Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2021.54.2.204>

pISSN : 0367-6315

eISSN : 2288-2162

Changes in Soil Chemical Properties of Rice Paddy, Upland Field, and Greenhouse in Incheon from 2015 to 2019

Seong Heo*

Professor, Department of Horticulture, Kongju National University, Yesan 32439, Korea

*Corresponding author: heoseong@kongju.ac.kr

ABSTRACT

Received: April 24, 2021**Revised:** May 19, 2021**Accepted:** May 25, 2021

ORCID

Seong Heo

<https://orcid.org/0000-0003-4485-8810>

This study was performed with the monitoring data of soil chemical properties of rice paddy, upland field and greenhouse soils in Ganghwa, Incheon metropolitan city from 2015 to 2019. Soil pH values tended to increase gradually in three soils, but there was no significant change in that of greenhouse soil. The concentration of organic matter (OM) and available phosphate (Av. P_2O_5) have fluctuated from 2015 to 2019, showing significant differences. In 2019, the average value of OM and Av. P_2O_5 were distributed within the appropriate level suggested by Rural Development Administration. In rice paddy field, the available silicate (SiO_2) were found to be proper within the standard concentration every year. The contents of exchangeable cations were higher than the proper standard, showing significant differences among the years, except greenhouse soil. The mean concentration of EC for five years in upland and greenhouse soils were 2.5 and 5.9 $dS\ m^{-1}$ above the proper standard. The optimal frequencies of pH were 46.8% and 47.1% at rice paddy and upland soil, but the excessive frequency ratio of pH was 48.5% at greenhouse soil in 2019. The exchangeable cations seemed to be seriously disproportionate exceeding the optimal level by 95%. In Pearson correlation matrix, the value of exchangeable Ca had a significantly positive correlation with exchangeable Mg content at upland and greenhouse soils. By principal component analysis, the exchangeable K, Mg and OM could distinguish between greenhouse and other soils on the first principal component and the pH and Av. P_2O_5 could differentiate between rice paddy and upland soils on the second principal component.

Keywords: Chemical property, Greenhouse, Principal component analysis, Rice paddy field, Upland field

Scatter plot of chemical properties investigated from rice paddy (P), upland (U) field and greenhouse (F) soils from 2015 to 2019.

Introduction

토양의 화학성은 작물의 생산성과 유의하게 상관되어 있으며 (Yamagishi et al., 2003), 벼의 경우, 토양의 화학적 특성이 생산량과 품질에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다 (Yanai et al., 2001). 즉, 토양 화학성에 의해 토양 비옥도가 결정되어 작물의 생산성에 영향을 끼치기 때문에, 토양 화학성 분석에 기반한 시비 처방은 친환경 지속농업의 가장 중요한 기본이라 할 수 있다. 또한 토양 화학성은 농경지의 이용형태, 비료사용, 토양관리, 재배작물의 종류 그리고 토양피복 등의 영향을 받기 때문에 (KREI, 2015), 재배작물의 생산성을 높이기 위해서는 토양 화학성에 대한 검정과 그에 따른 비료의 사용이 필요하다. 우리나라에서는 토양 화학성을 평가하는 인자로서 토양 pH, 토양 유기물 (OM), 유효인산, 치환성 양이온 (K, Ca, Mg), 염류농도를 나타내는 전기전도도 (EC), 유효규산 (논에서만 측정)를 조사하고 있으며, 이들에 기반하여 작물에 따른 적정범위의 양분수준을 추천하고 있다 (NAS, 2017). 그래서 1990년대 이후부터 지금과 같은 토양 화학성 조사 및 분석을 시작하여 현재까지 전국 규모의 농업환경변동조사가 이루어지고 있다.

전국의 논 (Kang et al., 2012), 밭 (Kim et al., 2019) 및 시설재배지 (Kang et al., 2013) 토양의 화학성 변동에 대한 보고를 보면, 화학성분에 따라 적정범위보다 부족하거나 과다한 농경지의 분포비율이 상당히 높았고, 경북지역의 경우, 시설하우스의 70%가 치환성 양이온 K의 함량이 추천수준을 초과한 것으로 보고되었다 (Park et al., 2016). 특히 시설재배지 토양은 염류가 과다하게 집적되어 있으며, 재배년수가 늘어남에 따라 토양의 염류 집적량도 계속 늘어나는 추세에 있다고 보고되었다 (Ha et al., 1997).

현재까지 인천광역시 내의 농경지에 대한 토양 화학성에 대한 시간적 변동을 조사하거나, 경지의 이용형태에 따른 토양 화학성을 분석한 연구가 그리 많지 않은 상황이다. 따라서 본 연구에서는 2015년부터 2019년까지 인천광역시 강화군 내의 논, 밭, 시설재배지 토양의 화학적 특성을 조사하였으며 그 변동요인을 분석하고자 하였다.

Materials and Methods

시설토양 시료채취 강화군의 논, 밭, 시설재배지 토양의 화학성 변동을 조사하기 위하여 2015년부터 2019년까지 주기적으로 조사하였다. 분석에 사용한 시료의 수는 동일 지점을 기준으로 논은 478개, 밭 265개, 시설재배지 87개 이상을 매년 조사하였다. 토양 시료는 화학비료 및 퇴비 처리가 실시되기 이전에 표토 10 - 15 cm 깊이로 토양시료 채취기를 이용하여 채취하였다.

토양 화학성 분석방법 채취한 토양은 그늘에서 5 - 7일간 풍건하여 고무망치로 입자를 분쇄한 후, 2 mm체를 통과시킨 다음 토양분석에 이용하였다. 토양의 화학성 분석은 농촌진흥청 토양화학 분석법 (NAAS, 2010)에 따라 검정하였다. 토양 pH와 EC는 토양에 증류수를 1:5 비율로 넣고 혼합하여 pH/EC meter (SP2000, Skalar, Netherlands)로 측정하였으며, OM은 원소분석기 (Primacs SNC 100, Skalar, Netherlands)를 활용하여 Dumas 분석법에 따라 정량하였다. 유효인산과 유효규산은 2017년까지 비색계를 이용하였고, 2018년부터 SAN++ system (Skalar, Netherlands) 장비를 활용하여 측정하였다. 치환성 양이온은 1M NH_4OAc 로 추출하여 ICP (Inductively Coupled Plasma)-OES (Optical Emission Spectrometry) (Optima 8300, PerkinElmer, USA)로 분석하였다.

통계 분석 농촌진흥청의 농업환경변동조사사업을 통해 확인된 논 토양 비옥도 적정기준과 흙토람에 제시된 논, 밭, 시설재배지 토양 적정기준을 바탕으로 (<http://soil.rda.go.kr>), 인천시 강화군 논 토양의 양분 부족, 적정, 과다비율을 구하여 연차별 토양 화학적 성분변화를 검토하였으며, 토양 화학성 분석 결과에 대한 연차간 차이의 통계적 유의성을 분석하기 위하여 통계 분석 프로그램인 R (version 3.6.3)에 “laercio” 패키지를 설치하여 ANOVA 분석과 Duncan’s multiple range test를 실시하였다. 토양 화학성분 간의 상관관계는 “corrplot”, “PerformanceAnalytics” 패키지로 분석하였고, “FactoMineR”, “factoextra” 패키지를 이용해 토양 화학성분의 주성분 분석을 수행하였다. 그래프 작성은 Sigmaplot version 12.0를 사용하였다.

Results and Discussion

연도별 논, 밭, 시설재배지 토양의 화학성 2015년부터 2019년까지 매년 조사한 강화군 논, 밭, 시설재배지 토양의 화학성 변동을 조사하였다 (Table 1, Table 2). 논 토양 pH는 2015년 6.0에서 2019년 6.4로 조금씩 상승하는 추세이며, 연도별 차이의 유의성이 인정되었다. OM은 2016년에 적정기준 밑으로 떨어졌으나 2017년부터는 계속 적정범위 이내로 분포하였으며, 계속 상승추세에 있다. 유효인산의 경우, 매해 적정기준보다 낮게 측정되었으나, 2019년에는 적정수준에 다다른 수치를 보여주었다. 유효규산은 매년 점점 증가하는 추세를 보여, pH와 상관성이 있음을 알 수 있었다 (Fig. 2). 치환성 양이온은 항상 적정수준보다 높게 유지되고 있으며, 전국 평균보다도 높게 유지되고 있다.

밭 토양 pH는 매년 적정범위 이내로 유지되고 있으며, OM 또한 2018년부터 적정수준 이내로 분포하였다 (Table 2). OM은 pH와 달리 점점 증가 추세에 있다. 유효인산은 2015년부터 2018년까지 평균치가 적정수준보다 낮았으나 2019년부터는 평균치 (441 mg kg^{-1})가 적정수준 이내로 분포함을 확인하였다. 치환성 양이온은 논과 마찬가지로 적정수준보다 높게 유지되었으며, 연도별 차이의 유의성도 인정되었다. Mg를 제외한 다른 양이온은 2019년부터 점차 낮아지는 추세를 보이고 있다. EC는 2017년 3.3 dSm^{-1} 으로 높았으나, 그 이후로 점점 낮아지는 경향을 보이고 있다.

시설재배지 토양의 pH는 매년 적정 수치가 유지되어, 연도간 차이가 인정되지 않았다 (Table 2). OM은 매해 적정범위내로 분포하였으며, 연도별 차이의 유의성이 인정되었으며 2019년부터 증가 추세에 있다. 유효인산은 2015년부터 적정수준을 유지해 왔으나, 2019년에 적정범위를 초과하였다. EC는 적정수준보다 두 배 이상으로 높게 유지되고

Table 1. Changes in chemical properties of rice paddy soils collected from Incheon between 2015 and 2019.

Year	pH (1:5)	OM (g kg^{-1})	Av. P_2O_5 (mg kg^{-1})	Av. SiO_2 (mg kg^{-1})	Exch. ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)		
					K	Ca	Mg
2015 [†]	6.0 d	20 c	61 b	166 c	0.39 d	6.02 b	2.82 ab
2016	6.2 b	18 d	60 b	159 c	0.47 bc	6.06 b	2.92 a
2017	6.1 c	21 b	43 c	218 b	0.49 b	6.08 b	2.93 a
2018	6.2 b	23 a	56 b	205 b	0.53 a	7.37 a	2.81 ab
2019	6.4 a	22 ab	76 a	309 a	0.44 c	6.02 b	2.75 b
Significance [‡]	***	***	***	***	***	***	**
Optimal lvl. [§]	5.5 - 6.5	20 - 30	80 - 120	≥ 157	0.2 - 0.3	5.0 - 6.0	1.5 - 2.0

[†] Values within a column followed by the same letter are not significantly different at 5% level by DMRT.

[‡] ns, *, **, ***: nonsignificant or significant at $p < 0.05$, 0.01, 0.001 respectively.

[§] NAS (2017): Fertilizer recommendation for crops.

있으며, 연도간 차이는 없었다. 치환성 양이온도 적정수준을 초과하는 수치가 계속 유지되고 있어 양이온의 축적이 심각한 상황인 것으로 보인다. 시설재배지 토양은 유기물과 유효인산을 제외하고 다른 화학성분은 대체로 연도별 차이가 없을 정도로 계속 높게 유지되고 있다.

Table 2. Changes in chemical properties of soils collected from upland field and greenhouse in Incheon between 2015 and 2019.

Soil	Year	pH (1:5)	OM (g kg ⁻¹)	Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	EC (dS m ⁻¹)	Exch. (cmol _c kg ⁻¹)		
						K	Ca	Mg
Upland field	2015 [†]	6.3 bc	18 b	279 b	2.0 c	0.64 b	6.25 c	2.05 c
	2016	6.5 a	17 b	310 b	1.6 c	1.03 a	7.48 b	2.43 ab
	2017	6.1 c	19 ab	123 d	3.3 ab	1.03 a	8.27 ab	2.72 a
	2018	6.5 a	21 a	215 c	3.6 a	0.94 a	8.60 a	2.38 b
	2019	6.4 ab	21 a	441 a	2.2 bc	0.93 a	6.55 c	2.49 ab
	Significance [‡]	***	**	***	**	***	***	***
	Optimal lvl. [§]	6.0 - 7.0	20 - 30	300 - 550	<2.0	0.5 - 0.8	5.0 - 6.0	1.5 - 2.0
Greenhouse soil	2015 [†]	6.3 b	28 a	355 b	5.5 ab	1.4 bc	10.34 ab	4.50 abc
	2016	6.3 b	23 b	388 b	6.5 ab	1.5 abc	11.05 ab	4.70 ab
	2017	6.3 b	31 a	459 b	4.9 b	1.7 ab	10.59 ab	4.17 bc
	2018	6.4 ab	23 b	208 c	6.7 a	1.9 a	31.37 a	4.84 a
	2019	6.5 a	28 a	674 a	6.0 ab	1.2 c	9.79 b	3.97 c
	Significance [‡]	ns	***	***	ns	*	ns	*
	Optimal lvl. [§]	6.0 - 6.5	20 - 35	350 - 500	<2.0	0.7 - 0.8	5.0 - 6.0	1.5 - 2.0

[†] Values within a column followed by the same letter are not significantly different at 5% level by DMRT.

[‡] ns, *, **, ***: nonsignificant or significant at $p < 0.05$, 0.01, 0.001 respectively.

[§] NAS (2017): Fertilizer recommendation for crops.

논, 밭, 시설재배지 토양의 화학성 과부족을 분포 논, 밭, 시설재배지 토양의 화학성 적정범위를 기준(NAS, 2017)으로, 연도별 토양 화학성분의 부족, 적정, 과다 비율을 조사하였다(Fig. 1). 토양 pH는 수치가 낮은(산성) 경우 부족으로, 적정수준보다 높은(알칼리성) 경우를 과다로 표시하였다. 논과 밭 토양의 pH는 2019년에 적정비율이 46.8%, 47.1%이었고, 시설재배지 토양에서 적정비율은 34.3%이고, 과다비율이 48.5%이었다. 논 토양 pH는 과다비율이 점점 증가하고, 부족비율은 감소하는 추세이다(Fig. 1). 밭 토양 pH는 부족, 과다비율 모두 감소하는 경향이지만, 시설재배지 토양 pH는 적정과 과다비율이 계속적으로 증가하는 추세이다. OM도 논, 밭과 달리 시설재배지 토양에서 다른 경향을 보여주었다. 시설재배지 토양의 유기물은 적정수준이 2015년 70.1%에서 2019년 47.5%로 매년 과부족 비율에 비해 높은 비율을 유지하고 있다. 그러나 논과 밭의 유기물은 부족비율이 45% 이상을 유지하고 있으며, 밭의 경우 2016년에는 65.2%를 기록하였다. 유효인산은 논, 밭, 시설재배지 토양 모두에서 부족비율이 높게 유지되었다. 치환성 양이온에서는 과다비율이 95.5%에 달할 정도로 높은 비율을 차지하고 있어 심각한 불균형 상태인 것을 확인할 수 있었다. 논, 밭의 유효인산은 적정수준의 토양이 점점 증가하여 2019년에 74.9%를 기록하였다. 밭 토양의 EC는 적정비율이 매년 60% 이상이 유지되고 있으나, 시설재배지 토양의 EC는 매년 과잉비율이 65% 이상이어서 염류집적이 심각한 상황임을 알 수 있다. 따라서 킬레이트제를 활용한 염류제거를 적극적으로 유도할 필요가 있다(Heo, 2019).

Fig. 1. The frequency distribution of excessive, optimal and insufficient ranges in soil chemical properties investigated from rice paddy, upland field and greenhouse soils.

논, 밭, 시설재배지 토양 화학성 간의 상관관계 강화군 논, 밭, 시설재배지 토양의 화학성분 간의 상관관계는 Fig. 2와 같다. 먼저 논 (Fig. 2A)을 보면, 토양 pH는 유효인산, 유효규산, 치환성 양이온과 정의 상관을 나타낸 반면, OM과는 부의 상관을 보였다. 일반적으로 토양 pH는 양이온과 정의 상관을 나타내고 (Abreu et al., 2003), 유기물의 수소 이온 반응에 영향을 받는다고 알려져 있다 (Rukshana et al., 2012). OM은 보통 논, 밭에서 유효인산과 상관 정도가 높은 것으로 알려져 있으나 (Park et al., 2016, 2017), 본 연구결과에서는 일치하지 않았다. 이는 토양 유기물의 시용이 비교적 최근에 이루어져 충분한 부숙이 되지 않은 것으로 보인다.

치환성 양이온 간에는 정의 상관을 이루었으며, 특히 치환성 칼륨과 마그네슘은 $r = 0.50$ 의 상관관계를 나타냈다. 유효규산은 pH와 치환성 칼슘과 유의한 정의 상관을 이루는데, 이는 규산질 비료의 시용이 증가한 결과인 것으로 보인다. 규산질 비료에는 칼슘과 알칼리분이 포함되어 있어 이로 인해 수치가 높아진 것으로 추정된다. 따라서 토양 개량을 위한 규산질 비료 투입량 산정 시 토양의 pH 수치에 따라 규산질 비료의 적정량을 제시해 줄 필요가 있다고 생각한다.

밭 토양 (Fig. 2B)의 경우, 대부분의 화학성분과 유의한 정의 상관을 이루었다. OM은 유효인산, 치환성 칼륨, 칼슘과 고도의 정의 상관을 보이는데, 퇴비의 시용과 연관이 있는 것으로 추정된다. 치환성 양이온 간에는 고도의 정의 상관을 보이는데, 치환성 칼슘과 마그네슘은 $r = 0.65$ 의 상관관계를 나타냈다. EC는 치환성 양이온과 정의 상관을 나타내는데, 이는 기 보고된 내용 (Miyamoto et al., 2015)과 일치하였다.

2015년부터 2019년까지 분석한 시설재배지 토양의 화학성분 간의 상관정도는 $r = 0.78$ 이하로 분석되었다 (Fig. 2C). pH는 OM, 유효인산 및 치환성 양이온과 정의 상관을 나타냈다. 이 연구에서 시설재배지 토양의 pH와 EC 간의 상관관계는 나타나지 않았다. OM은 모든 성분과 정의 상관을 이루었으며, 유효인산과 치환성 칼륨과 고도의 정의 상관을 나타냈다. 치환성 양이온 간에는 논, 밭과 마찬가지로 고도의 정의 상관을 보였다. 염류집적 정도를 나타내는 EC는 치환성 마그네슘, 칼슘, 칼륨 순으로 정의 상관을 보였다.

Fig. 2. Pearson correlation coefficient matrix comparing paired chemical properties of rice paddy (A), upland field (B) and greenhouse soils (C) in Incheon.

주성분 분석 연도별 논, 밭, 시설재배지 토양의 화학성분 간 주성분 분석을 수행하였다 (Fig. 3). 논 (Fig. 3A)의 경우, 주성분 (PC) 1의 변량에는 치환성 칼륨 (0.757)을 비롯한 칼슘과 pH가 양의 상관관계를 이루었고, OM (-0.051)만이 부의 상관관계를 나타냈다. PC 2에서는 유효규산 (0.614), OM (0.5792) 및 치환성 마그네슘 (-0.552)과 높은 상관관계를 이루었다. 2018년에는 치환성 칼륨을 비롯한 양이온들이 높게 측정되었고, 2019년에는 유효규산, 유효인산이 타 해와 비교해 높았다. 그럼에도 불구하고 각 연도 변량의 평균값이 거의 일치하고 있어 토양 화학성분의 변동이 크지 않은 것을 알 수 있다.

밭 토양 (Fig. 3B)에서 PC 1은 42.6%, PC 2는 14.8%를 나타내어 전체 57.4%를 설명할 수 있었다. PC 1에서는 치환성 칼륨 (0.808), 칼슘 (0.797), 마그네슘 (0.781)이 높은 상관관계를 나타냈다. PC 2의 변량을 보면, 유효인산 (0.709), OM (0.498)이 양의 상관관계를 보였고, 나머지 성분은 부의 상관관계를 이루었다. 2019년에 유효인산과 OM이 주요인이 되어 다른 해보다 변동이 컸음을 알 수 있다.

시설재배지 토양 (Fig. 3C)에서는 PC 1은 34.6%, PC 2는 18.1%를 나타내어 전체 52.7%를 설명할 수 있었다. PC 1의 변량에는 모든 성분이 양의 상관관계를 이루었으며, 치환성 칼륨 (0.837), 마그네슘 (0.745), OM (0.688)이 높았다. PC 2에서는 유효인산 (0.619)이 양의 상관관계를, EC (-0.458)가 부의 상관관계를 보였다. 시설재배지 토양에서도 해마다 차이가 크지 않았으나, 역시 2019년에 유효인산, pH, OM의 요인으로 인해 개별 샘플 간의 차이가 발생하였다. 위 자료를 기반으로 경지 유형별로 토양의 화학성분 간의 주성분 분석을 실시하였다 (Fig. 4). 논 그룹의 변량의 변동이 크지 않아 작은 타원을 이룬 반면, 시설재배지 그룹은 변량에 큰 차이가 있는 것을 알 수 있다. PC 1은 56.9%, PC 2는 20.8%로 전체 77.7%를 설명할 수 있었다. PC 1에서는 치환성 칼륨, 마그네슘, OM이 높은 상관관계를 나타내어 시설재배지 토양의 특성을 보여주었고, PC 2에서는 pH와 유효인산이 주요인인 것을 알 수 있었다. 위 결과에서 보듯, 시설재배지 토양에서는 모든 화학성분의 농도가 논, 밭보다 상대적으로 높았는데, 그 중에서도 특히 치환성 칼륨, 마그네슘 및 OM이 높아 논, 밭 토양과 구별되었다. 그리고 PC 2의 변량에 의해서 pH와 유효인산의 함량 차이로 인해 밭과 논이 구분되었다. 토양 이용형태에 따른 토양 화학성을 비교한 결과, 시설재배지 토양이 대부분의 토양 화학성이 논, 밭보다 높았는데, 이는 시설하우스 내에서 작물이 연중 재배됨에 따라, 노지 재배에 비해 연간 시비량이 훨씬 많고, 자연 강우가 차단되어 양분의 용탈과 유실은 적지만, 작물의 증산작용에 의해 토양수분이 계속 상향 이동해 염류가 표층에 계속 집적되기 때문인 것으로 보고 있다 (Lee et al., 1993).

Fig. 3. Scatter plot showing positive and negative correlations of seven soil variables to the first and second principal variates derived from principal component analysis: (A) for rice paddy field, (B) for upland field and (C) for greenhouse soil in Incheon.

Fig. 4. Scatter plot showing positive and negative correlations of seven soil variables to the first and second principal variates derived from principal component.

Conclusions

강화군 논, 밭, 시설재배지 표토의 화학적 특성을 5년간 조사하였다. 논, 밭 토양의 pH는 매년 점점 높아지는 추세이나, 시설재배지 토양은 차이가 인정되지 않았다. 밭 토양의 유기물 함량과 유효인산은 5년 동안 변동이 심하였으나, 2019년에는 평균값이 적정범위 이내로 분포하였다. 논 토양의 유효규산은 매해 적정수준을 유지하였지만, 치환성 양이온은 적정기준보다 매해 높게 유지되었다. 밭, 시설재배지 토양의 전기전도도는 매년 적정기준보다 높았다. 논, 밭 토양의 pH 적정비율은 46.8%, 47.1%로 적절한 토양이 많았으나, 2019년 시설재배지 토양의 경우, 과잉비율이 48.5%로 pH가 높은 토양이 많았다. 치환성 양이온은 논, 밭, 시설재배지 모두에서 과다비율이 높았으며, 특히 2019년 시설재배지 토양의 양이온(K, Ca, Mg)의 과다비율은 55.6%, 81.8%, 84.8%로 양분 불균형이 심각한 상황이었다. 치환성 양이온 중 칼슘과 마그네슘이 밭과 시설재배지 토양과 상관성이 높았다. 주성분 분석 결과, 논과 밭은 pH와 유효인산이, 시설재배지는 치환성 칼륨 및 마그네슘, 유기물함량이 농경지 화학적 특성에 주 영향을 끼치는 것으로 해석되었다.

References

- Abreu, Jr. C.H., T. Muraoka, and A.F. Lavorante. 2003. Relationship between acidity and chemical properties of Brazilians soils. *Sci. Agric.* 60:337-343.
- Ha, H.S., M.S. Yang, H. Lee, Y.B. Lee, B.K. Sohn, and U.G. Kang. 1997. Soil chemical properties and plant mineral contents in plastic film house in Southern part of Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 30:272-279.
- Heo, S. 2019. Changes in chemical properties of greenhouse soils collected from Ganghwa. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 52:226-234.
- Kang, S.S., A.S. Roh, S.C. Choi, Y.S. Kim, H.J. Kim, M.T. Choi, B.G. Ahn, H.K. Kim, S.J. Park, Y.H. Lee, S.H. Yang, J.S. Ryu, Y.G. Sohn, M.S. Kim, M.S. Kong, C.H. Lee, D.B. Lee, and Y.H. Kim. 2013. Status and change in chemical properties of polytunnel soil in Korea from 2000 to 2012. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 46:641-646.

- Kang, S.S., A.S. Roh, S.C. Choi, Y.S. Kim, H.J. Kim, M.T. Choi, B.K. Ahn, H.W. Kim, H.K. Kim, J.H. Park, Y.H. Lee, S.H. Yang, J.S. Ryu, Y.S. Jang, M.S. Kim, Y.K. Sonn, C.H. Lee, S.G. Ha, D.B. Lee, and Y.H. Kim. 2012. Status and changes in chemical properties of paddy soil in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45:968-972.
- Kim, Y.H., M.S. Kong, E.J. Lee, T.G. Lee, and G.B. Jung. 2019. Status and changes in chemical properties of upland soil from 2001 to 2017 in Korea. *Korean J. Environ. Agric.* 38:213-218.
- KREI (Korea Rural Economic Institute). 2015. Study on introduction of nutrient management institution. Korea Rural Economic Institute, Naju, Korea.
- Lee, Y.H., Y.K. Shin, K.N. Hwang, and G.S. Rhee. 1993. Studies on chemical properties of soils under the plastic house cultivations of vegetables. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 26(4):236-240.
- Miyamoto, T., K. Kameyama, and Y. Iwata. 2015. Monitoring electrical conductivity and nitrate concentrations in an Andisol field using time domain reflectometry. *JARQ-Jpn. Agric. Res. Q.* 49(3):261-267.
- NAAS (National Academy of Agricultural Science). 2010. Method of soil chemical analysis. Rural Development Administration, Wanju, Korea.
- NAS (National Institute of Agricultural Science). 2017. Fertilizer recommendation for crops. Third edition. Rural Development Administration, Wanju, Korea.
- Park, S.J., J.H. Park, C.Y. Kim, Y.J. Seo, O.H. Kwon, J.G. Won, and S.H. Lee. 2016. Comparison of the surface chemical properties of plastic film house, upland, and orchard soils in Gyeongbuk province. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49(2):115-124.
- Park, S.J., J.H. Park, C.Y. Kim, Y.J. Seo, O.H. Kwon, J.G. Won, and S.H. Lee. 2017. Assessing changes in selected soil chemical properties of rice paddy fields in Gyeongbuk province. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 50(3):150-161.
- Rukshana, F., C.R. Butterly, J.A. Baldock, and C. Tang. 2012. Model organic compounds differ in priming effects on alkalinity release in soils through carbon and nitrogen mineralization. *Soil Biol. Biochem.* 51:35-43.
- Yamagishi, J., T. Nakamoto, and W. Richner. 2003. Stability of spatial variability of wheat and maize biomass in a small field managed under two contrasting tillage. *Field Crop Res.* 81:95-108.
- Yanai, J., C.K. Lee, T. Kaho, M. Iida, T. Matsui, M. Umeda, and T. Kosaki. 2001. Geostatistical analysis of soil chemical properties and rice yield in a paddy field and application to the analysis of yield-determining factors. *Soil Sci. Plant Nutr.* 47:291-301.