

粪肥施用对设施番茄产量和土壤氮磷累积的影响

李超¹, 严正娟², 张经纬¹, 陈清², 李俊良^{1*}

(1. 青岛农业大学资源与环境学院, 山东 青岛 266109; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 针对国际上不同粪肥推荐施用策略, 利用两年的设施番茄田间试验, 以传统管理模式大棚为对照, 研究了基于粪肥中磷含量(P-based 处理)、基于粪肥中氮含量(N-based 处理)的施用策略以及在 P-based 处理基础上添加秸秆(P-based+S 处理)的粪肥施用模式对设施番茄产量以及土壤 N、P 累积的影响。结果表明: 在三种粪肥推荐施用策略下, 番茄产量没有显著性差异, 但均高于传统管理模式。两年试验期间, P-based 处理、P-based+S 处理和 N-based 处理的表观氮素盈余分别为 1123、1048、1039 kg N·hm⁻², 表观磷素盈余分别为 219、249、226 kg P·hm⁻²; P-based 处理、P-based+S 处理和 N-based 处理 0~180 cm 土壤剖面无机氮分别增加了 497、480、440 kg N·hm⁻², 而表层土壤 Olsen-P 含量分别增加了 28.4、34.7、31 mg P·kg⁻¹。从菜田土壤肥力的初期结果看, P-based 处理与 P-based+S 处理对土壤 N、P 累积的速率明显快于 N-based 处理。

关键词: 粪肥推荐; 产量; 设施; 土壤; 氮磷累积; 番茄

中图分类号: X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)08-1560-09 doi:10.11654/jaes.2014.08.014

Effects of Manure Applications on Tomato Yields and Soil Nitrogen and Phosphorus Accumulation in a Greenhouse Production System

LI Chao¹, YAN Zheng-juan², ZHANG Jing-wei¹, CHEN Qing², LI Jun-liang^{1*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Based on international strategies of manure applications, a two-year experiment was conducted in a greenhouse production system to investigate the effects of different strategies of manure application on tomato yield and soil nitrogen (N) and phosphorus (P) accumulation. The treatments included control treatment (SN) (the traditional farmers' manure application); P-based manure application (P); P-based manure plus wheat straw application (P+S); N-based manure application (N). Compared to the control (SN) treatment, different strategies of manure application increased tomato fruit yields, with no significant differences among the different strategies. The apparent N surplus was 1123, 1048, 1039 kg N·hm⁻², and the apparent P surplus 219, 249, 226 kg P·hm⁻² for P, P+S and N treatments, respectively. In 0~180 cm soil depth, soil inorganic N increased by 497, 480, 440 kg N·hm⁻², and soil Olsen-P content increased by 28.4, 34.7, 31.0 mg P·kg⁻¹ in P, P+S and N treatments, respectively. The preliminary results show that the accumulations of N and P in soils were greater under P-based and P-based + S treatments than under N-based treatment during the two-year experiment period.

Keywords: recommended manure application; yield; greenhouse; soil; nitrogen and phosphorus accumulation; tomato

我国养殖业和蔬菜产业在过去的二十年里得到了迅猛的发展, 养殖业产生的畜禽粪尿含有大量的氮磷钾素资源, 其中很大比例以固体粪肥形式直接施用

进入设施菜田^[1-2]。粪肥等有机肥对菜田培肥地力、养分供应及改善土壤结构等作用不容忽视^[3-4], 然而受经济利益驱动, 菜农盲目施用粪肥已经远远超过了农田承载能力。甘肃白银地区有机肥投入高达 150 t·hm⁻²^[5], 张经纬等^[6]指出寿光设施蔬菜生产中磷平均投入量为 949 kg P·hm⁻², 其中有机肥的磷投入量平均为 382 kg P·hm⁻², 占到磷投入总量的 40%。过量的有机肥投入不仅影响作物生长, 导致蔬菜产量和品质降低, 而且造成资源浪费, 导致菜田土壤氮磷过量, 带来

收稿日期: 2014-01-11

基金项目: “十二五”农村领域国家科技计划课题(2012BAD15B01-4) “极高氮磷投入种植体系的面源污染控制技术”; 公益性行业(农业)科研专项(201103003)

作者简介: 李超, 男, 在读研究生, 主要从事蔬菜养分管理研究。E-mail: kaoyan041018@sina.com

* 通信作者: 李俊良 E-mail: jlli1962@163.com

硝酸盐污染及水体富营养化等一系列环境问题^[7-10]。

目前国际上对于粪肥施用量的确定主要有两种策略,分别为基于粪肥中氮和磷含量进行粪肥用量推荐,即所谓的 N-based 和 P-based 策略。欧美国家在早期的粪肥推荐中主要采用 N-based 策略,限定施用到农田中粪便的含氮量不超过 $170 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。根据我国有机肥投入的习惯和蔬菜的特点,目前建议设施蔬菜生产以每季通过有机肥带入的总氮数量不超过 $200 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为宜,露地蔬菜不超过 $100 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为宜^[11]。P-based 策略,即根据粪肥中磷含量确定粪肥施用量,已被证明在控制土壤磷素的累积方面起到了很好的效果。欧美很多研究表明长期有机肥投入是导致土壤磷素累积的重要原因^[12-14],而设施蔬菜生产体系中,相比蔬菜带走的磷素养分比例,粪肥投入可能会带来更多的磷素盈余。目前各国对土壤磷管理的观点基本一致,都采用“Built up and Maintenance”策略,即构建并维持一定的土壤有效磷水平以保持产量的稳定,但同时要防止过高的土壤磷累积以减少由土壤淋失等造成的环境危害^[15]。

很多研究已经证明 N-based 和 P-based 粪肥施用策略在保证作物生产和控制氮磷污染方面的作用,但大多集中在大田作物^[16]。本研究针对目前设施蔬菜粪肥和化肥过量施用导致土壤氮磷养分积累严重的问题,基于“氮素总量控制、磷素恒量监控”的原则,采用 N-based 和 P-based 的粪肥施用策略,研究不同粪肥管理策略对蔬菜生长、养分吸收、土壤氮磷养分积累的影响,为设施蔬菜粪肥定量化推荐及养分管理提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点及供试土壤

试验于 2010 年 8 月在山东寿光古城街道美微蔬菜生产专业合作社进行,该地区为典型的大陆季风气候,年平均气温和降雨量分别为 12.4°C 和 558 mm 。试验选用的日光温室种植面积为 $56 \text{ m} \times 11 \text{ m}$,为新建设施温室,前两年为荒地。大棚建设时将表层土用于建造后土墙,试验开始前 $0\sim 200 \text{ cm}$ 土壤基本化学性质见表 1。 $0\sim 30 \text{ cm}$ 土壤容重为 $1330 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,田间持水量为 26% (W/W),土壤机械组成为砂粒 1.2% 、粉粒 62.3% 、粘粒 36.5% 。

1.2 供试作物

试验自 2010 年秋冬季开始持续到 2012 年冬春季。供试作物为番茄,品种为“美粉宝石”,栽培方式为

表 1 试验地土壤基础化学性状

Table 1 Basic chemical characteristics of soil for experimental greenhouse

土壤层次/ cm	无机氮/ $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$	速效磷/ $\text{mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg K} \cdot \text{kg}^{-1}$	有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH
0~30	63	4.4	101.9	15.2	5.81
30~60	54	4.5	101.9	8.14	5.98
60~90	47	5.9	65.4	4.83	6.09
90~120	36	8.8	55.7	3.47	6.08
120~150	25	5.4	43.5	2.36	6.15
150~180	34	6.3	43.5	2.49	6.21
180~200	23	6.7	43.5	1.53	6.23

注:采样时间为 2010 年 8 月 23 日,采集 5 点样品混合后处理分析。

传统的畦栽,畦宽为 0.8 m ,畦间距为 0.5 m ,株距为 0.35 m ,种植密度为每平方米 3.5 株,整个生育期一般保留 $4\sim 5$ 穗果,每穗留单果 $3\sim 4$ 个。秋冬茬定植时间在 8 月份,而拉秧时间一般选择在来年 2 月份,冬春茬定植时间一般在 2 月底 3 月初,拉秧时间在 6 月底 7 月初,7 月中下旬农民会进行闷棚处理。

1.3 试验设计

(1)P-based 处理:根据磷素推荐量确定粪肥施用量。磷素的施用量根据目标产量与土壤肥力水平确定,目标是控制表层土壤 Olsen-P 在 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下。本试验条件下番茄目标产量为 $85 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,作物磷素带走量为 $37 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。由于土壤速效磷水平很低,按照带走量的 2 倍补充^[17]。

(2)P-based+S 处理:在 P-based 处理的基础上添加小麦秸秆,用量为 $8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

(3)N-based 处理:根据粪肥中氮素含量确定粪肥施用量。基于目标产量和氮素供应目标值确定设施菜地氮素施用量和每季粪肥带入的总氮数量不超过 $200 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的限量,本试验确定粪肥的施用量以提供 $200 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为准,粪肥中磷素不足 $74 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$ 部分则由化学肥料普钙补充。

所有的处理追肥按照设施番茄施肥推荐策略进行。采用灌根方式将 $13 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$ 过磷酸钙肥料分别在番茄移栽后 $20, 40 \text{ d}$ 和第四穗果(约移栽后 80 d)时施入;氮肥施用采用目标供应值,灌溉施肥前测定土壤 $N_{\min}$ 含量,通过下列公式计算氮素施用量^[18];钾素的施用总量根据目标产量与土壤肥力水平确定,本实验条件下按照作物带走量的 1.5 倍补充^[17],化肥施用量为推荐总量减去粪肥带入钾量,其中 30% 作为基施,其余为追肥施用。

氮肥追施量=氮素供应目标值-土壤 $N_{\min}$ 含量

采用随机区组设计,三次重复,小区面积为 55 m²,灌溉方式为滴灌。为了比较上述控制效果,以临近大棚常规管理(SN)作为对照。

试验选用的肥料品种:有机肥为鸡粪,秸秆为小麦秸秆,养分含量如表 2 所示;化学肥料分别为尿素(46% N)、普钙(12% P₂O₅)和硫酸钾(52% K₂O)。具体的肥料投入状况如表 3 所示。

1.4 田间管理

在移栽后 40 d 左右第一穗果开始膨大,在此后的一个月里农民一般会根据天气 7~10 d 进行一次追肥和喷施一次杀菌剂。针对番茄叶霉病、早晚疫病、病毒病以及菜青虫和白粉虱等,每隔 10 d 左右喷药一次。同时在番茄移栽定植后,要及时去除多余枝杈,减少下

位老叶的养分消耗,增加地表的通风透光性,利于提升地温及降低地表空气湿度,减少病虫害的发生。

1.5 样品采集和测定

(1)土壤含水量及无机氮含量:每次灌溉施肥前按照 30 cm 土层间隔采集土样,每个小区采集 3 钻,混匀,装入封口袋内密封,将土样迅速带回室内,一部分迅速过 5 mm 筛,混匀后,称取 20 g 左右新鲜土样于铝盒中,在 105 ℃下烘干 12 h,测定土壤含水量;同时称取 12.00 g 新鲜土样于 200 mL 塑料瓶中,加入 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 溶液 100 mL,振荡 1 h 后过滤,采用硝酸盐试纸条-反射仪方法速测根层氮素,并计算根层土壤硝态氮含量;采用同样的方法速测灌溉水中硝酸氮的含量,结合灌溉量计算每次灌溉带入的氮素;根据上述公式计算推荐施氮量。其余滤液和灌溉水样置-18 ℃冰柜内冷冻贮存,后期用流动分析仪(型号 TRAACS2000)测定滤液中无机氮含量。另一部分土样风干后过 2 mm 筛用于测定土壤速效磷。番茄收获后采用相同的方法在各个小区采集 0~200 cm 土样进行相同的操作。

(2)土壤养分含量采用常规测定方法:全氮含量采用浓硫酸,混合加速剂消煮-半微量蒸馏定氮法进行测定,全磷含量采用 HClO₄-H₂SO₄ 消化-钼锑抗比色法测定,速效磷含量采用 0.5 mol·L⁻¹ 碳酸氢钠浸提-钼蓝比色法(Olsen 法),速效钾含量采用 1 mol·L⁻¹ 的乙酸铵浸提-火焰光度计测定,有机质采用重铬酸

表 2 试验使用的粪肥和秸秆的养分含量

Table 2 Nutrient contents of manure and straw used in experiment from autumn-winter, 2010 to winter-spring, 2012

时间	肥料	C/g·kg ⁻¹	N/g·kg ⁻¹	P/g·kg ⁻¹	K/g·kg ⁻¹	C/N	C/P
2010 年	鸡粪	294.2	26.7	6.94	17.18	11.0	42.4
秋冬季	小麦秸秆	478.8	7.6	0.70	15.6	63.0	685.4
2011 年	鸡粪	304.5	25.6	7.60	17.59	11.9	40.1
冬春季	小麦秸秆	478.8	7.6	0.70	15.6	63.0	685.4
2011 年	鸡粪	312.4	24.9	7.86	17.18	12.5	39.78
秋冬季	小麦秸秆	488.5	8.9	0.83	18.17	54.9	588.9
2012 年	鸡粪	304.6	25.2	8.43	17.26	12.1	36.2
冬春季	小麦秸秆	488.5	8.9	0.83	18.17	54.9	588.9

表 3 2010 年秋冬季至 2012 年冬春季不同处理养分投入量(kg·hm⁻²)

Table 3 Nutrient inputs in different treatments from autumn-winter, 2010 to winter-spring, 2012(kg·hm⁻²)

时段	肥料投入	P-based N-P-K	P-based+S N-P-K	N-based N-P-K	SN N-P-K
2010 年秋冬季	粪肥	330-74-179	330-74-179	200-45-108	789-247-312
	秸秆	—	63-5-125	—	—
	化肥	244-13-175	160-13-175	327-42-249	160-57-301
	合计	574-87-354	553-92-429	527-87-357	949-304-613
2011 年冬春季	粪肥	285-74-183	285-74-183	200-52-129	789-247-312
	秸秆	—	63-5-125	—	—
	化肥	167-13-171	84-13-171	204-35-203	224-44-268
	合计	452-87-354	432-92-429	404-87-332	1013-291-580
2011 年秋冬季	粪肥	235-74-162	235-74-162	200-63-138	—
	秸秆	—	63-6-96	—	—
	化肥	171-13-171	111-13-171	195-24-207	—
	合计	406-87-333	409-93-349	395-87-345	—
2012 年冬春季	粪肥	222-74-152	222-74-152	200-66-137	—
	秸秆	—	63-6-96	—	—
	化肥	195-13-182	110-13-182	200-21-191	—
	合计	417-87-334	395-93-341	400-87-328	—

钾外加热法测定。

(3) 植株样品处理及测定: 植株收获后将根茎叶分开杀青烘干, 干样粉碎后采用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 联合消煮, 全氮采用凯氏定氮法测定, 全磷采用钒钼黄比色法, 全钾采用火焰光度计测定。

(4) 产量: 在试验小区的中间位置选取两行为测产区, 收获时将各处理的果实分别称重, 统计产量。

1.6 数据分析

采用 DPS 6.85 进行方差分析及多重比较, 采用 Excel 2003 进行计算及绘图。

2 结果与分析

2.1 设施番茄产量

2010 年秋冬季至 2011 年冬春季, 传统处理肥料投入每季度的养分投入量约为 $1000 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $300 \text{ kg P}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $600 \text{ kg K}\cdot\text{hm}^{-2}$ (表 3), 明显高于三种粪肥推荐处理, 产量却有降低的趋势(图 1), 三种粪肥推荐

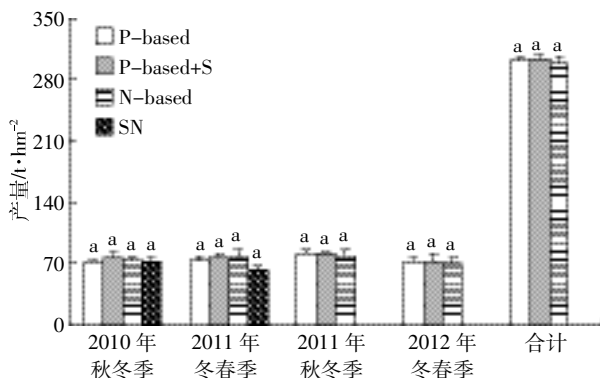


图 1 不同处理 2010 年秋冬茬至 2012 年冬春茬番茄产量

Figure 1 Tomato yields in different treatments from autumn-winter, 2010 to winter-spring, 2012

处理之间产量差异不显著。从整体趋势上来看, P-based+S 处理在整个试验过程中均保持较高产量, 主要是增加秸秆的投入能从调节 C/N 比, 改善土壤性质等方面使得番茄达到增产增收的效果。这与任涛^[19]研究得出的结论施用秸秆能对番茄起到一定的增产作用相似。

2.2 根层土壤氮、磷养分含量

2.2.1 根层无机氮

土壤无机氮含量是一定时期内有机肥矿化、作物吸收与损失等综合作用的结果。氮素优化管理通过施肥与动态监测相结合的方式将土壤氮素控制在一个合理的范围之内。根据何飞飞等^[18]在山东寿光得出的结论, 一般土壤无机氮含量达到 $250 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2} \text{ N}$ 即可满足番茄对于氮素的需求。由图 2 可知, 三种粪肥推荐处理与后期尿素配施基本可以满足番茄对于氮素的需求, 且 N-based 处理较其他两个处理根层无机氮偏低, 与氮素投入量低于 P-based 处理有关, 而 P-based+S 处理可能由于秸秆投入导致微生物活性增强, 进而导致有机氮矿化增强。传统处理由于施氮量较高(表 3), 在整个试验过程中均维持在一个较高水平, 过多的氮素投入并未达到更高的产量。鸡粪的矿化过程主要集中在施用鸡粪后前两个月, 本实验中 4 种处理在施用粪肥后 45~60 d 土壤无机氮含量达到一个峰值, 为有机肥矿化与化学氮肥投入共同作用的结果。后期虽然也有氮素的施入, 但随着有机肥释放氮素的速率越来越低以及氮素施用量的降低, 土壤无机氮的含量越来越低。

2.2.2 根层土壤速效磷

图 3 显示不同处理影响土壤 Olsen-P 的动态变

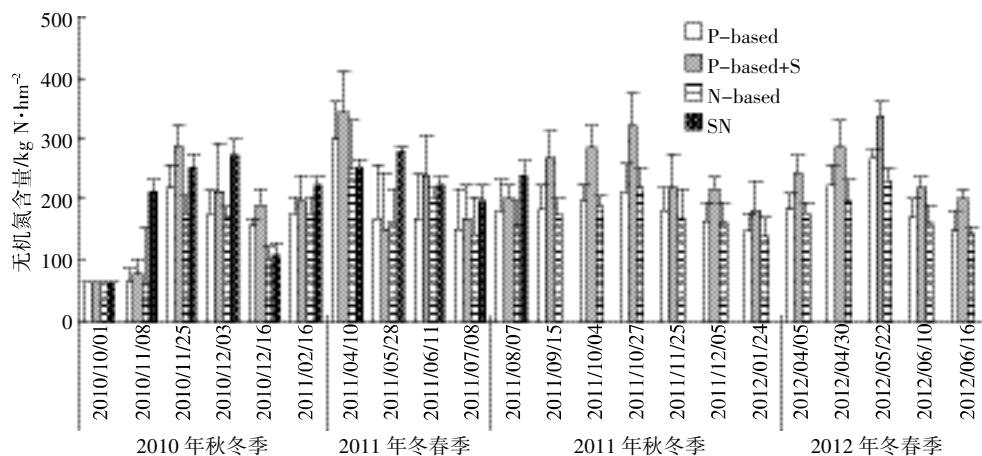


图 2 2010 年秋冬季至 2012 年冬春季 0~30 cm 土壤无机氮含量

Figure 2 Contents of N_{min} in 0~30 cm soil in different treatments from autumn-winter, 2010 to winter-spring, 2012

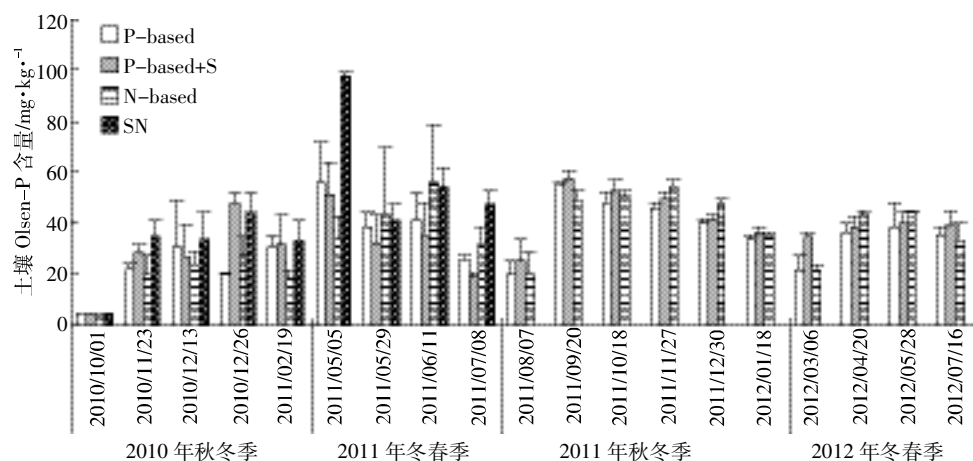


图3 2010年秋冬季至2012年冬春季0~30 cm土壤速效磷含量

Figure 3 Contents of Olsen-P in 0~30 cm soil in different treatments from autumn-winter, 2010 to winter-spring, 2012

化。从2010年秋冬季到2012年冬春季整个过程来看,三种粪肥处理Olsen-P含量均保持在 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下,而传统处理Olsen-P含量均较三种粪肥处理要高,且在部分时间段已经达到 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 这一临界值。在整个生长季中,所有处理表层土壤Olsen-P含量总体上随着作物的生长持续降低,2010年冬春季由于基础土样中Olsen-P含量较低,土壤Olsen-P含量经历了一个增加的过程。从整个生育期土壤速效磷增长速率来看,P-based+S处理土壤Olsen-P月平均

增长 $1.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别高出P-based处理、N-based处理 0.15 、 $0.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。2010年秋冬季N-based处理土壤Olsen-P较P-based处理低(除2010年12月26日),说明粪肥对土壤Olsen-P的前期累积起着重要作用。2011年秋冬季开始Olsen-P含量保持在一个相对稳定的状态。

2.3 剖面土壤N、P养分累积

2.3.1 剖面土壤无机氮含量

图4显示两年生育期内番茄收获后0~200 cm土

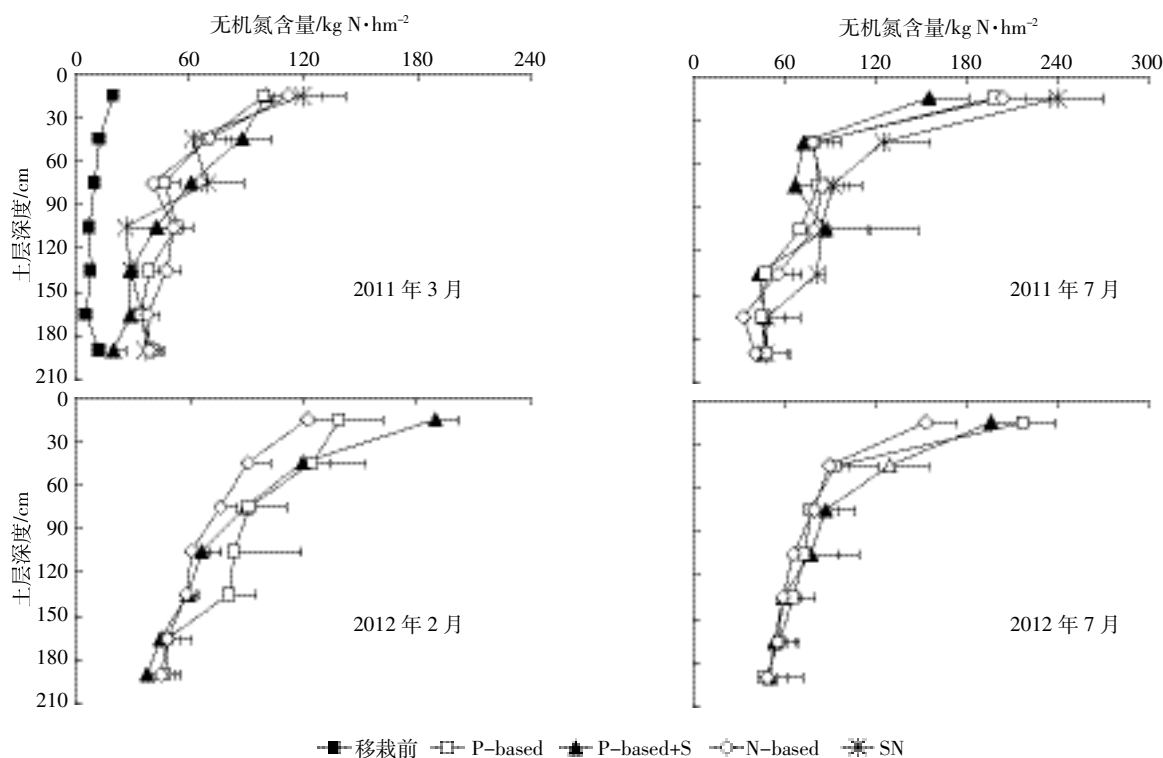


图4 2010年秋冬季至2012年冬春季收获后0~200 cm土壤剖面无机氮含量

Figure 4 Contents of N_{min} in 0~200 cm soil after tomato harvest from autumn-winter, 2010 to winter-spring, 2012

壤无机氮含量变化。可以看出,与种植前相比,三种处理 0~200 cm 土壤无机氮含量均有一定程度提高,且均以表层升高最大。2010 年秋冬季,0~90 cm 随着土层深度增加无机氮含量逐渐降低,且 P-based+S 处理较 P-based 与 N-based 处理无机氮含量都高;而 90~200 cm 土层无机氮含量变化趋势并不明显,P-based+S 处理较 P-based 与 N-based 处理无机氮含量都低。2011 年冬春季较 2010 年秋冬季无机氮含量又有一定程度的提高,说明氮素施用上还有一定的调控空间。2012 年两个季度的土壤无机氮含量与 2011 年冬春季相比差距不大,但 N-based 较 P-based 与 P-based+S 处理无机氮含量低一些。传统处理由于施用氮素较多且作物对于氮素的吸收利用有限,在表层积累了大量的无机氮,并且有进一步下移的趋势。

2.3.2 剖面土壤 Olsen-P 含量

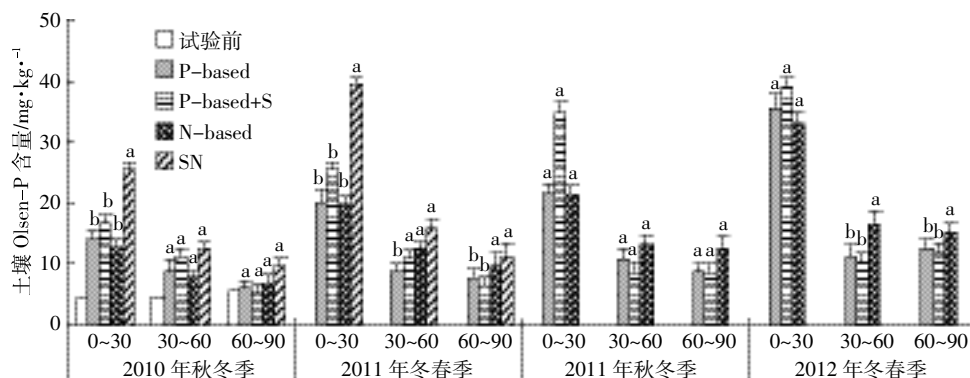
土壤磷素在土壤剖面的分布状况,间接反映了有机肥矿化后部分磷素的去向。由图 5 可知,随着种植年限的增加土壤 Olsen-P 含量(尤其是表层土壤)有所提高,在此期间有机肥主要是培肥土壤的作用,随着土壤剖面的加深 Olsen-P 含量不断降低。传统处理 Olsen-P 含量最高,尤其是表层土壤显著高于三种粪肥推荐处理,主要是因为磷素投入过多。2011 年冬春季各土层相比 2010 年秋冬季 Olsen-P 含量均有增加,0~30 cm 土壤以 P-based+S 处理 Olsen-P 含量最高,30~90 cm 土层 N-based 与 P-based 差异达到显著水平;2011 年秋冬季与 2012 年冬春季结论类似,P-based+S 处理较 P-based 与 N-based 处理表层土壤 Olsen-P 含量高,而 30~90 cm 土壤其含量最低,说明秸秆有固磷作用。

2.4 氮磷平衡

番茄属浅根系作物,根系主要分布在 30 cm 土层

内,因此土壤的氮素供应主要考虑 0~30 cm 土层,移出 30 cm 以下的氮素视为损失。由表 4 可以看出,各处理氮素投入量远远大于番茄的实际需氮量,而过高的氮肥投入并没有引起番茄植株氮素吸收量的增加,反而导致土壤无机氮含量增加,增大了土壤氮素的淋洗风险。调查显示寿光地区氮素每年的盈余量可达 $2167 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ (数据未发表),而本实验中农民传统处理的养分盈余状况也达到 $1534 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,为三种推荐处理氮素盈余量的 3~4 倍。2010 年秋冬季至 2011 年冬春季,P-based、P-based+S、N-based 处理植株吸收量分别占氮素投入量的 33.5%、34.8%、37.2%,而表观氮素损失占到氮素投入量的 50.4%、52.4%、46.4%,表明氮素还有很大的调控空间;与传统处理相比,三种粪肥推荐处理氮素的表观损失明显降低,且均有一定的氮素调控空间。2011 年秋冬季和 2012 年冬春季实际效果与 2011 年冬春季相似。

由于磷素易被土壤固定,同时粪肥的投入量要大于作物磷素的带走量,收获后土壤中磷含量与种植前相比有不同程度的提高,土壤中的磷素存在盈余和积累(表 4)。此实验表明农民传统处理的年养分盈余可达 $539 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$,均远远高于三种有机肥推荐处理。三种粪肥推荐处理以 P-based 在各个生长季内表观损失差距不大,而土壤 Olsen-P 含量也在稳定上升,截至 2012 年 6 月,仍低于 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,因此该阶段还是培肥土壤阶段;P-based+S 由于磷肥投入较 P-based 和 N-based 高,磷素累积量较其他两个处理要大;而 N-based 处理在整个生育期内磷素损失较 P-based 和 P-based+S 要高,主要是由于磷肥投入种类不同造成的。从番茄带走量占投入量的比例来看,2010 年秋冬季至 2011 年冬春季,P-based、P-based+S、N-based 处理植株带走量分别占投入量的 34.5%、31.7%和 35.4%,2011 年秋冬季和



同一生长季节同一土层相同字母表示不同处理在 $P=0.05$ 水平下差异不显著

图 5 2010 年秋冬季至 2012 年冬春季 0~90 cm 土壤剖面 Olsen-P 含量

Figure 5 Contents of Olsen-P in 0~90 cm soil from autumn-winter, 2010 to winter-spring, 2012

表4 2010年秋冬季至2012年冬春季设施番茄表观氮素($\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$)、磷素($\text{kg P}\cdot\text{hm}^{-2}$)平衡

Table 4 Apparent balances of N and P in greenhouse tomato cropping system from autumn–winter, 2010 to winter–spring, 2012

年份	处理	移栽前 0~30 cm 土壤 N _{min} 含量	投入						收获后 0~30 cm 土壤 N _{min} 含量	作物带走		表观平衡	
			有机肥		化肥		灌溉水带入			N	P	N	P
		N	N	P	N	P	N	P					
2010 年秋冬 季至 2011 年 冬春季	P-based	20	615	148	411	26	97	—	202	376	60	565	114
	P-based+S	20	737	160	244	26	97	—	158	375	59	565	127
	N-based	20	400	97	531	78	97	—	189	382	62	477	113
	SN	22	1578	494	407	100	110	—	240	343	55	1534	539
2011 年秋冬 季至 2012 年 冬春季	P-based	202	457	148	366	26	105	—	150	422	69	558	105
	P-based+S	158	599	162	221	26	105	—	200	400	66	483	122
	N-based	189	400	130	395	45	105	—	145	382	62	562	113

注:氮素表观平衡=移栽前 0~30 cm 土层 $N_{\min}$ 含量+有机肥氮(粪肥和秸秆)+化肥氮+灌溉水带入氮-作物带走-收获后 0~30 cm 土层 $N_{\min}$ 含量;
磷素表观平衡=有机肥磷(粪肥和秸秆)+化肥磷-作物带走。

2012 年冬春季基本保持在 35 % 左右。

3 讨论

3.1 不同粪肥推荐方式对于养分盈余的影响

新建日光温室一般土壤养分含量较低,难以满足作物对于养分的需求,同时土壤本身有机质等相对较低使得土壤地力状况需要一定程度的改善。由于受到高经济利益驱动的影响,传统处理的养分投入量一般较高,刘兆辉等^[20]在山东调查发现 1994—1997 年山东武城设施蔬菜年平均施肥量为 $2255 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $1474 \text{ kg P}\cdot\text{hm}^{-2}$,在这段时间内施肥量逐年增加。青州地区为 $2749 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $952 \text{ kg P}\cdot\text{hm}^{-2}$,而山东寿光则达到 $2488 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $1432 \text{ kg P}\cdot\text{hm}^{-2}$,氮、磷的表观利用率分别为 21.33% 和 2.82%,造成了氮、磷的大量盈余。山东寿光 2004 年的施肥量与 1997 年相比氮肥和磷肥的用量有所减少,有机养分占总养分的比例明显增加。Chen 等^[21]1996—2000 年在北京京郊的调查显示日光温室茄果类蔬菜单季生产氮素总投入量平均达到 $1000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上,远远超过了蔬菜对于养分的需求,其中有机肥的用量占到 55%。本实验中 P-based, P-based+S 以及 N-based 处理在第一个生长周年氮素盈余分别为 565、565、477 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,磷素盈余为 114、127、113 $\text{kg P}\cdot\text{hm}^{-2}$;第二个周年氮素盈余分别为 558、483、562 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,磷素盈余 105、122、113 $\text{kg P}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

刘宏斌等^[22]研究了北京地区 254 个深层土壤剖面硝态氮的空间分布特征与累积状况。0~400 cm 土壤剖面硝态氮累积总量表现为保护地菜田最高,115 个塑料大棚和日光温室平均达 $1230 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。李俊良等^[23]研究得出山东寿光在种植年限为 8 年以上的

日光温室 Olsen-P 含量可达 $253 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远远大于 $60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。本研究在氮素投入 $200 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、磷素投入 $74 \text{ kg P}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的标准投入量下, P-based 推荐粪肥量中氮素投入量要高于 N-based 推荐粪肥量,试验数据显示, P-based 推荐粪肥氮素投入是 N-based 的 1.4~1.6 倍。从整个试验周期来看,总体养分投入差距不大。P-based、P-based+S 以及 N-based 处理无机氮含量经历了第一季度的增长后总体保持平衡的趋势,0~90 cm 无机氮含量保持在 $200 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上,基本可以满足番茄对于氮素的需求,而各个处理磷素也不断增加,其中以 P-based+S 增加最快,但在整个试验期间并未超过 $60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,且番茄产量较传统处理有一定程度的提高。

3.2 不同粪肥推荐方式对于追肥的影响

追肥数目是根据土壤氮素供应目标值,土壤无机氮含量以及灌溉水中带入养分含量共同作用确定的。氮素供应目标值在不同的种植季节差异很大。春季番茄在第一、二、三穗果膨大期和第四、五、六穗果膨大期每次追肥后氮素的供应分别不低于 300、200 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,秋季番茄在第一、二、三、四穗果膨大期和第五、六穗果膨大期每次追肥后氮素的供应分别不低于 200、250 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ [18]。土壤无机氮含量受有机肥矿化、植物吸收等作用的影响^[24]。本研究 N-based 处理基肥投入含氮量比较少,整个生育期粪肥提高土壤无机氮的能力较其他处理低,因此后期追肥数量较其他两种处理高。P-based+S 在 P-based 基础上增加 $8 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 秸秆,一方面增加了基肥中氮、磷的量,另一方面调节了 C/N 与 C/P。一般认为,当有机肥的 C/N 比小于 15 时,有机肥可出现净矿化, C/N 比大于 19 时,有机肥出现净固定^[24]。本研究整个生育期 N-based 与 P-based 处理 C/N 均在 13 以下,试验前期会

出现氮素的净固定,而 P-based+S 处理 C/N 在 20 以上,使得鸡粪在矿化过程中不会出现氮素的净固定而增加作物对于养分的吸收。

4 结论

(1)与传统施肥管理模式相比,本研究中三种粪肥推荐管理模式在保证产量的前提下,氮、磷表观平衡大幅度降低。

(2)P-based 粪肥推荐策略中粪肥氮、磷投入量要高于 N-based 粪肥推荐策略。因此,在新建设施菜田,以培肥地力为主,应按照 P-based 推荐施用粪肥,在种植年限较长的老菜田,为了防止土壤养分积累和淋失,提高养分利用效率,可以考虑以 N-based 推荐施用粪肥。过量氮肥投入易造成 C/N、C/P 失衡,通过增施高 C 小麦秸秆可以提高 C/N 和 C/P,对培肥地力有很重要的作用,因此在两种有机肥推荐策略的基础上增施秸秆效果更佳。

(3)本研究是在两年的实验基础上对于氮素、磷素盈余以及无机氮、Olsen-P 状况进行分析的,三种粪肥处理无机氮含量均处在一个较低水平且保持稳定,Olsen-P 含量并未超过 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,但是土壤中氮素、磷素含量也在不断增加,随着试验的进行粪肥施入量还有一定的调控空间。本研究由于试验面积的限制并未设置 N-based+S 处理,后期的试验过程中应该增加该处理进行对比,为粪肥施用提供理论基础。

参考文献:

- [1] 李书田,刘荣乐,陕红.我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J].农业环境科学学报,2009,28(1):179-184.
LI Shu-tian, LIU Rong-le, SHAN Hong. Nutrient contents in main animal manures in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1):179-184.
- [2] 吴清清,马军伟,姜丽娜,等.鸡粪和垃圾有机肥对苋菜生长及土壤重金属积累的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(7):1302-1309.
WU Qing-qing, MA Jun-wei, JIANG Li-na, et al. Effect of poultry and household garbage manure on the growth of *Amaranth tricolor* L. and heavy metal accumulation in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7):1302-1309.
- [3] 孟艳玲,王丽萍,杨合法,等.长期施用有机肥对温室土壤盐分积累的抑制作用[J].长江蔬菜,2008(5):54-55.
MENG Yan-ling, WANG Li-ping, YANG He-fa, et al. Effects of long-term application of organic manure on controlling salt accumulation in greenhouse soil[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2008(5):54-56.
- [4] 傅锦涛.有机无机肥配施对空心菜产量及土壤肥力影响[J].安徽农学通报,2009,15(1):65-66.
FU Jin-tao. Effect of combined application of organic manure and chemical fertilizers on water spinach yield and soil fertility[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2009, 15(1):65-66.
- [5] 黄焱宁,任晓艳,陈年来,等.甘肃中部日光温室土壤剖面理化特征[J].冰川冻土,2009,31(3):576-581.
HUANG Yan-ning, REN Xiao-yan, CHEN Nian-lai, et al. The physical and chemical characteristics of soil profile in the sunlight greenhouse of central Gansu[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(3):576-581.
- [6] 张经纬,曹文超,严正娟,等.种植年限对设施菜田土壤剖面磷素累积特征的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(5):977-983.
ZHANG Jing-wei, CAO Wen-chao, YAN Zheng-juan, et al. Effects of cropping years on the characteristics of phosphorus accumulation in soil profiles under greenhouse vegetable production[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5):977-983.
- [7] Djodjic F, Borling K, Bergstrom L. Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(2):678-684.
- [8] Kleinman P J A, Wolf A M, Sharpley A N, et al. Survey of water-extractable phosphorus in livestock manures[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(3):701-708.
- [9] 王婷婷,王俊,赵牧秋,等.有机肥对设施菜地土壤磷素累积及有效性的影响[J].农业环境科学学报,2009,28(1):95-100.
WANG Ting-ting, WANG Jun, ZHAO Mu-qiu, et al. Effects of organic manure on phosphorus accumulating and its availability in a greenhouse soil in Shenyang suburb[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1):95-100.
- [10] 张风华,廖文华,刘建玲.连续过量施磷和有机肥的产量效应及环境风险评价[J].植物营养与肥料学报,2009,15(6):1280-1287.
ZHANG Feng-hua, LIAO Wen-hua, LIU Jian-ling. Applications of phosphorus and organic fertilizers on yields of vegetables and their environmental impacts[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(6):1280-1287.
- [11] 牛俊玲,李彦明,陈清.固体有机废弃物肥料化利用技术[M].北京:化学工业出版社,2010:164-167.
NIU Jun-ling, LI Yan-ming, CHEN Qing. Organic solid waste fertilizer utilization technology[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2010:164-167.
- [12] Sharpley A N, Smith S J, Bain W R. Nitrogen and phosphorus fate from long-term poultry litter applications to Oklahoma soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(4):1131-1137.
- [13] Sims J T, Edwards A C, Schoumans O F, et al. Integrating soil phosphorus testing into environmentally based agricultural management practices[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1):60-71.
- [14] Delgado A, Scalenghe R. Aspects of phosphorus transfer from soils in Europe[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(4):552-575.
- [15] 贾良良,张朝春,江荣风,等.国外测土施肥技术的发展与应用[J].世界农业,2008(5):60-63.
JIA Liang-liang, ZHANG Chao-chun, JIANG Rong-feng, et al. Overseas measured soil and recommended fertilizer technical development and the application[J]. *World Agriculture*, 2008(5):60-63.

- [16] Eghball B, Power J F. Beef cattle feedlot manure management[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1994, 49(2): 113–122.
- [17] 陈 清, 张福锁. 蔬菜养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006: 125–132.
- CHEN Qing, ZHANG Fu-suo. Vegetables integrated nutrient resource management theory and practice[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2006: 125–132.
- [18] 何飞飞, 肖万里, 李俊良, 等. 日光温室番茄氮素资源综合管理技术研究[J]. 植物营养与肥科学报, 2006, 12(3): 394–399.
- HE Fei-fei, XIAO Wan-li, LI Jun-liang, et al. Integrated nitrogen management in greenhouse tomato production[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(3): 394–399.
- [19] 任 涛. 不同氮肥及有机肥投入对设施番茄土壤碳氮去向的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2011.
- REN Tao. Balance of soil carbon and nitrogen in the greenhouse tomato cropping system influenced by different nitrogen and organic manure application[D]. Beijing: China Agricultural University, 2011.
- [20] 刘兆辉, 江丽华, 张文君, 等. 山东省设施蔬菜施肥量演变及土壤养分变化规律[J]. 土壤学报, 2008, 45(2): 296–303.
- LIU Zhao-hui, JIANG Li-hua, ZHANG Wen-jun, et al. Evolution of fertilization rate and variation of soil nutrient contents in greenhouse vegetable cultivation in Shandong[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(2): 296–303.
- [21] Chen Q, Zhang X, Zhang H, et al. Evaluation of current fertilizer practice and soil fertility in vegetable production in the Beijing region[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 69(1): 51–58.
- [22] 刘宏斌, 李志宏, 张云贵, 等. 北京市农田土壤硝态氮的分布与累积特征[J]. 中国农业科学, 2004, 37(5): 692–698.
- LIU Hong-bin, LI Zhi-hong, ZHANG Yun-gui, et al. Characteristics of nitrate distribution and accumulation in soil profiles under main agro-land use types in Beijing[J]. *Science Agricultural Sinica*, 2004, 37(5): 692–698.
- [23] 李俊良, 崔德杰, 孟祥霞, 等. 山东寿光保护地蔬菜施肥现状及问题的研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(2): 126–128.
- LI Jun-liang, CUI De-jie, MENG Xiang-xia, et al. The study of fertilization condition and question in protectorate vegetable in Shouguang, Shandong[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 3(2): 126–128.
- [24] 李玲玲, 李书田. 有机肥氮素矿化及影响因素研究进展[J]. 植物营养与肥科学报, 2012, 18(3): 749–757.
- LI Ling-ling, LI Shu-tian. A review on nitrogen mineralization of organic manure and affecting factors[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(3): 749–757.