

## Effects of DTPA application on Growth of Red Pepper (*Capsicum annuum* L.) and Chemical Properties of Nutrient Accumulated Soil in Plastic film House

Myung Sook Kim\*, Yoo Hak Kim, Chang Hoon Lee, Seong Jin Park, Byong Gu Ko, Sun Gang Yun, and Byung Keun Hyun

Soil & Fertilizer Management Division, National Academy of Agricultural Science, Wanju 565-851, Rep. of Korea

(Received: August 6 2015, Revised: August 24 2015, Accepted: August 26 2015)

This study was conducted to evaluate effects of diethylene triamine penta acetic acid (DTPA) treatment on growth of red pepper and nutrient availability to salt accumulated soil in the plastic film house. The treatments were no application (Control), chemical fertilizers (NPK), DTPA (0.06, 0.13, and 0.19 mM) and the half of chemical fertilizers (NPK) with DTPA 0.06 mM. Fruit yield of red pepper showed no significant difference between the treatments (control, NPK, DTPA 0.06 mM, 0.13 mM, except for DTPA 0.19 mM. Red peppers were killed by DTPA 0.19 mM treatment because the high concentration of DTPA was toxic to crop. However, dry mass (stem and leave) and nutrient uptake of red pepper in DTPA 0.06 mM treatment increased significantly compared with those of control. In particular, nutrient uptake of red pepper in DTPA 0.06 mM treatment increased in the order of Fe, Mn, and Zn > Ca and Mg > K, as the magnitude of the stability constants of DTPA. Thus the application of DTPA 0.06 mM was the most effective for the alleviation of nutrient accumulation in the plastic film house soils.

**Key words:** DTPA, Red pepper, Chemical properties, Growth, Field scale

**Inorganic element uptake of red pepper by soil application of DTPA in salt accumulated soil of the plastic film house located Cheonan.**

Treatment	T-N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----								
Control	36.0b	10.8a	54.0ab	27.0b	12.6b	0.126bc	0.216bc	0.009b	0.108a
NPK	37.8b	10.8a	61.2ab	32.4b	14.4b	0.198ab	0.630a	0.022a	0.144a
DTPA 0.06 mM	155.8a	14.4a	79.2a	45.0a	21.6a	0.306a	0.648a	0.032a	0.216a
DTPA 0.13 mM	34.2b	9.0a	46.8b	32.4b	14.4b	0.144abc	0.432ab	0.022a	0.144a
DTPA 0.06 mM+1/2 NPK	43.2ab	10.8a	63.0ab	34.2b	16.2b	0.234ab	0.594a	0.032a	0.180a

<sup>†</sup>Different letters in column represent significant differences ( $P < 0.05$ ) between treatments by Duncan's multiple range test.

\*Corresponding author : Phone: +82632382454, Fax: +82632383822, E-mail: msk74@korea.kr

<sup>§</sup>Acknowledgement : This study was conducted by support of NAAS research and development project (project number: PJ009348).

## Introduction

시설재배 농경지에서 가축분퇴비와 무기질비료를 과잉 투입함에 따라 양분이 과잉으로 집적되고 있는 실정이다 (Kim et al., 2013). 최근에 시설재배지 양분함량을 살펴보면, 전기전도도 (EC)는 증가하는 추세에 있고, 유효인산 (Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)과 치환성 양이온 (K, Ca, Mg)의 함량도 적정범위 상한치보다 훨씬 높은 수준에 있다 (RDA, 2013). 이러한 양분을 제거하기 위해 담수제염, 객토, 심토반전, 흡비작물 또는 녹비작물의 윤작 등을 사용하였지만, 시설규모의 대형화 및 연동화와 경영비의 부담 등으로 인해 사용상에 한계가 있었다 (RDA, 2008).

시설재배지에 투입된 비료는 토양에 고정된 형태, 비료 성분끼리 결합된 염 형태로 존재하며, 작물은 특정 양분만을 과잉으로 흡수하거나, 삼투압이 높아져 수분과 양분의 불균형적인 흡수로 생육장애 증상이 발생한다 (RDA, 2008). 그 예로 질소 (N)의 과잉 흡수로 칼륨 (K)과 인 (P), 칼슘 (Ca), 마그네슘 (Mg), 그리고 미량원소 (Fe, Cu, Mn, Zn)를 균형적으로 흡수하지 못해 생육장애가 발생한다. 이러한 문제를 해결하고자 양분이 집적된 토양의 성분을 킬레이트화하여 작물의 균형적인 양분 흡수를 촉진하는 방안 모색이 필요하다.

킬레이트제는 금속 이온과 2자리 이상으로 배위결합된 고리모양의 리간드로서 (Tuntiwit, 1982), 토양 무기성분 중 양이온 (Ca, K, Mg, Fe, Cu, Mn, Zn)과 배위결합이 용이하여 (Lindsay, 1979), 이들 성분을 작물이 흡수할 수 있는 형태로 전환시킨다 (Abdulla and Smith, 1963; Obrador et al., 2003; Weinstein et al., 1954; Wallace, 1971; Wallace et al., 1974). 킬레이트 화합물은 물질의 종류와 농도, 용액 중 pH, 양이온 등에 따라 배위결합정도가 다양하여 (Tnutiwit, 2008) 작물의 생육 반응이 매우 달라지며, 과잉 사용은 식물 독성과 미량원소 결핍을 야기하고, 식물의 수량 감소를 가져온다 (Abdulla and Smith, 1963; Brown et al., 1960; Wallace, 1971; Wallace et al., 1976).

따라서 본 연구는 농가포장의 염류 집적 토양에 DTPA를 관주하면서 고추를 재배할 시 고추의 생육과 무기성분 흡수량 그리고 토양화학성에 미치는 킬레이트제의 영향을 평가하여 적정 사용량을 구명하고자 수행하였다.

## Materials and Methods

**작물재배 내력** 2012년 충남 천안시 동남구 동면 장송리에 소재한 농가 포장에서 2012년 6월 14에 정식하여 11월 2일까지 137일 동안 고추를 재배하였다. 시험 전 공시토양의 EC는 고추재배를 위한 시설토양 적정 기준 (NIAST, 2006)의 상한치인 2.0 dS m<sup>-1</sup>보다 약간 높은 2.1 dS m<sup>-1</sup>이었으며, Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>은 2.1배, Ex. K는 1.5배 높았으며, Ex. Ca과 Ex. Mg, NO<sub>3</sub>-N는 적정범위에 있었다 (Table 1). 처리구의 면적은 28 m<sup>2</sup>로 무처리 (Control), 표준비료 사용량 (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O=190-64-101 kg ha<sup>-1</sup>), DTPA (0.06 mM, 0.13 mM, 0.19 mM), DTPA 0.06 mM + 1/2 NPK의 6처리로, 난괴법 4반복으로 배치하였다. 비료는 물에 잘 용해되는 요소, 질산칼륨, 인산칼륨을 사용하였고, DTPA 처리농도는 Kim et al. (2013)이 제시한 농도에 준하여 처리하였으며, 킬레이트제 및 화학비료는 1회/2주의 빈도로 물 (44.6 ton ha<sup>-1</sup>)에 녹여 관주하였다.

**토양 및 식물체 분석** 토양시료는 DTPA 처리전 (6월 14일)과 처리후인 수확기 (10월 30일)에 20 cm 깊이로 채취하여 풍건하여 분석시료로 사용하였다. pH와 EC는 토양과 증류수의 비율을 1:5로 추출하여 pH와 EC meter로 측정하였고, 토양유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법으로 720 nm에서 비색계 (U-3000, Hitachi)로 측정하였다. 치환성 양이온은 1 M NH<sub>4</sub>OAc (pH 7.0) 완충용액으로 추출하여 유도결합 플라즈마 발광광도계 (ICP-OES, GBC)로 분석하였다. 고추의 수량 조사는 재배기간 동안 고추를 구당 20 개체를 조사하였다. DTPA 0.19 mM은 DTPA 2회 정도 처리한 후부터 생육장애가 발생하여 고추 수확을 불가능하여 수량조사를 실시하지 못하였다. 식물체의 건조중은 수확기에 처리구당 3주씩 채취하여 건조기에 건조한 후 무게를 측정하였고, 식물체의 무기성분 함량은 건조 후 분쇄한 시료를 0.5 g 칭량하고 conc. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 10 mL와 50% HClO<sub>4</sub> 10 mL를 가하여 분해한 후 여과하여 총질소 (T-N)은 킬달증류 방법으로 분석하였고, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, Zn 등은 ICP-OES로 측정된 후 농도를 계산하였다 (NIAST, 2000).

**통계분석** 모든 데이터는 SAS 프로그램 (v. 9.2)으로 통

**Table 1. Chemical properties of soil used for cultivating red pepper at the plastic film house in 2012.**

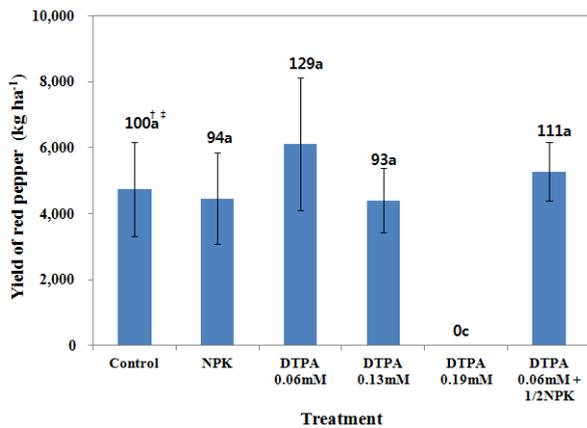
Soil	pH	EC	OM	Av. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ex. cation			NO <sub>3</sub> -N	NH <sub>4</sub> -N
					K	Ca	Mg		
	1:5	dS m <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	-----	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	-----	-----	mg kg <sup>-1</sup>
Soil for red pepper	6.4	2.2	19	1,037	1.15	5.3	2.0	176	22
Optimal range	6.0~6.5	≤2.00	25~35	450~550	0.70~0.80	5.0~6.0	1.5~2.0	70~200	-

계분석을 하였다. 킬레이트제 사용효과를 검정하고자 ANOVA 분석을 실시하였고, DTPA 농도 수준별 고추의 수량과 무기 성분 흡수량 비교는 Duncan의 다중범위 검정을 하였다. 또한 토양 화학성 비교는 t-test 검정을 통해 분석하였다.

## Results and Discussion

**고추 생육** 과실무게는 처리구간에 통계적으로 유의한 차이는 인정되지 않았으나, DTPA 0.06 mM과 DTPA 0.06 mM + 1/2 NPK 처리구의 생체수량이 무처리구보다 각각 29%, 11% 정도 증가하는 경향이였다 (Fig. 1). 이것은 토양에 킬레이트제를 적정한 농도로 처리하면 작물의 수량이 20~30% 증가한다는 Tuntiwit (1982)의 결과와 대체로 일치하는 경향이였다.

DTPA 0.19 mM 처리구의 고추는 고사하여 수량 생산이 불가능 하였다. Kim et al. (2013)의 연구에서 오이는 0.19



**Fig. 1.** Fresh weight of red pepper cultivated in soils as affected by the DTPA concentration at the plastic film house located in Cheonan. NPK represents standard fertilizer application level of nitrogen(N), phosphorus (P), and potassium (K). Vertical bars represent standard error (n=4). <sup>†</sup>Relative index mean the ratio of the yield of other treatments to the control. <sup>‡</sup>Different letters represent significant differences ( $P < 0.05$ ) between treatments by Duncan's multiple range test.

mM 처리에서도 정상적으로 생육하였다고 발표한 것과 대조적인 작물 반응을 보여주었다. Abdulla and Smith (1963)의 연구에서는 양배추보다 밀이 DTPA에 더욱 독성 반응을 나타낸다고 하였다. Wallace et al. (1974)의 연구에 따르면 고농도 (0.19 mM 이상)의 DTPA가 작물에 독성을 나타내는 이유는 식물의 뿌리와 킬레이트제가 토양의 양이온을 두고 경쟁하여 식물의 양이온 흡수를 억제하기 때문이라 하였다.

DTPA 처리에 따른 고추의 줄기와 잎의 건조중은 Table 2와 같다. DTPA 0.06 mM 처리구의 줄기와 잎은 무처리구에 비하여 유의성 있게 증가하였으며, 그 정도는 각각 65, 81% 정도 많게 나타났다 (Table 2). DTPA 농도가 높아질수록 줄기와 잎의 건조중은 감소하는 경향을 나타냈고, DTPA 0.06 mM + 1/2 NPK처리구와 NPK 표준시비구의 줄기와 잎의 건조중은 처리간 차이가 인정되지 않았다.

DTPA 0.06 mM 처리구의 고추 지상부의 T-N, Ca, Mg 및 미량원소 (Fe, Mn, Zn) 흡수량은 무처리구에 비하여 유의성 있게 증가하였다 (Table 3). 앞서 설명한 고추 줄기 및 잎의 건조중 (Table 2) 차이가 고추의 무기성분 흡수량에도 반영되었다. DTPA와 킬레이트 결합한 양이온은 자유롭게 작물 뿌리 근처로 이동되어 (Gonzalez and Alvarez, 2013; Hodgson, 1968; O'connor et al., 1971), 작물의 양분 흡수량

**Table 2.** Aboveground dry weight of red pepper cultivated in soils as affected by the DTPA concentration at the plastic film house located in Cheonan.

Treatments	Stem	Leaf
	kg ha <sup>-1</sup>	
Control	360b <sup>‡</sup>	378b
NPK <sup>†</sup>	504ab	558ab
DTPA 0.06 mM	594a	684a
DTPA 0.13 mM	414ab	540ab
DTPA 0.06 mM + 1/2 NPK	522ab	540ab

<sup>†</sup>NPK represents standard fertilizer application of nitrogen(N), phosphorus (P), and potassium (K).

<sup>‡</sup>Different letters within column represent significant differences ( $P < 0.05$ ) between treatments by Duncan's multiple range test.

**Table 3.** Inorganic element uptake of red pepper by soil application of DTPA in salt accumulated soil of the plastic film house located Cheonan.

Treatment	T-N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
	kg ha <sup>-1</sup>								
Control	36.0b	10.8a	54.0ab	27.0b	12.6b	0.126bc	0.216bc	0.009b	0.108a
NPK	37.8b	10.8a	61.2ab	32.4b	14.4b	0.198ab	0.630a	0.022a	0.144a
DTPA 0.06 mM	155.8a	14.4a	79.2a	45.0a	21.6a	0.306a	0.648a	0.032a	0.216a
DTPA 0.13 mM	34.2b	9.0a	46.8b	32.4b	14.4b	0.144abc	0.432ab	0.022a	0.144a
DTPA 0.06 mM+1/2 NPK	43.2ab	10.8a	63.0ab	34.2b	16.2b	0.234ab	0.594a	0.032a	0.180a

<sup>†</sup>Different letters in column represent significant differences ( $P < 0.05$ ) between treatments by Duncan's multiple range test.

은 증가될 수 있었다 (Ayed, 1970; Brown et al., 1960; Chaney et al., 1972).

DTPA 0.06 mM 처리구에서 고추의 무기성분 흡수량은 미량원소 (100~260%) > T-N, Ca, Mg (59~66%) > P, K (29~47%)의 순서로 증가되었다. 다시 말하면, 3가 양이온인 미량원소의 공급효과가 가장 컸고, 2가 양이온인 Ca과 Mg, 1가 양이온인 K의 순서로 나타났다. 이것은 토양 중 양이온에 대한 DTPA의 안정화 상수 (Stability constant)의 크기 (Lindsay, W.L. 1979)와 일치하는 것으로, DTPA의 안정화 상수가 클수록 고추의 무기성분 흡수량도 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 고추는 킬레이트 결합을 하지 않는 질소도 잘 흡수하였는데, 적정농도 (0.06 mM)의 DTPA 처리는 양이온 (K, Ca, Mg)과 인 (P)의 흡수 향상으로 질소의 흡수도 동반적으로 증가하였다고 판단된다. 그리고 인 (P)의 흡수량 증가는  $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$ 에 고정된 인 (P)를 DTPA에 의해 해리되어 토양용액 중에 방출되었기 때문이라고 볼 수 있다 (Wang et al., 2008).

양분집적 토양 ( $EC\ 2\ dS\ m^{-1}$ )에서 DTPA 0.06 mM과 비료 (NPK)의 병행 사용은 DTPA 0.06 mM 단독 사용에 비하여 고추의 무기성분 흡수량이 크게 감소하였는데, NPK 혼용은 토양의 양분과잉을 불러일으켜 작물 흡수를 저해하는 것으로 생각된다 (Kim et al., 2013).

따라서, 양분집적 시설토양에서 고추를 재배할 경우, 적정농도의 DTPA 처리만으로도 작물의 안정적 생산이 가능하고, 토양의 집적염류를 경감하고, 농자재의 절약과 생산비 절감을 유도할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나, DTPA의 단독처리에 따른 무기성분 흡수, 고추 생육 및 수량 증대 효과의 지속성에 관한 정보를 얻기 위해서는 장기적인 연구가 요구된다.

**토양 화학성** 토양 특성은 DTPA 처리 전 (6월 14일)과 처리 후 (10월 30일)인 고추 수확기로 나누어서 토양의 유효성분에 대해 비교하였다. 모든 처리구에서 처리전보다 수확기에 토양 pH는 감소하는 경향이었고, EC와  $NO_3-N$  함량은 증가하는 경향이였다 (Fig. 2). 토양 pH 감소와 EC 증가는 DTPA 영향보다는  $NO_3-N$  증가 ( $32\sim 227\ mg\ kg^{-1}$ )가 원인으로 생각되며, 여름철 미생물의 급속한 분해 작용으로 유기물 중 유기태 질소가 무기태 ( $NO_3-N$ )로 많이 전환되었기 때문이라 생각된다. DTPA 0.06 mM 처리구에서 DTPA 처리 전·후의  $NO_3-N$ 의 증가폭이 가장 적었는데, 앞에서 언급하였듯이 이 처리구에서 작물의 질소 흡수량이 가장 많이 증가하였기 때문이라고 생각된다. 그리고 DTPA와 킬레이트 결합하는 성분인 Ex, K, Ex, Ca, Ex, Mg와  $Av, P_2O_5$ 는 처리 전·후에 큰 차이가 없었다. Kim et al. (2012)은 포트조건에서 DTPA 처리한 후 배추재배 실험한 결과, 무처리구와 DTPA 처리구의 토양 전기전도도가 통계적으로 유의한 차

이가 있었다고 보고하였는데, 본 실험에서의 처리간 통계적으로 유의한 차이는 없는 것으로 나타났다. 이것은 포트 조건은 외부로부터 양분이동이 차단되었고, 포장 조건은 심토에서 표토로의 양분이동, 지온변화에 따른 미생물의 분해작용에 의한 무기화 양분 공급 등 생물적, 비생물적 복합시스템이 관여하기 때문이라고 생각되며, 단기간의 재배보다 장기간 (2~3년)의 연구를 통한 DTPA 처리효과 구명이 필요할 것으로 판단된다.

## Conclusion

본 연구에서는 양분 집적 시설재배지에서 고추를 대상으로 DTPA 토양 관주 처리에 따른 생육·수량 특성과 토양 화학성 변화를 검토하였다. 고추 열매 수량은 DTPA 처리간 (0.06~0.13 mM) 통계적으로 유의한 차이는 없었다. 그러나, 고추 생육 (줄기/잎)과 무기성분 흡수량은 DTPA 0.06 mM 처리구에서 생육량 (줄기/잎)과 무기성분 흡수량이 가장 증대하였고, 특히 DTPA 안정화상수가 높은 미량원소 (Fe, Mn, Zn, Cu), Ca, Mg, K의 순서로 고추의 무기성분 흡수량은 증가하였다. 따라서, 무기성분의 흡수량 증대로 인해 토양의 염류집적 경감 효과는 있었으며, 이를 위한 적절한 DTPA의 농도는 0.06 mM로 2주에 1회씩 관주하는 것이고 타당한 것으로 평가되었다. 그러나, 고농도 (0.19 mM 이상)로 토양에 처리할 경우 작물 독성이 발생하므로 관주시 주의할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## References

- Abdulla, I. and M.S. Smith. 1963. Influence of chelating agents on the concentration of some nutrients for plants growing in soil under acid and under alkaline conditions. *J. Sci. Fd Agric.* 14:98-109.
- Ayed, I.A. 1970. A study of the mobilization for iron in tomato roots by chelate treatments. *Plant and Soil* 32:18-26.
- Brown, J.C., L.O. Tiffin, and R.S. Holmes. 1960. Competition between chelating agents and roots as factor affecting absorption of iron and other ions by plant species. *Plant Physiol.* 35(6):878-886.
- Chaignon, V., F. Bedin, and P. Hinsinger. 2002. Copper bioavailability and rhizosphere pH changes as affected by nitrogen supply for tomato and oilseed rape cropped on an acidic and calcareous soil. *Plant Soil* 243:219-228.
- Chaney, R.L., J.C. Brown and L.O. Tiffin. 1972. Obligatory reduction of ferric chelates in iron uptake by soybeans. *Plant Physiol.* 50:208-213.
- Gonzalez, D. and J. M. Alvarez. 2013. Effects of copper chelates on lettuce response, leaching and soil status. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77:546-557.

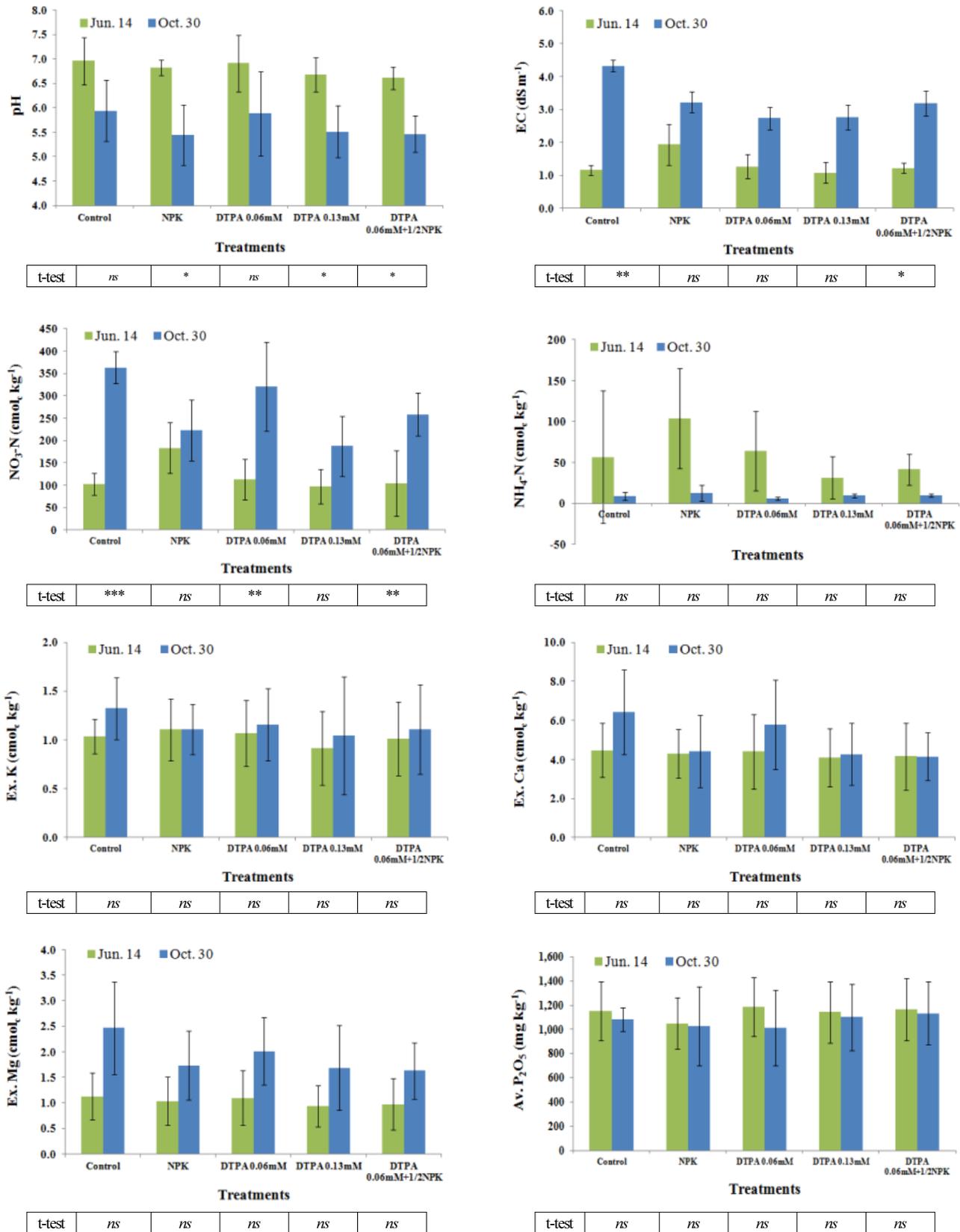


Fig. 2. Changes in soil chemical properties (pH, EC, Ex. K, Ex. Ca, NO<sub>3</sub>-N, and NH<sub>4</sub>-N) at harvest stage of red pepper crops grown with different levels of DTPA application at the plastic film house located in Cheonan. Vertical bars represent standard error (n=4). Jun. 14 and Oct. 30 mean soils before treatment and at harvest stage after treatment, respectively. \*, \*\*, and \*\*\* represent significance at p < 0.05, 0.01, and 0.001, respectively. and ns means no significance.

- Hodgson, J.F. 1968. Theoretical approach for the contribution of chelates to the movement of iron to roots. *Int. Soil Sci. Congr. Trans 9<sup>th</sup> Australia(Adelaide). II*:229-241.
- Kim, M.S., Y.H. Kim, M.Y. Roh, S.S. Gang, H.B. Yoon, and H.Y. Lee. 2012. Effect of chelating agents on growth of chinese cabbage and availability of nutrients in plastic film houses. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(6):949-954.
- Kim, M.S., Y.H. Kim, S.S. Kang, M.S. Gong, B.K. Hyun, and C. H. Lee. 2013. Effects of chelate agents on cucumber growth and soil chemical properties in nutrient-accumulated plastic film house soils. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(6): 949-954.
- Lindsay, W.L. 1979. *Chemical equilibria in soils*. John Wiley & Sons, New York, p. 238-266.
- National Institute of Agricultural Science and Technology (NIAST). 2000. *Methods of soil and plant analysis*. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- NIAST. 2006. *Fertilizer Recommendation for crops (revision)*. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Obrador, A., J. Novillo, and J.M. Alvarez. 2003. Mobility and availability to plants of two zinc sources applied to a calcareous soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:564-572.
- O'connorm G.A., W.L. Lindsay, and S.R. Olson. 1971. Diffusion of iron and iron chelates in soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 35:407-410.
- RDA. 2008. *Soil management manual for reduction of continuous cropping injury at the plastic film house*. RDA., Suwon, Korea.
- RDA. 2010. *Agricultural income information*. RDA., Suwon, Korea.
- RDA. 2013. *Soil management technology for agricultural land*. RDA., Suwon, Korea.
- Tuntiwiwut, S.N. 1982. *Effects of chelating agents on plant growth*. Thesis(Ph. D.), Washington State University.
- Wallace, A. 1963. Role of chelating agents on the availability of nutrients to plants. *Soil Science Society Proceedings.* 27:176-179.
- Wallace, A. 1971. General conclusions concerning chelating agents in plant nutrition in 1971, p. 267-269. In A. Wallace (ed.), *Regulation of the micronutrient status of plants by chelating agents and other factors*. Edwards Bros., Inc., Ann Arbor, Michigan.
- Wallace, A., R.T. Muller, J.W. Cha, and G.V. Alexander. 1974. Soil pH, excess lime, and chelating agent on micro nutrients in soybeans and bush beans. *Agron. J.* 66:698-700.
- Wallace, A., S.M. Soufi, G.V. Alexander, and J.W. Cha. 1976. Comparison of the effects of high levels of DTPA and EDDHA on micro-element uptake in bush beans. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 7:111-116.
- Wang, Y., Y. He, H. Zhang, J. Schroder, C. Li, and D. Zhou. 2008. Phosphate mobilization by citric, tartaric, and oxalic acids in a clay loam ultisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:1263-1268.
- Weinstein, L.H., W.R. Robbins, and H.F. Perkins. 1954. Chelating agents and plant nutrition. *Sci.* 129:41-43.