

## 오염 토양 정화공정에 의한 토양의 특성 변화 및 정화토의 회복기술

이상우 · 이우춘 · 이상훈 · 김순오\*

경상대학교 자연과학대학 지질학과 및 기초과학연구소(RINS)

### Changes of Soil Properties through the Remediation Processes and Techniques for the Restoration of Remediated Soils

Sang-Woo Lee, Woo-Chun Lee, Sang-Hun Lee and Soon-Oh Kim\*

*Department of Geology and Research Institute of Natural Science (RINS), Gyeongsang National University  
(Received: 10 August 2020 / Revised: 24 August 2020 / Accepted: 25 August 2020)*

There have been raised other environmental issues related to remediated soils piled up in numerous carry-out processing facilities because a considerable quantity of them have been produced every year, but most of them have not been relevantly reused or recycled. Thus, this article reports the trend of researches on the development of techniques to restore the quality of remediated soils to activate their reuse and recycling. Firstly, the tendency of change in soil properties through remediation processes was looked over, and then the degradation of soil quality was characterized according to the type of remediation processes. Besides, the direction of policy to promote the reuse and recycling of remediated soils was introduced, and finally, the future works needed were suggested. This article was prepared based on the results of the survey of domestic and foreign literature. A number of literature were reviewed to scrutinize the change of soil properties due to remediation processes and diverse techniques for the amendment and restoration of remediated soils. Furthermore, the policies related to the reuse and recycling of remediated soils were arranged with the reference of the first and second versions of the Soil Conservation Master Plan of Korea. The literature survey focused on three kinds of remediation technologies, such as land farming, soil washing, and thermal desorption, which were most frequently used so far in Korea. The results indicate that the tendency of change in soil properties was significantly different depending on the type of remediation processes applied, and the degradation characteristics of soil quality were also totally different between them. The soil amendment and restoration can be categorized as three techniques depending on the type of substances used, such as inorganic, organic, and biological ones. Diverse individual materials have been used, and the soil properties improved or enhanced were dependent on the type of specific materials utilized. However, few studies on the restoration of soil qualities degraded during the remediation processes have not been carried out so far. The second Soil Conservation Master Plan states the quality certification and target management system of remediated soils, and it is expected that their reuse and recycling will be facilitated hereafter. With the consideration of the type of remediation processes implemented and public utility, the restoration technologies of remediated soils should be developed for the vitalization of their reuse and recycling. Besides, practical and specific measures should be taken to support the policy specified in the second Soil Conservation Master Plan and to promote reuse/recycling of remediated soils.

**Key words** : contaminated soils, remediation processes, change of soil properties, restoration techniques, soil quality

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.

\*Corresponding author: sokim@gnu.ac.kr

매년 다량 발생되고 있는 정화토가 적절하게 재이용 또는 재활용되지 못하고 반출 처리장에 적치되어 또 다른 환경적 이슈가 되고 있다. 이에 본 논문에서는 이러한 정화토의 재이용 및 재활용을 활성화하기 위하여 필요한 정화토의 토양 질 회복 기술에 대한 연구 및 개발 동향을 조사하였다. 이를 위해 먼저 정화기술별 토양 특성의 변화 양상을 살펴보고, 정화공정에 따른 토양 질의 열화 특성을 파악하였다. 뿐만 아니라 정화토 재이용 및 재활용을 위한 정책적 관련 사항들을 정리하고, 향후 필요한 연구들에 대하여 제안하였다. 본 논문은 국내외 관련 문헌들을 검색하여 작성하였다. 키워드 검색을 통하여 정화기술별 토양 특성의 변화와 토양 개량 및 회복 기술과 연관된 문헌을 조사하였으며, 본문에서는 주로 최근에 발표된 문헌들을 바탕으로 논의하였다. 뿐만 아니라, 제 1, 2차 토양보전기본계획을 참고하여 정화토 재이용 및 재활용과 관련된 정책적 사항들을 정리하였다. 현재까지 국내에서 가장 많이 적용된 토양 경작, 토양세척, 열탈착 등을 대상으로 정화공정에 따른 토양의 특성 변화를 정리한 결과, 적용하는 정화기술에 따라서 매우 상이하게 나타나는 것으로 조사되었다. 특히 정화공정을 거치면서 토양 질이 열화되는 양상이 정화기술에 따라서 다르게 나타났다. 토양 개량 및 회복 기술은 크게 무기 개량제, 유기 개량제, 생물학적 개량제 등의 체제를 이용한 방법들로 구분할 수 있으며, 각 개량제에는 다양한 물질들이 활용되고 있고, 각 물질에 따라 개선 또는 향상되는 토양의 특성이 달랐다. 하지만, 각 정화기술별 열화되는 토양 질 회복을 위한 연구들은 현재까지 활발하게 수행되지 않은 것으로 조사되었다. 제 2차 토양보전기본계획에서는 정화토의 품질인증제, 목표관리제 등과 같은 정책적 방안이 명시되어 있음으로써 향후 정화토의 재이용 및 재활용이 촉진될 수 있을 것으로 예상된다. 정화토의 재이용 및 재활용을 위해서는 적용된 정화기술과 미래 용도를 고려한 공공활용성을 확보한 회복 기술들이 개발되어야 할 것으로 판단된다. 이와 더불어 제 2차 토양보전기본계획에서 제시한 정화토의 적극적 활용을 위해서는 이를 뒷받침할 수 있는 구체적이고 세부적인 정책 추진 방안이 마련되어야 할 것이다.

**주요어** : 오염 토양, 정화공정, 토양 특성 변화, 회복기술, 토양 질

## 1. 서 론

토양의 환경 생태학적 주요한 기능은 양분공급, 자원순환, 작물생산, 탄소저장, 수자원 함량, 생물 다양성 유지 등이 있다. 이렇게 자연 생태계 및 환경에서 다양한 역할을 수행하고 있는 토양을 인간이 잘못 이용함으로써 오염시키고 있으며, 이를 정화하고 토양 생태계를 복원하는 데 많은 노력과 비용이 소요되고 있다. 현재까지 알려진 토양오염물질은 약 346가지며, 이러한 오염물질의 특성에 따라 휘발성 오염물질, 준휘발성 오염물질, 유류 오염물질, 무기 오염물질, 방사성 오염물질, 폭발성 오염물질 등으로 구분할 수 있다(Yun, 2010). 이러한 물질로 오염된 토양을 정화하기 위하여 물리·화학적, 열적, 생물학적 기술들이 이용되고 있다(Lim *et al.*, 2016a). 특히 토양 내 오염물질을 제거하거나 독성을 저감하기 위하여 부지 특이성을 반영한 정화기술들을 적용하여 위해성을 줄일 수 있지만 그러한 정화 과정을 통하여 토양의 질은 열화될 수 있다(Guo *et al.*, 2016; Jelusic and Lestan, 2014; Jez and Lestan, 2016). 따라서 정화된 토양을 재이용하거나 재활용하기 위해서는 정화 과정에서 손상되는 토양의 질을 회복시키는 과정이 필요하다(Jelusic *et al.*, 2014; Kaurin *et al.*, 2018; Yoo *et al.*, 2018). 뿐만 아니라, 정화토의 재이용 및 재활용을 위해서는 정책

적 지원이 적극적으로 뒷받침되어야 한다.

국내 오염 토양은 부지 내 정화가 원칙이지만, 부지 협소로 불가피할 경우 제한적으로 ‘반입정화시설’로 반출하여 정화가 가능하다. 이러한 법령이 2005년에 도입된 후 5,058톤에서 2016년에는 575,814톤으로 10년간 반입되는 토양량이 기하급수적으로 증가되고 있다(Ministry of Environment, 2020). 또한 오염 물질이 제거된 정화토는 오염기준을 만족함에도 불구하고 오염토라는 선입견 때문에 재활용되지 않고 방치되거나 매립되어 처리되고 있는 실정이다. 그러므로 반입 정화 시설과 관련된 환경문제가 지속적으로 제기되고 있고 이를 관리할 수 있는 대책이나 기준의 마련과 더불어 체계화된 제도가 요구되고 있는 상황이다. 현재 정부에서는 반출 오염 토양 전산 관리시스템을 통해 정화토의 사용자가 정화토의 사용 용도, 사용 내역 및 사용량 등에 대한 내용을 제공하도록 규제하고 있지만 정화토를 재활용하는 데 있어 법적 규정이나 관련 지침이 미비한 실정이다. 이러한 현재 상황을 해결하기 위해 정부에서는 제2차 토양보전 기본계획에서 반출정화의 기준강화 및 정화토의 재활용이 필요하다는 주요 의견을 수렴하여 시설 정화기준의 강화(1지역)와 정화토의 재활용을 촉진할 수 있는 방안을 제시하고자 계획을 수립하였다.

2018년 기준으로 국내 토양 정화업체는 74개가 등

록되어 있으며, 이 중 20개 업체에서 오염 토양 반입 처리장을 보유하고 있으며 이러한 처리장들은 전국각지에 소재하고 있다(Ministry of Environment, 2020). 국내 반입처리장 내 정화공정시설은 토양 경작, 토양 세척, 동전기법, 열탈착, 화학적 산화, 바이오파일 순으로 보유하고 있다. 그리고 2017년 기준으로 국내에 적용하고 있는 주요 정화기술은 토양세척법(토양세정 포함 2,294,032톤), 토양경작법(595,166톤), 화학적 산화법(269,702톤), 열탈착법(206,968톤) 등 순으로 이용되고 있다(KEITI, 2019). 이러한 정화기술로 처리된 정화토에 대하여 2010년에서 2014년 동안 재활용된 용도와 부지의 현황을 각각 Fig. 1(a)와 (b)에 나타내었다. 정화토의 주요한 재활용 용도로는 매립용 성토나 성토용 골재로서 전체 정화토 재활용의 95% 이상을 차지하고 있으며, 정화토의 재활용 사용 부지는 대부분(86% 이상) 공장용지 및 임야 등으로 국한되어 활용되고 있는 실정이다(Hwang *et al.*, 2014).

최근 환경 분야의 전문가들은 “토양 열화 및 복원에 관한 새로운 연구”라는 주제로 *Journal of Environmental Management* (virtual special issue)에 다수의 논문을 발표하였다(Anastopoulos *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2019; López-Periago *et al.*, 2000; 2002; Núñez-Delgado *et al.*, 1997; 2002; Pousada-Ferradás *et al.*, 2012; Rivas-Pérez *et al.*, 2016; 2019; Shaaban *et al.*, 2019). 여기서는 황폐화된 토양, 매립지 및 광산지역의 열화된 토양의 질을 향상시키는 연구가 환경적 위험을 예방할 뿐만 아니라 관련된 문제를 해결할 수 있는 중요한 노력임을 강조하고 있다. 따라서 정화토의 활용도를 증가시키기 위한 회복기술의 연구가 필요할 것으로 보인다. 현재까지 이에 관련된 연구들이 많이 진행되고 있지만, 대부분의 연구들이 정화토를 대상으로 하지 않고 오염 토양의 정화기법이나 불량한 토양의 질을 향상시키는 연구를 중점으로 진행되어 왔

다. 따라서 본 연구는 정화토의 재이용 및 재활용을 증대시키기 위한 목적으로 현재까지 진행된 관련 연구들을 정리함으로써 연구 동향을 파악하고자 수행되었다.

본 논문에서는 오염토의 정화공정에 따른 토양 특성의 변화를 조사함으로써 정화 과정을 거치면서 열화되는 토양 특성을 파악하고, 이렇게 열화된 특성을 회복시키기 위하여 현재까지 연구 개발된 기술들을 조사하였다. 뿐만 아니라 정화토의 재이용 및 재활용을 증진시키기 위하여 마련되고 있는 정책적 사항들을 정리하고 향후 필요한 연구들에 대하여 제안하였다.

## 2. 정화기술의 종류에 따른 정화토의 토양 특성 변화

지난 수십 년간 동안 유류 및 중금속으로 오염된 토양의 정화를 위해 물리·화학적 및 생물학적 기술이 연구되어 왔으며, 이를 이용한 오염 토양의 정화가 수행되어 왔다. 그러나 토양 내 오염물질의 제거를 위해 이용되는 물리·화학적, 열적, 생물학적 기작들은 토양 내 오염물질의 제거뿐만 아니라 토양이 갖고 있는 고유한 특성에도 영향을 주어 다양한 용도로 이용되는 토양의 기능을 저하시킬 수 있다(Cébron *et al.*, 2009). 지금까지 국내·외에서 토양정화기술과 관련하여 수행된 대부분의 연구들은 대상 오염물질의 제거효율에 대한 평가나 효율 증진을 위한 처리공정 개선에 관한 연구가 주로 수행됐으며, 정화 과정에 따른 토양 특성 변화나 기능의 변화(열화) 등에 관한 관심이 부족한 상황이다. 따라서 기존 연구에 대한 검토를 통해 정화처리 전·후에 대한 토양의 물리·화학적 특성에 변화에 대한 기존 연구의 조사를 통해 재활용 용도에 적합한 토양 개량제의 활용에 기초 정보를 제공해 보고자 하였다. 토양의 고유한 기능들을 잘 발휘하기 위해서는 토성(soil texture), 토양 수분 보유능(water holding capacity,

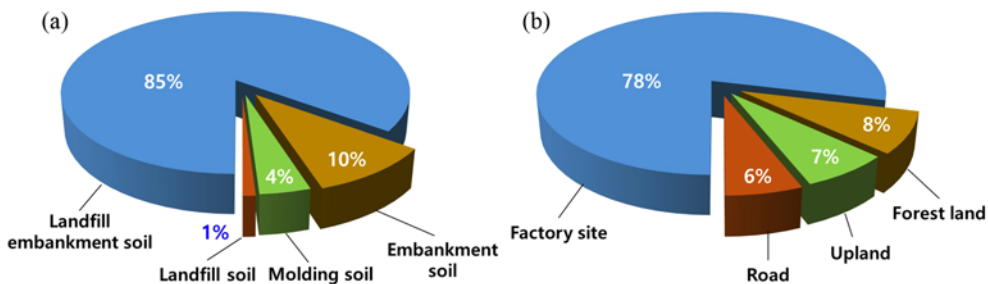


Fig. 1. Status of recycling of remediated soils from 2010 to 2014. Recycling purpose (a) and site (b) of remediated soils.

WHC), pH, 전기전도도(electrical conductivity, EC), Na, K, Ca, Mg 등의 치환성 양이온(exchangeable cation), 양이온교환능력(cation exchangeable capacity, CEC), 유기물함량(soil organic matter, SOM), 그리고 토양효소 활성도(soil enzyme activity) 등의 토양 특성이 우선적으로 적합해야 한다.

먼저, 토성은 토양의 특성을 결정하는 가장 기본 인자로서 투수성, 보수성, 통기성, 양분보유능력 등에 영향을 줄 수 있으며(Kim *et al.*, 2008), 토양 수분 보유능(WHC)은 식물이 이용할 수 있는 유효수분에 영향을 주어 식물의 생산성에 영향을 줄 수 있다(Karhu *et al.*, 2011). 토양 pH는 토양의 물리적, 화학적, 생물학적인 모든 특성에 영향을 미치며, 특히 미생물 활동에 영향을 줄 수 있는 것으로 알려져 있다(Marin *et al.*, 2005). 토양의 화학적 특성 중 전기전도도(EC)는 토양수 중 전해질 이온의 세기를 나타내는 척도로서, 일반적으로 0-2 dS/m에서는 작물 생육에 염류 영향이 낮은 것으로 알려져 있다(Choi *et al.*, 2009). 치환성 양이온은 토양의 물리·화학적 특성을 변화시킬 수 있으며, 농업 활동과 관련되어 작물에 필요한 영양소 공급과 토양 내에 존재하는 미생물의 활성 및 여러 가지 토양반응에도 영향을 줄 수 있는 것으로 보고되고 있다(Kim *et al.*, 2008). 마지막으로 토양 효소는 생태계 기능을 조절하고 특히 영양물질의 순환에 있어서 중요한 역할을 한다(Makoi and Ndakidemi, 2008). 따라서 토양효소 활성도 측정은 토양비옥도를 반영할 뿐만 아니라, 중금속 독성에 민감하게 반응하기 때문에(Welp, 1999), 토양 질의 중요한 생물지표로 이용될 수 있다(Paul and Clark, 1989). 앞에서 언급하였듯이, 현재까지 우리나라에서 가장 많이 적용된 대표적인 오염 토양 정화기술은 토양경작, 토양세척, 열탈착이다. 따라서 지금부터는 이러한 세 가지 정화기술 적용에 따른 토양 특성의 변화를 중심으로 논하고자 한다.

## 2.1. 토양경작법에 의한 토양 특성 변화

최근 농업 및 산업 활동이 급격하게 이루어지면서 유해한 오염물질에 의한 토양오염이 증가하고 있으며(Othman *et al.*, 2011), 이 때 발생하는 주된 오염물질은 유류와 중금속으로 알려져 있다(Jung *et al.*, 2009). 이 중 주유소, 군부대 등의 유류저장시설 노후화에 의한 누출 및 부적절한 유류 관리로 인하여 토양 및 지하수가 오염됨으로써 그로 인한 피해가 지속적으로 발생되고 있다(Hong *et al.*, 2011). 토양경작법(land farming)은 저렴한 처리 비용, 낮은 에너지 소비 및 소량의 부산물 발생하는 장점이 있어(Besalatpour *et al.*, 2011; Jeong, 2019; Lukić *et al.*, 2017), 주로 다양한 농도의 석유계 탄화수소로 오염된 토양을 정화하기 위해 널리 사용되는 기술이다(Chaudhary and Kim, 2019; Jho *et al.*, 2014; Yu *et al.*, 2014). 현재까지 토양경작법은 저농도의 유기물질로 오염된 토양을 정화하는데 주로 이용되어 왔다. 이러한 토양경작법을 이용하여 오염 토양을 처리할 때 발생할 수 있는 토양 특성 변화와 관련된 자료를 수집하여 Tables 1과 2에 정리하였다. Table 1에는 토양경작법 적용과 관련된 대상오염물질, 오염물질의 농도, 반응 기간, 영양분 투입 여부, 그리고 오염물질 제거효율 등과 같은 사항들이 함께 제시되어 있으며, 이와 더불어 Table 2에 토양경작 처리 전·후에 대한 토양 특성을 나타내는 인자의 변화를 나타내었다.

Table 2에서 보는 바와 같이 토양경작법 처리 시 정화 전·후 토양의 특성 중 토성의 변화는 크지 않은 것으로 알려져 있다. Yi *et al.* (2012)의 유류오염토양의 토양경작법에 의한 처리 후 전체적인 입경분포 측정 결과에서 모래(sand, 0.02~2.0 mm), 미사(silt, 0.002~0.02 mm), 점토(clay, 0.002 mm)의 함량 변화는 크지 않아 처리 전의 사양토의 토성이 그대로 유지되었다. Yi *et al.* (2016)의 연구에서도 토성의 변화는 모래의 비중이 38.2%에서 33.8%로 감소되고 점토질은 43.0%에서 44.0%로 다소 증가하였으나 전체적으로 크

**Table 1.** The conditions of land farming processes

TPH Conc. (mg/kg)	Duration (days)	Microbe inoculation	Nutrient	Condition of dump	Removal efficiency	Reference
1000~3,000	90	O	O	0.9~1.2 m	95~98%	Yi <i>et al.</i> (2012)
above 3,000	90	O	O	0.9~1.2 m	above 87.3%	Yi <i>et al.</i> (2016)
50,000~60,000	90	X	O	0.2 m	14~16%	Adams and Guzmán-Osorio (2008)
2,449	84	X	O		85.1%	Lee (2011)
4100	175	O	O	batch test	37%	Wang <i>et al.</i> (2016)

**Table 2.** The comparison of physicochemical and biological factors before and after land farming processes given in Table 1

Soil texture	WHC	pH	EC	Exchangeable cation					SOM	CEC	Av. P	TN	DHA <sup>1)</sup>	Beta-G <sup>2)</sup>	ACP <sup>3)</sup>	ARY <sup>4)</sup>	Reference
				Na	K	Ca	Mg	Al									
•	•	•	▼		▼	△	▼										Yi <i>et al.</i> (2012)
•	•	△	▼	▼	▼	▼	▼	•	△	•	▼	▼	•	△	▼	△	Yi <i>et al.</i> (2016)
		▼	△				△	▼									Adams and Guzmán-Osorio (2008)
												△					Lee (2011)
		•	△														Wang <i>et al.</i> (2016)

1) Dehydrogenase, 2) β-glucosidase, 3) acid phosphatas, 4) arysulphatase, △: Increased, ▼: Decreased, •: Not changed

게 변화하지 않음을 보였다. 이는 토양경작법의 경우 유효미생물의 활성도 증가를 통한 유기오염물질의 분해를 목적으로 하는 처리법으로 토성과 같은 토양의 물리적 특성의 변화에는 영향을 미치지 않기 때문일 것이다.

토성과 관련이 깊은 수분보유능(WHC)의 변화와 관련된 연구에서 토양경작에 의한 변화가 보이지 않았으며(Yi *et al.*, 2012), 유류오염토양의 처리를 위한 토양경작 처리를 수행한 Yi *et al.* (2016)의 연구에서도 처리 전 81.6%에서 처리 후 80.0%로 거의 변화가 없는 것으로 나타났다.

미생물을 이용하는 토양경작의 경우에 토양 pH는 매우 중요한 인자로 이는 토양 pH는 미생물 활동에도 영향을 주기 때문에 pH가 높아질 경우 미생물 군집의 탄화수소 이용성에 부정적인 영향을 줄 수 있기 때문이다(Marin *et al.*, 2005). 토양경작 전·후의 토양 pH는 Yi *et al.* (2012)에서 토양경작 이후 토양 pH의 변화는 거의 없었으며, Yi *et al.* (2016)의 연구에서는 4.38에서 4.73으로 다소 증가하는 것으로 나타났다. Adams and Guzmán-Osorio (2008)에 의한 연구에 따르면 TPH로 오염된 퇴적물의 토양경작 처리 시 초기 pH는 7.5~8.0의 범위를 보였으나 실험 기간 30일 후에는 pH 8.1~8.2의 값을 보였으며, 최종적으로는 90일 후에는 7.0~7.8이 pH 범위를 나타내었다. 30일 경의 pH 증가는 질소의 함량을 유지하기 위해 비료를 무기 양분으로 공급했기 때문인 것으로 보고하고 있다. Wang *et al.* (2016a)에 의한 토양경작과 관련한 실험실 내 소규모 실험(batch test) 결과에서는 초기 7.1에서 최종적으로 7.0의 pH를 나타내 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 토양의 완충 능력에 의하여 토양 pH가 급격하게 변화되는 것을 막아주기 때문이며, 미생물에 의한 유기물의 호기성 생분해 과정에서 이산화탄소가 생성되어 카르복시산(carboxylic acid, -COOH)

의 형성으로 인해 미미한 pH 감소될 수 있음을 제시하였다.

토양경작 처리 전·후의 EC는 6.281 dS/m에서 2.062 dS/m로 크게 감소하는 결과를 보였으며(Yi *et al.*, 2012), 유사한 연구인 Yi *et al.* (2016)에서는 5.18 dS/m에서 3.67 dS/m로 감소하는 값을 보였다. 반면, Wang *et al.* (2016)에 의한 연구에서는 초기 토양의 전기전도도(EC)는 0.1~0.3 mS/cm이었으나 175일 후 EC가 3.5~3.9 mS/cm로 증가하는 경향을 보였는데 이는 토양 내 미생물 활성을 위한 영양분의 공급에 따른 것으로 보고되었다. Kristensen *et al.* (2010)에 따르면 일반 토양의 EC 값은 약 0.1~0.3 mS/cm이며, 영양분을 첨가한 후 EC는 4 mS/cm까지 증가할 수 있다고 보고되었으며, 이는 앞선 결과와 일치한다.

작물과 토양미생물에 필요한 물질인 치환성 양이온 중 K, Mg는 각각 43.6%와 14.3% 감소, Ca은 44.4% 증가함을 보였으며, 이는 정화 후 미생물에 의하여 지속적으로 이용되었기 때문으로 보고되었다(Yi *et al.*, 2012). 그러나 Yi *et al.* (2016)에서는 토양경작의 경우 치환성 K, Ca, Mg이 각각 처리 전에 비해서 70.0%, 65.9%, 63.7% 감소하였으며 치환성 Na은 이보다 작은 44.2% 감소하는 경향을 보여 Ca의 경우 선행된 연구와 다른 결과를 나타내었다.

토양 경작에 의한 SOM 변화를 알아보기 위해 토양경작 처리 전·후의 토양에 대한 강열감량(loss of ignition, LOI)을 측정된 결과, 처리 전에는 2.12%에서 처리 후 2.38%로 변화가 크지 않았다(Yi *et al.*, 2012). 양이온교환능(cation exchange capacity, CEC)도 토양경작 토양에서는 각각 3.153 cmol/kg에서 2.860 cmol/kg로 다소 감소하나 큰 변화는 없었다(Yi *et al.*, 2012).

총질소와 유효인산은 초기의 함량에 비해 각각 57.6%와 69.2% 감소하는 것으로 나타나 함량 변화가 큰 것으로 나타났으며(Yi *et al.*, 2012), 이는 토양경작

시 유기오염물질에 관여하는 미생물에 의한 영양물질의 소모가 지속적으로 진행되기 때문으로 보인다.

오염정화 전·후의 토양에 대한 dehydrogenase,  $\beta$ -glucosidase, protease, acid phosphatase, arylsulphatase 등과 같은 토양 내 미생물 효소 활성도의 변화에 대한 Yi *et al.* (2016)의 연구결과에 따르면 처리 전·후의 토양에 대한 dehydrogenase는  $6.1 \mu\text{g TPF/g-soil/day}$ 으로 변화가 없으며,  $\beta$ -glucosidase는  $56.6 \mu\text{g PNP/g-dry soil/h}$ 에서  $98.2 \mu\text{g PNP/g-dry soil/h}$ 로 증가하였다. 토양 효소 중에 dehydrogenase은 산화-환원에 관여하는 탈수소효소로 기질에서 수소를 제거하는 역할을 수행하는 효소로서 토양 내 미생물의 활성을 간접적으로 나타낼 수 있는 지표로 활용되고 있다(Oh, 2004). 처리 전·후의 토양에 대한 protease의 변화는  $9.9 \text{ PNP/g-soil/2h}$ 에서  $13.7 \text{ PNP/g-soil/2h}$ 로 증가하였으며, acid phosphatase는  $343.3 \mu\text{g/g-soil/h}$ 에서  $287.3 \mu\text{g/g-soil/h}$ 으로 감소하였다. Arylsulphatase는  $16.8 \mu\text{g/g-soil/h}$ 에서 토양경작 이후  $20.6 \mu\text{g/g-soil/h}$ 으로 다소 증가한 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 토양경작 이후 미생물활성도가 증가한 것이며, 이는 공정 이후 영양물질의 순환에 긍정적인 영향을 줄 수 있는 것으로 판단하였다(Yi *et al.*, 2016). 또한 토양경작 처리 전·후의 효소 변화에 관한 연구(Lee, 2011)에 의하면 dehydrogenase은 낮은 활성의 증감이 반복되는 양태를 보였으며 토양경작처리 후 11주가 경과한 후에 최고값인  $26.78 \mu\text{g TPF/g-soil}$ 로 나타나 토양경작 처리 후 토양 내 미생물의 활성도가 증가하는 유사한 결과를 보였다.

## 2.2. 토양세척법에 의한 토양 특성 변화

중금속으로 오염된 부지의 정화를 위해 토양세척법이 주로 적용되어온 것으로 보고되고 있으며, 주로 산

세척법이 사용되어지고 있다(Kim and Lee, 2012; Rosas *et al.*, 2013; Villa *et al.*, 2010). 최근에는 국내 중금속 오염 토양의 굴착 후 세척공정에서  $\text{FeCl}_3$  세척액이 점차적으로 많이 사용되고 있다.  $\text{FeCl}_3$ 은 기존에 많이 사용되어온 염산 등과 같은 세척액에 비해 높은 산성도와 낮은 규소(Si) 탈리율을 가지므로 점토 광물의 파괴를 낮추고 중금속의 세척 효과를 높이는 장점이 있다(Makino, 2014; Moon *et al.*, 2016). 또한 최근에는 고농도의 TPH로 오염된 토양의 경우 계면활성제를 이용한 세척법의 활용도 보고되고 있다(Abayneh and Quanyuan, 2018; Heo and Lee, 2015; Lee *et al.*, 2002). 오염 토양의 정화를 위한 토양세척법을 적용한 연구에 대하여 대상오염물질, 세척액의 종류, 용액비, 처리효율 등을 Table 3에 정리하였으며, 토양세척 처리에 따른 토양의 특성 변화를 Table 4에 나타내었다.

토양세척법을 이용한 오염 토양의 처리 전·후에 대한 토양 특성의 변화와 관련된 기존 연구결과를 정리해 보았다. 먼저, Yi and Sung (2015)의 연구인 Pb로 오염된 토양을 물을 이용하여 세척공법을 이용한 실험에서는 2 mm 이하 토양의 토성의 경우 토양세척에서는 점토 함량 감소로 인하여 정화 전 토성인 sandy clay loam이 정화 후 sandy loam로 변화되었으며, 또한 Zn 오염 토양에 대한 산세척액을 이용한 경우에서도 중금속 오염 토양의 세척처리 후 0.02~2.0 mm의 모래 비중이 크게 증가하였고 0.002 mm 이하의 점토 질이 감소하여 처리전 clay loam에서 세척 처리 후 loamy sand로 변화하는 것으로 나타났다. 토양세척법은 미세입자를 선별하는 입자선별과정과 세척액을 활용하여 토양으로부터 오염물을 분리하는 세척과정, 폐 세척액을 처리하는 후처리 과정으로 구분된다(Evanko and Dzombak, 1997). Yi and Sung (2015)에 의하면

Table 3. The conditions of soil washing processes

Contaminant	Concentration (mg/kg)		Washing solution	Solution/soil ratio	Removal efficiency (%)	Reference	
Pb	650		water	1 : 2	90.5	Yi and Sung (2015)	
Zn	413.45		HCl(35%)	1 : 2	61.2		
Pb	264		0.3 M $\text{FeCl}_3$	1 : 2	49	Koh <i>et al.</i> (2017)	
			0.3 M HCl		37		
			1 M HCl		61		
As	97		0.5 M $\text{H}_3\text{PO}_4$	1 : 5	40	Im <i>et al.</i> (2015)	
			2% Na dithionite in 0.01 M HCl		52		
Cd	mine	Farmland	EDTA	1 : 5	mine	Farmland	
	15.4	36.2			62	93	
Pb	1,293	268			56	71	Wang <i>et al.</i> (2018)
Zn	2,278	1082			32	62	

**Table 4.** The comparison of physicochemical and biological factors before and after soil washing processes given in Table 3

Soil texture	WHC	pH	EC	Exchangeable cation				SOM	CEC	Av. P	TN	DHA <sup>1)</sup>	Beta-G <sup>2)</sup>	ACP <sup>3)</sup>	ARY <sup>4)</sup>	Reference
				Na	K	Ca	Mg									
Sand △																
Silt △		•	▼									•	▼	▼	▼	Water
Clay ▼	▼			▼	▼	▼	▼		△	▼						Yi and Sung (2015)
Sand △																
Silt ▼		▼	△									▼	△	▼	▼	Diluted HCl
Clay ▼																
Sand △																
Silt ▼	▼	▼	△	▼	▼	▼	▼		△	▼	▼	▼	△	▼	▼	Yi et al. (2016)
Clay ▼		▼		▼	▼	▼	▼		•	•						Koh et al. (2017)
		▼		▼	▼	▼	▼		▼	▼						Zhai et al. (2018)
																HCl(1 M)
		▼							•	•	△	▼		▼		H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (0.5 M)
																Dithionite in 0.01 M HCl
																Im et al. (2015)
																Wang et al. (2018)

1) Dehydrogenase, 2) β-glucosidase, 3) acid phosphatas, 4) arysulphatase, △: Increased, ▼: Decreased, •: Not changed

처리된 오염토양의 입경분포는 토양세척의 경우 4 mm 이상의 대부분의 자갈과 0.002 mm 미만의 점토가 일부 제거된 것으로 나타났으며, 이는 3.0 mm 이상의 자갈선별 공정과 0.075 mm 이하의 점토 제거 공정에 의한 것으로 볼 수 있다.

수분보유능(WHC)은 Yi and Sung (2015)의 물과 35% HCl을 세척액으로 사용한 연구에서도 27.4%와 42.6%가 감소하는 결과를 보였다. 이는 세척 시 점토질의 제거로 인하여 토양 중 모래 함량의 증가하므로 용존 물질을 함유한 토양수가 하향으로의 이동이 용이하기 때문인 것으로 판단된다(Slater and Lesmes, 2002). 즉, 점토 함량의 감소는 토양의 물과 양분의 보유능을 감소시키게 되기 때문이다.

토양 내 화학반응에 영향을 미치는 주요 인자인 pH의 경우 물을 이용한 토양세척 처리 전·후에서 pH는 큰 차이를 보이지 않았으며, 산(HCl)을 이용한 토양세척의 경우 초기 6.71에서 처리 후 4.77로 크게 감소하는 것으로 나타났다(Yi and Sung, 2015). Koh (2017)에 의한 연구에서는 FeCl<sub>3</sub>를 이용하여 pH는 4.8에서 2.6으로 감소하는 경향을 보였으며, Zhai et al. (2018)에서도 FeCl<sub>3</sub>를 이용한 토양 세척 전·후의 pH는 5.24에서 3.69로 산성화되는 것으로 나타났다. Im et al. (2015)의 토양세척 관련 연구에서는 1 M HCl, 0.5 M H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, Na dithionite과 0.01 M HCl을 세척액을 이용한 경우 초기 pH 6.1에서 각각 2.8, 4.0, 4.9로 크게 감소하는 경향을 보였다. 다양한 연구에서 보인 바

와 같이 토양세척 시 세척용액의 종류에 따라 토양의 pH는 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

전기전도도(EC)는 작물 생육에 영향을 크게 미치는 인자로 Yi and Sung (2015)에 의하면 물을 세척용액으로 사용한 경우 EC는 토양세척 후 0.596 dS/m에서 0.491 dS/m으로 변화가 크지 않았지만 다소 감소하는 경향을 보였으나, 산세척(HCl)이 수행된 경우에는 0.40 dS/m에서 4.98 dS/m로 크게 증가하는 경향으로 역시 토양세척시 사용되는 세척액에 의해 다른 경향을 보일 수 있는 것으로 보인다.

토양세척 후 토양을 알칼리성으로 만들려는 경향을 가지는 교환성 염기(Ca, Mg, K, Na) 중 K, Ca, Mg 함량이 각각 물 세척액을 이용한 경우 토양세척 처리 전에 비해서 31.8%, 9.8%, 20.4% 감소하는 경향을 보였으며, 산세척을 진행한 경우에는 각각 7.1%, 8.5%, 55.8% 감소하는 경향을 보임으로 세척처리 시 토양 내 치환성 양이온들 중 일부가 세척액에 의해 제거되는 것으로 나타났다(Yi and Sung, 2015). 또한 Koh et al. (2017)에서는 교환성 염기(Ca, Mg, K, Na)의 함량을 나타내는 지표인 염기포화도(BSP; base saturation percentage)가 세척 전 19.79%에서 세척 후 5%로 급격하게 감소하였으며, Ca, Mg, K의 농도가 세척 후 각각 67%, 78%, 25% 감소함을 보였다.

토양세척공정은 토양 내 존재하는 용존성 유기물과 입자성 유기물을 제거함으로써 토양 내 SOM을 감소시키는 것으로 알려져 있다(Ko et al., 2005). 토양세척

후 토양 내 SOM의 변화를 조사한 결과, 토양세척 후 토양 내 토양 유기물(SOM)은 물을 세척액으로 사용한 경우 3.84%에서 2.15%, 산용액(HCl)을 세척액으로 이용한 경우에는 토양세척 전 토양에 비해서 5.38%에서 3.81%로 감소하는 것으로 나타났으며(Yi and Sung, 2015), 이는 앞서 제시한 세척으로 인한 직접적인 유기물의 제거와 점토 질의 감소에 의한 것으로 판단된다. 반면 Im *et al.* (2015)의 1 M HCl, 0.5 M H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, Na dithionite과 0.01 M HCl을 세척액을 이용한 연구에서는 SOM은 토양세척 전·후의 토양에서 SOM이 평균적으로 21 g/kg으로 유사한 값을 보이는 것으로 보고되어 일반적인 결과와 차이를 나타냈다.

Yi *et al.* (2012)의 연구에서는 토양세척 공정을 통하여 토양의 양이온교환능력(CEC)는 4.693 cmol/kg에서 세척 후 3.813 cmol/kg으로서 크게 감소한 것으로 나타났으며, Zhai *et al.* (2018)의 연구에서도 FeCl<sub>3</sub>를 세척액으로 이용한 경우 26.4% 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 감소는 유기물함량의 감소와 토양입자에서 상대적으로 교환능력이 높은 점토질이 입도분리 과정에서의 감소했기 때문으로 보인다. 그러나 Im *et al.* (2015)의 연구에서는 SOM과 같이 다른 연구와 다른 결과를 보였다. 3가지 세척제를 이용한 토양세척 전·후의 토양의 CEC가 평균 17 cmol/kg으로 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 나타났다.

토양세척 후 토양의 총질소(TN)는 물을 세척액으로 사용한 경우 243.21 mg/kg에서 119.93 mg/kg으로 56% 감소한 반면에 유효인산 함유량은 59.92 mg/kg에서 103.28 mg/kg으로 오히려 72.4% 증가하였으며, 산세척액을 사용한 경우 총질소(T-N)는 89.50 mg/kg에서 54.92 mg/kg으로 38.6% 감소한 반면에 유효인산 함유량은 27.97 mg/kg에서 33.88 mg/kg으로 오히려 21.1% 증가한 결과를 보였다(Yi and Sung, 2015). Makino *et al.* (2007)은 카드뮴으로 오염된 논 토양을 CaCl<sub>2</sub>를 이용한 토양세척으로 정화한 후 총질소는 13.1% 감소한 반면, 유효인산은 75.6% 증가한 것으로 보고하여 유사한 경향을 보여주었으며, FeCl<sub>3</sub>를 이용한 토양세척에서는 유효태인산이 50.2% 감소한 것으로 나타났다(Makino *et al.*, 2008). 또한 Koh *et al.* (2017)에 의해 수행된 FeCl<sub>3</sub>를 이용한 연구에서는 총질소(TN)는 세척 전·후에서 큰 차이가 없으며, 유효인산의 경우에도 133 mg/kg에서 112 mg/kg으로 소량 감소하는 것으로 나타나 이용되는 세척액에 따라 유효인산의 변화는 다양하게 나타났다. Im *et al.* (2015)의 연구에서는 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>를 세척액으로 이용한 경우 2,800~2,900 mg/kg

으로 초기 43 mg/kg에 비하여 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 1 M HCl과 Na dithionite과 0.01 M HCl을 세척액으로 사용한 경우에도 43~71 mg/kg으로 다소 증가하는 경향을 보였다.

Yi and Sung (2015)의 연구에서 중금속 오염 토양 처리 전·후의 토양 미생물 효소 활성도 중 측정된 탈수소효소(DHA; dehydrogenase)는 물을 세척액으로 사용한 실험에서 처리 전·후 1.0 µg TPF/g-soil/d로 큰 변화가 없으며, 산세척액을 이용한 경우 초기 1.8 µg TPF/g-soil/d에서 0.4 µg TPF/g-soil/d로 정화처리 전과 후에서 감소하는 경향을 보였으며, Im *et al.* (2015)에서도 1 M HCl, 0.5 M H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, Na dithionite과 0.01 M HCl 등의 3가지 용출액에 대해 DHA 활성도는 초기 16 µg/g-soil에서 각각 9, 5, 11.5 µg/g-soil 정도로 감소하는 경향을 보였다. 이는 중금속 농도 감소로 독성 또한 감소하였으나 세척과정에서 토양 내 총 미생물 수도 함께 감소하였기 때문으로 보고 있다. β-glucosidase는 물과 산세척액을 이용한 경우 각각 정화 전·후에서 각각 14.2 µg/g-soil/h와 12.9 µg/g-soil/h, 9.8 µg/g-soil/h와 11.1 µg/g-soil/h로 차이가 없거나 크지 않았으나, Wang *et al.* (2018)의 EDTA세척액을 이용한 농경지 토양과 광산지역 토양을 이용한 연구에서는 각각 14.6 µg/g-soil/h에서 10.3 µg/g-soil/h, 51.11 µg/g-soil/h에서 25.6 µg/g-soil/h를 크게 감소한 것으로 나타났다. Acid phosphatase의 경우에 물 사용 시 토양세척 전에는 158.1 µg/g-soil/h에서 토양세척 이후 104.2 µg/g-soil/h, 그리고 산용액 처리 전에는 170.8 µg/g-soil/h에서 토양세척 이후 142.9 µg/g-soil/h로 감소하는 경향을 보였으며, Arysulphatase는 각각 10.6 µg/g-soil/h에서 7.8 µg/g-soil/h, 그리고 5.0 µg/g-soil/h에서 3.2 µg/g-soil/h로 역시 다소 감소하는 경향을 보이는 것으로 보고되었다(Yi *et al.*, 2016). Wang *et al.* (2018)이 수행한 연구에서도 농경지 토양에서는 52.2 µg/g-soil/h에서 28.8 µg/g-soil/h, 광산 토양에서는 89.4 µg/g-soil/h에서 23.3 µg/g-soil/h로 감소하는 결과를 보였다. 또한 1 M HCl, 0.5 M H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, Na dithionite과 0.01 M HCl 등의 3종의 세척액을 이용한 Im *et al.* (2015)의 연구에서는 acid phosphatase 활성도가 초기 약 100 µg/g-soil에서 각각 30, 35, 40정도로 감소하는 값을 보였다.

### 2.3. 열탈착법에 의한 토양 특성 변화

열탈착법은 휘발성 오염물질을 증기, 전자파, 열적외선 등을 이용하여 오염물질에 열을 가하고 이를 통해



**Table 5.** The conditions of thermal desorption processes

Contaminant	Contamination lever (mg/kg)	Operating temperature	Time (min)	Type of furnace	Removal efficiency	Reference
Petroleum	5,000	700°C (200°C in soil)	15	Rotary kiln	> 92%	Yi <i>et al.</i> (2012), Yi <i>et al.</i> (2016)
Hg	180~1,320	120~550	15~240	fixed bed reactor	36~100	Huang (2011)
PAH	1,846	500	-	mobile unit	94	Bonnard <i>et al.</i> (2010)
Hg		400, 700	60	Rotary kiln	7.1~99	Ma <i>et al.</i> (2014)

서 오염물질을 휘발시켜 처리하는 기술이다. 열탈착법은 처리 온도에 따라 고온 열탈착법(HTTD; High temperature thermal desorption, 320~560°C)와 저온 열탈착법(LTTD; Low temperature thermal desorption, 90~320°C)로 구분된다. 열탈착 정화 기술은 표토와 심토에 오염된 Petroleum hydrocarbon (PHCs), polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), polychlorinated bipheyls (PCBs), 살충제 등의 유기오염물질의 처리에 이용 되어질 수 있으며 무기오염물질인 수은의 처리에도 이용될 수 있다(O'Brien *et al.*, 2018). 열탈착 처리의 장점은 빠른 처리 속도로 할 수 있으며, 처리 된 토양을 최대한 빠르게 원토지로 되돌려 놓을 수 있다는 것이다. 그러나 단점으로는 열탈착 처리 시 토양 기능에 영향을 줄 수 있는 토양 특성을 변화시킬 수 있다는 것으로 본 논문에서는 열탈착 기술이 토양 특성 인자에 미치는 영향을 살펴보았다. 오염 토양의 정화를 위한 토양 열탈작 적용에 대한 대상 오염물질, 처리온도, 처리시간, 처리효율 등을 Table 5에 정리하였으며, 처리 시 변화되는 토양의 특성을

Table 6에 요약하였다.

열탈착 처리 전·후의 토성 변화와 관련된 연구 중 Yi *et al.* (2012)는 미사질(0.02~0.002 mm) 함량과 점토(0.002 mm 이하) 함량은 각각 1.6%에서 9.0%로, 3.3%에서 4.9%로 열탈착 처리 이후 다소 증가하고 처리 토양의 모래 함량 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 미사질함량 증가로 인하여 loamy sand에서 sandy loam으로 변화됨을 제시하였다. 또한 Yi *et al.* (2016)에 따르면 열탈착 이후 모래(0.02~2.0 mm) 함량이 36.7%에서 20.1%로 감소하였고, 미사(0.02~0.002 mm)는 18.2에서 43.7%로 증가하여 국제토양학회에 따른 토양 분류상으로 heavy clay에서 silty clay로 변화되는 것으로 나타났다. 이는 열탈착 공정 시 가열 방식인 로터리 킬른(rotary kiln)에 의한 회전교반 시 토양입자 파쇄에 의한 것으로 설명되고 있으나 타 연구에서는 이와는 상반된 연구 결과들이 제시되고 있다. 열적 처리 시 온도에 따른 토양의 특성 변화 연구에서는 토양 내 점토의 격자 구조는 고온의 처리 시 탈수와 구조 균열이 발생할 수 있으며 (Borchardt, 1989;

**Table 6.** The comparison of physicochemical and biological factors before and after thermal desorption processes given in Table 5

Soil texture	WHC	pH	EC	Exchangeable cation				SOM	CEC	Av. P	TN	DHA <sup>1)</sup>	Beta-G <sup>2)</sup>	ACP <sup>3)</sup>	ARY <sup>4)</sup>	Reference
				Na	K	Ca	Mg									
Sand △																Yi <i>et al.</i> (2012), Yi <i>et al.</i> (2013)
Silt △	△	△	▼	▼	▼	▼	▼	▼	△	•	△	•	•	▼		
Clay ▼																
Sand •																Huang (2011)
Silt •		△					▼									
Clay •																
Sand •																Bonnard (2010)
Silt •		△					▼									
Clay •																
Sand •																400°C Ma <i>et al.</i> (2014)
Clay •		△					▼	▼								
Sand △		△						•	▼							
Clay ▼																700°C

1) Dehydrogenase, 2) β-glucosidase, 3) acid phosphatas, 4) arylsulphatase, △: Increased, ▼: Decreased, •: Not changed

Dixon, 1989; Fanning *et al.*, 1989), 토양 내 비결정 질 점토 성분들은 SOM의 연소 시 생성되는 Fe와 Al 수산화물의 반응으로 입자 간 응집이 초래될 수 있다 (Ketterings *et al.*, 2000). 이는 일반적으로 550°C 이상의 처리공법 적용 시 모래의 함량이 증가하는 반면 점토의 함량이 감소하는 경향을 보일 수 있다는 연구가 있으나, O'Brien *et al.* (2018)에 따르면 400°C 이상에서 이와 같은 현상이 나타남을 확인하였다. 열처리하는 점토 구조 내 OH를 제거하여 점토광물의 결정 구조를 파괴하게 되며 (Sertsu and Sanchez, 1978). 이들은 모래의 입자로 상호 간의 응집이 진행될 수 있다 (Roh *et al.*, 2000). 이를 잘 뒷받침할 수 있는 연구로 Ma *et al.* (2014)에 따르면 400°C에서 열탈착 처리된 토양은 점토의 함량이 처리 전 토양과 큰 차이를 보이지 않았으나, 700°C에서 처리된 토양의 경우 점토의 함량은 크게 감소, 그리고 모래의 양이 크게 증가하는 결과를 나타내었다. 반면, Huang *et al.* (2011)의 Hg으로 오염된 토양에 대한 150~500°C에서 fixed bed reactor를 이용한 토양 열탈착 처리와 (Bonnard, 2010)의 PAH로 오염된 토양에 대한 500°C에서의 열탈착 처리 후의 토성은 처리 전 토양의 토성과 큰 차이를 나타내지 않았다. 이는 가열방식 및 열전달의 차이에 의하여 교질효과(cementing effect)가 진행되지 않은 것으로 열탈착공정의 운영에 따라 다른 결과가 도출될 수 있는 것으로 보인다.

식물이 이용할 수 있는 유효수분에 영향을 주는 토양의 수분보유능(WHC)는 Yi *et al.* (2012)에 따르면 열탈착 후 7.2% 증가하는 것으로 나타나 이는 토성 변화로 인하여 상대적으로 수분을 많이 보유할 수 있는 미세토양의 함량 변화에 의한 것이라 제시하였다, 그러나 유사한 연구인 Yi *et al.* (2016)에서는 이와 반대로 처리 전 83.4%에서 76.5%로 WHC가 다소 감소는 결과가 도출되었다.

열탈착 후 토양 pH는 Yi *et al.* (2012)에서 6.5에서 6.8로 다소 증가한 것으로 나타났으며, 이는 열탈착 공정 후 토양 pH의 증가를 관찰한 Huang *et al.* (2011)의 연구와 유사한 결과이다. 이는 열에 의해 산화된 유기물질이 염기성 이온을 방출하거나 (Terefe *et al.*, 2008), 유기산의 손실에 의한 것이라 주장하였다 (Certini, 2005). 그러나 Yi *et al.* (2016)의 연구에서는 토양 pH가 3.58에서 3.77로 5.3% 증가하는 상반된 결과를 보였다. 열적 처리 과정에서 토양의 pH는 열적 처리 공정의 온도와 반응 시간에 지체적으로 영향을 받는다. 토양의 정화를 위하여 저온 처리(250°C

이하)를 한 경우, 토양의 pH는 변화하지 않거나 또는 미미한 감소를 보일 수 있으며, 이는 토양의 가열로 인해 생성되는 CO<sub>2</sub>의 광물화로 생성되는 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 형성에 의한 것으로 볼 수 있다 (Badia and Marti, 2003; Ma *et al.*, 2014; Roh *et al.*, 2000; Sierra *et al.*, 2016). 반면 250°C 이상에서 토양 정화 처리가 진행되면 유기산의 분해(Pape *et al.*, 2015; Terefe *et al.*, 2008)와 토양 콜로이드 물질의 탈수 기작에 의하여 H<sup>+</sup>이 토양의 연소 시 생성된 알칼리 양이온과 치환되어짐으로 인하여 pH가 상승할 수 있다 (Badia and Marti, 2003; Sierra *et al.*, 2016; Terefe *et al.*, 2008). 이와 같은 결과는 Ma *et al.* (2014)에서도 400°C의 열탈착 처리 후 pH가 초기 5.2에서 6.5로 다소 증가하였으며, 700°C의 열탈착 처리 후 pH 9.8까지 상승하였다. Bonnard (2010)의 500°C에서 진행된 열탈착 실험에서도 역시 pH가 상승하는 결과를 보였으며, Huang *et al.* (2011)의 연구에서는 역시 7.0~9.0에서 9.1~10까지 증가하는 결과를 보였으며, 이는 400°C 이상의 열처리 시 ferrihydrit나 비결정질 철(prooerly crystalline Fe(III))이 탈수화된 hematite로 고결작용이 발생함에 기인한다고 보고되고 있다.

Yi *et al.* (2012)에 의하면 열탈착 처리 후 토양의 EC는 1.550 dS/m에서 0.871 dS/m로 감소한 것으로 보고되었다. 열탈착의 경우 처리 후 치환성 Na, K, Ca, Mg 등의 모든 항목에 대한 토양농도가 감소하였다. 특히 치환성 Ca의 경우 37.4%의 다소 크게 감소하였으며 그 외의 항목은 2.9-13.9% 감소하였다고 보고되었다 (Yi *et al.*, 2012). Yi *et al.* (2016)의 연구에서는 K, Mg의 함량은 열탈착 후 다소 감소하는 값을 보였으며, Ca의 경우 앞선 결과와 상반되게 처리 후 26.7% 증가하는 것으로 나타났다.

Yi *et al.* (2012)은 열탈착 공정을 통해 서는 유기물 함량이 5.26%에서 4.67% 감소하였다는 연구 결과를 제시하였다. Huang *et al.* (2011)의 Hg으로 오염된 토양에 대한 고정형 베드 반응기(fixed bed reactor)를 이용한 토양 처리 전후의 SOM의 함량은 0.06~0.11% 감소하는 것으로 보고되었다. O'Brien *et al.* (2018)에 따르면 오염 토양의 정화를 위한 열처리에서 토양으로 오염물질을 제거를 위한 온도는 일반적으로 SOM에 영향을 미치는 온도 이상이기 때문에 토양 내 SOM의 분해를 동반된다. SOM은 열분해 처리 시 다음의 3가지 메커니즘에 의해 감소될 수 있다: 1) 휘발(volatilization); 2) 탄화(charring); 3) 연소(combustion) (Certinini, 2005). 또한 이러한 SOM의 감소는 토양

내 SOM의 다양한 성분 구성과 이들의 상호작용에 의해 다르게 나타날 수 있다(Kiersch *et al.*, 2012). 또한 SOM의 전체 양을 감소시키는 것 외에도, 열탈착 처리시 가해지는 열에 의해 토양에 잔류하는 SOM을 고밀도의 방향족의 형태로 변형시킬 수 있다고 알려져 있다(Biache *et al.*, 2008; Gonzalez-Perez *et al.*, 2004; Kiersch *et al.*, 2012). 열적 처리시 SOM은 200°C 이상에서 손실을 발생시키며(García-Corona *et al.*, 2004; Pape *et al.*, 2015; Terefe *et al.*, 2008), 350°C에서 10분 처리 시 약 12%(Thomaz and Fachin, 2014), 350°C에서 60분 처리 시 거의 대부분의 SOM이 제거될 수 있다(Sierra *et al.*, 2016).

Yi *et al.* (2012)의 연구에 따르면 열탈착에 의한 처리 전후 토양의 CEC는 5.353 cmol/kg에서 3.960 cmol/kg으로 감소하였으며, 이와 같은 결과는 Ma *et al.* (2014)의 연구에서 유사한 결과를 제시하고 있다. 이는 연구에 의하면 토양 열처리에 의한 SOM, 점토 함량 및 토양 pH의 감소는 CEC를 감소시킬 수 있다고 보고되고 있다(Pape *et al.*, 2015; Roh *et al.*, 2000; Zihms *et al.*, 2013).

열탈착의 경우 TN는 4.3% 감소하여 큰 변화가 없었으나 유효인산은 56.2% 증가한 것으로 나타났으며(Yi *et al.*, 2012), Yi *et al.* (2016)의 연구에서도 유사하게 TN의 거의 변화가 나타나지 않았고 유효인산은 69.1% 증가하는 결과를 보였다. 열탈착 공정 후 총질소의 감소와 유효인산의 증가를 관찰한 Biache *et al.* (2008)의 연구와 유사한 결과이다. 이는 토양 내 존재하는 인의 존재 형태가 열탈착 공정을 통하여 이용 가능한 형태로 변화되었기 때문으로 판단된다. Glass *et al.* (2008)에 따르면 열처리에 따른 SOM의 연소는 휘발 기작에 의해 토양 내 질소의 손실을 초래할 수 있다(Giovannini *et al.*, 1990; Yi, 2016). 그러나 220°C 이하의 처리 시 토양 내 유기질소를 질산염과 암모늄 형태로 전환시킬 수 있으며, 총질소의 손실은 없다고 보고 되었다(Giovannini *et al.*, 1990; Glass *et al.*, 2008). 토양 내 인은 열에 매우 강하여 열적 처리에 의한 전체 토양의 질량감소가 있더라도 인의 손실은 일어나지 않을 수 있어, 토양의 부피 감소에 따른 인의 상대적 농도증가 현상이 나타날 수 있다(Galang *et al.*, 2010; Yi *et al.*, 2016).

Yi *et al.* (2016)에서 DHA는 열탈착 처리 전에는 3.7 µg TPF/g-soil/d에서 처리 후 5.4 µg TPF/g-soil/d로 증가하는 결과를 나타냈다. Yi *et al.* (2016)에서 β-glucosidase는 정화 전·후 각각 45.3과 44.6 µg

TPF/g-soil/d로 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 또한 Yi *et al.* (2016)에서 protease를 분석한 결과, 정화 전·후 각각 13.1 µg/g-soil/2h과 13.6 µg/g-soil/2h로 열탈착 처리에 의한 영향은 미미한 것으로 나타났다. 동일한 연구에서 열탈착 공정 전·후 토양 내 acid phosphatase를 측정된 결과, 187.1 µg/g-soil/h에서 157.1 µg/g-soil/h로 다소 감소한 것으로 나타났다. Arysulphatase는 탈착 공정 전·후 토양에서는 15.7 µg PNP/g-soil/h에서 17.2 µg PNP/g-soil/h으로 다소 증가하는 결과를 보였다. 종합적으로 열탈착 이후 acid phosphatase를 제외한 모든 항목에서 미생물 활성도가 유지 또는 증가하는 것으로 나타났으며, 따라서 열탈착 공정에 따른 토양의 양분 순환에는 문제가 없을 것으로 보인다.

### 3. 정화토의 토양 질 향상을 위한 개량 및 회복기술

지속적으로 토양오염이 확산됨에 따라 정화토의 발생량도 증가되고 있지만, 여전히 정화토의 재활용 용도는 다변화되고 있지 않고 대부분이 매립지 성토로만 이용되고 있다. 정화토의 질 향상 연구 동향의 파악을 위해 국내외 토양, 정화(soil + remediation)와 토양, 복원(soil + restoration)을 키워드로 1980년 이후 연구에 대해 검색하였다. 토양 정화는 환경학적 측면에서 토양 오염물질을 처리하기 위해 개량제 및 회복기술을 접목하기 때문에 주요 키워드를 설정하였고, 토양 복원은 농학적인 토양 질에 대한 개량 및 회복기술의 연구들이 이루어지고 있어 주요 키워드로 설정하였다. 그리고 토양 정화 및 토양 복원으로 검색한 결과에서 개량제에 대한 키워드(예 : 분뇨, 바이오 숯, 퇴비, 숯 및 석회석 등)를 조사하여 주요 키워드와 같이 검색하였으며, 검색한 결과를 무기질 개량제, 유기질 개량제, 생물 개량제 및 회복기술로 구분하였다.

토양 정화와 토양 복원의 키워드로 검색한 결과, 토양 복원과 관련된 연구는 1980년 이전부터 활발하게 진행되었지만 환경적인 문제들이 대두되고 이슈화되면서 1990년 이후 이에 관한 연구들이 급증하여 2019년까지 25,890개의 연구가 발표되었다. 생물학적 개량제 및 회복기술에 관한 연구는 무기질 및 유기질 개량제에 비해 많은 연구가 진행되었으며(Fig. 2), 이는 토양 질의 평가에서 대부분 식물을 이용한 검증이 이루어지기 때문으로 판단된다(Ros *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2015). 무기질 개량제에 대한 검색 결과, 토양 복

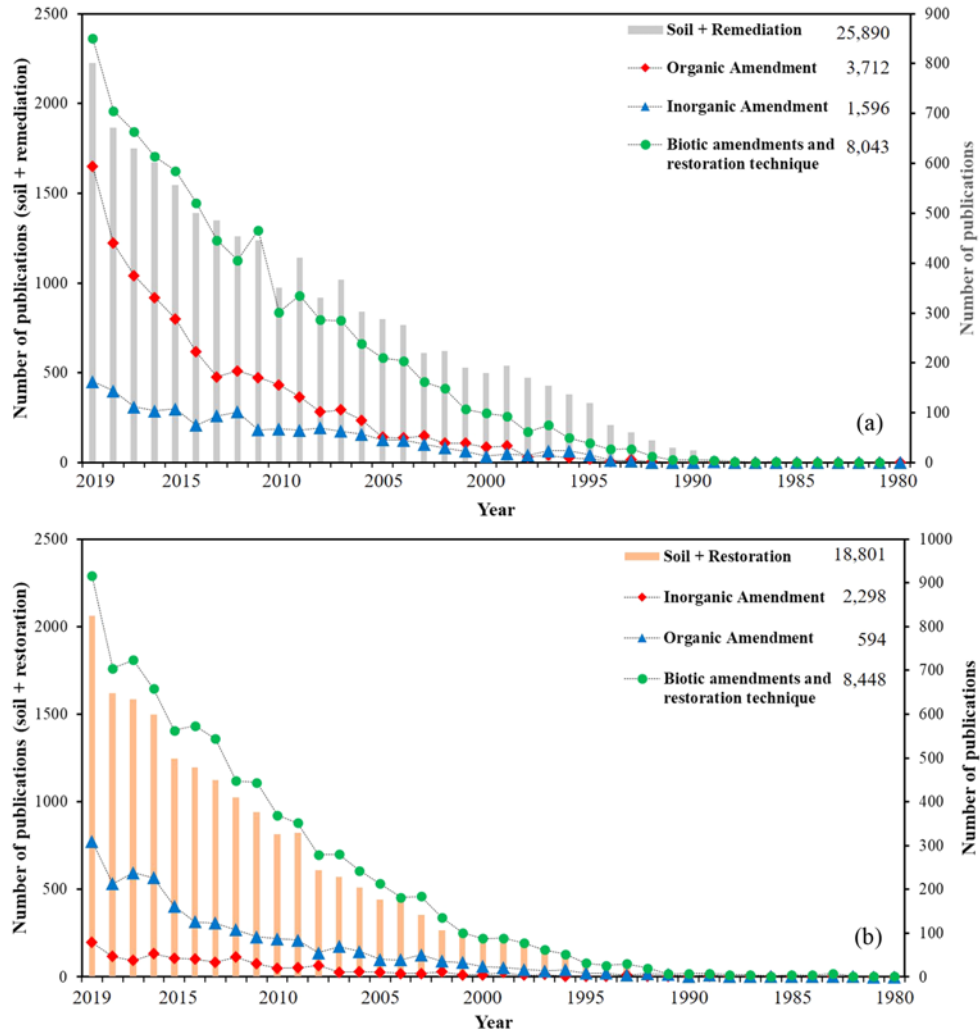


Fig. 2. Statistics of publications related to (a) soil remediation and (b) soil restoration. Data are acquired from 1980 to 2017 (SCOPUS data base).

원 관련 연구가 토양 정화 관련 연구에 비해 상대적으로 많은 양이 수행되어온 것으로 나타났는데 (Fig. 2), 이는 중금속과 같은 오염물질의 고정화 및 안정화하는데 주로 활용되었기 때문이다 (Houben *et al.*, 2012; Lim *et al.*, 2013; Palansooriya *et al.*, 2020; Qayyum *et al.*, 2017). 반면 토양 복원으로 검색한 결과에서 무기질 개량제와 관련된 연구가 낮은 이유는 토양질을 향상시키는 효율이 비교적 유기질 개량제보다 낮기 때문으로 판단된다 (Hahn *et al.*, 2018; She *et al.*, 2018). 다시 말하면 토양질을 향상시키기 위해서는 유기물 함량이나 미생물 활동도와 같은 생물학적 요인과

의 상관성이 높은 인자가 중요함을 시사하는 것이다 (Eldl *et al.*, 2019; Onagwu, 2019).

미국 EPA에서는 재이용 또는 재활용 용도에 적합한 토양 질료의 향상을 위해 토양 산도 및 pH 개량제, 무기질 및 유기질의 토양 개량제 등으로 구분하여 현장에 적용하고 있다 (US EPA, 2007). 토양 산도 및 pH 조절을 위한 개량제는 정화과정에서 pH가 감소함에 따라 중금속의 생체 이용률 및 토양 내 토착 미생물에 대한 독성 증가를 억제하고 토양질의 향상을 위해 활용되고 있으며, 석회석 (lime), 목재 회분 (wood ash), 석탄회 (coal combustion products), sugar beet

lime, cement kiln, lime kiln, red mud, lime-stabilized biosolids 등이 주로 이용되고 있다. 무기질의 토양 개량제는 토양의 수분 보유력(water holding capacity), 입단의 안전성(aggregate stability), 토성(soil texture) 변화, 발수성(water repellency) 등과 같은 물리적 특성을 개선하기 위해 활용되며, 주물사(foundry sand), 제강슬래그(steel slag), 준설물질(dredged material), 석고(gypsum), 석탄회(coal combustion products) 등이 사용되고 있다. 유기질 토양 개량제는 토양의 유기물 함량과 미생물 개체군의 종류 및 개체수를 증대시키기 위해 필수 영양소(C, N, P 등)가 포함되어 있는 개량제를 주로 이용하며, 특히 수분 침투 및 수분 유지, 응집력, 통기, 동식물의 영양분 공급을 할 수 있는 분뇨(manures), 퇴비(compost), 혐기성 소화물(anaerobic digested sludges), 제지슬러지(pulp sludges), biosolids, 정원폐기물(yard/wood waste) 등이 이용되고 있다.

앞서 조사된 무기질, 유기질 그리고 생물학적 토양 개량제 및 회복기술(지렁이, 식물, 유효 미생물 활용)로 구분하였고, EPA에서 제공하는 각 개량제에 대한 장단점을 고려하여 세부적인 개량제 및 회복기술을 선정하여 이에 관한 연구 동향을 조사하여 정리하였다.

### 3.1. 유기질 개량제

유기질 개량제에 관한 연구 동향을 조사한 결과, 다양한 유기질 개량제 중 비료, 퇴비, 바이오차, 분뇨, 바이오슬러지의 순으로 많이 이용되고 있는 것으로 조사되었다(Fig. 3). 특히 기존의 개량제인 비료와 퇴비의 경우에는 이전부터 이용되어 오고 있는 개량제이기 때문에 이와 관련된 연구들이 꾸준히 증가되고 있으며(Chen *et al.*, 2018; Diacono and Montemurro, 2018), 바이오차의 경우에는 2010년대 들어 큰비표면적을 갖는 특성 때문에 토양 개량제로 주목받기 시작하였으며(Beesley and Marmiroli, 2011; Mahar *et al.*, 2015), 최근 들어 이와 관련된 연구들이 급격하게 증가하고 있다(Yuan *et al.*, 2019). 분변토(cast)는 지렁이의 사육을 통해 생성되는 퇴비로 이전부터 이용되어 왔지만, 분변토가 식물과 토양에 미치는 영향이 명확하게 규명되지 않았으나, 최근 들어서 이와 관련된 연구들이 수행되고 있다(Shi *et al.*, 2019). 따라서 토양 질의 향상에 우수한 유기질 개량제인 비료, 퇴비, 바이오차, 분뇨, 바이오슬러지와 최근 많은 연구가 진행되고 있는 지렁이 분변토에 대해 연구 동향을 자세히 조사하여 정리하였다.

#### 3.1.1. 유기질비료(Organic fertilizer)

비료는 화학비료와 유기질비료로 구분된다. 화학비료는 토양 비옥도와 작물 생산성을 높이는 데 큰 역할을 한다(Hera, 1996). 그러나 화학비료를 장기간 과도하게 사용하면 토양 질이 떨어지고 토양 산성화 및 토양오염을 유발시키며 토양 유기물 함량을 줄이는 등 악영향을 초래한다(Dinesh *et al.*, 2010; Guo *et al.*, 2010; Roelcke *et al.*, 2004). 유기질비료는 동식물을 원료로 하며 유기물 함량이 높고 영양분이 풍부하여 환경적으로 안전하게 농업 생산에 크게 기여하며, 특히 토양의 입단 안정성을 개선하고 토양의 가밀도를 감소시킴으로써 토양의 물리적 특성을 향상시킨다(Ning *et al.*, 2017). 또한 토양의 생물학적 및 생화학적 특성의 개선을 통해 토양 미생물의 군집 구조를 최적화한다(Diacono and Montemurro, 2010; Zhang *et al.*, 2009). 하지만 유기질비료에 함유된 영양분은 천천히 용출되기 때문에 식물 성장에 필요한 영양소의 양을 충족시키지 못할 수도 있는 단점이 있다(Hartl *et al.*, 2003). Ning *et al.* (2017)의 연구에서는 유기질비료를 이용할 경우, 화학비료를 이용할 때보다 토양 내 유기물 함량, 카탈라아제(catalase)와 우레아제(urease) 등과 같은 토양 미생물 효소의 활성도를 증가시키는 데 도움을 줄 수 있음이 확인되었다. 그러나 유기질비료를 지속적으로 이용하면 식물 내 중금속이 축적되어 토양의 건강성 및 작물 안전성에 악영향을 줄 수 있는 것으로 연구되었다.

정화된 두 토양을 대상으로 친환경 농자재인 부산물 비료, 목탄(charcoal), 바이오차를 혼합하여 토양개량제로 처리한 결과, 작물 생육에 적합하지 않은 토양에서 생육 가능한 토양으로 개선되었다(Kim *et al.*, 2013). 이는 토양 유기물과 유효인산 함량을 다량 증가시키고, 총 질소, 치환성 칼륨의 함량이 다소 증가시킴으로써 정화된 토양의 질을 향상시키기 때문으로 판단될 수 있다. 그리고 유기질비료와 규산질비료를 59년 동안 사용하였을 때, 토양의 pH, 유효인산, 치환성 양이온, 유효규산 함량 모두 증가함을 확인하였다(Kim *et al.*, 2012). 또한 무기질 비료, 유기질비료, 규산질비료를 혼용하여 토양을 개량한 결과, 토양의 탄소축적을 증대시키고 환경으로 유출될 수 있는 수용성 탄소의 함량을 감소시켰다. 이를 통해 토양 질이 향상되어 작물의 성장과 수확량이 증가되고 안정적으로 생산할 수 있음을 보고하였다.

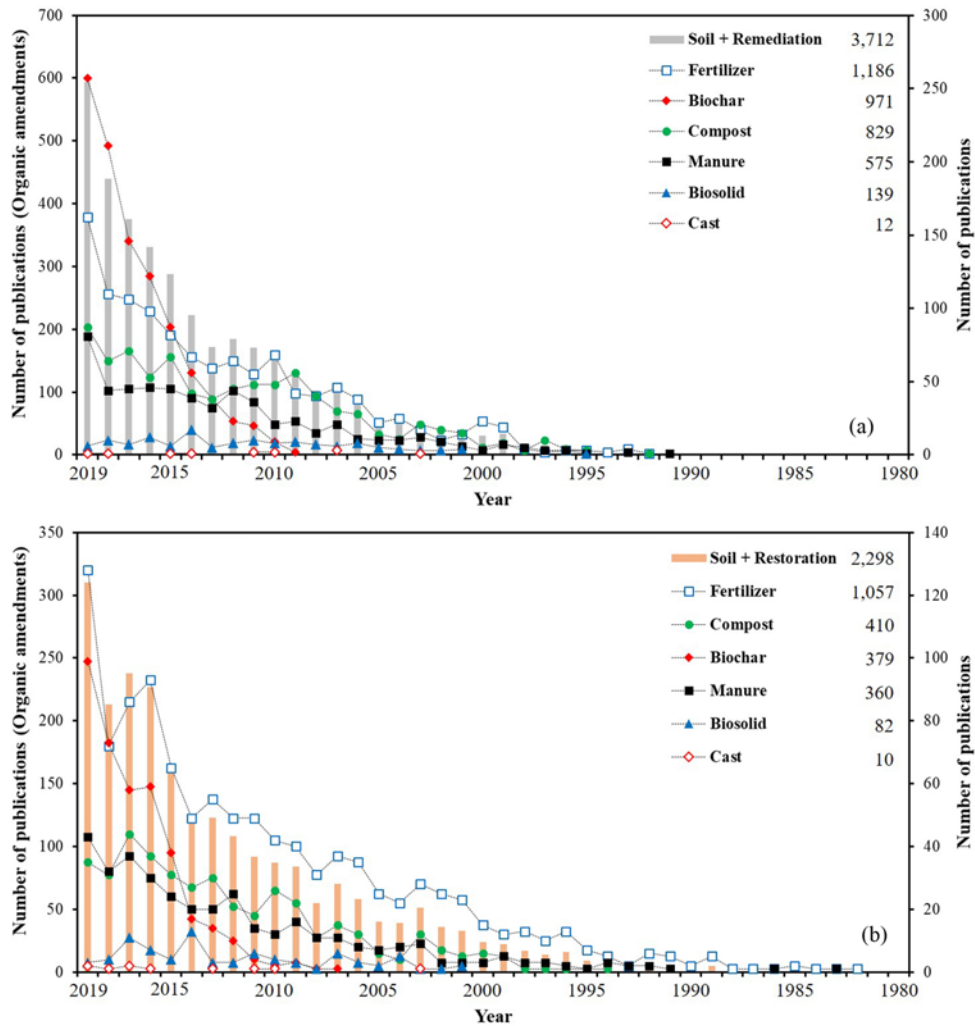


Fig. 3. Statistics of publications related to (a) soil remediation and (b) soil restoration using organic amendments. Data are acquired from 1980 to 2017 (SCOPUS data base).

### 3.1.2. 바이오차(Biochar)

바이오차의 과학적 용어는 탄소가 풍부한 물질로 공기가 없는 상태에서 나무, 잎, 짚 또는 분뇨 등과 같은 바이오매스의 폐기물을 열 분해한 물질을 말한다(Ahmad *et al.*, 2014; Lehmann, 2012; Manyà, 2012). 친환경적인 바이오차는 열분해로 인해 3차원 그물 모양의 다공성 구조와 큰 비표면적으로 인해 오염물질의 흡착 및 분해에 매우 효과적인 물질이다(Hu *et al.*, 2018; Shackley *et al.*, 2012; Sneath *et al.*, 2013; Yi *et al.*, 2018; Yuan *et al.*, 2017). 또한 토양의 물리화학적 특성인 pH, CEC, 유기물 함량, 총질

소, 총인, 가밀도 등을 개선시키는 것으로 알려져 있으며, 이를 Fig. 4에 도시하였다(Kumar *et al.*, 2018; Khorram *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2012; Yao *et al.*, 2012). 일반적으로 고온 (>550°C)에서 생성되는 바이오차는 큰 비표면적(>400 m<sup>2</sup>/g)과 다방향족 구조(polyaromatic structure)를 가지기 때문에 pH 증진제와 흡착제로 산성 오염토양에 적용에 많이 이용된다(Angin and Şensöz, 2014; Luo *et al.*, 2018; Yao *et al.*, 2012). 하지만 열분해할 때 생성되는 바이오차의 침상형 표면으로 인하여 지렁이와 같은 유기체의 표피를 자극하기 때문에 오히려 독성을 띠기도 한다

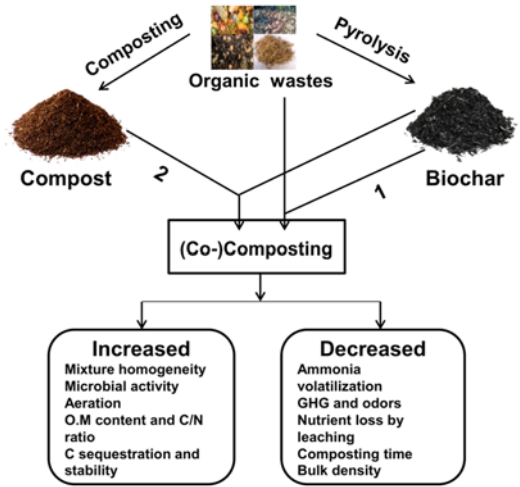


Fig. 4. Schematic illustration showing the processes of composting, pyrolysis, and co-composting for manufacturing biochar and their effects on the properties of biochar (Yuan *et al.*, 2019).

(Zeb *et al.*, 2020).

Chintala *et al.* (2014)은 옥수수 및 수수 줄기를 이용하여 바이오차를 제조하였으며, 이 바이오차들을 산성 재배 토양(Cultivated acidic Entisols, pH 4.8)에 적용한 연구를 수행하였다. 옥수수 바이오차와 수수 바이오차는 산성토양과 혼합하여 6개월 후 pH는 최대 1.36와 0.91의 증가폭을 보였으며, EC는 159%와 57%, CEC는 142%와 95%가 증가하는 것으로 나타났다. 원료의 차이로 인해 토양 특성도 다르게 나타났으며, 옥수수 바이오차가 수수 바이오차보다 토양의 질을 개선하는데 더 적합한 것으로 연구되었다. Getachew *et al.* (2016)의 연구에서는 버드 나무 폐기물을 500°C에서 가열하여 바이오차를 제조하였으며, 직접 토 함량이 높은 산성토양에 바이오차를 투입하므로써 수분함량(9%),  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (29%),  $\text{NO}_3\text{-N}$ (19%), available P(13%) 그리고 CEC(17%)가 증가되었지만 pH, EC, 가밀도는 변화가 없는 것으로 연구되었다. 이러한 영양소 공급 및 수분 유지율 증가로 인해 토양 질이 향상되고 밀의 생육 성장 및 수확량이 증가하는 것을 확인하였다.

Jones *et al.* (2012)의 연구에서는 바이오차를 토양 개량제로 이용하여 장기간 토양의 물리, 화학, 생물학적 특성을 모니터링한 결과, 각 부지에 바이오차를 0, 25, 50 ton/ha로 첨가하고 옥수수를 1년차에 재배하고 2~3년차에 잔디를 재배하였다. 바이오차의 이용으로

식물의 성장이 현저하게 증대되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 2년차에 총질소 함량과 3년차에 바이오매스량이 급격하게 증가하였으며, 토양 호흡, 곰팡이 및 박테리아 성장률이 증가하였다. 또한 토양의 산성화를 완전히 중화시켰으며, 미생물 군집을 구축 및 증대시키는 것으로 연구되었다. 하지만 DOC (sugars and organic acids), DON(amino acids),  $\text{NO}_3^-$  그리고  $\text{NH}_4^+$ 에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

### 3.1.3. 퇴비(Compost)

퇴비의 종류는 보통 퇴비와 부산물 퇴비로 구분되며, 공통적으로 반드시 발효 과정을 거쳐야 한다(Ros *et al.*, 2003; Tejada *et al.*, 2006; 2007; Walker, 2003). 국내의 현행 비료관리법상 퇴비 원료로 가능한 물질과 불가능한 물질로 구분되며, 농림부산물, 수산부산물, 분뇨, 음식물류 폐기물 그리고 식품 제조에서 발생하는 잔재물은 모두 이용이 가능하다(Bandick and Dick, 1999; Doran *et al.*, 1988; Eriksen, 2005; Garcia *et al.*, 2000; Randhawa *et al.*, 2005). 하지만, 화학 물질과 관련된 산업시설 및 제조업에서 발생하는 폐기물이나 폐수는 이용 불가능하다(Kranz *et al.*, 2020). 토양의 가밀도 증가는 공극의 감소를 말하며, 심한 압축으로 인해 식물의 뿌리 성장을 제한한다(Albiach *et al.*, 2000; Crogger, 2005). 퇴비는 토양의 가밀도의 증가(Mohammadshirazi *et al.*, 2016; Somerville *et al.*, 2018)와 침투율 증가(Chen, 2015; Logsdon *et al.*, 2017), 수리전도도 증가(Olson *et al.*, 2013; Somerville *et al.*, 2018), 수분함량 증가(Logsdon *et al.*, 2017; Sax *et al.*, 2017; Schmid *et al.*, 2017) 등을 초래하지만, 총질소, 질산성질소, 총인, 이용가능한 인의 농도를 감소시키는 것으로 연구되었다(Faucette *et al.*, 2005; Logsdon *et al.*, 2017).

질소 함량이 높은 도시 유기 폐기물 퇴비, 가축분뇨 퇴비, 하수 슬러지 퇴비 그리고 녹색 폐기물 퇴비(Green waste compost)를 옥수수 재배에 적용하여 토양 특성의 변화를 비교하였다(Ros *et al.*, 2006). 연구 결과, 사용된 여러 퇴비 중 도시 유기 폐기물 퇴비는 토양 내 총질소의 함량 증가(21%), 하수 슬러지 퇴비는 유기물 함량 증가(14%), 녹색 폐기물 퇴비는 미생물생체량(microbial biomass)을 증가(8%)시키는 데 효율적이라는 결과를 도출하였다. 네 가지의 퇴비 모두 옥수수의 생육 성장에는 유의성의 차이 없이 60~70%가 증가된 것으로 연구되었다. 그리고 미생물생체량이 가장 높은 녹색 폐기물 퇴비가 가장 우수한 퇴비임을



확인하였다. 이는 높은 미생물의 활성도로 인해 미생물 및 식물이 쉽게 이용 가능한 영양소를 제공하여 토양 질이 개선된 것이라 판단된다. Zhen *et al.* (2014)의 연구에서는 분뇨 퇴비를 옥수수 재배에 적용하였으며, 토양 특성은 유기물함량, 부식함량(humus), 총질소가 증가하고 다른 특성은 큰 영향이 없는 것으로 조사되었다. 그리고 미생물의 활동과 효소 활성도를 증진시켜 옥수수 생육을 촉진시켰다.

비닐하우스 내 채소 재배의 집약적 생산은 지속적인 토양 내 유기물 및 영양소의 축적으로 인해 토양 불균형을 초래하며, 이를 개선하기 위해 퇴비와 톱밥을 혼합하여 채소 재배의 효율로 평가하는 연구를 수행하였다(Bonanomi *et al.*, 2014). 18개의 토양 특성 인자를 선정하여 토양 질을 모니터링하였고, 혼합된 퇴비와 톱밥을 적용한 결과, dehydrogenase, phosphatase,  $\beta$ -glucosidase 등과 같은 효소 활성도와 토양 호흡이 개선되었다. 또한 토양의 양이온 교환능과 전기전도도가 크게 증대되었고, 채소의 생식력도 증가한 것으로 조사되었다.

#### 3.1.4 분뇨(Manure)

분뇨의 종류는 동물의 배설물에 따라 다르며, 가축 동물들의 분뇨가 혼합된 축산분뇨(livestock manure)와 뉘릿과 분뇨를 혼합한 두업(farmyard manure)이 있다(Zhu *et al.*, 2014). Mahood *et al.* (2017)의 연구에서는 건조지대의 토양인 haplic yermosol을 대상으로 양 분뇨, 축산분뇨, 두업을 이용하여 토양을 개량하였으며, 토양 유기물함량은 최대 85~90% 이상 증가, 총질소는 최대 100~120% 증가, 총 인은 최대 25~33%, 총 칼륨은 최대 40~60%가 증가하는 것으로 확인되었다. 하지만 pH는 0.3~0.5 폭으로 감소하고 가밀도는 10%가 감소하는 것으로 연구되었다. 상술한 3가지의 분뇨는 탄소와 질소의 비율이 비슷하여 유사한 결과가 나타났고, 건강하지 않은 토양을 개량함으로써 작물 수확량을 증가시켰다(Li *et al.*, 2017; Vo *et al.*, 2019; Xu and Shen, 2011). Qian *et al.* (2018)의 연구에서는 소, 닭 및 돼지 분뇨에서 항생제 내성 유전자가 각각 0.08~0.28%, 1.71~3.07% 및 0.54~1.49%로 보고되었고, 또한 대장균을 비롯해 다양한 바이러스가 함유하고 있어 직접적으로 가축 분뇨를 이용하는 것은 심각한 토양 질을 저하시킬 수 있다(US EPA, 2013).

Zhang *et al.* (2015)의 연구에서는 알빅층(albic) 논 토양을 대상으로 축산분뇨, 녹비(green manure), 뉘릿

퇴비로 토양을 개량하였으며, 토양유기탄소(soil organic carbon)가 뉘릿퇴비, 축산분뇨, 녹비 순으로 최대 50% 이상 증가한 것으로 확인되었다. 유효인산, 총질소, 칼륨 등이 20% 이상 증가하였고, 축산분뇨는 Phosphatase,  $\beta$ -Glucosidase,  $\beta$ -Cellobiosidase, L-leucine aminopeptidase와 뉘릿퇴비는 N-Acetyl-glucosamine, Urease, phenol oxidase,  $\beta$ -Xylosidase의 효소 활성도가 증가하는 것으로 연구되었다. 세 가지의 분뇨는 토양의 생화학 및 미생물의 활성도를 증진시키지만, 분뇨를 만들 때 주재료가 다르기 때문에 향상시키는 인자도 다르게 나타난 것을 확인하였다. 그리고 녹비를 이용하여 벼 재배 시 토양의 물리적 특성인 공극률과 용적밀도가 개선되었지만 쌀 수량의 유의적 증가에 기여하지는 못한 것으로 확인되었다(Jeon *et al.*, 2010). 토양 특성은 변화되었지만, 식물생육에 크게 기여되지 않아 녹비와 목탄(charcoal)을 혼합하여 이용한 결과, 토양의 pH와 EC는 감소하고, 토양유기물과 총질소 함량은 증가되는 것을 확인하였다. 그리고 생강의 생육상태가 양호하고 생산량이 높아졌으며, 병발생률이 상대적으로 낮게 나타났다(Yang *et al.*, 2014). 유류오염토양의 정화에 가축분뇨와 식물상 정화 동시에 적용함으로써 생물활성( $\beta$ -glucosidases, proteases, dehydrogenases, phosphomonoesterases)이 현저히 증가하는 것으로 확인되었다(Nwaichi and Chuku, 2017).

#### 3.1.5 바이오 솔리드(Biosolid)

산업화의 가속화와 도시 개발로 인해 천연자원이 무분별하게 사용하여 복합 고형 폐기물(complex solid waste)이 지속적으로 발생되고 있다(Sharma *et al.*, 2017; Singh *et al.*, 2014). 전세계적으로 매년 약 40억 톤의 고형 폐기물이 발생되고 있으며, 바이오 솔리드는 고형의 유기질 폐기물 중에서 하수 슬러지 또는 가정용 폐수 잔류물을 이용하기도 한다. 또는 하수 처리 공정에서 발생하는 불용성 생물학적 고형 잔류물 또는 유기 폐기물을 이용하기도 한다(Singh and Agrawal, 2007; 2008; 2010a; 2010b; Usman *et al.*, 2012). 발생되는 바이오 솔리드는 매립지, 토양 개량제, 퇴비화/분해, 열처리 및 다양한 분야에 이용되고 있다(Fig. 5). 바이오 솔리드는 유기물과 수용성 영양소가 풍부한 매질이며, 장기간 이용 시 토양의 물리화학적 특성이 향상되는 것으로 알려져 있다(Antolín *et al.*, 2005; Logan *et al.*, 1997; Veeresh *et al.*, 2003). 유럽의 지중해 농지의 토양과 같이 유기물이 부족한 토양에 유기적으로 이용하여 토양 비옥도를 향상시켰



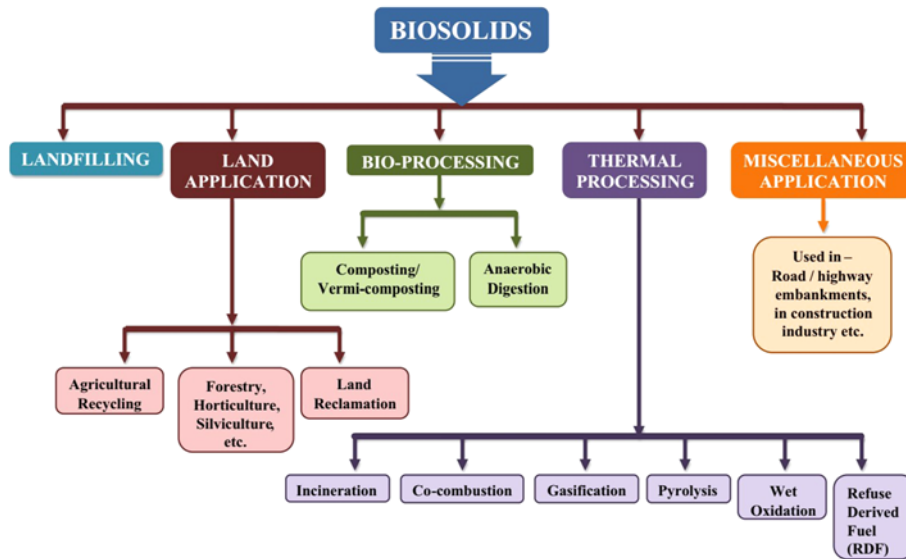


Fig. 5. A schematic representation of different waste management options for biosolids (Sharma *et al.*, 2017).

으며(Diacono and Montemurro, 2010; Mattana *et al.*, 2014; Zdruli *et al.*, 2004), 생물학적 및 생화학적인 특성의 개선으로 인해 토양의 질이 향상되어 작물의 생식력이 증대된 것으로 연구되었다(Antolín *et al.*, 2005; García *et al.*, 2000a;b). 하지만 악취, 병원체 문제 그리고 생활 유기물 폐기물에 대한 인식 문제들이 바이오 솔리드의 이용도에 악영향을 주며, 바이오 솔리드 내 중금속 및 유기 오염물질과 같이 잠재적으로 유해한 성분을 함유할 수 있어 재활용하는데 충분히 고려하여 이용하여야 한다(Düring and Gäth, 2002; Mattana *et al.*, 2014).

미국 켈카타 주변의 다른 고지대와 저지대에서 채취한 하수 슬러지를 농업용 개량제를 제조하여 표층의 0~15 cm와 15~30 cm에 적용하였다(Maiti *et al.*, 2001). 알카리 표층 토양이 중성으로 개선되고 토양의 CEC 값이 약간 증가되었다. 그리고 유기 탄소의 함량이 일반 토양보다 높고 이용 가능한 Ca, Mg, Na, K의 함량이 증대되었다. 또한 이용 가능한 유효 질소와 인 함량은 평균보다 약간 증가된 것으로 확인되었다. 그리고 일반 토양보다 바이오 솔리드를 적용한 토양에서 오염물질의 용출과 용해도 및 중금속의 생체이용률이 바이오 솔리드의 흡착으로 인해 감소하고, pH, 유기물 함량 그리고 CEC가 개선된 것으로 연구되었다(Antolín *et al.*, 2005; Benitez *et al.*, 2001; Saviozzi *et al.*, 1999).

국내에서는 콩나물, 숙주나물, 땅콩나물 등과 같은 콩류 발아 새싹채소류 또는 그의 부산물을 건조하여 판매하는 유향과 혼합하여 개량제를 개발하였고, 이를 농경지 경작, 임야 조성, 또는 조경 등에 적용하였는데, 수목 성장 촉진의 기반이 되는 토양의 보습, 영양분, 미생물 활성 등의 특성이나 지력이 증진되는 것을 확인하였다(Byun, 2019).

### 3.1.6 분변토(Cast)

지렁이의 분변토는 내장기관을 통해 소화된 유기 폐기물이며, 찰스 다윈은 지렁이의 활동과 지렁이의 분변토가 목초지를 비옥토로 변화시킨다고 주장하였다(Edwards and Bohlen, 1996). 분변토는 지렁이가 토양 표면이나 토양 내 배설함으로써 토양의 물리적 특성이 향상되고, 분변토 내 호르몬, 효소, 미생물, 무기 및 유기 물질 등이 함유되어 있음이 확인되었다(Capowiez *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2016; Teršič and Gosar, 2012). 분변토의 생산은 지렁이 수명 주기가 가장 중요하며, 이론적으로 토양의 오염 물질(중금속, 살충제 등)은 지렁이 활동을 저하시키며, 분변토의 생산 및 품질에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Capowiez *et al.*, 2010; Dittbrenner *et al.*, 2010; Givaudan *et al.*, 2014).

지렁이의 분변토는 토양 내 유기물의 함량을 증진시켜 작물의 생산량을 증가함으로써 토양 내에서 지렁이와

토양은 공생적인 관계를 가진다(Bertrand *et al.*, 2015). 비오염토양에 phenanthrene을 인위적으로 오염시킨 토양에 지렁이를 노출시켜 토양 내 phenanthrene 농도와 지렁이 분변토 내 phenanthrene의 농도를 분석한 결과, 분변토 내 phenanthrene 농도가 더 높은 것을 확인하였다(Shi *et al.*, 2019). 이는 지렁이가 먹이활동을 하는 동안 phenanthrene이 체내에 농축된 것이 아니라 phenanthrene의 소수성 특성으로 인해 소화되지 않고 배설되어 분변토 내 함량이 높은 것으로 판단하였다. 분변토는 오염되지 않은 일반 토양보다 총 유기물이 15~19%,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 가 550~800%, 이용 가능한 유효인이 300~450%, 효소 칼륨이 7-12.6%, 그리고 양이온교환능이 약 15%가 높은 것으로 조사되었다. Singh *et al.* (2016)는 재거름(wood ash), 쌀겨, 소똥 그리고 이들의 혼합물에서 지렁이를 생육시켜 지렁이 먹이의 종류에 따른 분변토의 특성 변화를 연구하였다. 이 연구에서 지렁이의 분변토의 특성은 토양의 종류보다 먹이의 종류에 따라 더 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 먹이가 풍부한 토양 내 지렁이의 분변토에는 영양소 함량, 탈수소 효소 및 우레아제 활성도가 큰 미생물 바이오 매스가 높게 나타났고, 지렁이의 성장과 분변토의 생산성도 높은 것으로 연구되었다.

dung의 분변토(Soldier fly cast)는 음식물 발효물과 dung에 번데기가 혼합된 부산물비료로써 토양 내 질소, 유효인산 및 칼륨을 증가시키고, 엽색지수와 엽록소지수를 증가시켜 잔디의 품질이 향상되는 것으로 나타났다(Lee *et al.*, 2013). 또한 토양의 보비력과 주요 영양분의 유효도가 증가하고, 잔디의 지상부와 지하부의 생육과 품질이 증대됨을 확인하였다. 그리고 dung에 분변토의 효율을 증대시키기 위해 코코피트(cocopeat)와 퇴비를 혼합하여 토양의 이화학적 특성을 살펴본 결과, dung에 분변토는 가밀도, 수리전도도가 증가되고, 퇴비와 혼합한 경우 모세관공극, 비모세관공극, 총공극 그리고 수리전도도가 증가되었고, cocopeat와 혼합한 경우 모세관공극과 비모세관 공극이 증가되는 것으로 나타났다(Kim *et al.*, 2011).

### 3.2. 무기질 개량제

무기질 개량제는 일반적으로 토양 pH를 개선하고 이온 공급원으로 이용되거나 중금속의 독성을 저감하거나 고정하기 위해 널리 이용되고 있다. 이에 대한 문헌을 조사한 결과, 석회석을 이용한 연구가 가장 많으며, '토양 정화' 키워드로 검색한 결과에서는 비산회(fly ash), 점토광물, 석고 등에 대한 연구가 유사한 수

준으로 수행되고 있다(Fig. 6). '토양 회복'으로 검색한 결과에서는 석고, 비산회, 제올라이트, 벤토나이트 순으로 많이 연구 개발되고 있다. 토양 정화 분야에서는 흡착능을 증점으로 제제에 대한 연구들이 이루어지고 있으며, 토양 회복에서는 양분과 토양 물리적 특성의 개량을 위한 목적의 연구가 진행되어 오고 있다.

#### 3.2.1. 석회(Lime)

석회는 토양 산도를 개선하기 위해 오랫동안 농업 분야에서 사용되어 온 개량제이며(Guo *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2018; Pang *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2017), 석회질은 질소 및 인 가용성 향상과 같은 토양의 물리화학적 특성 개량에 이용되어 왔다(Holland *et al.*, 2018; Murphy, 2007; Zhang *et al.*, 2017). 식물체 내의 칼슘은 효소 amylase의 구성분이며, 세포벽 middle lamella의 주요 구성분으로서 경도의 유지에 매우 큰 역할을 하고 세포의 분열 활동에도 크게 기여하고 있는 것으로 알려져 있다. 또한 석회는 중금속으로 오염된 토양 내 중금속을 고정에 효과적일 뿐만 아니라 가격이 저렴하여 많이 이용되고 있다(Han *et al.*, 2013; Hooda and Alloway, 1996; Vondrackova *et al.*, 2013). 특히 석회의 이용은 열대지역의 토양에서 매우 중요한 농업 관행으로 토양의 산도를 중화시키고 영양소의 가용성을 높이며, Ca 및 Mg를 공급함으로써 토양 내 오염물질의 독성을 완화시키는데 효과적인 것으로 연구되었다(Caires *et al.*, 2011). 하지만 석회석을 과도하게 이용하거나 장기간 이용한다면, 토양 내 pH와 염의 농도가 증가되어 토양 내  $\text{N}_2\text{O}$ 의 대기 방출,  $\text{NH}_3$ 의 휘발 그리고  $\text{NO}_3^-$ 의 용출로 인해 지하수 유입과 같은 이러한 현상에 의해 식물에 충분한 질소의 공급에 직접적인 악영향을 미치는 것으로 연구되었다(Liu *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2017).

Xie *et al.* (2019)는 납으로 오염된 토양에 석회석을 적용하여 중금속의 고정효과와 식물의 생육에 대해 영향을 살펴보았다. pH 6의 오염 토양이 pH 8까지 증가되었고, 생체 이용률이 오염 토양보다 매우 낮게 나타났다 대부분 뿌리에 납이 잔류하는 것으로 연구되었다. Bossolani *et al.* (2020)의 연구에서는 열대 산성 토양에 석회석을 13.04 Mg/ha의 양만큼 지속적으로 공급하여 장기간 모니터링한 결과, pH, 토양 유기물 함량,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , TN, 이용 가능한 P,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  그리고 CEC가 증가된 것으로 연구되었다. 국내에서는 광산지역 내 중금속의 안정화 공법으로 석회석이 널리 이용되고 있으며, Yun *et al.* (2010)의 연구에서는 제

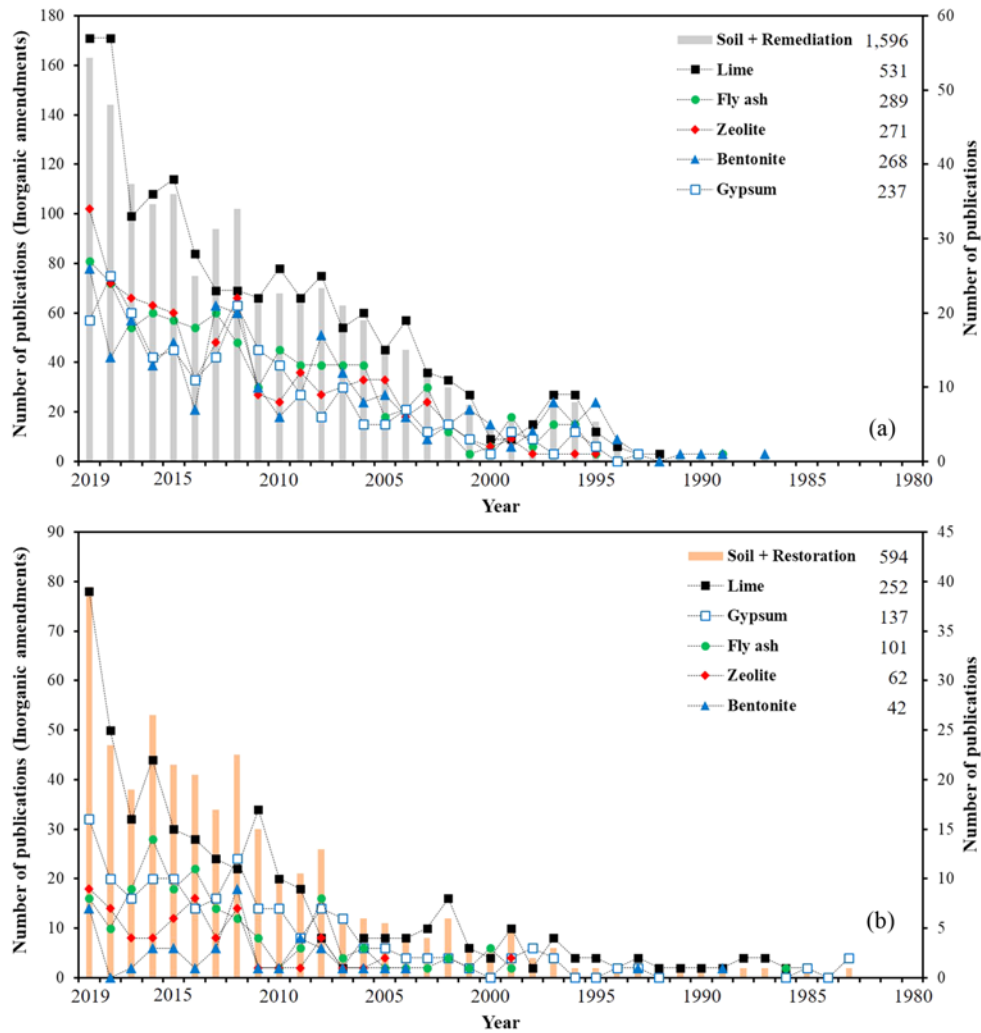


Fig. 6. Statistics of publications related to (a) soil remediation and (b) soil restoration using inorganic amendments. Data are acquired from 1980 to 2017 (SCOPUS data base).

강슬래그보다 석회석을 이용하였을때 pH, CEC 그리고 중금속의 고정효과에 가장 우수한 것으로 연구되었다. 하지만 폐광산의 안정화 공법을 적용한 후 한시적으로 안정화가 될 수 있지만 장기적으로 보면 중금속으로 인해 토양의 생태학적 기능이 저하될 수 있다고 연구된 바 있다(Park *et al.*, 2017).

### 3.2.2. 석고(Gypsum)

석고는 토양에 Ca와 S의 공급원 및 염류집적 토양의 안정제로 널리 사용되어 왔지만(Zoca and Penn, 2017), 최근에는 토성이 불량한 토양이나 고산도 토양에도 널리 적용되었다(Bossolani *et al.*, 2020). 석고는

토양 산도를 직접적으로 개량하지 않지만 Ca와 S를 공급을 통해 토양 내 가용성 Al을 감소시키는 것으로 조사되었다(Caires *et al.*, 2018; Filho *et al.*, 2017). 석고에 의해 토양 층위가 개선됨으로써 작물 뿌리의 생태환경도 개선되고, 이로 인해 식물의 영양분 순환 및 영양 섭취가 개선됨으로써 토양을 개량시키는 것으로 연구되었다(Holland *et al.*, 2018).

고염분 토양은 토양 내 암모니아를 증발시키는 것으로 알려져 있으며, 이를 개량하기 위해 석고를 이용하였다. 석고는 암모니아의 휘발을 억제시키지만 농도에 따른 변화가 없는 것으로 연구되었고, 바이오차와 혼합한 경우 암모니아의 휘발과 질소 손실을 억제하는

것으로 조사되었다(Zhu *et al.*, 2020). Tirado-Corbalá *et al.* (2019)의 연구에서는 0, 4, 12년 동안 석고로 처리한 토양 단면의 물리학적 특성을 중점으로 살펴보았다. 석고의 이용은 유효 칼슘과 마그네슘의 비율과 입자 응집력을 향상시키는 것으로 조사되었고, 토양의 공극률, 가밀도, 공극크기 분포, 입단화 크기, 그리고 구형도와 같은 물리적 특성들도 개선시키는 것으로 나타났다.

### 3.2.3. 점토(Clay)

점토 개량제는 수분 보유능의 개선과 중금속 흡착이 가장 주요한 기능이며(Gill *et al.*, 2004; Mojid *et al.*, 2012; Tahir and Marschner, 2016), 수분 보유능의 증가로 인해 식물이 이용할 수 있는 물의 효율을 증가시키고 증발산을 감소시킨다(Al-Omran *et al.*, 2005; Zayani *et al.*, 1996). 또한 토양 응집력을 증가시키고 토양 가밀도를 감소시킬 뿐만 아니라 토양의 다공성을 향상시키는 것으로 알려져 있다(Shao *et al.*, 2005). 토양의 응집은 토양 다공성과 수분 보유능에 영향을 미치며, 응집체 크기와 안정성은 토양 비옥도와 작물 성장에 영향을 미친다(Shi *et al.*, 2002). 이러한 목적으로 이용되는 점토광물의 종류는 다양하지만, 최근 많이 이용되고 있는 것들로는 벤토나이트, 제올라이트, 버미큘라이트, 그리고 레드머드 등이다.

천연 벤토나이트는 주로 2:1의 점토광물인 몬트모릴로나이트의 종류로 양이온 교환능(CEC), 수분보유능, 그리고 응집 안정도가 우수하여 모래질 토양에 전반적으로 많이 이용되고 있다(Benkhelifa *et al.*, 2008; Kaiser and Zech, 2000; Lazányi, 2005; Mishra *et al.*, 2001; Raiesi, 2006; Stoicescu *et al.*, 1996; Suzuki *et al.*, 2007; ). 그리고 벤토나이트의 풍부한 매장량과 저비용으로 인해 매우 경제적인 개량제로 광범위하게 이용되고 있으며(Peng and Sun, 2012; Suzuki *et al.*, 2007), 작물의 성장과 수확량을 향상시키는 것으로 알려져 있다(Aleem *et al.*, 2000). 다만 점토광물의 유실될 우려가 있어 얼마나 오래동안 지속될지 예측하기는 어렵다(Czaban and Siebielec, 2013).

제올라이트는 토양 내 작물의 질소 흡수 및 수확량을 촉진시킬 수 있는 개량제로 점차 인식이 변하고 있다(Sun *et al.*, 2020). 제올라이트는 영양소(특히 질소)와 물에 대한 친화력이 높고 양이온 교환능이 높으며, 식물 뿌리 영역에서 질소 함량을 유지함시킴으로써 작물 성장에 이로운 효과를 준다(Campisi *et al.*, 2016; He *et al.*, 2002; Malekian *et al.*, 2011; Noori *et al.*,

2006). 콩(Khan *et al.*, 2013), 옥수수(Malekian *et al.*, 2011), 밀(Joghan *et al.*, 2012)을 포함한 고지 농작물의 질소 축적 및 곡물 수확량이 향상됨이 입증하였다. 또한 높은 수분 보유력으로 인해 물의 스트레스가 식물의 성장에 미치는 악영향을 완화할 수 있으며, 이는 물이 부족한 환경에서의 식물에 대한 물의 이용 효율을 증가시키는 것으로 연구되었다(Hazrati *et al.*, 2017; Najafinezhad *et al.*, 2015; Ozbahce *et al.*, 2018). 하지만 제올라이트의 영양소 고정은 오염되지 않은 토양에서 식물이 성장하는데 잠재적 악영향을 미칠 수 있는 것으로 연구되었다(Lim *et al.*, 2016b). 다만 중금속으로 오염된 토양에 제올라이트로 개량한 결과, 중금속을 고정화하여 썬의 중금속 흡수를 저하시키지만, 제올라이트를 과도하게 사용하거나 장기간 사용하면 영양소(N과 P)도 동시에 식물 흡수를 저하시키는 것으로 조사되었다(Lee *et al.*, 2019)

산업 폐기물의 하나인 레드머드는 알루미늄 제련 공정의 부산물로 한 해 약 30여만 톤이 발생하고 있으며, 왕겨를 열분해 공정을 통해 제조된 바이오차와 레드머드를 혼합하여 산성 토양에 적용하였다(Shin *et al.*, 2019). 개량한 결과, 토양의 pH와 CEC가 증가되었고, 상추의 생육 지표인 엽장, 엽폭, 생체중, 견체중이 증가되어 산성토양을 효과적으로 개량할 수 있는 것으로 조사되었다.

### 3.2.4. 비산회(Fly ash)

전 세계적으로 발생하는 비산회의 총량은 엄청나게 크며, 이는 연간 7억 5천만톤을 초과하는 것으로 추정되지만, 총 비산회 발생량의 50% 미만만이 활용되고 있다(Izquierdo and Querol, 2012). 비산회는 물리화학적 특성이 양호하고 K, Ca, Mg, S 및 P의 함량이 높아 토양 개량제로서 30년 동안 꾸준히 이용해 왔다(Ram and Mastro, 2010). 비산회는 석탄이 연소되면서 탄소와 질소가 산화되어 질소를 제외한 대부분의 필수 식물 영양소를 함유하고 있다(TIFAC, 2001). 그리고 비산회의 특성은 큰 비표면적, 낮은 가밀도, 높은 수분 보유력 및 전기전도도, 그리고 비결정질과 결정질로 혼합되어 있으며, 일반 토양보다 양이온 교환능이 낮은 것으로 알려져 있다(Mattigod *et al.*, 1990). 비산회의 석회처리(liming) 방법 및 석탄의 종류, 특히 모 석탄의 황 함량 및 설비의 작동 조건에 따라 산성 또는 알칼리성을 띠는 비산회가 생성되는 것으로 알려져 있다(Ram and Mastro, 2010). 탄소와 질소를 풍부하게 함유한 개량제와 혼합하여 이용한다면 토양의 개

량 효과가 더 증대될 것이다(Adriano *et al.*, 1980).

비산회의 토양 개량제는 농업 및 산림의 많은 중에 적용하였으며, 과수 및 작물의 수확량이 증가한 것으로 연구되었다(Ahmaruzzaman, 2010; Dzantor *et al.*, 2013; Gond *et al.*, 2013; Pandey and Singh, 2010; Ram and Masto, 2010). 그리고 유용한 토착 미생물의 정착율을 향상시킴으로써 토양 내 잔류 염분을 분해하고 식물의 성장을 촉진뿐만 아니라 식물질병을 유발하는 곰팡이에 대해 길항력을 증가시킨 것으로 조사되었다(Un *et al.*, 2012). 비산회를 이용한 토양 개량은 가밀도, 다공성, 수리전도도, 공극률 및 수분 보유능과 관련이 있으며, 이는 작물 성장과 토양의 영양분 유지 및 생물학적 활동에 직접적인 영향을 미치는 것

으로 연구되었다(Jayasinghe and Tokashiki, 2012). 고염분 토양에 적용하거나 과도하게 이용하면, 비산회에서 용출되는 다량의 이온(P, K, B, Ca, Mg, Mn, Zn, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)들이 토양 내 pH, EC, 염도를 증가시켜 식물의 성장을 억제할 수도 있는 것으로 조사되었다(Haynes, 2009; Khan and Singh, 2001). 적절한 양을 이용한다면 토양 내 필수 식물 영양분의 공급원으로서 식물 성장을 촉진시킨다(Ram *et al.*, 2010; 2011; Ram and Masto, 2010; Srivastava and Ram, 2009; Tripathi *et al.*, 2009).

### 3.3. 생물학적 개량제 및 회복기술

생물을 이용한 개량제 및 회복기술의 연구 중 대부

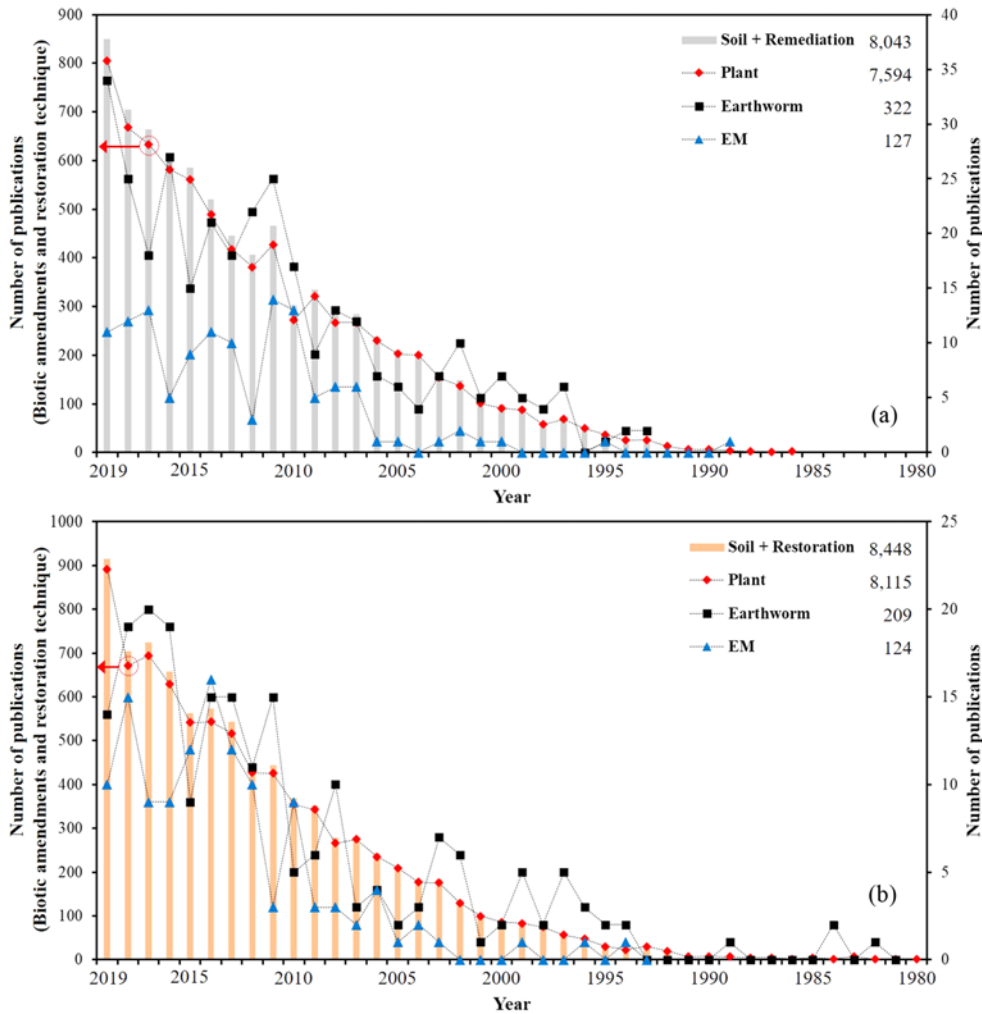


Fig. 7. Statistics of publications related to (a) soil remediation and (b) soil restoration using biotic amendments. Data are acquired from 1980 to 2017 (SCOPUS data base).

분의 연구들이 토양 질을 향상시키는 재제나 기술이 아닌 토양 질을 평가하는데 식물을 이용한 연구가 주를 이루고 있다(Fig. 7). '토양 정화' 및 '토양 복원'과 '식물'등의 키워드를 이용하여 검색한 결과, 본 연구와 관련된 주제의 논문이 전체에서 5% 미만으로 조사되었다. 지렁이, 식물, 미생을 이용하는 생물학적 개량제 및 회복기술은 친환경적이고 경제성이 우수하지만, 토양 질을 향상시키는데 시간이 많이 소모되며 오염물질에 대한 민감성이 높아 오히려 미생물이나 생물이 치사되어 아무런 효과가 없을 수도 있다. 하지만 미생물과 생물이 정화토 내 잔류되어 있는 오염물질을 제거하여 토양 질을 향상시키는데 가장 우수한 방법이다.

### 3.3.1. 지렁이(Earthworm)

토양 생태계의 엔지니어로서의 역할을 수행하는 가장 대표적인 생물이 지렁이이다(Bertrand *et al.*, 2015; Jones *et al.*, 1994). Fig. 8에 나타낸 바와 같이 지렁이는 먹이와 채굴 활동을 통해 응집체 안정성, 토양 구조, 물 침투 및 심토층의 폭기 등과 같은 토양의 물리적 특성에 영향을 미친다(Bertrand *et al.*, 2015; Forey *et al.*, 2018). 또한 지렁이는 토양 내 미생물의 바이오 매스 및 활동, 영양소 순환 및 영양분 고정, 기타 토양 무척추 생물의 밀도, 식물 생산성 및 공동체 구성, 지상 먹이사슬에도 큰 영향을 미치는

생물이다(Blouin *et al.*, 2013). 토양 내에서 앞서 언급한 다양한 역할을 수행하는 지렁이는 오염 토양이나 작물 성장이 불량한 토양의 질을 향상시키는 것으로 확인되었다(Boyer and Wratten, 2010; Butt, 1999; Jouquet *et al.*, 2014; Snyder and Hendrix, 2008). 그러나 대부분의 연구는 토양에 지렁이를 노출시키는 다양한 방법(지렁이 종 선택, 밀도, 방법, 시기, 비용 등)을 통한 토양개량과 관련된 연구들이 진행되었는데(Butt, 2008), 토양 개량 관련 연구에서는 토양 구조 및 다공성(Fraser *et al.*, 2003; Marashi and Scullion, 2003), 토양 비옥도(Fraser *et al.*, 2003; Scullion and Malik, 2000;), 오염된 토양의 정화(Sizmur *et al.*, 2011), 그리고 토양 심도에 따른 생태계 및 토양 특성 변화에 대하여 중점적으로 연구가 수행되었다(Curry and Boyle, 1987; Mudrak *et al.*, 2012; Roubickova *et al.*, 2009). 식물과 토양 생물이 지렁이에 어떤 영향을 미치는지를 살펴본 연구도 있으며(Mudrak *et al.*, 2012), 반대로 지렁이의 활동으로 인해 식물 및 토양 생물의 군집에 대한 영향을 살펴본 연구도 있다(Forey *et al.*, 2018).

### 3.3.2. 식물

식물은 지상 생태계의 복원하는데 지속 가능하고 효과적인 것으로 알려져 있다. 최근에는 토양 특성과 식

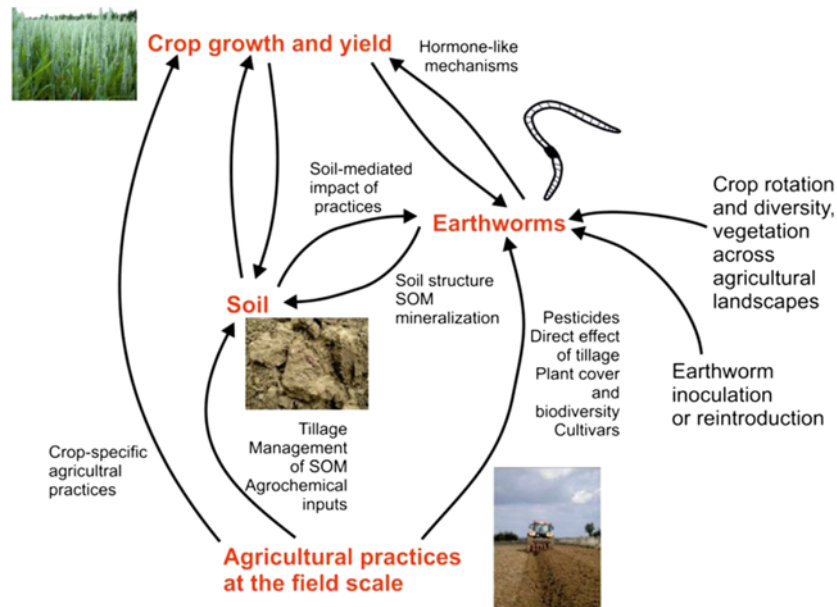


Fig. 8. Schematic illustration showing the effects of earthworm activity on the physicochemical and biological properties of soils (Bertrand *et al.*, 2015).



물 균집 구성 간의 공생 관계에 대한 연구가 수행되고 있다(Maiti and Ghosh, 2020). 식물을 이용한 토양 질의 향상에 관한 연구에서 토양 pH, 수분 보유능, 중금속 오염 및 독성 오염 물질의 분해를 비롯해 주요 생태계 기능인 생산, 침식 관리, 수질 및 토양 품질을 개량에 관한 연구가 있다(Maiti and Ghosh, 2020). 또한 식물의 근권에서 미세 동물과 같은 생물 균집의 복원, 희귀, 토착종 및 취약종의 보호, 침입종의 방지하는 것으로 알려져 있다(Evimer and Chapin, 2003; Wardle, 2002). 식물을 이용한 토양 정화기술(식물정화, phytoremediation)은 환경분야에서 널리 이용되고 있는 기술이며, 식물재배를 통해 오염 물질의 농도를 낮추고 토양 미생물을 이용하는 생물 정화기술이다. 식물정화의 기본 원리는 식물, 토양 및 미생물 상호 작용을 기반으로 하며, 식물정화의 원리는 크게 다섯 가지로 정리할 수 있다: 식물추출(phytoextraction, phytoaccumulation), 식물휘발(phytovolatilization), 근권여과(rhizofiltration), 식물안정화(phytostabilization) 및 식물분해(phytodegradation)(Fig. 9). 이외 식물정화는 근권추출(rhizoextraction)에 의하여 독성 오염물질이 뿌리 시스템에 의해 흡수되어 식물 신체 부위에 고정되는 기작도 포함한다(Ali *et al.*, 2013).

중금속 오염 토양에는 양치류 식물이 많이 이용되고 있으며, 황무지를 복원하는데도 널리 이용되고 있다(Kumari *et al.*, 2016; Witters *et al.*, 2012). 석호 인근

의 고염분 토양에 *Vetiveria zizanioides*와 *Cymbopogon flexuosus*의 식물을 심어 토양을 개량하였으며, 토양의 물리 화학적 및 생물학적 특성(EC 감소, 수분 보유능 증가, 가밀도 감소, N와 K 증가, 질소고정 효과)이 개량되는 것으로 연구되었다(Srivastava *et al.*, 2014). *Alhagi maurorum* 및 *Tamarix sp.*의 종이 석탄재 매립지의 오염된 토양을 개량하는데 효과적인 것으로 연구되었다(Pen-Mouratov *et al.*, 2014). 유류오염토양 정화에 식물과 가축분뇨를 동시에 적용하면 생물활성도(호흡율, DHA, GA 및 Pase)가 현저히 증가하고(Nwachii and Chuku, 2017), 피복식물 재배와 퇴비의 공급으로 미생물량 및 다양성을 비롯해 토양 특성이 개량되어 토양 질이 향상되는 것으로 연구되었다(Li *et al.*, 2018; Nair and Ngouajio, 2012).

### 3.3.3. 유용 미생물 제제(Effective microorganism solutions, EMS)

유용 미생물 제제(EMS)은 유산균, 효모균, 광합성균, 방선균 및 사상균 등 80 여종의 다양한 미생물을 이용하는 것으로 알려졌다(Talaat and Shawky, 2015). EM은 화학적으로 합성되거나 유전자를 조작하지 않고 자연 발효를 통해 생산된다(Higa, 1991). 토양 구조 및 비옥도, 유기물 및 영양 순환을 개선함으로써 화학 비료 및 살충제의 필요성을 감소시킨다(El-Mageed *et al.*, 2020). 또한 오염된 토양이나 불량한 토양에 대해

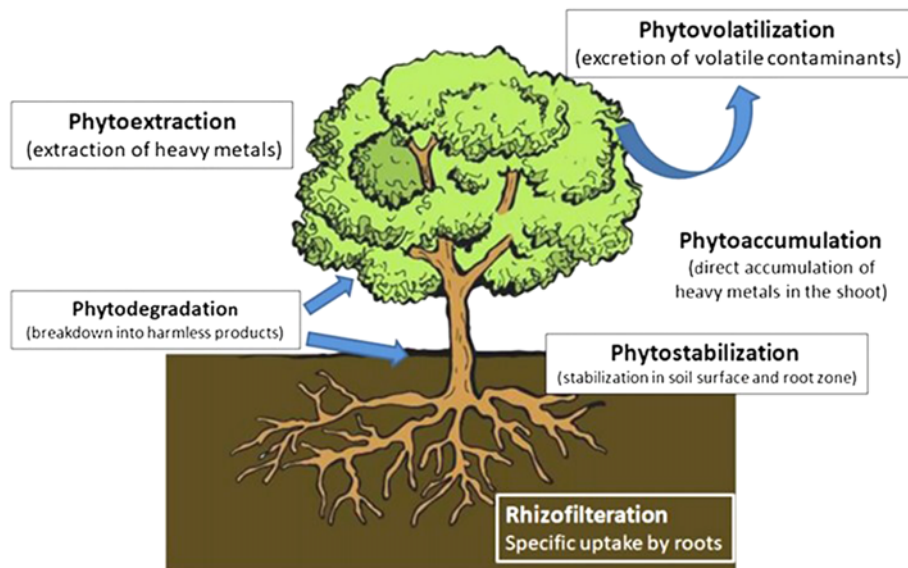


Fig. 9. An illustration showing the various mechanisms of phytoremediation (Maiti and Ghosh, 2020).

작물 성장을 촉진시키고, 영양소의 가용성과 식물 영양소 섭취를 늘리고, 종자의 발아, 작물 수확량 그리고 과실의 품질을 높이는 데 도움을 주는 것으로 알려져 있다(Talaat and Shawky, 2015). 뿐만 아니라 식물의 광합성과 단백질의 활성을 증진시켜 토양의 물리적 및 화학적 특성을 개량하며, 유류 오염물질이나 폐기물의 분해시키는 미생물을 활성화하여 촉진함으로써 오염물질의 제어하는데 도움을 준다(Hu and Qi, 2013; Ndona et al., 2011; Talaat and Shawky, 2015).

유류로 오염된 토양을 복원하는데 EM의 기초자료를 구축하기 위해 적용한 결과, 7일 경과 후 EM을 10%로 주입하였을 때 원유의 농도가 53.3%의 감소율을 나타내었다(Kim et al., 2011b). 또한 미량의 0.1%로 EM을 주입하여도 40% 정도의 원유 감소율을 나타냈고, EM의 발효에 의한 유분이 제거되어 탄소원 감소로 인해 이와 같은 결과가 나타난 것으로 확인되었다. 그리고 방울토마토 농가에서 EM을 장기간(3년 및 5년간) 이용하여 이에 따른 토양 특성 변화를 살펴 보았다(Choi et al., 2019). 토양에서 유용한 미생물을 추출하여 포자 형태로 고정하여 액상으로 제형화하는 액상 미생물제제로 개발하였으며, 이를 시용할 경우 작물의 생육에 효과적인 것으로 연구되었다(Yang, 2003).

#### 4. 정화기술별 토양 개량제 및 회복기술 연구

##### 4.1. 토양 경작법

일반적으로 유기 오염물질을 대상으로 정화하는 토양 경작법은 미생물의 활성화도에 따라 정화효율을 좌우하기 때문에 주로 미생물의 개체군 종과 수, pH, 온도, 토양 수분, 토성, 영양분(C, N, P) 등의 영향 인자에 대해 모니터링한다(Lukić et al., 2017). 정화과정 중 오염물질과 환경 조건의 악영향으로 인해 유기체가 감소하고, 또한 미생물 활동으로 인한 토양 내 영양분은 지속적으로 감소하기 때문에 미생물 활성도의 증가와 영양분을 보충할 수 있는 개량제 및 회복기술이 요구된다(Yi et al., 2016). 앞서 2장에서 언급하였듯이 열화된 정화토 내 영양분 공급과 미생물의 활동도를 증가시키기 위해서는 유기물 개량제와 생물학적 개량제를 이용하는 것이 적합하다고 판단된다.

유기물 개량제는 유기체에 오염물질의 전이의 위험을 줄이고 전처리 없이 직접 이용될 뿐만 아니라 토양 영양분을 공급하기 때문에 이전부터 많이 이용되는 토양 개량제이다(Beesley et al., 2011). 유기물 개량제의 종류로는 분뇨, 퇴비, 바이오차, 유기질 비료 그리

고 동식물 잔류물(biosolid) 등을 많이 이용되고 있다(Lee et al., 2013; Palansooriya et al., 2020). 최근 생물학적 개량제는 주로 미생물의 활성화도 증가 및 독립 영양 미생물을 활용하기 위해 이용되고 있으며, 종류로는 액상 미생물제제(EM 제제), 조류 바이오매스 그리고 지렁이의 분변토 등을 이용한다(Houben et al., 2012; Kim et al., 2011b; Yang, 2003).

##### 4.2. 토양 세척법

토양 세척을 통해 토양의 물리화학적 특성의 열화와 잔류 중금속으로 인해 낮은 생체 이용률은 토양의 비옥도와 품질에 악영향을 끼친다(Beiyuan et al., 2017; Guo et al., 2018; Im et al., 2015). 불량한 토성과 pH, 유기물 함량, 영양분 및 이온 교환 가능한 K, Na, Ca 및 Mg 농도들이 현저히 감소된다(Wang et al., 2016b; Zupanc et al., 2014). 정화토의 회복을 위해 석회, 석고, 제올라이트, 바이오 숯 그리고 유기 비료와 같은 토양 개량제를 일반적으로 이용하고 있다(Beiyuan et al., 2018; Kaurin et al., 2018; Yoo et al., 2018; Zhai et al., 2018). 그리고 석회, 석고 및 제올라이트와 같은 무기질 개량제는 정화토의 pH를 효과적으로 개선하고 잔류 중금속의 생체 이용률을 감소시키는 것으로 알려져 있다(Guo et al., 2016; Zupanc et al., 2014). 유기질 개량제인 바이오 숯, 퇴비 및 유기 비료는 토양 유기물의 조성, 양이온 교환 용량(CEC), 토양 미생물 군집에 효과적인 것으로 연구된 바 있다(Yoo et al., 2018). Kaurin et al. (2018)의 연구에서 EDTA로 세척된 토양에 퇴비와 바이오차를 적용하여 토양 내 효소 활성(dehydrogenase activity와  $\beta$ -glucosidase activity)가 향상된 것으로 확인하였다. 그리고 Pb, Zn, Cd로 오염된 토양을 대상으로 EDTA의 세척용액을 이용하여 토양 세척 공법으로 정화하였으며, 정화토에 분뇨, Hydrogel, Vermiculite, Apatite, Slovakite 등의 개량제를 이용하여 토양 질이 향상됨을 확인하였다(Jelusic et al., 2014).

##### 4.3. 열탈착법

열처리를 통한 토양 정화기술은 일반적으로 유류 오염물질을 대상으로 적용되며 다른 기술보다 빠르고 안정적이다. 하지만 토양의 열처리는 다양한 토양 특성에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있으며(Pape et al., 2015; Sierra et al., 2016; Yi et al., 2016), 광물질 점토 격자 구조는 과도한 가열에 의해 탈수되어 분해될 수 있기 때문에 토양 구조, 밀도, 수분 보유능



과 같은 토양 물리적 특성이 변화될 수 있다(Borchardt, 1989; Dixon, 1989; Fanning *et al.*, 1989). 토양 유기물함량이 높은 토양은 열처리 후 pH가 더 크게 변할 가능성이 높고(Badia and Marti, 2003; Sierra *et al.*, 2016; Terefe *et al.*, 2008), 반대로 유기물함량이 낮거나 CaCO<sub>3</sub>의 함량이 높은 토양에서는 pH 변화가 적을 것으로 보인다. 현재까지 열탈착법에 의한 정화토에 대한 토양 개량연구는 전무한 것으로 조사되었다. 앞서 설명한 바와 같이 열탈착법에 의한 오염 토양의 처리 시 토성은 사질토로 변화되어 보수력, 보비력, 수분함량들이 감소될 수 있어 유기질 개량제인 퇴비, 바이오차 등과 무기개량제인 점토 등을 이용한 토양질 향상에 도움을 줄 수 있을 것으로 보인다. 또한 이는 열처리에 의한 감소된 토양 내 유기물함량의 보충에도 효과가 높을 것으로 보인다.

## 5. 정책적 시사점 및 제언

### 5.1. 정책적 시사점

우리나라 주요한 토양환경관리 정책 방향은 10년 주기로 수립되는 토양보전기본계획에 담겨져 있다. 여기서는 현재까지 두 번에 걸쳐서 수립된 토양보전기본계획에 명시된 정화토 재이용 및 재활용과 관련된 정책적 사항들을 살펴보고자 한다.

2009년에 수립되어 2010년부터 2019년까지 운영된 제1차 토양보전기본계획에서는 5대 과제를 설정하여 추진하였는데, 본 논문의 주제와 연관해서는 네 번째 과제인 '녹색성장을 위한 토양환경산업 육성'이었다(Ministry of Environment, 2009). 이 과제에서는 핵심적으로 토양시장의 양적 성장을 유도하기 위하여 반출정화 대상을 지속적으로 확대하고, 토양 정화·유통단지 조성을 통한 정화토양 재활용시장 활성화를 추진하였다. 또한 정화 처리된 양질의 토양을 토양은행을 통해 건설 현장 등에 공급하는 체계를 구축(2011년 시범단지 조성, 2019년까지 5개 단지로 확대)하고자 계획하였다. 오염 토양 반출정화 시장의 확대와 반출정화 관리는 강화되었지만, 토양환경산업 관련 시장의 정체 및 축소와 더불어 토양 정화·유통단지 조성 등이 추진되지 못하였다. 이로 인하여 정화토의 재이용 및 재활용이 활성화되는 데는 한계가 있었으며, 결국에는 반출정화 처리장에 적치되는 정화토의 양이 증가하는 문제를 초래하였다.

올해 초에 수립되어 향후 10년간(2020~2029년) 진행될 제2차 토양환경보전기본계획에서는 4대 추진전략

과 이를 바탕으로 한 15개 핵심과제를 도출하였다(Ministry of Environment, 2020). 이 중 정화토 재이용과 재활용과 연관된 추진전략은 두 번째의 '오염 토양 정화 및 관리'와 핵심과제는 '오염 토양 반출정화 관리 강화'이다. 이와 관련된 내용을 좀 더 자세히 살펴보고자 한다. 첫 번째로 반출 정화 대상을 현실화하기 위하여 오염 토양은 부지 내 정화가 원칙이나, 부지 협소 등으로 부지 내 정화시설의 설치가 곤란한 등의 불가피한 경우에 제한적으로 반입 정화 시설로 반출하여 정화를 가능하게 할 계획이다. 2005년에 반입 정화처리를 도입한 이래 해마다 반입 정화량이 꾸준히 증가하는 추세(2005년에 5천 톤에서 2016년에 5십 8 만톤으로 증가)를 반영한 결과이다. 뿐만 아니라, 반입 정화시설에서 정화된 토양을 자원으로 인식하고, 재활용할 수 있는 기반을 구축할 필요성이 대두되고 있다. 정화토양이 토양오염기준을 만족함에도 오염된 토양이라는 선입견 때문에 재활용되지 못하고, 방치되거나 단순 매립 등으로 처리되고 있는 실정이다. 또한 반입 정화시설 운영 등에 따른 환경문제가 지속 제기되고 있어 관리기준 마련 등 관리를 체계화할 필요성이 증대되고 있다. 이러한 이유로 제2차 기본계획에서는 반입 정화시설의 정화토양의 재활용을 촉진시키기 위하여 반입 정화시설로 반출하여 정화하는 오염 토양의 정화기준을 1지역 우려 기준으로 상향하여 강화시키고, 매립지 복토제 사용 등 정화토양의 재활용 용도 및 기준을 마련하여 오염 토양의 확산을 최소화할 계획이다. 이와 더불어 정화토양 품질인증제(1지역까지 공급), 정화토양 목표관리제를 도입(공공분야에서 민간사업장까지 확대) 검토를 통해 정화토양의 순환체계 도입을 추진할 계획이다. 보다 더 세부적인 계획은 토양오염도, pH, 유기물 등 토양의 질을 종합적으로 검토하여 인증함으로써 반입정화시설에서 양질의 정화토양을 사용처에 공급할 수 있게 하고, 대규모 개발사업 시 정화토양을 성토제·복토제 등으로 사용하게 할 계획이다. 뿐만 아니라 정화토양의 원활한 수요와 공급을 위하여 반출정화시스템 등을 통해 반입정화시설의 토양정보(정화토양량, 정화농도 등) 등을 제공하고, 오염 부지 내에서 정화된 정화토양은 해당부지 개발계획과 관련한 성·복토제가 필요할 경우 해당 부지에서 정화토양을 재활용하는 방안을 추진할 계획이다.

이상과 같이 살펴본 제1, 2차 토양환경보전기본계획을 정리해 보면, 지난 10년간은 오염 토양 정화에 초점을 맞추어 정책이 수립되고 추진되었다면, 향후 10년은 정화된 토양의 재이용 및 재활용을 촉진함으로써

토양을 자원으로 효율적으로 관리하는 방향으로 정책이 추진될 전망이다.

## 5.2. 향후 연구에 대한 제언

오염 토양의 경우 다양한 오염물질의 독성으로 인하여 인체 및 생태학적 위해성이 증가한 상태이며, 이러한 오염 토양 내 오염물질의 제거 및 독성 저감을 위하여 부지특이성을 반영한 정화기술이 적용된다. 하지만 이러한 정화 과정을 거치면서 오염물질의 위해성은 저감되는 반면에 토양의 질과 토양 건강성은 열화(degradation)될 수 있다. 따라서 정화토를 특정 목적을 위하여 재이용하거나 재활용하기 위해서는 정화 과정에서 손상된 토양 질 또는 건강성을 회복시키는 과정이 필요하고 이를 위해 최적의 회복 기술 개발이 요구된다. 뿐만 아니라 재이용/재활용의 지속 가능성을 높이기 위해서는 회복 기술 적용 후 개선된 토양의 질과 건강성이 지속적이고 안정적인지를 평가해야 할 뿐만 아니라 사후 관리 기술개발도 필요하다. 이러한 일련의 기술개발을 통하여 궁극적으로는 오염 토양으로부터 정화 토양, 회복 토양, 재이용/재활용 토양에 걸친 전주기 오염 토양 관리 체계 수립을 위한 기술개발이 요구되어 진다.

앞서 2장에서 논의한 바와 같이, 정화기술에 따라 토양 질의 열화 특성이 상이하게 나타난다. 오염토양 정화 과정 중에 오염물질을 제거하기 위하여 적용되는 물리화학적, 열적, 생물학적 기작들은 토양 내 오염물질을 제거함으로써 법적 기준을 충족시킬 수 있겠지만, 토양 정화 이후 토양 특성은 변화할 수 있으며 주로 생물학적 다양성과 기능적인 측면에 있어서 변화를 초래할 수 있다. 따라서 정화 과정 중에 기능이 약화 또는 상실된 토양은 처리 후 정화토양의 재이용과 재활용 범위가 제한될 수 있다. 정화토양 또는 토양 자원으로로서의 가치를 인식하고 이를 적극적으로 재이용/재활용하기 위해서는 정화기술별 정화과정 중에 발생할 수 있는 토양의 주요 특성 변화를 충분히 고려한 토양 질 회복 기술개발이 요구된다.

정화토의 재이용/재활용의 목적에 따라 회복되어야 할 토양 특성 또는 질이 상이하다. 토양은 크게 생산성이 요구되는 용도와 그렇지 않은 용도로 대부분할 수 있으며 생산성이 요구되는 토양은 식물이 자라고 성장할 수 있는 토양으로서 농업용 또는 산림용(임야)으로 구분될 수 있고, 생산성이 요구되지 않는 토양은 주거지(대지) 또는 공학적인 용도로 이용되는 토양으로 성토·매립용, 도로용 등의 골재로 활용될 수 있다. 따라

서 오염 토양의 정화 후 재이용/재활용 목적에 따라 요구되는 토양 기능이 상이할 뿐만 아니라 그에 따라 회복되어야 할 토양 특성 및 질이 다르기 때문에 이러한 재이용/재활용 목적에 적합한 회복기술의 개발이 필요하다.

회복 수준을 정량적으로 평가하고 장단기적으로 검증할 수 있는 표준화된 기술개발이 필요하다. 회복기술 적용 후 토양 질의 회복 수준을 정량적으로 평가할 뿐만 아니라 회복기술의 지속성, 안정성을 장단기적으로 검증할 수 있는 표준화된 체계 및 구체적인 시험 방법의 마련이 필요하다.

뿐만 아니라 앞 절에서 언급한 제2차 토양환경보전 기본계획에 명시된 정화토의 재이용 및 재활용을 촉진하기 위한 정책의 실현을 뒷받침할 수 있는 구체적이고 세부적인 실행 방안이 마련되어야 한다. 이러한 방안은 법적 규제와 더불어 기술적 가이드라인이 동시에 충족되어야 실행 가능할 것이다. 예를 들어, 오염 토양을 정화하는 기술들의 공정별 토양 질을 떨어뜨리는 단위 요소들을 분석하고, 이를 개선할 수 있는 기술적 해결책과 법적 규제가 함께 제시되어야 실행 가능할 방안이 될 수 있을 것이다.

## Acknowledgements

본 결과물은 환경부의 재원으로 환경산업기술원(KEITI)의 사업 지원을 받아 연구되었다(과제번호: 2020002480002).

## References

- Abayneh, A. B. and Quanyuan, C. (2018) Surfactant enhanced soil washing for removal of petroleum hydrocarbons from contaminated soils: A Review, *Pedosphere*, 28(3), 383-410.
- Adams, R. H. and Guzmán-Osorioheavily, F. J. (2008) Evaluation of land farming and chemico-biological stabilization for treatment of contaminated sediments in a tropical environment. *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, v.5(2), p.169-178.
- Adriano, D. C., Page, A. L., Elseewi, A. A., Chang, A. and Straughan, I. A. (1980) Utilization and disposal of fly ash and other coal residues in terrestrial ecosystem: a review. *J. Environ. Qual.*, v.9, p.333-344.
- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S. and Ok, Y. S. (2014) Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. *Chemosphere*, v.99, p.19-33.
- Ahmaruzzaman, M. (2010) A review on the utilization of

- fly ash. *Prog. Energy Combust. Sci.*, v.36, p.27-363.
- Albiach, R., Canet, R. and Pomares, F. (2000) Ingelmo, F. Microbial biomass content and enzymatic activities after the application of organic amendments to a horticultural soil. *Bioresour. Technol.*, v.75, p.43-48.
- Aleem, M., Hanna, N. and Sabry, S. (2000) Relationship between wheat root characteristics and grain yield in sandy and clay soils. *Ann. Agric. Sic.*, 3(Special), p.977-995.
- Ali, H., Khan, E. and Sajad, M. A. (2013) Phytoremediation of heavy metals concepts and applications. *Chemosphere*, v.91(7), p.869-881(2013).
- Al-Omran, A. M., Sheta, A. S., Falatah, A. M. and Al-Harbi, A. R. (2005) Effect of drip irrigation on squash (*Cucurbita pepo*) yield and water-use efficiency in sandy calcareous soils amended with clay deposits. *Agric. Water Manage.*, v.73, p.43-55.
- Anastopoulos, I., Massas, I. and Pogka, E.E., Chatzipavlidis, I., Ehaliotis C. (2019) Organic materials may greatly enhance Ni and Pb progressive immobilization into the oxidisable soil fraction, acting as providers of sorption sites and microbial substrates. *Geoderma*, v.353, p.482-492.
- Angin, D. and Şensöz, S. (2014) Effect of pyrolysis temperature on chemical and surface properties of biochar of rapeseed (*Brassica napus L.*). *Int. J. Phytoremed.*, 16, 684-693.
- Antolín, M. C., Pascual, L., García, C., Polo, A. and Sánchez-Díaz M. (2005) Growth, yield and solute content of barley in soils treated with sewage sludge under semiarid Mediterranean conditions. *Field Crop. Res.*, v.94, p.224-237.
- Badia, D. and Marti, C. (2003) Plant ash and heat intensity effects on chemical and physical properties of two contrasting soils. *Arid Land Res. Manag.*, v.17(1), p.23-41.
- Bandick, A. K. and Dick, R. P. (1999) Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biol. Biochem.*, v.31, p.1471-1479.
- Beesley, L. and Marmiroli, M. (2011) The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar. *Environ. Pollut.*, v.159, p.474-480.
- Beesley, L., Moreno-Jiménez, E. and Gomez-Eyles, J. L. (2010) Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil. *Environ. Pollut.*, v.158(6), p.2282-2287.
- Beiyuan, J. Z., Lau, A. Y. T., Tsang, D. C. W., Zhang, W. H., Kao, C. M., Baek, K., Ok, Y. S. and Li, X. D. (2018) Chelant-enhanced washing of CCA-contaminated soil: Coupled with selective dissolution of soil stabilization. *Sci. Total Environ.*, v.612, p.1463-1472.
- Beiyuan, J. Z., Tsang, D. C. W., Valix, M., Zhang, W. H., Yang, X., Ok, Y. S. and Li, X. D. (2017) Selective dissolution followed by EDDS washing of an e-waste contaminated soil: Extraction efficiency, fate of residual metals, and impact on soil environment. *Chemosphere*, v.166, p.489-496.
- Benitez, E., Romero, E., Gómez, M., Gallardo-Lara, F. and Nogales, R. (2001) Biosolids and biosolids-ash as sources of heavy metals in a plant-soil system. *Water Air Soil Poll.*, v.132, p.75-87.
- Benkhelifa, M., Belkhdja, M., Daoud, Y., and Tessier, D. (2008) Effects of Maghnan bentonite on physical properties of sandy soils under semi-arid Mediterranean climate. *PK. J. biol. sci.* v.11(1), p.17-25.
- Bertrand, M., Barot, S., Blouin, M., Whalen, J., de Oliveira, T. and Roger-Estrade, J. (2015) Earthworm services for cropping systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, v.35, p.553-567.
- Besalatpour, A., Hajabbasi, M. A., Khoshgoftarmanesh, A. H. and Dorostkar, V. (2011) Landfarming process effects on biochemical properties of petroleum contaminated soils. *Soil. Sediment. Contam.*, v.20(2), p.234-248.
- Biache, C., Mansuy-Huault, L., Faure, P., Munier-Lamy, C. and Leyval, C. (2008) Effects of thermal desorption on the composition of two coking plant soils: impact on solvent extractable organic compounds and metal bioavailability. *Environ. Pollut.*, v.156(3), p.671-677.
- Blouin, M., Hodson, M. E., Delgado, E. A., Baker, G., Brussaard, L., Butt, K. R., Dai, J., Dendooven, L., Peres, G., Tondoh, J. E., Cluzeau, D. and Brun, J. J. (2013) A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *Eur. J. Soil Sci.*, v.64, p.161-182.
- Bonanomi, G., Ascoli, R. D., Scotti, R., Gaglione, S. A., Caceres, M.G., Sultana, S., Scelza, R., Rao, M.A. and Zoina, A. (2014) Soil quality recovery and crop yield enhancement by combined application of compost and wood to vegetables grown under plastic tunnels. *Agric., Ecosyst. Environ.*, v.192(1), p.1-7.
- Bonnard, M., Devin, S., Leyval, C. and Morel, J. L., (2010) Vasseur, P. The influence of thermal desorption on genotoxicity of multipolluted soil. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, v.73(5), p.955-960.
- Borchardt, G., (1989) Smectites. In: Dixon, J. B., Weed, S. B.(Eds.), *Minerals in soil environments*, SSSA Book Ser., 1, SSSA. Madison, WI, p.675-727.
- Bossolani, J. W., Crusciol, C. A. C., Merloti, L. F., Moretti, L. G., Costa, N. R., Tsai, S. M. and Kuramae, E. E. (2020) Long-term lime and gypsum amendment increase nitrogen fixation and decrease nitrification and denitrification gene abundances in the rhizosphere and soil in a tropical no-till intercropping system. *Geoderma*, v.375(1), 114476p.
- Boyer, S. and Wratten, S. D. (2010) The potential of earthworms to restore ecosystem services after opencast mining - a review. *Basic Appl. Ecol.*, v.11, p.196-203.
- Butt, K. R. (1999) Inoculation of earthworms into reclaimed soils: the UK experience. *Land Degrad. Dev.*, v.10, p.565-575.
- Butt, K. R. (2008) Earthworms in soil restoration: lessons learned from United Kingdom case studies of land reclamation. *Restor. Ecol.*, v.16, p.637-641.
- Byun, K.W. (2019) Soil conditioner and manufacturing method thereof, Korean patent, 10-2023738.
- Caires, E. F. and Guimarães, A. M. (2018) A novel phosphogypsum application recommendation method under continuous no-till management in Brazil. *Agron. J.*, v.110(5), p.1987-1995
- Caires, E. F., Joris, H. A. W. and Churka, S. (2011) Long-

- term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. *Soil Use Manage.*, v.27(1), p.45-53.
- Campisi, T., Abbondanzi, F., Faccini, B., Di Giuseppe, D., Malferrari, D., Coltorti, M., Laurora, A. and Passaglia, E. (2016) Ammonium-charged zeolite effects on crop growth and nutrient leaching: greenhouse experiments on maize (*Zea mays*). *Catena*. v.140, p.66-76.
- Capowiez, Y., Dittbrenner, N., Rault, M., Triebkorn, R., Hedde, M. and Mazzia, C. (2010) Earthworm cast production as a new behavioural biomarker for toxicity testing. *Environ. Pollut.*, v.158, p.388-393.
- Cébron, A., Beguiristain, T., Faure, P., Norini, M. P., Masfarau, J. F. and Leyval, C. (2009) Influence of vegetation on the in situ bacterial community and polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) degraders in aged PAH-contaminated or thermal-desorption-treated soil. *Appl. Environ. Microbiol.*, v.75(19), p.6322-6330.
- Certinini, G., (2005) Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, v.143(1), p.1-10.
- Chaudhary, D. K., Bajagain, R., Jeong, S. W. and Kim, J. (2019) Development of a bacterial consortium comprising oil-degraders and diazotrophic bacteria for elimination of exogenous nitrogen requirement in bioremediation of diesel-contaminated soil. *World J. Microbiol. Biotechnol.*, v.35(7), p.99.
- Chen, S. (2015) Evaluation of Compost Topdressing, Compost Tea and Cultivation on Tall Fescue Quality, Soil Physical Properties and Soil Microbial Activity. MS Thesis. Department of Plant Sciences and Landscaping Architecture, University of Maryland, College Park, College Park, MD.
- Chen, Y., Camps-Arbestain, M., Shen, Q., Singh, B. and Cayuela, M. L. (2018) The long-term role of organic amendments in building soil nutrient fertility: a meta-analysis and review. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, v.111, p.103-125.
- Chintala, R., Mollinedo, J., Schumacher, T. E., Malo, D. D. and Julson, J. L. (2014) Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. *Archives Agron. Soil Sci.*, v.60(3), p.393-404.
- Choi, H. S., Jung, J. S., Kuk, Y. I., Choi, I. Y. and Jung, S. K. (2019) Effect of Fertigation with Indigenous Microorganism and EM on Soil Chemical and Microbial Properties and Growth of Cherry Tomatoes. *J. Korea Organic Resources Recycling Association*, v. 27(4), p.15-24.
- Choi, S. I., Lee, G. T. and Yang, J. K. (2009) Soil pollution management and restoration. Donghwa Tech. Publish., 209p.
- Croger, C. G. (2005) Potential compost benefits for restoration of soils disturbed by urban development, *Compost Sci. Util.*, v.13, p.243-251.
- Curry, J. P. and Boyle, K. E. (1987) Growth rates, establishment, and effects on herbage yield of introduced earthworms in grassland on reclaimed cutover peat. *Biol. Fert. Soils*, v.3, p.95-98.
- Czaban, J. and Siebielec, G. (2013) Effects of bentonite on sandy soil chemistry in a long-term plot experiment (II); effect on pH, CEC, and macro- and micronutrients. *Pol. J. Environ. Stud.*, v.22(6), p.1669-1676.
- Diacono, M. and Montemurro, F. (2010) Long-term effects of organic amendments on soil fertility: a review. *Agron. Sustain. Dev.*, v.30, p.401-422.
- Diacono, M. and Montemurro, F. (2018) Long-term effects of organic amendments on soil fertility: a review. *Agron. Sustain. (2010) Dev.*, v.30, p.401-422, in: Ayer, N.W. and Dias, G. Supplying renewable energy for Canadian cement production: life cycle assessment of bioenergy from forest harvest residues using mobile fast pyrolysis units. *J. Clean. Prod.*, v.175, p.237-25.
- Dinesh, R., Srinivasan, V., Hamza, S. and Manjusha, A. (2010) Short-term incorporation of organic manures and biofertilizers influences biochemical and microbial characteristics of soils under an annual crop [Turmeric (*Curcuma longa* L.)]. *Bioresour. Technol.*, v.101, p.4697-4702.
- Dittbrenner, N., Triebkorn, R., Moser, I. and Capowiez, Y. (2010) Physiological and behavioural effects of imidacloprid on two ecologically relevant earthworm species (*Lumbricus terrestris* and *Aporrectodea caliginosa*). *Ecotoxicology*, v.19, p.1567-1573.
- Dixon, J. B. (1989) Kaolin and serpentine group minerals. In: Dixon, J. B., Weed, S. B. (Eds.), *Minerals in soil environments*, SSSA Book Ser., 1. SSSA, Madison, WI, p.467-525.
- Doran, J. W., Fraser, D. G., Culik, M. N. and Liebhardt, W. C. (1988) Influence of alternative and conventional agricultural management on soil microbial process and nitrogen availability. *Am. J. Altern. Agric.*, v.2, p.99-106.
- Düring, R. A. and Gäth, S. (2002) Utilization of municipal organic wastes in agriculture: where do we stand, where will we go?. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, v.165, p.544-556.
- Dzantor, E. K., Pettigrew, H., Adeleke, E. and Hui, D. (2013) Use of Fly Ash as Soil Amendment for Biofuel Feedstock Production with Concomitant Disposal of Waste Accumulations. WOCA, World of Coal Ash Association, Lexington, KY, April p.22-25.
- Edwards, C. A. and Bohlen, P. J. (1996) *Biology and Ecology of Earthworms. The Influence of Environmental Factors on Earthworms*, Chapman & Hall, UK, London, p.196-229.
- Eibl, J., Maková, J., Javoreková, S., Medo, J., Kintl, A., Lošák, T. and Lukas, V. (2019) Response of microbial activities in soil to various organic and mineral amendments as an indicator of soil quality. *Agron*, v.9, p.485.
- El-Mageed, T. A. A., Rady, M. M., Taha, R. S., El Azeam, S. A., Simpson, C. R. and Semida, W. M. (2020) Effects of integrated use of residual sulfur-enhanced biochar with effective microorganisms on soil properties, plant growth and short-term productivity of *Capsicum annum* under salt stress. *Scientia Horticulturae*, v.261(5), 108930p.
- Eriksen, J. (2005) Gross sulphur mineralisation-immobilisation turnover in soil amended with plant residues. *Soil Biol. Biochem.*, v.37, p.2216-2224.
- Evanko, C. R. and Dzombak, D. A. (1997) Remediation of metals-contaminated soils and groundwater. GWRTAC

- technol. eval. report, 28.
- Eviner, V. and Chapin, F. (2011) Plant species provide vital ecosystem functions for sustainable agriculture, rangeland management, and restoration. *Calif. Agric.*, v.55(6), p.54-60.
- Fanning, D. S., Keramidas, V. Z. and El-Desoky, M. A. (1989) Micas. In: Dixon, J.B., Weed, S. B.(Eds.), *Minerals in soil environments*, SSSA Book Ser., 1, SSSA. Madison, WI, p.551-634.
- Faucette, L. B., Jordan, C. F., Risse, L. M., Cabrera, M., Coleman, D. C. and West, L. T. (2005) Evaluation of stormwater from compost and conventional erosion control practices in construction activities. *J. Soil Water Conserv.*, v.60, p.288-298.
- Filho, A. C. A. C. Penn C., Crusciol, C. A. C. and Calonego, J. C. (2017) Lime and phosphogypsum impacts on soil organic matter pools in a tropical Oxisol under long-term no-till conditions. *Agric. Ecosyst. Environ.*, v.241, p.11-23.
- Forey, E., Chauvat, M., Coulibaly, S. F. M., Langlois, E., Barot, S. and Clause, J. (2018) Inoculation of an ecosystem engineer (Earthworm: *Lumbricus terrestris*) during experimental grassland restoration: Consequences for above and belowground soil compartments. *Appl. Soil Ecol.*, v.125, p.148-155.
- Fraser, P. M., Beare, M. H., Butler, R. C., Harrison-Kirk, T. and Piercy, J. E. (2003) Interactions between earthworms (*Aporrectodea caliginosa*), plants and crop residues for restoring properties of a degraded arable soil. *Pedobiologia*, v.47, p.870-876.
- Galang, M. A., Markewitz, D. and Morris, L. A. (2010) Soil phosphorus transformations under forest burning and laboratory heat treatments. *Geoderma*, v.155(3-4), p.401-408.
- García, C., Hernández, T., Pascual, J. A., Moreno, J. L. and Ros, M. (2000) Microbial activity in soils of SE Spain exposed to degradation and desertification processes: strategies for their rehabilitation. In: García, C., Hernández, T. (Eds.), *Research and Perspectives of Soil Enzymology in Spain*. CEBAS, CSIC, Murcia, p.93-143.
- García, C., Hernández, T., Pascual, J. A., Moreno, J. L. and Ros, M. (2000) Microbial activity in soils of SE Spain exposed to degradation and desertification processes—strategies for their rehabilitation. In: C. Garcia, M. T. Hernández, (Eds.), *Research and Perspectives of Soil Enzymology in Spain*. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura, Murcia, Spain, p.41-143.
- García-Corona, R., Benito, E., Blas, E. D. and Varela, M. E. (2004) Effects of heating on some physical properties related to its hydrological behaviour in two north-western Spanish soils. *Int. J. Wildland Fire*, v.13(2), p.195-199.
- Getachew, A., Bass, A. M., Nelson, P. N. and Bird, M. I. (2016) Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Sci. Total Environ.*, v.543, p.295-306.
- Gill, J. S., Tisdall, J., Kusnarta Sukartono, I. G. M., and McKenzie, B. M., (2004) Physical properties of a clay loam soil mixed with sand. In: *Super Soil 2004: 3rd Australian & New Zealand Soils Conference*, University of Sydney, Australia.
- Giovannini, G., Lucchesi, S. and Giachetti, M. (1990) Effect of heating on some chemical parameters related to soil fertility and plant growth. *Soil Sci.*, v.149(6), p.344-350.
- Givaudan, N., Wiegand, C., Bot, B. L., Renault, D., Pallois, F., Llopis, S. and Binet, F. (2014) Acclimation of earthworms to chemicals in anthropogenic landscapes, physiological mechanisms and soil ecological implications. *Soil Biol. Biochem.*, v.73, p.49-58.
- Glass, D. W., Johnson, D. W., Blank, R. R. and Miller, W. W. (2008) Factors affecting mineral nitrogen transformations by soil heating: a laboratory-simulated fire study. *Soil Sci.*, v.173(6), p.387-400.
- Gond, D. P., Singh, S., Pal, A. and Tewary, B. K. (2013) Growth, yield and metal residues in *Solanum melongena* grown in fly ash amended soils. *J. Environ. Biol.*, p.539-544.
- Gonzalez-Perez, J. A., Gonzalez-Vila, F. J., Almendros, G. and Knicker, H. (2004) The effect of fire on soil organic matter e a review, *Environ. Int.*, v.30(6), p.855-870.
- Guo, A., Ding, L., Tang, Z., Zhao, Z. and Duan, G. (2019) Microbial response to CaCO<sub>3</sub> application in an acid soil in southern China, *J. Environ. Sci.*, 79, 321-329(2019).
- Guo, J. H., Liu, X. J., Zhang, Y., Shen, J. L., Han, W. X., Zhang, W. F., Christie, P., Goulding, K. W. T., Vitousek, P. M. and Zhang, F. S. (2010) Significant acidification in major Chinese croplands, *Science*. v.327, p.1008-1010.
- Guo, X. F., Zhao, G. H., Zhang, G. X., He, Q. S., Wei, Z. B., Zheng, W., Qian, T. W. and Wu, Q. T. (2018) Effect of mixed chelators of EDTA, GLDA, and citric acid on bioavailability of residual heavy metals in soils and soil properties. *Chemosphere*, v.209, p.776-782.
- Guo, X.F., Wei, Z.B., Wu, Q.T., Li, C.P., Qian, T.W. and Zheng, W. (2016) Effect of soil washing with only chelators or combining with ferric chloride on soil heavy metal removal and phytoavailability: field experiments. *Chemosphere*, v.147, p.412-419.
- Hahn, P.G., Bullington, L., Larkin, B., LaFlamme, K., Maron, J. L. and Lekberg, Y. (2018) Effects of short- and long-term variation in resource conditions on soil fungal communities and plant responses to soil biota. *Front. Plant Sci.*, 9, 1605p.
- Han, D., Luo, D., Chen, Y. and Wang, G. (2013) Transfer of Cd, Pb, and Zn to water spinach from a polluted soil amended with lime and organic materials. *J. Soil. Sediment.*, v.13, p.1360-1368.
- Hartl, W., Putz, B. and Erhart, E. (2003) Influence of rates and timing of biowaste compost application on rye yield and soil nitrate levels. *Eur. J. Soil Biol.*, v.39, p.129-139.
- Haynes, R. J. (2009) Reclamation and revegetation of fly ash disposal sites challenges and research needs. *J. Environ. Manag.*, v.90, p.43-53.
- Hazrati, S., Tahmasebi-Sarvestani, Z., Mokhtassi-Bidgoli, A., Modarres-Sanavy, S. A. M., Mohammadi, H. and Nicola, S. (2017) Effects of zeolite and water stress on growth, yield and chemical compositions of *Aloe vera*

- L, *Agric. Water Manage.*, v.181, p.66-72.
- He, Z. L., Calvert, D. V., Alva, A. K., Li, Y. C. and Banks, D. J. (2002) Clinoptilolite zeolite and cellulose amendments to reduce ammonia volatilization in a calcareous sandy soil. *Plant Soil*, v.247, p.253-60.
- Heo, H. J. and Lee, M. H. (2002) Surfactant-enhanced soil washing using tween and tergitol series surfactants for Kuwait soil heavily contaminated with crude oil. *J. Soil Groundw. Environ.*, v.20(5), p.26-33.
- Hera, C. (1996) The role of inorganic fertilizers and their management practices. *Fertilizer Research*, v.43, p.63-81.
- Higa, T. (1991) Effective microorganisms: a biotechnology for mankind, *Proc. First Int. Conf. Kyusei Nat. Farming*, p.8-14.
- Holland, J. E., Bennett, A. E., Newton, A. C., White, P. J., McKenzie, B. M., George, T. S., Pakeman, R. J., Bqailey, J. S., Fornara, D. A. and Hayes, R. C. (2018) Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: a review. *Sci. Total Environ.*, v.610, p.316-332.
- Hong, S. H., Lee, S. M. and Lee, E. Y. (2011) Bioremediation efficiency in oil contaminated soil using microbial agents. *J. Microbiol. Biotechn.*, v.30(3), p.301-307.
- Hooda, P. S. and Alloway, B. J. (1996) The effect of liming on heavy metal concentrations in wheat, carrots and spinach grown on previously sludge-applied soils. *J. Agric. Sci.*, v.127, p.289-294.
- Houben, D., Pircar, J. and Sonnet, P. (2012) Heavy metal immobilization by cost-effective amendments in a contaminated soil: effects on metal leaching and phytoavailability, *J. Geochem. Explor.*, 123, 87-94(2012).
- Hu, C. and Qi, Y. (2013) Long-term effective microorganisms application promote growth and increase yields and nutrition of wheat in China. *Eur. J. Agron.*, v.46, p.63-67.
- Hu, X., Xue, Y., Long, L. and Zhang, K. (2018) Characteristics and batch experiments of acid and alkali-modified corn cob biomass for nitrate removal from aqueous solution. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, v.25(20), p.19932-19940.
- Huang, Y. T., Hseu, Z. Y. and Hsi, H. C. (2011) Influences of thermal decontamination on mercury removal, soil properties, and repartitioning of coexisting heavy metals. *Chemosphere*, v.81, p.1244-1249.
- Hwang, S., Moon, H., Gi, B. and Yun, S. (2014) A study on promotion of recycling of cleaned soil and improvement of management system i off-site remediation. Policy report, 2014-05.
- Im, J. W., Yang, K., Jho, E. H. and Nam, K. P. (2015) Effect of different soil washing solutions on bioavailability of residual arsenic in soils and soil properties. *Chemosphere*, v.138, p.253-258.
- Izquierdo, M. and Querol, X. (2012) Review article - leaching behavior of elements from coal combustion fly ash: an overview. *Int. J. Coal Geol.*, v.94, p.54-66.
- Jayasinghe, G. Y. and Tokashiki, Y. (2012) Influence of coal fly ash pellet aggregates on the growth and nutrient composition of *Brassica campestris* and physicochemical properties of greysoils in Okinawa. *J. Plant Nutr.*, v.35, p.453-470.
- Jelusic, M. and Lestan, D. (2014) Effect of EDTA washing of metal polluted garden soils Part I: toxicity hazards and impact on soil properties. *Sci. Total Environ.*, v.475, p.132-141.
- Jelusic, M., Vodnik, D., Macek, I. and Lestan, D. (2014) Effect of EDTA washing of metal polluted garden soils Part II: can remediated soil be used as a plant substrate?. *Sci. Total Environ.*, v.475, p.142-152.
- Jeon, W., Seong, K., Lee, J., Oh, I., Lee, Y. and Ok, Y. S. (2010) Effects of Green Manure and Carbonized Rice Husk on Soil Properties and Rice Growth. *Korean J. Soil Sci. Fert.*, v.43(4), p.484-489.
- Jeong, S. W. (2019) Estimation of remediation cost for reducing cancer and non-cancer risk of a fuel contaminated site. *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, v.41(5), p.286-291.
- Jez, E. and Lestan, D. (2016) EDTA retention and emissions from remediated soil. *Chemosphere*, v.151, p.202-209.
- Jho, E. H., Ryu, H., Shin, D., Kim, Y. J., Choi, Y. J. and Nam, K. P. (2014) Prediction of landfarming period using degradation kinetics of petroleum hydrocarbons: test with artificially contaminated and field-aged soils and commercially available bacterial cultures. *J. Soil. Sediment.*, v.14(1), p.138-145.
- Joghian, A. K., Ghalavand, A., Aghaalikhani, M., Gholamhoseini, M. and Dolatabadian, A. (2012) How organic and chemical nitrogen fertilizers, zeolite, and combinations influence wheat yield and grain mineral content. *J. Crop Improv.*, v.26(1), p.116-129.
- Jones, C. G., Lawton, J. H. and Shachak, M. (1994) Organisms as ecosystem engineers. *Oikos*, v.69, p.373-386.
- Jones, D. L., Rousk, J., Edwards-Jones, G., DeLuca, T. H. and Murphy, D. V. (2012) Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial. *Soil Biol. Biochem.*, v.45, p.113-124.
- Jouquet, P., Blanchart, E. and Capowiez, Y. (2014) Utilization of earthworms and termites for the restoration of ecosystem functioning. *Appl. Soil Ecol.*, v.73, p.34-40.
- Jung, B. G. Ro, G. H. and Sung, N. C. (2009) Removal characteristics of TPHs and heavy metals in contaminated soil with ultrasonic washing. *J. Environ. Sci. Intl.*, v.18(4), p.473-478.
- Kaiser, K. and Zech, W. (2000) Dissolved organic matter sorption by mineral constituents of subsoil clay fractions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, v.163(5), p.531-535.
- Karhu, K., Mattila, T., Bergström, I. and Regina, K. (2011) Biochar addition to agricultural soil increased CH<sub>4</sub> uptake and water holding capacity-Results from a short term pilot field study. *Agric. Ecosyst. and Environ.*, v.140(1-2), p.309-313.
- Kaurin, A., Cernilogar, Z. and Lestan, D. (2018) Revitalisation of metal-contaminated, EDTA-washed soil by addition of unpolluted soil, compost and biochar: Effects on soil enzyme activity, microbial community composition and abundance. *Chemosphere*, v.193, p.726-736.
- Ketterings, Q. M., Bigham, J. M. and Laperche, V. (2000) Changes in soil mineralogy and texture caused by slash-and-burn fires in Sumatra, Indonesia. *Soil Sci.*

- Soc. Am. J., v.64(3), p.1108-1117.
- Khan, A. Z., Nigar, S., Khalil, S. K., Wahab, S., Rab, A., Khattak, M. K. and Henmi, T. (2013) Influence of synthetic zeolite application on seed development profile of soybean grown on allophanic soil. Pak. J. Bot., v.45(3), p.1063-1068.
- Khan, M. R. and Singh, W. N. (2001) Effects of soil application of fly ash on the fusarial wilt on tomato cultivars. Int. J. Pest Manag., v.47, p.293-297.
- Khorram, M. S., Zhang, W., Lin, D., Zheng, Y., Fang, H. and Yu, Y. (2016) Biochar: a review of its impact on pesticide behavior in soil environments and its potential applications. J. Environ. Sci. (China), v.44, p.269-279.
- Kiersch, K., Kruse, J., Regier, T. Z. and Leinweber, P. (2012) Temperature resolved alteration of soil organic matter composition during laboratory heating as revealed by C and N XANES spectroscopy and Py-FIMS. Thermochim. Acta, v.537, p.36-43.
- Kim, D., Ahn, B. and Lee, J. (2013) Impact of Environmentally-friendly Organic Agro-Materials on Chemical Properties of Remediated Soils. Korean J. Organic Aari., v.21(4), p.753-767.
- Kim, I. S. and Lee, M. H. (2012) Pilot scale feasibility study for in-situ chemical oxidation using H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> solution conjugated with biodegradation to remediate a diesel contaminated site. J. Hazard. Mater., v.241-242, p.173-181.
- Kim, K. H., Kim, K. Y., Kim, J. G., Sa, T. M., Suh, J. S., Shon, B. G., Yang, J. E., Eom, K. C., Lee, S. E., Jung, K. Y., Chung, D. Y., Jung, Y. T., Jung, J. D. and Hyun, H. N. (2008) Soil science. Hyangmunsa, 193p.
- Kim, M., Kim, Y., Kang, S., Yun, H. and Hyun, B. (2012) Long-term Application Effects of Fertilizers and Amendments on Changes of Soil Organic Carbon in Paddy Soil. Korean J. Soil Sci. Fert., v.45(6), p.1108-1113.
- Kim, Y. K., Jin, S. H., Choi, S. D., Lee, G. D. and Ra, D. G. (2011b) EM effectiveness on remediation of oil contaminated soil. J. Korean Soc. Environ. Technol., v.12(3), p.176-181.
- Kim, Y., Lee, S., Ham, S., Kim, H. and Choi, Y. (2011a) Soil Physicochemical Properties by applied with Mixed Ratio Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Casts. Asian J. Turfgrass Sci., v. 25(1), p.106-111.
- Ko, I. W., Chang, Y. Y., Lee, C. H. and Kim, K. W. (2005) Assessment of pilot-scale acid washing of soil contaminated with As, Zn and Ni using the BCR three-step sequential extraction. J. Hazard. Mater., v.127(1), p.1-13.
- Koh, I. H., Kim, G. S., Chang, Y. Y., Yang, J. K. and Moon, D. H. (2017) Characteristics of agricultural paddy soil contaminated by lead after bench-scale in-situ washing with FeCl<sub>3</sub>. J. Soil Groundw. Environ., v.22(1), p.18-26.
- KEITI (Korea environmental industry & technology institute) (2019) Trend analysis and DB construction for soil, groundwater technology, industry, and manpower statistics.
- Kranz, C. N., McLaughlin, R. A., Johnson, A., Miller, G. and Heitman, J. L. (2020) The effects of compost incorporation on soil physical properties in urban soils - A concise review, J. Environ. Manage., v.261, 110209p.
- Kristensen, A. H., Henriksen, K., Mortensen, L., Scow, K.M. and Moldrup, P. (2010) Soil physical constraints on intrinsic biodegradation of petroleum vapors in a layered subsurface. Vadose Zone J., v.9(1), p.137-147.
- Kumar, A., Joseph, S., Tsechansky, L., Privat, K., Schreiter, I. J., Schüth, C. and Graber, E. R. (2018) Biochar aging in contaminated soil promotes Zn immobilization due to changes in biochar surface structural and chemical properties. Sci. Total Environ., v.626, p.953-961.
- Kumari, A., Lal, B. and Rai, U. N. (2016) Assessment of native plant species for phytoremediation of heavy metals growing near NTPC sites, Kahalgaon, India. Int. J. Phytorem., v.18(6), p.592-597.
- Lazányi, J. (2005) Effects of bentonite on the water budget of sandy soil. Culture Technology for Wheat and Corn. Symp. Int., July p.7-8.
- Lee, D. S., Lim, S. S., Park, H. J., Yang, H. I., Park, S. I., Kwak, J. H. and Choi, W. J. (2019) Fly ash and zeolite decrease metal uptake but do not improve rice growth in paddy soils contaminated with Cu and Zn. Environ. Inter., v.129, p.551-564.
- Lee, M. H., Chung, S. Y., Kang, D. W., Choi, S. L. and Kim, M. C. (2002) Surfactant enhanced in-situ soil flushing pilot test for the soil and groundwater remediation in an oil contaminated site. J. Soil Groundw. Environ., v.7(4), p.77-86.
- Lee, M. Y. (2011) Landfarming treatment on aged and freshly diesel-contaminated soils. Ph.D. thesis, Korea University.
- Lee, S., Kim, Y., Ham, S., Lim, H., Choi, Y. and Park, K. (2013) Effect of Soldier Fly Casts Mixed Soil on Change of Soil Properties in Root Zone and Growth of Zoysiagrass. Weed Turf. Sci., v.2(3), p.298-305.
- Lehmann, J. (2012) Biochar for environmental management: an introduction Biochar. Environ. Manag. Sci. Tech., v.25, p.15801-15811.
- Li, H. Y., Wang, H., Wang, H. T., Xin, P. Y., Xu, X. H., Ma, Y., Liu, W. P., Teng, C. Y., Jiang, C. L., Lou, L. P., Arnold, W., Cralle, L., Zhu, Y. G., Chu, J. F., Givert, J. A. and Zhang, Z. J. (2018) The chemodiversity of paddy soil dissolved organic matter correlates with microbial community at continental scales. Microbiome, v.6, p.187.
- Li, M., Ren, L., Zhang, J., Luo, L., Qin, P., Zhou, Y., Huang, C., Tang, J., Huang, H. and Chen, A. (2019) Population characteristics and influential factors of nitrogen cycling functional genes in heavy metal contaminated soil remediated by biochar and compost. Sci. Tot. Environ., v.651, p.2166-2174.
- Li, R. R. Duan, N. and Zhang, Y. H., (2017) Co-digestion of chicken manure and microalgae Chlorella 1067 grown in the recycled digestate: nutrients reuse and biogas enhancement. Waste Manag., v.70, p.247-254.
- Lim, J. E., Ahmad, M., Usman, A. R., Lee, S. S., Jeon, W., Oh, S., Yang, J. E. and Ok, Y. S. (2013) Effects of natural and calcined poultry waste on Cd, Pb and As mobility in contaminated soil. Environ. Earth Sci., v.69(1), p.11-20.
- Lim, M. W., Von Lau, E. and Poh, P. E. (2016a) A

- comprehensive guide of remediation technologies for oil contaminated soil e present works and future directions. *Mar. Pollut. Bull.*, v.109, p.14-45.
- Lim, S. S., Lee, D. S., Kwak, J. H., Park, H. J., Kim, H. Y. and Choi, W. J. (2016b) Fly ash and zeolite amendments increase soil nutrient retention but decrease paddy rice growth in a low fertility soil. *J. Soils Sediments*, v.16(3), p.756-766.
- Liu, B., Mørkved, P. T., Frostegård, A. and Bakken, L. R. (2010) Denitrification gene pools, transcription and kinetics of NO, N<sub>2</sub>O and N<sub>2</sub> production as affected by soil pH. *FEMS Microbiol. Ecol.*, v.72(3), p.407-417.
- Liu, X. Y., Rashti, M. R., Esfandbod, M., Powell, B. and Chen, C. R. (2018) Liming improves soil microbial growth, but trash blanket placement increases labile carbon and nitrogen availability in a sugarcane soil of subtropical Australia. *Soil Res.*, v.56(3), p.235-243.
- Logan, T. J., Lindsay, B. J., Goins, L. E. and Ryan, J. A. (1997) Field assessment of sludge metal bioavailability to crops: sludge rate response. *J. Environ. Qual.* v.26, p.534-550.
- Logsdon, S. D., Sauer, P. A. and Shipitalo, M. J. (2017) Compost improves urban soil and water quality. *J. Water Resour. Protect.*, v.9, p.345-357.
- López-Periágo, E., Núñez-Delgado, A. and Diaz-Fierros, F. (2002) Attenuation of groundwater contamination caused by cattle slurry: a plot-scale experimental study. *Bioresour. Technol.*, v.84(2), p.105-111.
- López-Periágo, E., Núñez-Delgado, A. and Diaz-Fierros, F. (2000) Groundwater contamination due to cattle slurry: modelling infiltration on the basis of soil column experiments. *Water Res.*, vol34(3), p.1017-1029.
- Lukić, B., Panico, A., Huguenot, D., Massimiliano, F., van Hullebusch, E. D. and Esposito, G. (2017) A review on the efficiency of landfarming integrated with composting as a soil remediation treatment. *Environ. Technol. Rev.*, 6(1), 94-116.
- Luo, Y., Dungalit, J. A. J., Zhao, X., Brookes, P. C., Durenkamp, M., Li, G. and Lin, Q. (2018) Pyrolysis temperature during biochar production alters its subsequent utilization by microorganisms in an acid arable soil. *Land Degrad. Dev.*, 29, 2183-2188.
- Ma, F., Zhang, Q., Xu, D., Hou, D., Li, F. and Gu, Q. (2014) Mercury removal from contaminated soil by thermal treatment with FeCl<sub>3</sub> at reduced temperature. *Chemosphere*, v.117, p.388-393.
- Mahar, A., Ping, W., Ronghua, L. and Zhang, Z. (2015) Immobilization of lead and cadmium in contaminated soil using amendments: a review. *Pedosphere*, 25(4), 555-568.
- Mahmood, F., Khan, I., Ashraf, U., Shahzad, T., Hussain, S. Shahid, M., Abid, M. and Ullah, S. (2017) Effects of organic and inorganic manures on maize and their residual impact on soil physico-chemical properties. *J. Soil Sci. Plant Nutr.*, v.17, p.22-32.
- Maiti, P. S., Sah, K. D., Gupta, S. K. and Banerjee, S. K. (2001) Evaluation of sewage sludge as a source of irrigation and manure. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, v.40, p.168-172.
- Maiti, S. K. and Ghosh, D. (2020) Chapter 24 - Plant-soil interactions as a restoration tool, *Climate Change and Soil Interactions*, p.689-730.
- Makino, T. (2014) Heavy metal contamination in Japan. *Proc. Int. Forum Soil Groundw.*, KME (Korea Ministry of Environment), Seoul, Korea, 45p.
- Makino, T., Kamiya, T., Takano, H., Itou, T., Sekiya, N., Sasaki, K., Maejima, Y. and Sugahara, K. (2007) Remediation of cadmium-contaminated paddy soils by washing with calcium chloride: verification of on-site washing. *Environ. Pollut.*, v.147, p.112-119.
- Makino, T., Takano, Y., Kamiya, T., Itou, T., Sekiya, N., Inahara, M. and Sakurai, Y. (2008) Restoration of cadmium-contaminated paddy soils by washing with ferric chloride: Cd extraction mechanism and bench-scale verification. *Chemosphere*, v.70, p.1035-1043.
- Makoi, J. H. J. R. and Ndakidemi, P. A. (2008) Selected soil enzymes : Examples of their potential roles in the ecosystem. *Afr. J. Biotechnol.*, v.7(3), p.181-191.
- Malekian, R., Abedi-Koupai, J. and Eslamian, S. S. (2011) Influences of clinoptilolite and surfactant-modified clinoptilolite zeolite on nitrate leaching and plant growth. *J. Hazard. Mater.*, v.185, p.970-976.
- Manyà, J. J., (2012) Pyrolysis for biochar purposes: a review to establish current knowledge gaps and research needs. *Environ. Sci. Technol.*, v.46, 7939p.
- Marashi, A. R. A. and Scullion, J. (2003) Earthworm casts form stable aggregates in physically degraded soils. *Biol. Fertil. Soils*, v.37, p.375-380.
- Marin, J. A. Hernandez, T. and Garcia, C. (2005) Bioremediation of oil refinery sludge by landfarming in semiarid conditions: Influence on soil microbial activity. *Environ. Res.*, v.98(2), p.185-195.
- Mattana, S., Petrovicová, B., Landi, L., Gelsomino, A., Cortés, P., Ortiz, O. and Renella, G. (2014) Sewage sludge processing determines its impact on soil microbial community structure and function. *Appl. Soil Ecol.*, v.75, p.150-161.
- Mattigod, S. V., Rai, D., Eary, L. F. and Ainsworth, C. C. (1990) Geochemical factors controlling the mobilization of inorganic constituents from fossil fuel combustion residues: I. Review of the major elements. *J. Environ. Qual.*, v.19, p.188-201.
- Ministry of Environment (2009) The first Soil Environment Conservation Master Plan.
- Ministry of Environment (2020) The second Soil Environment Conservation Master Plan.
- Mishra, P., Prasad, S. S., Babu, B. M. and Varalakshmi, L. (2001) Bentonite as an ameliorant in an alfisol a laboratory study. *J. Irrig. Drain. Eng.*, v.127(2), p.118-122.
- Mohammadshirazi, F., Brown, V. K., Heitman, J. L. and McLaughlin, R. A. (2016) Effects of tillage and compost amendment on infiltration in compacted soils. *J. Soil Water Conserv.*, v.71(6), p.443-449.
- Mojid, M. A., Wyseure, G. C. L. and Mustafa, S. M. T. (2012) Water use efficiency and productivity of wheat as a function of clay amendment. *Environ. Control Biol.*, v.50, p.347-362.
- Moon, D. H., Chang, Y. Y., Lee, M. H., Cheong, K. H., Ji, W. H., Koh, I. H., Choi, Y. L. and Park, J. H. (2016) Soil washing of heavy metal contaminated paddy soil using a FeCl<sub>3</sub> solution. *Proc. Int. Res. Symp. Eng. Technol.*, Singapore, p.152-153.



- Mudrak, O., Uteseny, K. and Frouz, J. (2012) Earthworms drive succession of both plant and Collembola communities in post-mining sites. *Appl. Soil. Ecol.*, v.62, p.170-177.
- Murphy, P. N. C. (2007) Lime and cow slurry application temporarily increases organic phosphorus mobility in an acid soil. *Eur. J. Soil. Sci.*, v. 58, p.794-801.
- Nair, A. and Ngouajio, M. (2012) Soil microbial biomass, functional microbial diversity, and nematode community structure as affected by cover crops and compost in an organic vegetable production system. *Appl. Soil Ecol.*, v.58, p.45-55.
- Najafinezhad, H., Sarvestani, Z. T., Sanavy, S. A. M. M. and Naghavi, H. (2015) Evaluation of yield and some physiological changes in corn and sorghum under irrigation regimes and application of barley residue, zeolite and superabsorbent polymer. *Arch. Agron. Soil Sci.*, v.61(7), p.891-906.
- Ndona, R. K., Friedel, J. K., Spornberger, A., Rinnofner, T. and Jezik, K. (2011) Effective microorganisms' (EM): an effective plant strengthening agent for tomatoes in protected cultivation. *Biol. Agric. Hortic.*, v.27, p.189-203(2011).
- Ning, C., Gao, P., Wang, B., Lin, W., Jiang, N. and Cai, K. (2017) Impacts of chemical fertilizer reduction and organic amendments supplementation on soil nutrient, enzyme activity and heavy metal content. *J. Integr. Agric.*, v.16(8), p.1819-1831.
- Noori, M., Zendehdel, M. and Ahmadi, A. (2006) Using natural zeolite for improvement of soil salinity and crop yield. *Toxicol. Environ. Chem. Rev.*, v.88(1), p.77-84.
- Núñez-Delgado, A. López-Periágo, E. and Diaz-Fierros-Viqueira, F. (1997) Breakthrough of inorganic ions present in cattle slurry: soil column trials. *Water Res.*, 31(11), 2892-2898.
- Núñez-Delgado, A. López-Periágo, E. and Diaz-Fierros-Viqueira, F. (2002) Chloride, sodium, potassium and faecal bacteria levels in surface runoff and subsurface percolates from grassland plots amended with cattle slurry. *Bioresour. Technol.*, 82(3), 261-271.
- Nwaichi, E.O. and Chuku, L.C. (2017) Biological Soil Quality Indicators and Conditioners in a Plant-Assisted Remediation of Crude Oil Polluted Farmland. *J. Environ. Prot.*, v.8(13), DOI: 10.4236/jep.2017.813100.
- O'Brien, P. L., DeSutter, T. M. and Wick, F. F. (2018) Thermal remediation alters soil properties - a review. *J. Environ. Manage.*, v.206, p.826-835.
- Oh, T.G. (2004) Phytoremediation of diesel fuel contaminated soil using herbaceous plants. Master thesis, Korea University.
- Olson, N. C., Gulliver, J. S., Nieber, J. L. and Kayhanian, M. (2013) Remediation to improve infiltration into compact soils. *J. Environ. Manage.*, v.117, p.85-95.
- Onagwu, B. O. (2019) Organic amendments applied to a degraded soil: short term effects on soil quality indicators. *African J. Agric. Res.*, v.14(4), p.218-225.
- Othman, N., Irwan, J. M., Hussain, N. and Abdul, S. T. (2011) Bioremediation a potential approach for soil contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons: an overview. *Int. J. Sustain. Constr. Eng. Technol.*, v.2(2), p.48-53.
- Ozbahce, A., Tari, A. F., Gonulal, E. and Simsekli, N. (2018) Zeolite for enhancing yield and quality of potatoes cultivated under water-deficit conditions. *Potato Res.*, p.1-13.
- Palansooriya, K. N., Shaheen, S. M., Chen, S. S., Tsang, D. C. W., Hashimoto, Y., Hou, D., Bolan, N. S., Rinklebe, J. and Oka, Y. S. (2020) Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review. *Environ. Int.*, v.134, 105046p.
- Pandey, V. C. and Singh, N. (2010) Impact of fly ash incorporation in soil systems. *Agric. Ecosyst. Environ.*, v.136, p.16-27.
- Pang, Z., Tayyab, M., Kong, C., Hu, C., Zhu, Z., Wei, X. and Yuan, Z. (2019) Liming positively modulates microbial community composition and function of sugarcane fields. *Agronomy*, v.9(12), 808p.
- Pape, A., Switzer, C., McCosh, C. and Knapp, C. W. (2015) Impacts of thermal and smouldering remediation on plant growth and soil ecology. *Geoderma*, v.243-244, p.1-9.
- Park, J. E., Lee, B., Lee, S., Kim, S. and Son, A. (2017) Application of enzymatic activity and arsenic respiratory gene quantification to evaluate the ecological functional state of stabilized soils nearby closed mines. *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, v.39(5), p.265-276.
- Paul, E. A. and Clark, F. E. (1989) *Soil microbiology and biochemistry*, Academic Press, San Diego, California, p.32-46.
- Peng, Y. and Sun, Y. (2012) Resources characteristics and market situation of bentonites at home and abroad. *Metal Mine*, v.4, p.95-99.
- Pen-Mouratov, S., Shukurov, N., Yu, J., Rakhmonkulova, S., Kodirov, O., Barness, G., Kersten, M. and Steinberger, Y. (2014) Successive development of soil ecosystems at abandoned coal-ash landfills. *Ecotoxicology*, v.23(5), p.880-897.
- Pousada-Ferradás, Y., Seoane-Labandeira, S., Mora-Gutierrez, A. and Núñez-Delgado, A. (2012) Risk of water pollution due to ash-sludge mixtures: column trials. *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, v.9, p.21-29.
- Qayyum, M. F., Rehman, M. Z. U., Ali, S., Rizwan, M., Naeem, A., Maqsood, M. A., Khalid, H., Rinklebe, J. and Ok, Y. S. (2017) Residual effects of monoammonium phosphate, gypsum and elemental sulfur on cadmium phytoavailability and translocation from soil to wheat in an effluent irrigated field. *Chemosphere*, v.174, p.515-523.
- Qian, X., Gu, J., Sun, W., Wang, X. J., Su, J. Q. and Stedfeld, R., (2018) Diversity, abundance, and persistence of antibiotic resistance genes in various types of animal manure following industrial composting. *J. Hazard. Mater.*, v.344, p.716-722.
- Raiesi, F. (2006) Carbon and N mineralization as affected by soil cultivation and crop residue in a calcareous wetland ecosystem in Central Iran. *Agric. Ecosyst. Environ.*, v.112(1), p.13-20.
- Ram, L. C. and Mastro, R. E. (2010) Review: an appraisal of the potential use of fly ash for reclaiming coal mine spoil. *J. Environ. Manage.*, v.91, p.603-617.

- Ram, L. C., Masto, R. E., Singh, S., Tripathi, R. C., Jha, S. K., Srivastava, N. K., Sinha, A. K., Selvi, V. A. and Sinha, A. (2011) An Appraisal of Coal Fly Ash Soil Amendment Technology (FASAT) of Central Institute of Mining and Fuel Research (CIMFR), World Acad. Sci. Eng. Technol., v.76, p.703–714.
- Ram, L. C., Singh, S., Masto, R. E., Jha, S. K., Tripathi, R. C., Sinha, A. K., Srivastava, N. K. and Selvi, V. A. (2010) Potential of Indian Fly ashes as Soil Ameliorant: State-of-the-Art, 25th Int. Conf. Solid Waste Techn. and Manag., Philadelphia USA, March p.14–17.
- Randhawa, P. S., Condrón, L. M., Di, H. J., Sinaj, S. and McLenaghan, R. D. (2005) Effect of green manure addition on soil organic phosphorus mineralisation. Nutr. Cycl. Agroecosyst., v.73, p.181–189.
- Rivas-Pérez, I. M., Fernández-Sanjurjo, M. J., Núñez-Delgado, A., Macías, F., Monterroso, C. and Álvarez-Rodríguez, E. (2016) Aluminum fractionation and speciation in a coal mine dump: twenty years of time-course evolution. Geoderma, v.273, p.45–53.
- Rivas-Pérez, I. M., Fernández-Sanjurjo, M. J., Núñez-Delgado, A., Monterroso Martínez, C., Macías-Vázquez, F. and Álvarez-Rodríguez, E. (2019) Efficacy of two different reclamation strategies to improve chemical properties and to reduce Al toxicity in a lignite mine dump during a 20-year period, Land Degrad. Dev., v.30, p.658–669.
- Roelcke, M., Han, Y., Schleaf, K. H., Zhu, J. G., Liu, G., Cai, Z. C. and Richter, J. (2004) Recent trends and recommendations for nitrogen fertilization in intensive agriculture in eastern China. Pedosphere, v.14, p.449–460.
- Roh, Y., Edwards, N. T., Lee, S. Y., Stiles, C. A., Armes, S. and Foss, J. E. (2000) Thermal treated soil for mercury removal: soil and phytotoxicity tests. J. Environ. Qual., v.29(2), p.415–424.
- Ros, M., Hernandez, M. T. and Garcia, C. (2003) Soil microbial activity after restoration of a semiarid soil by organic amendments. Soil Biol. Biochem., v.35, p.463–469.
- Ros, M., Klammer, S., Knapp, B., Aichberger, K. and Insam, H. (2006) Longterm effects of compost amendment of soil on functional and structural diversity and microbial activity, Soil Use Manage., v.22, p.209–218.
- Rosas, J. M., Vicente, F., Santos, A. and Romero, A. (2013) Soil remediation using soil washing followed by Fenton oxidation. Chem. Eng. J., v.220, p.125–132.
- Roubickova, A., Mudrak, O., Frouz, J., (2009) Effect of earthworm on growth of late succession plant species in postmining sites under laboratory and field conditions. Biol. Fertil. Soils 45, 769–774.
- Saviozzi, A., Biasci, A., Riffaldi, F. and Levi-Minzi, R. (1999) Long term effects of farmyard manure and sewage sludge on some soil biochemical characteristics. Biol. Fertil. Soils, v.30, p.100–106.
- Sax, M. S., Bassuk, N., van Es, H. and Rakow, D. (2017) Long-term remediation of compacted urban soils by physical fracturing and incorporation of compost. Urban For, Urban Green., v.24, p.149–156.
- Schmid, C. J., Murphy, J. A. and Murphy, S. (2017) Effect of tillage and compost amendment on turfgrass establishment on a compacted sandy loam, J. Soil Water Conserv., v.72, p.55–64.
- Scullion, J. and Malik, A. (2000) Earthworm activity affecting organic matter, aggregation and microbial activity in soils restored after opencast mining for coal. Soil Biol. Biochem., v.32, p.119–126.
- Sertsu, S. M. and Sánchez, P. A. (1978) Effects of heating on some changes in soil properties in relation to an Ethiopian land management practice. Soil Sci. Soc. Am. J., 42(6), p.940–944.
- Shaaban, M., Peng, Q., Bashir, S., Wu, Y., Younas, A., Xu, X., Rashti, M.R., Abid, M., Zafar-ul-Hye, M., Núñez-Delgado, A., Horwath, W.R., Jiang, Y., Lin, S. and Hu, R. (2019) Restoring effect of soil acidity and Cu on N<sub>2</sub>O emissions from an acidic soil. J. Environ. Manage., v.250(15), 109535p.
- Shackley, S., Carter, S., Knowles, T., Middelink, E., Haeefe, S., Sohi, S., Cross, A. and Haszeldine, S. (2012) Sustainable gasification-biochar systems? a case-study of rice-husk gasification in Cambodia, part I: context, chemical properties, environmental and health and safety issues, Energy Policy, v.42, p.49–58.
- Shao, Y. C., Zhang, Y. L., Li, Y., Yan, Y. D. and An, Y. C. (2005) Study of effect on using natural minerals to improve soil in irrigating brackish water. J. Soil Water Conserv., v.19, p.100–103 (In Chinese).
- Sharma, B., Sarkar, A., Singh P. and Singh R. P. (2017) Agricultural utilization of biosolids: A review on potential effects on soil and plant grown. Waste Manage., v.64, p.117–132.
- She, W. W., Bai, Y. X., Zhang, Y. Q., Qin, S. G., Feng, W., Sun, Y. F., Zheng, J. and Wu, B. (2018) Resource availability drives responses of soil microbial communities to short-term precipitation and nitrogen addition in a desert shrubland. Front. Microbiol., v.9, 186p.
- Shi, Y., Chen, X. and Shen, S. M. (2002) Mechanisms of organic cementing soil aggregate formation and its theoretical models. Chin. J. Appl. Ecol., v.13, p.1495–1498 (In Chinese).
- Shi, Z., Tang, Z. and Wang, C. (2019) Effect of phenanthrene on the physicochemical properties of earthworm casts in soil. Ecotox. Environ. Saf., v.168, p.348–355.
- Shin, D., Jo, Y. T., Park, S. J. and Park, J. H. (2019) Acidic Soil Improvement and Physicochemical Characteristics Using Red-mud and Biochar. J. Korean Soc. Environ. Eng., v.41(9), p.483–493.
- Sierra, M. J., Milla, N. R., Lopez, F.A., Alguacil, F. J. and Canadas, I. (2016) Sustainable remediation of mercury contaminated soils by thermal desorption. Environ. Sci. Pollut. Res. int., v.23(5), p.4898–4907.
- Singh, R. P. and Agrawal, M. (2007) Effects of sewage sludge amendment on heavy metal accumulation and consequent responses of Beta vulgaris plants. Chemosphere, v.67, p.2229–2240.
- Singh, R. P. and Agrawal, M. (2008) Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. Waste Manage., v.28, p.347–358.
- Singh, R. P. and Agrawal, M. (2010a) Biochemical and physiological responses of Rice (*Oryza sativa* L.)

- grown on different sewage sludge amendments rates. Bull. Environ. Contam. Toxicol., v.23, p.606–612.
- Singh, R. P. and Agrawal, M. (2010b) Effect of different sewage sludge applications on growth and yield of *Vigna radiata* L. field crop: Metal uptake by plant. Ecol. Eng., v.36, p.969–972.
- Singh, R. P., Sharma, B., Sarkar, A., Sengupta, C., Singh, P. and Ibrahim, M. H. (2014) Biological responses of agricultural soils to fly ash amendments. Rev. Environ. Contam. Toxicol., v.232, p.45–60.
- Singh, S., Singh, J. and Vig, A. P. (2016) Earthworm as ecological engineers to change the physico-chemical properties of soil: Soil vs vermicast. Ecol. Eng., v.90, p.1–5.
- Sizmur, T., Palumbo-Roe, B. and Hodson, M. E. (2011) Impact of earthworms on trace element solubility in contaminated mine soils amended with green waste compost. Environ. Pollut., v.159, p.1852–1860.
- Slater, L. and Lesmes, D. (2002) Electrical-hydraulic relationships observed for unconsolidated sediments. Water Resour. Res., v.38(10), p.31-1–31-13.
- Sneath, H. E., Hutchings, T. R. and de Leij, F. A. (2013) Assessment of biochar and iron filing amendments for the remediation of a metal, arsenic and phenanthrene cocontaminated spoil. Environ. Pollut., v.178, p.361–366.
- Snyder, B. A. and Hendrix, P. F. (2008) Current and potential roles of soil macroinvertebrates (earthworms, Millipedes, and Isopods) in Ecological Restoration. Restor. Ecol., v.16(4), p.629–636.
- Somerville, P. D., May, P. B. and Livesley, S. J. (2018) Effects of deep tillage and municipal green waste compost amendments on soil properties and tree growth in compacted urban soils. J. Environ. Manage., v.227, p.365–374.
- Srivastava, N. K. and Ram, L. C. (2009) Bio-restoration of coal mine spoil with fly ash and biological amendments. In: O. P. Chaubey, Bahadur, Vijay, P. K. Shukla(Eds.), Sustainable Rehabilitation of Degraded Ecosystems, Avishkar Publishers, p.77–91.
- Srivastava, N. K., Ram, L. C. and Mastro, R. E. (2014) Reclamation of overburden and lowland in coal mining area with fly ash and selective plantation: a sustainable ecological approach. Ecol. Eng., v.71, p.479–489.
- Stoicescu, J., Haug, M. and Fredlund, D. (1996) Soil water characteristics and pore size distribution of a sand-bentonite mixture. In: Proc. 49th Canadian Geotechnical Conference. St. John's Newfoundland, September, p.23–25.
- Sun, Y., He, Z., Wu, Q., Zheng, J., Li, Y., Wang, Y., Chen, T. and Chi, D. (2020) Zeolite amendment enhances rice production, nitrogen accumulation and translocation in wetting and drying irrigation paddy field. Agricultural Water Management, v.235(31) 106126p.
- Suzuki, S., Noble, A. D., Ruaysoongnern, S. and Chinabut, N. (2007) Improvement in waterholding capacity and structural stability of a sandy soil in Northeast Thailand. Arid Land Res. Manag., v.21(1), p.37–49.
- Tahir, S. and Marschner, P. (2016) Clay amendment to sandy soil effect of clay concentration and ped size on nutrient dynamics after residue addition. J. Soils Sediments, v.16, p.2072–2080.
- Talaat, N. B. and Shawky, B. T. (2014) Protective effects of arbuscular mycorrhizal fungi on wheat (*Triticum aestivum* L.) plants exposed to salinity. Environ. Exp. Bot., v.98, p.20–31.
- Tejada, M., Garcia, C., Gonzalez, J. L. and Hernandez, M. T. (2006) Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: influence on the physical, chemical and biological properties of soil. Soil Biol. Biochem., v.38, p.1413–1421.
- Tejada, M., Moreno, J. L., Hernandez, M. T. and Garcia, C. (2007) Application of two beet vinasse forms on soil restoration: effects on soil properties in an arid environment in southern Spain. Agric. Ecosyst. Environ., v.119, p.289–298.
- Terefe, T., Mariscal-Sancho, I., Peregrina, F. and Espejo, R. (2008) Influence of heating on various properties of six Mediterranean soils. A laboratory study. Geoderma, v.143(3-4), p.273–280.
- Teršič, T. and Gosar, M. (2012) Comparison of elemental contents in earthworm cast and soil from a mercury-contaminated site (Idrija area, Slovenia). Sci. Total Environ., v.430, p.28–33.
- Thomaz, E. L. and Fachin, P. A. (2014) Effects of heating on soil physical properties by using realistic peak temperature gradients. Geoderma, v.230-231, p.243–249.
- TIFAC (2001) Technology linked business opportunity publications. Non Conventional Sources of Plant Nutrient & Soil Conditioners to Enhance Agricultural Productivity, Code no. TMS1551.
- Tirado-Corbalá, R., Slater, B. K., Dick, W. A., Bigham, J. and Muñoz-Muñoz, M. (2019) Gypsum amendment effects on micromorphology and aggregation in no-till Mollisols and Alfisols from western Ohio, USA. Geoderma Regional, v.16, p.e00217.
- Tripathi, R. C., Mastro, R. E. and Ram, L. C. (2009) Bulk use of pond ash for cultivation of wheat maize eggplant crops in sequence on a fallow land Resources. Conserv. Rec., v.54, p.134–139.
- Un, H., Han, M., Seo, K. and Seo, M. (2012) Microbial fertilizer for soil improvement using bottom ash carrier, Korean patent, 10-2012-0009080.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA) (2007) Report on the Environment: Science Report.
- USEPA (2013) Literature Review of Contaminants in Livestock and Poultry Manure and Implications for Water Quality.
- Usman, K., Khan, S. Ghulam, S., Khan, M. U., Khan, N., Khan, M. A. and Khalil, S. K. (2012) Sewage sludge: an important biological resource for sustainable agriculture and its environmental implications. Am. J. Plant Sci., v.3, p.1708–1721.
- Veeresh, H., Tripathy, S., Chaudhuri, D., Ghosh, B. C., Hart, B. and Powell, M. (2003) Changes in physical and chemical properties of three soil types in India as a result of amendment with fly ash and sewage sludge. Environ. Geol., v.43, p.513–520.
- Villa, R. D., Trovó, A. G. and Nogueira, R. F. P. (2010) Soil

- remediation using a coupled process: soil washing with surfactant followed by photo-Fenton oxidation. *J. Hazard. Mater.*, v.174(1-3), p.770-775.
- Vo, T. D. H., Bui, X. T., Lin, C., Nguyen, V. T., Hoang, T. K. D., Nguyen, H. H., Nguyen, P. D., Ngo, H. H. and Guo, W. (2019) A mini-review on shallow-bed constructed wetlands: a promising innovative green roof. *Curr. Opin. Environ. Sci. Health*, v.12, p.38-47.
- Vondrackova, S., Hejzman, M., Tlustoš, P. and Szakova, J. (2013) Effect of quick lime and dolomite application on mobility of elements (Cd, Zn, Pb, As, Fe, and Mn) in contaminated Soils. *Pol. J. Environ. Stud.*, v.22, p.577-589.
- Walker, R. F. (2003) Comparison of organic and chemical soil amendments used in the reforestation of a harsh Sierra Nevada site. *Rest. Ecol.*, v.11, p.446-474.
- Wang, G. Y., Zhang, S. R., Xu, X. X., Zhong, Q. M., Zhang, C. E., Jia, Y. X., Li, T., Deng, O. P. and Li, Y. (2016b) Heavy metal removal by GLDA washing: Optimization, redistribution, recycling, and changes in soil fertility. *Sci. Total Environ.*, v.569-570, p.557-568.
- Wang, G., Zhang, S., Zhong, Q., Xu, X., Li, T., Jia, Y., Zhang, Y., Peijnenburg, W. J. G. M. and Vijver, M. G. (2018) Effect of soil washing with biodegradable chelators on the toxicity of residual metals and soil biological properties. *Sci. Total Environ.*, v.625, p.1021-1029.
- Wang, H., Feng, L. and Chen, Y. (2012) Advances in biochar production from wastes and its applications. *Chem. Ind. Eng. Prog.*, v.63, p.3727-3740.
- Wang, S. Y., Kuo, Y. C., Hong, A., Chang, Y. M. and Kao, C. M. (2016a) Bioremediation of diesel and lubricant oil-contaminated soils using enhanced landfarming system. *Chemospher*, v.164, p.558-567.
- Wardle, D. A. (2002) *Communities and Ecosystems: Linking the Aboveground and Belowground Components*, 34, Princeton University Press.
- Welp, G. (1999) Inhibitory effects of the total and water-soluble concentrations of nine different metals on the dehydrogenase activity of a loess soil. *Biol. Ferti. Soils*, v.30(1-2), p.132-139.
- Witters, N., Mendelsohn, R. O., Van Slycken, S., Weyens, N., Schreurs, E., Meers, E., Tack, F., Carleer, R. and Vangreonsveld, J. (2012) Phytoremediation, a sustainable remediation technology? Conclusions from a case study. I: energy production and carbon dioxide abatement. *Biomass Bioenerg.*, v.39, p.454-469.
- Xie, T., Li, Y., Dong, H., Liu, Y., Wang, M. and Wang, G. (2019) Effects and mechanisms on the reduction of lead accumulation in rice grains through lime amendment, *Ecotox. Environ. Saf.*, v.173(30) p.266-272.
- Xu, J. and Shen, G. (2011) Growing duckweed in swine wastewater for nutrient recovery and biomass production, *Bioresour. Technol.*, v.102(2), p.848-853.
- Yang, H., Kim, D., Ahn, B.W. and Lee, J. (2014) Impacts of Green Manure Crop and Charcoal Applications on Ginger Growth and Soil Properties, *Korean J Organic Aagi.*, v.22(3) p.503-519.
- Yang, J. E. (2003) Development of liquid bio-fertilizer production technology for soil amendment, R&D Program for Small and Medium-sized Enterprises.
- Yao, Y., Gao, B., Zhang, M., Inyang, M. and Zimmerman, A. R. (2012) Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. *Chemosphere*, v.89, p.1467-1471.
- Yi, Q., Zhao, Y., Huang, Y., Wei, G., Hao, Y., Feng, J., Mohamed, U., Pourkashanian, M., Nimmo, W. and Li, W. (2018) Life cycle energy-economic CO<sub>2</sub> emissions evaluation of biomass/coal, with and without CO<sub>2</sub> capture and storage, in a pulverized fuel combustion power plant in the United Kingdom. *Appl. Energy*, v.225, p.258-272.
- Yi, Y. M. (2016) Quality and health assessment of contaminated soil after remediation and amendment treatment. Ph. D. thesis, Yukyong National University.
- Yi, Y. M. and Sung, K. J. (2015) Influence of washing treatment on the qualities of heavy metal-contaminated soil. *Ecol. Eng.*, v.81, p.89-92.
- Yi, Y. M., Oh, C. T., Kim, G. J., Lee, C. H. and Sung, K. J. (2012) Changes in the physicochemical properties of soil according to soil remediation methods. *J. Soil Groundw. Environ.*, 17(4), 36-43
- Yi, Y. M., Park, S. Y., Munster, C., Kim, G. J. and Sung K. J. (2016) Changes in ecological properties of petroleum oil-contaminated soil after low-temperature thermal desorption treatment. *Water Air Soil Pollut.*, v.227(4), p.1-10
- Yoo, J. C., Beiyuan, J. Z., Wang, L., Tsang, D. C. W., Baek, K., Bolan, N.S., Ok, Y. S. and Li, X. D. (2018) A combination of ferric nitrate/EDDS-enhanced washing and sludge-derived biochar stabilization of metal-contaminated soils. *Sci. Total Environ.*, v.616-617, p.572-582.
- Yu, H., Xiao, H. and Wang, D. (2014) Effects of soil properties and biosurfactant on the behavior of PAHs in soil-water systems. *Environ. Syst. Res.*, v.3(1), p.1-11.
- Yuan, P., Shen, B., Duan, D., Adwek, G., Mei, X. and Lu, F. (2017) Study on the formation of direct reduced iron by using biomass as reductants of carbon containing pellets in RHF process. *Energy*, v.141, p.472-482.
- Yuan, P., Wang, J., Pan, Y., Shen, B. and Wu, C. (2019) Review of biochar for the management of contaminated soil: Preparation, application and prospect. *Sci. Total Environ.*, v.659, p.473-490.
- Yun, S., Jin, H., Kang, S., Choi, S., Lim, Y. and Yu, C. (2010) A Comparison on the effect of soil improvement methods for the remediation of heavy metal contaminated farm land soil. *J. Korean Geotech. Soc.*, v.26(7), p.59-70.
- Yun, S. J. (2010) World Trend and Prospect of Environmental Restoration Industry. *Gloval Green Growrh Policy*, v.24, p.1-16.
- Zayani, K., Bousnina, H., Mhiri, A., Hartmann, R. and Cherif, H. (1996) Evaporation in layered soils under different rates of clay amendment. *Agric. Water Manage.*, v.30, p.143-154.
- Zdruli, P., Jones, R. J. A. and Montanarella, L. (2004) Organic Matter in the Soils of Southern Europe. In: *European Soil Bureau Technical Report. EUR 21083*

- EN, Office for Official Publications of the European Communities. Luxembourg, 16p.
- Zeb, A., Li, S., Wu, J., Lian, J., Liu, W. and Sun, Y. (2020) Insights into the mechanisms underlying the remediation potential of earthworms in contaminated soil: A critical review of research progress and prospects. *Sci. Total Environ.*, v.740(20), 140145p.
- Zhai, X., Li, Z., Huang, B., Luo, N., Huang, M., Zhang, Q. and Zeng, G. (2018) Remediation of multiple heavy metal-contaminated soil through the combination of soil washing and in situ immobilization. *Sci. Total Environ.*, 635, 92-99.
- Zhang, H. M., Xu, M. G. and Zhang, F. (2009) Long-term effects of manure application on grain yield under different cropping systems and ecological conditions in China. *J. Agricult. Sci.*, v.147, p.31-42.
- Zhang, K., Chen, L., Li, Y., Brookes, P. C., Xu, J. and Luo, Y. (2017) The effects of combinations of biochar, lime, and organic fertilizer on nitrification and nitrifiers. *Biol. Fertil. Soils*, v.53(1), p.77-87.
- Zhang, Q., Zhou, W., Liang, G., Wang, X. Sun, J. and He, P. (2015) Effects of different organic manures on the biochemical and microbial characteristics of albic paddy soil in a short-term experiment. *PLoS One*, v.10(4), e0124096p.
- Zhen, Z., Liu, H., Wang, N., Guo, L., Meng, J., Ding, N., Wu, G. and Jiang, G. (2014) Effects of manure compost application on soil microbial community diversity and soil microenvironments in a temperate cropland in China. *PLoS One*, v.9(10), e108555p.
- Zhu, H., Yang, J., Yao, R., Wang, X., Xie, W., Zhu, W., Liu, X., Cao, Y. and Tao, J. (2020) Interactive effects of soil amendments (biochar and gypsum) and salinity on ammonia volatilization in coastal saline soil. *Catena*, v.190, p.104527.
- Zhu, J. C., Zhang, Z. Q., Fan, Z. M. and Li, H. R. (2014) Biogas potential, cropland load and total amount control of animal manure in China. *J. Agrometeorol.*, v.33, p.435-445.
- Zihms, S. G., Switzer, C., Irvine, J. and Karstunen, M. (2013) Effects of high temperature processes on physical properties of silica sand, *Eng. Geol.*, 164, 139-145.
- Zoca, S. M. and Penn, C. (2017) An important tool with no instruction manual: a review of gypsum use in agriculture. *Adv. Agron.*, v.144, p.1-44.
- Zupanc, V., Kastelec, D., Lestan, D. and Grcman, H. (2014) Soil physical characteristics after EDTA washing and amendment with inorganic and organic additives. *Environ. Pollu.*, v.186, p.56-62.