

模拟人工蓄水条件下拔节孕穗期稻田的氮磷 动态特征及其降污潜力

冯国禄^{1,2}, 杨仁斌^{2*}, 丁孟²

(1. 吉首大学 生态旅游重点实验室, 湖南 张家界 427000; 2. 湖南农业大学 资源环境学院, 湖南 长沙 410128)

摘要: 采用室外微区模拟稻田人工蓄水的控排水技术, 在 5、10、20 cm 等 3 个蓄水深度处理(分别表示为 t-5、t-10、t-20)条件下, 对拔节孕穗期稻田中氮磷的动态特征及降污潜力进行了研究. 结果表明, 田面水中 TN、NH₄⁺-N 和 TP 浓度与蓄水深度呈显著负相关($y = -2.18x + 10.870$, $R^2 = 0.960$; $y = -0.048x + 2.063$, $R^2 = 0.999$; $y = -0.05x + 0.223$, $R^2 = 0.949$), 即蓄水深度越大, TN、NH₄⁺-N 和 TP 浓度越低. 田面水中的 NO₃⁻-N 浓度与蓄水处理相关性不明显, 但比较而言, t-20 的 NO₃⁻-N 浓度要大于 t-5 和 t-10, 并于深施处理第 5 天后出现反弹升高现象. 撒施尿素对田面水中悬浮物(SS)有絮凝沉淀作用, 以致在施肥后第 2 天 SS 浓度最低. 从减排降污综合效能看, 在暴雨或大雨频发期, 将排水堰高度提高到 10~20 cm, 延长滞留滞水时间 5~7 d 左右, 具有显著的减排降污潜力.

关键词: 人工蓄水; 拔节孕穗期; 稻田; 氮磷; 动态特征; 降污潜力

中图分类号: X505 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2010)06-0710-05

Dynamics of nitrogen and phosphorus in impounded paddy field in jointing and booting stages and its pollution-reducing potential

FENG Guo-lu^{1,2}, YANG Ren-bin^{2*}, DING Meng²

(1. Key Laboratory of Eco-Tourism, Jishou University, Zhangjiajie, Hunan 427000, China; 2. College of Resources and Environment, HNAU, Changsha 410128, China)

Abstract: Variation characters of nitrogen and phosphorus in the rice field and its pollution-reducing potential were researched. Using controlled drainage technique in the micro-zone simulated paddy field with the water depth of 5, 10 and 20 cm (expressed as t-5, t-10, t-20, respectively). Concentration of TN, NH₄⁺-N and TP turned low with the water depth in the field, and showed a significant correlation between them (TN: $y = -2.18x + 10.87$, $R^2 = 0.960$; NH₄⁺-N: $y = -0.048x + 2.063$, $R^2 = 0.999$; TP: $y = -0.05x + 0.223$, $R^2 = 0.949$). NO₃⁻-N concentration in the t-20 treatment was higher than that in the t-5 and t-10 treatment, and increased at 5 d after deep application of fertilizer. However, there was not an obvious correlation between NO₃⁻-N concentration and water depth in the field. Urea caused the lowest SS concentration to appear at 2 d after application because of its flocculation and sedimentation to the suspended particulates. During heavy rain frequent-occurrence period, drainage weir should be increased by 10~20 cm to extend the water logging time 5~7 d longer to reach the best pollution-reducing potential.

Key words: artificial water storage; jointing and booting stage; paddy field; nitrogen and phosphorus; dynamics; pollution-reducing potential

水体富营养化是当今世界的水污染难题, 并已成为世人关注的主要环境问题之一. 基于此, 世界各国在控制氮、磷面源污染物方面, 其着重点主要

放在城市污水等点源污染治理上, 但取得的成效非常有限. 大量研究^[1-3]表明, 富营养化现象的发生与农田土壤中的氮、磷等养分的流失有着十分密切的

收稿日期: 2010-06-21

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2005AA601010-103); 国家科技部重大专项(2008ZX07211-1001)

作者简介: 冯国禄(1964—), 男, 湖南永州人, 博士研究生, 吉首大学副教授, 主要从事农业面源污染研究, fengguolu8@163.com;

*通讯作者, yrb4806@yahoo.com.cn

关系。中国南方是主要的水稻产区,每年 6—7 月是早稻的拔节孕穗期,传统的肥水管理是撒施孕穗肥尿素,而此时若遇到强降水,会因大面积的农田排水引起水体环境富营养化。

控制排水研究始于 20 世纪 90 年代中后期。欧美一些国家在旱作物种植区主要利用暗管控制排水^[4-7],较少涉及稻田。目前,控制排水减少农田氮磷损失的途径主要有:一是减少农田排水量^[4-5, 8-11];二是降低排水中氮磷浓度^[7-8, 12-13]。

笔者于 2009 年 6 月 21 日至 28 日在湖南农业大学试验基地进行微区模拟稻田拔节孕穗期施肥蓄水试验,取样测定稻田土壤、田面水中氮、磷质量浓度的变化,测算不同蓄水深度和退排水时期的降污潜力,以期为稻田夏季控排水技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试水稻为陆两优 996 杂交水稻。供试土壤为湖南农业大学资源与环境学院试验基地的红潮土,其基本理化性质为:有机质 11.8 g/kg,全氮 1.12 g/kg,全磷 1.38 g/kg,全钾 27.6 g/kg,水解氮 96.6 mg/kg,速效磷 70.8 mg/kg,速效钾 142.6 mg/kg, pH5.5。灌溉水取自附近井水,经蓄水池放置 1 周自然氧化后备用。复合肥的成分为氯化铵、磷酸铵和氯化钾,其 N、P、K 含量分别为 21%、8%、11%。

1.2 试验设计

设计砖混墙围成的模拟试验田,2009 年 5 月 11 日 17:00 插秧,每个试验小区插 35 株秧苗,共 4 个试验区(4 m×1.5 m)。各试验区呈 2 排对称排列,中间设有灌水渠。区内再用 PVC 板隔成 3 个小区,每个小区面积为 1.5 m²。为防止淋溶,将试验田底做成水泥地面,上铺充分混匀后的红潮土,土层厚 45 cm 左右。在每个试验小区外侧设有离表土层不同高度的带橡胶塞的 PVC 排水管,管口水平朝外。试验时小区各处理蓄相应深度的水,通过打开橡胶塞使小区内田面水刚好从排水管中流出。

根据天气预报选择无雨天气,从 6 月 21 日开始试验,设 5、10、20 cm 共 3 个蓄水深度处理(分别以 t-5、t-10、t-20 表示),每个处理设 3 个重复。尿素含 N 46.0%。钾肥为 KCl, K₂O 含量为 60%。按每

公顷追施尿素 45 kg、钾肥 45 kg,折合 1.5 m²小区的施肥量为尿素、钾肥各 6.75 g,平均株施尿素、钾肥各 0.19 g。在不扰动土层的情况下,采用撒施尿素的施肥方式,施肥后即进行人工灌水 1 周的控排水试验,于第 1/24、1、2、3、5、7 天取水样和土样进行相关养分的测定。试验于 6 月 28 日结束,试验期间一直保持各处理的蓄水深度不变。

1.3 测定项目与方法

试验后的第 1/24、1、2、3、5、7 天分别从模拟稻田中采集水样,带回实验室后立即测定各项指标的含量。水样各指标测定方法参照文献^[14],具体为总氮(TN)采用硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定;铵氮(NH₄⁺-N)采用纳氏试剂光度法(GB7479—87)测定;硝氮(NO₃⁻-N)采用酚二磺酸光度法测定(GB7480—87);总磷(TP)和可溶性磷(DP)采用钼锑抗分光光度法(GB11893—89)测定。将被水样过滤后的微孔滤膜放在称至恒重的铝盒内,再将该铝盒置于 103~105 °C 的烘箱烘至恒重,增加的质量为不可滤悬浮物(SS)。所有水样在 12 h 内预处理完毕。参照文献^[15]的方法测定土壤样品中的铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、总氮(TN)和总磷(TP)。鲜样中的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量分别采用 KCl 提取分光光度法和酚二磺酸光度法测定。干样中的总氮(TN)采用浓硫酸消解分光光度法测定。总磷(TP)采用高氯酸-硫酸消解钼锑抗分光光度法测定;速效磷(AP)采用钼蓝比色法测定。

数据采用 Excel 2003 和 DPS 统计分析软件分析。

2 结果与分析

2.1 田面水和土壤中氮素的动态特征

由表 1 可知,田面水和土壤中 NH₄⁺-N 质量浓度表现出不同的变化趋势。前者在施肥处理后先是迅速上升,第 1 天达峰值,随后逐渐下降。有研究表明,控制排水条件下排水中氮磷浓度降低的主要途径是作物吸收^[16]以及硝化、反硝化作用^[17-18]和泥沙沉淀^[12, 19-20]。本研究中,土壤中 NH₄⁺-N 质量浓度在施肥后 1 周内表现为升—微降—缓慢上升的趋势,是因为尿素施入田面水后,溶解于田面水中的尿素水解为 NH₄⁺,部分 NH₄⁺随固体颗粒物沉降或被土水界面的土壤黏粒吸附而进入土中,以致田面水

中NH₄⁺-N质量浓度缓慢降低,这与殷国玺等^[12, 18]的研究结果相一致. 由于水稻的吸收或土壤中的反硝化作用,致土壤中的NH₄⁺-N质量浓度在第2天达峰

值后缓慢降低;第5天后缓慢上升,可能是土壤中NH₄⁺不断被土壤黏粒吸附所致.

表1 不同处理稻田NH₄⁺-N的质量浓度
Table 1 Changes of NH₄⁺-N concentration in the paddy field under different treatments

| 处理 | NH ₄ ⁺ -N质量浓度 | | | | | | | | | | | |
|------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|--------|------|------|------|------|------|
| | 田面水 | | | | | | 土壤 | | | | | |
| | 1/24 d | 1 d | 2 d | 3 d | 5 d | 7 d | 1/24 d | 1 d | 2 d | 3 d | 5 d | 7 d |
| t-5 | 0.87 | 1.58 | 0.99 | 0.91 | 0.65 | 0.49 | 4.93 | 6.96 | 7.91 | 7.34 | 6.36 | 7.67 |
| t-10 | 0.60 | 1.11 | 0.63 | 0.59 | 0.42 | 0.31 | 3.16 | 6.11 | 6.87 | 5.20 | 5.53 | 7.62 |
| t-20 | 0.28 | 0.62 | 0.35 | 0.31 | 0.25 | 0.14 | 2.12 | 4.63 | 4.23 | 3.41 | 4.45 | 7.07 |

由表2可见,田面水中NO₃⁻-N质量浓度表现为升—峰值—下降—反弹的动态特征.究其原因,因为在控制排水条件下,土壤的厌氧条件加强,更利于微生物的反硝化作用^[18].由于土壤微生物的反硝化作用,土壤中NH₄⁺部分转化为NO₃⁻,不易被土壤吸附的NO₃⁻进入田面水中,使田面水中的NO₃⁻-N质量浓度在1~2 d达到峰值.土壤中NO₃⁻-N质量浓度变化平稳,在第1天后微弱降低,可能与植物的吸收和反硝化作用有关^[16].田面水和土壤中的

NO₃⁻-N质量浓度在第5天后都出现反弹现象,可能是由于稻田的硝化-反硝化作用、田面水侵蚀以及过滤渗透等综合因素的影响,致使田面水和土壤之间的NO₃⁻-N质量浓度趋于动态平衡状态.数据分析表明,田面水和土壤中NO₃⁻-N质量浓度,虽然在t-5和t-10之间变化不大,但蓄水处理后1周内,t-20的NO₃⁻-N质量浓度要大于t-5和t-10.这是因为蓄水深度越大,地下水水位抬高,土壤湿度增加,土壤的厌氧条件加强,更利于微生物的反硝化作用^[21].

表2 不同处理稻田NO₃⁻-N的质量浓度
Table 2 Changes of NO₃⁻-N concentration in the paddy field under different treatments

| 处理 | NO ₃ ⁻ -N质量浓度 | | | | | | | | | | | |
|------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 田面水 | | | | | | 土壤 | | | | | |
| | 1/24 d | 1 d | 2 d | 3 d | 5 d | 7 d | 1/24 d | 1 d | 2 d | 3 d | 5 d | 7 d |
| t-5 | 0.20 | 0.27 | 0.81 | 0.92 | 0.07 | 1.35 | 0.007 | 0.009 | 0.008 | 0.008 | 0.007 | 0.010 |
| t-10 | 0.19 | 0.44 | 0.46 | 0.39 | 0.05 | 0.30 | 0.008 | 0.009 | 0.007 | 0.007 | 0.006 | 0.015 |
| t-20 | 0.24 | 0.75 | 2.42 | 1.50 | 0.44 | 3.05 | 0.009 | 0.010 | 0.009 | 0.010 | 0.009 | 0.023 |

由表3可知,田面水TN质量浓度随时间变化呈微降—升—降—升的趋势.由于NH₄⁺能被植物吸收和土壤胶体吸附,TN质量浓度在第1天呈现微降;在第3天达峰值,说明此时田面水中尿素已基本水解完全;之后下降,并于第5天达最低浓度水平.已有研究^[22]表明,田面水氮素质量浓度随时间动态下

降,首先是由于土壤的吸附和过滤作用;其次与氨氮挥发有关.氨挥发过程十分复杂,且受许多因素的影响,是稻田氮素损失的主要途径之一.另外,稻田的硝化-反硝化作用中引起的气态氮(N₂或N₂O)排放也能造成一定的氮损失.

表3 不同处理稻田TN质量浓度
Table 3 Changes of TN concentration in the paddy field under different treatments

| 处理 | TN质量浓度 | | | | | | | | | | | |
|------|--------|------|------|------|------|------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|
| | 田面水 | | | | | | 土壤 | | | | | |
| | 1/24 d | 1 d | 2 d | 3 d | 5 d | 7 d | 1/24 d | 1 d | 2 d | 3 d | 5 d | 7 d |
| t-5 | 5.87 | 5.11 | 6.28 | 8.44 | 3.65 | 4.09 | 87.43 | 89.33 | 86.86 | 72.19 | 81.71 | 77.71 |
| t-10 | 4.92 | 4.57 | 5.52 | 7.03 | 3.95 | 4.08 | 73.90 | 76.00 | 64.57 | 81.14 | 101.10 | 73.14 |
| t-20 | 4.33 | 4.02 | 4.21 | 5.66 | 4.08 | 4.79 | 90.10 | 95.43 | 82.86 | 86.67 | 99.24 | 68.95 |

2.2 田面水和土壤中磷素的动态特征
从农田流失的磷素主要是非溶解态磷(DRP)

和颗粒结合态磷(PP),其中80%为PP,这部分磷可以随水流运输至较远的地区而输出农田^[23].有研

究^[24-25]证实,在垂直方向上DRP有渗漏和积累的现象,其中渗漏占 97%。本蓄水试验的微区模拟田底是水泥地面,渗漏现象可以忽略不计。

由表 4、表 5 可见,田面水中TP和DP质量浓度呈先升后降再上升的趋势,均于第 3 天达峰值。这可能是由于施尿素氮肥的激发效应^[26],导致了土壤

中磷素在前期向田面水中释放,而使田面水中TP和DP质量浓度升高,而由于土壤中磷素的不断释放,TP于第 3 天后达最低值,DP第 2 天后虽有反弹升高趋势,但于第 5 天后呈降低的趋势。后期田面水中DRP和PP,由于物理沉降而重新进入土壤中,使得田面水TP和DP质量浓度呈下降的趋势。

表 4 不同处理稻田 TP 质量浓度

Table 4 Changes of TP concentration in the paddy field under different treatments

mg/L

| 处理 | TP 质量浓度 | | | | | | | | | | | |
|------|---------|------|------|------|------|------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 田面水 | | | | | | 土壤 | | | | | |
| | 1/24 d | 1 d | 2 d | 3 d | 5 d | 7 d | 1/24 d | 1 d | 2 d | 3 d | 5 d | 7 d |
| t-5 | 0.12 | 0.13 | 0.13 | 0.16 | 0.11 | 0.12 | 719 | 776 | 661 | 503 | 608 | 670 |
| t-10 | 0.05 | 0.08 | 0.09 | 0.11 | 0.06 | 0.08 | 705 | 802 | 701 | 591 | 538 | 534 |
| t-20 | 0.05 | 0.05 | 0.06 | 0.08 | 0.05 | 0.06 | 556 | 622 | 569 | 472 | 503 | 538 |

表 5 不同处理稻田 DP 质量浓度

Table 5 Changes of DP concentration in the paddy field under different treatments

mg/L

| 处理 | DP 质量浓度 | | | | | | | | | | | |
|------|---------|------|------|------|------|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 田面水 | | | | | | 土壤 | | | | | |
| | 1/24 d | 1 d | 2 d | 3 d | 5 d | 7 d | 1/24 d | 1 d | 2 d | 3 d | 5 d | 7 d |
| t-5 | 0.05 | 0.10 | 0.06 | 0.21 | 0.05 | 0.03 | 68.79 | 78.54 | 77.54 | 65.52 | 89.28 | 53.85 |
| t-10 | 0.03 | 0.04 | 0.01 | 0.15 | 0.02 | 0.01 | 60.25 | 70.50 | 65.45 | 65.87 | 78.18 | 56.13 |
| t-20 | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.05 | 0.01 | 0.01 | 45.96 | 49.51 | 49.73 | 52.57 | 56.98 | 47.73 |

2.3 田面水中不可滤悬浮物的动态特征

从表 6 可以看出,蓄水处理的不可滤悬浮物(SS)含量呈高—低—升—降低的趋势。分析表明,尿素撒施田面水后,SS 吸附一部分尿素分子后迅速发生物理沉降,以致田面水中 SS 浓度于第 2 天达最低值。以后由于田面水中微生物大量繁殖,以致田面水中 SS 质量浓度反弹升高,并于第 3 天达峰值。随后田面水 SS 质量浓度随时间的推移,在重力的作用下缓慢下降而重新进入土壤,约 1 周后下降到较低浓度水平。

表 6 尿素撒施后田面水中 SS 质量浓度的变化

Table 6 Changes of SS concentration in the paddy water under different treatments

mg/L

| 蓄水处理 | SS 质量浓度 | | | | | |
|------|---------|-------|------|-------|-------|------|
| | 1/24 d | 1 d | 2 d | 3 d | 5 d | 7 d |
| t-5 | 31.00 | 10.00 | 3.00 | 22.00 | 11.00 | 5.00 |
| t-10 | 28.00 | 8.00 | 2.40 | 18.00 | 10.00 | 2.00 |
| t-20 | 16.00 | 6.00 | 2.00 | 12.00 | 8.00 | 1.00 |

2.4 模拟稻田蓄水处理降污潜力分析

由表 1~3 可见,在施肥后的 5 d 内,主要是由于蓄水对养分的稀释作用,3 个不同蓄水处理下田面水NH₄⁺-N质量浓度t-5 处理最大,t-20 处理最小,

且田面水NH₄⁺-N质量浓度与蓄水深度呈极显著负相关($y = -0.048x + 2.063, R^2 = 0.999$)。田面水和土壤中的NO₃⁻-N浓度,在t-5 和t-10 处理之间变化不大,但在蓄水处理的 1 周内,t-20 要大于t-5 和t-10。在施肥后的 5 d 内,田面水中TN质量浓度从大到小的处理依次为 t-5、t-10、t-20,田面水中TN质量浓度与蓄水深度呈极显著负相关($y = -2.18x + 10.87, R^2 = 0.960$)。表 4~6 表明,在蓄水处理约 1 周内TP质量浓度与蓄水深度呈极显著负相关($y = -0.05x + 0.223, R^2 = 0.949$),即蓄水越深,田面水TP质量浓度就越小。各处理SS质量浓度动态变化趋势一致,但总体上t-5 处理的SS质量浓度最大,t-20 处理最小,在施肥后 1 周内,田面水SS质量浓度与蓄水深度呈显著负相关($y = -5x + 27.32, R^2 = 0.986$)。

3 结论

6—7 月是中国南方早(中)稻的拔节孕穗期,又正值夏季暴雨频发期,若此时采取撒施方法追施尿素等氮肥,存在氮磷流失风险。采用人工蓄水的控排水技术,适当延长涝水滞留时间,显著降低稻田排水径流中的氮、磷浓度。本试验结果表明,田面

水中TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP质量浓度与蓄水深度呈显著的负相关,田面水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度则与蓄水深度相关不明显,但相比较而言,t-20要明显大于t-5和t-10,且在第5天后出现反弹现象.由于尿素撒施于田面水后,对田面水中悬浮物有絮凝沉淀作用,以致在施肥2d左右SS浓度最低.从减排降污综合效能看,在暴雨或大雨频发期,将排水堰高度提高到10~20cm,滞排涝水时间5~7d左右,具有显著的减排降污潜力.

参考文献:

- [1] Sharpley A N . Identifying sites vulnerable to phosphorus loss in agriculture runoff [J] . Environ Qual , 1995 , 24 : 947-951 .
- [2] Sharpley A N . Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus[J] . Environ Qual , 1995 , 24 : 920-926 .
- [3] Isermann K . Share of agriculture in nitrogen and phosphorus emissions into the surface waters of Western Europe against the back-ground of their eutrophication[J] . Fert Res , 1990 , 26 : 253-269 .
- [4] Hideo N , Muhammad A A , Hisao K . Nitrogen transport and transformation in packed soil columns from paddy fields[J] . Paddy and Water Environment , 2004 , 23 : 115-124 .
- [5] Ingrid W , Ingmar M , Harry L , et al . Controlled drainage-effects on drain outflow and water quality [J] . Agricultural Water Management , 2001 , 47 : 85-100 .
- [6] Tan C S , Drury C F , Soutani M , et al . Effect of controlled drainage and tillage on soil structure and tile drainage nitrate loss at the field scale[J] . Water Sci Tech , 1998 , 38(5) : 103-110 .
- [7] Ng H Y , Tan C S , Drury C F , et al . Controlled drainage and subirrigation influences tile nitrate loss and corn yields in a sandy loam soil in Southwestern Ontario [J] . Agriculture Ecosystems and Environment , 2002 , 90(1) : 81-88 .
- [8] Luederitz V , Eckert E , Martina L W , et al . Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands[J] . Ecol Eng , 2001 , 18 : 157-171 .
- [9] 龚琴红 , 田光明 , 吴坚阳 , 等 . 垂直流湿地处理低浓度生活污水的水力负荷[J] . 中国环境科学 , 2004 , 24(3) : 275-279 .
- [10] Devendra M , Amatya R W , Skaggs J D , et al . Effect of controlled drainage on the hydrology of drain pine plantation in the North Carolina Coast plain[J] . Journal of Hydrology , 1996 , 181 : 211-232 .
- [11] Evans R O , Skaggs R W , Gilliam J W . Controlled versus conventional drainage effects on water quality[J] . Journal of Irrigation and Drainage , 1995 , 121(4) : 271-276 .
- [12] 殷国玺 , 张展羽 , 郭相平 , 等 . 地表控制排水对氮质量浓度和排放量影响的试验研究[J] . 河海大学学报 , 2006 , 34(1) : 21-24 .
- [13] Madramootoo C A , Dodds G T , Papadopoulos A . Agronomic and environmental benefits of water-table management[J] . Journal of Irrigation and Drainage , 1993 , 119(4) : 1052-1065 .
- [14] 国家环境保护总局 . 水和废水监测分析方法[M] . 4版 . 北京 : 中国环境科学出版社 , 2002 : 210-284 .
- [15] 南京农业大学 . 土壤农化分析[M] . 北京 : 农业出版社 , 1992 : 29-73 .
- [16] Maija Paasonen-Kivek S , Tuomo Karvonen , Pertti Vakkilainen , et al . Field study on controlled drainage and recycling irrigation drainage for reduction of nutrient loading from arable land[J] . Wat Sci Tech , 1996 , 33(4) : 333-339 .
- [17] 张荣社 , 周琪 , 张建 , 等 . 潜流构造湿地去除农田排水中氮的研究[J] . 环境科学 , 2003 , 24(1) : 113-116 .
- [18] 刘培斌 , 程伦国 , 陈瑞忠 , 等 . 排水条件下稻田中氮素运移转化规律的试验研究[J] . 中国农村水利水电 , 1994(4) : 15-21 .
- [19] 晏维金 , 尹澄清 . 磷氮在水田湿地中的迁移转化及径流流失过程[J] . 应用生态学报 , 1999 , 10(3) : 312-316 .
- [20] 冯绍元 , 郑耀泉 . 农田氮素的转化与损失及其对水环境的影响[J] . 农业环境保护 , 1996 , 15(6) : 277-279 .
- [21] 章明奎 , 方利平 . 河岸水稻缓冲带宽度对排水中氮磷流失的影响[J] . 水土保持学报 , 2005 , 19(4) : 9-12 .
- [22] 张瑜芳 , 张蔚棒 , 沈荣开 , 等 . 淹灌稻田暗管排水中氮素流失的试验研究[J] . 灌溉排水 , 1999 , 18(3) : 12-16 .
- [23] Jaana Uusi-Kamppa , Braskerud B , Hakanjansson N S , et al . Buffer zones and constructed wetlands as filters for agricultural phosphorus[J] . J Environ Qual , 2000 , 29 : 151-158 .
- [24] Novak J M , Watts D W , Hunt P G , et al . Phosphorus movement through a coastal plain soil after a decade [J] . J Environ Qual , 2000 , 29 : 1310-1315 .
- [25] Siddique M T , Roubinson J S , Alloway B J . Phosphorus reactions and leaching potential in soils amended with sewage sludge[J] . J Environ Qual , 2000 , 29(6) : 1931-1938 .
- [26] 陈安磊 , 王凯荣 , 谢小立 , 等 . 不同施肥模式下稻田土壤微生物生物量磷对土壤有机碳和磷素变化的响应[J] . 应用生态学报 , 2007 , 18(12) : 2733-2738 .

责任编辑: 刘目前

英文编辑: 罗文翠