

精确滴灌施肥技术对大棚土壤盐渍化和氮磷流失控制的研究

郭春霞¹, 沈根祥¹, 黄丽华¹, 钱晓雍¹, 徐小辉², Massimo Pugliese³

(1.上海市环境科学研究院, 上海 200233; 2.上海上实现代农业开发有限公司, 上海 202183; 3.意大利都灵大学农业环境能力创新中心, 都灵 10095)

摘要:针对温室大棚盐渍化土壤灌水洗盐而导致的农业面源污染问题,以常规肥水管理方式为对照,在上海崇明东滩温室大棚采用土壤次生盐渍化监测、灌水洗盐过程模拟和农作物生产试验等方法研究精确滴灌施肥技术在降低土壤次生盐渍化程度和减少农田氮磷流失中的作用。结果表明,滴灌施肥技术可有效降低农田表层土壤的盐分积累速度,以此降低洗盐频次,进而显著削减温室大棚因灌水洗盐而引起的氮磷流失负荷。当滴灌施肥区洗盐频次降低为常规区的一半时,总氮、总磷、硝氮和氨氮的年流失负荷较常规方式削减 45%~53%,而作物产量基本可以保持;当洗盐频次降低为常规区的 1/4 时,总氮、总磷、硝氮和氨氮的年流失负荷的削减率达 58%~75%,但后茬作物减产明显。

关键词:精确滴灌施肥;土壤盐渍化;灌水洗盐;总氮流失负荷;总磷流失负荷

中图分类号:X502 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)02-0287-05

Control of Soil Salinization and Reduction of N & P Loss with Drip Fertigation in Greenhouse

GUO Chun-xia¹, SHEN Gen-xiang¹, HUANG Li-hua¹, QIAN Xiao-yong¹, XU Xiao-hui², Massimo Pugliese³

(1.Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 2.SIIC Modern Agriculture Development Co.Ltd, Shanghai 202183, China; 3.AGROINNOVA, Turin University, Turin 10095, Italy)

Abstract: Effects of drip fertigation (the application of fertilizer through drip irrigation system) strategy on the control of soil salinization and reduction of nitrogen and phosphorus loss have been studied through the field monitoring of soil quality, salt-washing simulation trial and the crop production evaluation in greenhouse. The results indicated that with the drip fertigation strategy, the salt accumulation rate in the surface soil decreased, which reduced the salt-washing frequency. As a result, nitrogen and phosphorus loss was significantly decreased in a long run. When the salt-washing frequency was reduced by 50% compared with the conventional practice, the annual loss of TN, TP, NO₃-N and NH₄⁺-N could be reduced by 45%~53% without compromising the crop yield. When the salt-washing frequency was reduced by 75%, the annual loss of TN, TP, NO₃-N and NH₄⁺-N could be even reduced by 58%~75%. However, in that case, the yield of the last crop was reduced too.

Keywords: drip fertigation; soil salinization; salt-washing; TN loss load; TP loss load

农田氮磷流失所导致的水体富营养化已成为近年来我国主要的环境污染问题之一,并引起了人们极大的关注^[1-3]。由于温室大棚农业生产长期处于封闭环境中,无自然降雨、温度高、蒸发量大,而且化肥施用水平比大田农业高,因而土壤中的盐分易随土壤毛管

水上升聚集在表层,经一段时间的积累后,容易发生土壤次生盐渍化,严重影响农业生产^[4-5]。尤其对于沿海地区温室大棚农业而言,由于土壤和地下水中的含盐量比较高,温室大棚中的次生盐渍化现象更容易发生。为了减轻温室大棚土壤盐渍化对农业生产的影响,常规农业生产中一般采取操作简单、见效快的灌水洗盐方法降低土壤盐分。灌水洗盐可以使土壤中的盐分随洗盐径流水和渗漏水离开土壤,降低土壤含盐量。但在洗盐过程中,土壤中的大量氮磷养分也进入水环境,导致水体富营养化^[6]。

收稿日期:2008-05-14

基金项目:中国-意大利环境保护合作项目

作者简介:郭春霞(1976—),女,硕士,工程师,主要从事农业环境保护研究。E-mail:guocx@saes.sh.cn

通讯作者:沈根祥 E-mail:shengx@saes.sh.cn

精确滴灌施肥技术是一种环境友好的精准农业技术,该技术可以根据作物在不同生长阶段对水分和养分的需求,分阶段定量把水分和肥料输送到作物根部周围,结合塑料薄膜覆盖,以提高肥料和水分的利用率。随着人们对农业生产土壤养分平衡和水管理日益关注,该技术的应用日趋广泛^[7-9]。但该技术在减缓温室大棚土壤盐渍化和削减农业面源污染上的作用与效果,国内外报道甚少。

本研究以土壤次生盐渍化严重的沿海地区温室大棚农业为研究对象,为期 2 年监测滴灌施肥区和常规对照区的土壤次生盐渍化发生和农作物生产情况,同时通过灌水洗盐模拟试验,研究基于土壤和作物养分管理的精确滴灌施肥技术在减缓温室大棚土壤盐渍化和削减氮磷流失负荷等农业面源污染的效果,以期为我国设施农业土壤次生盐渍化防治和面源污染控制工作提供借鉴。

1 试验材料及试验方法

1.1 试验基地概况及布置

试验在上海崇明岛上实东滩现代农业园区(东经 120°57.21',北纬 31°30.43')进行。东滩位于崇明岛最东端,南北濒临长江入海口,向东伸入东海。农田土壤质地为粉砂壤土,<0.002 mm 粒径含量为 17.96%,土壤 pH 值为 7.72,容重为 1.38 g·cm⁻³,全盐含量为 0.04%~0.28%,硝态氮含量为 74.4 mg·kg⁻¹,氨态氮含量为 23.5 mg·kg⁻¹,有机质含量为 1.1%。试验田为 0.2 hm² 的温室大棚,其中一半面积为常规区,采用常规施肥管理方式,洗盐次数为每茬作物 1 次,每年 2 次;而另一半为滴灌施肥区,采用自动化精确滴灌施肥技术,结合薄膜覆盖,根据洗盐频次的不同分为滴肥一区 and 滴肥二区,滴肥一区每年洗 1 次盐,滴肥二区每 2 年洗 1 次盐。试验期为 2006 和 2007 年,在试验期间,各处理区轮作蚕豆、南瓜、蚕豆和西红柿。

1.2 试验田肥水施用与监测方法

大棚常规区灌溉施肥与当地常规农业生产保持一致,蚕豆不施肥,每月浇灌 2 次;南瓜 4 月施基肥 1

次,6 月追肥 1 次,肥料品种为三元复合肥(N:P:K 为 15:15:15),施肥方式为撒施或穴施,每周浇灌 1 次;西红柿 4 月施基肥 1 次,6 月和 9 月追肥 2 次,肥料品种是三元复合肥和有机肥(N:P:K 为 0.75:1.47:0.66,有机质含量为 17.4%),每周浇灌 1 次。滴灌施肥区的灌溉频次与常规区保持一致,采取滴灌方式,灌溉量略有差异。滴灌施肥区的养分投入水平是在测定土壤养分含量的基础上,应用 Stanford 方程^[10]进行估算,在确定各种养分的用量和相对比例后,选择可溶于水且混合在水溶液时不发生沉淀的肥料品种,以尿素、磷酸二氢钾和硝酸钾为主。滴灌施肥区除基肥为撒施外,其余肥料通过精确滴灌系统分多次施用,南瓜种植季内(2006 年 5 月至 7 月)滴肥 15 次,西红柿种植季内(2007 年 5 月至 10 月)滴肥 19 次。试验期内常规区与滴灌施肥区的肥料施用量和灌溉量如表 1 所示。

在试验期间,分别于 2005 年 11 月、2006 年 11 月、2007 年 4 月和 2007 年 11 月对不同处理试验区采集混合土壤样品,测定其 pH、EC、碱解氮和速效磷等,以纵向和横向比较并评价各处理试验区的土壤次生盐渍化程度及其变化。

1.3 灌水洗盐模拟试验

灌水洗盐模拟试验时间为 2007 年 11 月。在常规区和滴灌施肥区各沿对角线设 3 个面积为 3 m² 的小区,小区四周用深度为 30 cm 的塑料薄膜隔离层防止侧渗,并在四周筑高约 10 cm 用塑料薄膜内衬的土堤。参照当地常规灌水洗盐方式,对小区进行连续两次计量灌水,灌水量合计为 2 145 t·hm⁻²,经 20~24 h 浸泡后,待土壤吸水饱和后,释放和收集径流水。

在每个径流小区附近各挖掘一个原状土柱,土柱高 80 cm,直径 30 cm,土柱外围用铁桶套严后运至实验室,削平土柱底部土壤,并安装带有自出水口的铁桶底盘。为防止土柱与桶壁间缝隙过大而造成边缘渗漏,在试验前沿桶壁灌入用底层土壤做成的泥浆,并使之平衡一段时间。根据灌水洗盐单位面积灌水量和径流水产生量,按土柱表面积确定原状土柱灌水量和

表 1 2006 年与 2007 年温室大棚灌溉水及肥料施用量

Table 1 Fertilizer & water amount in greenhouse in 2006 & 2007

年份	处理	有机肥/kg·hm ⁻²	氮肥/kg N·hm ⁻²	磷肥/kg P·hm ⁻²	钾肥/kg K·hm ⁻²	灌溉水量/t·hm ⁻²
2006	常规对照	0	78.75	78.75	78.75	575
	滴灌施肥	0	148.4	116.5	139.4	526
2007	常规对照	N:168.8, P ₂ O ₅ :330.75, K ₂ O:148.5	112.5	112.5	112.5	917.9
	滴灌施肥	0	212.9	95.2	160.2	953.5

与径流小区试验浸泡相同时间后的径流水收集量,待桶底出水口有水流时开始收集渗漏水。

分别测定小区径流水和渗漏水中的 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、TN 和 TP 含量。

1.4 分析方法

土壤电导率 (EC) 采用蒸馏水浸提后电导仪测定;土壤 pH 用 pH 计测定;土壤碱解氮用碱解扩散法测定;土壤速效磷用 Olsen 法测定。

水样 TN 用碱性过硫酸钾氧化,紫外分光光度法测定;TP 用过硫酸钾氧化,钼锑抗分光光度法测定; NH_4^+ -N 用纳氏试剂分光光度法测定; NO_3^- -N 用紫外分光光度法测定。

2 结果与讨论

2.1 不同灌溉施肥对表层土壤含盐量的影响

试验期间温室大棚表层土壤 (0~25 cm) 监测结果如表 2 所示。表中 2005 年,为尚未开始试验的监测值。2006 和 2007 年,试验大棚分为 3 种处理,常规区每年洗盐 2 次,滴肥一区每年洗盐 1 次,滴肥二区每 2 年洗盐 1 次。

从表中可以看出,在 2006 年底,经过一年的耕作,常规区与滴灌施肥区最大的差异体现在反映土壤含盐量的 EC 值上。虽然常规区已于 2006 年 4 月份洗盐 1 次,但 2006 年底的土壤 EC 值还是明显高于滴灌施肥区,说明滴灌施肥区土壤表层的盐分累积速度远远低于常规区。2007 年 4 月土壤 EC 监测结果同样说明了这一点。到 2007 年底土壤监测前,常规区已洗盐三次,滴肥一区洗盐 1 次,滴肥二区尚未洗盐,而

滴肥二区的 EC 值也只是略高于常规区。另外,2007 年底,滴肥二区的 pH 值、碱解氮远高于常规区和滴肥一区,这可能是由于滴肥二区久未洗盐,速效养分和各种离子在土壤表层长期积累而造成的。

在土壤基本性质相同的情况下,农业生产中日常翻耕、施肥、灌溉对于农田土壤盐分的累积速度有较大影响^[5]。常规与滴灌施肥区在种植期内都不进行翻耕。从表 1 可知,两处理区的灌溉水量互有高低,但差异不大。滴灌施肥区 2 年的肥料总用量略低于常规区;滴灌施肥区全部使用化学肥料,而常规区部分施用了有机肥。由此可见,滴肥区在施肥量和灌溉量上并无明显优势,但滴肥区的盐渍化程度显著低于常规区,这主要得益于施肥方案的优化和精确滴灌施肥系统的应用。如 1.2 所述,常规区 2 年共施肥 5 次,并在每次施肥后灌溉,集中的施肥和灌水加速了盐离子在土壤表层的积累。滴灌施肥区则利用精确滴灌系统分 34 次把水分和溶解态的肥料输送到作物根部,不仅减少了农田土壤浸润面积,提高了水分和肥料的利用率,而且还由于滴灌带上面覆盖了薄膜,在很大程度上减少了水分的蒸发,因此减缓了盐分随毛管水上升并积累于土壤表层的速度。由此可见,结合薄膜覆盖的精确滴灌施肥技术对于控制温室大棚次生盐渍化有着非常积极的作用。

2.2 常规区与滴灌施肥区的氮磷流失负荷

当地砂性土壤渗透性较好,按照当地灌水洗盐常规操作方法和灌水量,灌水洗盐所产生的径流量为零,灌水洗盐过程以渗漏流失为主。各处理原状土柱单次洗盐渗漏流失情况的模拟试验结果表明 (如表

表 2 试验大棚常规区与滴灌施肥区土壤质量变化

Table 2 Variation of soil quality of conventional plot & drip fertilizer irrigation plot in the greenhouse

指标	2005 年	2006 年 11 月		2007 年 4 月			2007 年 11 月		
		常规	滴肥区	常规	滴肥一区	滴肥二区	常规	滴肥一区	滴肥二区
pH	7.8	7.8	7.7	7.8	7.7	8.0	7.7	7.8	8.7
EC/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	490	1 276	701	1 083	625	876	1 015	926	1 154
碱解氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	75.0	98.6	106.8	—	—	—	78.0	60.0	139.9
速效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	113.0	—	—	—	—	—	71.0	64.0	86.7

注:土壤质量监测均在洗盐前进行。2006 年滴肥一区和二区都没有洗盐,因此监测土壤时视为同一处理。

表 3 温室大棚单次洗盐渗漏流失量及氮磷浓度

Table 3 Leaching volume and concentration of nutrients from a single salt-washing in greenhouse

试验区	灌水量/ $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$	渗漏水量/ $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$	NO_3^- -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NH_4^+ -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
常规区 (每年 2 次)	2 145	1 604.8±54.1	35.84±1.63	0.63±0.02	46.12±6.62	0.23±0.08
滴肥一区 (每年 1 次)	2 145	1 590.5±21.8	39.85±3.58	0.68±0.06	48.81±4.86	0.22±0.03
滴肥二区 (2 年 1 次)	2 145	1 590.5±41.2	58.7±1.82	0.61±0.08	77.84±7.11	0.27±0.01

3),在灌水量为 $2\ 145\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的情况下,常规区、滴肥一区 and 滴肥二区的平均渗漏量分别为 $1\ 604.8$ 、 $1\ 590.5$ 和 $1\ 590.5\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$,3 个处理的渗漏量没有明显差异。从渗漏水的氮素流失浓度看,滴肥一区与常规区相差不大,但滴肥一区要比常规区洗盐次数少 1 次,说明精确滴灌施肥技术减少了土壤养分的过度累积,而滴肥二区渗漏水中的 TN 和硝氮含量比其他两个处理都高,这是由于滴肥二区已经 2 年没有进行过灌水洗盐,土壤累积的养分含量相对更高,而 TN 和硝氮容易随水流失,因而明显反映在了渗漏水浓度中。另外,3 个处理区的 NH_4^+-N 和 TP 浓度差异不大,浓度较其他污染物而言要低很多,这也与 NH_4^+-N 和磷素在土壤中的向下移动性较差有关^[11-12]。

根据模拟试验所得到各处理区的渗漏流失水量、相应的氮磷浓度和各自的洗盐频次,可计算 3 个处理区由于灌水洗盐所造成的氮磷年流失负荷,如图 1 所示。从图中可见,对于 TN、TP、 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 4 种污染物的年流失负荷来说,常规区最高,滴肥一区次之,滴肥二区最低,这与 3 个处理区各自的洗盐频次是密切相关的。与常规区相比,滴肥一区的 TN、TP、 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 的流失负荷分别减少 69.9、0.39、51.6 和 $0.94\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,削减率分别达到 47.4%、45.0%、46.5%和 52.7%。滴肥二区的 TN、TP、 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 的流失负荷比常规区分别减少 86.2、0.53、68.3 和 $1.53\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,削减率高达 58%~75%。由此可见,由于滴灌施肥区中优化了肥水管理,采用了精确滴灌技术并覆盖地膜,有效减轻了土壤盐渍化程度,降低灌水洗盐的频率,进而减少农田氮磷的流失。

2.3 不同灌溉施肥技术对农作物产量及品质的影响

连续 2 年的农作物生产结果表明,滴灌施肥区和常规区的南瓜和蚕豆产量差别不大,洗盐频次的降低主要影响了最后一茬作物西红柿的产量,不同处理区

西红柿的产量和品质如表 4 所示。从表中可以看出,常规区与滴肥一区的西红柿产量没有显著差异,滴肥一区的西红柿单果重大于常规区,而酸度略低,糖度则没有差异。由此说明应用精确滴灌施肥技术后,把灌水洗盐频次降低为常规操作的 50%,对农作物产量没有明显影响。就滴肥二区而言,西红柿减产明显,较常规区减少了 42%,而单果重比常规区要高近 10%,酸度与糖度则介于常规区与滴肥一区之间。田间观察结果表明,滴肥二区减产主要是由于西红柿幼苗耐盐性较差,在盐分含量和 pH 值相对较高的滴肥二区中存活率较低所导致的,而对于存活下来的植株,生长情况表现较好。

表 4 温室大棚不同处理西红柿产量和品质

Table 4 Average tomato yield & quality in different treatments in the greenhouse

处理	产量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	单果重/g	酸度/ $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	糖度(brix degree)
常规区	22 936a	148.2a	0.004 1a	5.3a
滴肥一区	21 084a	183.1b	0.003 5b	5.1a
滴肥二区	13 132b	162.0c	0.003 7b	5.2a

注:产量数值后面英文字母相同表示无显著差异,字母不同表示差异达到 $P<0.05$ 的显著水平。

由 2.2 的分析可知,滴肥二区的氮磷流失负荷削减率高于滴肥一区,更利于水体环境的保护,但滴肥二区的后茬作物产量较低,减少了农业生产收入。相比而言,滴肥一区在保证作物产量的同时也有效削减了温室大棚的面源污染,说明在当地条件下,采用了基于土壤和作物养分管理的滴灌施肥技术后,降低 50%的洗盐频次更为科学合理。

3 结论

(1)温室大棚连续 2 年的田间试验表明,采用基于养分平衡管理的精确滴灌施肥技术,并结合地膜覆

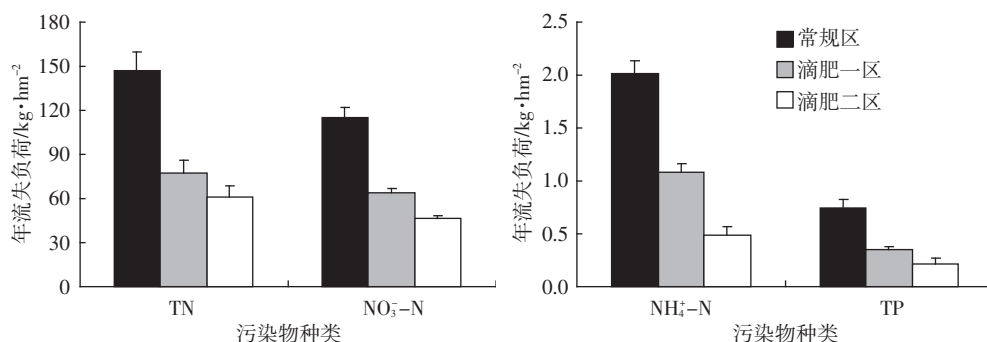


图 1 温室大棚不同处理区氮磷年流失负荷

Figure 1 Annual lost load of various pollutants of different treatment plots in greenhouse

盖,可有效减缓农田土壤表层盐分的积累速度,降低大棚次生盐渍化程度。当滴灌施肥区洗盐频次降为常规对照区的 1/2 时,表层土壤的含盐量(EC)略低于常规区;当洗盐频次降为常规对照区的 1/4 时,表层土壤的含盐量(EC)仅比常规区高 13.7%。

(2)由于精确滴灌施肥技术有效控制了温室大棚的土壤盐渍化程度,降低了土壤洗盐频次,因此也显著削减了灌水洗盐所引起的氮磷流失,更有利于水环境的保护。当洗盐频次降为常规对照的 1/2 时,总氮、总磷、硝氮和氨氮的年流失负荷可削减 45%~53%;当洗盐频次降为常规对照的 1/4 时,总氮、总磷、硝氮和氨氮的年流失负荷的削减率更高达 58%~75%。

(3)农作物生产试验表明,在应用精确滴灌施肥技术后,当洗盐频次降为常规频次的 1/2 时,各茬作物的产量和品质都没有受到显著影响,而洗盐频次降为常规频次的 1/4 时,后茬作物减产明显。

参考文献:

- [1] 金洁, 杨京平. 从水环境角度探析农田氮素流失及控制对策[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 579-582.
JIN Jie, YANG Jing-ping. Farmland nitrogen loss and its control strategies from the view of water environment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(3): 579-582.
- [2] Lambertus L. Development and eutrophication[J]. *Water Science and Technology*, 1995, 31(9): 11-15.
- [3] 全为民, 严力蛟. 农业面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施[J]. 生态学报, 2002, 22(3): 291-299.
QUAN Wei-min, YAN Li-jiao. Effects of agricultural non-point source pollution on eutrophication of water body and its control measure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(3): 291-299.
- [4] 龚宪成. 自控温室内土壤盐渍化防治措施[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(4): 75-76.
GONG Xian-cheng. The reason of forming salinized soil and its preven-
- tion in automatic green-house[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2002, 10(4): 75-76.
- [5] 李文庆, 张民, 李海峰, 等. 大棚土壤硝态氮状况研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(2): 283-287.
LI Wen-qing, ZHANG Min, LI Hai-feng, et al. The study of soil nitrate status in fields under plastic house gardening[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(2): 283-287.
- [6] 沈根祥, 杨建军, 黄沈发, 等. 塑料大棚盐渍化土壤灌水洗盐对水环境污染负荷的研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 124-127.
SHEN Gen-xiang, YANG Jian-jun, HUANG Shen-fa, et al. Water pollution load of saliferous soil washed by water in plastic greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(1): 124-127.
- [7] Ayars J E, Phene C J, Hutmacher R B, et al. Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the water management research laboratory[J]. *Agricultural Water Management*, 1999, 42: 1-27.
- [8] Guimera J, Marfa O, Candela L, et al. Nitrate leaching and strawberry production under drip irrigation management[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1995, 56: 121-135.
- [9] 黄丽华, 沈根祥, 钱晓雍, 等. 砂质梨园和蔬菜地氮素流失及其影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 687-691.
HUANG Li-hua, SHEN Gen-xiang, QIAN Xiao-yong, et al. Nitrogen loss in sandy pear orchard and vegetable field and impact factors[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 687-691.
- [10] 陈伦寿. 农田施肥原理与实践[M]. 北京: 农业出版社, 1984.
Chen Lun-shou. Fertilizer application theory and practices in fields[M]. Beijing: Agriculture Press, 1984.
- [11] 杨建军, 冉炜, 沈其荣. 小麦生长季节太湖地区土壤溶液中氮磷浓度的变化[J]. 南京农业大学学报, 2002, 25(2): 60-70.
YANG Jian-jun, RAN Wei, SHEN Qi-rong. Changes of nitrogen and phosphorus in soil solutions from the soil in Taihu Lake region during wheat growth[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2002, 25(2): 60-70.
- [12] Daniel T C, Sharpley A N, Lemunyou J L. Agricultural phosphorus and eutrophication: a symposium overview[J]. *J Environ Qual*, 1998, 27: 251-257.