第 44 卷 第 5 期　　土 壤 学 报　　Vol. 44, No. 5
2007 年 9 月　　ACTA PEDOLOGICA SINICA　　Sep., 2007

# 太湖地区稻田缓冲带在减少养分流失中的作用*

张　刚[1,2]　王德建[1†]　陈效民[2]
(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 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京　210095)

**摘　要**　选取苏南太湖地区宜兴市和常熟市的水稻田为试验点, 研究了不同施肥水平下缓冲带降低稻田田面水、渗漏水、灌溉水中 N、P 浓度的效果, 以及对水稻产量的影响。结果表明: 缓冲带与施肥处理的水稻产量差异不显著; 稻季缓冲带拦截 N、P 径流损失效果明显, 总氮净拦截量在 20.6～51.8 kg $hm^{-2}$ 之间, 占田面水中总氮的 31.7%～50.9%, 总磷净拦截量在 4.7～5.1 kg $hm^{-2}$ 之间, 占田面水中总磷的 1/2 多, 缓冲带对渗漏水中 N、P 的水平迁移具有同样明显的拦截效果, 减少了 N、P 向水体的输入量; 土壤剖面中 N、P 养分呈上高下低的趋势, 稻田生态系统能净化灌溉水中的磷。

**关键词**　缓冲带; 养分流失; 水稻田; 太湖地区
**中图分类号**　S147.2　　**文献标识码**　A

苏南太湖流域是我国农业最发达的地区之一, 全区面积仅占全国的 0.4%, 而化肥用量占全国的 1.3%, 过量施肥和施肥结构的不合理, 使流域内农田氮随径流排水进入河流最终输入太湖[1], 马立珊等[2,3]研究表明太湖流域农田氮的年总排放量为 $3.37\times10^4$ t, 磷的年总排放量为 440.4 t。因此, 减少农田养分流失, 是控制太湖面源污染的关键[4～6]。据报道缓冲带在拦截农田养分流失、去除农业面源污染方面是一个简单而有效的工具[7～10]。缓冲带是指利用永久性植被拦截污染物或有害物质的条带状、受保护的土地, 主要是通过滞缓径流、沉降泥沙、强化过滤和增强吸附等功能来实现防治农业非点源污染的, 能明显降低各种污染物的浓度[11,12]。如尹澄清等[13]研究发现, 4 m 交错带芦苇群落根区土壤对总磷的拦截率可达 90%, 总氮的拦截率可达 64%, 多水塘系统能截留来自村庄、农田的氮磷污染负荷的 94%以上[14]; 刘文祥[15]在滇池流域 0.18 $km^2$ 范围内构建的 1 257 $m^2$ 人工湿地对农田径流具有较好的净化作用, 去除效果为总氮 60%, 总磷 50%, 可溶性总氮 40%, 可溶性总磷 20%。

上述生态工程技术在太湖流域的应用具有一定的局限性。太湖地区人口密度超过 1 000 人 $km^{-2}$, 而构建人工湿地、缓冲带、生态交错带等生态工程需要占用大量土地, 会进一步加剧当地人多地少的矛盾[16]。所以太湖地区需要一种既不占用大量土地, 还能充分发挥拦截功能的新型缓冲带。宋静、骆永明等[17]研究表明, 施肥期间稻田是水体 N、P 的污染源, 而施肥后稻田又可成为削减水体 N、P 负荷的"人工湿地"。故可将稻田本身作为一种缓冲拦截带来控制太湖地区的农田面源污染。本文研究稻田缓冲带在减少氮磷养分流失上的效果, 为制定控制农田面源污染技术措施提供依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验设计

试验于太湖流域宜兴市大浦镇和常熟市杨园镇的"863"项目农业面源污染控制示范区内进行, 示范区面积均为 13 $hm^2$。提高示范区内农田四周的田埂, 并在农田的排水侧设置一条宽 3 m 的缓冲带, 缓冲带中照常种植水稻, 但不施化肥。试验设置优化施肥(Y)与优化施肥缓冲带(YL)、常规施肥(C)与常规施肥缓冲带(CL) 2 组共 4 个处理, 采用大区处理, 分别在示范区的优化施肥与常规施肥区中随机选取 3 个自然田块(面积 0.08～0.12 $hm^2$)作为研究的 3 次重复, 同时分别在优化施肥与常规施肥缓冲带中

* 国家重点基础研究发展规划项目(No. 2005CB121107)和中国科学院台站基金项目资助
† 通讯作者, E-mail: djwang@issas.ac.cn
作者简介: 张　刚(1980～), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤、农业生态环境研究。E-mail: xzhanggang@163.com
收稿日期: 2006-05-25; 收到修改稿日期: 2006-10-11

相应的位置布置 3 个无肥对照区(面积 70 $m^2$)。优化施肥的 N、P、K 用量分别为 225、15、90 kg $hm^{-2}$,常规施肥分别为 290、0、37.5 kg $hm^{-2}$(示范区所在地习惯通常稻季不施磷肥)。在每个自然地块中分别埋设 30 cm、60 cm 深的简易渗漏水采样管,3 次重复,分别测定田面水和 30 cm、60 cm 深的渗漏水以及灌溉水(IRRI)中的总氮、总磷浓度。

试验期间从 2005 年 6 月 20 日水稻移栽到 10 月 20 日水稻收获,整个水稻生长期的田间管理措施均按当地习惯方式进行,灌溉水为临近稻田的河水。

### 1.2 样品采集与分析

试验的渗漏水样用自制的采样管采集,将管径为 3 cm,不同长度的 PVC 管底部封死,在管底部的侧壁上均匀地打一些小孔(孔径 5 mm),壁外包三层细尼龙网,以防泥沙渗入,管口塞有具孔塞,将一细软管经塞孔插入 PVC 管底部以抽取渗漏水。将制作好的 PVC 管埋入不同深度的土层,以采集不同深度的渗漏水样。

水稻生长期间,施肥后每 2 天取样一次,连续采样 4～5 次,随后每 10 天取样 1 次。采集的水样包括灌溉水、田面水与 30 cm、60 cm 深的渗漏水,采样期从 2005 年水稻移栽至收获。

所采水样经普通滤纸过滤后,用过硫酸钾高压氧化处理后,测定总氮(TN)与总磷(TP)。TN 测定采用紫外分光光度法,TP 测定采用钼蓝比色法。

### 1.3 产量测定

水稻收获时在每个处理的重复地块内随机选取 5 个样方(1 m ×5 m)收割测产,换算为每公顷产量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 缓冲带与施肥大田的产量比较

2005 年宜兴大浦、常熟杨园示范方水稻样方测产表明,不同施肥处理下的田块与其缓冲带内的水稻产量相近,产量的变化幅度在 2.0 %～5.8 %内。方差检验表明(表 1),施肥大田与缓冲带的产量差异不显著,说明缓冲带的应用不会造成当年水稻减产,缓冲带中截留大田流失的养分足够供应水稻生长发育之用。

表 1 不同处理下水稻的产量[1)]

Table 1 Yield of rice in different treatments (kg $hm^{-2}$)

| 处理 Treatment | 宜兴优化 Recommended Fert. in Yixing | 宜兴常规 Conventional Fert. in Yixing | 常熟优化 Recommended Fert. in Changshu | 常熟常规 Conventional Fert. in Changshu |
|---|---|---|---|---|
| 施肥大田 Field fertilized | 6 902 a | 8 397 a | 7 164 a | 7 041 a |
| 缓冲带 Buffer strip | 7 226 a | 8 570 a | 6 942 a | 7 452 a |

1) 在同一列内带有相同字母的平均值之间无显著差异($p < 0.05$,新复级差测验) No significant difference between means followed by the same letter in the column ($p < 0.05$, Duncan's Test)

### 2.2 缓冲带与施肥大田田面水中氮素含量比较

吴敬民等[18]研究表明,基肥采用耙面施用时,施入农田总氮量的 70 %～80 %存在于田面水中,被土壤颗粒吸附的很少,极易通过侧渗径流等途径进入稻田周围水体,施肥期间的农田是周边水体的 N、P 污染源。所以水稻施肥期间是监控和防止田面水 N、P 流失的关键时期。若施肥后数日内出现田面水渗漏和径流就会造成 N、P 的大量损失[17]。

宜兴大浦示范方不同处理稻季田面水中 TN 浓度变化表明(图 1),秧苗移栽后,田面水 TN 浓度较高,约 10 d 后降到很低,直至水稻收获。常规施肥氮浓度高于优化施肥,说明施肥量高则田面水中的氮浓度高。缓冲带内田面水中氮的浓度在施肥后 1 周内明显低于大田,之后差别不明显。部分时间缓冲带内氮浓度下降不明显,这可能与肥水串灌有关。

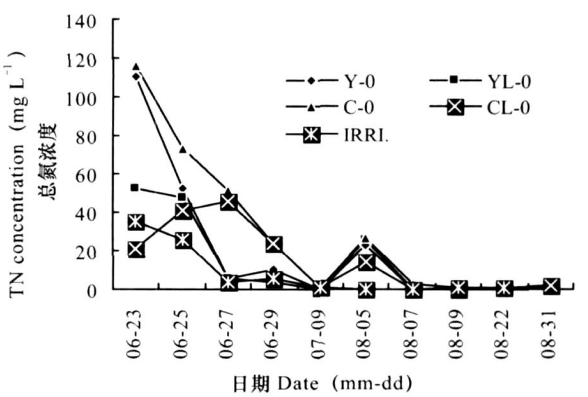


图 1 宜兴示范方稻季田面水及灌溉水总氮浓度变化

Fig. 1 TN concentration in surface and irrigation waters during the rice growing period in Yixing

优化施肥与其缓冲带内氮的平均浓度分别为 20.3、13.8 mg $L^{-1}$,常规施肥与其缓冲带内氮的平均浓度

分别为 29.8、14.9 mg L$^{-1}$,缓冲带使田面水的 DTN 浓度减少 31.7 %～50.9 %。赵建宁等[19]研究表明,太湖地区 30 m$^2$的试验小区的整个稻季径流量为 9 601～10 365 L,若以此为标准估算,水稻生长季由缓冲带截留的径流氮量在 20.6～51.8 kg hm$^{-2}$。这表明缓冲带具有较好的养分拦截作用,能作为控制农田氮素养分流失的一种有效措施。

## 2.3　渗漏水中氮素含量的动态变化

常熟杨园示范方不同深度土壤渗漏水监测结果表明(图 2),秧苗移栽后氮素浓度呈先升后降的趋势,高峰时 30 cm 深渗漏水氮素浓度高达 18.0 mg L$^{-1}$;在水稻的整个生长期中,氮素在土壤剖面中的浓度变化基本呈上高下低的趋势,这表明土壤对氮素有吸附作用,稻田生态系统具有固定灌溉水中氮素养分的功能。

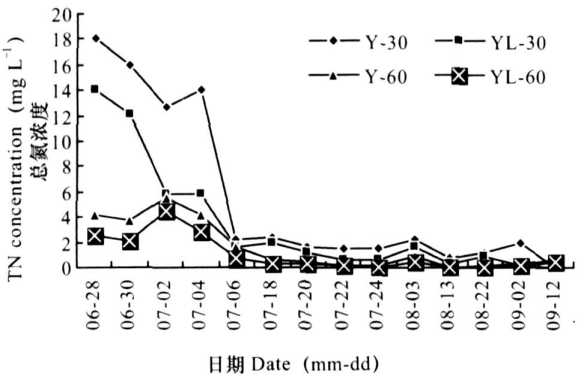


图 2　常熟示范方稻季 30 cm 及 60 cm 渗漏水总氮浓度变化

Fig.2　TN concentration in leachate during the rice growing period in Changshu

同深度的土壤渗漏水测定表明(图 2),在水稻的整个生长期中,缓冲带中 TN 浓度均较施肥大田的浓度低。这说明下渗的氮素在随土壤水向周边水体迁移的过程中浓度逐渐降低,缓冲带对土壤养分氮素有拦截作用。缓冲带拦截的这部分养分可被缓冲带内种植的水稻吸收利用,从而减少了氮素养分向水体中的迁移。

## 2.4　田面水中磷素含量的动态变化

宜兴大浦示范方稻田田面水中磷浓度监测表明,秧苗移栽后优化施肥大田与其缓冲带的田面水中总磷浓度均较高(常规施肥处理没有施用磷肥),施肥后优化施肥处理的田面水中磷素浓度迅速升高,高峰时达到 15.66 mg L$^{-1}$,大约 10 d 后降至 0.40 mg L$^{-1}$,与缓冲带的磷浓度水平相当,直至水稻收获。方差检验表明,缓冲带中田面水的磷浓度明显低于优化施肥的大田,在施肥初期这种差异尤为明显(表 2)。

由于肥水串灌的原因,部分缓冲带中磷的浓度在施肥初期也有所升高,但其在整个稻季的平均浓度为 1.01 mg L$^{-1}$,远远低于优化施肥处理(2.48 mg L$^{-1}$)。缓冲带拦截的径流磷占可溶性总磷的 1/2 多,同样以赵建宁等[19]测得的稻季径流量为标准计算,则缓冲带在稻季可截留径流磷的量在 4.7～5.1 kg hm$^{-2}$。这表明缓冲带对磷素的径流损失有较好的拦截作用,缓冲带减少田面水中磷向水体的输入量,减轻了施磷对水体的影响。

表 2　宜兴示范方不同处理稻田田面水磷素含量[1)]

**Table 2**　TP concentration of surface water with different fertilization during rice growth period (mg L$^{-1}$)

| 处理 Treatment | 采样时间 Date sampling (mm-dd) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 06 - 23 | 06 - 25 | 06 - 27 | 06 - 29 | 08 - 05 | 08 - 07 | 08 - 09 | 08 - 22 |
| Y - 0 | 15.66 a* | 2.30 a | 0.51 a | 0.40 a | 0.51 a | 0.09 a | 0.08 a | 0.29 a |
| C - 0 | 1.44 c | 0.32 c | 0.18 a | 0.25 a | 0.51 a | 0.17 a | 0.07 a | 0.32 a |
| YL - 0 | 4.86 b | 1.63 b | 0.42 a | 0.36 a | 0.40 b | 0.07 a | 0.09 a | 0.26 a |

1) 在同一列内带有相同字母的平均值之间无显著差异($p < 0.05$,新复级差测验) No significant difference between means followed by the same letter in the column ($p < 0.05$, Duncan's Test)

## 2.5　土壤渗漏水中磷素浓度变化

常熟杨园示范方优化施肥大田不同深度土壤渗漏水磷浓度监测结果表明(图 3),磷浓度上层高于下层,这表明稻田生态系统具有固定灌溉水中磷的作用。这是由土壤对磷素的吸附作用造成的,这种吸附作用与土壤质地有关,质地较细的土壤更易吸附土壤水中的可溶性磷素。

同深度的土壤渗漏水中磷浓度测定结果表明(图 3),优化施肥的大田渗漏水中磷浓度大于缓冲带,尤其是 30 cm 深的土壤渗漏水表现更为明显,方差检验表明,在施肥初期优化施肥大田和缓冲带之间浓度的差异显著,随着时间的推移,磷素的浓度逐渐降低,至水稻收获前期两者之间基本没有差异。这表明稻田缓冲带对渗漏水中磷素的水平迁移具有拦截作用,其拦截效果在施肥初期尤为明显。

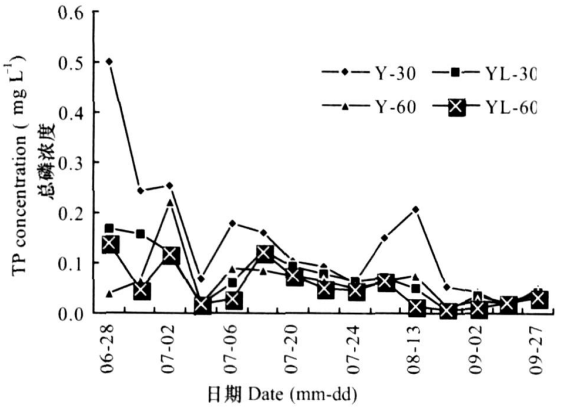


**图 3 常熟示范方稻季 30 cm 及 60 cm 渗漏水总磷浓度变化**

Fig. 3 TP concentration in leachate during the rice growing period in Changshu

## 3 结 论

1) 无肥的缓冲带与施肥的大田当年水稻产量没有显著差异,缓冲带利用大田流失的养分足够水稻生长发育之用,不会造成水稻减产。

2) 渗漏水中的氮、磷在土壤剖面中呈现上高下低的趋势,稻田生态系统具有吸附固定氮、磷养分的功能,可有效减小氮、磷的淋失。

3) 缓冲带能显著地拦截径流养分,稻季拦截的 TN 和 TP 分别为 20.6～51.8、4.7～5.1 kg $hm^{-2}$,而且对渗漏水中 N、P 养分的水平迁移具有明显的拦截效果,表明缓冲带减缓了农田氮、磷养分流失,是一种有效的减少农田面源污染的措施。

## 参 考 文 献

[1] 吕耀. 苏南太湖流域农业非点源污染及农业持续发展战略. 环境科学动态, 1998 (2): 1～4. Lu Y. Agri-cultural non-point sources pollution and stratagem of stainable development of Taihu Lake watershed (In Chinese). Environment Science Trends, 1998 (2): 1～4

[2] 马立珊,汪祖强,张水铭,等. 苏南太湖水系农业面源污染及其控制对策研究. 环境科学学报, 1997, 17(1): 39～47. Ma L S, Wang Z Q, Zhang S M, *et al*. Pollution from agricultural non-point sources and its control in river system of Taihu Lake (In Chinese). Acta Scientiae Circumstantiae, 1997, 17(1): 39～47

[3] 张水铭,马杏法,汪祖强. 农田排水中磷素对苏南太湖水系的污染. 环境科学, 1993, 14(6): 24～30. Zhang S M, Ma X F, Wang Z Q. Pollution by phosphorus in farmland drainage to the Taihu Lake water system (In Chinese). Environmental Science, 1993, 14(6): 24～30

[4] 王彩绒,吕家珑,胡正义,等. 太湖流域典型蔬菜地土壤氮及 pH 空间变异特征. 水土保持学报, 2005, 19(3): 17～20. Wang C R, Lu J L, Hu Z Y, *et al*. Spatial variability of soil nitrogen and pH in typical area of Taihu Lake watershed (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(3): 17～20

[5] 王德建,林静慧,孙瑞娟,等. 太湖地区稻麦高产的氮肥适宜用量及其对地下水的影响. 土壤学报, 2003, 40(3): 426～432. Wang D J, Lin J H, Sun R J, *et al*. Optimum nitrogen rates for a high productive and its impact on the ground water in the Taihu Lake area (In Chinese). Acta Pedological Sinica, 2003, 40(3): 426～432

[6] Lu J J, Yang H, Gao L, *et al*. Spatial variation of P and N in water and sediments of Dianchi Lake, China. Pedosphere, 2005, 15(1): 78～83

[7] 梁继东,周启星,孙铁珩. 人工湿地污水处理系统研究及性能改进分析. 生态学杂志, 2003, 22(2): 49～55. Liang J D, Zhou Q X, Sun T H. A research review and technical improvement analysis of constructed wetland systems for wastewater treatment (In Chinese). Chinese Journal of Ecology, 2003, 22(2): 49～55

[8] Braskerud B C. Factors affecting nitrogen retention in small constructed wetlands treating agricultural non-point source pollution. Ecological Engineering, 2002, 18(3): 351～370

[9] Hefting M M, Jeroen J M, Klein D. Nitrogen removal in buffer strips along a lowland stream in the Netherlands: A pilot study. Environ. Pollut., 1998, 102: 521～526

[10] Koskiaho J, Ekholm P, Mari R, *et al*. Retaining agricultural nutrients in constructed wetlands-Experiences under boreal conditions. Ecd. Eng., 2003, 20(1): 89～103

[11] Barfied BJ, Blevins RL, Fogle AW, *et al*. Water quality impacts of natural filter strips in karst areas. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1998, 41(2): 371～381

[12] Bavor H J, Roser D J, Adcock P W. Challenges for the development of advanced constructed wetlands technology. Water Science and Technology, 1995, 32(3): 13～20

[13] 尹澄清,邵霞,王星. 白洋淀水路交错带土壤对磷氮截流容量的初步研究. 生态学杂志, 1999, 18(5): 7～11. Yin C Q, Shao X, Wang X. The preliminary study for the nitrogen and phosphorus held up by the road-water belt (In Chinese). Chinese Journal of Ecology, 1999, 18(5): 7～11

[14] Yin C Q, Shan B Q. Mult-pond systems: A sustainable way to control diffuse phosphorus pollution. AMBIO, 2001, 30(6): 369～375

[15] 刘文祥. 人工湿地在农业面源污染控制中的应用研究. 环境科学研究, 1997, 10(4): 15～19. Liu W X. Study on the application of artificial wetland in agriculture non-point source pollution (In Chinese). Research of Environmental Sciences, 1997, 10(4): 15～19

[16] 杨林章,周小平,王建国,等. 用于农田非点源污染控制的生态拦截型沟渠系统及其效果. 生态学杂志, 2005, 24(11): 1 371～1 374. Yang L Z, Zhou X P, Wang J G, *et al*. Ecological ditch system with interception function and its effects on controlling farmland non-point pollution (In Chinese). Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(11): 1 371～1 374

[17] 宋静,骆永明,乔显亮,等. 苏南典型水稻丰产方施肥与地表水浓度动态变化 ——以苏州市旺山村为例. 土壤, 2002, 34(4): 210～214. Song J, Luo Y M, Qiao X L, *et al*. Effect of fertilizer on nitrogen and phosphorous in surface water of representative paddy

fields in southern Jiangsu Province-A case study of wangshan village, Suzhou City (In Chinese). Soils, 2002, 34(4): 210～214

[18] 吴敬民,许学前,姚月明. 基肥不同施用方法对水稻生长及稻田周围水体污染的影响. 土壤通报, 1999, 30(5): 232～234. Wu J M, Xu X Q, Yao Y M. The fluence on paddy growth and around water pollution with the different fertilized method of basal fertilizer (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 1999, 30(5): 232～234

[19] 赵建宁,沈其荣,冉炜. 太湖地区侧渗水稻土连续施磷处理下稻田磷的径流损失. 农村生态环境, 2005, 21(3): 29～33. Zhao J N, Shen Q R, Ran W. Phosphorus loss with runoff from a side bleaching paddy soil under continual P application in Taihu Lake region (In Chinese). Rural Eco-Environment, 2005, 21(3): 29～33

# ROLES OF BUFFER STRIPS IN REDUCING NUTRIENT LOSS FROM PADDY FIELD IN TAIHU LAKE REGION

Zhang Gang[1,2]　Wang Dejian[1†]　Chen Xiaomin[2]

(1 *Changshu National Agroecosystem Experiment Station, Institute of Soil Science, CAS, Nanjing* 210008, *China*)

(2 *College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing* 210095, *China*)

**Abstract**　An experiment was carried out in 2005 in Yixing and Changshu, part of the Taihu Lake region, to study roles of buffer strips (BS) in reducing nitrogen (N) and phosphorus (P) concentrations in surface water, leachate, and irrigation water of paddy fields different in fertilization level during the rice-growing season, and their effect on yield of the crop. Results show that Treatment BS differed slightly from Treatment Fertilization in rice yield, but significantly reduced N and P loss by intercepting runoff. The total net N intercepted ranged between 20.6 and 51.9 kg $hm^{-2}$, accounting for 31.7%～50.9% of the total dissolved N in the surface water, and the total net P intercepted did between 4.7 and 5.1 kg $hm^{-2}$, accounting for more than 1/2 of the total dissolved P in the surface water. Its role in intercepting N and P in leachate in soil profile was also apparent, reducing N and P transfer into water bodies. N and P concentrations in the profile display a declining trend with the depth, suggesting that paddy field can filter out N and P from irrigation water.

**Key words**　Buffer strip; Nutrient losses; Paddy field; Taihu Lake region