

亚热带区稻田土壤氮磷淋失特征试验研究

许晓光^{1,2}, 李裕元^{1*}, 孟 岑¹, 焦军霞¹, 石 辉^{2*}, 张满意¹, 吴金水¹

(1.中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2.西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘 要:土壤氮磷淋失是农业面源污染的一种重要形式。以亚热带稻田为研究对象, 采用陶土头定位观测法比较研究了施肥对稻田土壤氮(N)磷(P)淋失特征的影响。2010—2011年连续近2年的试验结果表明, 与不施肥对照(CK)相比, 施肥会显著增加稻田土壤N、P的淋失。稻田土壤N的淋失形态有显著差异($P < 0.05$), 水稻生长期(4—10月)淹水条件下淋失形态主要为 NH_4^+-N , 而闲田期(10—翌年3月)非淹水条件下则主要为 NO_3^--N 。这与土壤通气状况的变化有密切关系。研究区10—12月(闲田期)稻田P的淋失明显高于其他时期, 是稻田土壤P淋失的主要阶段。控制土壤N、P累积是降低稻田土壤N、P淋失的重要途径。

关键词:亚热带稻田土壤; 氮磷淋失; 动态特征; 陶土头采样法; 闲田期淹水条件

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)05-0991-09 doi:10.11654/jaes.2013.05.017

The Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Leaching in a Paddy Soil in Subtropics

XU Xiao-guang^{1,2}, LI Yu-yuan^{1*}, MENG Cen¹, JIAO Jun-xia¹, SHI Hui^{2*}, ZHANG Man-yi¹, WU Jin-shui¹

(1.Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Science, Changsha 410125, China; 2.College of Environment and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Nitrogen(N) and phosphorus(P) leaching in soil is regarded as one of the important aspects of agricultural nonpoint source pollution. The characteristics of N and P leaching from a double rice-cropped paddy soil in subtropics with two fertilization treatments (Fert: $195 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ season}^{-1}$ and $69 \text{ kgP} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ season}^{-1}$, and CK: no fertilizers) were studied using a suction cup sampling method. The field observations were conducted at four soil depths: 15 cm, 30 cm, 60 cm, and 90 cm from soil surface and from April 2010 to November 2011. Our results showed that compared with CK the Fert treatment significantly enhanced the leaching of N and P in paddy soil, in particular during the rice growing season. The leached N was observed significantly different ($P < 0.05$) in N forms at different observation times, i.e. ammonium N dominated during the rice growing season under water-logged condition (April-middle October) and contrarily nitrate N prevailed during the fallow season under drained condition (late October-March). This was expected to be attributed to the alteration of soil aeration. The P leaching risk in the fallow season (October-December) under drained condition was significantly greater than other periods. Therefore, the fallow season was probably the key P leaching period in the paddy soil in this area. We speculated that controlling N and P accumulation in soil and strengthening water management during the fallow season could be the effective approaches to reduce N and P leaching risk of paddy soil. Besides, it was also found that compared with the $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ and Olsen ($0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$) extraction methods, the Bray-1 ($0.03 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{F} + 0.025 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl}$) method performed the best to determine the P leaching risk of paddy soils in this study area.

Keywords: paddy soil in subtropics; nitrogen and phosphorus leaching; dynamic characteristics; suction cup sampling method; waterlogged condition during fallow season

收稿日期: 2012-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(41171396); 国家支撑计划课题(2012BAD14B17); 中国科学院创新团队项目(ZCX2-YW-T07)

作者简介: 许晓光(1987—), 男。E-mail: 510545481@qq.com

* 通信作者: 李裕元 E-mail: liyy@isa.ac.cn

石 辉 E-mail: 497394178@qq.com

土壤氮(N)磷(P)向环境的迁移是农业面源污染的主要形式,土壤中氮磷累积是导致其向环境迁移的主要原因。稻田作为我国南方亚热带地区最主要的土地利用方式之一,对于当地水环境具有重要影响。研究表明,自20世纪90年代以来南方六省区已经出现肥料过剩现象^[1],导致该地区水体出现明显的富营养化趋势^[2],研究农区氮磷迁移规律对于揭示农业面源污染机理及其科学控制具有重要意义。目前,对N、P迁移的研究主要以地表径流流失规律为主^[3-4],而对淋失机理的研究,尤其是野外观测研究很少^[5-6]。研究表明,土壤N、P向水体的迁移机制并不相同,其中N的迁移主要以溶解态硝酸盐淋失或随地表径流流失两种方式,而P随地表径流的流失主要是泥沙结合态,直接以溶解态流失的P很少^[7-9]。但是自20世纪90年代后期以来,国内外研究者均发现,随着施肥量的增加,土壤中P不断积累且有明显向深层迁移的趋势,尤其在砂土和结构发育较好的粘土上^[10-12]。土壤P的积累量与土壤径流、排水和渗漏液中P浓度的关系一直是农业和环境领域关心的问题,当土壤有效P含量超过其临界值时,土壤径流、排水和渗漏液中P含量将明显增加,从而对环境构成威胁^[5,13-14]。Nature^[15]和Science^[16]等国际权威杂志近期均发表文章认为,养分不平衡施用不仅会造成资源的浪费,还会带来严重的环境问题,这一问题在中国表现尤为突出。

湖南以南的双季稻区,由于产量高,化肥投入量也大,对区域水体环境会构成不同程度的威胁。一些研究表明,稻田氮磷不仅在水平方向上通过地表径流向地表水体迁移,而且也会在垂直方向上通过淋溶方式迁移^[17]。高茹等^[18]通过室内土柱模拟试验发现,稻田土壤中 NO_3^- -N一旦出现积累,其淋失强度甚至超过旱地土壤。但是也有研究认为,稻田土壤磷素的淋失是很低的,其原因主要在于土壤对磷的强烈固持作用和相对较低的土壤导水率^[19-20]。以往的研究也认为,由于稻田长期处于积水状态,土壤一般处于嫌气环境,硝化作用十分微弱,硝态氮的淋失也十分有限^[21-22]。事实上淹水也为土壤氮磷的淋溶提供了有利条件,可能导致氮磷的累积淋失量增加,但国内外关于稻田N、P(尤其是P)淋失特征的研究还相对较少,其环境影响也尚不十分清楚^[10-11,23],这在很大程度上制约了稻田环境效应的精确评价。基于此,本文主要通过野外试验研究不同层次土壤溶液氮磷浓度的变化,试图探讨施肥对亚热带稻田土壤氮磷淋溶迁移变化特征的影响,为稻田土壤养分的科学管理以及农业

面源污染防控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖南省长沙县金井镇($113^{\circ}17.9' \sim 113^{\circ}25.9'E, 28^{\circ}24.3' \sim 28^{\circ}38.6'N$),属于典型亚热带湿润季风气候,为双季稻种植区,年均降水量1300~1400 mm,年均气温17.2℃,无霜期274 d,年日照时数1663 h,相对湿度80%左右。区内海拔高度为45~350 m,相对高差一般在100 m以内,为典型的江南红壤丘岗地貌。本试验所选地块位于中国科学院亚热带农业生态研究所长沙农业环境观测研究站内,土壤为水稻土,母质为河流冲积物,土壤基本理化性质如下:pH值5.53,砂粒($>0.05 \text{ mm}$)13.4%,粘粒($<0.002 \text{ mm}$)28.8%,质地为粉砂壤土,土壤有机质 $32.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,阳离子交换量(CEC) $6.63 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤全氮 $2.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Olsen-P $22.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。肥力水平中等,双季稻年产量水平为 $22.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.2 试验设计与采样

在研究区选择地形平整、地力均匀的稻田,面积约1400 m^2 ,设置施肥(Fert)和不施肥(CK)2个处理3次重复,为便于田间管理,试验小区排列为2个裂区,即3个施肥处理小区排在一起,3个不施肥处理小区排在一起,小区之间用田埂隔开,田埂用塑料薄膜覆盖,以防止小区之间田面水串流和渗透。施肥处理每季施肥量为:氮肥 $195 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2}$,磷肥 $69 \text{ kgP} \cdot \text{hm}^{-2}$,钾肥 $57.5 \text{ kgK} \cdot \text{hm}^{-2}$,早稻与晚稻施肥量一样,其中70%氮肥和全部的磷、钾肥在插秧前犁田时作基肥施入(早稻和晚稻分别为4月中旬和7月中旬),30%的氮肥作追肥在分蘖期(插秧后3~4周)施入(撒施),早稻和晚稻的追肥时间分别为5月上旬和8月上旬。稻田其他管理方式同一般大田。于2010年4月插秧后布设陶土头土壤溶液采集器,每小区设置1个采样点,2个处理3次重复共计设置6个采样点,每个点设置4个深度,即15、30、60、90 cm,定期抽取不同深度的土壤溶液,并分析其不同形态氮磷含量的动态变化。土壤溶液样品抽取以后一般要在24 h之内进行分析,不能及时分析的采用 -18°C 冷冻保存,待分析时再解冻。采用陶土头法所抽取的水样均为清澈液体,不必进行抽虑。试验采样观测从2010年4月开始,根据作物生长期和田间管理安排采样时间,2010年度共采集4次水样,采样时间分别为2010年4月22日(早稻插秧期,淹水)、6月16日(早稻扬花灌浆期,淹

水)、9月30日(晚稻灌浆期,淹水)、12月24日(闲田期,排水)。2011年采集6次,时间为2011年4月7日(早稻插秧期,淹水)、6月5日(早稻孕穗期,淹水)、7月30日(晚稻分蘖期,淹水)、8月30日(孕穗期,淹水)、10月4日(晚稻灌浆期,淹水)、11月11日(闲田期,排水)。由于采样一般只能在有较大降雨(一般 $>30\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$)的时候方能同时采到4个土层的水样(尤其在闲田期),因此两年的采样时间不尽一致。此外,为了探讨土壤氮磷含量与土壤溶液氮磷浓度的关系,分别于2011年3月、6月和7月在采集土壤溶液的同时采集了3次表层(0~20 cm)土样,用于测定土壤浸提态氮磷的含量。

1.3 室内分析与数据统计

土壤溶液测定指标包括总氮(TN)、总磷(TP)、铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)以及溶解态无机磷(DP),共5项指标。 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 直接采用流动注射仪(FIA Star 5000)法测定;TN采用碱性过硫酸钾消煮-流动注射仪法测定;DP采用钼锑抗比色法测定;TP采用过硫酸钾消煮-钼锑抗比色法测定。土样分析均采用新鲜土样, NH_4^+-N 和 NO_3^--N 采用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl浸提-流动注射仪法测定;土壤有效磷测定采用浸提-钼蓝比色法测定,为进一步探讨能较好反映磷淋失特征的磷素测定指标,本文采用3种浸提方法,即Olsen法($\text{pH}8.5$ 、 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHCO_3 浸提)、 CaCl_2 法($0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2 浸提)和Bray-1法($0.03\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{NH}_4\text{F}+0.025\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl 混合溶液浸提)^[24]。土壤溶液各测定指标之间存在如下关系:

$$\text{TN}=\text{N}_{\text{am}}+\text{N}_{\text{ni}}+\text{N}_{\text{o}} \quad (1)$$

$$\text{TP}=\text{DP}+\text{OP} \quad (2)$$

式中:TN、 N_{am} 、 N_{ni} 与 N_{o} 分别为总氮、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和有机氮;TP、DP和OP分别为总磷、溶解态无机磷和有机磷。

本文所用数据为田间3个观测点的均值,数据用Excel 2010初步计算与做图,用SPSS 19.0统计软件对施肥与不施肥两个处理以及同一处理不同阶段的各个指标分别进行方差分析,以比较分析施肥和环境条件对氮磷淋失特征的影响,差异达到统计显著水平($P<0.05$)的则进一步进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 稻田土壤氮素迁移变化特征

2.1.1 土壤溶液不同形态氮素含量的动态变化

2010—2011年连续观测结果表明,施肥处理土

壤溶液中TN与 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 浓度总体上明显高于不施肥对照(CK)处理,其中施肥处理在2010年6月(早稻扬花灌浆期)和10月(晚稻灌浆期)、2011年6月(早稻孕穗期)、7月(晚稻分蘖期)和11月(冬季闲田期)浓度均明显较高(图1),而不施肥处理2010年10月、2011年3月和7月土壤溶液中TN浓度较其他月高。2年的试验结果均表明,4—11月(水稻生长期)施肥处理土壤溶液中 NH_4^+-N 浓度明显高于其他阶段,其中2010年6月最高达到 $8.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,比CK($0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)高约14.2倍;2011年以6月最高,为 $4.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,比CK($0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)高约50.1倍。可见,施肥会显著增加土壤溶液中 NH_4^+-N 的浓度,这与水稻生长期期间氮肥(尿素)的施用以及高温导致土壤养分的矿化释放有密切关系。

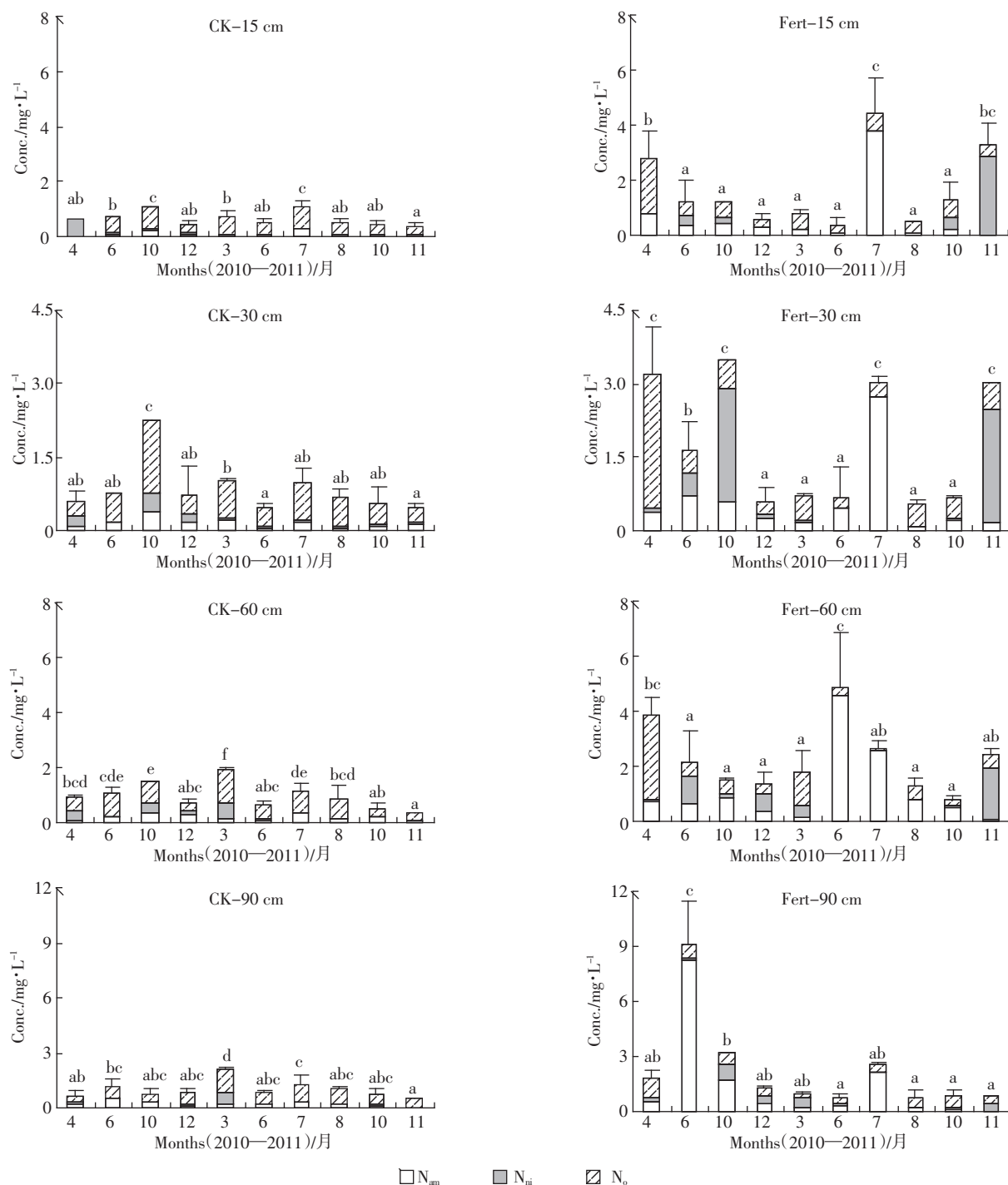
NO_3^--N 的观测结果表明,在水稻生长期土壤溶液 NO_3^--N 浓度均较低,均未超过 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。但在水稻收获以后的闲田期, NO_3^--N 浓度有较明显的升高趋势,且施肥处理 NO_3^--N 浓度显著高于CK,其中施肥处理土壤溶液 NO_3^--N 浓度在2010年10月和2011年11月为当年最大,均为 $2.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,分别比CK高5.3倍和30.7倍,表明施肥也会增加稻田土壤溶液的 NO_3^--N 浓度,并增加氮素的淋失风险,这与前人的观测结果基本一致^[25-26],因此控制稻田施肥是减少氮素淋失环境风险的关键。另外,由于稻田土壤肥力水平一般要比相邻区域的旱地土壤高,尤其是土壤有机质含量较高^[27-28],因此闲田期稻田土壤在好气条件下矿化和硝化作用产生的 NO_3^--N 淋失会有不同程度的增加,所以从环境保护的角度而言,加强闲田期土壤水分的管理以降低土壤氮淋失对地下水环境的负面影响也值得关注。

2.1.2 土壤溶液不同形态氮素含量的垂直变化

将2年的数据分为早稻期、晚稻期和闲田期3个阶段以进一步比较分析其垂直变化规律。结果表明,各阶段施肥处理各层不同形态N的含量总体上均高于CK(表1),这与前人的研究结果基本一致^[29-31]。深层土壤溶液N含量越高意味着N的淋失强度越高,对地下水环境的影响也就越大,3个阶段90 cm深度土壤溶液的TN含量均显著高于表层(15 cm),表明研究区稻田土壤在不同阶段均存在显著的N淋失。早稻阶段施肥处理各层次TN变幅为 $1.5\sim 3.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其中最高值($3.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)出现在90 cm深度,比CK高3.4倍,其中 NH_4^+-N 为 $3.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,占TN的77.7%;晚稻施肥处理各层TN含量变化较小,变幅为 $1.6\sim 1.9$

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 比 CK 高 0.5~1.4 倍, 其中 NH_4^+-N 占 46.8%~75.4%; 闲田期施肥处理 TN 含量的垂直变化也相对较小, 变幅为 1.1~1.8 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中 60 cm 以上各层比 CK 有明显增加, 而 90 cm 深度则与 CK 的差异不明

显, 表明闲田期氮素淋失强度要低于水稻生长期。但是从各层土壤溶液中 N 素形态的变化来看, 水稻生长期各层 TN 中 NH_4^+-N 的比例显著较高 (>60%), 表明该阶段 N 的淋失形态以 NH_4^+-N 为主, 而闲田期 60



图中误差线为 TN 标准差, 不同月份之间标有不同字母的表示 TN 的统计差异显著 ($P < 0.05$)。CK 和 Fert 分别表示不施肥对照和施肥处理
The bars show standard errors of TN. Columns signed by different same letters indicated significant difference at 0.05 level among different months for TN.

CK and Fert indicate treatments with or without fertilization

图 1 稻田不同形态氮素含量在各土层的动态变化

Figure 1 Dynamic changes in soil ammonium N (N_{am}), nitrate N (N_{ni}), and total N (TN) concentrations at different soil depth of paddy field

表 1 稻田不同阶段土壤溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 以及总氮(TN)平均浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的垂直变化Table 1 The vertical changes in mean N concentrations($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, and total nitrogen(TN) of soil solution in different stages of paddy field

N 形态 N forms	深度 Depth/cm	早稻期 Early rice(Apr-Jun)		晚稻期 Late rice(Jul-Oct)		闲田期 Fallow(Nov-Mar)	
		CK	施肥 Fert	CK	施肥 Fert	CK	施肥 Fert
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	15	0.091a	0.416a	0.141	1.311	0.056	0.188
	30	0.093a	0.545a	0.166	0.905	0.160	0.196
	60	0.121a	1.628ab	0.247	1.172	0.155	0.208
	90	0.287b	3.775b	0.223	1.068	0.186	0.245
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	15	0.193	0.156	0.036	0.170	0.055	0.730
	30	0.100	0.179	0.092	0.524	0.101	0.622
	60	0.149	0.390	0.079	0.047	0.272	0.858
	90	0.059	0.131	0.031	0.203	0.149	0.422
TN	15	0.615	1.612	0.785	2.051	0.490	1.337
	30	0.593	1.824	1.062	1.935	0.736	1.235
	60	0.806	3.487	1.010	1.553	1.074	1.694
	90	0.848	4.647	1.026	1.523	1.117	1.128

注:表内同一处理阶段数据标有不同字母的表示不同土层间统计差异达到显著水平($P<0.05$)。

cm 以上各层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占 TN 的比例明显高于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 自上而下依次为 62%(15 cm)、57%(30 cm)、55%(60 cm)和 38%(90 cm),表明该阶段氮素的淋失形态主要为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 。闲田期随着土层深度的增加, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在 TN 中所占比例逐渐降低的原因主要与土壤的通气状况有关,越向下土壤的硝化作用越微弱。

2.2 稻田土壤磷素迁移变化特征

2.2.1 土壤溶液磷素含量动态变化

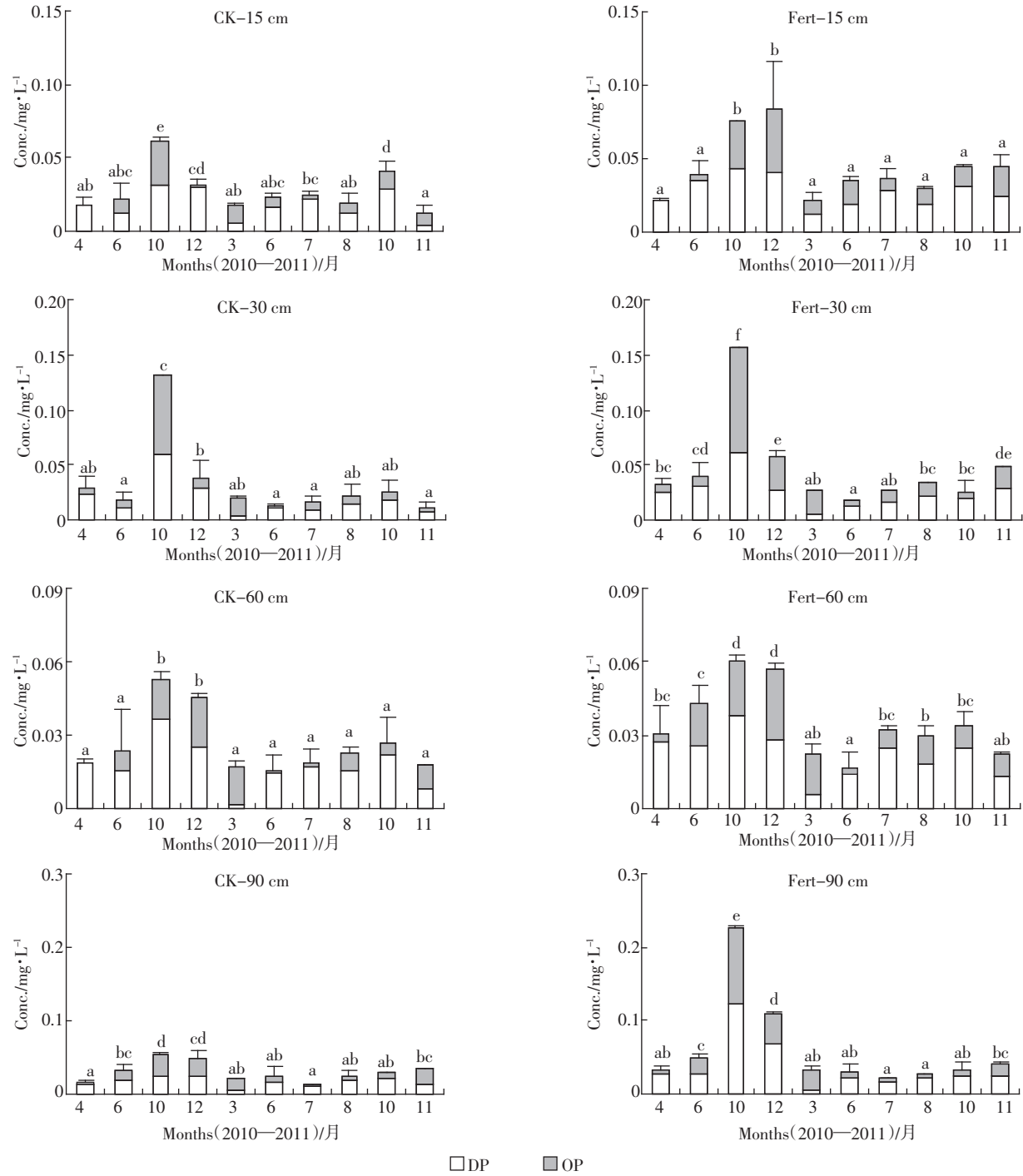
土壤溶液 P 含量的动态变化结果(图 2)表明,无论施肥与否,各层土壤溶液 TP、DP 含量均具有十分明显而且基本一致的动态规律,即每年的 10—12 月 TP、DP 含量为全年最高,而 3—6 月则为全年最低,意味着稻田土壤 P 的淋失与当季的施肥并没有十分显著的直接关系,但是与稻田的水分管理有着密切关系,稻田 P 的淋失风险可能主要发生于闲田期。根据调查,研究区双季稻的耕作与施肥一般在 3—4 月(早稻)和 7 月(晚稻),而 10—12 月为晚稻成熟期和闲田期。有研究表明,在水稻生长期,淹水条件下土壤本身的渗透性与土壤养分的矿化作用均相对较低,加之水稻土本身对 P 的强烈固持作用,因此水稻生长期能观测到的 P 淋失现象十分微弱^[32-33]。但是在水稻生长晚期和闲田期,由于土壤处在好气条件下,其理化性质与淹水阶段相比发生明显变化:通气性增强、氧化还原电位(Eh)和 pH 升高,土壤矿化作用增强,导致土壤中矿化释放的有效磷含量有所增加^[34],因此淋失风险增大。另一方面,闲田期土壤含水量的降低会导

致土壤的不均匀收缩,从而在土体内形成许多不规则的裂隙,以至引起在降雨和淹水时形成优先流,导致 P 淋失强度的增大^[35]。因此,闲田期土壤水分条件和土壤结构的变化是引起稻田土壤磷素淋失的主要因素,关注闲田期土壤水分的管理,适当延长稻田土壤的淹水时间,可在一定程度上降低磷素淋失对地下水环境产生的负面影响。但是,该结果尚待进一步的试验验证,而且稻田水分管理也应该综合考虑各方面的因素,比如氮素淋失、温室气体排放等。

图 2 也表明,与 CK 相比,施肥处理各层土壤溶液 TP、DP 含量普遍显著较高($P<0.05$),表明施肥在不同程度上增加了土壤 P 的淋失风险,加之闲田期是稻田磷素淋失的主要阶段,因而从降低面源污染和环境保育的角度而言,适当减少施肥以降低土壤氮磷的累积与尽量保持淹水条件是降低稻田土壤磷素淋失的两个重要方面。

2.2.2 土壤溶液磷素含量的垂直变化

对早稻期、晚稻期和闲田期 3 个阶段土壤溶液 TP 和 DP 垂直变化的分析结果(表 2)表明,除晚稻阶段 TP 和 DP 均以 30 cm 深度为最高以外,其余阶段均以 90 cm 深度 P 浓度为最高,表明研究区稻田均存在明显的 P 淋失现象,而且施肥处理一般都高于对照处理,进一步表明施肥会显著增强 P 的淋失风险,与以往一般认为稻田土壤固 P 能力较强^[36]、P 淋失一般较弱的结论^[6,32-33]有所不同,这可能有两个方面的原因:一是以往的研究主要以土柱模拟试验为主,试验



图中误差线为 TP 标准差,不同月份之间标有不同字母的表示 TP 的统计差异显著($P<0.05$)。CK 和 Fert 分别表示不施肥对照和施肥处理
The bars show standard errors of TP. Columns signed by different same letters indicate significant difference at 0.05 level among different months for TP.
CK and Fert indicate treatments with or without fertilization.

图 2 稻田土壤溶液溶解态磷(DP)和总磷(TP=DP+OP,OP 为有机磷)浓度在各土层的动态变化
Figure 2 Dynamic changes in the concentrations of dissolved P(DP) and total P(TP =DP+OP,OP indicates organic P)
in soil solution at different depth of paddy field

土柱的土壤结构与实际有一定差异(主要是垂直裂隙);二是多数研究者主要关注水稻生长期内^[32-33,37],而对水稻休闲期的研究较少。从本文的试验结果来看,稻田休闲期磷素淋失的环境风险也不容低估,至

表 2 稻田不同阶段土壤溶液总磷(TP)与溶解态无机磷(DP)平均浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的垂直变化Table 2 The vertical changes in mean P concentrations($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) of total P and dissolved inorganic P(DP) of soil solution in different stages of paddy field

N 形态 N forms	深度 Depth/cm	早稻期(4—6 月)		晚稻期(7—10 月)		闲田期(11—3 月)	
		CK	施肥	CK	施肥	CK	施肥
DP	15	0.016	0.024	0.023	0.030	0.012	0.026
	30	0.015	0.022	0.023	0.028	0.014	0.020
	60	0.016	0.022	0.021	0.026	0.012	0.016
	90	0.017	0.025	0.019	0.041	0.017	0.029
TP	15	0.021	0.031	0.033	0.045	0.019	0.050
	30	0.020	0.029	0.043	0.058	0.024	0.044
	60	0.019	0.029	0.028	0.038	0.028	0.035
	90	0.024	0.036	0.028	0.067	0.031	0.057

于淋失强度的大小尚待进一步深入研究。

2.3 土壤溶液 N、P 浓度与土壤浸提态 N、P 含量的相关性

对 2011 年 3、6 月和 7 月 3 次土壤与溶液 N、P 含量的 Pearson 相关性分析结果表明,表土铵态氮、硝态氮以及全氮含量与各层土壤溶液中不同形态 N 浓度的关系有一定的正相关关系,但统计差异均不显著($P>0.05$,结果略),其原因可能在于水田土壤氮素形态的易变性,如淹水条件下土壤硝态氮很容易随下渗水淋失,并在微生物作用下发生反硝化^[38-39],而水旱交替条件下更容易发生有机质的矿化和硝化^[34,40]。对 P 的相关性分析结果表明,在测定的 Olsen-P、 CaCl_2 -P 以及 Bray1-P 3 种浸提态 P 中,与土壤溶液 P 浓度正相关性较好的是 Bray1-P 和 Olsen-P,而与 CaCl_2 -P 的相关性则相对较差(表 3)。这可能与 CaCl_2 -P 测定

值较低、时空变异性相对偏大有一定关系,其中与 Bray1-P 在 15 cm 和 30 cm 达到统计显著水平($P<0.05$),表明土壤有效磷的累积会导致稻田 P 淋失强度的显著增加,因此控制稻田土壤磷素的累积是降低 P 淋失风险的关键。上述结果同时表明,采用 Bray-1 法测定土壤浸提态 P 的含量要比采用 Olsen 法和 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ CaCl}_2$ 法更能反映研究区稻田土壤 P 的淋失风险。

3 结论

(1)近 2 年的田间试验结果表明,施肥会显著增加亚热带稻田土壤 N、P 的淋失风险,其中淹水条件对稻田不同时期土壤 N 素的淋失形态有显著影响,水稻生长期(4—11 月)淹水条件下 N 的淋失以 NH_4^+-N 为主,而闲田期(12—翌年 3 月)N 的淋失以 NO_3^--N

表 3 各层土壤溶液磷素浓度与表层 0~20 cm 3 种土壤浸提态磷的 Pearson 相关性

Table 3 The pearson correlation between phosphorus concentration in soil solution at different soil depths and three extractable phosphorus contents of surface soil(0~20 cm)

土壤溶液磷素指标 P index in soil solution	土层深度 Soil depth/cm	土壤浸提态磷指标 Indexes of soil extractable P		
		Bray1-P	CaCl_2 -P	Olsen-P
DP	15	0.553*	0.027	0.409
	30	0.556**	0.127	0.390
	60	0.301	-0.151	0.203
	90	0.254	0.015	0.069
TP	15	0.587**	-0.034	0.295
	30	0.187	-0.25	0.179
	60	0.253	-0.446	0.114
	90	-0.201	-0.222	-0.247

注:* 表示相关性达到统计显著水平($P<0.05$);** 表示相关性达到统计极显著水平($P<0.01$);DP 与 TP 分别表示土壤溶液中的水溶性无机磷和总磷。

为主。研究区 10—12 月稻田 P 的淋失明显高于其他时期,是稻田土壤 P 淋失的主要阶段,因此适当延长闲田期的淹水时间可在一定程度上降低磷素淋失的风险。

(2)与 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 法与 Olsen 法相比, Bray-1 法测定的土壤浸提态磷含量能更准确地反映研究区稻田土壤中 P 的淋失风险。

致谢:魏红安、杨蕊、高茹、张卫东等在野外试验布设、采样以及室内分析等方面陆续参与了许多工作,对他们表示真诚的感谢!

参考文献:

- [1] 鲁如坤,时正元,施建平.我国南方 6 省区农田养分平衡现状评价和动态变化研究[J].中国农业科学,2000,33(2):63-67.
LU Ru-kun, SHI Zheng-yuan, SHI Jian-ping. Nutrient balance of a-groecosystem in six provinces in Southern China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(2):63-67.
- [2] 黄文钰,吴延根,舒金华.中国主要湖泊水库的水环境问题与防治建议[J].湖泊科学,1998,10(3):83-90.
HUANG Wen-yu, WU Yan-gen, SHU Jin-hua. Hydrographical environmental problems and countermeasures of main lakes and reservoirs in China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1998, 10(3):83-90.
- [3] 张志剑,董亮,朱荫涓.水稻田面水氮素的动态特征、模式表征及排水流失研究[J].环境科学学报,2001,21(4):475-480.
ZHANG Zhi-jian, DONG Liang, ZHU Yin-mei. The dynamic characteristics and modeling of nitrogen in paddy field surface water and nitrogen loss from field drainage[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(4):475-480.
- [4] 梁新强,田光明,李华,等.天然降雨条件下水稻田氮磷径流流失特征研究[J].水土保持学报,2005,19(1):59-63.
LIANG Xin-qiang, TIAN Guang-ming, LI Hua, et al. Study on characteristic of nitrogen and phosphorus loss from rice field by natural rainfall runoff[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1):59-63.
- [5] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, et al. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broad balk experiment[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24:904-910.
- [6] 单艳红,杨林章,颜廷梅,等.水田土壤溶液磷氮的动态变化及潜在的环境影响[J].生态学报,2005,25(1):115-121.
SHAN Yan-hong, YANG Lin-zhang, YAN Ting-mei, et al. The variation of P&N contents in paddy soil water and its environmental effect[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1):115-121.
- [7] Pote D H, Daniel T C, Sharpley A P, et al. Relating extractable soil phosphorus to phosphorus losses in runoff[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60:855-859.
- [8] McDowell R W, Sharpley A N. Approximating phosphorus release from soils to surface runoff and subsurface drainage[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30:508-520.
- [9] 李裕元,邵明安,郑纪勇,等.降雨强度对黄绵土坡地磷流失特征影响实验研究[J].农业工程学报,2007,23(4):39-46.
LI Yu-yuan, SHAO Ming-an, ZHENG Ji-yong, et al. Experimental study on the impacts of rainfall intensity on phosphorus loss from loessial slope land[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(4):39-46.
- [10] Hooda P S, Rendell A R, Edwards A C, et al. Relating soil phosphorus indices to potential release to water[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29:1166-1171.
- [11] Brock E H, Ketterings Q M, Kleinman P J A. Phosphorus leaching through intact soil cores as influenced by type and duration of manure application[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 77(3):269-281.
- [12] Zhang M K. Effects of soil properties on phosphorus subsurface migration in sandy soils[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(5):599-610.
- [13] 钟晓英,赵小蓉,鲍华军,等.我国 23 个土壤磷素淋失风险评估 I. 淋失临界值[J].生态学报,2004,24(10):2275-2280.
ZHONG Xiao-ying, ZHAO Xiao-rong, BAO Hua-jun, et al. The evaluation of phosphorus leaching risk of 23 Chinese soils: I. Leaching criterion[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10):2275-2280.
- [14] 魏红安,李裕元,杨蕊,等.红壤磷素有效性衰减过程及磷素农学与环境学指标比较研究[J].中国农业科学,2012,45(6):1116-1126.
WEI Hong-an, LI Yu-yuan, YANG Rui, et al. The declining process of soil phosphorus availability and comparison between agronomic and environmental indexes in red soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(6):1116-1126.
- [15] Gilbert N. The disappearing nutrient[J]. *Nature*, 2009, 461:716-718.
- [16] Vitousek P M, Naylor R, Crews T, et al. Nutrient imbalances in agricultural development[J]. *Science*, 2009, 324:1519-1520.
- [17] 孙瑞娟,王德建,林静慧,等.长期施用有机-无机肥对太湖流域土壤肥力的影响[J].土壤,2009,44(3):384-388.
SUN Rui-juan, WANG De-jian, LIN Jing-hui, et al. Effects of long term integrated fertilization with organic manure and chemical fertilizers on soil nutrients in Taihu Lake Region[J]. *Soils*, 2009, 44(3):384-388.
- [18] 高茹,李裕元,杨蕊,等.亚热带主要耕作土壤硝态氮淋失特征试验研究[J].植物营养与肥料学报,2012,18(4):839-852.
GAO Ru, LI Yu-yuan, YANG Rui, et al. Study on nitrate leaching characteristics in arable soils in subtropical region[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(4):839-852.
- [19] 隋红健,杨邦杰,张家炳.入渗条件下土壤中磷离子迁移的数值模拟[J].环境科学学报,1996,16(3):302-308.
SUI Hong-jian, YANG Bang-jie, ZHANG Jia-bing. Numerical simulation of the transport of phosphate in unsaturated soil during infiltration[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1996, 16(3):302-308.
- [20] Linquist B A, Ruark M D, Hill J E. Soil order and management practices control soil phosphorus fractions in managed wetland ecosystems[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 90:51-62.
- [21] 张朝,车玉萍,李忠佩.水稻土模拟土柱中肥料氮素的迁移转化特征[J].应用生态学报,2011,22(12):3236-3242.
ZHANG Zhao, CHE Yu-ping, LI Zhong-pe. Translocation and transformation characteristics of fertilizer nitrogen in paddy soil: A study

- with simulated soil column[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(12):3236-3242.
- [22] 易 军, 张晴雯, 杨正礼. 宁夏引黄灌区稻田氮素浓度变化与迁移特征[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4):771-777.
- YI Jun, ZHANG Qing-wen, YANG Zheng-li. Concentration change and migration characteristics of nitrogen in the paddy field of Ningxia Yellow River irrigation area[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4):771-777.
- [23] Stamm C, Flühler H, Gächter R, et al. Preferential transport of phosphorus in drained grassland[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27:515-522.
- [24] Carter M R, Gregorich E G. Soil sampling and methods of analysis, canadian society of soil science[J]. *The Chemical Rubber Company Press*, 2004.
- [25] Bergstrom L, Brink N. Effects of differentiated applications of fertilizer N leaching losses and distribution of inorganic N in soil[J]. *Plant and Soil*, 1986, 93(3):333-345.
- [26] 左海军, 张 奇, 徐力刚, 等. 农田氮素淋溶损失影响因素及防治对策研究[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(12):83-89.
- ZUO Hai-jun, ZHANG Qi, XU Li-gang, et al. Study of influence factors and prevention countermeasures on nitrogen leaching in arable soil [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2008, 30(12):83-89.
- [27] 章家恩, 刘文高, 胡 刚. 不同土地利用方式下土壤微生物数量与土壤肥力的关系[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2):140-143.
- ZHANG Jia-en, LIU Wen-gao, HU Gang. The relationship between quantity index of soil microorganisms and soil fertility of different land use systems[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(2):140-143.
- [28] 李 玲, 肖和艾, 童成立, 等. 培养条件下旱地和稻田土壤活性有机碳对外源有机底物的响应[J]. 生态学报, 2008, 27(12):2178-2183.
- LI Ling, XIAO He-ai, TONG Cheng-li, et al. Responses of active organic carbon in upland soil and paddy soil of red earth region to exogenous organic substrates: A laboratory incubation study[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(12):2178-2183.
- [29] 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]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(5):692-698.
- [30] 单艳红, 杨林章, 沈明星, 等. 长期不同施肥处理水稻土磷素在剖面的分布与移动[J]. 土壤学报, 2005, 42(6):970-976.
- SHAN Yan-hong, YANG Lin-zhang, SHEN Ming-xing, et al. Accumulation and downward transport of phosphorus in paddy soil in long-term fertilization experiments[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(6):970-976.
- [31] 贾俊仙, 李忠佩, 刘 明, 等. 施用氮肥对不同肥力红壤性水稻土硝化作用的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(4):329-333.
- JIA Jun-xian, LI Zhong-pei, LIU Ming, et al. Nitrification in red paddy soils different in soil fertility under N fertilization[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(4):329-333.
- [32] 谢学俭, 冉 炜, 沈其荣. 淹水条件下水稻田中磷的淋溶研究[J]. 土壤, 2003, 35(6):506-509.
- XIE Xue-jian, RAN Wei, SHEN Qi-rong. P loss through vertical leaching form paddy field under submerged conditions [J]. *Soils*, 2003, 35(6):506-509.
- [33] 周全来, 赵牧秋, 鲁彩艳, 等. 磷在稻田土壤中的淋溶和迁移模拟研究[J]. 土壤, 2006, 38(6):734-739.
- ZHOU Quan-lai, ZHAO Mu-qiu, LU Cai-yan, et al. Simulation of leaching and transport of P in paddy soil[J]. *Soils*, 2006, 38(6):734-739.
- [34] 郝瑞军, 李忠佩, 车玉萍. 水分状况对水稻土有机碳矿化动态的影响[J]. 土壤, 2006, 38(6):750-754.
- HAO Rui-jun, LI Zhong-pei, CHE Yu-ping. Effect of moisture regime on dynamics of soil organic carbon mineralization[J]. *Soils*, 2006, 38(6):750-754.
- [35] Djodjic F, Borling K, Bergström L. Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33:678-684.
- [36] 张慧敏, 章明奎. 氮磷在水稻土不同发生层中的穿透性研究[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(8):48-51.
- ZHANG Hui-min, ZHANG Ming-kui. Transport of phosphorus and nitrogen species in different genetic horizons of paddy soils[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2008, 30(8):48-51.
- [37] 王彦彦, 俞双恩, 肖梦华, 等. 淹水稻田抽穗开花期氮磷变化及最佳排水时机[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(3):270-274.
- WANG Yan-yan, YU Shuang-en, XIAO Meng-hua, et al. Changes of nitrogen and phosphorus at sprouting and blooming stage and optimal drainage time in flooded paddy field[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2012, 40(3):270-274.
- [38] 高效江, 胡雪峰, 王少平, 等. 淹水稻田中氮素损失及其对水环境影响的试验研究[J]. 农业环境保护, 2001, 20(4):196-198, 205.
- GAO Xiao-jiang, HU Xue-feng, WANG Shao-ping, et al. Loss of nitrogen in rice field and its influence on water environment [J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(4):196-198, 205.
- [39] 王小治, 尹微琴, 蔡玉琪, 等. 施用不同尿素对稻季不同层次土壤溶液中氮形态的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4):1516-1521.
- WANG Xiao-zhi, YIN Wei-qin, CAI Yu-qi, et al. Nitrogen forms in soil solution at different depths as affected by types of urea fertilizers applied in paddy season[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(4):1516-1521.
- [40] 张丽娟, 巨晓棠, 张福锁, 等. 土壤剖面不同层次标记硝态氮的运移及其后效[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9):1964-1972.
- ZHANG Li-juan, JU Xiao-tang, ZHANG Fu-suo, et al. Movement and residual effect of labeled nitrate-N in different soil layers[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9):1964-1972.