

洱海北部地区不同氮、磷处理对稻田田面水氮磷动态变化的影响

施泽升¹, 续勇波^{2*}, 雷宝坤³, 刘宏斌⁴

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 云南农业大学烟草学院, 昆明 650201; 3. 云南省农业科学院农业环境资源研究所, 昆明 650205; 4. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 水稻种植期的田面水氮、磷浓度是稻田 N、P 径流流失、N 素的氨挥发等各种损失途径的关键控制因子。通过田间定点实验监测与分析研究了洱海北部地区水稻土田面水氮磷浓度的动态变化特征。结果表明: 总氮(TN)以及可溶性总氮(DTN)在施基肥后是先升后降的趋势, 1~3 d 内达到峰值, 然后迅速下降, 9 d 后含量差异趋同; 在施入孕穗肥后, TN 及 DTN 浓度立即到达峰值后迅速下降, 在 9 d 后含量很少, 并趋于稳定; DTN 浓度变化趋势可用二次曲线模型 $Y=AX^2+BX+C$ 来描述; 铵态氮(NH_4^+-N)浓度变化在不同施肥时期有明显区别, 施基肥后田面水 NH_4^+-N 浓度在 3~5 d 内到顶点, 而在追肥期 1~2 d 内就到顶峰; 田面水总磷(TP)和可溶性总磷(DTP)浓度施入基肥后呈指数型下降, 在施肥 12 d 后差异趋同, 其变化都可用指数模型($Y=C_0 \times e^{kt}$, $k<0$)来描述。因此, 施肥后 9 d 内是控制 N 损失的关键时期, 控制 P 损失的关键时期则是在施肥后的两周内; 水稻施肥应避免降雨时期, 以减少施肥后的径流流失。

关键词: 水稻土; 田面水; 氮; 磷; 动态变化

中图分类号: X522 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)04-0838-09 doi:10.11654/jaes.2013.04.026

Dynamic Changes of Nitrogen and Phosphorus Concentrations in Surface Waters of Paddy Soils in the Northern Area of Erhai Lake

SHI Ze-sheng¹, XU Yong-bo^{2*}, LEI Bao-kun³, LIU Hong-bin⁴

(1. College of Resources and Environment Science, Yunnan Agriculture University, Kunming 650201, China; 2. College of Tobacco Science, Yunnan Agriculture University, Kunming 650201, China; 3. Institute of Agriculture Environmental Resources Research, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China; 4. Institute of Agricultural Resources and Regionalization, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: A field experiment was conducted to study dynamic changes in ammonium(NH_4^+-N), nitrate(NO_3^--N) concentrations, dissolved total N(DTN), total N(TN), total P(TP) and dissolved total P(DTP) concentrations in the surface waters of paddy fields applied with different treatments of N and P fertilizers in the northern region of Erhai Lake. Results showed that TN and DTN peaked after 1~3 days, and decreased rapidly and then leveled off after 9 days of the basal fertilizer applied, while TN and DTN reached their respective peak values in concentrations quickly during milk stage. Dynamic changes of DTN fitted a quadratic equation($Y=AX^2+BX+C$). NH_4^+-N peaked 3~5 days after the basal fertilizer applied, but NH_4^+-N peaked 1~2 days after the milk fertilizer applied. TP and DTP concentrations were exponentially declined after basal fertilizer application. However, there were no differences in these indexes 12 days later, this change could be described with an exponential equation ($Y=C_0 \times e^{kt}$, $k<0$). Therefore, 9 days after fertilizing were the key period for controlling the N loss from the paddy fields, but two weeks for controlling the P loss. Fertilizing season should avoid rainfall period to reduce nutrient losses through runoff.

Keywords: paddy; surface water; nitrogen; phosphorus; dynamic change

收稿日期: 2012-09-10

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201003014-6); 土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金(0812000051); 国家自然科学基金(31101605, 31260503); 云南省自然科学基金(2010ZC083)

作者简介: 施泽升(1986—), 男, 云南临沧人, 硕士研究生, 主要从事养分资源利用与环境研究。E-mail: shizesh@126.com

* 通信作者: 续勇波 E-mail: xuyongboxx@163.com

洱海水质的改善对洱海流域社会经济可持续发展有着重要意义。近年来,洱海水质日益下降,水质已由 20 世纪 90 年代的Ⅱ~Ⅲ类恶化为Ⅲ~Ⅳ类,洱海属于中营养状态湖泊,有污染加重的趋势^[1]。洱海流域农田面源氮、磷污染是洱海富营养化的主要影响因素之一^[2]。洱海北部地区水稻季降雨频繁,稻农往往重施肥而轻田面水管理,水稻长期处于泡田,田面水往往随意排放,极易造成田面水养分的径流损失及农田生态环境质量下降。有研究表明,田面水对沟渠水存在不同程度增荷作用,农田水对沟渠水总氮和总磷的增荷率分别为 73% 和 82%^[3]。另外,田面水径流的发生,以及尿素的水解速度过快,都能增加稻田氮肥损失^[4]。本文针对洱海流域北部地区水稻土水稻种植区,通过田间定点试验,以水稻种植模式下的不同氮磷处理为研究对象,分析了田面水氮磷养分的动态变化特征及氮磷养分的分配特征,以期寻找出控制田面水氮磷养分流失的关键时期及措施,为稻田养分流失研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验点基本情况

试验地位于洱海北部地区,属典型的低纬高原中亚热带西南季风气候类型,具有干湿季分明、光照充足、立体气候和区域性小气候明显等特点。年平均日照 2 061.0~2 439.4 h,日照百分率 55%~57%,年平均气温为 15.3 ℃,该地区雨量充沛,多年平均降雨量为 1048 mm。试验于 2011 年 5—10 月在云南省大理市洱源县右所镇的稻田中进行,北纬 26°01'57",东经 100°03'48",地下水位为 0.65 m,海拔 1934 m。实验地属红壤性水稻土,土壤质地为粘土,土壤耕层(0~20 cm)基本理化性状:有机质 80.02 g·kg⁻¹、全氮 4.54 g·kg⁻¹、全磷 1.56 g·kg⁻¹、全钾 12.80 g·kg⁻¹、速效磷 50.46 mg·kg⁻¹、速效钾 128.65 mg·kg⁻¹、pH 7.46、铵态氮 10.80 mg·kg⁻¹、硝态氮 50.10 mg·kg⁻¹。据调查,该地区近年来大蒜种植面积一直处于上升趋势,而蚕豆因栽培简便(可免耕),其种植面积也仅次于大蒜。该地区农户在不同年份间小春作物的种植并不固定,若干年下来,农田往往因种植大蒜投入大量的肥料尤其是有机肥而导致土壤养分残留量高。因此,本实验农田基础肥力具有代表性。

1.2 试验设计及处理

笔者于 2011 年 4 月对洱海北部地区三乡镇(右所镇、邓川镇、上关镇)的水稻施肥情况进行了调查,

结果表明:农户习惯采取以有机肥(牛粪)作为基肥为主,在水稻分蘖期追施少量尿素的方法。有机肥投入量(干重)在 11 250 kg·hm⁻² 左右,肥料含量折合纯 N 约为 180 kg·hm⁻²,P₂O₅ 约为 315 kg·hm⁻²,K₂O 约为 230 kg·hm⁻²;分蘖期追施的尿素折合纯 N 为 70~100 kg·hm⁻²。在有机肥中的钾素及磷素主要以难溶态存在,难以被单季作物完全吸收,本试验肥料均为无机肥,因此磷钾肥施用量有所下调。

田面水 N 实验共设 6 个处理,施用尿素(纯 N 含量为 46%),折合纯 N 分别为(kg·hm⁻²):0(N0)、135(N1)、180(N2:优化施肥)、225(N3)、270(N4:习惯施肥)、360(N5)。所有处理的磷、钾用量相同,磷肥品种为普钙,折合 P₂O₅ 75 kg·hm⁻²,钾肥为硫酸钾,折合 K₂O 90 kg·hm⁻²;田面水 P 实验共设 4 个处理,施用普钙(P₂O₅ 含量为 16%),折合 P₂O₅ 分别为(kg·hm⁻²):0(P0)、75(P1:优化施肥)、140(P2)、300(P3:习惯施肥),所有处理的氮钾含量一致,其中氮肥(N)180 kg·hm⁻²、钾肥(K₂O)90 kg·hm⁻²。水稻磷、钾肥作为基肥一次性施入,氮肥分基肥(70%)、孕穗肥(30%)两次施入。基肥施入比例较高的原因主要考虑到该地区土壤保肥能力较强,水稻分蘖时雨季开始,此时追肥极易造成养分径流流失。基肥施肥日期为 2011 年 5 月 19 日,追肥日期为 2011 年 7 月 26 日。田间灌水后,基肥施入田面(田面水深度为 4 cm)后,随即用田耙人工拌匀,孕穗肥为表施(田面水深度为 8 cm)。试验田前茬种植作物为当地早熟蚕豆品种,实验品种为楚粳 28,水稻种植日期为 2011 年 4 月 10 日,移栽日期为 2011 年 5 月 19 日,每穴种植 3 株,收获日期为 2011 年 10 月 10 日。如图 1 所示,施肥后的 9 d 内,降雨一般都在 10 mm 以下,因此降雨对氮素的动态变化影响较少;在 6 月 1 日(施肥后 13 d)降雨量则达 56.2 mm,此次降雨造成小区磷素浓度一定程度被稀释,由于降水水样磷素含量极低(总磷在 0.028 mg·L⁻¹ 以下),不会掩盖不同施磷处理对田面水磷素的影响。

小区面积为 6.0 m × 5.0 m,采用随机区组排列,3 次重复。试验区周围设置宽为 2 m 的保护行。各小区均设有单独的排水口和进水口,灌溉用水为附近河水。水稻移栽后,除后期收获前 10~15 d 小区不进水,其余时间保持田面水层 5~12 cm,当田面水低于 5 cm 时,在傍晚进行灌水。在水样采集期间共灌溉 3 次,于 2011 年 5 月 19 日施入基肥后进行第一次灌溉,灌溉量为 200 mm,总氮浓度为 0.80 mg·L⁻¹,总磷浓度为 0.20 mg·L⁻¹;2011 年 5 月 26 日灌溉量为 100 mm,总

氮浓度为 $4.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总磷浓度为 $0.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 2011 年 8 月 1 日灌溉量为 100 mm , 总氮浓度为 $3.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总磷浓度为 $0.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。灌溉水水质在实验期间存在变化, 水质养分含量的变化会对试验结果有一定影响, 但这一影响对所有处理都一致, 因而试验结果对各处理之间仍具有可比性。

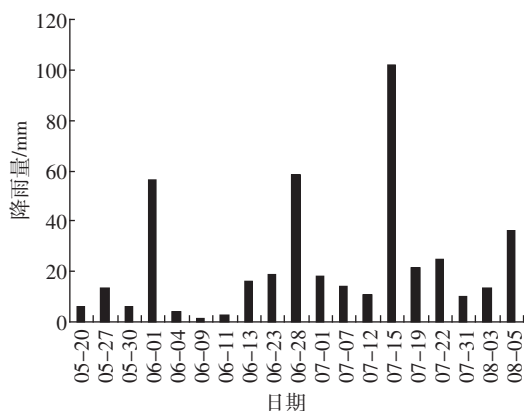


图1 2011年实验期间的降雨量情况

Figure 1 Rainfall during experimental period in 2011

1.3 采样及测定

在中午基肥施入后 1、2、3、5、9 d 以及生育中期追施氮肥后 1、2、3、5、9 d 的 10:00—11:00 采集不同施 N 处理的田面水水样; 在中午基肥施入后 1、3、5、9、15 d 的 10:00—11:00 采集不同施 P 处理的田面水水样。每个小区采 8 个子样点, 混合后分取 2 份各 200 mL 冷冻保存, 其中 1 个样品作为待测样, 另 1 个备用。样品取回后带回实验室, TN(总 N)采用过硫酸钾(进口)氧化-紫外分光光度法测定; DTN(可溶性总 N)先过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤, 再采用过硫酸钾(进口)氧化-紫外分光光度法测定; NH_4^+-N 采用靛酚蓝比色法测定; NO_3^--N 采用紫外分光光度法测定; TP(总 P)采用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法测定; DTP(可溶性总 P)先用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤, 再采用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法测定。土壤全氮采用 H_2SO_4 消煮-半微量开氏法; 土壤全磷采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法; 土壤全钾采用 NaOH 熔融采用火焰光度法; 土壤速效磷采用 NaHCO_3 浸提-钼蓝比色法; 土壤速效钾采用 NH_4OAc 浸提-火焰光度法; 土壤有机质采用重铬酸钾容量法-外加加热法; 土壤铵态氮采用氯化钾浸提(液:土=5:1)-靛酚蓝比色法; 土壤硝态氮采用氯化钾浸提(液:土=5:1)-紫外分光光度法; 土壤 pH 采用电位法(液:土=5:1)。

1.4 计算方法与统计软件

$$\text{DON} = \text{DTN} - (\text{NH}_4^+-\text{N}) - (\text{NO}_3^--\text{N})$$

$$\text{PN} = \text{TN} - \text{DTN}$$

$$\text{PP} = \text{TP} - \text{DTP}$$

式中: DON 代表可溶性有机氮, TN 代表总氮, DTN 代表可溶性总氮, PN 代表颗粒态氮。TP 代表总磷, DTP 代表可溶性总磷, PP 代表颗粒态磷。

本实验数据统计分析和作图利用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS Statistics 15.0 软件, LSD 法检验差异显著性。

2 结果与讨论

2.1 不同施 N 水平对田面水不同形态 N 素分配特征的影响

在不同施氮水平下, 研究施肥后 9 d 内各形态氮素的平均浓度变化规律, 结果表明: 田面水 TN、DTN、 NH_4^+-N 、PN、DON 含量和施 N 量极显著正相关(相关系数分别为 0.980^{**} 、 0.972^{**} 、 0.985^{**} 、 0.847^{**} 和 0.958^{**}); 而 NO_3^--N 和施 N 量间无显著相关(表 1)。稻田田面水中亚硝态氮的含量很低, 不是氮素存在的主要形态^[9], 因此本实验没有把亚硝态氮考虑在内。与其他研究相比^[6], 本研究 TN 平均含量较高(尤其是 N5 水平), 这可能与施入基肥后田面水深度较浅(田面水深度约为 4 cm), 而增加了尿素在田面水中的溶解有关(表 1)。在不同施氮水平下, TN、DTN、 NH_4^+-N 的含量随施 N 量增加而显著升高, 高氮处理(N5)的 TN、DTN、 NH_4^+-N 的平均浓度分别是低氮处理(N1)的 3.4、3.7、3 倍; 不同施氮水平的硝态氮浓度变化不显著; N1~N4 施氮水平间的 PN 浓度变化不显著, 只有当施氮量达到 N5 水平后, 才能显著提高田面水中 PN 的含量(表 1)。与对照(N0)相比, 稻田施入氮肥后, 能显著提高 DTN/TN 的比例, 而在不同施氮处理(N2~N5)间的 DTN/TN 变化并不显著, 这主要来源于 NH_4^+-N 和 DON 的贡献, 两者累加所占总氮比例在 69%~82%之间。如表 1、表 2 所示, 当施 N 量在 N2 以上时, DON/TN 的比例显著高于 N0 处理, 表明施入较高的氮肥后能提高田面水中 DON/TN 的值, 不同施氮水平间的 DON/TN 的值在 36.73%~58.03%之间, 田面水 DON 含量随施 N 量增加而显著升高。这与试验施用肥料为尿素, 而尿素是酰胺态有机氮肥直接相关; 其次, 由于土壤耕层有机质含量极高, 土壤在淹水的条件下提高了土壤有机质的溶出而增加了田面水 DON 含量。 $\text{NO}_3^--\text{N}/\text{TN}$ 比值小于 10%, 与对照(N0)相

表 1 不同施 N 水平对田面水各形态 N 素含量的影响

Table 1 Effects of N levels on the contents of different forms of N in the surface water

N 水平	TN/mg·L ⁻¹	DTN/mg·L ⁻¹	NO ₃ -N/mg·L ⁻¹	NH ₄ -N/mg·L ⁻¹	DON/mg·L ⁻¹	PN/mg·L ⁻¹
N0	8.34±0.5f	5.22±0.51f	1.62±1.19a	0.55±0.52f	3.04±0.58e	3.12±0.05c
N1	57.66±2.61e	42.6±5.06e	2.58±2.41a	14.35±3.2e	25.66±6.17d	15.06±4.73b
N2	78.08±9.26d	66.42±2.47d	2.66±1.35a	22.04±2.77d	41.72±1.82d	11.65±6.95bc
N3	108.19±11.02c	91.57±10.37c	2.98±1.95a	27.82±2.21c	60.78±9.73c	16.62±2.13b
N4	136.46±8.78b	114.45±22.7b	2.35±0.44a	33.38±4.71b	78.73±17.96b	22.01±14.1b
N5	196.5±16.09a	159.93±17.53a	2.17±0.91a	43.53±3.39a	114.23±14.11a	36.57±2.51a
r(n=18)	0.980**	0.972**	0.142	0.985**	0.958**	0.847**

注: 表内同列数据后不同字母代表差异达 5% 显著水平; ** 相关性在 0.01 显著水平 (双尾检验); 所有数值为 2011 年基肥时期 (5 月 19 日—5 月 28 日) 5 次测定数据的平均值和孕穗肥时期 (7 月 29 日—8 月 4 日) 5 次测定数据的平均值之和。

Note: Values followed by different letters in a column were significant among treatments at the 5% level. ** Correlation was significant at the 0.01 level (2-tailed). Values were the sum of the mean values respectively averaged during the base (19 May to 28 May) and milk fertilizing stages (29 July to 4 August) in 2011.

表 2 不同施 N 水平对各形态氮素分配比例的影响 (%)

Table 2 Effects of N levels on the proportions of different forms of N (%)

N 水平	DTN/TN	NO ₃ -N/TN	NH ₄ -N/TN	DON/TN	PN/TN
N0	62.48±2.38c	19.08±12.81a	6.67±6.43c	36.73±8.89c	37.52±2.38a
N1	73.88±8.16b	4.49±4.2b	25.01±6.48b	44.39±9.32bc	26.12±8.16b
N2	85.54±7.65a	3.55±2.27b	28.26±2.04a	53.74±4.99ab	14.46±7.65c
N3	84.59±1.99a	2.67±1.55b	25.93±4.25b	55.99±3.51a	15.41±1.99c
N4	83.49±11.6ab	1.72±0.27b	24.41±2.07b	57.37±9.73a	16.51±11.6bc
N5	81.29±2.55ab	1.11±0.43b	22.16±0.1b	58.03±2.8a	18.71±2.55bc
r(n=18)	0.674**	-0.732**	0.616**	0.779**	-0.674**

注: 表内同列数据后不同字母代表差异达 5% 显著水平; ** 相关性在 0.01 显著水平 (双尾检验); 所有数值为 2011 年基肥时期 (5 月 19 日—5 月 28 日) 5 次测定数据的平均值和孕穗肥时期 (7 月 29 日—8 月 4 日) 5 次测定数据的平均值之和。

Note: Values followed by different letters in a column were significant among treatments at the 5% level. ** Correlation was significant at the 0.01 level (2-tailed). Values were the sum of the mean values respectively averaged during the base (19 May to 28 May) and milk fertilizing stages (29 July to 4 August) in 2011.

比, 施氮处理能显著减少田面水中 NO₃-N/TN 的值, 不同施氮处理间田面水 NO₃-N/TN 的值则无显著差异 (表 2)。

2.2 不同施 N 水平对田面水不同形态 N 素动态变化

特征的影响

TN 在施入基肥 3 d 内逐渐下降, 此后急剧下降, 9 d 后不同施 N 水平间差异趋同; 而在施入孕穗肥后, TN 浓度立即到达峰值后迅速下降, 在 9 d 后不同

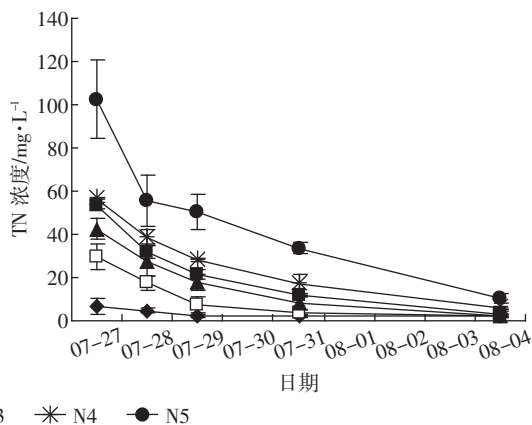
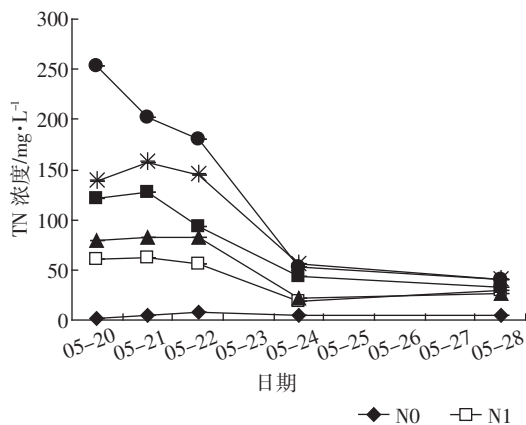


图 2 不同施 N 水平对施肥后田面水 TN 浓度变化的影响

Figure 2 Effects of different N levels on changes in TN concentrations in the surface water

施 N 水平间差异趋同,TN 浓度在 10 mg·L⁻¹ 以下(图 2)。DTN 含量在施入基肥 2 d 后达最大值,接着急剧下降,各处理的 DTN 含量在施入基肥 9 d 后的值小于 16 mg·L⁻¹;DTN 浓度在追孕穗肥后变化趋势与 TN 追孕穗肥后变化相同,即施入孕穗肥后即到顶峰,然后迅速下降,9 d 后不同处理间差异趋同(图 3)。DTN 浓度的变化趋势也可用二次曲线模型 $Y=AX^2+BX+C$ 来描述,拟合结果见表 3。所以施肥后的 9 d 内是控制氮素流失的关键时期,尤其是在施基肥后的时期。这主要是因为水稻在生育苗期其根系尚未充分发育完全,水稻正处于返青时期,对氮素需求量少,氮素难以在短期内被植株充分吸收,如降雨极易发生径流流失。张继宗等的研究表明降雨后稻田总氮流失量随着施 N 量的增加而增加,而施氮初期是氮素流失高峰期^[7]。因此,水稻施肥应根据品种需肥特性,采用适宜的氮肥运筹比例,在水稻生产中则提倡基肥深施。有研究表明^[8],水田中施用的硫酸铵在深施 10~15 cm 时利用率最高,平均达到 57.48%,尿素则以深施 10 cm

的利用率较高。在氮肥施用的同时,加强水肥的综合管理也是提高氮肥的利用效率途径之一。目前生产上已提出“无水层混施法”(施用基肥)和“以水带氮法”等组合技术^[9],该技术比传统施肥法中水稻的氮肥利用率平均提高 12%。

氨挥发是稻田氮肥损失的主要途径之一^[10-12],而田面水中的 NH₄⁺-N 浓度是氨挥发的决定因素之一^[13]。本实验表明,施基肥后田面水 NH₄⁺-N 浓度在 3~5 d 内很快到顶点,随后迅速下降;而在追肥期 1~2 d 内就到顶峰(图 4)。在水稻土中,施氮处理下的 NH₄⁺-N 浓度在基肥时期的最大值与孕穗肥时期的峰值的比值小于不同时期的肥料投入比值,如减氮处理 N1 (135 kg·hm⁻²)和高氮处理 N5(360 kg·hm⁻²)在施基肥后和施孕穗肥后 NH₄⁺-N 最大浓度比值分别为 1.36 和 1.66,小于基肥和孕穗肥投入量的比值(2.33)。田面水 NO₃⁻-N 浓度动态变化过程复杂,但不同施 N 水平间差异不大。在施入基肥后,田面水 NO₃⁻-N 浓度在施基肥后 1~2 d 内降低,2~3 d 内增加,3 d 之后迅速

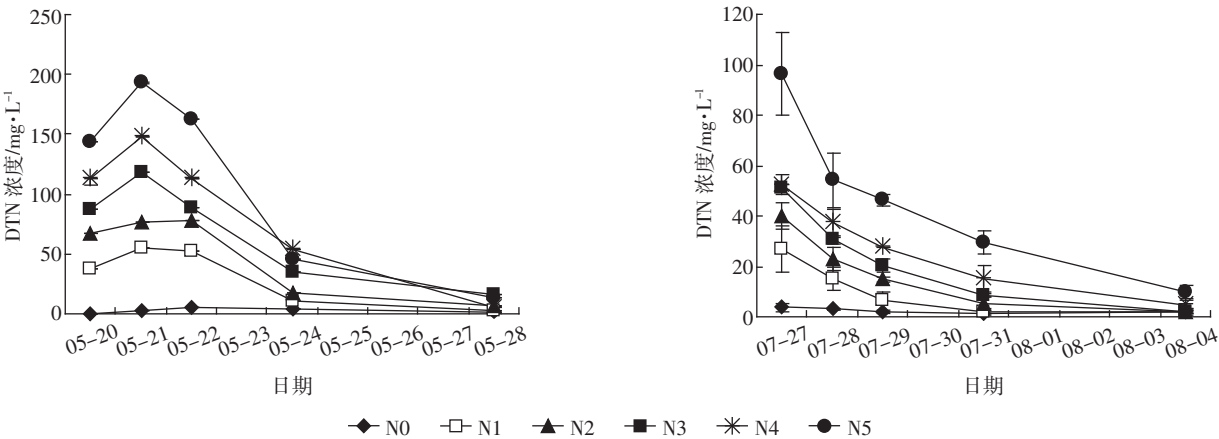


图 3 不同施 N 水平对施肥后田面水 DTN 浓度变化的影响

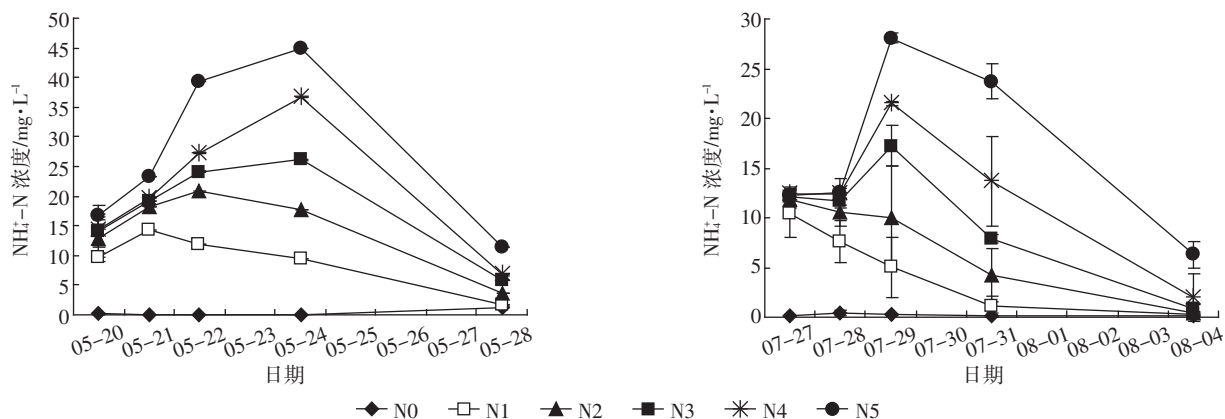
Figure 3 Effects of different N levels on changes in DTN concentrations in the surface water

表 3 N 肥施用后田面水 DTN 浓度变化二次曲线模拟结果

Table 3 Quadratic simulation of the changes in the DTN concentration in the surface water after N fertilizing

参数	DTN(施入基肥后)					DTN(施入孕穗肥后)				
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5
A	-6.311	-7.404	-8.823	-13.223	-17.520	1.964	1.856	1.934	0.552	2.533
B	26.694	26.278	30.330	48.983	65.083	-18.080	-20.500	-23.621	-15.024	-34.957
C	21.518	52.002	75.016	85.544	110.229	43.058	58.111	72.206	66.416	124.185
r	0.879	0.898	0.884	0.906	0.883	0.920	0.978	0.995	0.981	0.948
P	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注:A 代表二次项回归系数;B 代表一次项回归系数;C 代表常数项系数;r 代表相关系数;P 代表 F 检验统计量的观察值相应的概率。
Note: A was the quadratic coefficient, B was the monomial coefficient, C was the constant, r was the correlation coefficient, P was the probability of the observed value in F-test.

图 4 不同施 N 水平对施肥后面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化的影响Figure 4 Effect of different N levels on changes in $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentrations in the surface water

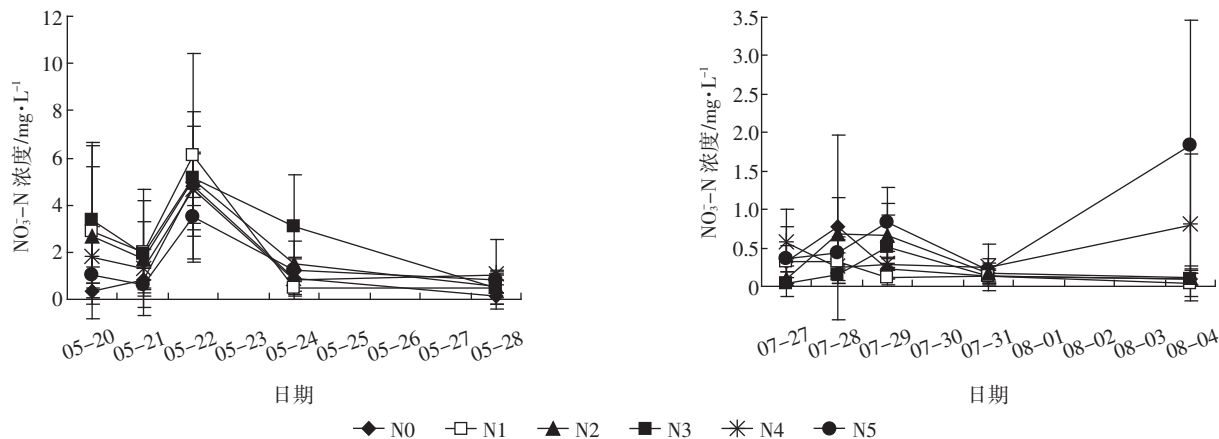
降低,这可能与土体硝态氮释放速度与硝化-反硝化间的转化有关(图 5)。施基肥前,水稻土经过旱季的氧化使土体硝态氮含量增加,在 1~2 d 内,由于水体渗漏,致使硝态氮有所下降,随着时间的推移,硝化作用变得强烈并大于反硝化作用,致使 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度在第 3 d 达顶峰;随后,由于土壤中的 O_2 欠缺,能使硝化作用减弱^[14],从而硝态氮损失量远大于硝化作用的生成量,硝态氮的含量随之下降,此时 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的迅速下降并不能提高田面水 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 的含量(图 5)。而在相隔 2 个月追孕穗肥后, $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度波动较小,但在第 5~9 d 时,高 N 处理(N4、N5)下的 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度开始逐渐上升,而施氮量较小的处理(N0~N3)则下降到谷底(图 5)。造成这种差异的原因可能是:水稻生长旺盛,水稻对铵态氮的吸收能使铵态氮含量下降,在第 5~9 d 时,低氮处理条件下,硝化反应所需的底物铵态氮减少,致使硝态氮含量有所下降;高氮水平条件下,田面水中盈余的铵态氮提供了硝化作用底

物,其次,水稻田中有部分浮萍生长,浮萍可能使田面水中的氧气增加,并向田面水中释放氮素^[15],从而使硝化作用加剧, $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度有所上升。

需要指出的是,不同气象条件直接影响着水稻田田面水氮含量的变化。有研究表明^[16]田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度高、气温高、光照强、风大,可促进稻田氮挥发。本试验期间的降雨较少,基肥时期的平均温度为 22℃,低于孕穗肥时期的温度(28℃)。温度较低时尿素水解较慢,所以基肥施用后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、DTN 浓度上升慢,而孕穗肥施用后,由于气温高,DTN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 很快就到峰值,这与其他地区研究结果类似^[17]。可见田面水氮含量的变化不仅与施氮量有关,还受到天气因素的影响。

2.3 不同施 P 水平对田面水各形态 P 素分配特征的影响

如表 4 所示,在施入磷肥 15 d 内,不同施 P 水平与 TP、DTP、PP 的浓度极显著正相关(相关系数分别

图 5 不同施 N 水平对施肥后面水 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度变化的影响Figure 5 Effect of different N levels on changes in $\text{NO}_3^+\text{-N}$ concentrations in the surface water

为 0.954**、0.967** 和 0.856**);DTP、PP 占 TP 的比例与施 P 量间则相关性不显著(相关系数分别为 0.410 和-0.410)。增倍施磷(P2、P3)能显著提高田面水中TP 的浓度,这种差异主要由田面水中不同施 P 水平的 DTP 浓度显著差异造成的;而在不同施 P 水平间,只有当施入磷肥达高磷水平(P3)后,才能显著提高田面水 PP 的浓度(表 4)。与对照(P0)相比,施磷能显著提高 DTP/TP 的比例,而 PP/TP 的比例显著降低;DTP 是田面水磷素的主要成分,比例占 TP 的 50.69%~78.71%,而 PP 占 TP 的 21.29%~49.31%,这可能与 P 肥随水浅施于耕层表层,PP 态磷容易沉淀有关(表 4)。

2.4 不同施 P 水平对田面水 P 素动态变化特征的影响

磷肥施入土壤后,在土壤中的转化主要进行吸附过程和沉淀过程,DTP 经吸附反应生成吸附态磷,两者都可以迅速与土壤中的 Fe、Al 和 Ca 结合生成难溶性的 Fe-P、Al-P 和 Ca-P,表层土壤有机-无机胶粒物质含量高,对磷肥具有极强的吸附和固定作用,磷素在土壤中很难移动^[18]。磷素在表土层固定时间较长,

当表土随径流迁移时吸附固定在颗粒表面的磷素也随之流失^[19]。其次,作物对磷肥的利用率较低,长期过量地施用磷肥,常导致农田耕层土壤处于富磷状态,从而通过径流等途径向水体迁移^[20]。本实验表明,田面水 TP 和 DTP 变化趋势相同,施肥 1 d 后达最大值,然后迅速下降,施入 P 肥 12 d 后不同施磷水平间差异趋同,15 d 以后田面水浓度下降到谷底(图 6)。

表 5 P 肥施用后田面水 TP 和 DTP 浓度变化指数模拟结果
Table 5 Exponential simulation of the decrease in the TP and DTP concentrations in the surface water after P fertilizing

参数	TP			DTP		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
$C_0/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	12.243	19.880	40.856	10.338	11.554	23.760
k/d^{-1}	-0.305	-0.262	-0.281	-0.317	-0.230	-0.258
r	0.948	0.924	0.911	0.954	0.920	0.910
P	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注: C_0 代表常数项系数; k 代表回归系数; r 代表相关系数; P 代表 F 检验统计量的观察值相应的概率。
Note: C_0 was the constant, k was the regression coefficient, r was the correlation coefficient, P was the probability of the observed value in F -test.

表 4 不同施 P 肥水平对各型态 P 分配的影响

Table 4 P fertilizer to different levels of each type P the influence of the distribution

P 水平	TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	DTP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	PP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	DTP/TP/%	PP/TP/%
P0	0.24±0.07c	0.12±0.01d	0.12±0.02b	50.69±0.67b	49.31±0.67a
P1	2.09±0.08c	1.64±0.15c	0.45±0.17b	78.71±13.06a	21.29±13.06b
P2	4.39±1.18b	2.83±0.44b	1.56±1.26b	77.71±11.88a	22.29±11.88b
P3	8.64±2.46a	5.46±1.35a	3.19±1.44a	71.03±2.91a	28.97±2.91b
$r(n=12)$	0.954**	0.967**	0.856**	0.410	-0.410

注: 表内同列数据后不同字母代表差异达 5% 显著水平; ** 相关性在 0.01 显著水平(双尾检验); 所有数值为 2011 年基肥时期(5 月 19 日—6 月 3 日)5 次测定数据的平均值。

Note: Values followed by different letters in a column were significant among treatments at the 5% level. ** Correlation was significant at the 0.01 level (2-tailed). Values were the average of data measured in five times during the base(19 May to 3 June).

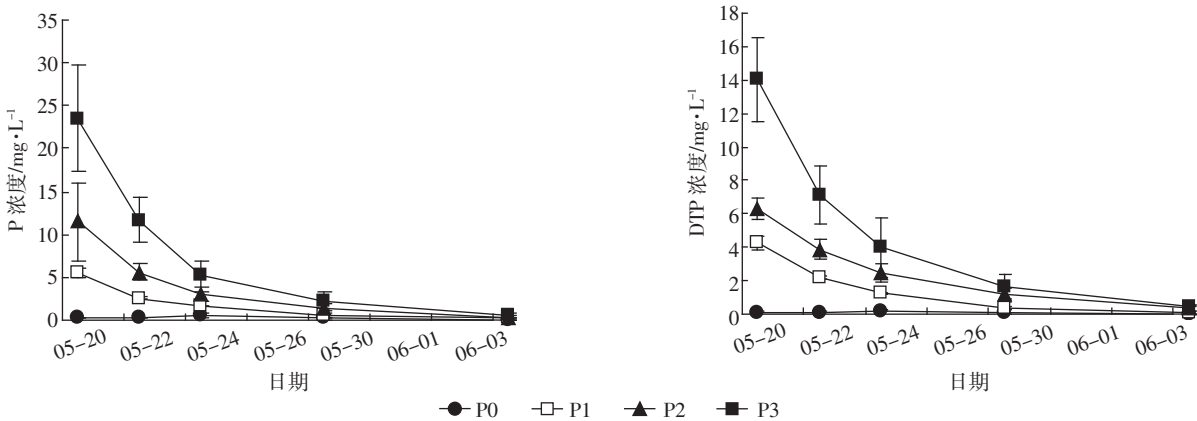


图 6 水稻不同施 P 水平对田面水 TP 和 DTP 浓度变化的影响

Figure 6 Effects of different P levels on changes in TP and DTP concentrations in the surface water of paddy

其变化趋势也可用指数降低模型($Y=C_0 \times e^{kt}$, $k<0$)来拟合,拟合结果见表5,这与前人研究结果类似^[4]。因此,水稻田中施入磷后的两周是磷流失风险的高峰期。也有研究表明稻季土壤磷素流失的最大风险时期约在水稻移栽后一个月内^[21],磷素径流携带的磷以PP为主^[22-23]。杨丽霞等指出,不同施P量在水稻生长初期,对径流中不同形态磷浓度的影响较大,且随着施P量的增加,不同形态磷的浓度都在增加,但溶解态总磷(DTP)和溶解态无机磷(DIP)浓度增加幅度最大^[24]。

3 结论

(1)施肥后9d内的田面水TN、DTN、 NH_4^+-N 、PN、TON平均含量和施肥量呈极显著正相关(相关系数分别为0.980**、0.972**、0.985**、0.847**和0.958**),硝态氮和施N量间无显著相关性(相关系数为0.142);施肥后15d内的田面水TP、DTP、PP平均浓度与不同施P水平呈极显著正相关(相关系数分别为0.954**、0.967**和0.856**),但DTP、PP占TP的比例与施P量间无显著相关性(相关系数分别为0.410和-0.410)。

(2)TN以及DTN在施基肥后呈先升后降的趋势,1~3d达到峰值,9d后含量差异趋同,在施入孕穗肥后,TN浓度立即到达峰值后以线性下降,在9d后含量很少,并趋于稳定。DTN浓度的变化趋势可用二次曲线模型 $Y=AX^2+BX+C$ 来描述;田面水TP和DTP浓度的变化都可用指数降低模型($Y=C_0 \times e^{kt}$, $k<0$)来描述。施肥后TN、DTN、TP可作为稻田N、P流失的主要N、P指标,施肥后9d内是控制N的关键时期,而控制P损失的关键时期则是在施肥后的两周内。

(3) NH_4^+-N 浓度变化在不同施肥时期有明显区别,基肥施用后其浓度上升比追肥施用后上升慢。施基肥后田面水 NH_4^+-N 浓度在3~5d内到顶点,而在追肥后1~2d内到顶峰。

(4)洱海北部地区水稻施肥期应避开降雨时期,以减少施肥后的径流流失。

关于洱海流域水稻田氮磷流失情况的研究国内鲜有报导,洱海流域农田田埂矮化严重,农户水稻施肥不精准,田面水往往随意排放,极易造成田面水养分的径流损失。因此,研究不同施肥强度条件下水稻田氮磷流失的情况,探索出适宜的水肥管理措施,对控制该流域面源污染都有实际意义。需要指出的是,本实验在农田养分流失方面的研究还有待继续开展,有些研究结果还有待完善。

参考文献:

- [1] 于洋,张民,钱善勤,等.云贵高原湖泊水质现状及演变[J].湖泊科学,2010,22(6):820-828.
YU Yang, ZHANG Min, QIAN Shan-qin, et al. Current status and development of water quality of lakes in Yunnan-Guizhou Plateau[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(6):820-828.
- [2] 杨曙辉,宋天庆.洱海湖滨区的农业面源污染问题及对策[J].农业现代化研究,2006,27(6):428-431.
YANG Shu-hui, SONG Tian-qing. Problems of pollution derived from agriculture in Erhai Lake district and countermeasures[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2006, 27(6):428-431.
- [3] 汤秋香,任天志,雷宝坤,等.洱海北部地区不同轮作农田氮、磷流失特征研究[J].植物营养与肥料学报,2011,17(3):608-615.
TANG Qiu-xiang, REN Tian-zhi, LEI Bao-kun, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss in various crop rotation systems in northern watershed of Erhai Lake [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3):608-615.
- [4] 田玉华,贺发云,尹斌,等.不同氮磷配合下稻田田面水的氮磷动态变化研究[J].土壤,2006,38(6):727-733.
TIAN Yu-hua, HE Fa-yun, YIN Bin, et al. Dynamic changes of nitrogen and phosphorus concentrations in surface water of paddy field[J]. *Soils*, 2006, 38(6):727-733.
- [5] 俞巧钢,陈英旭. DMPP对稻田田面水氮素转化及流失潜能的影响[J].中国环境科学,2010,30(9):1274-1280.
YU Qiao-gang, CHEN Ying-xu. Influences of nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate on nitrogen transformation and potential runoff loss in rice fields[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(9):1274-1280.
- [6] 王小治,朱建国,宝川靖和,等.施用尿素稻田表层水氮素的动态变化及模式表征[J].农业环境科学学报,2004,23(5):852-856.
WANG Xiao-zhi, ZHU Jian-guo, HOSEN Yasu-kazu, et al. Dynamic changes and modeling of nitrogen in paddy field surface water after application with different doses of urea [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(5):852-856.
- [7] 张继宗,雷秋良,左强,等.模拟降雨条件下太湖地区稻田氮素径流流失特征[J].湖北农业科学,2009,48(11):2688-2692.
ZHANG Ji-zong, LEI Qiu-liang, ZUO Qiang, et al. Nitrogen loss characteristics with runoff under simulated rainfall conditions in paddy field of Taihu Lake Region[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2009, 48(11):2688-2692.
- [8] 苏正义,韩晓日,李春全.氮肥深施对作物产量和氮肥利用率的影响[J].沈阳农业大学学报,1997,28(4):292-296.
SU Zheng-yi, HAN Xiao-ri, LI Chun-quan, et al. Effect of deep placement N on fertilizers crop yields and use efficiency of nitrogen[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1997, 28(4):292-296.
- [9] 朱兆良.稻田节氮的水肥综合管理技术的研究[J].土壤,1991,23:241-245.
- [10] 朱兆良.农田中氮肥的损失与对策[J].土壤与环境,2000,9(1):1-6.

- ZHU Zhao-liang. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1): 1-6.
- [11] Datta S K. Nitrogen transformations in wetland rice ecosystems[J]. *Nutrient Cycling in Agro-Ecosystems*, 1995, 42(13): 193-203.
- [12] Fillery R P, De Dana S K. Ammonia volatilization from nitrogen volatilization as a N loss mechanism in flooded rice fields[J]. *Fertilizer Research*, 1986, 9: 78-98.
- [13] 杨丽霞, 杨桂山, 苑韶峰. 施磷对太湖流域典型蔬菜地磷素流失的影响[J]. *中国环境科学*, 2007, 27(4): 518-523.
- YANG Li-xia, YANG Gui-shan, YUAN Shao-feng. Effects of phosphorus application on phosphorus loss in the typical vegetable plot of Taihu Watershed[J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(4): 518-523.
- [14] Malhi S S, McGill W B. Nitrification in three Alberta soils: Effect of temperature, moisture and substrate concentration[J]. *Soil Biol Biochem*, 1982, 14: 393-399.
- [15] 李 华, 陈英旭, 梁新强, 等. 浮萍对稻田田面水中氮素转化与可溶性氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(5): 92-94, 129.
- LI Hua, CHEN Ying-xu, LIANG Xin-qiang, et al. Influence of duckweed on N conversion and dissolved N in floodwater after urea application into paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(5): 92-94, 129.
- [16] 邓美华, 尹 斌, 张绍林, 等. 不同施氮量和施肥方式对稻田氨挥发损失的影响[J]. *土壤*, 2006, 38(3): 263-269.
- DENG Mei-hua, YIN Bin, ZHANG Shao-lin, et al. Effects of rate and method of N application on ammonia volatilization in paddy field[J]. *Soils*, 2006, 38(3): 263-269.
- [17] 林忠成. 太湖地区土壤-作物系统氮素利用的综合研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2010.
- LIN Zhong-cheng. Studies on nitrogen utilization in soil-crop system in the Taihu Lake region[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2010.
- [18] 曹志洪, 林先贵, 杨林章, 等. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能: I. 稻田土壤磷素径流迁移流失的特征[J]. *土壤学报*, 2005(5): 799-804.
- CAO Zhi-hong, LIN Xian-gui, YANG Lin-zhang, et al. Ecological function of “Paddy field ring” to urban and rural environment: I. Characteristics of soil P losses from paddy fields to waterbodies with runoff[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005(5): 799-804.
- [19] 李 勉, 杨剑锋, 侯建才, 等. 黄土丘陵区小流域淤地坝记录的泥沙沉积过程研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(2): 64-69.
- LI Mian, YANG Jian-feng, HOU Jian-cai, et al. Sediment deposition process for a silt dam in a small watershed in Loess Hilly region[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(2): 64-69.
- [20] 王庆仁, 李继云. 论合理施肥与土壤环境的可持续发展[J]. *环境科学进展*, 1999, 7(2): 116-123.
- WANG Qing-ren, LI Ji-yun. Fertilizer proper use and sustainable development of soil environment in China[J]. *Advances in Environmental Science*, 1999, 7(2): 116-123.
- [21] 张红爱, 张焕朝, 钟 萍. 太湖地区典型水稻土稻-麦轮作地表径流中磷的变动规律[J]. *生态科学*, 2008, 27(1): 17-23.
- ZHANG Hong-ai, ZHANG Huan-chao, ZHONG Ping. Study on phosphorus concentrations in runoff from paddy soils of rice-wheat double cropping system in Taihu Lake region[J]. *Ecological Science*, 2008, 27(1): 17-23.
- [22] 张 威, 艾绍英, 姚建武, 等. 水稻田磷径流流失特征初步研究[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(16): 237-243.
- ZHANG Wei, AI Shao-ying, YAO Jian-wu, et al. Preliminary study on characteristics of phosphorus losses from rice fields[J]. *Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(16): 237-243.
- [23] 曹雪艳, 李永梅, 张怀志, 等. 滇池流域原位模拟降雨条件下不同土壤质地磷素流失差异研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(3): 13-17.
- CAO Xue-yan, LI Yong-mei, ZHANG Huai-zhi, et al. Differences of phosphorus loss on different soil texture in-situ under simulated rainfall conditions of Dianchi Lake watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(3): 13-17.
- [24] 杨丽霞, 杨桂山. 施磷对太湖流域水稻田磷素径流流失形态的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(5): 31-34.
- YANG Li-xia, YANG Gui-shan. Effects of phosphorus application on P forms in runoff from rice field of Taihu watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(5): 31-34.