

농업환경 분야에서 토양 리질리언스 분야별 평가 방법

Evaluation Methods of Soil Resilience Related to Agricultural Environment

김민석¹ · 민현기² · 현승훈³ · 김정규^{3*}

¹고려대학교 오정리질리언스연구원 연구교수, ²고려대학교 환경생태공학과 박사과정, ³고려대학교 환경생태공학과 교수

Min-Suk Kim¹, Hyun-Gi Min², Seung-Hun Hyun³ and Jeong-Gyu Kim^{3*}

¹Research Professor, O-JEong Resilience Institute, Korea University, Seoul 02841, Korea

²Doctoral Student, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, College of Life Science and Biotechnology, Korea University, Seoul 02841, Korea

³Professor, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, College of Life Science and Biotechnology, Korea University, Seoul 02841, Korea

Received 17 April 2020, revised 4 May 2020, accepted 25 May 2020, published online 30 June 2020

ABSTRACT: Soil is the foundation of human life and the basis for food security. Considering this it is prioritized in the UN's Sustainable Development Goals (SDG). Therefore, research on soil resilience in the agricultural environment is crucial for sound and sustainable soil management, especially in highly uncertain and unpredictable conditions. Soil resilience is defined in different ways by several researchers; however, its definition typically includes the concepts of recovery and resistance to stress. The physical, chemical, and biological characteristics of soils that are used to assess the soil resilience, i.e., the response of soil to various types of stress are summarized in this study. In addition, various statistical processing techniques and quantification methods are summarized considering the wide spatial and temporal scope of soil resilience research. Several soil resilience studies typically conduct the following five steps: (1) soil and site selection (2) stress (independent variable) setting (3) soil characteristics and indicator (dependent variable) setting (4) performing various spatiotemporal scale experiments (5) statistical analysis. The previous and present studies present a general introduction of soil resilience, based on which, further practical research considering domestic agricultural environment should be conducted. The extensive range of soil resilience measurements will require collaboration between researchers in various fields.

KEYWORDS: Multivariate analysis, Recovery and resistance to stress, Soil characteristics, Soil indicators, Soil resilience

요약: 토양은 인간의 삶의 터전이자 식량안보를 책임질 수 있는 근간으로, UN의 지속가능한 개발 목표에서도 중요하게 다루고 있다. 농업환경에서 토양 리질리언스는, 불확실성과 예측불가능성이 높은 시대에 건전하고 지속가능한 토양 관리를 위해 반드시 필요한 연구분야이다. 토양 리질리언스의 정의는 연구자들마다 조금씩 다르나 교란에 대한 회복과 저항 개념을 공통적으로 포함하고 있다. 본 연구에서는 다양한 종류의 교란에 대한 토양 리질리언스의 반응을 평가하기 위하여 사용된 토양의 물리적, 화학적, 생물학적 특성들을 정리하였다. 이어서 토양 리질리언스 연구의 시공간적 범위가 넓은 것에 기인한 다양한 통계 처리 기법들과 리질리언스 정량화 방법들을 정리하였다. 또한 많은 토양 리질리언스 연구들은 공통적으로 (1) 토양 및 부지 선정 (2) 스트레스 및 교란 (독립변수) 설정 (3) 토양 특성 및 지표 (종속변수) 설정 (4) 다양한 시공간적 규모 (scale) 실험 수행 (5) 데이터 통계분석 등 5단계에 걸쳐 수행되어왔음을 확인할 수 있었다. 선행 및 이변 연구를 통해 토양 리질리언스의 일반적 개념을 다루었으며, 이를 바탕으로 국내 농업 환경을 고려한 실질적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

핵심어: 다변량분석, 토양 회복 및 저항성, 토양 특성, 토양 지표, 토양 리질리언스

*Corresponding author: lemongkim@korea.ac.kr, ORCID 0000-0002-5734-1311

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

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 the original work is properly cited.

1. 서론

개별 오염물질의 농도에 기반한 토양 환경 관리는 토양 생태계의 구조와 기능을 충분히 반영하지 못하고 생물체에 미치는 영향 정보를 제공하지 못하는 한계를 안고 있다(Nam and An 2014). 국내의 경우 다양한 종류의 교란 원인을 대상으로 토양의 위해성을 평가하고 토지의 이용도를 극대화하기 위하여 토양생태 위해성 평가를 도입하기 위한 연구가 수행 중이다(Kim et al. 2019). 일반적으로 생태 위해성평가는 교란이 노출되는 과정을 우선적으로 평가하고, 그로 인한 생태계의 반응과 회복을 단기적/장기적 관점에서 종합적으로 평가하는 순으로 진행된다(de Lange et al. 2010). Faber et al. (2006)은 토양 생태 위해성평가에 있어 생태계 서비스의 기본이 되는 생태요구지표를 정리하면서 6가지 대분류 중 하나로 토지이용도, 토지관리, 스트레스에 대한 적응성, 즉 리질리언스(resilience)를 꼽았다.

농업, 환경, 생태분야에 있어 토양 리질리언스(soil resilience)는 여러 연구자들을 통해 다양하게 정의 내려져 왔다(Table 1). 연구자들의 시각에 따라 조금씩 다르지만, 일반적으로 교란 이전의 상태 또는 최초의 조건으로 돌아가는 능력을 토양 리질리언스로 이해하고 해석하려는 공통의 경향을 찾아볼 수 있다. 선행 종설 연구에서는(Kim et al. 2020), 토양 리질리언스 뿐만 아니라 관련 유사한 용어들인 토양 저항성과 토양 질을 비교하고, 토양 리질리언스에 영향을 미치는 스트레스 및 교란을 자연적인 원인(건조, 가뭄, 고온, 동결 등)과 인위적인 요인(토지 이용도, 물리적 교란, 화학적 교란 등)으로 나누어 선행연구 사례들을 구분하여 정리하였다. 살펴본 토양 리질리언스 연구들의 공통적인 수행 과정은(1) 적합한 토양 및 부지 선정(2) 토양에 가해지

는 ‘독립변수’인 스트레스 및 교란 선정 및 방법 설정(3) 스트레스와 교란에 영향을 받는 ‘종속변수’인 토양 특성 결정(4) 시공간적 규모(scale) 설정 및 실험 수행(5) 실험결과와 가공(통계처리 및 정량화) 및 결론 도출 등 크게 5단계의 과정을 따르고 있으며, 이는 앞서 언급된 토양생태 위해성평가의 과정과 흡사하다.

본 종설에서는(1)과(2) 과정을 다루었던 선행 연구에 뒤이어, 토양 리질리언스 연구들이 관심있게 살펴본 종속변수에 해당하는 토양의 물리적, 화학적 그리고 생물학적 특성과, 연구결과 데이터를 가공한 방법들을 사례를 중심으로 정리하여 소개하고자 한다.

2. 토양 리질리언스의 평가 지표

2.1 토양 물리학적 특성

농경지에서 작물의 생육 및 생산성은 토양학자들로 하여금 토양 물리학적 특성(물리성)에 관심을 가지게 하였고 그로 인해 토양 물리성과 식물의 성장 사이의 관계를 다루는 연구가 오래전부터 진행되어왔다. Letey (1991)는 토양 수분, 공기, 온도와 같은 물리성이 식물의 성장에 직접적으로 영향을 주며, 토양 구조, 토성, 밀도와 같은 물리성은 간접적으로 영향을 미치는 것으로 이해하였다. Schoenholtz et al. (2000)은 토양 물리적 특성을 크게 정적인 특성(토성, 토심, 밀도, 유효 수분 보유력, 포화 수리전도도, 토양 강도, 공극, 입단 안정성과 분포)과 역동적인 특성 [최소생육제한수분범위(least limiting water range), 주행성(trafficability), 침출가능성(leaching potential), 침식가능성(erosion potential)]으로 구분하고, 각각의 특성들이 토양 질에 기여하는 기능을 서술하였다. 토양 물리성은 토양 화학

Table 1. Definitions of soil resilience

Definition	References
Rate of return to original state after disturbances	Pimm (1984)
The ability of the soil to recover to a state prior to changes in land use or disturbances	Lal (1993)
The process of keeping the soil back in equilibrium when the cause of stress tolerance or disturbances is removed and of preventing the soil from stress and change	Szabolcs (1994)
The ability of the system to move to a new dynamic equilibrium after disturbance	Blum and Santelises (1994)
The capacity to resist changes caused by disturbances	Rozanov (1994)
The ability to resist and recover from human and natural disturbances	Lal (1997)
The ability of soil recovery after disturbances	Seybold et al. (1999)

적 특성(회화성)에 비해 그 특성이 변화하는 데에 더 많은 시간을 필요로 한다. 따라서 기후변화 또는 반복적인 인간활동과 같이 장기간의 영향을 대상으로 하는 연구들에서 토양 물리성을 많이 다루고 있는 것을 확인할 수 있다 (Table 2). 토양의 기본 정보에 해당하는 토양 물리성이 아닌, 스트레스 및 교란에 대한 토양 리질리언스 측면에서 종속변수로서의 토양 물리성을 다른 연구를 대상으로 정리하였다.

토양 리질리언스 연구들에서 사용된 여러 토양 물리적 특성들을 크게 밀도, 공극률, 입단 그리고 수분 4종

류로 나누어볼 수 있다. 우선 토양의 용적밀도 (bulk density)는 토양 수분 및 양분보유력처럼 물질의 저장고(pool)로써, 생산성과 환경 질에 영향을 주는 매우 중요한 토양의 물리적 특성이다 (Lal and Kimble 2001). 용적밀도의 분석은 대부분 현장에서스코어로 채취한 토양 시료의 부피와 건조 중량 계산을 통해 수행된다. 또한 입자 밀도 (particle density)와 달리 토양의 3상(기체상, 액체상, 그리고 고체상)을 모두 포함하는 것이 특징이다.

토양의 공극 (pore space)은 토양 입자들의 3차원적

Table 2. Soil physical characteristics used in soil resilience researches

Independent variable	Indicators	References
Grazing intensity	Bulk density, Soil moisture	Mworia et al. (1997)
Packing, Wetting, Drying/wetting cycle	Void ratio, Compression index, Expansion index	Griffiths et al. (2005)
Peat amendment, Wet/Dry cycle	Total porosity, Pore size, Void ratio, Compressibility index, Rebound hight, Water potential, Shear strength	Zhang et al. (2005)
Compaction	Soil water content, Soil strength	Gregory et al. (2007)
Organic amendments	Aggregate stability	Fujino et al. (2008)
Heat	Soil water content	Griffiths et al. (2008)
Conservation tillage, Crop rotation	Bulk density, Size distribution of water stable soil aggregates	Carter et al. (2009)
Soil management	Void ratio, Compression index, Water content	Gregory et al. (2009)
Amendments	Water retention, Soil water content, Water stable aggregates >1 mm, Aggregate stability, Aggregation dispersion ratio	Thorsen et al. (2010)
Tillage, Irrigation	Soil aggregate distribution, Time-to-pond	Verhulst et al. (2011)
Management	Soil volumetric water content, Air filled porosity, Air permeability, Pore organization, Water dispersible clay, Void ratio, Compression index	Arthur et al. (2012)
Soil transplantation	Volumetric water content	Meola et al. (2014)
Unloading rebound	Compression index, Rebound index, Void ratio, Water content, Plasticity index, Liquidity index	Wang et al. (2014)
Amendment	Soil moisture	Ng et al. (2015)
Amendment	Temperature, Soil water storage	Song et al. (2015)
Topsoil removal, Amendment	Water stable aggregation	Lamey et al. (2016)
Amendments	Volumetric of water retained, Total porosity, Air capacity, Available water capacity, Rheological parameters (storage modulus, Loss modulus, Loss factor)	Ajayi and Horn (2016a)
Management	Water retention, Saturated hydraulic conductivity, Structural stability, Precompression parameters, Shear strength parameters	Ajayi and Horn (2016b)
Amendment	Water retention, Pore size distribution, Rheological parameters, Aggregate precompression parameters, Shear strength parameters	Ajayi and Horn (2017)
Land use change	Bulk density, Penetration resistance, Aggregates	Ayala-Orozco et al. (2017)
Long term conservation systems	Bulk density, Total porosity, Microporosity, Macroporosity	de Andrade Bonetti et al. (2017)

배열에 따라 만들어져 공기와 물이 들어갈 수 있는 공간을 말하며, 토양의 전체 부피에 대한 공극 부피의 비율을 공극률 (porosity)이라 한다. 공극비 (void ratio)는 토양 공극의 부피 대비 토양 고체상만의 부피비율을 의미한다. Zhang et al. (2005)은 유기물 개량제의 사용과 건조/습윤 주기가 토양 물리성에 미치는 영향을 확인하기 위해 총 공극률 (total porosity) 뿐만 아니라 공극의 크기, 공극비 등의 지표를 종합적으로 활용하였으며, Ajayi and Horn (2017)과 de Andrade Bonetti et al. (2017)도 공극 크기의 분포 (pore size distribution)와 대공극 (macroporosity), 소공극 (microporosity) 등을 수두 장치 (suction table)를 활용하여 분석하였다.

입단 (aggregation)은 토양 입자들이 유기물, 이온, 미생물, 건조/습윤 주기 등의 영향과 재배열 (rearrangement), 응집 (flocculation), 교결 (cementation) 과정을 거쳐 뭉쳐진 덩어리 형태를 말한다 (Jastrow 1996, Duiker et al. 2003). 토양 구조를 이해하는 중요 지표인 입단은 토양 비옥도, 농업 생산성, 공극 증진과 침식 저감 그리고 미생물 군집 서식처 제공과 같은 다양한 기능을 수행한다 (Bronick and Lal 2005, Fujino et al. 2008). 따라서 입단 또는 토양구조의 파괴는 곧 토양 질의 저하를 의미한다. 또한 입단은 일반적으로 그 크기에 따라 대형입단 (macro aggregate, >250 μm)과 소형입단 (micro aggregate, <250 μm)로 나뉘며, 크기에 따라 입단 결속제 (binding agents)와 탄소 또는 질소의 구배가 다양하게 나타난다 (Tisdall and Oades 1982, Bronick and Lal 2005). Fujino et al. (2008)은 유기개량제에 의한 토양 입단 구조의 변화를 fast wetting method (LeBissonais 1996)으로, Carter et al. (2009)은 보전농업과 감자 단일종의 장기 재배가 토양의 대형, 소형 입단에 미치는 영향을 wet-sieving (Angers et al. 2008) 방법으로 분석하였다. Thorsen et al. (2010)은 사질토양에서 유기개량제에 의한 1 mm 이상의 입단의 안정성을, Verhulst et al. (2011)은 보전농업 활동에 따른 토양 구조의 변화를 확인하기 위하여 내수성입단을 크기 별로 세분화하여 분석하였다.

토양 수분은 불포화 지대의 토양 환경에서 가장 중요하고 기초적이며 토양 중 다른 인자들과 밀접한 관계를 갖는 매우 중요한 정보이다 (Gardner et al. 2000). 따라서 많은 토양 리질리언스 연구에서 토양 수분에 관심을 가졌으며, 토양 수분 함량 (soil water content)은 실험

실에서 가열 (100°C, 105°C, 또는 110°C)하거나 압력 조절을 통해 제거된 수분함량을 계산하여 산출하였으며, 현장에서는 수분 전극을 통해 수분함량을 측정하였다. 이외에도 Mworira et al. (1997)은 Black (1986)의 중량법 (gravimetric method)을 이용하여 토양 수분 (soil moisture)을 측정하였고, Thorsen et al. (2010)은 사질토양에서 개량제 처리에 의한 토양의 수분 보유 능력 (soil water retention)을, Arthur et al. (2012)은 토양 체적함수비 (soil volumetric water contents)를 매트릭 흡인 (matric suction) 방법을 활용하여 분석하였다.

경운 또는 농기계에 의한 밟힘 (답압)과 같은 직접적인 물리적 교란에 대한 토양 리질리언스를 평가하기 위하여 농공학·토목공학에서 사용하던 공법을 활용하기도 하였다 (Table 2). Griffiths et al. (2005)은 다짐시험 (compaction test)을 통해 압축지수 (compression index)와 팽창지수 (expansion index)를 도출하여 건조/습윤 주기 및 차량 교통과 같은 물리적 교란이 토양에 미치는 영향을 확인하였으며, Zhang et al. (2005)도 다짐시험과 전단시험 (shear test)을 병행하여 물리적 스트레스에 대한 유기개량제의 효과를 확인하였다. Verhulst et al. (2011)은 토양 질 개선을 통한 토양 리질리언스 향상 효과를 확인하기 위해 “Time-to-pond” 방법을 활용하여 표토의 직접적인 침투성을 분석하였다 (Govaerts et al. 2006). 최근 Wang et al. (2014)은 단축 압축시험 (uniaxial compression test)을 통해 압축지수, 반등지수 (rebound index), 가소성지수 (plasticity index), 액성지수 (liquidity index)를 도출함으로써 중국 북쪽 지대 토양의 물리적 저항성과 리질리언스를 조사하였다 (Di Prisco et al. 2000).

종합해보면 토양 리질리언스 연구들에서는 토양 밀도의 변화, 입단 크기 및 분포와 공극에 따른 통기성과 통수성, 그리고 토양 수분 함량 및 보유능력들을 물리적 특성 및 관련 지표로 많이 사용해왔다.

2.2 토양 화학적 특성

토양의 여러 기능들 가운데 양분 순환 (nutrient cycling)과 양분 공급능력 (nutrient supplying capacity) 그리고 생산성 (productivity)은 토양의 화학적 및 생물학적 특성과 관련이 높은 것으로 알려져 있다 (Seybold et al. 1999, de Vries et al. 2012). 토양 리질리언스 연구들에서 저하된 토양의 기능을 향상시키고 회복 여부를

확인하기 위하여 활용한 토양의 화학적 특성들을 정리하였다 (Table 3). 토양의 화학성과 관련하여, 많은 리질리언스 연구들은 토양 내 탄소·질소·유기물의 저장과 분획 그리고 거동에 관심을 가졌으며, 인 (phosphorus)과 미량원소를 대상으로도 수행해왔다. 이러한 토양 내 양분의 저장, 격리, 순환, 제공, 오염물질의 무독화 기작은 토양 리질리언스의 한 축이라 할 수 있는 토양의 회복을 결정짓는 매우 중요한 인자이다 (Seybold et al. 1999).

토양의 유기물 저장능력을 의미하는 유기물 함량은 유기물의 유입속도와 분해속도의 작용에 의해 결정되며, 이전 연구에서 다른 여러 요인들은 저장고의 크기와 영양분의 순환 속도에 변화를 야기한다 (Blair et al. 1995). 토양 중 미생물이 이용 가능한 탄소를 나타내는 용존유기탄소 (dissolved organic carbon, DOC)는 유기물 투입 직후 농도가 급격히 증가한 후 시간에 따라 점차 감소하는 경향을 나타낸다 (Lundquist et al. 1999). 이에 Griffiths et al. (2005)은 Cd, Cu, Zn가 포

함된 슬러지를 처리한 토양을 대상으로 DOC를 측정하여 토양의 물리적 및 생물학적 리질리언스에 미치는 영향을 종합적으로 평가하였다. 또한 Saison et al. (2006)도 퇴비처리에 따른 탄소 유효도의 변화를 180일 동안 DOC 측정을 통해 확인한 바 있다. Benitez et al. (2004)은 농업폐기물과 지렁이분변 퇴비의 처리가 토양 생물학적 리질리언스 평가 결과를 해석하기 위해 수용성 탄소 (water soluble carbon)를 측정하기도 하였다.

농업활동의 변화에 따른 토양 중 탄소와 질소의 변화를 관찰한 연구도 여러 진행되어왔다. Carter et al. (2009)은 보전경운을 실행하고 토양 중 탄소와 질소의 총 함량과 입자성 (particulate) 형태를 구분하여 모니터링하였고, Verhulst et al. (2011)도 보전경운에 따른 토양 깊이별 치환성양이온, 염기포화도, 총 질소, 유기물 함량의 변화를 보고하였다. de Moraes Sá et al. (2014)은 토양 중 유기탄소 분획을 light organic C (LOC), particulate organic C (C-POC), mineral associated organic fraction (MAOC), hot water extractable organic C (HWEOC),

Table 3. Soil chemical characteristics used in soil resilience researches

Indicators	References
Total organic C, Total N, Humic acid, pH, Water soluble C	Benitez et al. (2004)
Organic C, Soil fraction (residual, volatilized, irreversibly adsorbed, degraded)	Franco et al. (2004)
Total C, Total N, Dissolved organic C	Griffiths et al. (2005)
Dissolved organic C	Saison et al. (2006)
Water-extractable heavy metals (Cu, Pb, Zn)	Frey et al. (2008)
Soil organic C, Total N, Particulate C, Particulate N	Carter et al. (2009)
Total organic C, Total N, Free Cu activity	Deng et al. (2009)
Bioavailable Cu	Brandt et al. (2010)
Organic C, Total N, Water soluble C, Water soluble N	Hueso et al. (2011)
Soil organic C, Total N, Exchangeable cations (Ca, Mg, Na, K)	Verhulst et al. (2011)
Total organic C, Exchangeable P	del Mar Alguacil et al. (2012)
Total C, Total N, Exchangeable P, Total soil exchangeable base cations,	McGovern et al. (2013)
Soil organic C, Hot water extractable organic C, Permanganate oxidizable C, Light organic C, Particulate organic C, Mineral associated organic C	de Moraes Sá et al. (2014)
Organic C, Total organic N, Effective cation exchange capacity, Total soil P	Hejzman et al. (2014)
Soil organic matter, Humic substances, Humic acids, Fulvic acids, Non humic substances	Romero et al. (2014)
Total soil C, Total soil N, Mineral N, Plant available P	Ng et al. (2015)
Organic C, Organic N, Light fraction C, Light fraction N, Mineralizable C, Mineralized N	Larney et al. (2016)
Soil organic C, Total nitrogen, Cation exchange capacity	Zhang et al. (2016)
Total organic C, Total nitrogen, Total P, Soil inorganic N, Soil available P	Ayala-Orozco et al. (2017)
Total C, Total N	Hirsch et al. (2017)
Total N, Available-N, -P, -K, -Zn, Organic C, Cation exchange capacity	Mandal et al. (2017)

potassium permanganate oxidizable C (POXC)로 구분하고, 보전경운에 따른 탄소 분획의 변화와 작물(콩, 옥수수) 생산성사이의 관계를 연구하였다. 그 결과 이동성이 높은 불안정한(labile) 분획 형태(LOC, POXC)의 탄소들이 토양 리질리언스의 복원과 생산성에 긍정적인 영향을 미치는 것이 확인되었다. Romero et al. (2014)은 탄소 순환 과정에서 특히 부식화(humification)에 관심을 갖고 humic acid과 fulvic acid를 대상으로 장기 경운 농경지 토양의 리질리언스를 평가하였다. 그 결과 지속적인 경운은 부식에 따른 유기물의 분해를 증가시켰으며 반대로 무경운 시 분해속도가 감소하는 것을 확인하였다.

Larney et al. (2016)은 절토로 인한 교란 후 개량제가 토양 질 회복에 미치는 영향을 확인하기 위하여 탄소와 질소의 유기형태, light fraction, mineralized fraction의 변화를 상세히 분석하였다. Ayala-Orozco et al. (2017)은 열대 건조림, 천이 산림 지대, 목초지의 용도 변경이 토양 리질리언스에 미치는 영향을 확인하기 위하여 토양 탄소와 질소뿐만 아니라 총인과 유효인산을 추가적으로 분석하였다. 그 외에도 하수 관계, 퇴비, 화학비료의 장기사용이 토양 내 인 함량, 식생에 미치는 영향을 확인한 연구도 찾아볼 수 있다(del Mar Alguacil et al. 2012, McGovern et al. 2013, Hejcman et al. 2014).

토양 내 무기 또는 유기 오염물질이 토양 리질리언스에 미치는 영향에 관한 연구도 수행되었는데, Frey et al. (2008)은 중금속 오염 토양에서 포폴러 나무를 활용한 식물추출(phytoextraction) 복원방법을 적용하고 식물 생육, 시간, 그리고 수용성 중금속(water-extractable heavy metals) 사이의 관계를 90일 동안 관찰하여 보고하였다. Deng et al. (2009)은 구리 오염이 토양 리질리언스에 미치는 영향을 확인하기 위해 탄소와 질소뿐만 아니라 자유 구리 활동도(free Cu^{2+} activity)를 분석하고 생물학적 지표들과의 관계를 분석하였다. Brandt et al. (2010)과 Zhang et al. (2016) 또한 토양 내 구리에 대한 미생물의 저항성 및 리질리언스를 평가하기 위하여 구리의 총 농도와 생물유효도 지표를 활용하였다. Franco et al. (2004)은 토양에 유출된 원유(crude oil)가 토양 미생물에 의해 분해될 때 중간생성물(residual oil, volatilized oil, irreversibly adsorbed oil, degraded oil)의 탄소 분획 특성을 60일간 확인하였다. 그 결과 미생물에 의한 원유 분해 속도는 미생물 기질로 사용될 수

있는 유기물 보다는 토양의 특성에 더 많은 영향을 받았으며, 특히 토양의 pH와 점토함량, 유기물이 원유의 휘발성에 영향을 끼쳐 미생물 독성 및 분해 활성을 조절하는 것으로 나타났다.

종합해보면 토양의 양분순환, 저장, 생산 기능을 평가하기 위해 탄소, 질소, 인, 치환성양이온 그리고 오염물질의 농도 및 유효도가 사용되었다. 그리고 그 결과 들은 토양의 질, 토양 저항성, 회복력, 그리고 리질리언스 평가시 매우 중요한 자료로 활용될 수 있다(Mandal et al. 2017). 또한 이러한 토양 화학적 특성 지표들은 토양 근권 및 미생물과의 상호작용과 밀접한 관련을 갖고 있는 것으로 나타났다.

2.3 토양 생물학적 특성

토양 동물과 토양 미생물은 토양의 구조와 기능에 중요한 역할을 담당하고 있다. 토양 중 거대동물, 미소동물, 균근, 세균 등은 미생물포식, 토양입단 증진, 토양 미생물 밀도 조절, 유기물 분해 및 무기화 등 작용을 통해 토양 내 양분 순환, 공급, 작물 생산성에 중요한 역할을 수행한다(Seybold et al. 1999, Kim et al. 2006). 토양 미생물체량(soil microbial biomass)은 토양 내 일정 공간 안에 존재하는 모든 생물(박테리아, 곰팡이, 플랑크톤, 원생동물 등)의 총량을 탄소, 질소, 인, 황 중량으로 환산하여 표기한 값으로 토양의 기능을 평가하는데 중요하고 기본적인 정보이다(Brookes et al. 1982, 1985, Carter et al. 2009). 토양 리질리언스 연구에서 미생물체량을 분석하는 데에 주로 사용된 방법은 훈증-배양(fumigation-incubation) 방법과 훈증-추출(fumigation-extraction) 방법인 것으로 나타났다. Franco et al. (2004)은 토양 특성과 식생, 그리고 유류 오염에 의한 토양 미생물체량의 변화를 60일간 관찰하며 토양 미생물의 회복능력을 평가하였다. 또한 Saison et al. (2006)과 Hueso et al. (2011)은 퇴비 처리, Frey et al. (2008)은 중금속에 의한 총 미생물체량의 변화를 보고하였다. Thorsen et al. (2010)은 에스테르 결합 지방산(ester-linked fatty acid)을 정량하고 그 총 함량을 전체 미생물량의 지표로 활용하기도 하였다(Griffiths et al. 2008). 이 외에도 인지질 지방산(phospholipid fatty acid)을 박테리아와 균류의 미생물체량 분석에 활용한 연구도 여러 진행된 것 확인할 수 있었다(Saison et al. 2006, Deng et al. 2009, Thorsen et al. 2010, de Vries

et al. 2012, Zhang et al. 2013, Overby et al. 2015, Ng et al. 2015).

기초호흡 (basal respiration, BR)은 양분을 추가하지 않고 토양에서 발생하는 이산화탄소를 측정하여 미생물량, 토양기능을 확인하는 지표이다. 반면 기질유도 호흡량 (substrate induced respiration, SIR)은 토양에 추가적으로 투입된 기질을 먹이로 하는 미생물의 호흡량을 의미하며, 특히 식물 잔사와 같은 유기물을 분해할 수 있는 잠재적 미생물량을 측정하고자 고안된 분석 지표이다 (Beare et al. 1990). 따라서 토양 미생물량과 그 활성을 교란에 대한 토양의 저항성과 회복능력의 원동력으로 인지하고 이를 활용한 토양 리질리언스 연구를 여럿 찾아볼 수 있다. 비료, 슬러지, 개량제, 퇴비 등의 처리와 (Griffiths et al. 2005, Saison et al. 2006, Fujino et al. 2008, Brandt et al. 2010, Hueso et al. 2011, Kumar et al. 2014), 식생, 농업형태, 토지 이용도의 변화, 제초제, 원유, 중금속 등이 (Franco et al. 2004, Orwin and Wardle 2004, Kuan et al. 2006, Rivest et al. 2015), 토양 미생물량과 그 활성에 미치는 영향을 토양 호흡을 통해 확인함으로써 토양 저항성 및 리질리언스를 평가하였다. 더하여 Dilly et al. (2011)은 ^{13}C 동위원소가 포함된 화석연료 기원의 소수성 탄소 기질 (n-hexadecane, palmitic acid)을 활용하여 미생물의 산소소비 및 이산화탄소생성 비율인 호흡률 (respiratory quotient, RQ)을 상세히 분석함으로써 산림토양과 농경지토양에서 토양 미생물의 리질리언스를 비교하였다. 이처럼 미생물 호흡 분석 결과는 토양의 전반적인 미생물의 량과 활성을 간접적으로 측정하고 비교함으로써 토양 리질리언스를 평가하는 생물학적 지표로 유용하게 활용되었다.

선충 (nematodes)은 토양에서 발견되는 미소동물로, 일반적으로 미생물의 개체와 밀도를 조절하여 토양 내 질소 유효도에 영향을 미치며, 일부 농경지에서 작물 생육에 피해를 입히기도 하고 또는 병원균을 포식하여 생물학적 방제 역할을 담당하는 등 다양한 역할을 수행한다 (Neher 2001). 선충은 투과성 각피 (cuticle)로 둘러싸여 있고 열 저항 단백질 생성 능력을 갖고 있으며 휴면과정을 생활사에 포함하기 때문에 다양한 스트레스를 회피하고 생존할 수 있다. 이러한 이유로 환경 지표, 육상생태계에서 다양성 지표, 먹이사슬 지표, 토양 군집의 성숙 지표 등 오래전부터 연구되어 왔다 (Coull

et al. 1981, Bongers 1990, Freckman and Ettema 1993, Neher 2001). 선충은 토양에서 다양한 기능을 수행하고 관련 주요 지표로 활용되고 있지만, 토양 리질리언스 분야에서는 아직까지 협의적으로 사용되고 있는 것을 확인할 수 있었다. Wada and Toyota (2007)와 Fujino et al. (2008)은 토양 소독 효과를 검증하기 위하여, Mocali et al. (2015)은 해바라기 탈지방 종자 (defatted seed meal)의 생물 훈증 (biofumigant) 효과를 검증하기 위하여 선충의 개체수, 과 (family) 풍부도, 다양성, 성숙도, 그리고 먹이사슬 지표를 활용하였다. Carter et al. (2009)은 관행 경운, 보전경운, 그리고 윤작과 같은 농업 활동이 박테리아 포식자로서의 선충 밀도와 그리고 톡토기 (collembola)의 풍부도 (richness)에 미치는 영향을 확인함으로써 보전경운이 토양의 생물학적 건전성에 가장 긍정적인 영향을 미치는 것을 보고하였다. 이처럼 강한 교란에 의한 토양의 훼손을 검증하고 토양의 회복력을 확인하기 위하여 선충을 활용하는 것이 주를 이루었다.

토양에 유입되는 무기물 (화학비료) 또는 유기물 특성은 토양 미생물의 양분 이용도와 유기물 분해 속도에 영향을 주어 미생물 군집 구조와 조성에 변화를 야기한다 (Sarniguet et al. 1992, Marschner et al. 2003). 중합효소 연쇄반응 변성 구배 겔 전기영동 (polymerase chain reaction denaturing gradient gel electrophoresis, PCR-DGGE)은 토양 리질리언스 연구에서 분자수준에서 박테리아와 진핵생물 군집 구조를 확인하기 위해 여러 연구에서 사용된 분석방법 가운데 하나로, 여러 토양 시료를 신속하게 평가할 수 있는 것이 특징이다. 이외에 16S rRNA와 18S rRNA 분석방법은 각각 진정세균 (eubacteria)과 균류 (fungi)의 군집구조를 분석하기 위해 사용되었다 (Marschner et al. 2003, Martinez-Pascual et al. 2015, Mocali et al. 2015). 이 외에도 Kuske et al. (2012)은 건조지역에서 물리적 스트레스에 의한 biocrust 내 박테리아 군집 구조 변화를 제한효소 절편길이다형성 (restriction fragment length polymorphism, RFLP) 방법을 통해 확인하였다. 더하여 Saison et al. (2006)은 퇴비와 퇴비 처리 농도에 따른 총 박테리아 군집의 유전 구조의 변화 확인하기 위하여 자동 rRNA 유전자간 공간분석 (automated rRNA intergenic spacer analysis, A-RISA) 방법을 활용하기도 하였다. Community-level physiological profile (CLPP)

은 중속영양 미생물 군집 구조를 기질의 이용도 차이에 근거한 분석방법으로 (Park et al. 2006), 군집간 유사성과 차이점을 평가할 때 사용되며 일부 토양 리질리언스 연구에서도 이 방법을 활용된 바 있다 (Brandt et al. 2010, Zhang et al. 2013).

효소는 토양 양분 순환에 중요한 역할을 담당하며, 살아있는 세포로부터 방출된 세포외효소 (exoenzyme)와 세포가 파괴되면서 세포내부에 있던 효소 (endoenzyme), 그리고 세포에 붙어있는 효소 등을 모두 포함한다. 토양 중 효소의 활성 (enzyme activity)은 효소 합성이 활성화되거나 또는 증식하는 미생물이 합성하는 효소 활성에 기인한다 (Kiss et al. 1975). 토양 효소 활성은 토양의 비옥도와 질을 평가하는 데에 유용한 도구로 오래전부터 사용되어왔으며 (Doran 1980, Miller and Dick 1995, Badiane et al. 2001), 토양 리질리언스 연구들에서도 토양 효소를 생물학적 지표로 활용한 사례를 여럿 찾아볼 수 있었다. 특히 양분 순환의 주요 대상 물질인 탄소, 질소, 인, 황 대사와 관련된 효소 (glucosidase, galactosidase, arylamidase, asparaginase, glutaminase, amidase, urease, asparatase, alkaline phosphatase, acid phosphatase, phosphodiesterase, arylsulfatase)가 주를 이루었다.

미생물 외에 육상의 생물을 조사하고 토양 리질리언스를 평가한 연구도 수행되었다. Lewis et al. (2010)은 반건조 기후대에 위치한 초지에서 방목, 화재, 경운 교란에 대한 식생의 종 풍부도 (richness)의 변화와 회복을 조사하여 리질리언스를 측정하였다. Carter et al. (2009)은 감자 밭에서 보전경운과 윤작을 수행함에 따라 미소절지동물 (micro-arthropod) 개체들의 발생밀도 (abundance)와 툴토기 (collembola)의 풍부도 (richness), 다양성 (diversity)이 3년간 어떻게 변하는지 보고하였다. 발생빈도는 단위 면적당 개체의 수로 계산하고, 풍부도는 식별된 과 (family)의 수, 다양성은 Shannon의 다양성 지수를 활용하였다. Hirsch et al. (2017)은 휴한지와 경작지와 초지의 용도 변경에 따른 박테리아, 고세균, 균류, 중형동물의 밀도와 다양성의 변화를 확인하였다. 이 외에 집약 사과 과수원 (intensive orchards)에서 토양의 비옥도와 개량제 사용이 사과나무 뿌리의 형태적 그리고 생리학적 리질리언스에 미치는 영향을 보고한 사례도 있었다 (Polverigiani et al. 2016).

종합해보면, 토양 리질리언스의 생물학적 평가 지표

들은 토양의 교란으로부터 저항성 또는 훼손된 토양의 회복력을 토양의 기능적 측면에서 평가하는 데에 매우 적합한 것으로 판단된다. 특히 토양 중 양분의 저장과 순환 능력의 잠재력을 토양 생물체량, 효소 활성, 종과 군집의 풍부도와 다양성 등을 중심으로 토양 리질리언스 연구가 진행되어온 것을 확인할 수 있었다.

3. 통계 분석

지금까지 수행된 토양 리질리언스 연구들을 살펴보면 장기간에 걸친 연구들이 많았으며 그만큼 많은 데이터를 바탕으로 연구가 진행된 것이 특징이라 할 수 있다 (Duniway et al. 2010, Abdel Kawy and Ali 2012, Kumar et al. 2014, Ayala-Orozco et al. 2017, Wang et al. 2017). 이에 다량의 데이터를 바탕으로 리질리언스를 평가하고 의미있는 결과를 도출하고 위해 활용된 여러 종류의 통계기법을 정리하고자 한다. 반면 기본적인 통계기법인 t검정, 분산분석, 상관분석 등은 제외하였다.

다변량분석 (multivariate analysis)은 복잡한 구조의 데이터를 여러 변수 또는 여러 차원의 동시분석을 통해 데이터의 기본적인 경향을 요약하는 통계적 기법으로, 개별 시료를 조사하거나 분석할 때 하나 이상의 특성이 측정되는 경우 다변량 자료가 생성된다고 볼 수 있다 (Kenkel et al. 2002). 선행 연구들이 많이 사용한 방법으로 주성분 분석 (principal component analysis, PCA), 주좌표분석 (principal coordinate analysis, PCoA), 비계량형 다차원 척도법 (nonmetric multidimensional scaling, NMDS), 중복분석 (redundancy analysis, RDA), 정준분석 (canonical analysis, CA), 대응분석 (correspondence analysis, CA) 등이 있으며, 데이터의 근본적인 구조와 연구의 목적에 따라 적절한 방법을 선정하게 된다.

그 중에서도 많은 연구자들이 토양 리질리언스 연구에 활용한 통계분석 방법은 주성분 분석이라 할 수 있다 (Frey et al. 2008, Griffiths et al. 2008, Deng et al. 2009, Brandt et al. 2010, Thorsen et al. 2010, McFarland et al. 2013, Mora and Lazaro 2013, Zhang et al. 2013). 주성분분석은 Pearson (1901)과 Hotelling (1933)에 의해 소개된 가장 오래된 다변량 분석방법 가운데 하나로, 다변량 자료의 차원을 축소 및 요약하여 분석의 단순화를 가능케 하는 가장 널리 사용되는 방법이다. Frey

et al. (2008)은 오염/비오염 토양을 대상으로 식물추출 공법을 적용하고 20일, 40일, 90일 후에 시료를 채취하여 *Pseudomonas*의 16S rRNA와 암모늄 산화 박테리아의 *amoA* 유전자를 12개 운영분류단위 (operating taxonomic unit, OTUs)를 기준으로 주성분 분석을 수행하였다. Griffiths et al. (2008)는 26개의 서로 다른 토양을 대상으로 구리와 열 스트레스 실험을 수행하고 토성에 따른 인지질 지방산 (PLFA)의 패턴을 주성분 분석하였다. 그 결과 살균과 점종된 식양토 (clay-loam soil) 또는 사질토 (sandy soil)에서 발견된 미생물 군집이 서로 달랐으며 점종원에 의한 차이는 없는 것을 확인하였다. Deng et al. (2009)과 Brandt et al. (2010)은 미생물 군집수준 또는 인지질 지방산, 제한효소 절편길이 다형성과 같은 유전자 수준에서 구리에 의한 미생물 군집의 전환 (shift)과 리질리언스를 확인하였다. 그리고 Mora and Lázaro (2013)는 식생의 발달과 리질리언스에 차이를 야기하는 토양 침식의 문턱 영향 인자를 주성분 분석을 통해 제1 성분 (토양 입자 크기, 토양 유기탄소의 분획, 토양 입단)과 제2 성분 (전기전도도, 거친 모래, 점토)을 각각 도출하였다.

주성분분석의 저차원화를 더 강력하게 만드는 방법인 다차원척도법 (multidimensional scaling, MDS)은 데이터를 축소하고, 많은 데이터 속에 잠재된 패턴과 구조를 찾아내며 그 구조를 기하학적으로 표현하는 것을 목적으로, 데이터 사이의 유사도 (similarity), 또는 비유사도 (dissimilarity)를 측정하여 그래프에 점으로 표기함으로써 데이터 사이의 집단화를 시각적으로 표현하는 방법이다 (Huh and Lee 2012). Hernández et al. (2012)은 비결정성 (non-crystalline) 광물이 토양 유기물, 리질리언스, 그리고 분자 구성에 미치는 기작을 명확히 밝히기 위해 84개 토양 시료에 각각 40개의 물리화학적 특성 자료를 대상으로 MDS기법을 사용하였다. 그 결과 토양 유기물의 양과 리질리언스는 비정형 광물의 양에 매우 의존적인 것으로 나타났고 정형광물 또는 방향성 화합물에는 큰 영향을 받지 않았으며, 부정형 점토광물은 미생물 대사물의 보호와 콜로이드 수준에서 토양 탄소의 안정화에 중요한 역할을 하는 것을 확인하였다.

Chaer et al. (2009)은 미생물 군집의 변화를 확인하기 위하여 토양의 특성별 열 교란에 대한 인지질 지방산 결과에 비계량형 다차원척도법 (non-metric multidimen-

sional scaling, NMDS)을 활용하였으며, 이를 통해 열 처리에 의한 토양 고유 미생물 군집의 상대적인 변화를 평가할 수 있었다. Kuske et al. (2012)은 16S rRNA 제한효소절편길이다형성 자료를 NMDS 기법을 활용하여 물리적 교란과 시간에 따른 박테리아 군집 구조의 변화를 시각적으로 이차원 도표에 표현하였다. Frenk et al. (2014)은 관개수 수질이, Zhou et al. (2016)은 건조-습윤 처리가, 그리고 Hirsch et al. (2017)은 토지 이용도의 변화가 박테리아 군집의 변화에 미치는 영향을 확인하였고 McFarland et al. (2013)과 Howell et al. (2014)은 각각 이산화탄소의 농도와 살진균제의 농도가 진균 군집의 변화를 시각적으로 결과를 보여주었다. 이 외에도 식물 군락의 변화 그리고 매토종자 (soil seed bank)의 변화를 보여주기 위해 NMDS를 활용한 연구도 찾아볼 수 있었다 (Scott et al. 2010, Scott and Morgan 2012, Overby et al. 2015, Wonkka et al. 2016).

Kuan et al. (2006)과 Meola et al. (2014)은 계량형 다차원척도법인 주요좌표분석법 (principal coordinate analysis, PCoA)을 활용하기도 하였다. 비계량형 다차원척도법인 NMDS는 데이터 사이의 거리 또는 비유사성에 대한 절대적인 크기는 무시하고, 연구자의 판단에 의한 순위 정보를 이용하여 근접도를 계산하는 반면, 계량형 다차원척도법은 데이터 사이의 실제거리와 비유사성을 근접도로 계산한다는 데에 차이가 있다. Kuan et al. (2006)은 토양에 체초제, 질소 및 석회비료, 하수, 파종 등의 처리가 토양 진정세균 박테리아의 유전적 구조에 미치는 영향을 확인하기 위하여 진정세균 프라이머를 활용한 PCR 전기영동 결과 패턴을 PCoA를 활용하여 분석하였다. 그 결과, 미생물 군집 구조의 변화가 토양 미생물의 기능적 리질리언스 결과와는 일치하지 않는 한계점을 보고하였다.

대응분석 (correspondence analysis)은 범주형 자료에 대한 다차원척도법으로, 다변량 (주로 이변량) 범주형 자료를 저차원 공간에 시각화하여 변수들 간 연관패턴을 그림으로 나타내는 방법이다 (Choi and Moon 2003). 그림에 상에서 각 자료의 값들이 서로 가까이 위치할수록 유사도 (similarity)가 높으며 행과 열의 연관성 (association)을 확인할 수 있다. 정준대응분석 (canonical correspondence analysis, CCA)은 대응분석의 표준 형태이자 직접적인 변화도 분석 (gradient analysis)의 한 형태로, 설명변수 행렬에 의해 설명될 수

있는 대응만이 최종 결과에 표현되는 분석 방법이다. 특히 정준대응분석은 생태학 분야에서 많이 사용되는데 특정 장소에서 종 (spcies)의 양(abundance)인 관측값과 환경변수인 변화도 두 개의 행렬을 가지고 분석을 수행하게 된다. 주성분분석이 관측값과 변화도가 선형적인 관련이 있다고 가정하는 반면, 정준대응분석은 관측값이 변화도에 따라 단봉형 분포 (봉우리가 하나인 분포, unimodal)를 갖는 것을 가정하는 것이 차이이다. del Mar Alguacil et al. (2012)은 하수 처리수를 농경지에 장기 관개 시, 미생물 활성과 관련된 토양 특성들, 균근 균집 구조사이의 상관관계를 확인하기 위해 CCA 분석을 수행하였다. 그 결과 하수 처리수 사용 시 다양성은 저하되었으나 미생물 활성은 증가하여 작물 생산성에 부정적인 영향을 미치지 않았고, 또한 미생물 활동이 더 높아지게끔 균류가 적합한 종 선택 유도하여 토양의 비옥도를 높이는 것으로 보고하였다. Mocali et al. (2015)은 미생물과 선충 균집인 생물학적 변수와 환경적인 변수사이의 관계를 확인하기 위해 CCA 분석을 수행하였다. 그 결과 화학 훈증제는 박테리아와 균의 포식자인 선충을 조절하여 도표상에서 박테리아와 균류의 다양도 지수와 같은 방향성을 나타내었으며 반대로 선충 관련 지표들은 화학 훈증제와 반대 방향으로 분포하며 대조구와 탈지방종자 처리구와 함께하는 경향을 나타내었다.

이외에 리질리언스 연구에서 중복분석 (redundancy analysis, RDA)을 적용한 사례도 일부 찾아볼 수 있었다 (Lewis et al. 2010, Bérard et al. 2011, Rivest et al. 2013, Ayala-Orozco et al. 2017). 중복 분석은 선형회귀의 확장이자 주성분분석의 표준화된 형태로, 두 변수 집단 간의 중복되는 분산의 최대치를 측정하여 설명변수들의 선형결합으로 설명이 가능한 반응변수 중 변수를 추출하고 요약하는 방법이다.

종합해보면, 다양하고 많은 양의 생물 또는 환경 인자 정보들 가운데 토양 리질리언스에 주요한 영향을 미치는 요인들을 새로운 성분 (component)으로 요약하여 설명하고자하는 주성분분석과, 교란에 대한 토양의 저항성과 리질리언스를 생물 균집 구조를 통해 평가하고자 다차원척도 분석을 활용한 토양 리질리언스 연구들이 많았던 것을 확인할 수 있었다. 그리고 조금 더 복잡하고 다차원의 정보 사이의 관계를 이해하기 위해 정준대응분석, 중복 분석 등 다양한 통계 기법들을 적용

한 사례도 살펴보았다. 많은 연구자들은 연구를 통해 수집하고 생산한, 방대한 양의 데이터를 각각의 목적과 데이터 성격에 맞게 처리하여 결과를 해석하였다. 따라서 토양 리질리언스 연구를 수행함에 있어 연구 목적을 향시 염두하여 목적 달성에 적합한 결과를 생산해내는 과정이 매우 중요할 것이다.

4. 토양 리질리언스의 정량 평가

토양 리질리언스 연구가 시작된 이래로 토양에 미치는 교란과 반응, 그리고 리질리언스를 정량화하려는 움직임이 끊임없이 진행되어왔다. Lal (1993)은 질량수지 (mass balance)에 기초하여 통합적인 토양 리질리언스 정량 수식을 소개하였다 (Eq. 1).

$$S_r = S_a + \int_{t_i}^{t_f} (S_n - S_{su} + I_m) dt \quad (\text{Eq. 1})$$

S_r : 토양 리질리언스

S_a : 토양 선행 특성

S_n : 토양 복원 속도

S_{su} : 저하과정에 대한 토양의 민감도

I_m : 투입되는 토양 경영 방법

t : 시간

Lal (1997)은 토양에서 진행되는 저하과정 (degradative)과 복원과정 (restorative) 그리고 토양의 특성들을 계산하여 토양 리질리언스를 정량화할 수 있다고 보았다. 당시에는 경운 과정이 불리오는 토양침식, 유기물감소, 다양성감소와 같은 부정적인 저하과정과 토양 다짐원화, 침투속도 증대, 유효토심 증대, 토양유기물 또는 개량제 혼입과 같은 긍정적인 복원과정을 중심으로 토양리질리언스, 토양비옥도, 토양안정성을 설명하였다. 이후 토양 리질리언스를 평가할 때 정량적 부분 뿐만 아니라 토양 특성, 피복, 생물량, 물과 에너지 수지 처럼 정성적인 분야도 통합적으로 고려해야함을 주장하기도 하였다 (Lal 1997).

이어 Herrick and Wander (1997)는 토양 리질리언스 연구에서 관심을 갖는 특정 토양 특성에 대해 리질리언스와 회복을 계산할 수 있는 식을 제안하였다 (Eqs. 2 and 3).

$$R_{es} = \frac{(X_{ct} - X_{c0})}{(|X_A - X_{c0}|)} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$RS(t_0) = 1 - \frac{2|D_0|}{(C_0 + |D_0|)} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$R_{ec} = (|X_{ct} - X_{c0}|) \quad (\text{Eq. 3})$$

RS: 토양 저항성

t_0 : 교란이 끝난 시점

C_0 : t_0 에서 교란을 받지 않은 대조구 토양의 특성 값

P_0 : t_0 에서 교란을 받은 토양의 특성 값

D_0 : $C_0 - P_0$

R_{es} : 토양 리질리언스

R_{ec} : 토양 회복력

X_A : 교란 이전의 토양 특성

X_{c0} : 교란 직후 토양 특성

X_{ct} : 교란 이후 t 시간 후 토양 특성

t : 시간

$$RL(t_x) = \frac{2 \times |D_0|}{(|D_0| + |D_x|)} - 1 \quad (\text{Eq. 5})$$

RL: 토양 리질리언스

t_x : 리질리언스를 측정하려는 시점

C_x : t_x 에서 교란을 받지 않은 대조구 토양의 특성 값

P_x : t_x 에서 교란을 받은 토양의 특성 값

D_x : $C_x - P_x$

Tivet et al. (2013)은 경운 교란에 의한 토양 리질리언스와 회복력을 계산하여 토양 중 유기탄소가 연간 토양 탄소 주입량에 비례하여 상승하는 것을 확인하였으며, de Andrade Bonetti et al. (2017)은 물리적 교란에 따른 토양의 밀도, 통기성, 입단을 지표로하여 리질리언스와 회복력을 계산하였다. 특히 리질리언스의 경우 유기물, 점토함량, 미사함량과 유의한 상관관계에 있는 것을 확인하였다. de Moraes Sá et al. (2014)도 토양 유기탄소에 대한 리질리언스를 계산하고, 다른 지표들에 비하여 생태학적 천이단계를 분류할 때 매우 적합한 지표임을 확인하였다.

교란으로부터의 저항성과 리질리언스를 비교·평가할 때 상대적 정량 척도를 제공하는 지표의 필요성이 제기되어, Orwin and Wardle (2004)은 실제 데이터 결과와 기존 문헌들의 계산식, 타 저자들이 고안한 계산식들을 비교하고 새로운 계산식을 제안하였다 (Eqs. 4 and 5).

저항성은, 교란이 끝나는 시점 (t_0) 이후에는 교란이 더 이상 가하지 않기 때문에 교란이 종료되는 시간까지를 대상으로 측정하고, 리질리언스는 교란이 종료된 이후 어느 정도 시간이 흐른 이후 특정 시간에 리질리언스를 측정하게 된다. 이처럼 저항성과 리질리언스를 계산할 때의 가장 큰 차이는 측정하는 또는 관측하는 시점의 차이라 할 수 있으며, 이후 많은 연구들에서 위 계산식을 활용하였다 (Kumar et al. 2014, Lazzaro et al. 2010, Lipińska et al. 2013, Liang et al. 2014). 이 외에도 Table 4와 같이 리질리언스를 정량화하기 위해 다양한 계산식들이 제안된 바 있다.

Table 4. Calculation of resilience indices

Resilience	References
$\sqrt{\sum_{t=i} (D_x)^2 / C_x}$	O'Neill (1976)
$\frac{D_x}{C_0}$	Sousa (1980), Kaufman (1982)
$(C_x - \frac{C_x}{D_x}) \times 100$	Griffiths et al. (2000)
$\int_x^j f(t) \frac{dt}{(j-x)}$	Zhang et al. (2010)

C_0 : soil characteristics of undisturbed control soil.

C_x : soil characteristics of undisturbed control soil after time x immediately after disturbance termination.

d_x : soil characteristics of disturbed after time x immediately after disturbance termination.

5. 결론

토양에 가해지는 교란은 크게 자연적인 원인과 인위적인 요인으로 나눌 수 있으며, 다양한 물리적, 화학적, 생물학적 과정으로 교란을 가하게 된다. 선행 토양 리질리언스 연구들은 공통적으로 (1) 토양 및 부지 선정 (2) 스트레스 및 교란(독립변수) 설정 (3) 토양 특성 및 지표(종속변수) 설정 (4) 다양한 시공간적 규모(scale) 실험 수행 (5) 데이터 통계분석 등 5단계로 수행되어왔다. 본 종설은 선행연구를 통해 토양 리질리언스를 접한 연구자들이 실질적으로 실험을 설계하고 연구를 진행하는 데에 기본적인 이정표가 될 것을 목적으로, 토양 교란에 대한 종속변수에 해당하는 토양의 물리적, 화학적 그리고 생물학적 특성과, 결과 데이터를 가공한 사례와 방법들을 정리하였다. 선행연구들은 교란의 종류와 목적에 맞는 다양한 지표들을 선정하였으며, 넓은 시공간적 연구 범위와 다차원의 복잡하고 방대한 양의 결과를 처리하기 위하여 여러 통계기법들을 활용한 것을 확인할 수 있었다. 또한 리질리언스, 회복 및 저항성을 정량화 한 사례들을 정리함으로써 각 용어의 정의에 따라 계산식이 조금씩 상이한 것을 확인하였다. 선행 및 이번 연구 종설에서 다룬 토양 리질리언스의 일반적인 개론을 바탕으로, 향후 국내 농업 환경을 고려한 실질적인 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

This research was funded by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) [2019R1I1A1A01043684], and partly supported by Korea University.

References

- Abdel Kawy, W.A.M. and Ali, R.R. 2012. Assessment of soil degradation and resilience at northeast Nile Delta Egypt: the impact on soil productivity. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 15(1): 19-30.
- Ajayi, A.E. and Horn, R. 2016a. Comparing the potential of clay and biochar in improving water retention and mechanical resilience of sandy soil. *International Agrophysics* 30(4): 391-399.
- Ajayi, A.E. and Horn, R. 2016b. Transformation of ex-arable land to permanent grassland promotes pore rigidity and mechanical soil resilience. *Ecological Engineering* 94: 592-598.
- Ajayi, A.E. and Horn, R. 2017. Biochar-induced changes in soil resilience: effects of soil texture and biochar dosage. *Pedosphere* 27(2): 236-247.
- Angers, D.A., Bullock, M.S., and Mehuys, G.R. 2008. Aggregate stability to water. In, Carter, M.R. and Gregorich, E.G. (eds.), *Soil sampling and methods of analysis*, 2nd. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA. pp. 811-820.
- Arthur, E., Schjøning, P., Moldrup, P., and de Jonge, L.W. 2012. Soil resistance and resilience to mechanical stresses for three differently managed sandy loam soils. *Geoderma* 173-174: 50-60.
- Ayala-Orozco, B., Gavito, M.E., Mora, F., Siddique, I., Balvanera, P., Jaramillo, V.J., Cotler, H., Romero-Doque, L.P., and Martinez-Meyer, E. 2017. Resilience of soil properties to land-use change in a tropical dry forest ecosystem. *Land Degradation and Development* 29(2): 315-325.
- Badiane, N.N.Y., Chotte, J.L., Pate, E., Masse, D., and Rouland, C. 2001. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions. *Applied Soil Ecology* 18(3): 229-238.
- Beare, M.H., Neely, C.L., Coleman, D.C., and Hargrove, W.L. 1990. A substrate-induced respiration (SIR) method for measurement of fungal and bacterial biomass on plant residues. *Soil Biology and Biochemistry* 22(5): 585-594.
- Benitez, E., Melgar, R., and Nogales, R. 2004. Estimating soil resilience to a toxic organic waste by measuring enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry* 36(10): 1615-1623.
- Bérard, A., Bouchet, T., Sévenier, G., Pablo, A.L., and Gros, R. 2011. Resilience of soil microbial communities impacted by severe drought and high temperature in the context of Mediterranean heat waves. *Eurasian Soil Science* 47(6): 333-342.
- Black, R. 1986. The determination of specific gravity using the Siphon-Can method. *Cement, Concrete and Aggregates* 8(1): 46-49.
- Blair, G.J., Lefroy, R.D.B., and Lisle, L. 1995. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research* 46(7): 1459-1466.
- Blum, W.E.H. and Santelises, A.A. 1994. A concept of sustainability and resilience based on soil functions. In, Greenland, D.J. and Szabolcs, I. (eds.), *Soil resilience and sustainable land use*. CAB Int., Wallingford, UK. pp.

- 535-542.
- Bongers, T. 1990. The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia* 83(1): 14-19.
- Brandt, K.K., Frandsen, R.J.N., Holm, P.E., and Nybroe, O. 2010. Development of pollution-induced community tolerance is linked to structural and functional resilience of a soil bacterial community following a five year field exposure to copper. *Soil Biology and Biochemistry* 42(5): 748-757.
- Bronick, C.J. and Lal, R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124(1-2): 3-22.
- Brookes, P.C., Landman, A., Pruden, G., and Jenkinson, D.S. 1985. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 17(6): 837-842.
- Brookes, P.C., Powlson, D.S., and Jenkinson, D.S. 1982. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 14(4): 319-329.
- Carter, M.R., Noronha, C., Peters, R.D., and Kimpinski, J. 2009. Influence of conservation tillage and crop rotation on the resilience of an intensive long-term potato cropping system: restoration of soil biological properties after potato phase. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 133(1-2): 32-39.
- Chaer, G., Fernandes, M., Myrold, D., and Bottomley, P. 2009. Comparative resistance and resilience of soil microbial communities and enzyme activities in adjacent native forest and agricultural soils. *Microbial Ecology* 58(2): 414-424.
- Choi, Y.S. and Moon, H.J. 2003. Comparative study on statistical packages for using multivariate Q-technique. *The Korean Communications in Statistics* 10(2): 433-443.
- Coull, B.C., Hicks, G.R.F., and Wells, J.B.J. 1981. Nematode/copepod ratios for monitoring pollution: a rebuttal. *Marine Pollution Bulletin* 12(11): 378-381.
- de Andrade Bonetti, J., Anghinoni, I., de Moraes, M.T., and Fink, J.R. 2017. Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems. *Soil and Tillage Research* 174: 104-112.
- de Lange, H.J., Sala, S., Vighi, M., and Faber, J.H. 2010. Ecological vulnerability in risk assessment - A review and perspectives. *Science of the Total Environment* 405(18): 3871-3879.
- de Moraes Sá, J.C., Tivet, F., Lal, R., Briedis, C., Hartman, D.C., dos Santos, J.Z., and dos Santos, J.B. 2014. Long-term tillage systems impacts on soil C dynamics, soil resilience and agronomic productivity of a Brazilian oxisol. *Soil and Tillage Research* 136: 38-50.
- de Vries, F.T., Liiri, M.E., Bjørnlund, L., Bowker, M.A., Christensen, S., Setälä, H.M., and Bardgett, R.D. 2012. Land use alters the resistance and resilience of soil food webs to drought. *Nature Climate Change* 2: 276-280.
- del Mar Alguacil, M., Torrecillas, E., Torres, P., García-Orenes, F., and Roldán, A. 2012. Long-term effects of irrigation with waste water on soil AM fungi diversity and microbial activities: the implications for agroecosystem resilience. *Plos One* 7(10): e47680.
- Deng, H., Li, X.F., Cheng, W.D., and Zhu, Y.G. 2009. Resistance and resilience of Cu-polluted soil after Cu perturbation, tested by a wide range of soil microbial parameters. *FEMS Microbiology Ecology* 70(2): 293-304.
- Di Prisco, C., Imposimato, S., Vardoulakis, I. 2000. Mechanical modelling of drained creep triaxial tests on loose sand. *Géotechnique* 50(1): 73-82.
- Dilly, O., Nii-Annang, S., Franke, G., Fischer, T., Buegger, F., and Zyakun, A. 2011. Resilience of microbial respiration, respiratory quotient and stable isotope characteristics to soil hydrocarbon addition. *Soil Biology and Biochemistry* 43(9): 1808-1811.
- Doran, J.W. 1980. Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. *Soil Science Society of America Journal* 44(4): 765-771.
- Duiker, S.W., Rhoton, F.E., Torrent, J., Smeck, N.E., and Lal, R. 2003. Iron (hydro)oxide crystallinity effects on soil aggregation. *Journal of Soil Science Society* 37(2): 606-611.
- Duniway, M.C., Herrick, J.E., and Monger, H.C. 2010. Spatial and temporal variability of plant-available water in calcium carbonate-cemented soils and consequences for arid ecosystem resilience. *Oecologia* 163(1): 215-226.
- Faber, J.H., van der Pol, J.J.C., and Rutgers, M. 2006. Land use and soil quality: ecological suitability for use. In: Pistocchi, A. (ed.), *Database for distributed landscape classification and land use data of selected distributors based on scientific evidence for importance*. Deliverable D.1.1.4. Integrated Project 'NOMIRACLE' in EU 6th Framework Programme, projectnr0039563. pp. 51-65.
- Franco, I., Contin, M., Bragato, G., and de Nobilli, M. 2004. Microbiological resilience of soils contaminated with crude oil. *Geoderma* 121(1-2): 17-30.
- Freckman, D.W. and Ettema, C.H. 1993. Assessing nematode communities in agroecosystems of varying human intervention. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 45(3-4): 239-261.
- Frenk, S., Hadar, Y., and Minz, D. 2014. Resilience of soil bacterial community to irrigation with water of different qualities under Mediterranean climate. *Environmental Microbiology* 16(2): 559-569.
- Frey, B., Pesaro, M., Rüdte, A., and Widmer, F. 2008. Resilience of the rhizosphere *Pseudomonas* and ammonia oxidizing bacterial populations during phytoextraction of heavy metal polluted soil with poplar. *Environmental Microbiology* 10(6): 1433-1449.

- Fujino, C., Wada, S., Konoike, T., Toyota, K., Suga, Y., and Ikeda, J.I. 2008. Effect of different organic amendments on the resistance and resilience of the organic matter decomposing ability of soil and the role of aggregated soil structure. *Soil Science and Plant Nutrition* 54(4): 534-542.
- Gardner, C.M., Robinson, D., Blyth, K., and Cooper, J.D. 2000. Soil water content. In, Smith, K.A. and Mullins, C.E. (eds.), *Soil and Environmental Analysis: Physical methods* 2nd ed. Marcel Dekker Inc. New York. pp. 1-74.
- Govaerts, B., Sayre, K.D., and Deckers, J. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil and Tillage Research* 87(2): 163-174.
- Gregory, A.S., Watts, C.W., Griffiths, B.S., Hallett, P.D., Kuan, H.L., and Whitmore, A.P. 2009. The effect of long-term soil management on the physical and biological resilience of a range of arable and grassland soils in England. *Geoderma* 153(1-2): 172-185.
- Gregory, A.S., Watts, C.W., Whalley, W.R., Kuan, H.L., Griffiths, B.S., Hallett, P.D., and Whitmore, A.P. 2007. Physical resilience of soil to field compaction and the interactions with plant growth and microbial community structure. *Eurasian Journal of Soil Science* 58(6): 1221-1232.
- Griffiths, B.S., Hallett, P.D., Kuan, H.L., Gregory, A.S., Watts, C.W., and Whitmore, A.P. 2008. Functional resilience of soil microbial communities depends on both soil structure and microbial community composition. *Biology and Fertility of Soils* 44(5): 745-754.
- Griffiths, B.S., Hallett, P.D., Kuan, H.L., Pitkin, Y., and Aitken, M.N. 2005. Biological and physical resilience of soil amended with heavy metal-contaminated sewage sludge. *Eurasian Journal of Soil Science* 56(2):197-206.
- Griffiths, B.S., Ritz, K., Bardgett, R.D., Cook, R., Christensen, S., Ekelund, F., Sørensen, S.J., Bååth, E., Bloem, J., de Ruiter, P.C., Dolfing, J., and Nicolardot, B. 2000. Ecosystem response of pasture soil communities to fumigation-induced microbial diversity reductions: an examination of the biodiversity-ecosystem function relationship. *OIKOS* 90(2): 279-294.
- Hejzman, M., Jouany, C., Cruz, P., Morel, C., Stroia, C., and Theau, J.P. 2014. Sub soil P status could explain the absence of resilience in plant species composition of subalpine grassland 63 years after the last fertilizer application. *Scientia Agriculturae Bohemica* 45(2): 75-84.
- Hernández, Z., Almendros, G., Carral, P., Álvarez, A., Knicker, H., and Pérez-Trujillo, J.P. 2012. Influence of non-crystalline minerals in the total amount, resilience and molecular composition of the organic matter in volcanic ash soils (Tenerife Island, Spain). *European Journal of Soil Science* 63(5): 603-615.
- Herrick, J.E. and Wander, M.M. 1997. Relationships between soil organic carbon and soil quality in cropped and rangeland soils: the importance of distribution, composition, and soil biological activity. CRC press, Boca Raton, FL.
- Hirsch, P.R., Jhurrea, D., Williams, J.K., Murray, P.J., Scott, T., and Misselbrook, T.H. 2017. Soil resilience and recovery: rapid community responses to management changes. *Plant and Soil* 412(1-2): 283-297.
- Hotelling, H. 1933. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology* 24(6): 417-441.
- Howell, C.C., Hilton, S., Semple, K.T., and Bending, G.D. 2014. Resistance and resilience responses of a range of soil eukaryote and bacterial taxa to fungicide application. *Chemosphere* 112: 194-202.
- Hueso, S., Hernández, T., and García, C. 2011. Resistance and resilience of the soil microbial biomass to severe drought in semiarid soils: the importance of organic amendments. *Applied Soil Ecology* 50: 27-36.
- Huh, M.H. and Lee, Y.G. 2012. Multidimensional scaling of asymmetric distance matrices. *The Korean Journal of Applied Statistics* 25(4): 613-620.
- Jastrow, J.D. 1996. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* 28(4-5): 665-676.
- Kaufman, L.H. 1982. Stream aufwuchs accumulation: disturbance frequency and stress resistance and resilience. *Oecologia* 52: 57-63.
- Kenkel, N.C., Derksen, D.A., Thomas, A.G., and Watson, P.R. 2002. Multivariate analysis in weed science research. *Weed Science* 50(3): 281-292.
- Kim, D.K., Kim, S.W., and An, Y.J. 2019. Research trend for on-site soil ecotoxicity evaluation methods for field soil. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 39(6): 348-355.
- Kim, J., Kang, S.H., Min, K.A., Cho, K.S., Lee, I.S. 2006. Rhizosphere microbial activity during phytoremediation of diesel contaminated soil. *Journal of Environmental Science and Health, Part A* 41(11): 2503-2516.
- Kim, M.S., Min, H.G., Hyun, S.H., and Kim, J.G. 2020. Soil resilience and threat factors related to agricultural environment. *Ecology and Resilient Infrastructure* 7(1): 26-42.
- Kiss, S., Drăgan-Bularda, M., and Rădulescu, D. 1975. Biological significance of enzymes accumulated in soil. *Advanced Agronomy* 27: 25-87.
- Kuan, H.L., Fenwick, C., Glover, L.A., Griffiths, B.S., and Ritz, K. 2006. Functional resilience of microbial communities from perturbed upland grassland soils to further persistent or transient stresses. *Soil Biology and Biochemistry* 38(8): 2300-2306.
- Kumar, S., Patra, A.K., Singh, D., and Purakayastha, T.J. 2014. Long-term chemical fertilization along with

- farmyard manure enhances resistance and resilience of soil microbial activity against heat stress. *Journal of Agronomy and Crop Science* 200(2): 156-162.
- Kuske, C.R., Yeager, C.M., Johnson, S., Ticknor, L.O., and Belnap, J. 2012. Response and resilience of soil biocrust bacterial communities to chronic physical disturbance in arid shrublands. *The ISME Journal* 6: 886-897.
- Lal, R. 1993. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. *Soil and Tillage Research* 27(1-4): 1-8.
- Lal, R. 1997. Degradation and resilience of soils. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 352: 997-1010.
- Lal, R. and Kimble, J.M. 2001. Importance of soil bulk density and methods of its importance. In, Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F. and Stewart, B.A. (eds.), *Assessment methods for soil carbon*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA. pp. 31-44.
- Larney, F.J., Li, L., Janzen, H.H., Angers, D.A., and Olson, B.M. 2016. Soil quality attributes, soil resilience and legacy effects following topsoil removal and one-time amendments. *Canadian Journal of Soil Science* 96(2): 177-190.
- Lazzaro, A., Franchini, A.G., Brankatschk, R., and Zeyer, J. 2010. Pioneer communities in the forefields of retreating glaciers: how microbes adapt to a challenging environment. How microbes adapt to a challenging environment. *Formatex, Badajoz, Spain*. pp. 43-52.
- LeBissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Eurasian Journal of Soil Science* 47(4): 425-437.
- Letey, J. 1991. The study of soil structure - science of art. *Australian Journal of Soil Research* 29(6): 699-707.
- Lewis, T., Reid, N., Clarke, P.J., and Whalley, R.D.B. 2010. Resilience of a high conservation-value, semi-arid grassland on fertile clay soils to burning, mowing and ploughing. *Austral Ecology* 35(4): 464-481.
- Liang, C., Zhu, X., Fu, S., Méndez, A., Gascó, G., and Paz-Ferreiro, J. 2014. Biochar alters the resistance and resilience to drought in a tropical soil. *Environmental Research Letters* 9(6): 1-6.
- Lipińska, A., Kucharski, J., and Wyszowska, J. 2013. Urease activity in soil contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons. *Polish Journal of Environmental Studies* 22(5): 1393-1400.
- Lundquist, E.J., Jackson, L.E., and Scow, K.M. 1999. Wet-dry cycles affect dissolved organic carbon in two California agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry* 31(7): 1031-1038.
- Mandal, U.K., Sharma, K.L., Venkanna, K., Pushpanjali, Adake, R.V., Masane, R.N., Prasad, J.V.N.S., Venkatesh, G., and Rao, Ch.S. 2017. Sustaining soil quality, resilience and critical carbon level under different cropping systems in semi-arid tropical Alfisol soils. *Current Science* 112(9): 1882-1895.
- Marschner, P., Kandeler, E., and Marschner, B. 2003. Structure and function of the soil microbial community in a long-term fertilizer experiment. *Soil Biology and Biochemistry* 35(3): 453-461.
- Martínez-Pascual, E., Grotenhuis, T., Solana, A.M., and Viñas, M. 2015. Coupling chemical oxidation and biostimulation: effects on the natural attenuation capacity and resilience of the native microbial community in alkylbenzene-polluted soil. *Journal of Hazardous Materials* 300(30): 135-143.
- McFarland, J.W., Waldrop, M.P., and Haw, M. 2013. Extreme CO₂ disturbance and the resilience of soil microbial communities. *Soil Biology and Biochemistry* 65: 274-286.
- McGovern, S.T., Evans, C.D., Dennis, P., Walmsley, C.A., Turner, A., and McDonald, M.A. 2013. Resilience of upland soils to long term environmental changes. *Geoderma* 197-198: 36-42.
- Meola, M., Lazzaro, A., and Zeuwer, J. 2014. Diversity, resistance and resilience of the bacterial communities at tow alpine glacier forefields after a reciprocal soil transplantation. *Environmental Microbiology* 16(6): 1918-1934.
- Miller, M. and Dick, R.P. 1995. Thermal stability and activities of soil enzymes as influenced by crop rotations. *Soil Biology and Biochemistry* 27(9): 1161-1166.
- Mocali, S., Landi, S., Curto, G., Dallavalle, E., Infantino, A., Colzi, C., d'Errico, G., D'Avino, L., and Lazzari, L. 2015. Resilience of soil microbial and nematode communities after biofumigant treatment with defatted seed meals. *Industrial Crops and Products* 75(30): 79-90.
- Mora, J.L. and Lázaro, R. 2013. Evidence of a threshold in soil erodibility generating differences in vegetation development and resilience between two semiarid grasslands. *Journal of Arid Environments* 89: 57-66.
- Mworia, J.K., Mnene, W.N., Musembi, D.K., and Reid, R.S. 1997. Resilience of soils and vegetation subjected to different grazing intensities in a semi-arid rangeland of Kenya. *African Journal of Range and Forage Science* 14(1): 26-31.
- Nam, S.H. and An, Y.J. 2014. Review of extraction methods of soil extracts, soil elutriates, and soil suspensions for ecotoxicology assessment. *Journal of Soil and Groundwater Environment* 19(3): 15-24.
- Neher, D.A. 2001. Role of nematodes in soil health and their use as indicators. *Journal of Nematology* 33(4): 161-168.
- Ng, E.L., Patti, A.F., Rose, M.T., Scheffe, C.R., Smernik, R.J., and Cavagnaro, T.R. 2015. Do organic inputs alter

- resistance and resilience of soil microbial community to drying? *Soil Biology and Biochemistry* 81: 58-66
- O'Neill, R.V. 1976. Ecosystem persistence and heterotrophic regulation. *Ecology* 57(6): 1244-1253.
- Orwin, K.H. and Wardle, D.A. 2004. New indices for quantifying the resistance and resilience of soil biota to exogenous disturbances. *Soil Biology and Biochemistry* 36(11): 1907-1912.
- Overby, S.T., Owen, S.M., Hart, S.C., Neary, D.G., and Johnson, N.C. 2015. Soil microbial community resilience with tree thinning in a 40-year-old experimental ponderosa pine forest. *Applied Soil Ecology* 93: 1-10.
- Park, S.K., Lee, H.D., Kim, Y.K. 2006. Characteristics of community level physiological profile (CLPP) of biofilm microorganisms formed on different drinking water distribution pipe materials. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater* 20(3): 431-441.
- Pearson, K. 1901. Principal components analysis. *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal* 6: 566.
- Pimm, S.L. 1984. The complexity and stability of ecosystems. *Nature* 307: 321.
- Polverigiani, S., Franzina, M., Salvetti, M., Folini, L., Ferrante, P., Scortichini, M., and Neri, D. 2016. The effect of growth substrate on apple plant status and on the occurrence of blister bark symptoms. *Scientia Horticulturae* 198: 233-241.
- Rivest, D., Lorente, M., Olivier, A., and Messier, C. 2013. Soil biochemical properties and microbial resilience in agroforestry systems: effects on wheat growth under controlled drought and flooding conditions. *Science of Total Environment* 463-464: 51-60.
- Rivest, D., Paquette, A., Shipley, B., Reich, P.B., and Messier, C. 2015. Tree communities rapidly alter soil microbial resistance and resilience to drought. *Functional Ecology* 29(4): 570-578.
- Romero, C.M., Abril, A., Noe, L., and Rampoldi, E.A. 2014. Resilience of humification process to evaluate soil recovery in a semiarid agroecosystem of central Argentina. *Spanish Journal of Soil Science* 4(3): 211-224.
- Rozanov, B.G. 1994. Stressed soil systems and soil resilience in drylands. In, *Proceeding of 15th International Congress of Soil Science, Acapulco, Mexico*. pp. 238-245.
- Saison, C., Degrange, V., Oliver, R., Millard, P., Commeaux, C., Montange, D., and le Roux, X. 2006. Alteration and resilience of the soil microbial community following compost amendment: effects of compost level and compost borne microbial community. *Environmental Microbiology* 8(2): 247-257.
- Samiguet, A., Lucas, P., Lucas, M., and Samson, R. 1992. Soil conduciveness to take-all of wheat: influence of the nitrogen fertilizers on the structure of populations of fluorescent pseudomonads. *Plant and Soil* 145(1): 29-36.
- Schoenholtz, S.H., Miegroet, H.V., and Burger, J.A. 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management* 138(1-3): 335-356.
- Scott, A.J. and Morgan, J.W. 2012. Resilience, persistence and relationship to standing vegetation in soil seed banks of semi-arid Australian old field. *Applied Vegetation Science* 15(1): 48-61.
- Scott, K., Setterfield, S., Douglas, M., and Andersen, A. 2010. Soil seed bank confer resilience to savanna grass-layer plants during seasonal disturbance. *Acta Oecologica* 36(2): 202-210.
- Seybold, C.A., Herrick, J.E., and Brejda, J.J. 1999. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. *Soil Science* 164(4): 224-234.
- Song, X., Liu, M., Wu, D., Griffiths, B.S., Jiao, J., Li, H., and Hu, F. 2015. Interaction matters: synergy between vermicompost and PGPR agents improves soil quality, crop quality and crop yield in the field. *Applied Soil Ecology* 89: 25-34.
- Sousa, W.P. 1980. The responses of a community to disturbance: the importance of successional age and species life history strategies. *Oecologia* 45: 72-81.
- Szabolcs, I. 1994. The concept of soil resilience. In, Greenland, D.J. and Szabolcs, I. (eds.), *Soil resilience and sustainable land use*. CAB International, Wallingford, UK. pp. 33-39.
- Thorsen, M.K., Hopkins, D.W., Woodward, S., and McKenzie, B.M. 2010. Resilience of microorganisms and aggregation of a sandy calcareous soil to amendment with organic and synthetic fertilizer. *Soil Use and Management* 26(2): 149-157.
- Tisdall, J.M. and Oades, J.M. 1982. Organic matter and water stable aggregates in soils. *Soil Science* 33(2): 141-163.
- Tivet, F., de Moraes Sá, J.C., Lal, R., Borszowskei, P.R., Briedis, C., dos Santos, J.B., Machado Sá, M.F., da Cruz Hartman, D., Eurich, G., Farias, A., Bouzinac, S., and Séguy, L. 2013. Soil organic carbon fraction losses upon continuous plow-based tillage and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. *Geoderma* 209-210: 214-225.
- Verhulst, N., Carrillo-Garcia, A., Moeller, C., Trethowan, R., Sayre, K.D., and Govaerts, B. 2011. Conservation agriculture for wheat-based cropping systems under gravity irrigation: increasing resilience through improved soil quality. *Plant and Soil* 240(1-2): 467-479.
- Wada, S., and Toyota, K. 2007. Repeated applications of farmyard manure enhance resistance and resilience of soil biological functions against soil disinfection. *Biol. Fert. Soil* 43(3): 349-356.
- Wang, F., Ding, Y., Sayer, E.J., Li, Q., Zou, B., Mo, Q.,

- Li, Y., Lu, X., Tang, J., Zhu, W., and Li, Z. 2017. Tropical forest restoration: fast resilience of plant biomass contrasts with slow recovery of stable soil C stocks. *Functional Ecology* 31(12): 2344-2355.
- Wang, X., Sun, L., Wang, Z., Liu, C., and Zhang, Y. 2014. An analysis of the resilience capacity of soils in North China: a study on land subsidence treatment. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 73(3): 723-731.
- Wonkka, C.L., Twidwell, D., West, J.B., and Rogers, W.E. 2016. Shrubland resilience varies across soil types: implications for operationalizing resilience in ecological restoration. *Ecological Application* 26(1): 128-145.
- Zhang, B., Deng, H., Wang, H.L., Yin, R., Hallett, P.D., Griffiths, B.S., and Daniell, T.J. 2010. Does microbial habitat or community structure drive the functional resilience of microbes to stress in severely degraded soils restored with different plant species? *Soil Biology and Biochemistry* 42: 850-859.
- Zhang, B., Horn, R., and Hallett, P.D. 2005. Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter. *Soil Science Society of America Journal* 69(3): 864-871.
- Zhang, B., Wang, H., Yao, S., and Bi, L. 2013. Litter quantity confers soil functional resilience through mediating soil biophysical habitat and microbial community structure on an eroded bare land restored with mono *Pinus massoniana*. *Soil Biology and Biochemistry* 57: 556-567.
- Zhang, Y., Deng, H., Xue, H.J., Chen, X.Y., Cai, C., Deng, Y.C., and Zhong, W.H. 2016. The effects of soil microbial and physicochemical properties on resistance and resilience to copper perturbation across China. *CATENA* 147: 678-685.
- Zhou, X., Fornara, D., Ikenage, M., Akagi, I., Zhang, R., and Jia, Z. 2016. The resilience of microbial community under drying and rewetting cycles of three forest soils. *Frontiers in Microbiology* 7: 1-12.