

논토양에서 토양개량제 장기연용에 따른 벼의 생육 및 토양특성 평가

권순익^a, 이윤혜^a, 황현영^b, 김성현^{c†}

Long-term Application Effects of Soil Amendments on Yield and Soil Properties in Paddy

Soon-Ik Kwon^a, Yun-Hae Lee^a, Hyun-Young Hwang^b, Sung-Hyun Kim^{c†}

(Received: Dec. 6, 2020 / Revised: Aug. 30, 2021 / Accepted: Aug. 30, 2021)

ABSTRACT: This research evaluated the long-term application effects of different soil amendments on yield, dissolved organic carbon, nitrogen and soil organic carbon stock in rice paddy. The experiment consisted of four different fertilizations; Inorganic fertilization (NPK), NPK+Lime (NPKL), NPK+Silicate (NPKS), NPK+Compost (NPKC). There was no significant difference in rice yield between the treatment groups in 1995, but the rice yields in the NPKL and NPKC treatments in 2019 increased by 4.3% and 14.3% compared to NPK. In terms of soil properties, the pH of NPKS(6.7) and NPKL(6.4) in 2019 increased the most compared to the soil pH before experiment(5.2). The organic matter(OM) content from NPKC treatment increased upto 34 and 27 g kg⁻¹ in year of 1995 and 2019, respectively, compared to before the test. In NPKS and NPKL treatment, labile carbon and nitrogen content, used as a soil quality indicator, increased by 1.1-1.9 times over the control. From these result, it is suggested that type and application rate of soil amendment should be determined based on the soil analysis before cultivation for sustainable agricultural environment and productivity.

Keywords: Soil amendment, Long-term experiment, Yield, Soil properties

초 록: 본 연구는 벼 재배 장기연용 시험포장에서 다른 특성의 토양개량제 사용이 벼(*Oryza sativa*) 생산량, 토양 가용성 탄소, 질소함량 및 탄소 저장량 변화에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 본 시험에 사용된 처리구는 NPK 처리구, NPKS 처리구(NPK+규산), NPKL 처리구(NPK+생석회), NPKC 처리구(NPK+뽕짚퇴비)를 장기연용 포장에서 선별하여 실험을 진행하였다. 1995년 처리구 간의 유의한 벼 수량 차이 없었으나, 2019년 NPKL, NPKC 처리구 벼 수량은 NPK 처리구보다 각각 4.3%와 14.3%씩 증수되었다. 2019년 NPKS와 NPKL 처리구의 토양 pH는 각각 6.7과 6.4였고, 시험 전 토양 pH (5.2)보다 증가하였다. 시험 전과 비교할 때, NPK, NPKS 및 NPKL 처리구의 토양 유기물 함량은 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았으나 NPKC는 1995년과 2019년에 각각 34 g/kg, 27 g/kg으로 증가하였다. 토양의 가용성 탄소 및 질소 함량은 2019년의 NPKS 및 NPKL 처리구에서 1.1에서 1.9배 가량 증가하였다. 이러한 결과를 종합하여 벼 재배시 토양개량제 사용은 재배전 토양검정을 통해 토양의 특성을 파악하여 사용하는 것이 생산량 증대와 더불어 농업환경을 고려한 토양관리방법이라고 판단된다.

주제어: 토양개량제, 장기사용, 수량, 토양특성

^a 국립농업과학원 토양비료과 연구관(Senior Researcher, Soil & Fertilizer Management Division, National Institute of Agricultural Science)

^b 국립농업과학원 유기농업과 연구사(Researcher, Organic Agriculture Division, National Institute of Agricultural Science)

^c 국립농업과학원 토양비료과 연구사(Researcher, Soil & Fertilizer Management Division, National Institute of Agricultural Sciences)

† Corresponding author(e-mail: ksh4054@korea.kr)

1. 서론

세계적으로 농경지 중 논외 경지면적은 식량 공급 문제 해결 등을 위해 증가되고 있는 추세이며, 우리나라 또한 논외 비중은 농경지에서 약 58% 이상을 차지하고 있다.¹⁾ 국내에서 벼의 단위면적당 생산성 증대를 위해 토양 개량 사업을 진행하였으며, 토양개량제로 석회질 비료, 규회석, 광재 규산질비료, 규산질 비료 등을 사용하였다.^{2,3)}

토양개량제 중 석회는 작물 생육에 필요한 칼슘 및 마그네슘 등을 직접적으로 공급하는 역할도 있지만 토양의 pH를 증가시키는 역할로 많이 사용된다.⁴⁾ 토양의 pH 증가는 토양미생물의 활동에 영향을 주며 인산의 가용화를 증대시키므로 작물의 생육에 큰 효과를 준다고 알려져 있다.⁵⁾

규산은 벼와 같은 수도작을 제외한 작물에서는 필수원소가 아니나,^{6,9)} 벼와 같은 화본과 작물에서는 가용성 질소 등 각종 양분의 균형 조절에 의해 수량이 증대되며 벼 내에 규산 함량을 증대시켜 수광태세를 개선함으로써 등숙율이 향상된다고 알려져 있다.^{2,3)} 또한 뿌리의 활력을 증대시켜 독성물질의 해독작용 및 도복 저항성을 높인다고 알려져 있다.^{2,10)} 과거 규산의 공급은 관개수, 토양 및 볏짚퇴비를 통한 공급만으로도 충족할 수 있다고 여겨졌으나, 쌀 생산량의 증대를 위해 규산질 비료를 통해 공급되기 시작하였다.^{11,12)}

수도작에서에서 퇴비의 사용은 주요 유기물 공급 원으로서 토양 비옥도 유지 및 증진과 생산성을 증대시키는 효과적인 토양 관리 방법이다. 토양-작물생산성-품질-농업환경의 균형을 위해 사용하는 퇴비는 토양의 개선과 생산성을 높이는 대표적인 농업용 토양개량제이다. 퇴비는 토양개량제이면서 양분을 함유하고 있어 토양비옥도와 생산성을 향상시킬 수 있으므로 장기간 사용에 따른 작물의 생산성과 토양환경에 미치는 영향에 대한 조사가 필요하다.

토양의 특성과 비옥도 증진 효과는 점진적으로 변화가 나타나므로 장기적인 시험을 통해 토양 특성의 변화 요인과 작물의 생산성 추이 등을 확인 할 수 있다. 장기포장은 동일한 처리를 20년 이상 진행한 시험포장으로 작물 생육 및 토양 특성 변화 데이터를

추적하고, 이를 통해 미래 예측을 가능케 한다.

본 연구는 논토양의 비옥도 증진과 생산성 향상을 위한 합리적인 개량제 관리방안을 모색하고자 66년간 운영되고 있는 장기연용 포장에서 1995년과 2019년의 벼 생산량, 토양화학성 및 토양 유기 탄소 및 질소 특성을 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시험포장 및 처리구 선정

본 시험포장은 1954년부터 현재까지 운영 중인 동일비료 장기연용 시험포장(농촌진흥청 중부작물부)으로 시험기간 중 1995년과 2019년도 토양 결과를 이용하여 토양 개량제의 장기연용 효과를 확인하고자 하였다. 토질은 사양질이며, 유효토심은 100cm로 보통으로 투수성이 빠르며 배수등급은 약간 양호이다. 1954년 시험 전 토양 특성은 Table 1과 같으며, 처리구는 완전 임의배치법에 의해 전체 32개 처리구로 구성되어 있으며,^{11,13)} 그 중 본 논문에서의 처리구는 토양개량제의 종류에 따라 NPK 처리구, NPKS 처리구(NPK+규산), NPKL 처리구(NPK+생석회) 및 NPKC 처리구(NPK+볏짚퇴비)로 설정하였다. 지난 60년간 처리구별 벼 품종 사용 내력은 Fig. 1과 같다.¹¹⁾ 볏짚퇴비는 벼 수확기에 시험포장에서 볏짚을 수거하여 물과 요소비료를 첨가하여 후숙시켜 사용하였다. 퇴비의 평균 양분함량은 현물기준 탄소 51.1%, 질소 1.44%, 인산 0.7%, 탄질을 35이다. 개량제 규산(규산칼슘), 소석회(수산화칼슘) 및 퇴비는 토양에서 가용화되는 기간을 고려하여 4월 중순에 살포 후 경운하였고, 무기질비료는 5월 말경 담수 시작과 함께 처리하여 벼를 이앙하였다. 시비량은 정부가 권장하는 표준시비량의 변화로 1986년~2003년까지는 N-P₂O₅-K₂O=110-70-80 kg/ha, 2004년부터는 110-30-30 로 표준시비하였다. 비료는 기비-분얼비-수비-실비로 분시하였으며, 분시 비율은 질소 50-20-20-10%, 칼리 70-0-30-0% 및 인산 100-0-0-0%로 사용하였다.

Table 1. Chemical Properties of Soil before This Experiment

	pH	Organic matter g kg ⁻¹	Av.P ₂ O ₅ mg kg ⁻¹	Ex. cation		
				1:5 H ₂ O	K	Mg
Year of 1954	5.2	16	120	0.08	3.4	

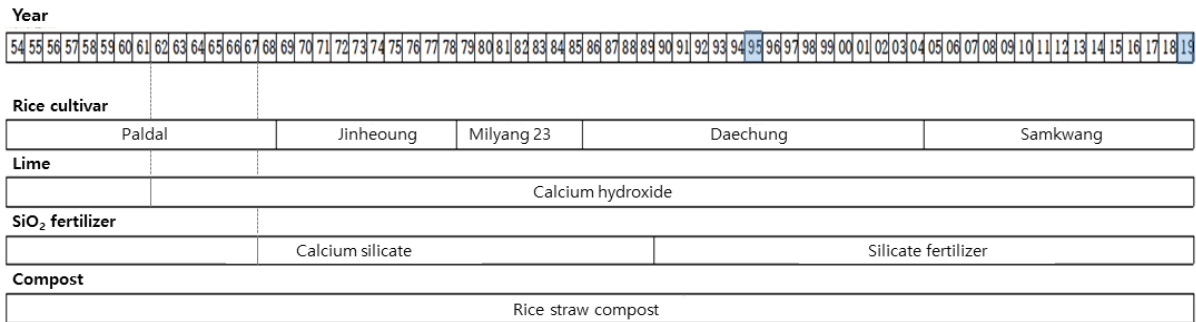


Fig. 1. Field management history of rice cultivar and soil amendments.

2.2. 토양 시료 채취, 토양화학성, 탄소 축적량 및 탄소분획 분석

토양 시료는 유기물층을 제거한 다음 채취하였으며 풍건 및 분쇄한 후 2 mm체에 통과된 시료를 이용해 화학성 분석에 이용하였다. 토양의 pH 및 전기전도도(EC, electrical conductivity)는 토양과 증류수를 1:5비율로 추출하여 측정하였고, 토양 중 탄소 및 질소의 함량은 원소분석기(CHNS-932, Leco)로 분석하였다. 유효인산은 Lancaster법으로 추출하여 몰리브덴 청범으로 720 nm에서 비색계(U-3000, Hitachi)를 이용하였으며, 교환성 양이온은 1N NH₄OAc (pH 7.0)용액을 이용하여 추출 후 유도결합 플라즈마 발광광도계(ICP-OES, GBC)로 측정하였다.¹⁴⁾ 토양의 용적밀도는 코어(diameter: 7.5 cm, height : 7.5 cm)를 이용하여 산정하였으며 토양 탄소 축적량은 아래 식을 이용하였다(Eq. 1).

$$\text{탄소축적량 (MgCha}^{-1}\text{)} = \text{SOC함량 (gkg}^{-1}\text{)} \times \text{용적밀도 (Mgm}^{-3}\text{)} \times \text{깊이 (0.3m)} \quad \text{Eq. 1}$$

토양의 가용성 유기탄소 (Dissolved organic carbon, DOC)와 가용성 유기질소 (Dissolved organic nitrogen, DON)는 water extraction 및 hot water extraction법을 이용하여 분석하였다.¹⁵⁾ 시료와 증류수를 1:10 비율

로 취한 후 1시간 진탕시킨 용액을 3,750 rpm, 20분간 원심분리하여 구분하였다. 상등액은 0.4 µg membrane filter에 여과한 후 여액을 TOC 분석기(TOC- V 5050A, Shimadzu)로 측정하여 water extractable carbon (WEC) 및 water extractable nitrogen (WEN)을 산정하였다. 침전물은 증류수 30 mL을 추가하여 voltexing 후 80°C에서 16시간 정치하였다. 정치 후 위와 같은 방법으로 전처리 및 TOC 분석기로 분석하여 hot water extractable carbon (HWEC) 및 hot water extractable nitrogen (HWEN)을 분석하였다.

2.3. 통계분석

실험 결과는 IBM SPSS statistics 26을 이용하여 ANOVA 분석을 실시하였고, 각 처리구별 평균비교는 유의 수준 5%로 Duncan 다중 분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 토양개량제 종류에 따른 벼 생산량 비교

1995년과 2019년 각각 토양개량제 종류별 벼생산량을 비교하기 위해 처리구를 토양개량제의 종류에 따라 NPK 처리구, NPKS 처리구(NPK+규산), NPKL

처리구(NPK+생석회) 및 NPKC 처리구(NPK+뽕집퇴비)로 설정하여 실험한 결과 토양개량제를 사용하지 않은 처리구에 비해 토양개량제를 처리한 처리구에서 증수효과가 나타났다(Fig. 2). 선행연구에 따르면 토양개량제를 사용하였을 경우 무기질비료만 사용한 처리구에 비해 평균적으로 107~112% 정도의 증수가 된다고 보고하고 있으며¹¹⁾, 특히 퇴비는 장기간 사용시 토양 특성, 사용 시기 및 지역에 관계없이 증대된다고 보고 하고 있다.^{6,16,17)}

또한 규산의 장기간 사용은 벼의 규산흡수량을 증가시켜 수량증대에 매우 효과적이며 석회 처리는 토

양의 pH를 증가시켜 양분(유효인산 등)의 유효도를 높여 증수효과를 나타내는 것으로 알려져 있다.^{4,11)} 본 연구 결과 또한 선행연구와 유사한 역할로 인해 증수효과가 있는 것으로 판단된다. 27년(1995년)간의 장기연용에 따른 증수효과는 미미하였다. 또한 NPKL 처리구에서는 석회 처리 후 토양 내 유기물, 유효인산 및 치환성 칼륨 함량의 변화에 영향을 미치지 않아 증수효과는 나타나지 않은 것으로 알려져 있다.¹⁸⁾ 하지만 본 연구에서는 1995년도와 2019년의 수량결과 패턴이 다르게 나타났다. 이는 석회 처리로 인해 토양의 pH가 증가되어 양분(유효인산 등)의 유효도를 증대시켜 증수효과가 나타난 것으로 판단된다.⁴⁾

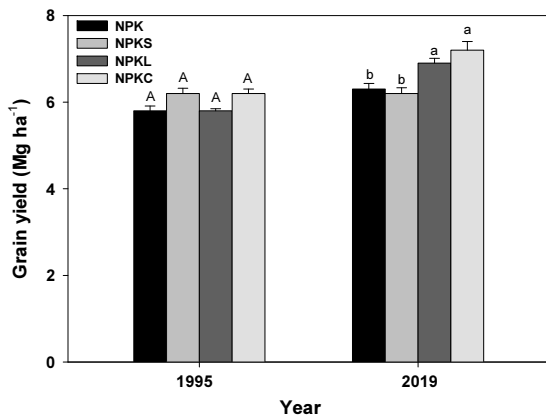


Fig. 2. Rice yield under different soil amendments. The different letters indicated significant difference among amendments within same year at Duncan. NPK: chemical fertilizer; NPKS: NPK+Silicate fertilizer; NPKL: NPK+Lime fertilizer; NPKC: NPK+Compost.

3.2. 토양개량제 종류에 따른 토양화학성 변화

토양개량제 종류 및 연도에 따른 처리구별 토양의 화학성은 Table 2와 같다. pH는 1954년의 5.2에 비해 NPKS와 NPKL 처리구에서 1995년에는 각각 6.1과 6.0을, 2019년에는 각각 6.7과 6.4를 나타내어 시험 전보다 pH는 증가하였다. 반면 무기질비료 및 퇴비 처리구에서는 큰 변화가 없었다. NPKL 처리구는 소석회가 토양 중에서 반응하여 수산화 이온을 발생하므로 알칼리화하여 토양 pH가 증가하는 경향을 나타내었다.⁴⁾ 또한 NPKS 처리구에서도 NPKL 처리구와 같이 토양 pH가 재배기간 경과 후 증가하였고, Kim 등²⁾은 규산질비료 중에는 가용성 규산(25%) 뿐아니라 알칼리분(40%)이 포함되어 있기 때문에 규산을 장기간 사용하는 경우 pH가 상승할 수 있다고 보고하였다.^{19,20)}

Table 2. Chemical Properties of Soil in 1995 and 2019

Year	Treatment	pH (1:5)	OM ²⁾ (g kg ⁻¹)	Av.P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Av.SiO ₂ (mg kg ⁻¹)	K Ca Mg		
						(cmol ⁺ kg ⁻¹)		
1995	NPK ¹⁾	5.4B	22B	280AB	48B	0.13A	4.2B	0.8A
	NPKS	6.1A	22B	225B	184A	0.14A	5.3A	0.9A
	NPKL	6.0A	22B	223B	61B	0.15A	5.4A	1.0A
	NPKC	5.5B	34A	345A	75B	0.15A	5.0A	0.7A
2019	NPK	5.6b	21b	116a	121b	0.06a	4.6b	0.8a
	NPKS	6.7a	21b	102a	520a	0.07a	6.9a	0.8a
	NPKL	6.4ab	19b	105a	124b	0.05a	5.7b	1.1a
	NPKC	5.6b	27a	136a	106b	0.08a	4.5b	0.9a

1)NPK: Chemical fertilizer; NPKS: NPK+Silicate fertilizer; NPKL: NPK+Lime fertilizer; NPKC: NPK+Compost

2)OM: Organic matter

토양 유기물함량은 전체적으로 시험 초기인 1954년에 비해 증가하였으나 특히 NPKC 처리구에서 1995년과 2019년에 각각 34 g/kg과 27 g/kg으로 조사되어 1954년보다 2.1배와 1.7배 씩 증가하였다. 선행연구에서도 수도작 재배 토양 중 유기물 함량은 20~23 g/kg 수준으로 유지되는 것으로 조사된 바 있다.¹³⁾ 유효 규산의 경우는 Table 2에서 보는 바와 같이 규산질비료를 처리한 NPKS 처리구에서 가장 많이 증가하였다.

3.3. 토양개량제 종류별 SOC, 용적밀도 및 SOC 저장량

토양개량제의 장기간 사용에 따른 토양 유기탄소, 용적밀도 및 SOC 저장량 변화에 대한 결과이다(Table 3). SOC(soil organic carbon, SOC)는 다른 처리구에 비해 퇴비를 처리한 NPKC 처리구가 가장 높은 함량을 나타냈으며, 퇴비를 장기간 사용하게 되면 유기물 공급을 통해 SOC가 증가하며,¹⁶⁾ 또한 미생물의 활성을 개선시켜 토양 내 입단 발달을 도모한다. 입단 내 탄소를 물리적으로 가둬 토양 탄소저장 증대에 기여한다고 알려져 있다.²¹⁾ 이러한 선행연구의 결과와 같이 본 시험 처리구에서도 장기간 퇴비 사용에 의한 토양 중 탄소를 공급함으로써 SOC의 함량이 증가한 것으로 판단된다. 토양의 물리성을 나타내는 지표 중의 하나인 용적밀도의 경우 퇴비를 처리한 NPKC 처리구에서 가장 낮았으며, 이는 퇴비 사용에 의해 공극률이 증가함에 따라 토양의 용적밀도가 감소한 것으로 판단된다.²¹⁾ SOC 저장량은 NPKC 처리구에서 SOC 저장량이 가장 높으며 이는 벧집 퇴비 중 함유된 유기물 공급으로 토양 내 유기 탄소 공급이 증가하였기 때문으로 판단된다.²²⁾

Table 3. Soil Organic Carbon (SOC) Content, Bulk Density and SOC Stock of the Soils with Different Amendments

Treatment ¹⁾	SOC content (g kg ⁻¹)	Bulk density (Mg m ⁻³)	SOC stock (Mg C ha ⁻¹)
NPK	12.18b	1.41a	51.5ab
NPKS	12.18b	1.45a	53.0ab
NPKL	11.02b	1.35ab	44.6b
NPKC	15.66a	1.31b	61.5a

¹⁾NPK: Chemical fertilizer; NPKS: NPK+Silicate fertilizer; NPKL: NPK+Lime fertilizer; NPKC: NPK+Compost

3.4. 토양개량제 종류에 따른 가용성 탄소 및 질소의 축적 양상

25년간 토양개량제 사용으로 인한 토양 내 가용성 탄소 및 질소의 함량 변화는 Fig. 3과 같다. NPKC 처리구를 제외한 NPKS와 NPKL 처리구에서는 가용성 탄소 및 질소는 동일한 연도에서는 통계적인 유의차는 나타나지 않았으나 사용연도에 따라 점차 증가하는 경향을 보였으며, NPKC 처리구와 비교할 때 그 증가량은 미미하였다. 가용성 탄소나 질소의 경우 미생물에 의해 쉽게 분해가 가능한 것을 의미하며,²³⁾ 이러한 가용성 질소와 탄소의 증감을 확인할 수 없었다는 것은 미생물에 의해 쉽게 분해되지 않는 토양 탄소의 형태인 부식으로 축적된다고 알려져 있다.²⁴⁾ Hong 등²¹⁾은 퇴비화 과정에서 부식질 탄소와 가용성 탄소(HWEC)의 함량비는 각각 80.1%와 5.1%를 나타내며, 이는 가용성 탄소가 퇴비화 과정에서 쉽게 분해되어 소실되기 때문이라고 하여 본 연구 결과와 유사한 결과를 나타내었다.

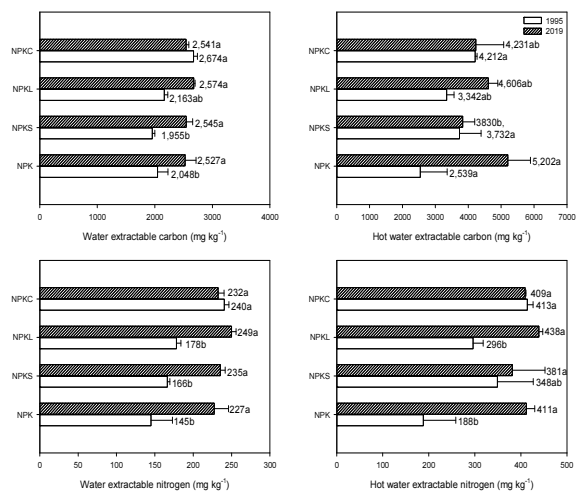


Fig. 3. Characteristics of water and hot-water extractable carbon and nitrogen concentration of the soils with different amendments in 1995 and 2019. (A) water extractable carbon, (B) water extractable nitrogen, (C) hot water extractable carbon and (D) hot water extractable nitrogen. The different letters indicated significant difference among amendments. NPK: Chemical fertilizer; NPKS: NPK+Silicate fertilizer; NPKL: NPK+Lime fertilizer; NPKC: NPK+Compost.

4. 결론

본 연구는 벼 재배 장기연용 시험포장에서 25년간 다른 특성의 토양개량제를 사용하였을 때 벼의 생산량, 토양화학적 및 토양 가용성 탄소와 질소의 축적에 어떠한 영향을 미쳤는지에 대해 평가하고자 하였다. 연구 결과 토양개량제의 종류와 상관없이 벼의 생산량은 증가하였으며 특히 퇴비 처리구에서 가장 높은 생산량(7.2 Mg ha⁻¹)을 보였다. 토양화학적은 NPKC 처리구에서 가장 높은 유기물 함량의 증가를 보였으며 pH는 규산 및 석회를 처리하였을 때 증가하는 것으로 나타났다. NPKS와 NPKL 처리구에서 처리 기간에 따라 토양내 가용성 탄소와 질소 함량이 증가하였으나 NPKC 처리구에서는 가용성 탄소와 질소의 변화를 확인할 수 없었다. 토양개량제 사용 시 모든 처리구에서 벼의 생산성은 증대되었으며, NPKL과 NPKS 처리구는 산성토양의 pH 교정효과를, NPKC 처리구는 토양 유기물 함량의 증가효과를 나타냈다. 또한 퇴비는 석회 및 규산에 비해 토양 탄소 축적에 효과적인 것으로 나타났다. 이에 토양개량제는 장기적 투입에도 토양의 특성을 크게 변화시키지는 않으므로, 토양 검정결과를 기반으로 재배할 작목의 생육특성을 고려하여 개량제를 선발 사용하는 것이 생산량뿐만 아니라 농업환경을 고려한 적절한 토양개량제의 사용 방법이라 판단된다.

사 사

This study was carried out with the support of “PJ 013522” Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

1. Lim, C. H., Kim, S. Y. and Kim, P. J., “Effect of gypsum application on reducing methane (CH₄) emission in a reclaimed coastal paddy soil”, *Korea J. Environ. Agric.*, 30(3), pp. 243~251. (2011).
2. Kim, C. B. and Choi, J., “Changes in rice yield, nutrients’ use efficiency and soil chemical properties as affected by annual application of slag silicate fertilizer”, *Korea J. Soil Sci. Fert.*, 35(5), pp. 280~289. (2002).
3. Kang, Y. K. and Stutte, C. A., “Silicon influences on growth and some physiological activities of rice”, *Res. Rept., ORF(C)*, 24, pp. 1~17. (1982).
4. Park, Y. H. and Lee, C. S., “Importance and supply of lime fertilizer”, 2010 Conference of Korean J. Soil Sci. Fert., pp. 1~110. (2010).
5. Kim, J. S., Chang, H. N., Roh, Y. J., Hn, S. H. and Son, Y. H., “Research trends of forest liming and the effects of liming on forest ecosystems”, *Korean J. Environ. Biol.*, 36(1), pp. 50~61. (2018).
6. Kim, M. S., Kim, S. C., Park, S. J. and Lee, C. H., “Evaluation of replacement ratio of organic fertilizers for basal application of nitrogen fertilizer in pot cultivation of rice”, *KORRA*, 27(1), pp. 5~14. (2019).
7. Seo, Y. J., Kim, J. S., Kim, C. B., Park, M., Lee, D. H., Choi, C. L. and Choi, J., “Evaluation of input and output amount of silica in sandy paddy soil during growing periods of rice plant”, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 35(3), pp. 162~168. (2002).
8. Epstein, E., “Silicon annual review of plant physiology”, *Plant Molecular Biology*, 50, pp. 641~664. (1999).
9. Yoshida, S. Y., Ohnishi, Y. and Kitagishi, K., “Role of silicon in rice nutrient”, *Soil & Plant Food*, 5, pp. 15~21. (1959).
10. Neumann, D. and Nieden, U. Z., “Silica and heavy metal tolerance of higher plants”, *Phytochemistry*, 56, pp. 685~692. (2001).
11. Kim, M. S., Kim, Y. H., Hyun, B. K., Yang, J. E., Zhang, Y. S., Yun, H. B., Sonm, Y. G., Lee, Y. J. and Ha, S. K., “Rice yield and changes of available silicate in paddy soils from long-term application of chemical fertilizers and soil amendments”, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 44(6), pp. 1118~1123. (2011).
12. Jian, F. M. and Eiichi, T., “Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan”, Elsevier, Amsterdam.

- Bonston-London. (2002).
13. Yeon, B. Y., Kwan, H. K., Song, Y. S., Jun, H. J., Cho, H. J. and Kim, C. H., "Changes in rice yield and soil organic matter content under continued application of rice straw compost for 50 years in paddy soil", *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 40(6), pp. 454~459. (2007).
 14. NAIST (national institute of agricultural science and technology), "Method of soil and plant analysis", RDA, Suwon, Korea. (2000).
 15. Ghani, A., Dexter, M. and Perrott, K. W., "Hot-water extractable carbon in soils: A sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation", *Soil Biology & Biochemistry*, 35, pp. 1231~1243. (2003).
 16. Hwang, S. A., Bae, H. S., Lee, S. H., Kang, J. G., Kim, H. K. and Lee, K. B., "Changes of soil properties and rice quality by long-term application of rice straw and rice straw compost in paddy field", *Journal of Agric. Life Sci.*, 44(2), pp. 65~70. (2013).
 17. Oh, W. K. and Lee, S. K., "Studies on the effect of compost and fresh rice straw on paddy yield", *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 4(2), pp. 177~186. (1971).
 18. Kwak, H. K., Yeon, B. R., Ki, Y. H., Seo, J. S. and Kim, S. H., "Development of soil fertility and long term application effect of soil properties and rice yield", *Korean J. soil Sci. Fert.*, 15, pp. 4~20. (2003).
 19. Kang, S. S., Roh, A. S., Choi, S. C., Kim, Y. S., Kim, H. J., Choi, M. T., Ahn, B. K., Kim, H. W., Kim, H. K., Park, J. H., Lee, Y. H., Yang, S. H., Ryu, J. S., Jang, Y. S., Kim, M. S., Sonn, Y. K., Lee, C. H., Ha, S. G., Lee, D. B. and Kim, Y. H., "Status and changes in chemical properties of paddy soil in Korea", *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 45(6), pp. 968~972. (2012).
 20. Lee, C. H., Yang, M. S., Chang, K. W., Lee, Y. B., Chung, K. Y. and Kim, P. J., "Reducing nitrogen fertilization level of rice (*Oryza sativa* L.) by silicate application in Korean paddy soil", *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 38(4), pp. 194~201. (2005).
 21. Hong, C. H., Kang, J. S., Shin, H. N., Cho, J. H. and Seo, J. M., "Effect of compost and tillage on soil carbon sequestration and stability in paddy soil", *Journal of Environ. Sci. Intl.*, 22(11), pp. 1509~1517. (2013).
 22. Hwang, H. Y., Kim, S. H., Kim, M. S., Lee, D. W., Rim, J. E., Shim, J. H. and Park, S. J., "Soil organic carbon fractions and stocks as affected by organic fertilizers in rice paddy soil", *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 52(4), pp. 520~529. (2019).
 23. Spaccini, R., Piccolo, A., Haberhauer, G. and Gerzabek, M. H., "Transformation of organic matter from maize residues into labile and humic fractions of three European soils as revealed by ¹³C distribution and CPMAS-NMR spectra", *Eur. J. Soil Sci.*, 51, pp. 583~594. (2000).
 24. Piccolo, A., Spaccini, R., Haberhauer, G. and Gerzabek, M. H., "Increased sequestration of organic carbon in soil by hydrophobic protection", *Naturwissenschaften*, 86, pp. 496~499. (1999).