陈秋会,席运官,王 磊,等.太湖地区稻麦轮作农田有机和常规种植模式下氮磷径流流失特征研究[J].农业环境科学学报,2016,35(8):1550-1558.

CHEN Qiu-hui, XI Yun-guan, WANG Lei, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus runoff losses in organic and conventional rice-wheat rotation farmland in Taihu Lake Region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8):1550-1558.

太湖地区稻麦轮作农田有机和常规种植模式下氮磷径流流失特征研究

陈秋会,席运官*,王 磊,李 妍,张 弛,田 伟,田 然,肖兴基,赵克强

(环境保护部南京环境科学研究所,南京 210042)

摘 要:为探究不同种植模式对氮磷流失的影响,采用田间径流池法,在太湖地区稻麦轮作系统中,通过连续两年田间试验,研究比较了等氮投入条件下常规种植和有机种植模式农田径流水中氮、磷浓度特征,以及径流氮、磷流失量、流失系数。结果表明,稻季和麦季农田径流中总氮、可溶性氮、铵态氮和硝态氮平均浓度和总氮流失量均表现为:常规种植>有机种植>对照。与常规种植相比,有机种植模式能够有效减少稻麦轮作农田中氮的径流流失,且对麦季氮素径流流失的减少效果优于稻季;尽管有机种植模式下磷流失系数低于常规种植,但有机肥投入携带的高磷量会增加农田磷素径流流失量。

关键词:稻麦轮作;有机种植;农田;径流;氮磷流失

中图分类号:S153.6 **文献标志码**:A **文章编号**:1672-2043(2016)08-1550-09 doi:10.11654/jaes.2016-0102

Characteristics of nitrogen and phosphorus runoff losses in organic and conventional rice-wheat rotation farmland in Taihu Lake Region

CHEN Qiu-hui, XI Yun-guan*, WANG Lei, LI Yan, ZHANG Chi, TIAN Wei, TIAN Ran, XIAO Xing-ji, ZHAO Ke-qiang

(Nanjing Institute of Environmental Sciences of the Ministry of Environmental Protection of PR China, Nanjing 210042, China)

Abstract: In order to explore the effects of different cultivation patterns (conventional and organic cultivation) on nitrogen and phosphorus losses, a 2-year field experiment was conducted by building runoff ponds in farmland. The concentrations of nitrogen and phosphorus in runoff from the conventional and organic rice-wheat rotation farmland in Taihu Lake Region were analyzed. Results showed that the average concentrations of total nitrogen (TN), soluble nitrogen, ammonium, nitrate and TN in runoff were in order of conventional cultivation>organic cultivation>control. The TN loss coefficients in organic fields were significantly lower than those in the conventional fields. Runoff losses of TN from rice-wheat rotation under the organic cultivation and conventional cultivation were 24.42~52.30 kg·hm^{-2} and 54.84~78.21 kg·hm^{-2}, respectively, with TN losses lower in organic fields decreased by 33.13%~55.47%. Total N runoff loss under organic cultivation in rice and wheat seasons decreased respectively by 19.27%~25.10% and 40.29%~67.58%, suggesting that effective of reducing N runoff loss in wheat season was better than in rice season. Although the TP loss coefficients in organic fields were lower than that in conventional fields, higher P amount in organic fertilizer led to the increase of P runoff loss from organic cultivation system.

Keywords: rice-wheat rotation; organic cultivation; farmland; surface runoff; loss of nitrogen and phosphorus

太湖地区是我国化肥用量最高的地区之一[1],据悉,该区稻麦轮作年施氮量平均值已高达约590 kg·hm^{-2}[2]。过量化肥的施用不仅增加农业生产成本,而且过低的肥料利用率使得土壤中氮磷大量流失,导致地表水污染和水体富营养化加剧,引起一系列环境问题。目前,太湖流域农业面源污染比较严重,已成为人们普遍关注的热点问题[3-8]。地表径流是农田氮磷流失的主要方式,我国农田生态系统中氮年径流损失量约

收稿日期:2016-01-21

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201003014-2);国家科技支撑计划项目(2014BAK19B01)

作者简介:陈秋会(1982—),女,河南商丘人,博士,助理研究员,主要从事有机农业与生态修复研究。E-mail:cqhofrcc@126.com

*通信作者:席运官 E-mail:xygofrcc@126.com

131 万 t[9]，磷径流损失量约 6.36 万 t[10]。研究表明，农田氮磷化学养分投入的减量化技术、科学农业管理模式有利于减少农田氮磷径流流失，控制农业面源污染、改善农村生态环境[11-13]。

环境友好型农业即有机农业的日益兴起引起了人们的极大关注。有机农业是指遵照一定的有机农业生产标准，在生产中不采用基因工程获得的生物及其产物，不使用化学合成的农药、化肥、生长调节剂、饲料添加剂等物质，遵循自然规律和生态学原理，协调种植业和养殖业的平衡，采用一系列可持续发展的农业技术以维持持续稳定的农业生产体系的一种农业生产方式。岳玉波等[13]指出，发展有机农业是从源头上控制面源污染的良好途径之一，针对有机种植模式下的农田养分流失问题已逐渐成为研究热点[11,13-15]。为科学实施有机农业生态工程，发挥有机农业面源污染控制功效，本文通过研究比较太湖地区主要种植作物-水稻、小麦在有机与常规种植条件下径流中的氮磷浓度及其构成、流失量与流失系数，探究稻麦轮作农田径流氮磷流失的动态变化规律和主控因素，为优化种植技术，实现发展有机种植控制面源污染目标提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究地点

试验于 2011 年 6 月至 2013 年 6 月在江苏省常州市武进区雪堰镇万寿村（120°05′05"E，31°29′24"N）进行。试验田距太湖 2 km，所处地形为丘陵谷地，土壤类型为水稻土，质地为壤土。土壤 pH5.13，有机质 31 g·kg^{-1}，总氮 1.71 g·kg^{-1}，碱解氮 164 mg·kg^{-1}，总磷 1.17 g·kg^{-1}，有效磷 11.5 mg·kg^{-1}，速效钾 76 mg·kg^{-1}。

耕作制度为稻麦轮作，水稻耕作方式为常规翻耕，小麦为免耕。供试作物水稻为 9998-3，冬小麦为扬麦 11 号。

1.2 试验设计

在田间布设长 3.0 m、宽 0.7 m、深 1.0 m 的径流池，混凝土结构，在降雨产生径流后，测量计算径流水量，采集径流水样。试验小区面积为 30 m^2（长 6.0 m、宽 5.0 m）。2011 年第一季作物水稻，2011 年 6 月 16 日移栽，2011 年 11 月 11 日收获；第二季作物小麦，2011 年 11 月 26 日播种，2012 年 5 月 28 日收获。2012 年第一季作物水稻，2012 年 6 月 14 日移栽，2012 年 11 月 2 日收获；第二季作物小麦，2012 年 11 月 15 日播种，2013 年 5 月 28 日收获。设置 3 个处理，每个处理设 3 次重复。（1）空白对照：不施肥；（2）常规种植模式：在广泛调查的基础上，采用当地农民的平均施肥量与施肥方式；（3）有机种植模式：施用和常规组等氮量的有机肥。种植期间全部采用商品有机肥和植物源农药，不使用任何人工农药和尿素等，严格执行有机产品生产行业标准。所用有机肥为“田娘”商品有机肥（含 N 1.42%、P_2O_5 2.00%、K_2O 1.58%）。稻麦轮作期间各处理具体施肥情况见表 1。试验小区并排分布在径流池两侧。

1.3 稻麦轮作季降雨和灌溉情况

2011—2012 年稻麦轮作季降雨总量 1 309.7 mm，其中稻季为 923.2 mm，麦季为 386.5 mm；2011 年 6—8 月降雨 868.7 mm，其中较大的两次降雨发生在 2011 年 6 月 18 日和 8 月 22 日，降雨量分别为 98.6 mm 和 92.1 mm。径流受控于降雨特性，季节特征明显，主要发生在 6—8 月，其中稻季共发生 9 次径流，小区径流量为 21 050 L，麦季发生 5 次径流，小区径流量为 6810 L。在整个稻季共灌溉 15 次，灌溉水量为 650 mm，每隔 5~7 d 灌溉一次。

表 1 有机和常规种植模式下的施肥种类和施肥量（kg·hm^{-2}）

Table 1 Types and amount of fertilizations under organic and conventional cultivation patterns (kg·hm^{-2})

项目	种植模式	基肥			追肥 1			追肥 2			总施氮量	总施磷量	总施钾量
		复合肥	尿素	有机肥	复合肥	尿素	有机肥	复合肥	尿素	有机肥			
2011 年稻季	常规	67.5	69.6	—	—	69.6	—	22.5	69.6	—	298.8	39.3	74.7
	有机	—	—	152.0	—	—	87.4	—	—	59.4	298.8	183.8	275.9
2011 年麦季	常规	45	69.6	—	—	69.6	—	—	—	—	184.2	19.6	37.3
	有机	—	—	114.6	—	—	69.6	—	—	—	184.2	113.3	170.1
2012 年稻季	常规	67.5	69.6	—	—	69.6	—	22.5	69.6	—	298.8	39.3	74.7
	有机	—	—	162.0	—	—	82.3	—	—	54.5	298.8	183.8	275.9
2012 年麦季	常规	45.0	69.6	—	—	69.6	—	—	—	—	184.2	19.6	37.3
	有机	—	—	102.7	—	—	81.5	—	—	—	184.2	113.3	170.1

2012—2013 年稻麦轮作季降雨总量为 1 094.6 mm，其中稻季降雨量为 533.5 mm，明显低于 2011 年稻季，而麦季为 561.1 mm，较 2011 年增加 174.6 mm，较大的两次降雨发生在 2012 年 8 月 9 日和 2013 年 5 月 6 日，降雨量分别为 106.2 mm 和 122.1 mm。稻季降雨量的减少导致径流次数（4 次）和径流量（9200 L）较 2011 年少，而麦季径流次数（7 次）和径流量（14 560 L）较 2011 年多。2012 年稻季灌溉 14 次，灌溉水量为 600 mm，每隔 5~7 d 灌溉一次。

2011—2013 年稻麦轮作期间降雨和灌溉情况如图 1。

1.4 样品采集与测试方法

1.4.1 样品采集

土壤取样：稻麦轮作前采集 0~20 cm 的耕层土壤样品风干、过筛，用于测定土壤基本理化性质。

径流水取样：在降雨产生径流时记录各径流池水面高度，计算径流量，然后取水样 500 mL，用于测定硝态氮、铵态氮、总氮和总磷等含量。

此外，每次降雨后记录降雨量。在小麦和水稻收获时记录每个小区的作物产量。

1.4.2 测试方法

土壤 pH 采用 pH 计测定（水土比为 2.5∶1），有机质采用重铬酸钾滴定法测定，总氮采用凯氏定氮法测定，碱解氮采用碱解扩散法测定，总磷采用钼锑抗分光光度法测定，有效磷采用碳酸氢钠浸提–钼锑抗分光光度法测定，速效钾采用乙酸铵浸提–火焰光度计法测定。

水样硝态氮、铵态氮、总氮采用流动分析仪进行测试，可溶性总氮采用碱性过硫酸钾消解–紫外分光光度法测定，总磷采用钼酸铵分光光度法测定，水溶性磷采用过硫酸钾氧化–钼蓝比色法测定。

1.5 径流氮、磷流失计算方法

径流氮、磷流失量等于整个监测周期中（一个完整的生长季）各次径流水中氮、磷浓度与径流水体积乘积之和。计算公式如下：

$$P=\sum_{i=1}^{n}(C_i\times V)$$

式中：P 为氮、磷流失量；C_i 为第 i 次径流水中氮、磷的浓度；V_i 为第 i 次径流水的体积。

氮、磷流失系数以流失率（%）表示，即氮、磷流失量除以施肥投入的氮、磷量，计算公式如下：

$$L_c(\%)=\frac{P_f-P_c}{F}\times 100\%$$

式中：L_c 为氮、磷流失系数；P_f 为施肥处理氮、磷流失量；P_c 为对照氮、磷流失量；F 为施肥量。

1.6 数据分析

数据分析采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 16.0 统计软件完成，不同处理间显著性差异的检验采用单因素 ANOVA 方差分析。

2 结果与分析

2.1 有机和常规种植模式下水稻和小麦产量差异

从图 2 可以看出，2011 年度有机种植水稻产量略高于常规种植，但是未达到显著水平（$P>0.05$），分别为 8911 kg·hm^{-2} 和 8711 kg·hm^{-2}，是不施肥对照产量的 2 倍。有机种植小麦产量明显高于常规种植，分别较对照增产 64.89%和 57.00%。

2012 年度有机种植水稻产量（6654 kg·hm^{-2}）和小麦产量（3097 kg·hm^{-2}）分别是对照的 1.32 倍和 1.88 倍，但是均显著低于常规种植产量，分别较常规

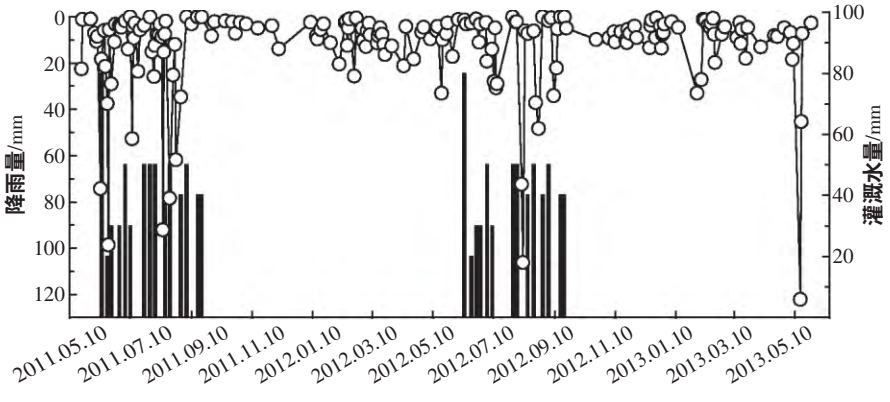
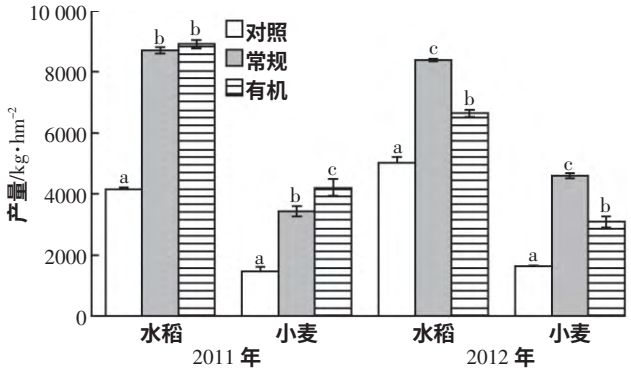


图 1 2011—2013 年稻麦轮作期间降雨和灌溉情况

Figure 1 Rainfall and irrigation in rice–wheat rotation system during 2011—2013



图表中不同小写字母表示各处理间差异显著（$P<0.05$）。下同

Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) between different treatments. The same below

图 2 有机和常规种植模式下水稻和小麦产量

Figure 2 Rice and wheat yields under organic and conventional cultivation patterns

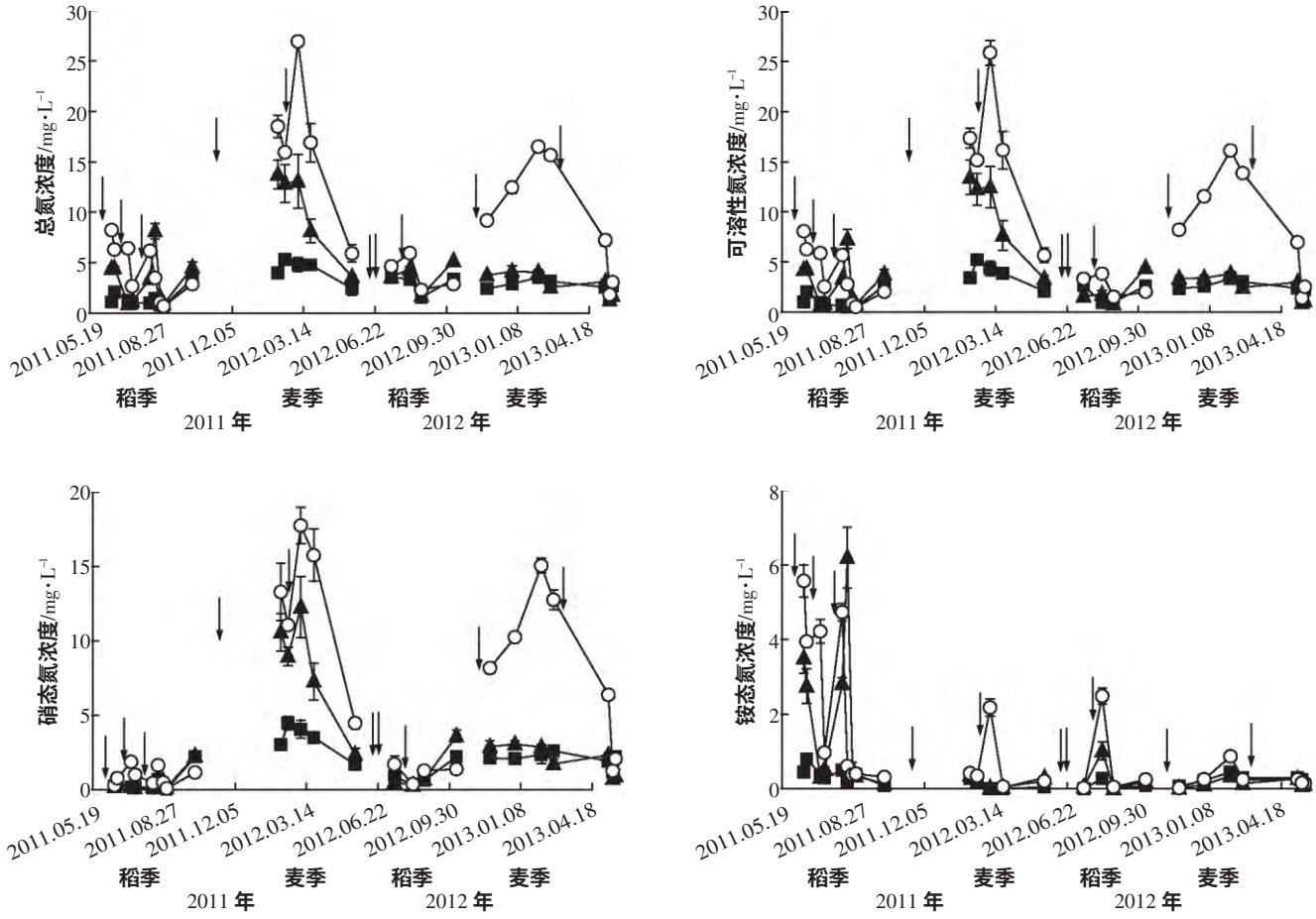
种植减产 20.76%和 32.82%。

2.2 稻麦轮作径流水中的氮素及其流失分析

2.2.1 稻季农田径流水中氮浓度的动态变化

不同种植模式下，稻季农田径流水中总氮、可溶性氮、硝态氮和铵态氮浓度变化特征如图 3 所示。2012 年稻季降雨量较 2011 年减少 389.7 mm，径流量减少11 850 L，径流次数仅为 4 次。2012 年稻季各处理间径流水中氮浓度差异较 2011 年小。在 2011 年整个稻季，不施肥对照、常规种植和有机种植模式下稻田径流水中总氮平均浓度分别为 1.42、4.24、3.28 mg·L^{-1}，而在 2012 年整个稻季，不施肥对照、常规种植和有机种植模式下稻田径流水中总氮平均浓度分别为 2.97、3.94、3.73 mg·L^{-1}。

不同种植模式下，稻田径流水中氮浓度差异明显。常规种植模式下径流水中总氮、可溶性总氮和铵



图中箭头标注的为施肥时间。下同

Arrows denote the timing of fertilization. The same below

图 3 稻麦轮作径流水中氮浓度的动态变化

Figure 3 Variation of N concentrations in runoff water in rice–wheat rotation system

态氮浓度在基肥和追肥施用后明显增加，显著高于有机种植和不施肥对照。2011 年常规种植模式下径流水中总氮浓度峰值（8.23 mg·L^{-1}）出现在基肥施用后（6 月 19 日），有机种植模式径流水中总氮浓度峰值（8.15 mg·L^{-1}）出现在 8 月 19 日；2012 年常规种植模式下径流水中总氮浓度峰值（5.59 mg·L^{-1}）出现在 8 月 10 日，而有机种植在 10 月 10 日出现总氮浓度峰值（5.19 mg·L^{-1}）。

2.2.2 麦季农田径流水中氮浓度的动态变化

由图 3 可见，麦季农田径流水中氮浓度高于稻季，尤其在常规种植模式下。麦季径流水中氮形态以硝态氮为主，而在稻季以铵态氮为主。小麦常规和有机种植模式下农田径流水中总氮、可溶性总氮、硝态氮浓度高于不施肥对照，且常规种植模式下氮浓度高于有机种植。在 2011 年麦季，不施肥对照、常规种植和有机种植模式下麦田径流水中总氮平均浓度分别为 4.27、16.84、10.29 mg·L^{-1}，2012 年麦季径流水中总氮平均浓度分别为 2.71、9.42、2.96 mg·L^{-1}。在 2012 年 3 月 6 日常规种植麦田径流水中总氮浓度达到峰值（26.93 mg·L^{-1}），有机种植则在发生第一次径流时（2012 年 2 月 7 日）总氮浓度出现峰值（13.77 mg·L^{-1}）。2012 年小麦常规种植径流水中总氮浓度在 2013 年 2 月 6 日出现峰值（16.50 mg·L^{-1}），有机种植在 2012 年 12 月 31 日出现峰值（4.15 mg·L^{-1}）。

2.2.3 稻麦轮作径流水中氮的流失量

对径流水中总氮流失量的动态变化规律进行分析（图 4），结果显示，基肥和追肥施用后，径流水中总氮流失量明显增加，且常规种植农田总氮流失量高于有机种植，其变化规律与总氮浓度的动态变化基本一致。

由表 2 可见，太湖流域稻季总氮径流流失总量为 8.83~36.82 kg·hm^{-2}，其中可溶态氮是径流流失氮素的主要形态，占 58.83%~90.74%，铵态氮是稻季农田地表径流可溶态氮流失的主要成分，最高可占74.85%。麦季总氮径流流失量为 9.72~41.40 kg·hm^{-2}，硝态氮流失量是麦田氮流失的主要形态，占可溶态氮流失量的 75.86%~89.15%。水稻常规种植和有机种植模式下的总氮径流流失总量分别占总施氮量的 4.58%~12.27%和 3.70%~9.19%，麦季总氮径流流失总量分别占总施氮量的 22.31%~22.48%和 7.23%~13.42%。

通过两年的试验可以看出，稻麦轮作季有机种植农田径流氮流失量、总氮流失系数明显低于常规种植，2011 年和 2012 年有机种植较常规种植总氮流失量分别减少 33.13%和 55.47%，其中稻季有机种植较常规种植总氮流失减少 19.27%~25.10%，麦季有机种植较常规种植总氮流失减排 40.29%~67.58%。

2.3 稻麦轮作径流水中的磷素及其流失分析

2.3.1 稻麦轮作农田径流水中磷浓度动态变化

稻麦轮作农田径流水中磷浓度的动态变化趋势见图 5。结果显示，径流水中总磷浓度和可溶性磷浓度变化规律一致，不同种植模式间农田径流水中总磷浓度有所差异，有机种植农田径流水中的磷浓度普遍高于常规种植和不施肥对照。在 2011 年，稻季不施肥对照、常规种植和有机种植模式下径流水中总磷平均浓度分别为0.06、0.11、0.24 mg·L^{-1}，麦季总磷平均浓度分别为 0.07、0.08、0.14 mg·L^{-1}；在 2012 年，稻季不施肥对照、常规种植和有机种植模式下径流水中总磷平均浓度分别为 0.05、0.08、0.14 mg·L^{-1}，麦季总磷平均浓度分别为 0.03、0.06、0.10 mg·L^{-1}。

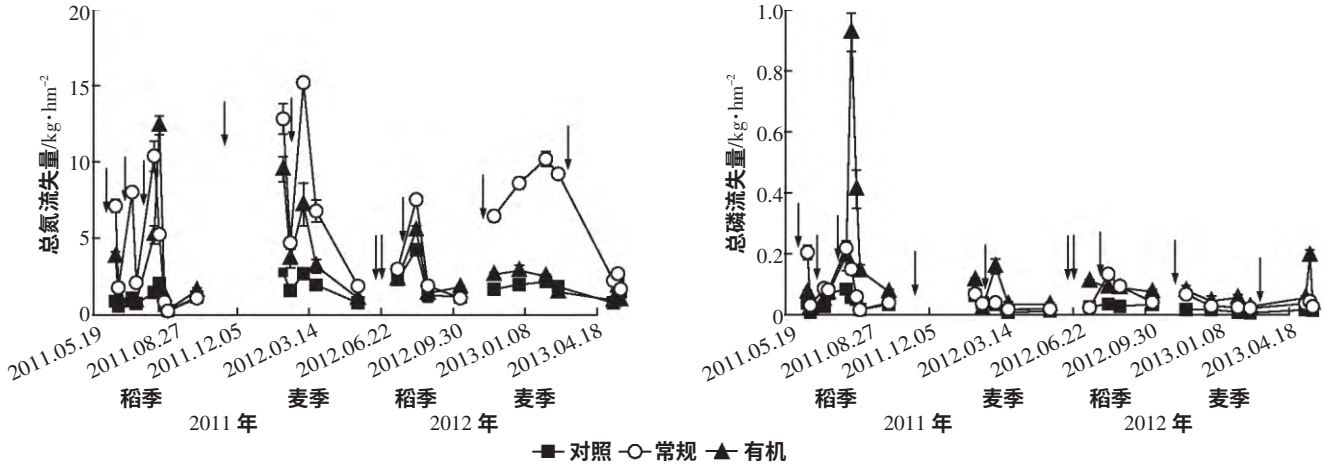


图 4 稻麦轮作径流水中氮、磷流失量的动态变化

Figure 4 Variation of N, P losses in runoff water in rice-wheat rotation system

基肥和追肥施用后径流水中总磷和可溶性磷浓度有所增加。在 2011 年 6 月 19 日稻季发生第一次径流时，常规种植径流水中总磷和可溶性磷浓度达到最高值（0.24 mg·L^{-1} 和 0.20 mg·L^{-1}），除了降雨时间（基肥施用后 1 d）离施肥时间比较近外，连续 2 d 37.5 mm 和 98.6 mm 的暴雨强度和化肥的速效性是关键因素。2011 年水稻有机种植径流水中总磷浓度则在 8 月 19 日出现峰值（0.62 mg·L^{-1}）；麦季常规种植径流水中总磷浓度在 2012 年 2 月 17 日出现峰值（0.12 mg·L^{-1}），有机种植则在 3 月 6 日出现峰值（0.29 mg·L^{-1}）。2012 年稻季常规种植径流水中总磷浓度在 2012 年 2 月 17 日出现峰值（0.12 mg·L^{-1}），有机种植则在 3 月 6 日出现峰值（0.29 mg·L^{-1}）；麦季常规和有机种植径流水中总磷浓度均在 2013 年 5 月 11 日出现峰值，分别为 0.12、0.18 mg·L^{-1}。

2.3.2 稻麦轮作径流水中磷的流失量

径流水中总磷流失量的动态变化规律见图 5。结果表明，稻麦轮作系统径流水中总磷流失量在基肥和

表 2 稻麦轮作季氮、磷径流流失总量及流失系数

Table 2 Runoff losses and loss coefficients of N and P in rice-wheat rotation system

项目	处理	氮流失量/kg·hm^{-2}				磷流失量/kg·hm^{-2}		流失系数/%	
		总氮	可溶性氮	硝态氮	铵态氮	总磷	可溶性磷	总氮	总磷
2011 年稻季	对照	8.83a	5.90a	2.60a	2.59a	0.38a	0.33a		
	常规	36.82c	33.41c	7.66c	21.39c	0.88b	0.81b	9.36b	1.28b
	有机	27.58b	25.01b	3.48b	18.72b	1.97c	1.87c	6.27a	0.86a
2012 年稻季	对照	8.98a	5.55a	2.07a	1.40a	0.13a	0.11a		
	常规	13.75c	9.23b	3.48a	3.27c	0.30b	0.28b	1.60b	0.43a
	有机	11.10b	6.53a	2.59a	2.36b	0.34b	0.31b	0.71a	0.38a
2011 年麦季	对照	9.72a	8.57a	7.64a	0.26a	0.15a	0.14a		
	常规	41.40c	39.42c	30.26c	1.70c	0.18a	0.17a	17.21b	0.13a
	有机	24.72b	23.71b	20.26b	0.41b	0.36b	0.35b	8.15a	0.18a
2012 年麦季	对照	12.33a	11.14a	9.33a	1.12b	0.11a	0.08a		
	常规	41.09b	37.48b	34.62b	1.24c	0.25b	0.22b	15.62b	0.67b
	有机	13.32a	11.42a	9.27a	0.62a	0.49c	0.47c	0.54a	0.39a
2011 年稻麦轮作	对照	18.55a	14.47a	10.24a	2.85a	0.53a	0.48a		
	常规	78.21c	72.83c	37.92c	23.09c	1.06b	0.98b	12.35b	0.89b
	有机	52.30b	48.72b	23.74b	19.13b	2.33c	2.22c	6.99a	0.60a
2012 年稻麦轮作	对照	21.31a	16.69a	11.40a	2.51a	0.25a	0.19a		
	常规	54.84c	46.78b	38.11b	4.50b	0.55b	0.50b	6.94b	0.51b
	有机	24.42b	17.95a	11.85a	2.97a	0.83c	0.78c	0.65a	0.39a

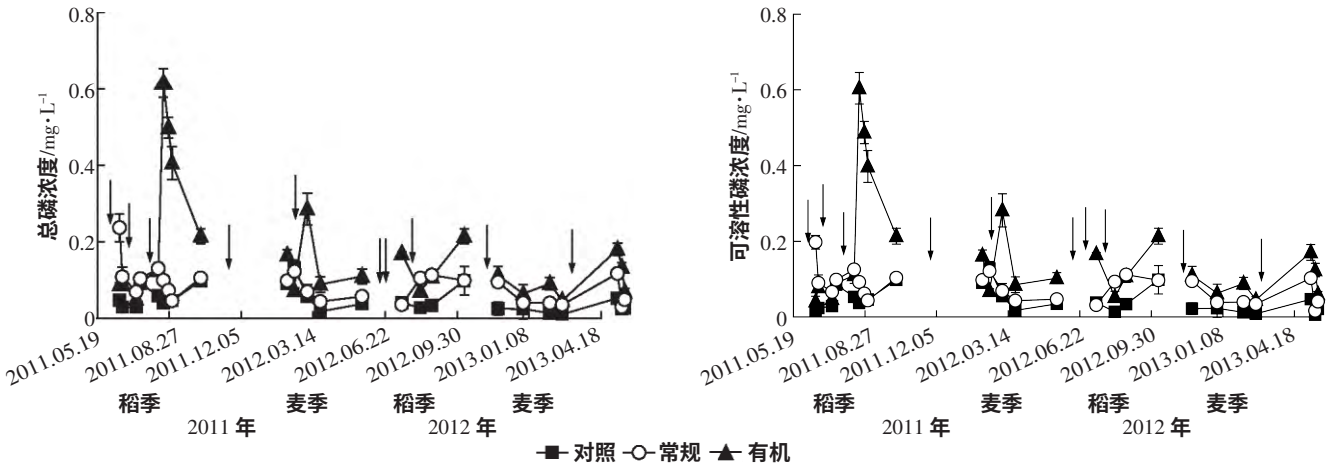


图 5 稻麦轮作径流水中磷浓度的动态变化

Figure 5 Variation of P concentrations in runoff water in rice-wheat rotation system

追肥施用后明显增加，且有机种植农田总磷流失量普遍高于常规种植，其变化规律与总磷浓度变化趋势基本一致，但是总磷流失量在各处理间的差异较小。

稻麦轮作农田径流磷流失总量见表 2。2011 年和 2012 年稻季总磷流失总量分别为 0.38~1.97 kg·hm^{-2} 和 0.13~0.34 kg·hm^{-2}，有机种植稻田径流总磷流失总量比常规种植增加11.76%~55.33%。2012 年对照和常规种植稻田径流水中总磷流失总量较 2011 年减少 65%左右；有机种植稻田径流总磷流失总量较 2011 年减少82.74%。2011 年和 2012 年麦季总磷径流流失量分别为 0.15~0.36 kg·hm^{-2} 和 0.11~0.49 kg·hm^{-2}，有机麦田总磷径流流失总量是常规麦田的 2 倍。2011 年和 2012 年有机种植模式下稻麦轮作农田总磷流失总量较常规种植分别增加 119.81%和 50.91%，但是总磷流失系数明显低于常规种植。

3 讨论

本研究发现有机种植和常规种植的作物产量有所差异，试验结果显示，有机种植和常规种植稻麦产量的比值为 0.67~1.22，与岳玉波等[13]的结果接近。Seufert 等[16]和 Ponti 等[17]的数据分析结果表明，有机和常规种植作物产量的比值为 0.75~0.80。通过分析发现，有机种植水稻和小麦年际间的产量差异较常规种植大，这是由于有机种植体系从建立到平衡需要一定的时间，产量必然会受到体系内外多种因素的影响。目前，有研究报道，有机种植转换期内作物产量增加或降低，这主要与土壤肥力、管理措施、农业生产水平、作物类型和有机生产者的经验有关[18-20]。研究表明，在 2 至 5 年内，有机种植作物产量有较大的波动，普遍低于常规种植，5 年之后的产量趋于稳定，不易受外界因素影响[16]。

径流流失是农田氮素流失最直观的一种表现形式。本研究中基肥和追肥施用使得稻麦轮作农田径流水中氮浓度明显升高，总氮径流流失量增加，尤其在发生强降雨事件后，表明降雨和施肥是影响氮素径流输出的主要因子[4,21]。如在 2012 年 8 月 10 日常规种植稻田径流水中总氮浓度出现峰值（5.95 mg·L^{-1}），主要与 8 月 8 日至 9 日出现强降雨和 8 月 5 日施用第二次追施化肥有关。因此，在作物生长季，要密切关注天气情况，尽量避免在降雨前一周内施肥。由于有机肥和化肥供肥特点的差异，常规种植模式下化肥中氮的快速释放使得其径流水中氮浓度高于有机种植和不施肥对照。两年试验结果显示，稻麦轮作系统农田总氮、可溶态氮、硝态氮和铵态氮流失总量均表现为常规种植>有机种植>对照，且有机种植模式下总氮流失系数明显低于常规种植，2011 年和 2012 年有机种植较常规种植总氮流失量分别减少 33.13%和 55.47%，表明有机种植可有效控制氮径流流失，降低氮素流失风险。夏天翔等[11]和 Shan 等[3]的研究显示，常规种植菜地氮素径流损失远高于有机种植菜地。岳玉波等[13]指出，与常规种植模式相比，有机蛙稻模式在稻季中的总氮径流流失量减少 14.95%，常规和有机种植模式下总氮径流流失量分别占总施氮量的 4.52%和 3.68%。在本研究中，稻季有机种植较常规种植总氮流失减少 19.27%~25.10%，常规种植和有机种植模式下的总氮径流流失总量分别占总施氮量的 4.58%~12.27%和 3.70%~9.19%。

年际间农田径流水中氮浓度和氮流失量有明显差异，可能与年际间降雨量的差异有关。2012 年稻季各处理间氮浓度差异较 2011 年小，常规和有机种植模式下总氮径流总量分别为 13.75、11.10 kg N·hm^{-2}，显著低于 2011 年的 36.82、27.58 kg N·hm^{-2}。这与 2012 年稻季降雨量和灌溉量减少所引起的径流量和径流次数减少密切相关，与 Zhao 等[4]的研究相似。研究显示，降雨量、灌溉、施肥情况以及稻田堤坝高度等对稻田径流流失有着显著的影响[8,22]。Zhao 等[4]采用电磁流量计精准计算得出，59.1%的稻田氮径流流失是由降雨引起的。与 2011 年相比，2012 年麦季降雨量的增多导致不施肥对照麦田氮径流流失量增加，常规种植模式下以硝态氮为形态的氮素径流流失量增加；然而，有机种植麦田氮径流流失量明显降低，据分析，可能原因是 2012 年麦季降雨主要集中在 2012 年 11 月—2013 年 2 月，较低的温度不利于有机肥氮素的矿化，有效氮释放缓慢，说明降雨时机和温度对有机种植模式下氮径流流失也有明显影响。

稻季和麦季径流水中氮流失主要形态不同，麦季径流水中氮形态以硝态氮为主，流失量占总氮径流总量的 69.59%~84.25%；而在稻季氮径流流失形态以铵态氮为主，最高约占总氮径流总量的 67.88%，与陆敏等[23]和席运官等[7]的结论一致。本研究稻田和麦田总氮径流流失量分别为 8.83~36.82 kg N·hm^{-2} 和 9.72~41.40 kg N·hm^{-2}。Zhao 等[4]和 Tian 等[24]的结果显示，太湖流域稻季径流总氮流失量分别为 2.65~21.8 kg N·hm^{-2} 和 1.0~17.9 kg N·hm^{-2}，低于麦季径流总氮流失量（33.4~58.7 kg N·hm^{-2} 和5.2~38.6 kg N·hm^{-2}），与本研究结果基本一致。麦季耕层土壤较强的硝化作用

使得硝态氮大量积累在表层，由于硝态氮易流失，导致麦季径流水中硝态氮浓度较高，而在淹水条件下，硝化作用受到抑制，反硝化作用较为活跃。有研究表明，稻季氮损失途径主要为反硝化作用和氨挥发[4]，而氮素径流流失是麦季氮损失的主要途径。稻季有机种植较常规种植总氮流失减少 19.27%~25.10%，麦季有机种植较常规种植总氮流失减排 40.29%~67.58%，表明有机种植模式对麦田氮径流流失减排的影响较水稻田大。

径流水中磷素流失与降雨、肥料种类的关系很密切[25]。磷素施用后主要吸附于土壤层表面，遇到较大的降雨后引起土壤吸附磷的流失，是径流磷素流失的主要形式。研究表明，化肥和有机肥对农田磷径流流失有着显著影响，磷素径流损失与施磷量呈显著正相关[26]，当化学磷肥施用后发生强降雨时，径流水中的磷浓度升高，而有机肥中磷的释放相对滞后，且施肥处理的径流水中水溶性磷的浓度普遍超过水体富营养化的阈值（0.05 mg·L^{-1}），磷径流流失对周边水体构成严重威胁。由于小麦常规种植追肥中不含磷，径流水中的磷素主要来源于基肥，故在第一次径流时径流水中的磷浓度相对较高。小麦有机种植麦田径流水中磷浓度最高值出现在施用追肥和较频繁降雨发生后产生的径流中，地表径流是土壤中磷流失的主要途径[26]，可溶性磷是磷流失的主要形态，占总磷径流流失总量的 72.73%~97.22%。两年的稻麦轮作试验显示，有机和常规种植模式下稻季总磷径流流失量分别为 0.34~1.97 kg P·hm^{-2} 和 0.30~0.88 kg P·hm^{-2}，麦季总磷径流流失量分别为 0.36~0.49 kg P·hm^{-2} 和 0.18~0.25 kg P·hm^{-2}。以往的研究表明，太湖流域稻季总磷径流流失总量为 0.43~1.21 kg P·hm^{-2}[27-28]，与本试验结果接近。稻麦轮作有机种植农田径流总磷和可溶性磷流失量明显高于常规种植和不施肥对照，有机种植模式总磷流失总量较常规种植增加 50.91%~119.81%，主要是由于等氮量有机肥替代化肥条件下磷素投入量增加。随有机肥施用量的增加，径流水中总磷浓度和总磷流失总量明显增加[25]。由于两种种植模式施磷量有所差异，通过比较总磷流失系数发现，常规种植农田总磷流失系数高于有机种植，表明化肥中的磷素较有机肥中的磷素更易流失。

4　结论

在太湖流域稻麦轮作系统中，有机种植模式能有效控制农田中氮素的径流损失，且有机种植对麦季氮素径流流失减少的效果优于稻季，麦季氮素流失以硝态氮为主，稻季以铵态氮为主。然而，值得注意的是，有机种植携入农田的高磷量会增加土壤中磷的积累和磷素径流流失量，尽管有机种植模式下的磷流失系数低于常规种植。降雨也是影响农田氮、磷径流流失的主要因素之一，降雨情况的不同导致年际间氮、磷流失量差异较大，为减少氮、磷径流损失，要避免在较大降雨发生前施肥。总之，在太湖地区发展有机农业应特别关注有机肥的施用风险，采取完善和科学的肥力管理措施，如种植绿肥、施用高氮低磷有机肥等以减少有机肥中磷的投入，避免磷流失的污染风险。

参考文献：

[1] 王德建, 林静慧, 夏立忠. 太湖地区稻麦轮作农田氮素淋洗特点[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9 (1): 26-28.
WANG De-jian, LIN Jing-hui, XIA Li-zhong. Characteristics of nitrogen leaching of rice-wheat rotation field in Taihu Lake Area[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9 (1): 26-28.

[2] 王　海, 席运官, 陈瑞冰, 等. 太湖地区肥料、农药过量施用调查研究[J]. 农业环境与发展, 2009 (3): 10-15.
WANG Hai, XI Yun-guan, CHEN Rui-bing, et al. Investigation on the excessive fertilizer and pesticides application in Taihu Lake Region[J]. *Agro-Environment and Development*, 2009 (3): 10-15.

[3] Shan L N, He Y F, Chen J, et al. Nitrogen surface runoff losses from a Chinese cabbage field under different nitrogen treatments in the Taihu Lake Basin, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 159: 255-263.

[4] Zhao X, Zhou Y, Min J, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake Region of China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 156: 1-11.

[5] 焦少俊, 胡夏民, 潘根兴, 等. 施肥对太湖地区青紫泥水稻土稻季农田氮磷流失的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26 (4): 495-500.
JIAO Shao-jun, HU Xia-min, PAN Gen-xing, et al. Effects of fertilization on nitrogen and phosphorus run-off loss from qingzini paddy soil in Taihu lake region during rice growth season[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26 (4): 495-500.

[6] 汪　玉, 赵　旭, 王　磊, 等. 太湖流域稻麦轮作农田磷素累积现状及其环境风险与控制对策[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33 (5): 829-835.
WANG Yu, ZHAO Xu, WANG Lei, et al. Accumulation, environmental risk and control of phosphorus in rice/wheat rotation farmland in Taihu Lake Watershed[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33 (5): 829-835.

[7] 席运官, 田　伟, 李　妍, 等. 太湖地区稻麦轮作系统氮、磷径流排放规律及流失系数[J]. 江苏农业学报, 2014, 30 (3): 534-540.
XI Yun-guan, TIAN Wei, LI Yan, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses and loss coefficients in rice-wheat rotation system in Taihu Lake Basin[J]. *Jiangsu Journal of Agriculture Science*, 2014, 30 (3): 534-540.

[8] 俞映倞, 薛利红, 杨林章. 太湖地区稻麦轮作系统不同氮肥管理模式

对麦季氮素利用与流失的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12): 2475-2482.
YU Ying-liang, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang. Nitrogen use efficiency and loss from runoff and leaching in wheat season with rice-wheat rotation system under different nitrogen management methods in Taihu lake region, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12): 2475-2482.

[9] 胡玉婷. 中国农田氮素径流、淋溶损失影响因素子分析与损失值估算[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
HU Yu-ting. Influencing factors and estimation of nitrogen runoff and leaching losses from farmlands in China[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2010.

[10] 杨旺鑫, 夏永秋, 姜小三, 等. 我国农田总磷径流损失影响因素及损失量初步估算[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2): 319-325.
YANG Wang-xin, XIA Yong-qiu, JIANG Xiao-san, et al. Influencing factors and estimation of total phosphorus runoff from farmlands in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2): 319-325.

[11] 夏天翔, 李文朝. 抚仙湖北岸有机与常规种植菜地土壤氮、磷流失及累积特征[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 560-564.
XIA Tian-xiang, LI Wen-chao. Nitrogen and phosphorus loss and accumulation in organic and conventional vegetable fields in Northern Bank of Fuxian Lake[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(3): 560-564.

[12] 杨林章, 王德建, 夏立忠. 太湖地区农业面源污染特征及控制途径[J]. 中国水利, 2004, 20: 29-30.
YANG Lin-zhang, WANG De-jian, XIA Li-zhong. Features and ways of control of non-point agricultural pollution in Taihu Area[J]. *China Water Resources*, 2004, 20: 29-30.

[13] 岳玉波, 沙之敏, 赵 峥, 等. 不同水稻种植模式对氮磷流失特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(12): 1424-1432.
YUE Yu-bo, SHA Zhi-min, ZHAO Zheng, et al. Effects of rice cultivation patterns on nitrogen and phosphorus leaching and runoff losses[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(12): 1424-1432.

[14] Benoit M, Garnier J, Anglade J, et al. Nitrate leaching from organic and conventional arable crop farms in the Seine Basin (France) [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2014, 100: 285-299.

[15] 李志芳. 有机农业土壤氮素流失与防止措施[J]. 农业环境保护, 2002, 21(1): 90-92.
LI Zhi-fang. Nitrogen loss in soil of organic agriculture and its control procedure[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2002, 21(1): 90-92.

[16] Seufert V, Ramankutty N, Foley A J. Comparing the yields of organic and conventional agriculture[J]. *Nature*, 2012, 485: 229-232.

[17] Ponti T D, B Rijk, and M K V Ittersum. The crop yield gap between organic and conventional agriculture[J]. *Agricultural Systems*, 2012, 108(4): 1-9.

[18] Gopinath K A, Saha S, Mina B L, et al. Influence of organic amendments on growth, yield and quality of wheat and on soil properties during transition to organic production[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, 82(82): 51-60.

[19] Martini E A, Buyer S B, Bryant D S, et al. Yield increases during the organic transition: Improving soil quality or increasing experience[J]. *Field Crops Research*, 2004, 86(2/3): 255-266.

[20] Caldwell B, Mohler C L, Ketterings Q M, et al. Yields and profitability during and after transition in organic grain cropping systems[J]. *Agronomy Journal*, 2014, 106(3): 871-880.

[21] Yoshinaga I, Miura A, Hitomi T, et al. Runoff nitrogen from a large sized paddy field during a crop period[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 87(2): 217-222.

[22] Zhao X, Zhou Y, Wang S Q, et al. Nitrogen balance in a highly fertilized rice wheat double-cropping system in Southern China[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(3): 1068-1078.

[23] 陆 敏, 刘 敏, 黄明蔚, 等. 大田条件下稻麦轮作土壤氮素流失研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1234-1239.
LU Min, LIU Min, HUANG Ming-wei, et al. Field study of nitrogen loss in soil with rice-wheat rotation system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5): 1234-1239.

[24] Tian Y H, Ying B, Yang L Z, et al. Nitrogen runoff and leaching losses during rice-wheat rotations in Taihu Lake Region, China[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(4): 445-456.

[25] Wang W L, Liang T, Wang L Q, et al. The effects of fertilizer applications on runoff loss of phosphorus[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 68(5): 1313-1319.

[26] 徐爱兰, 王 鹏. 太湖流域典型圩区农田磷素随地表径流迁移特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 1106-1111.
XU Ai-lan, WANG Peng. Phosphorus losses with surface runoff from farm lands in polder area around Taihu Basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3): 1106-1111.

[27] 席运官, 王 海, 徐 欣, 等. 太湖流域稻季氮磷径流流失规律与控制对策研究[C]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会 2009 年学术年会论文集. 北京: 北京航天航空大学出版社, 2009: 792-798.

[28] 张焕朝, 张红爱, 曹志洪. 太湖地区水稻土磷素径流流失及其 Olsen 磷的"突变点"[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, 28(5): 6-10.
ZHANG Huan-chao, ZHANG Hong-ai, CAO Zhi-hong. Research on phosphorus runoff losses from paddy soils in the Taihu Lake Region and its olsen-P "change-point"[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2004, 28(5): 6-10.