

免耕稻田田面水磷素动态及其淋溶损失

通乐嘎^{1,2,3}, 李成芳^{1,2}, 杨金花^{1,2}, 汪金平^{1,2}, 曹凑贵^{1,2}, 吴海亚⁵, 梅少华⁴, 梅金先⁴, 翟中兵⁵

(1.农业部华中作物栽培与生理生态重点开放实验室, 武汉 430070; 2.华中农业大学植物科学技术学院, 武汉 430070; 3.河套大学农牧与生化工程学院, 内蒙古 临河 015000; 4.湖北省武穴市农业局, 湖北 黄冈 435404; 5.武穴市大法寺镇农业技术推广服务中心, 湖北 黄冈 435404)

摘要:以免耕和翻耕稻田为研究对象,通过大田试验与室内分析,研究了不同耕作方式下稻田田面水和渗漏水的淋溶损失及其对环境的影响。试验共设4个处理,分别是免耕+不施肥(NT0)、翻耕+不施肥(CT0)、免耕+复合肥(NTC)和翻耕+复合肥(CTC)。结果表明,施磷肥显著提高稻田田面水以及渗漏水各形态磷浓度。施磷肥2 d后田面水总磷(TP)浓度、颗粒态磷(PP)浓度和溶解磷(DP)浓度即达到最大值,此后由于水中颗粒或表土对田面水磷素的固定,磷素的淋失,水稻生长吸收及前期的稻田排水和灌水稀释,1周后迅速降低并趋于稳定;渗漏水TP浓度和溶解磷(RP)浓度在施磷肥2 d后达到最大值,渗漏水TP浓度在施肥后一个半月达到最低值,而渗漏水RP浓度在施肥4 d后就降低到最低值。处理NTC田面水TP、DP与PP显著高于处理CTC,而处理NT0与处理CT0之间无差异;与翻耕相比,免耕不影响渗漏水TP与RP浓度及磷下渗淋失。对田面水磷素及渗漏水磷素变化动态分析表明,施磷肥后的1周左右是控制磷素流失的关键时期。

关键词:免耕;稻田;田面水;渗漏水;磷素

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)03-0527-07

Floodwater Phosphorus Dynamics and Losses from No-tillage Rice Fields

TONG Le-ga^{1,2,3}, LI Cheng-fang^{1,2}, YANG Jin-hua^{1,2}, WANG Jin-ping^{1,2}, CAO Cou-gui^{1,2}, WU Hai-ya⁵, MEI Shao-hua⁴, MEI Jin-xian⁴, ZHAI Zhong-bing⁵

(1.Key Laboratory of Huazhong Crop Physiology, Ecology and Production, Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China; 2.College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3.Agriculture and Animal Husbandry and Biochemical Engineering Institute, Hetao University, Linhe 015000, China; 4.Bureau of Agriculture in Wuxue, Huanggang 435404, China; 5.Extend Service Center of Agricultural Technology, Dafashi Town in Wuxue, Huanggang 435404, China)

Abstract: Phosphorus (P) enhances eutrophication of fresh water bodies. This study was conducted to determine P dynamics of floodwater and percolation water, and to assess P losses through leaching and its environmental impact in different rice tillage fields during the rice growing season of 2008. The four treatments conducted in this study were no-tillage + no fertilizer (NT0), conventional tillage + no fertilizer (CT0); no-tillage + compound fertilizer (NTC) and conventional tillage + compound fertilizer (CTC). The results showed that total P (TP), dissolved P (DP) and particulate phosphorus (PP) concentrations in floodwater all peaked two days after P application. Afterward, they declined then reached to background levels two weeks after application of fertilizer P. Both TP and reactive P (RP) in percolation water also peaked two days after P application then decreased. TP in percolation water came to background values one and half months after P application but RP reached to background values just four days after P application. TP, PP and DP concentrations in floodwater in NTC all were significantly higher than those in CTC whereas no significant difference was observed between NT0 and CT0. Application of P fertilizer significantly enhanced TP, DP and PP concentrations of floodwater, and TP and RP concentrations of percolation water. Compared with conventional tillage,

收稿日期:2009-08-13

基金项目:国家重大科技专项资助项目(2007BA520A02);湖北省农业创新岗位项目

作者简介:通乐嘎(1980—),女,内蒙古通辽人,硕士生,主要从事农业稻田系统土壤生态的研究。E-mail:tonglega_bai@webmail.hzau.edu.cn

通讯作者:曹凑贵 E-mail:ccgui@mail.hzau.edu.cn

no-tillage did not affect RP, and TP concentrations and P losses through leaching. The analysis of P dynamics of floodwater and percolation water showed that it was the key time in one week after P application to control P losses.

Keywords: no-tillage; paddy field; floodwater; percolation water; phosphorus

我国南方是主要的粮食作物生产区之一, 长期高产集约耕作, 导致大量肥料磷累积在农田。累积在农田土壤中的磷通过径流和下渗进入水体, 引起农业非点源污染^[1-3], 对地表水和地下水构成威胁。水田土壤磷素受降雨径流而流失的磷低于旱地, 但是水田施入磷肥时, 会有一些磷肥随径流进入周围的水体, 对周围的水体环境造成污染^[4]。因此, 研究稻田磷损失机理对这些地区发展保护水质策略是很必要的^[5]。

免耕能省时、省力、节约农业机械的化石燃料消耗, 防止秧苗移栽前稻田排水侵蚀土壤^[6], 保持土壤结构、增加渗透^[7]。因此, 在日本和中国免耕稻作的比重越来越大^[8-9], 在我国湖北、湖南、广东、江西、浙江、上海、江苏等省、市得到大力推广^[8, 10]。

近年来, 国内外关于免耕的研究多见于稻田土壤物理及生物特性方面, 土壤及田面水营养成分变化方面^[11-12], 温室气体排放方面^[9], 和免耕稻田作物生长与产量方面的研究^[13-15]。关于稻田磷素动态变化及损失的研究主要针对于传统翻耕稻作系统^[16-19], 而免耕稻田系统磷素动态变化及损失的研究较少, 本文旨在研究免耕条件下稻田水体肥料磷素的动态及下渗淋失规律, 为提高免耕稻田肥料利用率、降低肥料磷的环境危害, 及发展稻区免耕模式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点和材料

试验地点为湖北省武穴市大法寺镇中桂村试验基地, 此试验田已连续 30 a 实行油菜免耕-水稻翻耕轮作制度。试验田地处 115°30'E, 29°55'N, 海拔 20 m, 土壤为潜育型水稻土, 泥沙田, 土壤肥力中等, 质地为重壤, 耕层 20 cm, 犁底层 10 cm。试验田土壤基本理化性状为: pH 值为 6.58, 有机质 31.70 mg·kg⁻¹, 全氮 3.57 g·kg⁻¹, 铵态氮 2.43 mg·kg⁻¹, 硝态氮 4.37 mg·kg⁻¹, 全磷 0.70 g·kg⁻¹, 有效磷 3.65 mg·kg⁻¹, 有效钾 111 mg·kg⁻¹。

本研究选 2008 年 5 月下旬到 10 月上旬试验进行研究。水稻为两优培 9 (*Oryza sativa* L.)。

1.2 试验处理及田间设计

试验共设 4 个处理: 免耕+不施肥 (NT0); 翻耕+不施肥 (CT0); 免耕+复合肥 (NTC); 翻耕+复合肥 (CTC)。

每个处理 3 次重复, 12 个小区随机区组设计。小区面积 45 m², 小区之间设埂, 覆塑料薄膜, 埂高 20 cm, 厢宽 120 cm, 沟宽 30 cm、深 20 cm, 每小区内含有四厢五沟。

5 月 28 日用浓度为 36% 克无踪喷雾除草 (3 L·hm⁻²), 5 月 30 日泡田, 用犁耙对翻处理进行翻耕, 耕作深度为 20 cm, 耕作 3 次; 6 月 1 日播种, 播种量 22.5 kg·hm⁻², 直播前稻谷先于清水中浸泡 12 h, 后与旱育保姆充分混匀。

水稻全生育期氮、磷、钾施用标准为: 210 kg N·hm⁻²、105 kg P₂O₅·hm⁻²、240 kg K₂O·hm⁻²。

试验所需磷肥为复合肥 (15% N、15% P₂O₅、15% K₂O) 和过磷酸钙 (17% P₂O₅)。钾肥为复合肥和氯化钾。磷肥和钾肥作为基肥于播种前一次性施入, 在水稻生长期不追磷钾肥; 氮肥分底肥 (复合肥) 和追肥 (尿素) 施用, 施肥比为 4:2:2:2, 施肥日期为 6 月 1 日、6 月 16 日、7 月 16 日和 8 月 6 日。稻田进行浅水灌溉, 10 月 10 日收获。

1.3 样品采集与分析

按照当地灌排习惯, 在水稻生长季节, 当水下降到距稻田土面 1~2 cm 时, 对稻田进行灌水至 10 cm。由于土壤溶液采样器前端为 5 cm 长的陶瓷管, 因此将 60 cm 长土壤溶液采样器垂直埋入犁底层 5 cm 下 (即陶瓷管上部与犁底层底部平齐), 采样时用手动气泵将管内溶液清除干净, 后收集的溶液即为下渗到土壤 30 cm 下的淋失液。样品采集后加少许酸液, 用以抑制微生物的活动, 即送回实验室测定。

田面水及渗漏水从施肥后 2 d 即 (6 月 3 日) 开始取样, 截止到 10 月 2 日。前期每隔 2 d 取样, 后期频率减少。田面水共取样 18 次, 渗漏水共取样 20 次 (由于晒田, 田面水取样次数较渗漏水少 2 次)。

田面水 DP 与渗漏水 RP 经过 0.45 μm 滤膜过滤-钼锑抗比色法测定, 田面水 TP 与渗漏水 TP 采用 K₂S₂O₈ 氧化-紫外分光光度法测定^[20], 田面水 PP 为田面水 TP 与田面水 DP 之差。根据徐向阳和刘俊报道的方法估算, 水稻生长期间稻田的渗漏水量^[21-22], 每季 (年) 通过地下渗漏流失的磷量 (P_{load}) 可用每次渗漏水平均 TP 浓度和渗漏水体积乘积计算。渗漏水体积利用田间水分平衡的方法得到, 公式为:

$$P_{\text{load}} = \bar{C}_L V_L, V_L = (V_P + V_I) - (V_R + V_E)$$

式中: P_{load} 表示每季作物生长期磷素渗漏流失量, $\text{mg} \cdot \text{hm}^{-2}$; $\bar{C}_L$ 表示稻季 30 cm 处渗漏水平均磷浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V_L 表示每季土层的渗漏量, $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; V_P 表示稻季的降雨量, $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; V_I 表示灌水量; V_R 表示径流量; V_E 表示蒸腾蒸发量, $V_E = KE_0$, E_0 表示蒸发量, K 在每个特定月份对水稻生长来说是一常量。

试验所需气象资料由武穴市气象站提供, 气象站距离试验田约 1 km。

用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 11.0 软件进行试

验数据统计检验和方差分析。

2 结果

2.1 田面水磷素动态

由于第 1 次采样时间滞后于施肥当日, 本研究中处理 NTC 和 CTC 田面水 TP 浓度峰值只是在第 1 次采样时(6 月 3 日)观察到(图 1(a)), 分别为 $(9.79 \pm 0.65) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(8.25 \pm 0.29) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随后迅速下降, 到 6 月 21 日, NTC 和 CTC 田面水 TP 浓度下降到 NT0 和 CT0 水平, 趋于稳定; 不施肥处理 NT0 和 CT0 田面

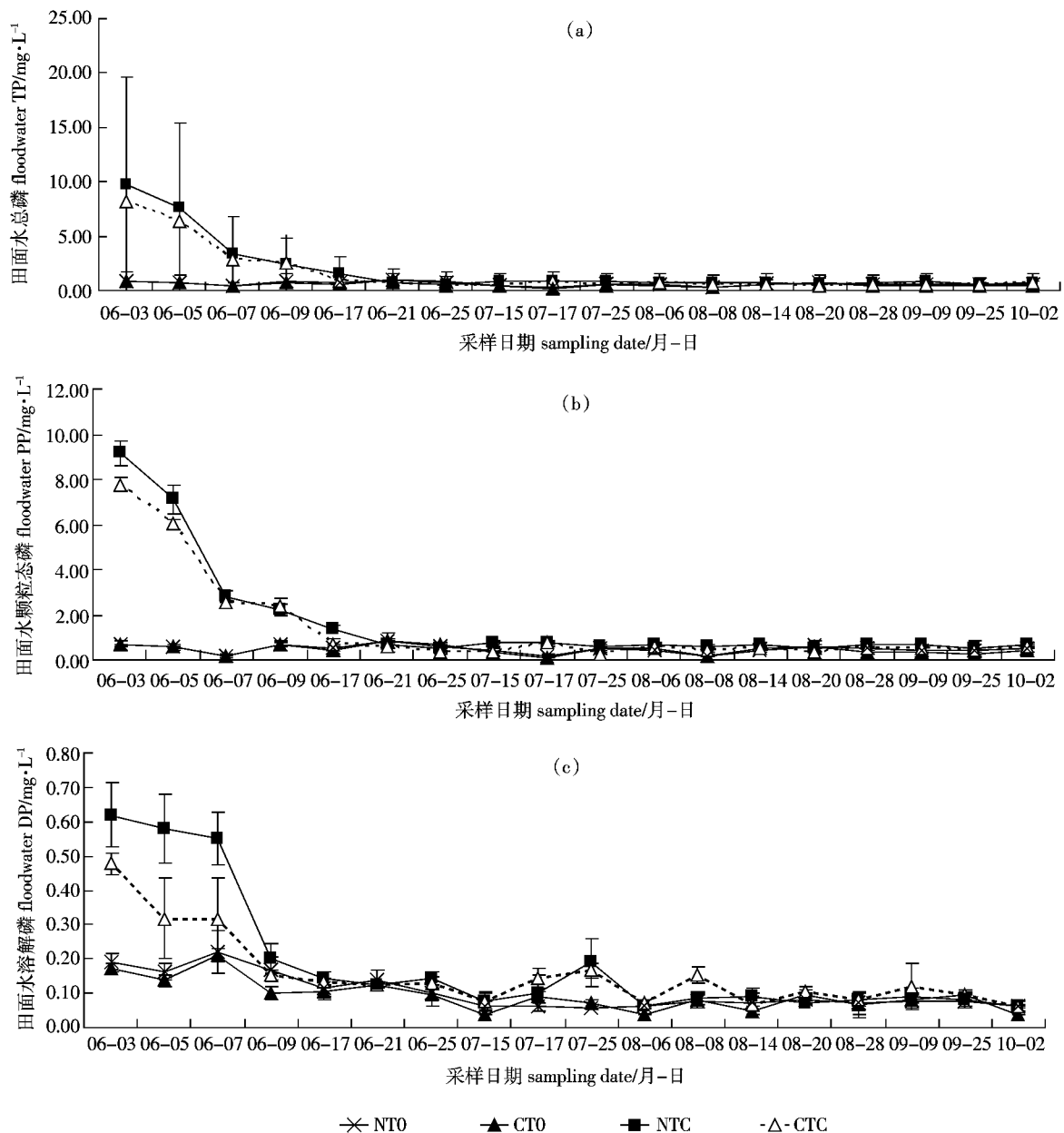


图1 稻田田面水总磷、溶解态磷与颗粒态磷动态

Figure 1 Variations of floodwater TP, PP and DP in paddy fields

水 TP 浓度在 $0.26\sim 1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内波动, 无显著变化, 平均值分别为 $(0.57\pm 0.08)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(0.46\pm 0.10)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。整个生育期内施肥处理 NTC 和 CTC 的田面水 TP 浓度显著高于对照 NT0 和 CT0 ($P<0.01$), NTC 显著高于 CTC ($P<0.01$), NT0 与 CT0 差异不显著 ($P>0.05$)。

稻田田面水 PP 浓度变化趋势与 TP 浓度变化趋势一致(图 1(b)), 即在第 1 次采样时, 观察到处理 NTC 和 CTC 田面水 PP 浓度峰值, 分别为 $(9.17\pm 0.16)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(7.88\pm 0.12)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 随后迅速下降, 到 6 月 21 日, NTC 和 CTC 田面水 PP 浓度下降到对照 NT0 和 CT0 水平; 不施肥处理 NT0 与 CT0 田面水 PP 浓度在 $(0.28\sim 0.72)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动, 平均值分别为 $(0.49\pm 0.09)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(0.45\pm 0.10)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。整个生育期两施肥处理 NTC 和 CTC 田面水 PP 浓度显著高于对照 NT0 和 CT0 ($P<0.01$), NTC 显著高于 CTC ($P<0.01$), NT0 与 CT0 差异不显著 ($P>0.05$)。

由图 1(c)可知, 稻田田面水 DP 浓度变化趋势与稻田田面水 TP 浓度和 PP 浓度变化趋势较为一致。在第一次采样时, 观察到处理 NTC 和 CTC 田面水 DP

浓度峰值, 分别为 $(0.62\pm 0.1)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(0.48\pm 0.03)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 随后两周迅速下降, 到 6 月 17 日, 下降到对照 NT0 和 NT0 水平; 不施肥处理 NT0 和 CT0 田面水 DP 浓度在 $(0.04\sim 0.21)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动, 变化幅度不大, 平均值分别为 $(0.1\pm 0.02)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(0.09\pm 0.01)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。整个生育期内, 两施肥处理 NTC 和 CTC 田面水 DP 浓度显著高于对照 NT0 和 NTC ($P<0.01$), NTC 显著高于 CTC ($P<0.05$), NT0 和 NT0 差异不显著 ($P>0.05$)。

2.2 渗漏水磷素动态

由图 2(a)可知, 在第 1 次采样时, 观察到处理 NTC 和 CTC 稻田渗漏水 TP 浓度峰值, 分别为 $(0.61\pm 0.054)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(0.60\pm 0.065)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 随后下降, 一个半月后达到对照水平; 不施肥处理 NT0 和 CT0 渗漏水 TP 浓度在 $(0.05\sim 0.15)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动, 均值为 $(0.08\pm 0.015)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(0.09\pm 0.020)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在整个生育期内施肥处理 NTC 和 CTC 稻田渗漏水 TP 显著高于对照 NT0 和 CT0 ($P<0.01$), 而 NTC 与 CTC 无明显差异 ($P>0.05$), NT0 与 CT0 差异不显著 ($P>0.05$)。

施肥 2 d 后, 处理 NTC 和 CTC 稻田渗漏水 RP 浓度迅速达到最大值(图 2(b)), 分别为 (0.57 ± 0.025)

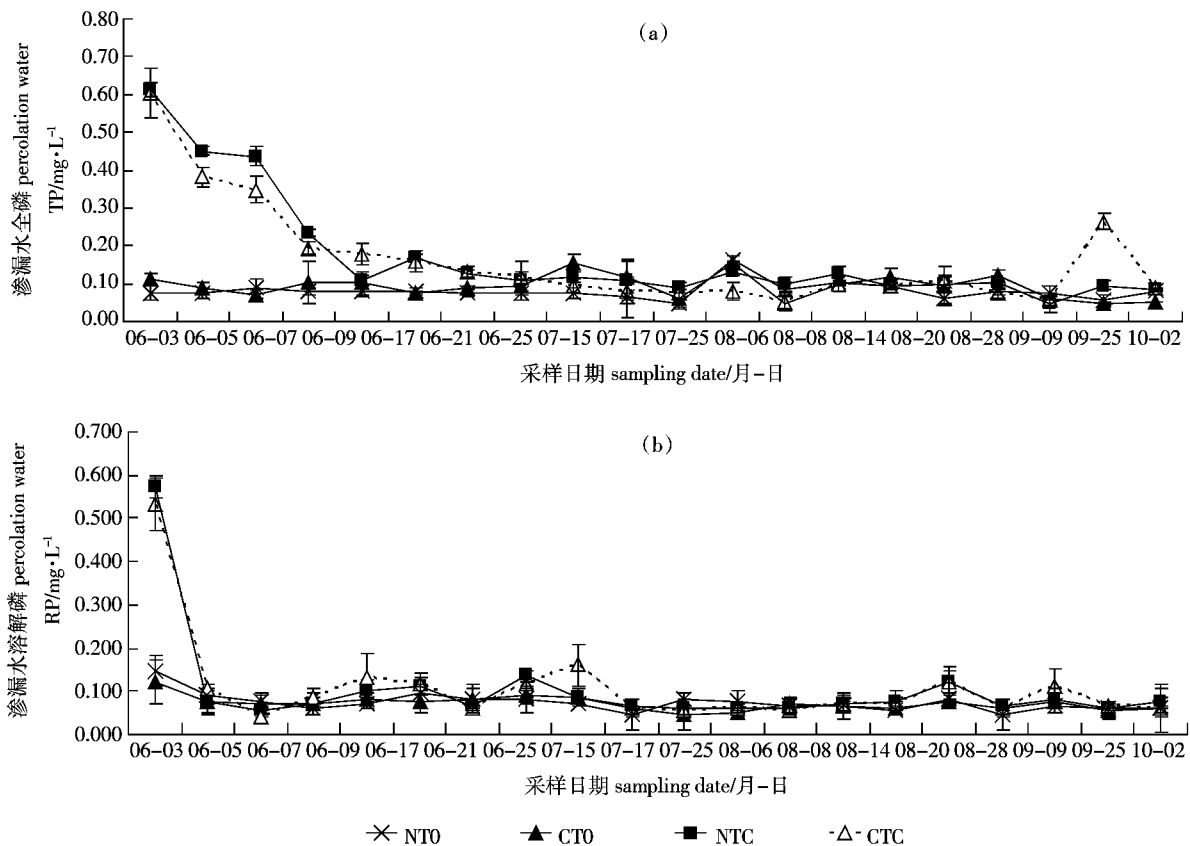


图 2 稻田渗漏水总磷与溶解磷动态

Figure 2 Variations of percolation TP and RP in paddy fields

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(0.53\pm 0.060)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 后急剧下降, 4 d 后达对照 NT0 和 CT0 水平; 不施肥处理 NT0 和 CT0 稻田渗漏水 RP 浓度在 $(0.047\sim 0.147)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动, 平均值为 $(0.075\pm 0.023)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(0.073\pm 0.021)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。整个生育期内施肥处理 NTC 和 CTC 渗漏水 RP 浓度显著高于对照 NT0 和 CT0 ($P<0.01$), NTC 与 CTC 差异不显著 ($P>0.05$), NT0 与 CT0 无显著差异 ($P>0.05$)。

2.3 渗漏量

由表 1 可知, 施肥处理 NTC 与 CTC 通过渗漏引起的 DP 和 TP 的渗漏量显著高于不施肥处理 NT0 与 CT0, 这表明磷肥施入显著增加了磷素的下渗淋失^[23]。耕作措施不影响 DP 与 TP 的渗漏量。本试验 DP 淋失量为 $(0.24\sim 0.35)\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 低于李卫正等报道的 DP 淋失量^[22]。其原因可能与水稻土质地、施肥方法、施肥时间以及不同灌水方式有关。

表 1 水稻全生育期不同处理的磷素下渗淋失量 ($\text{kg P}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Table 1 P leakage from different treatments during rice growing season in paddy fields ($\text{kg P}\cdot\text{hm}^{-2}$)

处理	TP 渗漏量	DP 渗漏量
NT0	0.27a	0.25a
CT0	0.30a	0.24a
NTC	0.56b	0.34b
CTC	0.52b	0.35b

注: 同一列不同字母表示在 5% 水平上的差异显著。

Notes: Different letters in a row mean significant differences at the 5% level.

3 讨论

3.1 田面水磷素变化

本研究表明, 施肥后面水各形态磷迅速升高, 1 周后迅速降低并趋于稳定; 这与周全来和周萍等人研究较为一致^[24-25], 其原因可能与水中颗粒或表土对田面水磷素的固定, 磷素的淋失以及水稻生长吸收^[26]及前期的稻田排水和灌水稀释有关。

6 月 17 日之前, NTC 田面水 TP、DP 与 PP 浓度显著高于 CTC; 而 6 月 17 日以后, NTC 田面水 TP、DP 与 PP 浓度略高于 CTC, 但差异不显著。这主要因为水稻生长早期, 免耕稻田土壤表层有较多的油菜秸秆残留, 油菜秸秆存在降低了土壤对肥料磷的吸附, 提高了土壤表层磷的有效性^[27-28]。到水稻生育期后期各处理无显著差异, 说明控制稻田磷素流失应在生育期前期, 施肥后 1 周是关键时期, 这与大部分研究结果是一致的^[29-30]。各处理 DP 浓度均值在 $0.04\sim 0.62\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 超过了国际上一般认为的水体富营养化的临

界值 $0.02\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[31], 表明对周边水体富营养化具有贡献作用。

3.2 渗漏水磷素变化

施肥处理 NTC 和 CTC 渗漏水 TP 和 RP 浓度显著高于不施肥处理, 表明施磷肥提高了稻田渗漏水磷素的水平^[22]。在施肥后的前期, 处理 NTC 和 CTC 渗漏水 RP 与 TP 浓度相对较高, 这是由于在淹水之前土壤基质的收缩引起断裂导致肥料下渗淋失^[32-33]。处理 NTC 和 CTC 渗漏水 RP 与 TP 浓度差异不显著, 这可能与早期稻田排水晒田有关。由于前期农作需要, 6 月 7 日的稻田排水导致大量 P 流失, 同时水稻生长和土壤固定, 致使淋失的 P 量少, 从而处理 NTC 和 CTC 渗漏水 RP 浓度与 TP 浓度差异不显著。施肥 4 d 后处理 NTC 和 CTC 渗漏水 RP 浓度就下降到对照水平, 而渗漏水 TP 浓度在施肥后一个半月才达到对照水平, 尽管对其原因尚不清楚, 但在施肥后早期加强对磷下渗所引起的地下水污染控制是必要的。

处理 NT0、CT0、NTC 和 CTC 渗漏水 RP/TP 为 61.13%~92.74%, 说明渗漏水磷素以可溶态磷淋溶下渗为主, 这与 Hansen 等认为耕作土壤中流失进入水体的磷约有 75% 是溶解态磷的结论相同^[34-35], 而与李卫正等认为通过渗漏迁移作用进入水体的磷素主要是以 PP 为主不同^[22]。造成这种差异的原因可能与李卫正等所采用的自制渗漏水采集装置与本研究所用的渗漏水采集装置滤孔直径大小不同有关。

4 小结

(1) 施肥显著提高稻田田面水的磷素含量, 施肥后 1 周内是控制田面水磷素径流损失的关键时期。

(2) 免耕与翻耕稻田肥料磷主要以可溶态磷下渗。

(3) 在施 P 肥后, 免耕与翻耕田面水 DP 的浓度达到稳定后仍保持在 $0.04\sim 0.1\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 渗漏水 RP 浓度在 $0.047\sim 0.117\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 超过了水体富营养化的临界值, 表明这部分磷对环境的影响是不可忽视的。

(4) 免耕施肥处理田面水各形态磷素浓度均显著高于免耕翻耕处理。

参考文献:

- [1] 李庆召, 王定勇, 朱 波, 等. 川中紫色土早坡地磷素的输出特征研究[J]. 水土保持学报, 2004, 15(6): 97-99.
Li Qing-zhao, WANG Ding-yong, ZHU Bo, et al. Study of phosphorus load from purple soil cropland in mid-sichuan[J]. *Soil Water Conserv*, 2004, 15(6): 97-99.
- [2] 刘 方, 罗海波, 舒英格, 等. 黄壤旱地-水系统中磷释放及影响因

- 素的研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(1): 118-124.
- LIU Fang, LUO Hai-bo, SHU Ying-ge, et al. Soil phosphorus release to the water bodies in the upland fields of yellow soil areas and the influencing factors[J]. *Sci Agri Sinica*, 2006, 39(1): 118-124.
- [3] Sharpley A N, Chapra S C, Wedepohl R, et al. Managing phosphorus for protection of surface water: Issues and options[J]. *J Environ Qual*, 1994, 23: 437-451.
- [4] ZHOU M R D, Hanis W G. Phosphorus sorption characteristics of bh and ht horizon from sandy coastal plain soils[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1997, 61: 1364-1369.
- [5] ZHANG Z J, ZHU Y M, GUO P Y, et al. Potential loss of phosphorus from a rice field in taihu lake basin[J]. *J Environ Qual*, 2004, 33: 1403-1412.
- [6] Harada H, Ota T, Murakami S. Water conservation effect of puddle elimination or reduction in depth of ponding water on pollutant loads before rice transplanting in Hachirogata polder[C]. Proceedings of the World Rice Research Conference, Tokyo Japan; 2004, 281.
- [7] Hossain M Z, Shibuya K, Saigusa M. No-tillage transplating system of rice with controlled availability fertilizer in the nursery box. 1. Growth characteristics and yield of rice in three representative paddy soils[J]. *Tohoku J Agr Res*, 2000, 50(3-4): 71-86.
- [8] 邹应斌, 李克勤, 任泽民, 等. 水稻的直播与免耕直播栽培研究进展[J]. 作物研究, 2003, 17(1): 52-59.
- ZOU Ying-bin, LI Ke-qin, REN Ze-min, et al. Advances in studies on direct planting of rice with or without plowing[J]. *Crop Research*, 2003, 17(1): 52-59.
- [9] Harada H, Kobayashi H, Shindo H. Reduction in greenhouse gas emissions by no-tilling rice cultivation in Hachirogata polder, northern Japan: life-cycle inventory analysis[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2007, 53: 668-677.
- [10] 任泽明. 湖南水稻免耕直播、免耕抛秧技术的发展前景[J]. 作物研究, 2003, 17(4): 174-175.
- REN Ze-ming. Prospects for rice no-tillage direct-planting and no-tillage broadcasting-seedlings cultivation techniques in Hunan[J]. *Crop Research*, 2003, 17(4): 174-175.
- [11] 高明, 张磊, 魏朝富, 等. 稻田长期垄作免耕对水稻产量及土壤肥力的影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(4): 343-348.
- GAO Ming, ZHANG Lei, WEI Chao-fu, et al. Study of the changes of the rice yield and soil fertility on the paddy field under long-term no-tillage and ridge culture conditions [J]. *Plant Nutr Fertil Sci*, 2004, 10(4): 343-348.
- [12] 高明, 周保同, 魏朝富, 等. 不同耕作方式对稻田土壤动物、微生物及酶活性的影响研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(7): 1177-1181.
- GAO Ming, ZHOU Bao-tong, Wei Chao-fu, et al. Effect of tillage system on soil animal, microorganism and enzyme activity in paddy field [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, 15(7): 1177-1181.
- [13] Bhattacharyya R, Kundu S, Pandey S C, et al. Tillage and irrigation effects on crop yields and soil properties under the rice-wheat system in the Indian Himalayas[J]. *Agr Water Manage*, 2008, 95: 993-1002.
- [14] Bhushan L, Ladha J K, Gupta R K, et al. Saving of water and labor in a rice-wheat system with no-tillage and direct seeding technologies[J]. *Agron J*, 2007, 99: 1288-1296.
- [15] Gangwar K S, Tomar O K, Pandey D K. Productivity and economics of transplanted and direct-seeded rice (*Oryza sativa*) - based cropping systems in Indo-Gangetic plains[J]. *Ind J Agr Sci*, 2008, 78: 655-658.
- [16] Wang K, Zhang Z J, Zhu Y M, et al. Surface water phosphorus dynamics in rice fields receiving fertiliser and manure phosphorus[J]. *Chemosphere*, 2001, 42: 209-214.
- [17] Zhang H C, Cao Z H, Wang G P, et al. Winter runoff losses of phosphorus from paddy soils in the Taihu Lake Region of South China [J]. *Chemosphere*, 2003, 52: 1461-1466.
- [18] Zhang Z J, Zhu Y M, Guo P Y, et al. Potential loss of phosphorus from a rice field in Taihu Lake Basin[J]. *J Environ Qual*, 2004, 33: 1403-1412.
- [19] Zhang H C, Cao F L, Fang S Z, et al. Effects of agricultural production on phosphorus losses from paddy soils: a case study in the Taihu Lake Region of China[J]. *Wetlands Eco Manage*, 2005, 13: 25-33.
- [20] 国家环保局. 水和废水分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989: 246-248, 274-275.
- SEPA. Methods for examination of water and wastewater[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1989: 272-274, 256-258, 278-280.
- [21] 徐向阳, 刘俊. 太湖湖区有机物流失模拟[J]. 湖泊科学, 1999, 11(1): 81-85.
- XU Xiang-yang, LIU Jun. Simulation of organic matter loss in the area around Taihu[J]. *J Lake Sci*, 1999, 11(1): 81-85.
- [22] 李卫正, 王改萍, 张焕朝, 等. 两种水稻土磷素渗漏流失及其与Olsen磷的关系[J]. 南京林业大学学报, 2007, 31(3): 52-56.
- LI Wei-zheng, WANG Gai-ping, ZHANG Huan-chao, et al. Phosphorus move down by leaching and related to Olsen -P of surface soil in two paddy soils[J]. *J Nanjing For Uni*, 2007, 31(3): 52-56.
- [23] Zhang H C, Cao Z H, Wang G P, et al. Winter runoff losses of phosphorus from paddy soils in the Taihu Lake Region of South China [J]. *Chemosphere*, 2003, 52: 1461-1466.
- [24] 周全来, 赵牧秋, 鲁彩艳, 等. 施磷对稻田土壤及田面水磷浓度影响的模拟[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1845-1848.
- ZHOU Quan-lai, ZHAO Mu-qiu, LU Cai-yan, et al. Effects of P application on P concentrations in paddy soil and its surface water: A simulation test[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2006, 17(10): 1845-1848.
- [25] 周萍, 范先鹏, 何丙辉, 等. 江汉平原地区潮土水稻田面水磷素流失风险研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(4): 47-50, 116.
- ZHOU Ping, FAN Xian-peng, HE Bing-hui, et al. Research on loss risk of phosphorus in surface water of paddy soil in Jiangnan Plain Region[J]. *J Soil Water Conserv*, 2007, 21(4): 47-50, 116.
- [26] 李成芳, 曹凑贵, 汪金平, 等. 稻鸭、稻鱼共作对稻田P素动态变化的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2): 126-131.
- LI Cheng-fang, CAO Cou-gui, WANG Jin-ping, et al. Phosphorus variations of paddy fields in rice-duck and rice-fish ecosystems[J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2009, 18(2): 126-131.
- [27] Phiri S, Amezcua E, Rao I M, et al. Disc harrowing intensity and its impact on soil properties and plant growth of agropastoral systems in the Llanos of Colombia[J]. *Soil Till Res*, 2001, 62, 131-143.

- [28] Borie F, Redel Y, Rubio R, et al. Interactions between crop residues application and mycorrhizal developments and some soil-root interface properties and mineral acquisition by plants in an acidic soil [J]. *Biol Fertil Soils*, 2002, 36: 151-160.
- [29] 张志剑, 朱荫渭, 王 珂, 等. 水稻田土-水系统中磷素行为及其环境影响研究[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(2): 229-232.
ZHANG Zhi-jian, ZHU Yin-mei, WANG Ke, et al. Phosphorus behavior in soil-water system of paddy field and its environmental impact[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2001, 12(2): 229-232.
- [30] 金 洁, 杨京平, 施洪鑫, 等. 水稻田面水中氮磷素的动态特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(2): 357-361.
JIN Jie, YANG Jing-ping, SHI Hong-xin, et al. Variations of nitrogen and phosphorus in surface water body of a paddy field[J]. *J Agro-Environ Sci*, 2005, 24(2): 357-361.
- [31] Sharpley A N, Meyer M. Managing agriculture nonpoint-source overview [J]. *J Environ Qual*, 1994, 23: 1-3.
- [32] Heckrath G, Brooks P C, Poulton P R, et al. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk Experiment[J]. *J Environ Qual*, 1995, 24: 904-910.
- [33] Simard R R, Beauchemin S, Haygarth P M. Potential for preferential pathways of phosphorus transport[J]. *J Environ Qual*, 2000, 29: 97-105.
- [34] Hansen N C, Gupta S C. Snowmelt runoff, sediment and phosphorus losses under three different tillage systems[J]. *Soil Till Res*, 2000, 57: 93-100.
- [35] Gaynor J D, Findlay W I. Soil and phosphorus loss from conservation and conventional tillage in corn production[J]. *J Environ Qual*, 1995, 24: 734-741.