

苏南平原稻田灌排水系统中氮磷平衡状况*

张 静^{1,2} 王德建[†] 王 灿¹

(¹中国科学院南京土壤研究所常熟农业生态国家实验站, 南京 210008)

(²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要 应用大型原状模拟土柱, 对苏南平原典型稻田灌排水系统中, 养分的输入输出平衡状况进行定位监测和分析。初步结果表明: 稻田生态系统每季水分消耗量在 890~1320 mm 之间。稻田能净化灌溉水中养分, 不同施肥处理稻田对 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 TP 的净化量分别为 10.7~12.3、6.8~9.2 和 -1.2~2.0 kg lm^{-2} 。稻田养分淋溶量随着施肥量的增加而增加, 但养分净化量与化肥用量之间没有很好的相关性, 秸秆对养分净化量的影响不明显, 而猪粪明显降低了稻田养分净化量, 甚至成为周围水体磷素污染源。稻田对灌溉水中的 NH_4^+ -N 在整个水稻生长期均起到净化作用, 对 NO_3^- -N 在水稻生长初期有淋溶风险, 而对 TP, 除了猪粪处理, 稻田均呈现出净化作用。

关键词 稻田灌排水; 养分平衡; 养分净化; 苏南平原

中图分类号 S181; S607 **文献标识码** A

水体富营养化导致生产与饮水安全的问题受到了广泛关注, 太湖是一个高度富营养化的湖泊, 近年来由蓝藻爆发引发的饮水危机事件频频发生。据估算在引起太湖水体富营养化的氮、磷来源中, 来自农田面源的分别占 27.5%、15.3%。稻麦轮作是苏南太湖平原农田的主要轮作制度, 稻田作为一种特殊的人工湿地系统, 与旱地相比, 其淹水能增加养分的淋洗, 但其灌溉又能回收水体中的养分。通常人工湿地作为污水养分处理净化的有效介质^[1], 那么稻田湿地系统, 其灌排中养分平衡状况如何? 是否具有净化环境水体养分的能力呢? 已有的研究结果迥异: 有研究表明, 稻田通过降雨、灌溉输入的养分与渗漏排出的养分大体相同^[2]; 也有研究表明, 稻田通过硝化-反硝化、沉积吸附、作物吸收等作用, 使得排水中的养分低于灌溉水中的养分浓度, 从而净化了环境的水质^[3-4], 即稻田是环境友好、生态安全、可持续利用的生态系统^[5-6]; 但也有研究认为, 稻田淋溶风险仍然很严重。出现上述差异的原因主要是在研究方法上缺少系统的监测、灌排水量测定不准确、养分测定频度低等, 因此所得的结果难以令人置信。而正确评价稻田的环境功能, 对保证水稻种植、从源头上控制农田面源污染具有重要的意义。鉴于此, 本试验应用一组大型原

状土柱, 对苏南平原典型稻田灌排水系统中水分、养分输入输出平衡状况进行系统监测研究, 同时揭示不同施肥水平(化肥、秸秆和猪粪)在上述过程中所起的作用, 旨在为正确评价稻田生态系统的功能提供依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验于 2006 年 6~10 月在位于苏南平原的中国科学院常熟农业生态国家实验站进行。站区所在地属亚热带北部湿润季风气候, 年平均气温 15.5℃, 最高气温 39.1℃, 年降雨量 1038 mm, 站区地形属阳澄湖低洼湖荡平原, 海拔 3.2 m, 地下水深 80 cm 左右。供试土壤为该地区典型土壤乌栅土(系统分类名: 普通潜育水耕人为土), 其潜在肥力较高, 0~15 cm 土壤的基本性状为: pH(H₂O) 7.4 有机质 35 g kg^{-1} , 全氮 2.1 g kg^{-1} , 全磷 0.93 g kg^{-1} , 速效磷 5.0 mg kg^{-1} , 速效钾 121.3 mg kg^{-1} 。轮作制度为稻麦水旱轮作。

1.2 试验设计

试验所用的原状土柱是将高 110 cm、直径 80 cm 的 PVC 圆桶打入 100 cm 深的乌栅土中, 取出后

* 国家科技支撑计划项目(2006BAJ10B06)和中国科学院野外台站研究基金项目资助

† 通讯作者, E-mail: djwang@issas.ac.cn

作者简介: 张 静(1982~), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤生态方面的研究。E-mail: zhang@issas.ac.cn

收稿日期: 2006-12-12 收到修改稿日期: 2007-03-19

将桶底密封,再回埋入带有采样坑道的大田中,之后在土柱底部中间,安装一侧向 PVC 淋溶水采样管。为更好模拟大田的实际情况,按本区乌栅土的平均渗漏速度 4.8 mm d^{-1} [7] 控制淋溶,即每个土柱按日从底部放出 2.5 L 淋溶水。本季水稻种植前,为扣除土体本底值的影响,用自来水对上季麦田残留养分进行 3 次淋洗。

试验共设 6 个处理,3 次重复,施肥情况见表 1。氮肥(尿素)的运筹为:基肥占 40% (6 月 20 日施用),分蘖肥占 20% (6 月 27 日施用),穗肥占 40% (8 月 7 日施用);磷肥(过磷酸钙)以基肥一次性施入;钾肥(氯化钾)以基肥、穗肥各占 1/2 施入;猪粪和秸秆均作基肥一次性施入,其中猪粪为鲜样,含水量 60% 左右,全氮含量 26.8 g kg^{-1} ;秸秆为风干样,全氮含量 8.72 g kg^{-1} 。水稻于 6 月 20 日插秧,10 月 23 日收获。

表 1 排水采集器试验小区的施肥量

Table 1 Fertilization treatments of the lysimeter experiment (kg hm^{-2})

处理 Treatment	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机物料 Organic material
CK	0	0	0	0
F1	180	30	120	0
F2	270	60	120	0
F3	360	90	120	0
F1+M	180	30	120	15 000
F2+S	270	60	120	4 500

注: M, 鲜猪粪; S, 秸秆 Note: M, Pig manure; S, Straw

1.3 水样采集

1.3.1 淋溶水样 淋溶水样的采集始于基肥施用后的第 2 天,即按日从侧渗管放出 2.5 L 的淋溶水,每次取 50 mL 水样放入冰箱保存,每 5 天混匀一次,分析其中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和总磷 (TP) 的浓度,计算每 5 天养分淋溶量 (淋溶水养分浓度 \times 12.5 L),一直持续至水稻收获。

1.3.2 灌溉水样 试验所用的灌溉水取自离试验小区 100 m 左右的河水。每次灌溉前,先将河水抽入一大容器中以确保灌溉水浓度稳定,后取灌溉水样,再用定量水桶 (精确至 0.1 L) 进行灌溉,记下各土柱的灌溉量,从而可算出灌溉水输入的养分量 (灌溉水养分浓度 \times 灌溉水体积),一直持续至水稻收获前几天停止灌溉。

1.3.3 雨水样 实验站上的生态网络 (CERN) 气象站 (离试验田 50 m 左右),可提供水稻生长期

间的每次降雨量并进行每次雨水水样的采集,进而可算得每次由降雨所带入土柱的养分量 (雨水养分浓度 \times 降雨体积)。

1.4 水样测定方法

水样经处理后,测定 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 TP。 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的测定用靛酚蓝比色法, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 用紫外分光比色法,TP 用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法 [8]。

1.5 稻田养分净化量的计算

本文所讨论的稻田养分净化量指的是稻田灌排水系统中养分平衡状况:

输入养分量 = 灌溉水输入 + 雨水输入

输出养分量 = 淋溶水输出

稻田养分净化量 = 输入养分量 - 输出养分量

净化量为正值,说明稻田通过排水输出的养分小于通过灌溉水输入的,即稻田吸收灌溉水中的养分,对周围水环境有净化能力;净化量为负值,说明稻田以养分淋溶为主,是周围水体的污染源。

2 结果与分析

2.1 稻田水分平衡状况

稻田灌排水系统的水分平衡状况: 水分消耗量 = 降雨量 + 灌溉水量 - 淋溶水量。其中试验期间降雨量为 640 mm,各处理灌溉水量和淋溶水量见表 2 可得出整个稻季水分消耗量在 890~1 320 mm 之间,可见大量的水分用于水稻蒸腾及田面蒸发。

表 2 稻田灌排水系统水分平衡状况

Table 2 Water balance in the paddy field irrigation drainage system (mm)

处理 Treatment	淋溶水 Leachate	灌溉水 Irrigation	降雨 Precipitation	消耗量 Using
CK	600	850	640	890
F1	600	1 110	640	1 150
F2	600	1 150	640	1 190
F3	600	1 280	640	1 320
F1+M	600	1 160	640	1 200
F2+S	600	1 160	640	1 200

2.2 稻田灌排水中氮磷浓度动态变化状况

本试验对不同处理,淋溶水、灌溉水和雨水中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 TP 浓度进行了连续监测,得出在水稻不同生长阶段,稻田各养分浓度的动态变化特点 (图 1~图 3)

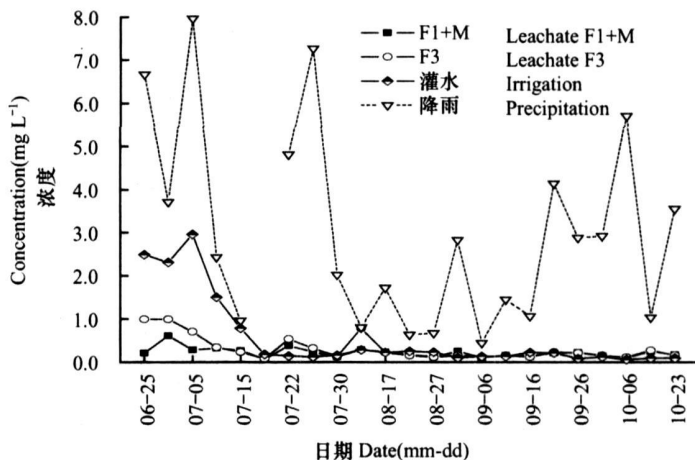
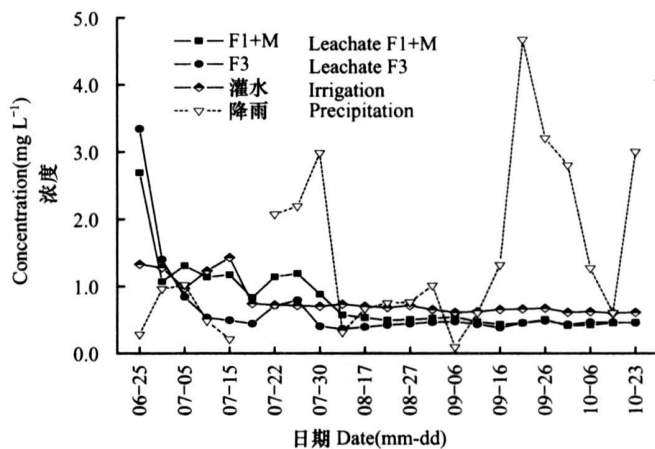
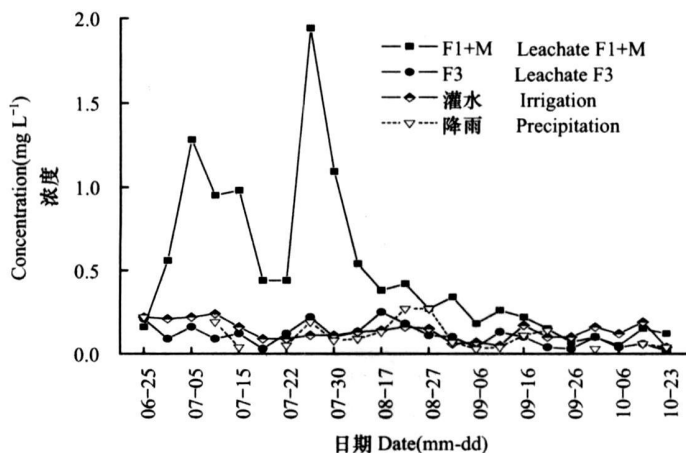
图1 淋溶水、灌溉水和雨水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的变化Fig. 1 Concentrations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in leachate, irrigation water and precipitation图2 淋溶水、灌溉水和雨水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的变化Fig. 2 Concentrations of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in leachate, irrigation water and precipitation

图3 淋溶水、灌溉水和雨水中 TP 浓度的变化

Fig. 3 Concentrations of TP in leachate, irrigation water and precipitation

图 1 结果显示,在整个水稻生长期,通过淋溶水输出的 NH_4^+ -N 浓度远低于通过灌溉水和降雨输入的 NH_4^+ -N 浓度,可见在整个水稻生长期,稻田对灌溉水中的 NH_4^+ -N 起到明显的净化作用。这是由于 NH_4^+ -N 带有正电荷,易被土壤胶体吸附,不是氮素淋溶的主要形态,一般仅占稻田氮素淋溶量的 0.008%~0.074%^[8]。

图 2 中 NO_3^- -N 浓度变化表明,施用基肥后有一明显的 NO_3^- -N 快速淋溶期,持续时间约 10 d 此期间 NO_3^- -N 浓度在 2.5~3.5 mg L^{-1} 之间,明显高于灌溉水中的 1.3 mg L^{-1} 和雨水中的 0.3~1.0 mg L^{-1} ,表明稻田中 NO_3^- -N 以淋溶为主;之后大约 20 d, F1+M 处理淋溶水中 NO_3^- -N 浓度保持在 1~1.5 mg L^{-1} 之间,与灌溉水和雨水中 NO_3^- -N 浓度接近,而其余处理此时通过淋溶水输出的 NO_3^- -N 浓度小于输入,即稻田已表现出净化灌溉水中养分的作用;随后各处理淋溶水中 NO_3^- -N 浓度逐渐降低,稻田对 NO_3^- -N 的净化作用越加明显。这主要是由作为稻田氮素淋溶的主要形态 NO_3^- -N 的淋溶特点所决定的^[7],施肥初期稻田存在明显的淋溶风险,尤其是 F1+M 处理。穗肥施用后,由于此时水稻生长需要大量养分, NO_3^- -N 浓度未见有明显的回升。因此,

稻田在前期表现为 NO_3^- -N 淋溶,后期表现为净化。

从图 3 中可以明显看出,在水稻生长期, F1+M 处理淋溶水中 TP 浓度明显高于灌溉水和雨水中 TP 浓度,且主要集中在施肥后的 10~60 d 可见在此期间,施用猪粪的稻田有严重的磷素淋溶风险,持续时间占水稻生育期的 1/2 随后的 1 个月,输出的 TP 浓度与输入的 TP 浓度持平,稻田逐渐表现出净化功能;再后随着淋溶水中的 TP 浓度越来越低,最终稻田对灌溉水中的磷素起到净化作用。而其余处理(图 3 中以施化肥磷最高的 F3 处理为例说明)输入的灌溉水、雨水与输出的淋溶水的 TP 浓度差异不大,浓度变化曲线基本重叠在一起,但总体上是输入的 TP 浓度大于输出,可见在整个水稻生长期,稻田对灌溉水中的 TP 起到净化作用。

2.3 养分平衡状况

依据上述的灌排水量与相应的养分浓度,根据 1.5 所述方法分别计算出由降雨、灌溉水输入和淋溶水输出的养分量,其中通过降雨输入稻田的 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 TP 的量分别为 8.0、3.8 和 1.3 kg hm^{-2} ,最终可得,整个水稻生长期,不同处理稻田灌排水系统养分平衡状况,即稻田对灌溉水中养分的净化量(表 3)。

表 3 稻田生态系统对灌溉水中养分的净化量

Table 3 Nutrient rate purified by the rice field ecosystem from input water (kg hm^{-2})

处理 Treatment	NH_4^+ -N			NO_3^- -N			TP		
	灌溉 Irrigation	淋溶 Leachate	净化 Purified	灌溉 Irrigation	淋溶 Leachate	净化 Purified	灌溉 Irrigation	淋溶 Leachate	净化 Purified
CK	3.5c	0.7c	10.7±0.1b	6.2c	1.8c	8.1±0.3b	0.9c	0.5b	1.7±0.1a
F1	4.2b	0.9c	11.2±0.2b	7.9b	3.4b	8.2±0.3ab	1.2b	0.5b	2.0±0.04a
F2	5.3a	1.0c	12.3±0.1a	8.2b	3.2b	8.8±0.2ab	1.2b	0.5b	1.9±0.03a
F3	5.4a	2.0a	11.4±0.2b	9.3a	3.8b	9.2±0.7a	1.4a	0.6b	2.0±0.18a
F1+M	4.2b	1.4b	10.8±0.2b	8.2b	5.1a	6.8±0.3c	1.2b	3.7a	-1.2±0.10b
F2+S	4.3b	1.0c	11.2±0.4b	8.2b	3.4b	8.5±0.2ab	1.2b	0.6b	1.9±0.07a

注:在同一列内带有相同字母的平均值之间无显著差异 ($p < 0.05$) Note No significant difference among them mean values with the same letter in the column ($p < 0.05$)

各处理 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 TP 的净化量分别为 10.7~12.3、6.8~9.2 和 -1.2~2.0 kg hm^{-2} , 与前人试验结果接近^[3,5,6,9]。表 3 中数值除 F1+M 处理的 TP 净化量为负值外,均为正值,说明灌溉水中的 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 TP 经过稻田向下迁移后,经排水输出的养分量明显小于由灌溉水而输入的养分量,

表明稻田经过对无机氮的吸收转化(硝化-反硝化)、磷的固定沉积及水稻对养分的吸收等作用,吸收了灌溉水中的养分,降低了养分淋溶的环境风险,进而对周围水质起到了改善作用。

从表 3 中可以看出,在化肥处理 F1、F2、F3 中, NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 TP 淋溶量随着施肥量的增加而

增加,且均高于无肥对照,但养分净化量却与施肥量之间没有很好的相关性,究其原因,随着施肥量的增加,水稻长势旺盛,消耗的水分增加,导致灌溉水增加(表2),随灌溉水输入的养分增加(表3),最终两者平衡结果是,在此试验水平上,化肥用量对稻田生态系统的养分净化量影响不大。对于F2+S处理,由于秸秆含有较高比例的纤维素、木质素等难于降解的物质,使得其各养分淋溶量仅略高于F2处理,没有显著差异,因此,除 NH_4^+ -N由灌溉水带入的量,F2处理大于F2+S处理 1 kg hm^{-2} ,导致F2的 NH_4^+ -N净化量显著高于F2+S,其余养分 NO_3^- -N和TP的稻田净化量,两处理之间没有显著差异。而增施猪粪的F1+M处理,严重超出了稻田自身对养分的净化能力,随着淋溶量的增加,其净化量显著低于其他处理,甚至出现TP净化量是负值,为 -1.2 kg hm^{-2} ,即稻田通过淋溶向地下水体中释放磷。这主要是由于猪粪自身含有大量较秸秆更易分解的氮磷,且有机磷较无机磷的移动性大得多^[10],有机质分解,一方面增加了土壤中的氮磷含量,另一方面增加了土壤中的有机酸,提高了土壤有效磷的含量和移动性^[11,12]。可见施用猪粪处理的稻田呈现出磷的“淋溶”特点,是周围水体磷素污染的“源”,因此从水环境保护方面考虑,稻田每 hm^2 15 t鲜猪粪用量过多。

本定位试验严格控制了灌排水量,灌溉水量精确至0.1 L,淋溶水按天准确收集,并且考虑了降雨的影响。同时应用了大型原状模拟土柱,减少了小土柱的边际效应。但本研究没有考虑稻田径流,而在实际情况下,稻田存在一定的径流风险,尤其施肥期的一次强降雨造成的氮、磷径流损失量更是相当可观。因此,本试验得出的稻田养分净化量是在稻田养分随水输出途径仅为淋溶条件下的量。

3 结论与讨论

稻田生态系统的耗水量在890~1320 mm之间。不同处理稻田净化灌溉水中 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N和TP养分的量分别为10.7~12.3、6.8~9.2和-1.2~2.0 kg hm^{-2} 。稻田对灌溉水中的 NH_4^+ -N在整个水稻生长期间均起到净化作用,对 NO_3^- -N在水稻生长初期有淋溶风险,而对TP,除了F1+M处理,稻田均呈现出净化功能。

通过对稻田灌排水系统养分平衡状况及不同时期养分浓度变化特点的研究,我们认为,稻田由

于存在区别于旱地的水循环系统,其通过灌溉等途径输入的大量营养物质,不仅使稻田土壤保持了一定的肥力,如太湖区域两种水稻土,在连续不施肥条件下,水稻仍可获得 $4\sim 5\text{ t hm}^{-2}$ 的产量^[6]。同时,由于稻田特有的好气氧化与淹水还原的环境条件,使其对水体养分有消解能力,净化了灌溉水中的养分,本试验中稻季通过灌溉回收河水中 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N和TP的量分别为3.5~5.4、6.2~9.3和0.9~1.4 kg hm^{-2} ,减少了环境水体养分负荷。因此,稻田较旱地更有利于改进环境水质,为了减少来自农田的面源污染,苏南平原应稳定水稻种植面积。

参考文献

- [1] He S B, Yan L, Kong H N, *et al*. Treatment efficiencies of constructed wetlands for eutrophic landscape river water. *Pedosphere* 2007, 17(4): 522~528
- [2] 刘元昌,徐琪.江苏省太湖地区养分平衡状况的初步探讨.生态学杂志,1984(3):12~16. Liu Y C, Xu Q. The elementary study of the nutrient balance in Taihu Lake area. *Jiangsu* (In Chinese). *Ecological Magazine*, 1984(3): 12~16
- [3] Feng Y W, Yoshinaga I, Shiratani E, *et al*. Characteristics and behavior of nutrients in a paddy field area equipped with a recycling irrigation system. *Agricultural Water Management* 2004, 68: 47~60
- [4] Takeda I, Fukushima A, Tanaka R. Non-point pollutant in a paddy-field watershed using a circular irrigation system. *Wat Res*, 1997, 31(11): 2685~2692
- [5] 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.土壤学报,2005,42(5):799~804. Cao Z H, Lin X G, Yang L Z, *et al*. Ecological function of “paddy field ring” to urban and rural environment. Characteristics of soil P losses from paddy fields to water bodies with runoff (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica* 2005, 42(5): 799~804
- [6] 徐琪,杨林章,董元华,等.中国稻田生态系统.北京:中国农业出版社,1998.100,156. Xu Q, Yang L Z, Dong Y H, *et al*. eds. *Rice Field Ecosystem in China* (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1998. 100, 156
- [7] 连纲,王德建,林静慧,等.太湖地区稻田土壤养分淋洗特征.应用生态学报,2003,14(11):1879~1883. Lian G, Wang D J, Lin J H, *et al*. Characteristic of nutrient leaching from paddy field in Taihu Lake area (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1879~1883
- [8] 鲁如坤.土壤农业化学分析法.北京:中国农业出版社,2000.150~152. Lu R K. *Analytical Methods of Soil and Agronomy* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. 150~152
- [9] Yoshinaga I, Feng Y W, Shiratani E, *et al*. Nitrogen removal function of paddy field in circular irrigation system. 7th Internat

- tional Diffuse Pollution Conference, Dublin, 2003. *Theme* 14 (14): 43~48
- [10] Harrisonaf. 土壤有机磷—文献述评. *土壤学进展*, 1990, 18(4): 11~19. Harrisonaf. Soil organic phosphorus—A literature review (In Chinese). *Progress in Soil Science*, 1990, 18(4): 11~19
- [11] 罗安程, 孙羲, 章永松. 有机肥及其施用方法对红壤磷吸附和解吸特征的研究. *热带亚热带土壤科学*, 1995, 4(2): 73~78. Luo A C, Sun X, Zhang Y S. Absorption and desorption of phosphate in red soil as affected by long term application of organic manure (In Chinese). *Tropical and Subtropical Soil Science* 1995, 4(2): 73~78
- [12] 孟娜, 廖文华, 贾可, 等. 磷肥、有机肥对土壤有机磷及磷酸酶活性的影响. *河北农业大学学报*, 2006, 29(4): 57~59. Meng N, Liao W H, Jia K, *et al.* Effect of phosphorus fertilizer and organic manure on organic phosphorus content and the activity of phosphatase in soils (In Chinese). *Journal of Agricultural University of Hebei* 2006, 29(4): 57~59

NITROGEN AND PHOSPHORUS BALANCE UNDER PADDY FIELD IRRIGATION-DRAINAGE SYSTEM IN SOUTH JIANGSU PLAIN

Zhang Jing^{1, 2} Wang Dejian^{1†} Wang Can¹

(1 *Changshu National Agroecological Experiment Station, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

(2 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract An experiment using monolith lysimeter under a paddy field irrigation-drainage system was conducted to monitor and analyze soil nutrient balance in South Jiangsu Plain. Results showed that the paddy field ecosystem consumed 890~1320 mm irrigation water in each season, and it might purify nutrients by absorbing 10.7~12.3, 6.8~9.2 and -1.2~2.0 kg hm⁻² of NH₄⁺-N, NO₃⁻-N and TP (total phosphorus), respectively in all fertilization treatment, regardless of application rate. Although nutrient leaching rate increased with the fertilization rate, the net nutrient purifying rate did not seem to be closely related to it. Application of straw had a little effect on purifying rate, while application of pig manure weakened the purifying function significantly, and could even be deemed as a “source” of phosphorus in surrounding water bodies. During the rice growing period, paddy field played the role of purifying the water of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N and of TP as well, except for in the treatment of adding pig manure. NO₃⁻-N, however, was liable to leach in the early rice growing period.

Key words Paddy field irrigation-drainage water, Nutrient balance, Nutrient purifying, South-Jiangsu Plain