Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2019.52.3.226>

pISSN : 0367-6315

eISSN : 2288-2162

Changes in Chemical Properties of Greenhouse Soils Collected from Ganghwa

Seong Heo*

Ganghwa Agricultural Technology Service Center, Ganghwa 23038, Korea

*Corresponding author: heoseong@gmail.com

ABSTRACT

Received: April 24, 2019**Revised:** August 14, 2019**Accepted:** August 26, 2019

ORCID

Seong Heo

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

The chemical properties of greenhouse soils in Ganghwa were investigated every year from 2014 to 2018 in order to manage soil fertility and increase crop yield. In 2018, the average concentrations of chemical properties from greenhouse soils were analyzed: 6.4 for pH, 6.72 dS m⁻¹ for EC (electrical conductivity), 23 g kg⁻¹ for OM (amount of organic matter), 187 mg kg⁻¹ for P₂O₅ (available phosphate), 1.89, 12.09, 4.84 cmol_c kg⁻¹ for exchangeable potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), respectively. There were no significant changes in the contents of pH and OM from 2014 to 2018. However, the concentration of EC was 3.7 times higher than that of the proper standard recommended by Rural Development Administration in 2018. Further, the excessive frequency ratio about exchangeable cations were 60.6% for K, 93.9% for Ca and 95.9% for Mg based on the recommendation and the contents of exchangeable cations had a tendency to increase according to the years. The frequency ratio of P₂O₅ which is insufficient in comparison with the standard was 83.8% and the concentration of P₂O₅ was 1.9 times lower than that of the recommendation in 2018. The P₂O₅ content had tended to decrease with years. The OM values of cucumber and tomato were higher than those of pepper and water melon, whereas the contents of P₂O₅ were also insufficient in all crops. Based on principal component analysis, EC was significantly correlated with exchangeable cations, K, Ca and Mg from greenhouse soils in Ganghwa. In order to promote soil fertility of greenhouse in Ganghwa, it is necessary to apply phosphate fertilizer and manage soil nutrients based on the soil tests and analyses.

Keywords: Chemical property, Greenhouse soil, Long-term monitoring, Principal component analysis

Pearson correlation coefficient matrix comparing paired chemical properties of greenhouse soils in Ganghwa.

Introduction

국내 시설재배 온실면적은 2000년에 48,853 ha에서 2017년 52,418 ha로 증가하였고, 인천광역시 내 시설재배 면적 또한 2000년 262 ha에서, 2017년 511 ha로 두 배 이상 증가하였다(KOSIS, 2018). 첨단과학 영농을 추진하기 위한 스마트팜 보급사업 또한 2014년부터 시작하여 2017년에는 시설온실 4,010 ha가 보급되었고, 2022년까지 7,000 ha 보급을 목표로 진행하고 있다(KREI, 2019). 세부적으로 토마토를 재배하는 시설온실의 경우, 2017년 785 ha에서 2022년까지 1,002 ha로, 딸기는 2017년 600 ha에서, 2022년까지 1,493 ha로 면적을 확대할 계획이다(KREI, 2019). 이와 같이 정보통신기술과 접목된 스마트팜이 점차 확산되어 가고 있는 추세에 따라, 노동력·에너지·양분 투입 감소와 농업 생산량 증가가 농업소득 증대로 이어지고 있으며, 시설하우스 단위면적당 생산량과 농산물의 품질은 점점 높아질 것으로 예상하고 있다. 최근 스마트팜은 IoT기술을 이용하여 생력재배가 가능할 뿐만 아니라, 작물이 자라는 토양의 화학성에 기반한 빅데이터를 분석하여 이를 활용한 종합양분관리 시스템을 구축하는 것을 포함하고 있다.

우리나라 시설재배 토양은 염류가 과다 집적되어 있으며, 특히 채소 시설재배 토양의 염류 집적량은 재배년수가 늘어날수록 계속 늘어나는 추세에 있다고 보고되었다(Ha et al., 1997). 이는 시설하우스 내에서 작물이 연중 재배됨에 따라, 노지 재배에 비해 연간 시비량이 훨씬 많으며, 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). 토양 화학성이 적정수준보다 떨어지면 작물이 사용할 수 있는 양분수준이 감소하여 작물 생산성의 하락을 야기하기 때문에, 지속적인 토양 화학성 분석은 농업생산량 증가와 직결된다고 볼 수 있다. 즉, 토양 화학성 분석 결과를 바탕으로 비료 투입량을 결정하고, 비료 투입량에 따라 개선된 토양 화학성으로 인해 작물이 이용가능한 양분이 증가하여 생산성 향상을 유도할 수 있다. 토양 화학성 조사는 pH, 유기물 함량 (organic matter), 전기전도도 (electrical conductivity), 유효인산 (available phosphate), 치환성 양이온 (exchangeable potassium, calcium, magnesium) 분석으로 이루어지며, 이 결과는 흙토람 (토양환경정보시스템, <http://soil.rda.go.kr>)에 입력하고 그 토양에 맞는 맞춤형 비료사용처방서를 발급하고 있다(NAS, 2017). 본 연구는 인천광역시 강화군 내 시설재배지의 토양 자료를 얻기 위하여, 2014년부터 2018년까지 5년 동안 선정된 시설재배지의 토양 화학성 변화를 조사하였고 그 변동요인을 분석하고자 하였다.

Materials and Methods

시설토양 시료채취 강화군 시설재배지의 토양 화학성 변동을 주기적으로 조사하기 위하여 2014년에 재배작물 및 면적을 고려하여 22개 지점을 선정하였고, 2018년까지 매년 3 - 5반복 이상 동일한 지점을 조사하였다. 토양 시료는 3 - 5월 사이에 표토 (10 - 15 cm) 깊이로 무작위로 3군데에서 토양시료채취기를 이용하여 채취, 혼합하였다.

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 측정하였는데, 2014년부터 2017년까지는 pH meter (Orion star A214, Thermo Scientific, Singapore)와 EC meter (EC-450L, Itek, South Korea)를 활용하였고, 2018년부터 pH/EC meter (SP2000, Skalar, Netherlands)로 측정하였다. 2014년부터 2017년까지 OM은 Tyurin법으

로 정량하였으며, 유효인산은 Lancaster법으로 비색계 (UV/VIS spectrometer Lambda 35, PerkinElmer, USA)를 사용하여 분석하였다. 2018년부터 OM은 고온연소산화법에 따른 원소분석기 (Primacs SNC 100, Skalar, Netherlands)를 활용하였고, 유효인산은 역시 Lancaster법에 따른 SAN++ system (Skalar, Netherlands) 장비와 비색계를 혼용하여 측정하였다. 치환성 양이온 K, Ca, Mg은 1M NH₄OAc로 추출하여 ICP (Inductively Coupled Plasma)-OES (Optical Emission Spectrometry) (Optima 8300, PerkinElmer, USA)로 분석하였다.

통계 분석 농촌진흥청의 농업환경변동조사사업을 통해 확인된 시설재배지 토양 비옥도 적정기준 (<http://soil.rda.go.kr>)과 작물별 비료사용처방 기준 (NAS, 2017)을 바탕으로, 강화군 시설재배지 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 3.5.2)에 “agricolae”, “laercio” 패키지를 설치하여 ANOVA 분석과 Duncan’s multiple range test를 실시하였다. 토양 화학성분 간의 상관관계는 Pearson 상관관계수 (“psych”패키지)로 분석하였고, “rgl” 패키지를 이용해 토양 화학성분의 주성분 분석을 수행하였다. 그래프 작성은 Sigmaplot version 12.0를 사용하였다.

Results and Discussion

연도별 시설재배지 토양 화학성 비교 강화군 내 시설재배지의 토양 화학성을 조사하였다 (Table 1). 토양 pH는 2014년 6.1에서 2018년 6.4로 약간 상승했지만 연도별 차이의 유의성이 인정되지 않았으며, 치환성 Ca 또한 연도별 차이의 유의성은 없었으나, 계속 증가하는 경향을 보였다. OM은 증감을 반복하다가 2017년 31 g kg⁻¹로 크게 증가하였고, 차이의 유의성도 인정되었다. 이는 유기물 사용을 적극적으로 권장한 결과에 기인한 것으로 판단된다. 유효인산 또한 2015년에 감소하였다가 2016년 이후부터 계속 증가하는 추세였으며 2017년까지 적정범위 이내에 분포하였으나 2018년에는 적정기준에 미달하였다. 유효인산의 평균치가 2018년에 갑자기 낮아진 이유는 2018년부터 신규장비 (SAN++ system)로 측정을 했던 것에 기인한 것으로 보이며, 또한 신규장비에 대한 운용 미숙과 이에 따른 비색계 측정을 혼용한 결과로 보인다. EC 및 치환성 K, Mg의 경우, 계속 증가하는 추세이며 연도별 차이의 유의성도 인정

Table 1. Chemical properties of greenhouse soils collected from Ganghwa between 2014 and 2018.

Year	pH	EC	OM	Avail. P ₂ O ₅	K	Ca	Mg
	(1:5)	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	----- Exch. cmol _c kg ⁻¹ -----		
2014	6.1a [†]	4.52b	22b	407ab	0.94b	9.07a	3.93b
2015	6.3a	5.52ab	28a	355b	1.38ab	10.34a	4.50ab
2016	6.3a	6.46a	23b	388ab	1.48a	11.05a	4.70a
2017	6.3a	4.90b	31a	459a	1.73a	10.59a	4.17ab
2018	6.4a	6.72a	23b	187c	1.89a	12.09a	4.84a
Significance [†]	ns	**	***	***	**	ns	*
Optimal lvl. [§]	6.0 - 6.5	0.0 - 2.0	20 - 35	350 - 500	0.7 - 0.8	5.0 - 6.0	1.5 - 2.0

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

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

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

되었다. 2018년의 토양 화학성분을 보면 EC는 적정수준보다 3.7배, 치환성 K은 2.4배, Ca은 2.0배, Mg는 2.4배 높게 나타났다. EC는 치환성 양이온, 특히 Ca과 Mg의 농도와 밀접한 연관이 있는 것으로 추정된다.

작물별 시설재배지 토양 화학성 비교 2014년부터 2018년까지 강화군 작물별 시설재배지 표토의 화학성 변화는 Fig. 1과 같다. 작물별 토양 화학성의 적정기준은 작물별 비료사용처방 기준 (NAS, 2017)을 활용하였다. 고추의 경우, pH, EC, 치환성 K, Ca, Mg 모두 2014년부터 2018년까지 큰 변동이 없었다. pH는 적정기준 (6.0 - 6.5) 보다 낮게 유지되었으며, EC는 5년 동안 기준 (2 이하) 보다 계속 높게 유지되었다. 치환성 K 또한 기준을 미달하였으나, 치환성 Ca와 Mg는 초과하였다. 특히 치환성 Ca은 1.2 - 1.6배 이상 높았다. OM은 2015년 27 dS m^{-1} 으로 가장 높았으며 적정 범위에 포함되었으나, 그 이후로는 계속 적정범위 이하로 낮은 수치를 기록하였다.

Fig. 1. Comparison of chemical properties of greenhouse soils affected by different crops from 2014 to 2018: A for pH, B for OM, C for EC, D, E, F for exchangeable K, Ca and Mg, respectively.

수박의 경우, 역시 OM, EC, 치환성 K, Ca, Mg는 연도별로 유의한 차이는 발생하지 않았으나, pH는 적정범위 이내로 분포하다가 2017년부터 낮아지기 시작했으며, OM 또한 2018년부터 적정수준 이하로 떨어졌다. 치환성 양이온도 고추와 비슷한 경향이었으며, 치환성 Ca는 1.6 - 1.9배 이상 높았다.

오이의 pH는 2018년 6.0으로 적정수준을 유지하고 있으며, OM 또한 오이 기준 (2018년 27.7)에 맞게 유지되고 있다. 그러나 치환성 양이온인 Ca와 Mg는 2배, EC는 2 - 5배 이상 높게 유지되고 있어, 심각한 염류집적과 양분 불균형이 발생한 것으로 보인다.

토마토의 pH는 5년 동안 안정적으로 적정수준을 유지하고 있으며, OM은 2017년에 40 g kg^{-1} 로 높았으나 전체적으로 적정범위 내로 분포하고 있다. 토마토 토양도 오이와 마찬가지로 치환성 양이온 농도가 높았고, EC 또한 기준보다 2배 (2018년 6.0) 높아 염류집적으로 인한 문제 발생이 예상된다.

각 작물별 시설재배지 토양의 유효인산의 변화를 보면 (Fig. 2), 고추와 수박은 5년 동안 계속 적정범위보다 낮았으며, 특히 2018년에는 고추 21 mg kg^{-1} , 수박 78.4 mg kg^{-1} 으로, 적정기준치인 $450 - 550 \text{ mg kg}^{-1}$ (고추), $350 - 450 \text{ mg kg}^{-1}$ (수박)보다 각각 26배, 5배 이상 낮은 수치였다. 토마토와 오이는 2017년 적정기준을 상회하는 수치를 기록하였으나, 2018년에는 평균 유효인산 함량이 토마토 185 mg kg^{-1} , 오이 313 mg kg^{-1} 으로 급격히 낮아졌다.

Fig. 2. Comparison of the available P_2O_5 contents according to the crops cultivated at greenhouse soils in Ganghwa.

시설재배지 토양 화학성 과부족 비율 분포 강화군 시설재배지 토양의 연도별 양분 분포비율을 조사하였다 (Fig. 3). pH는 적정범위인 6.0 - 6.5 수준에서 계속 등락을 반복하고 있으며, 2018년에는 오히려 2017년보다 적정비율이 40.8%에서 18.1%로 더 낮아졌다. 이에 반해 pH 적정수준을 초과하는 비율은 점점 높아져, 2014년 35.9%에서 2018년 49.5%로 증가했다. pH농도와 밀접한 관련이 있는 치환성 칼슘 함량의 과잉비율을 보면, pH 과잉비율의 패턴과 비슷함을 알 수 있다. 유기물 함량의 연도별 적정비율은 2014년 46.9%, 2015년 70.1%, 2016년 50.5%, 2017년 42.2%, 2018년 59.6%로 적정범위 내에 속하는 시설재배지가 부족 또는 과잉 재배지보다 많았다. 유효인산의 경우 부족비율이 2014년 60.9%에서 2018년 83.8%로 개선되지 못하고 점점 더 나빠지고 있는 상황이다. 치환성 칼륨 함량의 과잉비율은 계속 높아지고 있는 추세이며, 치환성 칼슘과 마그네슘 또한 과잉비율이 2018년 각각 93.9%, 95.9%로 심각한 불균형 현상을 나타내고 있다. 치환성 양이온이 부족하면 토양이 산성화되어 Fe, Mn, Cu, Zn 및 Co 등의 미량성

분 함량이 높아지나, 과잉되면 토양 pH가 높아져 미량원소의 결핍현상이 나타날 수 있다 (Fageria and Baligar, 2008; Behera and Shukla, 2014). 또한 시설토양은 강우에 의한 치환성 양이온의 용탈이 발생하지 않아 더더욱 양이온의 축적이 이루어지기 쉽다 (Behera and Shukla, 2014). 그러므로 심각한 염류집적과 양분 불균형을 해결하기 위해서는 거듭된 토양검정과 결과에 기초한 적정시비를 유지하여야 한다 (Cho et al., 2018).

Fig. 3. The frequency distribution of excessive, optimal and insufficient ranges of chemical properties investigated from greenhouse soils in Ganghwa.

시설재배지 토양 화학성 간의 상관관계 강화군 시설재배지 토양 화학성분간의 상관관계는 Fig. 4와 같다. 2014년부터 2018년까지 분석한 7개의 토양 화학성간의 상관 정도는 $r = 0.78$ 이하로 분석되었다. 토양 pH는 유기물, 유효인산, 치환성 칼륨, 칼슘, 마그네슘과 정의 상관을 나타내었다. 일반적으로 토양 pH는 양이온과 정의 상관을 보이고 (Abreu et al., 2003), 음이온과는 부의 상관을 나타낸다 (Zhang et al., 2016). 또한 pH는 유기물의 수소이온 반응에 영향을 받는다고 알려져 있어 (Rukshana et al., 2012), 본 연구의 결과와 일치하는 것을 알 수 있다. 이 실험에서 시설재배지 토양의 pH와 전기전도도 간의 상관관계는 나타나지 않았다. 유기물 함량은 유효인산과 치환성 칼륨, 칼슘과

Fig. 4. Pearson correlation coefficient matrix comparing paired chemical properties of greenhouse soils in Ganghwa.

고도의 정의 상관을 나타냈다. 유기물과 유효인산 간의 상관정도가 높은 것은 논과 밭 조건 모두에서 공통적으로 나타나는 현상으로, 퇴비의 사용과 연관이 있는 것으로 생각된다 (Park et al., 2016; Park et al., 2017). 치환성 양이온 간에는 고도의 정의 상관을 보였으며, 특히 치환성 칼슘과 마그네슘은 $r = 0.78$ 의 상관관계를 나타냈다. 염류집적 정도를 나타내는 전기전도도는 치환성 마그네슘, 칼슘, 칼륨 순으로 정의 상관을 나타냈다. 전기전도도는 치환성 양이온과 정의 상관을 나타내는데 (Miyamoto et al., 2015), 이는 경남지역 시설재배지 토양분석 결과와 같은 것을 알 수 있었으며, 양분을 다량 함유하고 있는 가축분 퇴비를 사용한 때문인 것으로 보인다 (Cho et al., 2018).

주성분 분석 시설재배지 토양의 연도별 화학성분 간의 주성분 분석을 수행한 결과 (Fig. 5), 주성분1은 67.1%, 주성분2는 23.0%를 나타내어 전체 90.1%를 설명할 수 있었다. 주성분1의 변량에는 치환성 마그네슘을 비롯한 pH, 치환성 칼슘 등과 양의 상관이 높았고, 유효인산과는 부의 상관을 나타냈다. 주성분2의 변량을 보면, 유기물 함량이 부의 상관을 보였으며, 2017년과 2015년에 유기물 함량이 높았음을 보여주었다. 2018년에는 pH와 전기전도도, 치환성 양이온이 타 해와 비교해 높았으며, 2014년에는 상대적으로 낮아 토양 화학성분의 변동이 큰 것을 확인할 수 있었다. 즉 토양 양분 관리가 제대로 되지 않아 일정한 경향을 띠지 못하였다.

2014년부터 2018년까지 강화군 시설재배지 토양의 화학성분 간의 주성분 분석을 수행한 결과 (Fig. 6), 주성분1은 47.7%, 주성분2는 19.3%, 주성분3은 10.9%를 나타내어 전체 77.9%를 설명할 수 있었다. 주성분1에서는 치환성 마그네슘, 칼슘, 칼륨이, 주성분2에서는 전기전도도와 유효인산이, 주성분3에서는 pH가 비교적 높은 상관을 나타내었다. 주성분1, 2 그리고 3 변량의 벡터값을 3차원 입체 산포도로 나타낸 결과, 주성분1에서는 모든 변수가 같은 벡터 방향으로 향하였고, 주성분2에는 pH, 유기물, 유효인산이 부의 상관을, 치환성 양이온과 전기전도도가 양의 상관을 이루었다. 주성분3에서는 pH, 치환성 칼슘과 마그네슘이 양의 상관을 이루어 Fig. 6과 같은 분포를 하였다.

Fig. 5. Scatter plot showing positive and negative correlations of seven soil variables to the first and second principal variates derived from a principal component analysis (PCA).

Fig. 6. Three dimensional scatter plot of chemical properties in greenhouse soils collected from Ganghwa from 2014 to 2018. The colored dots in the plot indicate the years between 2014 to 2018: red for 2018, blue for 2017, green for 2016, black for 2015, grey for 2014.

Conclusions

강화군 내 시설재배지 22농가를 대상으로 토양의 화학성을 조사한 결과, 시설토양 적정기준치보다 높게 측정되어 염류가 많이 집적되어 있는 것으로 나타났다. 토양 내 염류집적의 지표가 되는 전기전도도의 경우, 2018년에 적정수준보다 3.7배 높았으며, 전기전도도와 정의 상관을 갖는 치환성 양이온의 경우, 칼륨은 2.4배, 칼슘은 2.0배, 마그네슘은 2.4배 높았고, 과잉비율 또한 칼륨 60.6%, 칼슘 93.9%, 마그네슘 95.9%로 굉장히 높았다. 유기물 함량은 2018년 평균 23 g kg^{-1} 으로 적정범위 내에 속했으며, 적정비율이 59.6%로 유기물의 사용이 적절히 이루어졌다. 작물별 시설재배지 토양을 분석한 결과, 오이, 토마토와 같이 1년에 2 - 3기작을 하는 작물의 경우, 전기전도도가 2 - 5배 이상 높게 유지되고 있어, 심각한 염류집적이 예상되며 킬레이트제를 활용한 염류 제거를 적극적으로 유도해야 할 것이다.

References

- Abreu, C.H. Jr., T. Muraoka, and A.F. Lavorante. 2003. Relationship between acidity and chemical properties of Brazilians soils. *Sci. Agric.* 60:337-343.
- Behera, S.K. and A.K. Shukla. 2014. Total and extractable manganese and iron in some cultivated acid soils of India – status, distribution and relationship with some soil properties. *Pedosphere*. 24:196-208.
- Cho, H.J., D. Son, S.L. Choi, Y.H. Lee, J.Y. Lee, and J.Y. Heo. 2018. Changes in chemical properties of greenhouse soils collected from Gyeongnam province between 2000 and 2016. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 51(3):265-273.
- Fageria, N.K. and V.C. Baligar. 2008. Ameliorating soil acidity of tropical oxisols by liming for sustainable crop production. *Adv. Agron.* 99:345-399.
- 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(3):272-279.
- KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2018. <http://kosis.kr/index/index.do>.
- KREI (Korea Rural Economic Institute). 2019. Agricultural outlook. pp.278-286.
- 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. Agr. 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 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.
- Zhang, Y., S. Zhang, R. Wang, J. Cai, Y. Zhang, H. Li, S. Huang, and Y. Jiang. 2016. Impacts of fertilization practices on pH and the pH buffering capacity of calcareous soil. *Soil Sci. Plant Nutr.* 62:432-439.