Korean J. Soil Sci. Fert. Vol.57, No.1, pp.35-47, 2024

Korean Journal of Soil Science and Fertilizer

Original research article

https://doi.org/10.7745/KJSSF.2024.57.1.035
pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

Selecting indicator of soil properties to correlate with crop productivity in organic farming system

Young Kyu Hong[1], Jin Wook Kim[2], Kyeong Min Lee[3], Dong Ju Lee[3], Cho Rong Lee[4], Sung Chul Kim[5]*

[1]Ph.D. Fellow, Institute of Agricultural Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea
[2]Ph.D. Student, Department of Bio-Environmental Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea
[3]Graduated Student, Department of Bio-Environmental Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea
[4]Researcher, Organic Agricultural Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea
[5]Professor, Department of Bio-Environmental Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

***Corresponding author:** Kim SC (Email: sckim@cnu.ac.kr)

Received: February 7, 2024
Revised: February 28, 2024
Accepted: February 29, 2024

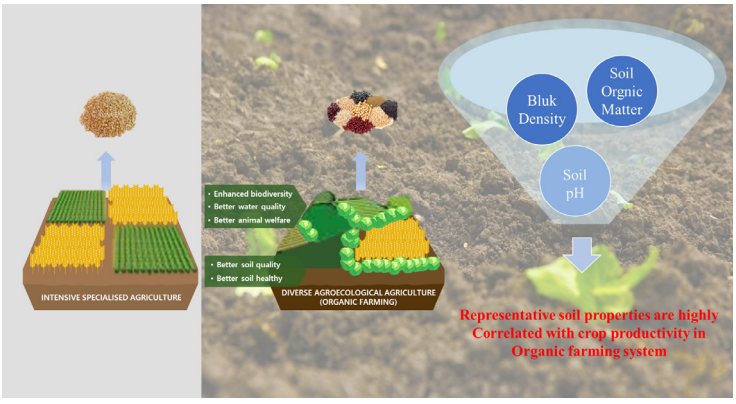
Edited by
Kwon-Rae Kim,
Gyeongsang National University,
Korea

ORCID
Hong YK
https://orcid.org/0000-0002-2828-5939
Kim JW
https://orcid.org/0000-0003-3180-838X
Lee KM
https://orcid.org/0009-0001-1022-3633
Lee DJ
https://orcid.org/0009-0006-4654-4953
Lee CR
https://orcid.org/0000-0002-4912-8035
Kim SC
https://orcid.org/0000-0002-2521-6516

A B S T R A C T

Organic farming has been awarded as an eco-friendly agricultural practice and soil properties are closely related to crop productivity in organic farming system. The main purpose of this study was to examine the physicochemical and biological properties of soil in organic farming and to find closely correlated soil parameters among varied soil properties. Result showed that physicochemical and biological properties of soil in organic farming was generally optimum range for crop production. When soil properties in organic farming was compared to conventional farming, lower bulk density and higher porosity, soil pH, organic matter contents, and cation exchange capacity were observed in organic farming system. Consequently, those soil properties are highly correlated to pepper yield in organic farming although, no biological soil properties are highly correlated to pepper production. This result may indicate that management of physicochemical properties of soil in organic farming system is more important than management of biological properties in soil. However, this study only used limited soil samples and more soil sample analysis in organic farming system should be conducted for comprehensive understanding between soil properties and crop productivity in organic farming system.

Keywords: Crop production, Manure, Organic farming, Soil enzyme activity, Sustainable agriculture



Among varied soil properties, bulk density, porosity, soil pH, soil organic matter content, and cation exchange capacity are highly correlated to pepper yield in organic farming system.

© The Korean Society of Soil Science and Fertilizer. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Introduction

무기질 비료 농약 등과 같은 농자재의 발달은 작물의 생산성 향상에 많은 기여를 하였으나 (Reboredo et al., 2019; Singh et al., 2020), 이러한 농자재의 오남용은 수질 및 토양오염과 같은 농업 환경의 악영향을 초래하였다 (Gimeno-García et al., 1996; Zheng et al., 2019). 이와 같이 농업환경에서 발생할 수 있는 문제점 해결 및 지속 가능한 친환경 농업의 실행, 그리고 안전한 먹거리 생산을 위해 국내외 모두 유기농업에 대한 관심과 연구가 활발히 진행되고 있다 (Reddy, 2010; Seufert et al., 2017). 특히 국내에서는 "친환경농어업 육성 및 유기식품 등의 관리 · 지원에 관한 법률"을 제정하고 이를 바탕으로 지속가능한 농업을 구현하기 위해 유기농업의 활용을 장려하고 있는 실정이다.

국내 유기 농가의 경우 토양 양분관리를 위해 주로 가축분퇴비 (40%), 유기질비료 (39%), 풋거름작물 (3%) 등과 같은 유기물을 활용하고 있다 (Lee et al., 2018). 이와 같은 유기물 시용은 토양 입단화를 촉진시켜 토양 침식을 감소시키며 (Gale et al., 2000; Lee et al., 2023), 토양 미생물 및 효소 활성 증진 등의 토양 특성에 영향을 미쳐 궁극적으로 작물 생산성을 향상 시킨다 (Gale et al., 2000; Hartmann et al., 2015; Ding et al., 2018; Seitz et al., 2019).

An et al. (2015)의 연구에 의하면 유기질 비료와 녹비작물을 2년간 연용 하였을 때 토양 미생물 생체량이 증가하였으며 토양 미생물 군집 분석 결과, 높은 종 다양성을 보였다. Yi et al. (2020)의 연구에서는 시설재배지에 헤어리베치를 풋거름작물로 활용하였을 때 무기질 비료 처리구보다 토양 효소 활성이 증가함을 증명하였다. 또한, Kim et al. (2023)은 국내 유기 농경지와 관행 농경지 토양의 이화학적 및 생물학적 특성을 비교하였을 때, 유기 농경지의 pH, 전기전도도 (EC), 양이온교환용량 (CEC) 및 효소 활성 (β-glucosidase, phosphatse)이 관행 농경지에 비해 높은 것으로 조사되었다. 이와 같이 유기 농법을 적용한 농경지 토양의 특성에 관한 연구는 다양하게 진행되었지만 유기 농경지 토양 특성과 작물 생산성과의 상관관계에 관한 연구는 아직 부족한 실정이다.

고추는 국내 10대 재배 작물 중 하나로 2023년 기준 전국 재배 면적은 27,129 ha이며, 이는 마늘 (24,710 ha), 양파 (17,661 ha), 봄 감자 (14,699 ha), 가을 배추 (13,152 ha)에 비해 높은 재배 면적을 가지고 있는 작물이다. 시군 지역 중에서는 경북 지역 (16,084톤)에서 국내 생산량의 26.1%로 가장 많은 고추가 재배되고 있다.

우리나라에서 재배되고 있는 다양한 작물 중 고추 (*Capsicum annuum* L.)는 유기농 재배의 경우 녹비작물과 유기질 비료를 활용하고 생육 중기 이후에는 다양한 유기자원을 활용하고 있다 (Choi et al., 2008). 또한, 정부에서는 농업 분야에서의 환경보전기능 강화를 위해 2021년부터 2025년까지 제5차 친환경농업 육성 5개년 계획에 따라 무기질비료 사용량을 2025년까지 233 kg ha^{-1}로 감축 목표를 설정하고, 이를 실천하기 위해 친환경 농자재로 유기질비료 공급을 지원하고 있다 (MAFRA, 2021).

따라서 본 연구에서는 장기적으로 유기농업을 실시한 농경지 중 고추재배지를 대상으로 토양의 다양한 특성과 고추 생산량과의 관계를 알기 위해 연구를 수행하였다.

Materials and Methods

시료 채취 및 전처리 방법 토양 시료 채취는 경북 지역을 대상으로 2022년 기준 5년 이상 유기농산물 인증을 받은 농가를 선정하였으며, 이 중 고추 재배지인 농경지 20지점을 선정하여 2022년 10월에 토양 시료를 채취하였다 (Fig. 1). 토양 시료 채취 방법은 토양오염공정시험기준 (ES. 07130)에 따라 토양 표면의 유기물층을 제거한 뒤 표토층 (0 - 15 cm)을 토양시료채취기 (soil auger)를 이용하여 채취하였다. 토양 시료 채취 시, 시료의 균질성을 위해 같은

필지 내 서로 다른 5곳의 위치에서 채취한 시료를 폴리에틸렌 시료채취 봉투 (polyethylene bag)에 넣어 하나의 시료로 혼합한 후 아이스박스에 담아 실험실로 운반하였다. 채취한 토양 시료는 이화학적 분석을 위해 80°C에서 12시간 건조 후 2 mm 표준체로 체거름 후 사용하였으며, 생물학적 특성 분석은 건조하지 않은 습토를 2 mm 표준체로 체 거름한 후, 4°C 이하에서 냉장 보관하였다.

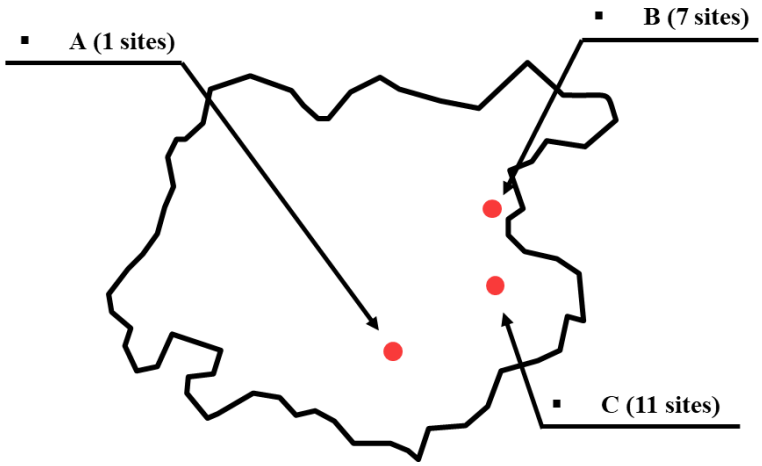


Fig. 1. Sampling locations in this study (Bonghwa-gun, Gyeongsangbuk-do, Korea).

토양의 이화학성 분석 토양의 이화학적 특성 분석 방법은 Table 1에 정리하였다. 토양의 용적밀도 및 공극률은 현장에서 100 cm^3 코어를 이용하여 토양을 채취한 뒤 105°C의 건조기에서 12시간 건조 후 건토의 무게를 측정하여 구하였다. 경도 측정은 산중식 토양 경도계 (DIK-5553, Japan)를 이용하여 현장에서 측정한 후 Eq. 1을 활용하여 측정치 (ω, mm)를 압력값 (R, kg cm^{-2})으로 변환하여 산출하였다.

$$R\ (kg\ m^{-2}) = \frac{100\omega}{0.795 \times (40-\omega)^2} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

점토 함량 분석은 비중계법 (hydrometer method)을 활용하여 산정하였으며 내수성입단화율은 Wet sieving apparatus (M-0813E, Eijkelkamp, Netherlands)를 활용하여 기기사용 매뉴얼에 따라 토양입자크기가 1.0 - 2.0 mm범위의 건조 토양 시료를 사용하였다. 토양의 pH와 전기전도도 (electrical conductivity, EC)는 토양 시료와 증류수를 1:5 (w/v)로 혼합 후, 150 rpm에서 30분간 진탕하여 각각 pH meter (Orion Star™ A111, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA)와 EC meter (SevenCompact™ Conductivity Meter S230, Mettler Toledo, Columbus, OH, USA)를 이용하여 측정하였다. 토양 유기물 함량 및 총 질소 함량은 원소분석기 (TruSpec CHN, LECO Corporation, St. Joseph, MI, USA)를 활용하여 산정하였으며, 토양 유기물 함량 (g kg^{-1})은 총 탄소 함량에 van bemmelen factor (1.724)를 활용하여 산정하였다. 토양의 유효인산 함량 측정에는 Bray No.1 법을 활용하여 분석하였으며, UV-Vis spectrophotometer (Uvmini-1240, Shimadzu, Kyoto, Japan)를 이용하여 비색 정량 하였다. 양이온교환용량 (Cation exchange capacity, CEC)은 1.0 N NH_4OAc (pH 7.0)로 추출하여 ICP-OES (Optima 3200XL, Perkin Elmer, Waltham, MA, USA)로 측정하여 산출하였다.

Table 1. Physicochemical and biological soil analysis method used in this study.

	Parameters	Method/apparatus	Reference
Physical	Clay contents	Hydrometer method	NIAST (2000)
	Water-stable aggregate	Wet sieving method	
	Bulk density	Core sampling	
	Porosity	Core sampling	
	Hardness	Penetrometer in field	
Chemical	pH	1:5 H_2O (w/v)	
	Electric conductivity	1:5 H_2O (w/v)	
	Cation exchange capacity	Brown method	
	Available P_2O_5	Bray No. 1 (UV-vis)	
	Soil organic matter	Elemental analyzer	
	Total nitrogen	Elemental analyzer	
Biological	Soil respiration	Alkaline adsorption method	Weaver et al. (1994)
	β-glucosidase	Titration method	Eivazi and Tabatabai (1988)
	Phosphatase	Titration method	Tabatabai and Bremner (1969)
	Urease	Titration method	Kandeler and Gerber (1988)
	Dehydrogenase	Titration method	Casida (1977)

토양의 생물학적 특성 분석 토양의 생물학적 특성 분석을 위한 분석 방법은 Table 1에 정리하였다. 토양 호흡량 분석은 Weaver et al. (1994)을 참고하여 수행하였다. 토양 호흡량 분석을 위해 약 300 mL 용기에 습토 100 g을 담은 후, 0.5 M NaOH 15 mL을 유리 재질의 튜브에 넣고 용기 안에 있는 습토에 고정시킨 후 밀봉하여 25°C에서 72시간 동안 배양하였다. 배양 후 0.5 M NaOH을 비커에 옮긴 후 phenolphthalein 지시약 (2 - 3방울)을 넣고 1.0 M HCl 용액으로 보라색에서 무색으로 변할 때까지 적정하였으며, 이후 Bromocresol green 지시약 (2 - 3방울)을 다시 첨가 후 0.2 M HCl을 사용하여 푸른색에서 노란색으로 변할 때까지 적정하였다. 이때, 소모된 0.2 M HCl의 양을 CO_2 발생량으로 환산하여 토양 호흡량을 산출하였다. 토양 효소 중 β-glucosidase의 활성도를 측정하기 위해 Eivazi and Tabatabai (1988)의 분석법을 참고하였다. 간략하게 습토 0.5 g에 toluene (0.1 mL), citric phosphate buffer (1.5 mL) (pH 4.9), 증류수 (0.9 mL)를 각각 넣은 후 기질인 50 mM ρ-nitrophenyl-nitrophenyl-D-glucopyranoside (PNG)를 0.6 mL 첨가하였다. 이후 배양기를 이용하여 30°C에서 1시간 배양하였으며, 배양이 완료된 뒤 Whatman No.2 여과지를 이용하여 여과한 후 UV/Vis Spectrophotometer를 이용하여 400 nm 파장에서 흡광도를 측정하여 정량 하였다. Phosphatase 활성 분석은 Tabatabai and Bremner (1969)의 실험 방법을 참고하였다. 습토에 toluene을 첨가한 후 buffer solution (0.5 M Tris, pH 6.5, 1.8 mL), 증류수 (0.6 mL)와 기질인 50 mM sodium-p-nitrophenyl phosphate (p-NPP) 0.6 mL를 넣고 혼합한 뒤 30°C에서 1시간 동안 배양하였다. 이후 ethanol을 8.0 mL 넣은 뒤 Whatman No.2 여과지로 여과한 후, 여과액에 2 M Tris (2.0 mL)를 넣은 후 400 nm에서 비색 정량 하였다. 토양 내 dehydrogenase (DHA) 활성 분석은 습토 (6.0 g)와 $CaCO_3$ (0.2 g)을 혼합한 뒤 3개의 시험관으로 나눠 기질인 2,3,5-triphenyltetrazolium chloride (TTC) 1.0 mL와 증류수 (2.5 mL)를 넣어 혼합 후 밀봉하여 37°C에서 24시간 배양하였다. 배양 후 methanol (10.0 mL)을 넣어 혼합한 후 탈지면으로 막은 funnel에 혼합물을 탈지면의 붉은색이 없어질 때까지 지속적으로 methanol을 넣어 여과하였으며, 여과액은 methanol을 이용하여 100 mL까지 mass up한 뒤 485 nm에서 비색 정

량 하였다 (Casida, 1977). Urease의 활성도는 Kandeler and Gerber (1988)의 분석법을 참고하였다. 토양 시료 (5.0 g)에 2.5 mL 79.9 mM Urea를 가하여 37°C에서 2시간 동안 배양시킨 후 2.0 M KCl (30.0 mL)과 증류수 (2.5 mL)를 첨가한 뒤 30분간 교반하고 Whatman No.2 여과지를 이용하여 여과하였다. 이후 여과액에 증류수와 0.3 M NaOH와 sodium salicylate solution을 혼합하여 조제한 시약 (5.0 mL)을 넣은 뒤 30분간 교반 하여 690 nm 파장에서 비색 정량하였다.

고추 생산량 산출 및 통계분석 선정된 고추 재배 유기 농경지의 면적 및 생산량에 대한 정보는 「국립농산물품질관리원 친환경 인증관리 정보시스템」을 이용하여 수집하였다. 수집된 고추 생산량은 2022년 당해 연도의 생산량이었으며 각 필지별로 면적 대비 생산량을 고려하여 단위면적당 고추 생산량 (kg ha^{-1})을 산출하였다.

토양의 물리, 화학 생물학적 특성 분석 실험은 모든 시료에 대해 3회 반복하였으며, 토양 특성과 생산량과의 상관관계 분석은 pearson 상관계수 분석을 통해 $p < 0.05$ 또는 $p < 0.01$ 값의 인자를 선별하여 분석값의 유의성을 평가 하였다.

Results and Discussion

토양의 이화학적 특성 토양의 이화학적 특성 분석 결과는 Table 2에 나타내었다. 연구 대상 유기 농경지 토양의 물리적 특성 평균값 (측정범위)은 다음과 같았다: 용적밀도 1.13 g cm^{-3} (0.75 - 1.59 g cm^{-3}), 공극률 56.4% (39.0 - 71.0%), 경도 0.53 kg cm^{-2} (0.13 - 1.01 kg cm^{-2}), Clay 함량 19% (10 - 32%). 유기 농경지 토양의 화학적 특성 분석 결과 pH, EC는 각각 6.21 (5.08 - 7.24), 1.00 dS m^{-1} (0.36 - 2.94 dS m^{-1})로 조사되었으며, 토양 유기물 함량은 64.5 g kg^{-1} (35.6 - 95.7 g kg^{-1}), 유효인산 544 mg kg^{-1} (182 - 919 mg kg^{-1}), 총 질소 0.52% (0.08 - 0.85%), CEC는 11.4 $cmol_c$ kg^{-1} (5.33 - 21.2 $cmol_c$ kg^{-1})로 조사되었다.

본 연구에서 분석한 유기 농경지와 선행 연구 중 관행 농경지 토양의 물리적 특성 (용적밀도 1.45 g cm^{-3}, 공극률 47.7%, 경도 1.88 kg cm^{-2})을 비교한 결과, 관행 농경지에 비해 유기 농경지 토양의 용적밀도와 경도는 낮고 공극률은 높은 것으로 나타났다 (Kim et al., 2010). 일반적으로 유기 농경지의 경우 유기질 비료로 인한 토양 내 유기물 함량이 관행 농경지에 비해 높으며 이로 인해 토양의 입단 안정화가 촉진되면서 용적밀도가 감소하고 공극률은 증가하는 추세를 나타낸다 (Cho et al., 2009; Wortman et al., 2012; Lee et al., 2023). 이러한 유기 농경지 토양의 물리적 특성은 작물의 뿌리 생장, 토양 수분과 양분의 흡수속도 등을 촉진하여 생산량에까지 영향을 미칠 수 있다 (Håkansson and Lipiec, 2000; Ruehlmann and Körschens, 2009).

유기 농경지와 관행 농경지 토양의 화학적 특성을 비교하기 위해 선행 연구 중 경북지역 관행 농경지 토양의 화학적 특성과 비교하였다 (Table 2). 본 연구에서 분석한 유기 농경지와 선행 연구에서 분석한 관행 농경지 토양의 화학적 특성을 비교하였을 경우 유기 농경지 토양의 pH와 유기물 함량이 관행 농경지 토양에 비해 높았다. 양이온치환용량의 경우 유기 농경지 토양이 관행 농경지 토양에 비해 평균값은 낮은 것으로 조사되었으나, 분석 결과 범위가 5.33 - 21.2 $cmol_c$ kg^{-1}로 나타났다. 선행 연구에 따르면 토양의 유기물 함량이 높아짐에 따라 토양 pH는 상승하며 토양 내의 치환성 양이온 함량은 가축분이 포함된 농자재의 사용 유무에 따라 다른 것으로 조사되었다 (Lee et al., 2017). 가축분이 포함되지 않은 농자재는 가축분이 포함된 농자재에 비해 치환성 양이온인 칼슘과 칼륨의 함량이 낮으며 가축분을 포함한 농자재를 시용한 토양에 비해 유의적으로 칼슘과 칼륨의 농도가 낮았다 (Lee et al., 2017). 따라서 본 연구에서

조사한 유기 농경지의 경우 가축분이 포함되지 않은 유기 농자재를 시용하였을 것으로 예상되며 이는 농가의 설문조사를 통해 추적 연구가 필요할 것으로 판단된다. 그 이외의 토양 화학성인 전기 전도도, 유효인산, 총질소 함량의 경우 유기 농경지와 관행 농경지의 차이가 크지 않은 것으로 조사되었다.

Table 2. Summary of soil properties in this study and range of representative soil properties in previous study for comparison.

	Parameters	Unit	Organic farming		Conventional farming
			This study	Previous study	Previous study
Physical	BD[1]	(g cm^{-3})	1.13 (0.75 - 1.59)[2]	1.01 - 1.08	1.12 - 1.45
	Porosity	(%)	56.4 (39.0 - 71.0)	58.4 - 60.8	47.7 - 58.4
	WSA	(%)	32.7 (15.6 - 53.6)	-	-
	Hardness	(kg cm^{-2})	0.53 (0.13 - 1.01)	-	1.88
	Clay	(%)	19 (10 - 32)	-	-
Chemical	pH (1:5 H_2O)	-	6.2 (5.1 - 7.2)	6.2 - 6.7	5.63 - 6.20
	EC	(dS m^{-1})	1.00 (0.36 - 2.94)	0.9 - 2.3	0.48 - 1.20
	SOM	(g kg^{-1})	64.5 (35.6 - 95.7)	43.0 - 60.8	28.0 - 35.8
	Av. P_2O_5	(mg kg^{-1})	545 (182 - 919)	489 - 1,221	488 - 894
	T-N	(%)	0.52 (0.08 - 0.85)	0.41	0.14 - 1.43
	CEC	($cmol_c$ kg^{-1})	11.4 (5.33 - 21.2)	14.9 - 16.4	11.9 - 13.3
Biological	SR	(CO_2 mg kg^{-1} day^{-1})	36.6 (16.5 - 63.4)	44.0	46.9 - 56.1
	Glu	(PNP μg g^{-1} h^{-1})	69.2 (7.96 - 109.5)	72.1	380.2 - 403.8
	PHA	(PNP μg g^{-1} h^{-1})	815 (378 - 1,592)	865.0	1,740 - 1,970
	URE	(NH_4-N μg g^{-1} 2 h^{-1})	230.6 (90.2 - 455.9)	228.7	121.4 - 166.3
	DHA	(TPF $μg^{-1}$ g^{-1} day^{-1})	16.1 (4.83 - 32.9)	16.4	12.5 - 23.3
References	-	-	-	Cho et al. (2009) Kim et al. (2023)	Cho et al. (2009) Hong et al. (2021) Kim et al. (2010, 2023)

[1]BD, bulk density; WSA, water stable aggregate; EC, electrical conductivity; SOM, soil organic matter; Av. P_2O_5, available phosphorous; CEC, cation exchange capacity; SR, soil respiration; Glu, β-glucosidase; PHA, phosphatase; URE, urease; DHA, dehydrogenase.
[2]Means (range), n = 20 (sample number).

토양의 생물학적 특성 토양의 생물학적 특성인 토양 호흡량, 토양 효소 활성에 대한 분석 결과는 Table 2에 정리하였다. 본 연구에서 분석한 유기농 토양의 토양 호흡량은 36.6 CO_2 mg kg^{-1} day^{-1} (16.5 - 63.4 mg kg^{-1} day^{-1})로 선행 연구에서 조사된 유기 농경지 (44.0 CO_2 mg kg^{-1} day^{-1})와 관행 농경지 (46.9 - 56.1 CO_2 mg kg^{-1} day^{-1})의 토양 호흡량에 비해 낮았다. 토양호흡의 경우 토양 내 유기물의 분해과정에서 발생되는 뿌리호흡과 미생물 호흡 등에 의해 방출되는 이산화탄소의 양이 혼합된 것으로, 이는 환경요인들과 상호작용하며 다양한 변수 발생으로 인해 차이가 있다 (Maier and Kress, 2000; Jassal and Black, 2006). 본 연구에서는 재배 초기에 투입되는 유기질 비료가 토양 미생물에 의해 충분히 분해된 후 정체기 (stasis phase)에 시료 채취 (10월) 및 분석을 수행하여 토양 호흡량이 낮은 것으로 판단된다 (Gunapala et al., 1998).

토양 효소 활성도 측정 결과 β-glucosidase, phosphatase, urease, dehydrogenase의 평균값이 각각 69.2 PNP μg g^{-1} h^{-1}, 815.2 PNP μg g^{-1} h^{-1}, 230.6 NH_4-N μg g^{-1} 2 h^{-1}, 16.1 TPF μg g^{-1} day^{-1}로 조사되었다. β-glucosidase와 phosphatase는 유기 농경지 토양이 관행 농경지에 비해 낮았으며 urease는 유기 농경지 토양이 관행 농경지에 비해 높았다. 탈수소효소인 dehydrogenase는 유기 농경지와 관행 농경지의 차이가 크지 않았다.

β-glucosidase는 토양 내 유기물을 분해하는 효소로 유기물 함량이나 바이오매스가 증가할수록 활성이 증가한다고 알려져 있다 (Lagomarsino et al., 2009; Aranda et al., 2015). 본 연구 결과에서 유기농 토양의 경우 유기물 함량이 64.5 g kg^{-1}로 관행 농경지 토양 (28.0 - 35.8 g kg^{-1})에 비해 높아 높은 활성을 예상하였으나 반대로 낮은 활성도를 나타났다. 토양 pH가 증가함에 따라 β-glucosidase 활성이 감소한다 (Eivazi and Tabatabai, 1988; Wade et al., 2021)는 선행 연구 결과에 따라 관행 농경지에 비해 토양 pH가 높은 유기 농경지의 토양 특성에 의해 β-glucosidase의 활성도가 유기 농경지에서 낮은 것으로 판단되며 또한 관행농에서 무기질 비료 시비로 인해 작물 뿌리와 같은 바이오매스의 증가로 β-glucosidase 활성이 증가하여 유기 농경지보다 높은 활성을 보인 것으로 판단된다 (Sotomayor-Ramírez et al., 2009).

Phosphatase의 경우 토양 내 불용성인을 가수분해하여 작물이 활용할 수 있도록 가용화 (mineralization)시키는 토양 효소이며 토양 pH와 관계가 있다. 토양의 pH가 중성에 가까울수록 가용성 인산의 함량이 높아 인산효소의 활성도는 감소하며 토양의 pH가 감소함으로써 인산과 Fe 또는 Al과 결합한 불용성 인의 함량이 증가하여 인산효소의 활성도는 증가한다 (Turner and Joseph Wright, 2014; Yokoyama et al., 2017; Ghorbanzadeh et al., 2020). 관행 농경지에 비해 유기 농경지의 토양 pH가 높아 유기 농경지의 가용성 인산 함량이 관행 농경지에 높을 것으로 예상되며 따라서, 인산효소의 활성도는 유기 농경지가 관행 농경지에 비해 낮은 것으로 판단된다.

Urease는 볏짚을 논 토양에 환원할 경우 효소 활성 (invertase, phosphatase, urease)이 높다고 보고 된 바 있으며 (Wu et al., 2020), Liu et al. (2018)은 무기질 비료와 유기질 비료 (pig manure)를 함께 시용한 농경지에서 무기질 비료만 처리한 농경지에 비해 더 높은 urease의 활성을 보인다고 보고 된 바 있다. 이와 같이 유기질 비료로 인해 토양 내 유기물 함량이 증가하고 볏짚과 같은 복합 유기 질소로 urease 활성을 촉진시켜 유기농경지에서 urease 활성이 높은 것으로 판단된다 (Zhang et al., 2016).

Dehydrogenase는 토양 내 유기물 산화과정의 초기단계에서 필수적인 역할을 하며 (Ross, 1971), 토양 내 유기물 함량이 증가할수록 활성이 높아지는 것으로 알려져 있다 (Zhang et al., 2010; Yuan and Yue, 2012; Chun et al., 2021). 본 연구에서는 토양 유기물 함량이 관행 농경지보다 높았음에도 탈수소효소의 활성도는 크게 차이가 나지 않았다. 이는 Dehydrogenase의 활성이 유기물 함량에만 국한되는 것이 아니라 토성, 점토함량, 미생물 생체량과 같은 특성들에도 관련이 있어 유기물 함량에 따른 탈수소효소의 활성도는 큰 관련이 없었던 것으로 판단된다.

유기 농경지 토양 특성과 생산량의 상관관계 유기 농경지 토양의 물리, 화학, 생물학적 특성과 고추의 생산량과의 상관관계는 Table 3에 정리하였다.

고추 생산량과의 상관관계 분석 결과 물리적 특성에서는 용적밀도와, 공극률이 각각 -0.459 ($p < 0.05$), 0.459 ($p < 0.05$)로 통계적으로 유의한 음과 양의 상반된 상관관계를 나타냈으며, 화학적 특성의 경우 pH, 유기물함량, CEC가 각각 0.448 ($p < 0.05$), 0.472 ($p < 0.05$), 0.564 ($p < 0.01$)로 통계적으로 유의한 양의 상관관계를 나타내었다. 반면, 생물학적 특성은 고추 생산량과 통계적으로 유의한 상관관계가 나타나지 않았다. 용적밀도와 공극률의 경우 용적밀

도가 높을수록 토양 내 고형 입자가 많아 공극률이 낮아지며, 토양의 투수성 및 배수성에 영향을 미쳐 식물의 뿌리 생장에 제한 인자가 된다 (Håkansson and Lipiec, 2000; Neves et al., 2003; Kim et al., 2004; Cho et al., 2009). 본 연구에서 조사한 유기 농경지 토양의 경우 선행연구에서 제시한 토양의 용적밀도와 공극률을 비교하였을 때 용적밀도는 약 15.0% 높고 공극률은 약 8.4% 낮아 식물의 뿌리 생장에 영향을 미쳤을 것으로 판단하였다.

농촌진흥청에서 제공하는 농업기술길잡이 고추재배기술에 따르면 고추의 경우 토양에 대한 적응성이 넓어 토양 pH에 대해 민감하진 않으나 pH 6.0 - 6.5 정도에서 생육이 좋으며, 토양 화학적 특성 중 유기물 적정범위는 25 - 35 g kg^{-1}, CEC는 10 - 15 $cmol_c$ kg^{-1} 범위에서 생육이 적합하다고 기술되어 있다. 본 연구 대상 농경지의 토양 pH 평균은 6.21로 고추 생육에 적합한 것으로 보이며, pH가 낮은 농가 (pH 범위 5.08 - 5.77)의 생산량이 약 217 kg $10a^{-1}$, pH가 높은 농가 (pH 범위 6.63 - 7.24)의 생산량이 약 303 kg $10a^{-1}$로 토양 pH가 높은 농가에서 고추 생산량이 높아 양의 상관관계를 보인 것으로 판단된다. CEC는 11.4 $cmol_c$ kg^{-1}로 적정범위에 속하며, 토양 CEC가 높은 농가 (CEC 범위 17.8 - 21.2 $cmol_c$ kg^{-1})의 생산량 (약 318 kg $10a^{-1}$)이 높아 양의 상관관계를 보였다 ($p < 0.05$). CEC의 경우 pH가 증가함에 따라 1:1형 점토 광물, 부식 및 Fe과 Al 산화물의 음전하가 증가하여 CEC가 증가하는 양의 상관관계를 보이며, CEC는 양분 가용화 (mineralization)를 간접적으로 나타내 주는 지표로 작물 생산량에 영향을 미친 것으로 판단된다 (Karlen et al., 1997; Ahn et al., 2012; Sainju and Alasinrin, 2020).

또한, 유기물은 평균 64.5 g kg^{-1}로 유기물 적정범위보다 높게 측정되었으나, 적정범위 이상일수록 생산량이 증가하여 양의 상관관계를 보였다 ($p < 0.05$). 토양 내 유기물은 지속적인 작물 생산의 필수 인자이며 선행 연구에서도 유기물 함량과 작물 생산량은 양의 상관관계를 나타내었다 (Loveland and Webb, 2003; Johnston et al., 2009; Schjønning et al., 2018).

Table 3. Pearson's correlation coefficient (r) between soil properties and crop production.

	Crop production	BD	Porosity	WSA	Hardness	Clay	pH	EC	SOM	Av. P_2O_5	T-N	CEC	SR	Glu	PHA	URE	DHA
Crop production	1																
BD[1]	**-0.459***	1															
Porosity	**0.459***	-1.000**	1														
WSA	-0.088	-0.314	0.317	1													
Hardness	-0.314	0.590**	-0.591**	-0.023	1												
Clay	-0.256	0.648**	-0.651**	-0.193	0.454*	1											
pH	**0.448***	-0.244	0.243	0.110	-0.016	-0.407	1										
EC	0.215	-0.094	0.089	0.156	-0.143	0.192	0.388	1									
SOM	**0.472***	-0.586**	0.584**	0.315	-0.456*	-0.465*	0.572**	0.425	1								
Av. P_2O_5	0.352	-0.577**	0.576**	0.200	-0.477*	-0.466*	0.178	0.252	0.631**	1							
T-N	-0.005	-0.199	0.196	-0.159	-0.470*	-0.369	0.229	0.405	0.339	0.158	1						
CEC	**0.564****	-0.113	0.115	0.004	0.022	-0.165	0.547*	0.285	0.347	0.331	0.056	1					
SR	0.010	0.075	-0.076	-0.054	0.077	-0.152	0.459*	0.269	0.239	0.077	0.311	0.245	1				
Glu	0.016	0.440	-0.439	-0.382	0.051	0.428	-0.271	-0.317	-0.382	-0.369	-0.240	-0.246	-0.216	1			
PHA	-0.201	-0.033	0.033	-0.190	-0.096	-0.034	-0.101	-0.191	0.259	0.115	0.243	-0.434	0.046	0.031	1		
URE	0.110	-0.237	0.237	0.301	-0.264	0.039	0.298	0.468*	0.482*	0.27	-0.024	-0.001	0.164	-0.016	0.073	1	
DHA	0.080	-0.234	0.234	0.495*	-0.162	-0.071	0.445	0.644**	0.369	0.006	0.191	0.126	0.352	-0.519*	-0.253	0.491*	1

[1]BD, bulk density; WSA, water stable aggregate; EC, electrical conductivity; SOM, soil organic matter; Av. P_2O_5, available phosphorous; CEC, cation exchange capacity; SR, soil respiration; Glu, β-glucosidase; PHA, phosphatase; URE, urease; DHA, dehydrogenase.
*$p < 0.05$, **$p < 0.01$.

Conclusions

본 연구에서는 5년 이상 지속적으로 유기 농법을 적용하여 고추 재배를 실시한 농경지 토양의 물리, 화학, 생물학적 특성과 고추 생산량의 상관 관계를 비교하였다. 총 20지점의 유기 농경지 토양은 관행 농경지 토양에 비해 용적밀도가 낮고 공극률이 높았으며 이는 유기질 비료로 인한 토양 물리성 개선 효과를 나타내어 뿌리 생장 증가, 토양 수분 및 양분의 흡수속도, 효율성 증대 등에 영향을 나타내어 고추 생산량과 유의적인 상관관계를 보여주었다. 토양 화학적 특성 중 pH는 고추를 재배하기 적합한 범위로 나타났으며, pH 증가에 따른 CEC 상승은 토양 내 양분가용화를 통한 작물 생산량에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 또한, 토양 내 유기물 함량 증가로 충분한 양분 공급이 고추 생산량에 영향을 미쳤다. 본 연구를 통해 유기 농경지의 물리, 화학, 생물학적 특성이 작물의 생산성과 유의적인 상관 관계가 있음을 규명하였고 지속 가능한 유기 농업을 실행하기 위해서는 토양 관리가 필요할 것으로 판단된다.

Funding

This study was funded by Grant No. PJ017012 from the Rural Development Administration, Korea.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Author Contribution

Hong YK: Conceptualization, Data curation, Writing-original draft, **Kim JW:** Formal analysis, Data curation, **Lee KM:** Formal analysis, Data curation, **Lee DJ:** Formal analysis, Data curation, **Lee CR:** Funding acquisition, Writing-review & editing, **Kim SC:** Supervision, Conceptualization, Writing-review & editing.

Data Availability

Data will be provided on reasonable request.

Acknowledgement

This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. PJ017012)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

Ahn BK, Lee JH, Kim KC, Kim HG, Jeong SS, Jeon HW, Zhang YS. 2012. Changes in chemical properties of paddy field soils as influenced by regional topography in Jeonbuk Province. Korean J. Soil Sci. Fert. 45:393-398. https://doi.org/10.7745/KJSSF.2012.45.3.393

An NH, Ok JH, Cho JL, Shin JH, Nam HS, Kim SC. 2015. Effects of organic matter application on soil microbial community in a newly reclaimed soil. Korean J. Org. Agric. 23:767-779. https://doi.org/10.11625/KJOA.2015.23.4.767

Aranda V, Macci C, Peruzzi E, Masciandaro G. 2015. Biochemical activity and chemical-structural properties of soil organic matter after 17 years of amendments with olive-mill pomace co-compost. J. Environ. Manage. 147:278-285. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.08.024

Casida, L. 1977. Microbial metabolic activity in soil as measured by dehydrogenase determinations. Appl. Environ. Microbiol. 34:630-636. https://doi.org/10.1128/aem.34.6.630-636.1977

Cho, HJ, Hwang SW, Han KH, Cho HR, Shin JH, Kim LY. 2009. Physicochemical properties of upland soils under organic farming. Korean J. Soil Sci. Fert. 42:98-102.

Choi DH, Sugn JK, Lee SM, Lee YH, Kim JM, Jung JA, Song BH. 2008. Selection of useful organic materials as an additional fertilizer for organic red-pepper production and the application effect. Korean J. Soil Sci. Fert. 41:153-157.

Chun, HC, Lee S, Gong DH, Jung KY, Cho JY, Kim YN. Lee YB. 2021. Difference in biochemical properties of soils with different periods of agricultural practice after conversion from paddies to uplands. Korean J. Soil Sci. Fert. 54:467-477. https://doi.org/10.7745/KJSSF.2021.54.4.467

Ding LJ, Su JQ, Sun GX, Wu JS, Wei WX. 2018. Increased microbial functional diversity under long-term organic and integrated fertilization in a paddy soil. Appl. Microbiol. Biotechnol. 102:1969-1982. https://doi.org/10.1007/s00253-017-8704-8

Eivazi F, Tabatabai M. 1988. Glucosidases and galactosidases in soils. Soil Biol. Biochem. 20:601-606. https://doi.org/10.1016/0038-0717(88)90141-1

Gale W, Cambardella C, Bailey T. 2000. Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates. Soil Sci. Soc. Am. J. 64:201-207. https://doi.org/10.2136/sssaj2000.641201x

Ghorbanzadeh N, Mahsefat M, Farhangi M, Rad MK, Proietti P. 2020. Short-term impacts of pomace application and *Pseudomonas* bacteria on soil available phosphorus. Biocatal. Agric. Biotechnol. 28:101742. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101742

Gimeno-García E, Andreu V, Bloluda R. 1996. Heavy metals incidence in the application of inorganic fertilizers and pesticides to rice farming soils. Environ. Pollut. 92:19-25. https://doi.org/10.1016/0269-7491(95)00090-9

Gunapala, N, Venette R, Ferris H, Scow K. 1998. Effects of soil management history on the rate of organic matter decomposition. Soil Biol. Biochem. 30:1917-1927. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(98)00062-5

Håkansson I, Lipiec J. 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. Soil Tillage Res. 53:71-85. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00095-1

Hartmann M, Frey B, Mayer J, Mäder P, Widmer F. 2015. Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming. ISME J. 9:1177-1194. https://doi.org/10.1038/ismej.2014.210

Hong YK, Kim JW, Kim HS, Park YH, Kim SC. 2021. Comparing soil chemical and biological properties in varied land use. Korean J. Soil Sci. Fert. 54:20-32. https://doi.org/10.7745/KJSSF.2021.54.1.020

Jassal RS, Black TA. 2006. Estimating heterotrophic and autotrophic soil respiration using small-area trenched plot technique: Theory and practice. Agric. For. Meteorol. 140:193-202. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.12.012

Johnston AE, Poulton PR, Coleman K. 2009. Soil organic matter: Its importance in sustainable agriculture and carbon

dioxide fluxes. Adv. Agron. 101:1-57. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)00801-8

Kandeler E, Gerber H. 1988. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium. Biol. Fertil. Soils 6:68-72. https://doi.org/10.1007/BF00257924

Karlen DL, Mausbach M, Doran JW, Cline R, Harris R, Schuman G. 1997. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). Soil Sci. Soc. Am. J. 61:4-10. https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x

Kim CY, Seo YJ, Kwon TY, Park JH, Heo MS, Ha SK. 2010. Correlation between the factors of soil physical property in upland soil. Korean J. Soil Sci. Fert. 43:793-797.

Kim JW, Hong YK, Lee CR, Kim SC. 2023. Comparison of physicochemical and biological soil properties in organic and conventional upland fields. Korean J. Soil Sci. Fert. 56:77-89. https://doi.org/10.7745/KJSSF.2023.56.1.077

Kim LY, Cho HJ, Han KH. 2004. Changes of physical properties of soils by organic material application. Korean J. Soil Sci. Fert. 37:304-314.

Lagomarsino A, Moscatelli MC, Di Tizio A, Mancinell R, Grego S, Marinari S. 2009. Soil biochemical indicators as a tool to assess the short-term impact of agricultural management on changes in organic C in a Mediterranean environment. Ecol. Indic. 9:518-527. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2008.07.003

Lee CR, Kim PJ, Oh Y, Park CB, Park KL, Nam HS, Park GC. 2018. Biomass, nitrogen, and phosphorus productivities of green manure by barley and hairy vetch mixtures. Korean J. Org. Agric. 26:719-729. https://doi.org/10.11625/KJOA.2018.26.4.719

Lee CR, Kim SH, Oh Y, Kim YJ, Lee SM. 2023. Effect of green manure on water-stable soil aggregates and carbon storage in paddy soil. Korean J. Soil Sci. Fert. 56:191-198. https://doi.org/10.7745/KJSSF.2023.56.2.191

Lee CR, Ok JH, An MS, Lee SB, Park KL, Hong SG, Kim MG, Park CB. 2017. Soil chemical properties of long-term organic cultivation upland. Korean J. Org. Agric. 25:161-170. http://dx.doi.org/10.11625/KJOA.2017.25.1.161

Liu Kl, Li YZ, Zhou LJ, Chen Y, Huang QH, Yu XC, Li DM. 2018. Comparison of crop productivity and soil microbial activity among different fertilization patterns in red upland and paddy soils. Acta Ecol. Sin. 38:262-267. https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2017.08.003

Loveland P, Webb J. 2003. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: A review. Soil Tillage Res. 70:1-18. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00139-3

MAFRA. 2021. The national fifth five- year plan for environmental agriculture. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Sejong, Korea.

Maier C, Kress L. 2000. Soil CO_2 evolution and root respiration in 11 year-old loblolly pine (*Pinus taeda*) plantations as affected by moisture and nutrient availability. Can. J. For. Res. 30:347-359. https://doi.org/10.1139/x99-218

Neves C, Feller C, Guimarães MF, Medina C, Tavares Filho J, Fortier M. 2003. Soil bulk density and porosity of homogeneous morphological units identified by the Cropping Profile Method in clayey Oxisols in Brazil. Soil Tillage Res. 71:109-119. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00023-0

NIAST (National Institute of Agricultural Science and Technology). 2000. Soil and plant analysis method. RDA, Suwon, Korea.

Reboredo F, Simões M, Jorge C, Mancuso M, Martinez J, Guerra M, Ramalho JC, Pessoa MF, Lidon F. 2019. Metal content in edible crops and agricultural soils due to intensive use of fertilizers and pesticides in Terras da Costa de Caparica (Portugal). Environ. Sci. Pollut. Res. 26:2512-2522. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3625-3

Reddy BS. 2010. Organic farming: Status, issues and prospects - A review. Agric. Econ. Res. Rev. 23:343-358. https://doi.org/10.22004/ag.econ.97015

Ross D. 1971. Some factors influencing the estimation of dehydrogenase activities of some soils under pasture. Soil Biol. Biochem. 3:97-110. https://doi.org/10.1016/0038-0717(71)90002-2

Ruehlmann J, Körschens M. 2009. Calculating the effect of soil organic matter concentration on soil bulk density.

Soil Sci. Soc. Am. J. 73:876-885. https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0149

Sainju UM, Alasinrin SY. 2020. Changes in soil chemical properties and crop yields with long-term cropping system and nitrogen fertilization. Agrosyst., Geosci. Environ. 3:e20019. https://doi.org/10.1002/agg2.20019

Schjønning P, Jensen JL, Bruun S, Jensen LS, Christensen BT, Munkholm LJ, Oelofse M, Baby S, Knudsen L. 2018. The role of soil organic matter for maintaining crop yields: Evidence for a renewed conceptual basis. Adv. Agron. 150:35-79. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2018.03.001

Seitz S, Geobes P, Puerta VL, Pereira EIP, Wittwer R. Six J. van der Heijden MGA, Scholten T. 2019. Conservation tillage and organic farming reduce soil erosion. Agron. Sustain. Dev. 39:1-10. https://doi.org/10.1007/s13593-018-0545-z

Seufert V, Ramankutty N, Mayerhofer T. 2017. What is this thing called organic? - How organic farming is codified in regulations. Food Policy 68:10-20. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2016.12.009

Singh J, Yadav P, Pal AK, Mishra V. 2020. Water pollutants: Origin and status. pp. 5-20. In Pooja D et al. (Eds.) Sensors in water pollutants monitoring: Role of material. Springer, Berlin, Germany. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0671-0_2

Sotomayor-Ramírez D, Espinoza Y, Acosta-Martínez V. 2009. Land use effects on microbial biomass C, β-glucosidase and β-glucosaminidase activities, and availability, storage, and age of organic C in soil. Biol. Fertil. Soils 45:487-497. https://doi.org/10.1007/s00374-009-0359-x

Tabatabai MA, Bremner JM. 1969. Use of *p*-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. Soil Biol. Biochem. 1:301-307. https://doi.org/10.1016/0038-0717(69)90012-1

Turner BL, Joseph Wright S. 2014. The response of microbial biomass and hydrolytic enzymes to a decade of nitrogen, phosphorus, and potassium addition in a lowland tropical rain forest. Biogeochemistry 117:115-130. https://doi.org/10.1007/s10533-013-9848-y

Wade J. Li C, Vollbracht K, Hooper DG, Wills SA, Margenot AJ. 2021. Prescribed pH for soil β-glucosidase and phosphomonoesterase do not reflect pH optima. Geoderma 401:115161. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115161

Weaver RW, Angle S, Bottomley P, Bezdicek D, Smith S, Tabatabai A, Wollum A. 1994. Methods of soil analysis, Part 2. Microbiological and biochemical properties. Soil Science Society of America, WI, USA.

Wortman SE, Galusha TD, Mason SC, Francis CA. 2012. Soil fertility and crop yields in long-term organic and conventional cropping systems in Eastern Nebraska. Renewable Agric. Food Syst. 27:200-216. https://doi.org/10.1017/S1742170511000317

Wu L, Ma H, Zhao Q, Zhang S, Wei W, Ding X. 2020. Changes in soil bacterial community and enzyme activity under five years straw returning in paddy soil. Eur. J. Soil Biol. 100:103215. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2020.103215

Yi PH, Han SG, Gopal S, Lee SE, Jung DH, Lee IB. 2020. Analysis of soil nutrient balance, soil enzymatic activity and growth characteristics of facility-grown red pepper (*Capsicum annuum L.*) with incorporation of hairy vetch. Korean J. Soil Sci. Fert. 53:1-12. https://doi.org/10.7745/KJSSF.2020.53.1.001

Yokoyama D, Imai N, Kitayama K. 2017. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on the activities of four different classes of fine-root and soil phosphatases in Bornean tropical rain forests. Plant and Soil. 416:463-476. https://doi.org/10.1007/s11104-017-3225-x

Yuan BC, Yue DX. 2012. Soil microbial and enzymatic activities across a chronosequence of Chinese pine plantation development on the loess plateau of China. Pedosphere 22:1-12. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60186-0

Zhang N, He XD, Bao YB, Li YH, Wang HT, Zhang DMR, Yang S. 2010. Pedogenic carbonate and soil dehydrogenase activity in response to soil organic matter in *Artemisia ordosica* community. Pedosphere 20:229-235. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(10)60010-0

Zhang P, Chen X, Wei T, Yang Z, Jia Z, Yang B, Han, Ren X. 2016. Effects of straw incorporation on the soil nutrient

contents, enzyme activities, and crop yield in a semiarid region of China. Soil Tillage Res. 160:65-72. https://doi.org/10.1016/j.still.2016.02.006

Zheng F, Zhu D, Giles M, Daniell T, Neilson R, Zhu YG, Yang XR. 2019. Mineral and organic fertilization alters the microbiome of a soil nematode *Dorylaimus stagnalis* and its resistome. Sci. Total Environ. 680:70-78. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.384