



한국 밭토양 화학성 변동 평가

김이현^{1*}, 공명석¹, 이은진¹, 이태구¹, 정구복²

¹농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경부 토양비료과, ²농촌진흥청 국립농업과학원 기획조정과

Status and Changes in Chemical Properties of Upland Soil from 2001 to 2017 in Korea

Yi-Hyun Kim^{1*}, Myung-suk Kong¹, Eun-Jin Lee¹, Tae-Goo Lee¹ and Goo-Bok Jung² (¹Soil & Fertilizer Management Division, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea, ²Planning and Coordination Division, National Institute of Agricultural Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea)

Received: 12 August 2019/ Revised: 6 September 2019/ Accepted: 23 September 2019

Copyright © 2019 The Korean Society of Environmental Agriculture

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.

ORCID

Yi-Hyun Kim

<https://orcid.org/0000-0001-5974-6665>

Abstract

BACKGROUND: Monitoring of the dynamic changes of chemical properties in agricultural land is very important for agricultural sustainability. Chemical properties of agricultural soils in Korea have been investigated at four-year interval in the order of paddy, plastic film house, upland, and orchard soils since 1999.

METHODS AND RESULTS: Total 8,160 topsoil samples were taken from the upland in 2001, 2005, 2009, 2013, and 2017, respectively. Soil chemical properties such as pH, electrical conductivity (EC), organic matter (OM), available phosphate (Avail. P₂O₅), and exchangeable (Exch.) cations (K, Ca, and Mg) were analyzed. Soil pH and Exch. Ca contents have increased since 2001. Average concentration of Avail. P₂O₅ increased from 547 mg kg⁻¹ in 2001 to 657 mg kg⁻¹ in 2017. Average concentration of Exch. Ca in 2017 was higher than the upper limit of its optimal range for upland cultivation. Excess and deficiency of chemical properties of upland soils comply with soil analysis and fertilizer prescription.

CONCLUSION: We concluded that excessive nutrient in upland needed to be properly managed with soil test.

Key words: Fertilizer Prescription, Optimal Range, Soil Chemical Properties, Upland Soil

서론

국내외적으로 국가 농업환경보전 대책 수립 시행하는데 필수조건인 농업환경자원 실태조사를 추진하고 있다. 프랑스 국립농학연구소(INRA)의 토양질 네트워크(RMQS)는 10년마다 2,200지점에서 토양을 채취하여 토양의 질을 모니터링하고 있다. 일본은 국가 토양조사 프로그램(NSSP: National Soil Survey Programs)을 통해 토양화학성, 중금속 등 농업환경 지표들의 상태를 평가하고 토양정보시스템을 통해 웹서비스를 제공하고 있다. 유럽은 1990년대 초부터 농업환경자원 DB와 환경영향평가 모니터링 시스템을 운영하고 있으며 토양비옥도 변화를 예측하고 이를 이용하여 작황 예측에 활용하고 있다. 미국은 농업환경지도 작성하기 위한 전체 국토에 조사지점을 정하고 중금속, 양분, 농약 등의 성분을 주기적으로 모니터링하여 인벤토리 자료를 축적하고 있다. 중국은 토양오염 예방 및 복원을 위해 환경보호부와 국토자원부에서 전국의 토양오염상황을 조사하였으며('05~'13), 토양특성을 파악하여 자연적인 복원을 추진하고 복원기술 개발 강화와 안전이용 평가지표 및 안전성 평가를 적극 지원하고 있다.

우리나라는 1990년대 까지는 토양 비옥도를 증진시켜 작물의 생산성을 높이는데 중점을 두었지만(Peters, 2000) 환경에 대한 중요성이 대두되면서 농경지 내 인산 등 집적된 양분

*Corresponding author: Yi-Hyun Kim

Phone: +82-63-238-2440; Fax: +82-63-238-3822;

E-mail: yhkim75@korea.kr

이 환경으로 유출될 수 있는 가능성을 평가하고 2차 오염을 방지하는 것이 중요하게 되었다(Cho *et al.*, 2002; Tang *et al.*, 2008). 친환경농어업 육성 및 유기식품 등의 관리·지원에 관한 법률 시행(1998)과 함께 친환경농업을 위한 농경지 관리기준(화학·물리성·수질) 설정, 농업환경측정망 구축 및 조사·분석을 위해 농촌진흥청에서는 1999년부터 각도 농업기술원과 공동으로 농업환경변동 실태조사를 실시하고 있다. 논, 밭, 시설재배지, 과수원을 4년 1주기로 하여 토양화학성, 중금속, 물리성, 수질, 비료사용실태 등의 항목을 조사 및 평가하고 있다. 2007년까지 조사결과는 Kim 등(2010)이 발표하였다. Ahn 등(2012)은 전북지역 논토양 화학성변화를 지형특성에 따라 분석하였고, 경남지역의 논토양 지형과 화학성의 관계(Lee *et al.*, 2012a), 논토양의 중금속 함량조사(Lee *et al.*, 2012b) 결과를 보고한 바 있다.

최근 전통적인 생산기능 뿐만 아니라 삶터·쉼터의 제공, 환경보전 등 농업의 복합적 기능에 대한 국민의 인식과 수요가 증가하고 있다. 이와 함께 OECD에서는 농촌지역의 사회적, 경제적, 문화적 복원력 강화를 강조하면서 자연자원과 토지 이용의 지속가능한 관리를 보장하고, 홍수예방·생물다양성 증가 등 생태서비스 가치 창출 등을 적극 추진하고 있다. 농업환경변동 실태조사는 토양의 건전성 및 지속적 생산성 유지를 위한 기초자료로 활용되고 있으며, 토양가치 평가, 농업환경정보시스템 등에 자료로 활용되고 있다. 또한 토양비옥도 및 농업용수 수질 개선을 위한 정책자료로 제공되고 있다.

본 연구에서는 농업환경변동 실태조사 중 2001년부터 2017년까지 제주도를 제외한 각 도의 밭 토양 화학성분 함량을 분석하고, 함량수준별 분포비율 비교 및 변동평가를 하고자 하였다.

재료 및 방법

우리나라 밭토양의 화학성 변화를 모니터링하기 위해 각도 농업기술원에서는 조사 시기(2001, 2005, 2009, 2013, 2017) 별 정점조사를 기본으로 총 8,160점 토양시료를 채취, 분석하였

다. 토양시료는 표토 0~15 cm 깊이로 채취한 후 그늘에서 풍건하여 2 mm 체를 통과시켜 조제하였으며, 농촌진흥청 토양화학분석법(NAAS, 2010)에 준하여 검정 항목별로 토양화학성을 분석하였다. 토양 pH는 토양과 증류수 비율을 1:5(w/w)로 하여 진탕한 후 pH meter로 측정하였고, 이 현탁액에 대하여 전기전도도(EC, electrical conductivity)를 측정하였다. 유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법, 치환성양이온은 1.0 M NH₄OAc (pH 7.0)법 추출하여 Inductively Coupled Plasma (GBC Scientific Equipment, Australia)로 분석하였다. 농촌진흥청에서는 각도 농업기술원의 토양분석 결과의 신뢰도를 높이기 위해 토양표준물질을 사용하여 정도관리를 실시하였다. 정도관리를 위해 각도 농업기술원에 숙련도 평가를(Proficiency testing) 하였는데 z-score 기준(ISO/IEC 17043) 적용하여 $|z| \leq 2.0$ 은 적합, $|z| > 2.0$ 은 미흡으로 판정하여 관리하였다.

본 연구에서는 밭토양의 토양분석 결과를 바탕으로 연차간 화학성 변화를 평가하고, 농촌진흥청의 밭토양 화학성분별 적정범위를 기준으로 부족, 적정, 과다 비율을 분석하였다(NAAS, 2017).

결과 및 고찰

밭토양 화학적 특성

2001년부터 2017년까지 4년 1주기로 조사한 밭토양 화학성분의 평균 함량 변화는 Table 1과 같다. 2017년 밭토양의 pH는 6.4, 전기전도도는 1.03 ds m⁻¹, 유기물 함량은 27 g kg⁻¹, 유효인산은 657 mg kg⁻¹이고, 치환성 칼륨, 칼슘, 마그네슘은 각각 0.97, 7.6, 2.1 cmol_c kg⁻¹ 이었다.

토양 pH는 2001년 5.9에서 2017년 6.4로, 전기전도도는 2001년 0.61에서 2017년 1.03으로 증가하였으며, 밭토양의 pH, 전기전도도는 적정범위 내에서 현재의 수준을 유지하였다. 토양유기물 함량은 2001년 24에서 2017년 27 g kg⁻¹으로 증가하는 추세를 보였고, 유효인산함량은 지속적으로 증가하여

Table 1. Changes of chemical properties in upland soils from 2001 to 2017 in Korea

Year	pH	EC [†]	OM	Avail. P ₂ O ₅	Exch. Cation			No. of sample
					K	Ca	Mg	
	(1:5)	(dS m ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(cmol _c kg ⁻¹)			
2001	5.9	0.61	24	547	0.81	5.8	1.6	1,650
2005	5.9	0.64	25	567	0.81	6.2	1.7	1,650
2009	6.2	0.85	24	679	0.79	5.9	1.8	1,610
2013	6.3	0.63	24	626	0.75	6.4	1.7	1,620
2017	6.4	1.03	27	657	0.97	7.6	2.1	1,630
Mean	6.1	0.75	25	615	0.83	6.4	1.8	
Optimum range	6.0~7.0	≤2.00	20~30	300~550	0.5~0.8	5.0~6.0	1.5~2.0	

[†]EC, electrical conductivity; OM, organic matter.

적정범위 상한기준을 약 20% 초과하였다. 치환성칼륨, 칼슘 및 마그네슘 함량도 각각 2001년 0.81, 5.8, 1.6 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ 에서 2017년 0.97, 7.6, 2.1 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ 로 꾸준히 증가하고 있었다.

Kong 등(2018)은 정부의 토양개량제 지원사업을 통해 우리나라 시설재배지의 토양 pH는 꾸준히 증가하고 있으며, 치환성 칼슘과 마그네슘 함량도 높은 상관성을 나타내며 증가하고 있다고 보고하였으며, 우리나라 밭토양에서도 비슷한 경향으로 평균 함량이 증가하였다. Jo 와 Koh (2004)는 우리나라 칼륨 비료의 사용량은 1980년대 92 kg ha^{-1} 및 90년대 44 kg ha^{-1} 로 감소한다고 하였으나, Lee 등(1999)이 보고한 바와 같이 퇴비의 과다사용 등으로 칼륨함량이 증가한 것으로 판단된다.

2017년 지역별 밭토양 화학성분의 평균 함량은 Table 2와 같다. 토양 pH는 2017년 경상남·북도 지역에서 6.6으로 가장 높았고, 전라북도에서 6.2로 가장 낮았다. 전기전도도는 전라북도과 고령권에서 각각 1.34, 1.30 dS m^{-1} 로 가장 높게 나타났지만 밭토양 전기전도도 기준범위인 2.0 dS m^{-1} 보다 평균 함량이 낮았다. 토양 유기물 함량은 강원도와 고령권에서 각각 33, 32 g kg^{-1} 로 가장 높았으며, 경기도에서 22 g kg^{-1} 로 가장 낮았다. 유효인산과 치환성칼륨의 함량도 고령권에서 각각 889 mg kg^{-1} , 1.25 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 충청북도에서 510 mg kg^{-1} , 0.57 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ 로 가장 낮게 나타났다. 작물별 치환성칼슘의 함량은 경상남도에서 10.2 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 모든 도에서 밭토양 치환성칼슘 적정상한기준보다 높게 나타났다. 치환성마그네슘 함량은 전라북도에서 2.7 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 경기도는 치환성칼슘과 마그네슘의 함량이 각각 6.2, 1.7 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ 로 도별 가장 낮게 나타났다.

고령권에서는 전기전도도, 유효인산과 치환성칼륨의 함량이 다른 지역에 비해 매우 높게 나타났는데, Lee 등(2006)은 고령지 채소 재배농가에서 다량의 화학비료를 관행적으로 반복 사용하고 있으며, 특히 토양에 과다 축적되어 있는 유효인산과 치환성 칼륨함량을 고려하지 않고 인산과 칼리질 비료를 다량 사용하고 있다고 보고하였다. 고령권의 밭토양은 경사가 심하여 토양침식에 의한 양분 용탈로 환경에 부정적인 영향을 줄 위험이 매우 높아 토양검정에 의한 적정시비 등 관리가 필요한 것으로 판단된다.

밭토양 화학성분 함량 분포율

농촌진흥청의 밭토양 화학성 적정범위를 기준으로(NAAS, 2010) 부족/낮음, 적정, 과다/높음 비율의 연차간 변화는 Fig. 1과 같다. 토양 pH 6.0 미만의 낮음 비율은 2001년 58%에서 2017년 32%로 감소하였으며, 반면에 pH 6.0-7.0의 적정범위는 2001년 33%에서 2017년 43%로 증가하였다. 토양 pH 7.0을 초과하는 비율도 2001년 9%에서 2017년 25%로 증가하여, 토양 pH가 높은 밭토양의 비율이 증가하고 있었다.

토양 유기물 함량의 적정범위 비율은 2001년에 30%에서 2017년 31%로 큰 변화가 없었지만 적정범위 보다 높은 비율은 2001년 16%에서 2017년 35%로 증가하였다. 토양 유기물은 작물 생산성에 중요한 역할을 하여 토양질 평가에서 중요한 지표로 활용되며(Cannell and Hawes, 1994; Larson and Pierce, 1991; Reeves, 1997), 경운, 작부체계 및 시비 등에 영향을 받는다(Dawe *et al.*, 2000; Ladha *et al.*, 2003; Yadav *et al.*, 1998). 지속적인 화학비료의 사용은 유기물 감소와 더불어 밭작물 생산성을 감소시키는 것으로 알려져 있으며, 밭토양의 유기물 함량의 기준 범위인 20-30 g kg^{-1} 보다 낮은

Table 2. Chemical properties of upland soils in different provinces (2017 yr)

Province	pH	EC [†]	OM	Avail. P ₂ O ₅	Exch. Cation			No. of sample
					K	Ca	Mg	
	(1:5)	(dS m^{-1})	(g kg^{-1})	(mg kg^{-1})	(cmol _c kg ⁻¹)			
Gyeonggi	6.3	0.86	22	651	0.83	6.2	1.7	190
Gangweon	6.4	0.89	32	742	1.18	7.6	2.0	150
Chungbuk	6.5	1.11	24	510	0.57	6.5	1.8	180
Chungnam	6.3	1.07	24	805	0.88	7.3	2.1	160
Jeonbuk	6.2	1.34	29	618	1.17	6.9	2.7	185
Jeonnam	6.4	1.27	26	605	0.97	8.3	2.4	250
Gyeongbuk	6.6	0.88	31	665	1.03	7.8	2.1	263
Gyeongnam	6.6	0.63	28	561	0.86	10.2	1.9	176
Highland areas	6.3	1.30	33	889	1.25	7.1	1.9	76
Mean	6.4	1.03	27	657	0.96	7.6	2.1	181
Optimum range	6.0~7.0	≤2.00	20~30	300~550	0.5~0.8	5.0~6.0	1.5~2.0	

[†]EC, electrical conductivity; OM, organic matter.

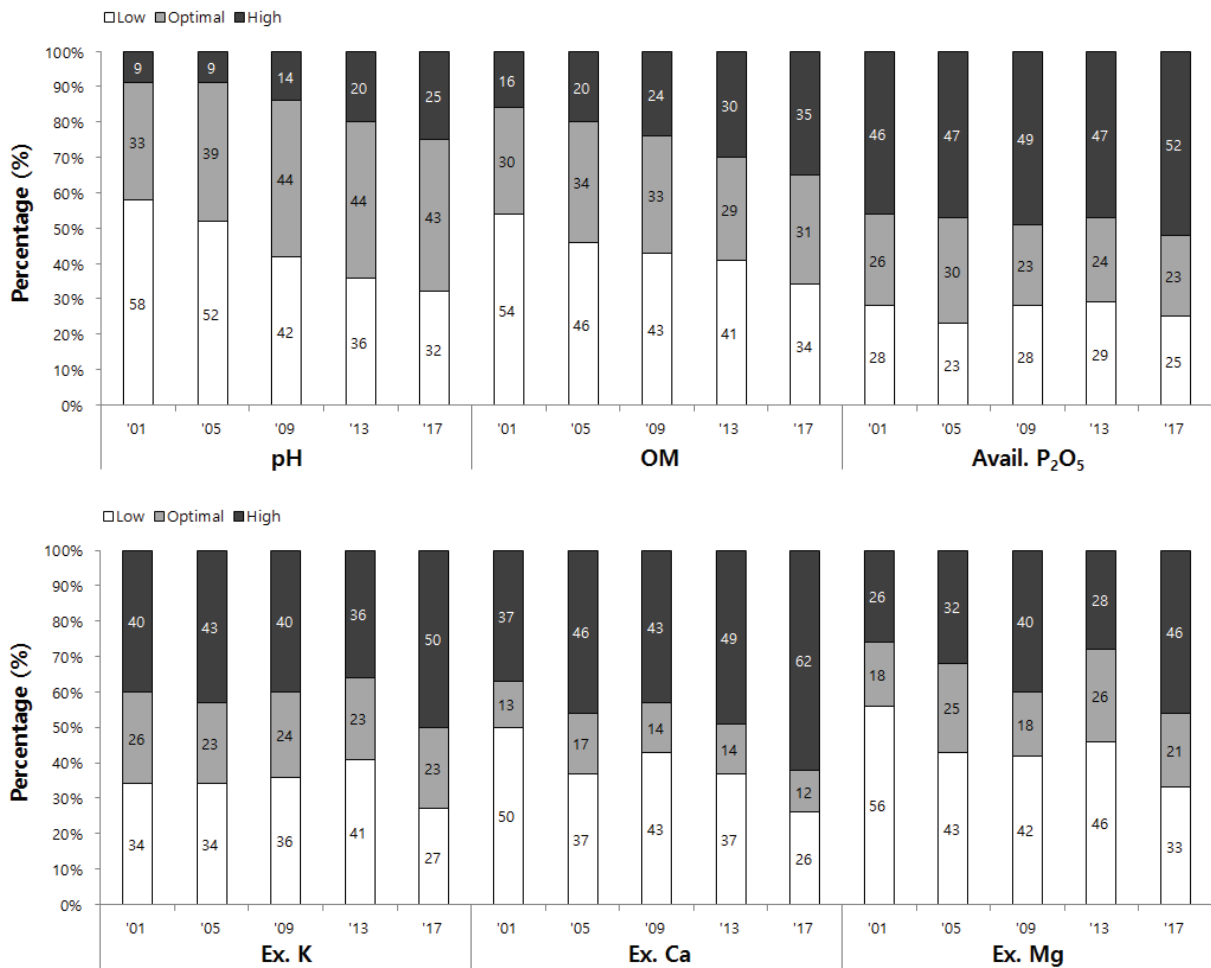


Fig. 1. Ratios of low, optimal and high ranges of chemical properties in upland soils from 2001 to 2017.

비율이 2017년 34%로 여전히 높아, 토양검정 결과에 따라 유기물 부족 농경지는 지속적으로 유기물을 공급하여 적정수준으로 유지하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

유효인산 함량의 적정범위 비율은 2001년 26%에서 2017년 23%로 감소하는 경향을 보였지만, 적정범위 이상 비율은 2001년 46%에서 2017년 52%로 증가하였다. 치환성칼륨의 적정범위 비율은 2001년 26%에서 2017년 23%로 감소한 반면 적정범위 이상 비율은 2001년 40%에서 2017년 50%로 높아지는 경향을 보였다. 적정범위 이하 비율은 2001년 34%에서 2017년 27%로 감소하였다. Choi 등(2010)은 퇴비의 과다사용 등으로 토양 중 치환성칼륨과 유효인산 함량이 높은 상관성을 가지고 증가한다고 보고하였으며, 토양 중 유기물, 유효인산, 치환성칼륨 함량을 고려한 퇴비 및 화학비료의 투입이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

치환성칼슘은 적정범위 비율이 2001년 13%에서 2017년 12%로 감소하는 경향을 보였고 적정범위 보다 높은 비율은 2001년 37%에서 2017년 62%로 크게 증가하였다. 치환성 마그네슘은 적정범위보다 낮은 비율이 2001년 56%에서 2017년 33%로 감소한 반면 적정범위보다 높은 비율은 2001년 26%

에서 2017년 46%로 증가하였다.

정부의 토양비옥도 유지 정책에 의해 토양 pH, 유기물함량, 치환성마그네슘의 2017년 평균함량은 적정범위에 들었지만 유효인산, 치환성칼륨은 적정범위를 초과했다. 따라서 양분과다 필지에 대해서는 토양검정에 의한 적정시비량을 준수하고, 석회, 규산질 비료나 퇴비 등은 양분과다 경지보다는 부족한 경지에 공급될 수 있도록 하는 토양관리가 필요하다. 본 연구에서 얻어진 전국 밭토양 화학성 변동평가 결과는 농경지 양분함량 적정 범위 유지로 작물의 지속적 생산성 확보 및 환경보전에 기초자료로 활용될 수 있고 토양비옥도 증진을 통한 토양 건전성 강화에 기여할 것으로 판단된다.

결론

우리나라 밭토양의 토양화학성을 4년 1주기로 정점조사하여 2001부터 2017년까지의 변화를 평가하였다. 밭토양의 화학성분 평균 함량은 pH는 6.1, 전기전도도 0.75 ds m⁻¹, 유기물 함량은 25 g kg⁻¹, 유효인산 615 mg kg⁻¹, 치환성칼륨, 칼슘, 마그네슘은 각각 0.83, 6.4, 1.8 cmol_c kg⁻¹ 이었다.

유효인산은 2001년 547에서 2017년 657 mg kg⁻¹로 지속적으로 증가하였고 적정범위 상한기준을 약 20% 초과 하였다. 밭토양의 화학성분 적정범위 기준으로 부족, 적정, 과다비율을 구하여 연차별 변이를 분석한 결과 측정 평균값이 증가한 항목 중 과다와 적정범위의 비율도 증가하는 경향을 보였고, 적정범위보다 낮은 비율은 감소하였다. 유기물함량, 유효인산, 치환성 양이온 과다비율이 증가하는 경향을 보였다. 생산량에 초점을 둔 고투입 농업의 지속적인 추진으로 우리나라 농업환경이 악화되고 있는 시점에서 농업환경변동 실태조사를 통한 농업환경자원 평가체계 구축 및 지표개발 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement

This study was supported financially by a grant from the research project (PJ012505) of National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Ahn, B. K., Lee, J. H., Kim, K. C., Kim, H. G., Jeong, S. S., Jeon, H. W., & Zhang, Y. S. (2012). Changes in chemical properties of paddy field soils as influenced by regional topography in Jeonbuk Province. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 45(3), 393-398.
- Cannell, R. Q., & Hawes, J. D. (1994). Trends in tillage practices in relation to sustainable crop production with special reference to temperate climates. *Soil and Tillage Research*, 30(2-4), 245-282.
- Cho, J. Y., Han, K. W., Choi, J. K., Kim, Y. J., & Yoon, K. S. (2002). N and P losses from a paddy field plot in central Korea. *Soil Science and Plant Nutrition*, 48(3), 301-306.
- Choi, M. T., Lee, J. I., Yun, Y. U., Lee, J. E., Lee, B. C., Yang, E. S., & Lee, Y. H. (2010). Relationship between fertilizer application level and soil chemical properties for strawberry cultivation under greenhouse in Chungnam Province. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 43(2), 153-159.
- Dawe, D., Dobermann, A., Moya, P., Abdulrachman, S., Singh, B., Lal, P., Li, S. Y., Lin, B., Panullah, G., Sariam, O., Singh, Y., Swarup, A., Tan, p. S., & Zhen, Q. X. (2000). How widespread are yield declines in long-term rice experiments in Asia?. *Field Crops Research*, 66(2), 175-193.
- Jo, I. S., & Koh, M. H. (2004). Chemical changes in agricultural soils of Korea: data review and suggested countermeasures. *Environmental Geochemistry and Health*, 26(2), 105-117.
- Kim, M. S., Kim, W. I., Lee, J. S., Lee, G. J., Jo, G. L., Ahn, M. S., Choi, S. C., Kim, H. J., Kim, Y. S., Choi, M. T., Moon, Y. H., Ahn, B. K., Kim, H. W., Seo, Y. J., Lee, Y. H., Hwang, J. J., Kim, Y. H., & Ha, S. K. (2010). Long-term monitoring study of soil chemical contents and quality in paddy fields. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 43(6), 930-936.
- Kong, M. S., Kim, Y. H., Kim, D. J., Kang, S. S., Lee, E. J., Jung, G. B., & Jung, H. I. (2018). Agricultural soil management practices by assessing the soil chemical properties of plastic film houses in Korea. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 51(4), 576-585.
- Ladha, J. K., Dawe, D., Pathak, H., Padre, A. T., Yadav, R. L., Singh, B., Singh, Y., Singh, P., Kundu, A. L., Sakal, R., Ram, N., Regmi, A. P., Gami, S. K., Bhandari, A. L., Amin, R., Yadav, C. R., Bhattarai, E. M., & Hobbs, P. R. (2003). How extensive are yield declines in long-term rice wheat experiments in Asia? *Field Crops Research*, 81(2-3), 159-180.
- Larson, W. E., & Pierce, F. J. (1991). Conservation and enhancement of soil quality. evaluation for sustainable land management in the developing world. Vol. 2. IBSRAM Proc. 12, 2 Technical Papers, pp. 175-203. International Board for Soil Research and Management, Bangkok, Thailand.
- Lee, S. M., Ryu, I. S., Lee, C. S., Park, Y. H., & Um, M. H. (1999). Determination of application rate of composted pig manure for wetland rice. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 32(2), 182-191.
- Lee, J. T., Lee, G. J., Zhang, Y. S., Hwang, S. W., Im, S. J., Kim, C. B., & Mun, Y. H. (2006). Status of fertilizer application and soil management for major vegetable crops in farmers fields of alpine area. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 39(6), 357-365.
- Lee, Y. H., Sonn, Y. K., Lee, S. T., Heo, J. Y., Kim, M. K., Kim, E. S., Song, W. D., Zhang, Y. S., Jeon, W. T., & Ok, Y. S. (2012a). Topographical chemical properties of paddy soils in Gyeongnam province. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 45(2), 143-148.
- Lee, Y. H., Sonn, Y. K., & Ok, Y. S. (2012b). Investigation of heavy metal concentrations in paddy soils of Gyeongnam province. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 45(3), 399-403.
- Peters, J. B. (2000). Gambian soil fertility trends, 1991-1998.

- Communication Soil Science and Plant Analysis, 31(11-14), 2201-2210.
- Reeves, D. W. (1997). The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 43(1-2), 131-167.
- Tang, J., Zhang, B., Gao, C., & Zepp, H. (2008). Hydrological pathway and source area of nutrient losses identified by a multi-scale monitoring in an agricultural catchment. *Catena*, 72(3), 374-385.
- Yadav, R. L., Yadav, D. S., Singh, R. M., & Kumar, A. (1998). Long-term effects of inorganic fertilizer inputs on crop productivity in a rice-wheat cropping system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 51(3), 193-200.