

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

曹志洪 林先贵 杨林章 胡正义 董元华 尹睿

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要 太湖流域最近5年的研究表明:单位面积上径流迁移的土壤磷素是桑园 >> 菜园 \geq 大田麦季 > 大田稻季; 稻麦轮作田每年向水体排放的磷量为 $P\ 0.84\ kg\ hm^{-2}$, 占当年磷肥用量的2.5%, 而菜园地5个月内土壤磷素流失量就达 $P\ 0.6\ kg\ hm^{-2}$, 桑园在4个月内高达 $P\ 1.1\ kg\ hm^{-2}$ 。径流迁移的土壤磷素形态主要是颗粒态磷(PP), 占总流失磷的70%~80%, 可溶性磷(DP)仅占20%~30%。在径流携出的可溶性磷总量中, 可溶性无机磷(DIP)占30%~40%, 可溶性有机磷(DOP)占60%~70%。径流产生的机制与土地利用方式有关: 稻田产生的是“机会径流”, 蔬菜地等旱地是“开放径流”, 而桑园等则是“强化径流”, 不同的产流机制决定径流的次数、流量和强度并导致不同的磷素迁移量。太湖流域水稻土磷素向水体排放的警戒值(Break point)为有效磷(P) $25\sim 30\ mg\ kg^{-1}$, 目前该地区水稻土平均的土壤有效磷水平为 $12\sim 15\ mg\ kg^{-1}$; 因此常规条件下, 未来5~10a内稻田不会形成严重的磷素面源污染威胁。故在城镇郊区、桑园和蔬菜基地周边建立“稻田圈”是防治磷素面源污染有效的生态措施。

关键词 土壤磷素; 径流; 环境警戒值; 面源污染; 稻田圈

中图分类号 S153

文献标识码 A

我国一些经济发达地区(如长三角、珠三角及东部沿海)一方面是植稻面积大大缩减, 另一方面是生态环境问题日趋严峻。龚子同先生等曾把稻田定义为人工湿地生态系统^[1], 国家973项目“土壤质量演变规律和持续利用研究”(编号为: G019990118)曾在太湖流域的水稻土地区开展了大量的研究, 取得的新成果进一步证明稻田是环境友好、生态安全、可持续利用的生态系统。它能吸纳、降解不同来源的氮、磷和有机物等污染, 维持本身土壤质量的健康。据此, 我们建议在年降水量大于800 mm(如我国秦岭淮河以南的广大地区)或水源充沛的地区(如我国东北的一些地方), 应最大限度的保护稻田, 以“稻田圈”包围城镇、隔离蔬菜基地, 实现生态安全和粮食保障双赢, 确保区域可持续发展。我们将从稻田圈的磷素、氮素、碳素(和有机质)、水分和生物多样性及其他生态特征等多方面来论述稻田圈在城乡生态环境建设中的重要作用, 并将通过现今水稻土与史前古水稻土质量的系统比较, 阐明水稻土的可持续利用的机理及保护稻田的生态环境作用。本文将阐述

稻田土壤的磷素迁移流失特征。

鉴于磷素是温带水体富营养化发生的限制因子。本文着重对太湖流域不同土地利用方式下农田土壤磷素径流流失的数量、形态与机制、稻田土壤磷素环境警戒值等进行讨论。

1 稻田土壤磷素的径流流失

在太湖流域的5种水稻土类型上进行了5a稻麦轮作田间试验(5季小麦, 4季水稻)。结果^[2-6]证明, 常规施磷量条件下稻麦轮作农田土壤磷素年均径流损失量为 $P\ 0.84\ kg\ hm^{-2}$, 约占当年施磷量的2.5%, 其变动范围是0.3%~2.7%(表1)。结果还表明, 土壤磷素的径流流失量与土壤类型、有效磷含量、磷肥用量、排水模式及降雨量、径流量、径流产生时期和持续时间等因素有关, 是一个与时间、作物、地形等因子相关的变量。

表1可见, 稻田土壤磷素的径流流失量是麦季大于稻季, 常规施磷量($P\ 50\ kg\ hm^{-2}$)和对照(不施磷)情况下, 前者是后者的2~3倍。

* 国家自然科学基金重点项目(D0115-40335047)资助

作者简介: 曹志洪(1941~), 研究员, 浙江余姚人。主要从事土壤、植物营养与环境研究

收稿日期: 2005-01-03; 收到修改稿日期: 2005-04-05

表 1 常规施肥条件下($P 50 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)不同土壤稻麦轮作农田土壤中磷素径流损失($P \text{ kg hm}^{-2}$)¹⁾Table 1 P losses with runoff ($P \text{ kg hm}^{-2}$) from fields different in soils under rice-wheat crop rotation and normal phosphorus fertilization ($50 \text{ kg P hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)

| 地点 Location | 土壤 Soil type | 稻季 Rice season | | 麦季 Wheat season | | 全年 Sum of year | | 占施 P 量(%) % of P applied |
|------------------|-----------------------------|-------------------|----------------------------|--------------------|------------|-------------------|------------|-----------------------------|
| | | 范围 Range | 均值 Mean | 范围 Range | 均值 Mean | 范围 Range | 均值 Mean | |
| | | 常熟 Changshu | 乌珊土 Waterlogged paddy soil | 0.15 ~ 0.18 | 0.16 | 0.97 ~ 1.25 | 1.19 | |
| 无锡 Wuxi | 黄泥土 Permeable paddy soil | 0.40 ~ 0.46 | 0.44 | 0.68 ~ 0.92 | 0.71 | 1.08 ~ 1.38 | 1.15 | 2.3 |
| 宜兴 Yixing | 白土 Side leaching paddy soil | 0.41 ~ 0.48 | 0.46 | 0.69 ~ 0.95 | 0.73 | 1.10 ~ 1.43 | 1.19 | 2.4 |
| 嘉兴 Jiaxing | 青紫泥 Gleyed paddy soil | 0.02 ~ 0.04 | 0.03 | 0.07 ~ 0.12 | 0.09 | 0.09 ~ 0.16 | 0.12 | 0.3 |
| 张家港 Zhangjiagang | 沙土 Percogenic paddy soils | 0.46 ~ 0.51 | 0.49 | 0.75 ~ 0.77 | 0.76 | 1.21 ~ 1.28 | 1.25 | 2.4 |

1) 资料来源参考文献[2~6,12] Data sources:[2~6,12]

2 稻田磷素径流迁移的警戒值

国外在旱地和牧草地上的研究表明,土壤磷素径流流失的大小在其他条件(植被、气候、土壤等生态和管理)一致的前提下,随土壤有效磷(Olsen-P)含量的增加而提高,但是在土壤有效磷含量达到一定累积水平前径流携带流失的磷量随有效磷增加非常有限,一旦达到这个有效磷水平后径流迁移的磷素便会迅速和急剧地增加,这个值称为土壤磷素的环境警戒值(Break Point)^[7,8]。参照国外作图获得此值(Break Point)的方法^[7,8],根据太湖地区水稻土上

的试验结果,无论是以径流携带的可溶性磷(DP)或是流失磷总量(TP)为纵坐标,以土壤有效磷(Olsen P)为横坐标作图,稻季土壤磷素径流流失曲线的突变点都在 $25 \sim 30 \text{ mg kg}^{-1}$ 范围(图 1)。因此,初步认为此值—Olsen-P $25 \sim 30 \text{ mg kg}^{-1}$ 是太湖流域水稻土磷素向水体排放的环境警戒值。

2001 年对太湖地区 4000 多个水稻土样品的分析表明,有效磷的平均水平为 $P 12 \sim 15 \text{ mg kg}^{-1}$ 。因此,这个磷素环境警戒值对土壤培肥和环境保护都具有指导作用;在未来 5~10a 内如果维持稻麦轮作的耕作制度和现有施磷水平(不过量施磷),则既能满足稻麦稳产优质的需要,也不存在农田磷素严重污染水体的风险。

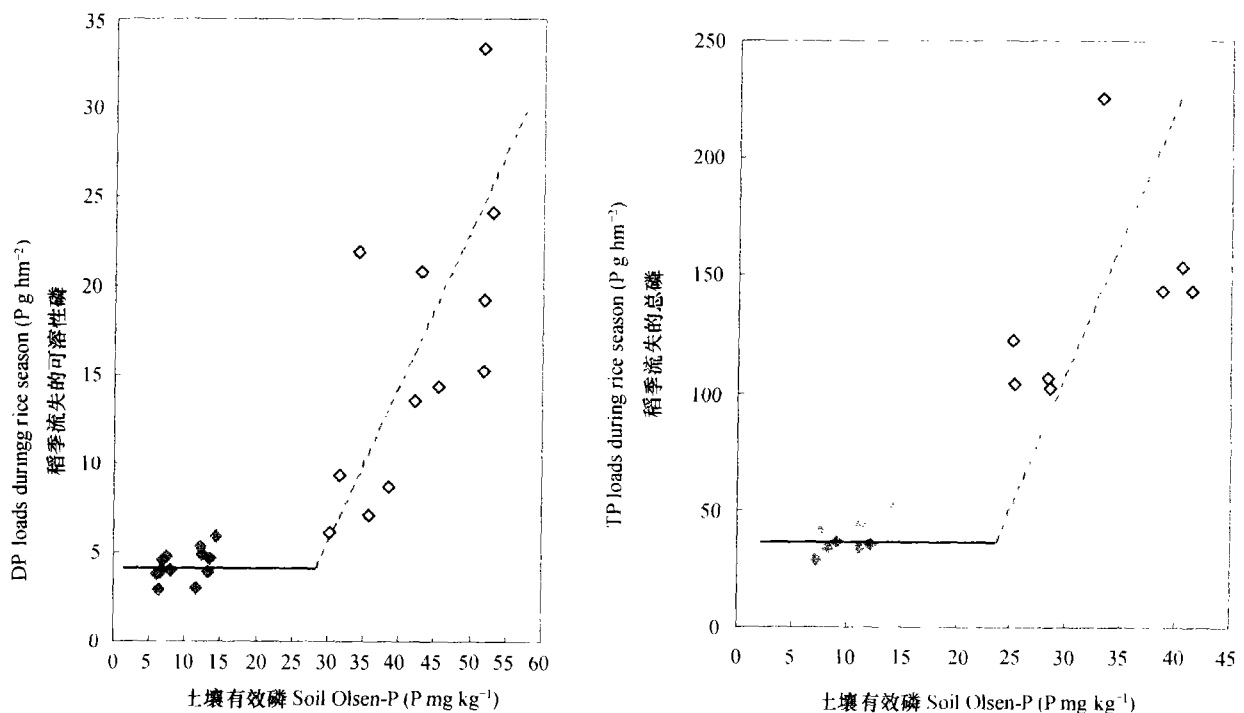


图 1 太湖地区水稻土(左-可溶性磷,右-总磷为纵坐标)磷素向水体排放的警戒值

Fig. 1 Soil P break point of paddy soil (DP - left and TP - right as Y axis) in the Taihu Lake region

3 不同利用方式农田土壤磷素径流迁移量的比较

太湖平原地区除了稻麦轮作田外,还有部分分布在城郊和乡镇周围高地或沿河浜渠道两岸的桑园以及蔬菜基地、设施农业用地等,因为桑蚕和蔬菜的经济回报效益高,农民舍得投入,愿意大量使用有机和无机肥料,从而促进了土壤有效磷含量急速提高。调查证明,桑园和蔬菜地的有效磷都在 $P\ 70\sim 90\text{ mg kg}^{-1}$ 以上,有的高达 $P\ 150\sim 282\text{ mg kg}^{-1}$ [9,10]。桑园表土层有效磷很高,加之冬季的落叶和修剪,桑园地面暴露比例很大,且大多数有机肥料如剩余的

桑叶和排泄的蚕粪等是撒施于地表;蔬菜地的有机肥用量更大,加上其生长季节短,表土翻动频繁(1年种菜4~5次),幼苗期和换季倒茬时暴露的表土比例大、时间长,因此其土壤磷素流失的潜能就大。在浙江嘉兴桑园中进行的田间试验表明,4个月(4月至8月)内就有 $P\ 1.1\text{ kg hm}^{-2}$ 流失⁽¹⁾,宜兴蔬菜基地上的试验证明在5个月(2月至7月)内土壤磷素流失量达 $P\ 0.6\text{ kg hm}^{-2}$ [11]。如果与大田的稻季和麦季之磷素流失量的平均值相比(表1),桑园和菜园的土壤磷素流失量非常大。本区不同利用方式农田土壤磷素径流流失是桑园 >> 菜园 ≥ 大田麦季 > 大田稻季,因此桑园和蔬菜基地是本区农业面源污染的主要控制区域。

表2 磷肥用量对径流携带的可溶性磷素中无机和有机磷含量的影响¹⁾

Table 2 Effect of P application rate on contents of dissolved inorganic and dissolved organic P in runoff during the rice and wheat growing seasons in the Taihu Lake region

| 作物 Crop | 磷处理 P rate (kg hm^{-2}) | 可溶性无机磷 DIP (g hm^{-2}) | 可溶性有机磷 DOP (g hm^{-2}) | 总可溶磷 TDP (g hm^{-2}) | 可溶性无机磷(%) % of DIP | 可溶性有机磷(%) % of DOP |
|-------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 小麦 Wheat | 0 | 6.11 | 9.40 | 25.5 | 23.8 | 76.2 |
| | 30 | 12.8 | 35.5 | 48.3 | 27.6 | 76.4 |
| | 70 | 7.80 | 32.7 | 40.5 | 19.3 | 80.7 |
| 水稻 Rice | 0 | 29.3 | 32.2 | 61.5 | 47.7 | 52.3 |
| | 30 | 18.2 | 32.4 | 50.6 | 35.9 | 64.1 |
| | 70 | 37.7 | 41.2 | 79.2 | 47.6 | 52.0 |
| | 150 | 40.0 | 49.5 | 89.9 | 44.9 | 55.1 |

1)资料来源参考文献[2~4] Data sources:[2~4]

4 土壤磷素流失的形态

^{32}P 同位素标记磷肥的田间试验表明^[12],施入土壤1个月后50%的磷素仍然固定在3~5cm的表土层,因而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。田间试验证明径流迁移的土壤磷素主要是颗粒态磷(PP)——吸附在被径流携带的固体颗粒(无机的黏土矿物或有机的胶体)上的磷,占总流失磷的70%~80%,可溶性磷(DP)仅占总流失磷的20%~30%。而在可溶性磷总量中,可溶性无机磷(DIP)占30%~40%,可溶性有机磷(DOP)占60%~70%(表2)。可溶性有机磷(DOP)主要来自当季使用的有机肥,土壤有机磷的矿化,或作物根系分泌的小分子有机磷等。使用有机肥很多的桑园径流携带的可溶性有机磷的比例比大田的

还高。

5 不同农业利用方式土壤磷素径流迁移量差异的机理

5.1 稻田发生的径流

稻田发生的径流是“机会径流”,发生次数少,强度小,携带可溶性磷和颗粒磷的数量少。这是因为稻田的田面平整,更有田埂围护,在水稻生长季节的大部分时间有田面水层覆盖;太湖平原稻田一般发育了紧实的犁底层,因此稻田是一种径流的封闭系统(图2)。只有特大的暴雨或足够大的雨量使田面水层溢出田埂时才会产生径流。所以稻季的径流只是机会性的发生,次数很少,强度不大。其次稻季田面水层在移栽后不久已经不再混浊而澄清了,如果发生暴雨,水层起到保护表土不被雨滴直接打击的

(1) 中国科学院南京土壤研究所2004年973项目(G19990118)总结报告

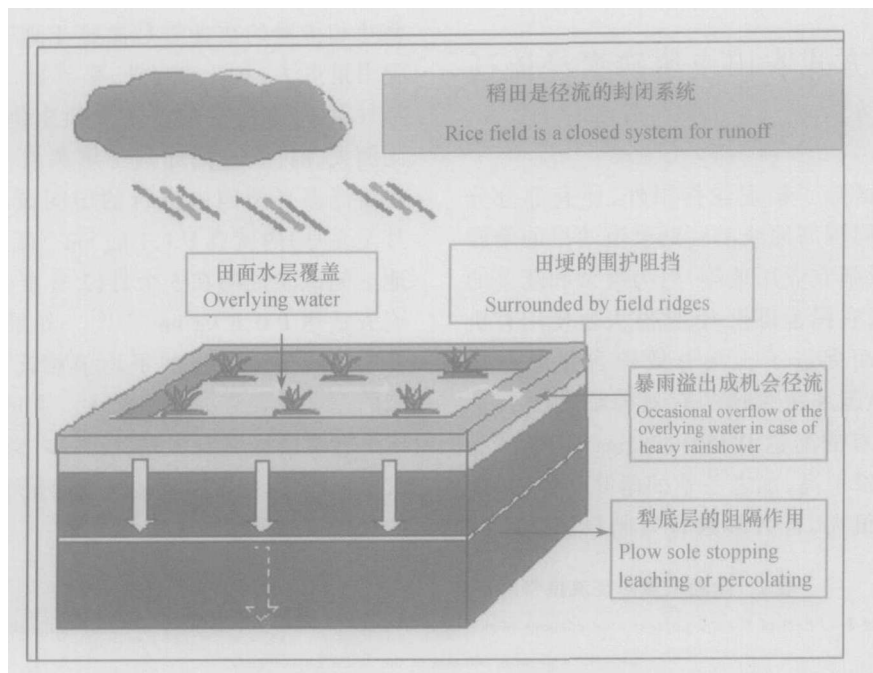


图2 稻田径流封闭系统示意图(引自文献(1))

Fig.2 Flooded rice field is defined as a closed system for runoff (Cited from reference (1))

作用,因而即使有径流产生,所携带的可溶性磷素不多,颗粒态磷也很少。再则,稻田有犁底层防护,一般没有大空隙产生优势流,渗漏量也不大,因此纵向的磷素淋失也较少。

5.2 蔬菜地等旱地产生的径流

蔬菜等旱地没有田埂的阻挡,一般的降水或灌溉水就易形成地表径流。冬季的麦地等更须开深沟排水以降低地下水位、抗涝防渍,促进小麦的良好生长,但增加了径流的数量和时间。麦地的排水沟还打破了犁底层,可能有亚表层的渗漏产生。因此,蔬菜地等旱地是磷素迁移的开放系统,发生径流次数多,总量大,定义为“开放径流”。

5.3 桑(果)园发生的径流

桑园,一般位于地形部位较高的高地或有一定坡度坡地(村边、池塘边、河湖边等),排水非常畅通,一有降水便会形成径流,无论大雨或小雨在坡度作用下,土壤的侵蚀流失都会很大。同时,桑园等受人为扰动很大,不少是堆叠形成的,其剖面中有很多大空隙,优势流携带的颗粒迁移也会增加磷素移出。因此,桑园是磷素迁移的强化开放系统,产流次数更多,强度更大,流速更快,定义为“强化径流”。

6 结论和建议

1) 太湖平原不同土地利用方式土壤磷素径流

迁移流失量的大小次序是:桑园 >> 菜园 ≥ 大田麦季 > 大田稻季。该地区稻麦轮作大田每年向水体排放磷的平均值为 $P 0.84 \text{ kg hm}^{-2}$,占当年磷肥用量的 2.5%;而菜园地 5 个月内土壤磷素流失量就达 $P 0.6 \text{ kg hm}^{-2}$,桑园在 4 个月内高达 $P 1.1 \text{ kg hm}^{-2}$ 。

2) 径流迁移的土壤磷素形态主要是颗粒态磷(PP),占总流失磷的 70%~80%,可溶性磷(DP)仅占 20%~30%。在径流携出的可溶性磷总量中,可溶性无机磷(DIP)占 30%~40%,可溶性有机磷(DOP)占 60%~70%。桑园和蔬菜地使用的有机肥较多,径流中可溶性有机磷的比例也较大。

3) 不同土地利用方式土壤磷素径流迁移的机制不同:稻田是“机会径流”,蔬菜地等旱地的是“开放径流”,而桑园是“强化径流”,产流机制决定了径流的次数、流量、强度并导致不同的磷素迁移量。

4) 太湖流域水稻土磷素环境警戒值(Break point)是 $P 25 \sim 30 \text{ mg kg}^{-1}$ (以 Olsen-P 为准),目前太湖地区水稻土有效磷的平均水平仅为 $P 12 \sim 15 \text{ mg kg}^{-1}$ 。这个磷素环境警戒值的意义是在未来的 5~10 a 内如果维持稻麦轮作的耕作制度和现有施磷水平,既能满足稻麦高产优质的需要,也不存在磷素污染水体的严重威胁。

鉴于稻田径流排放的磷素最少,目前土壤有效磷与环境警戒值有较大距离,建议在城镇郊区、桑园和蔬菜基地周边建立稻田圈,包围和隔离面源污染

的源头,用稻田圈吸纳从城镇排出的经过初步处理的生活污水,接纳从桑园和蔬菜基地排出的有大量氮磷养分的径流或排水,不仅是养分和水资源的循环利用,更是防治水体面源的有效途径。稻田圈也可以包围大城市郊区的居民小区,既可作为人工湿地接受经过处理的生活污水,又可作为一种水景美化人居环境,让城里的人们亲近水稻。稻田圈范围的大小和形状应根据城镇(乡村)和蔬菜基地或住宅小区的具体情况以及农业机械化的要求进行设计。

致谢 本文是国家重大基础研究发展规划项目(973)及部分以前工作成果的综述。在本文所阐明的观点形成过程中有南京农业大学的沈其荣教授和冉炜副教授、扬州大学的封克教授、中国农业科学院土壤肥料研究所的张维理研究员、中国科学院生态环境研究中心的王春霞研究员、香港浸会大学的黄铭洪教授、南京林业大学的张焕朝副教授和中国科学院南京土壤研究所的尹斌研究员和朱建国研究员的积极参与,并对申请后续的重点基金课题提出了宝贵的意见,在此一并致谢。

参考文献

- [1] Gong Z T. Wetland soils in China. *Wetland: Characterization Classification and Utilization*. IRRI, Philippines, 1985
- [2] Cao Z H, Zhang H C. Phosphorus losses to water from lowland rice field under rice-wheat double cropping system in Taihu Lake region. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26(2/3): 229 ~ 236
- [3] Zhang H C, Cao Z H, Shen Q R, *et al.* Effect of phosphorus fertilizer application on phosphorus (P) losses from paddy soils in Taihu Lake region. *Chemosphere*, 2003, 50: 695 ~ 701
- [4] 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. *Chemosphere*, 2003, 52: 1 461 ~ 1 466
- [5] 曹志洪. 施肥与水体环境质量—论施肥对环境的影响(2). *土壤*, 2003, 35(5): 353 ~ 363. Cao Z H. Effect of fertilization on water quality-Effect of fertilization on environment quality(2)(In Chinese). *Soils*, 2003, 35(5): 353 ~ 363
- [6] 王小治, 曹志洪, 盛海君, 等. 太湖地区渗育性水稻土径流中磷组分的研究. *土壤学报*, 2004, 41(2): 278 ~ 284. Wang X Z, Cao Z H, Sheng H J, *et al.* Study on the fractionation of phosphorus loaded by the runoff and drainage flows of percologenic paddy soils in the Taihu Lake region(In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 278 ~ 284
- [7] Edwards A C, Withers P J A. Soil phosphorus management and water quality: a UK perspective *Soil Use and Management*, 1998, (14): 124 ~ 130
- [8] Sharpley A N, Daniel T, Sims T, *et al.* *Agricultural Phosphorus and Eutrophication* USDA. Agricultural Research Service ARS, No. 149. New York: Marcel Dekker Inc, 1999
- [9] Cao, Z H, Huang J F, Zhang C S, *et al.* Soil quality evolution after land use changing from paddy rice to upland vegetables in relation to public health. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26(2/3): 97 ~ 103
- [10] Lin, X G, Yin R, Zhang HY, *et al.* Changes of soil microbiological properties caused by land use changing from rice-wheat rotation to vegetable cultivation. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26(2/3): 119 ~ 128
- [11] 胡正义, 王彩绒, 杨林章, 等. 太湖流域典型蔬菜地氮磷向水体迁移与控制策略. 见: 中国环境科学学会. 中国水环境污染控制与生态修复技术高级研讨会论文集. 中国杭州, 2004. 329 ~ 343. Hu Z Y, Wang C R, Yang L Z, *et al.* Phosphorus and nitrogen losses from typical vegetable land to water in Taihu Lake region and its control Measures. *In: Chinese Society for Environmental Science*. ed. *Proceedings of Advanced Symposium on Water Pollution Control and its Ecological Remediation in China* (In Chinese). Hangzhou, China, 2004 329 ~ 343
- [12] Xie X J, Ran W, Shen Q R, *et al.* Field studies on ³²P movement and P leaching from flooded paddy soils in the region of Taihu Lake, China. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26(2/3): 237 ~ 243

**ECOLOGICAL FUNCTION OF "PADDY FIELD RING"
TO URBAN AND RURAL ENVIRONMENT
I. CHARACTERISTICS OF SOIL P LOSSES FROM PADDY FIELDS
TO WATERBODIES WITH RUNOFF**

Cao Zhihong Lin Xiangui Yang Linzhang Hu Zhengyi Dong Yuanhua Yin Rui

(State Key Lab. of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract Results of field trials revealed that P losses from soil with runoff are closely related to land use patterns, which are in the order of: mulberry garden >> vegetable fields \geq paddy in wheat season > paddy in rice season. The annual mean total P loss from paddy field under wheat - rice crop rotation was about P 0.84 kg hm⁻², which was equivalent to 2.5% of the total P applied. P loss from vegetable field reached P 0.6 kg hm⁻² in 5 months due to a very high content of soil available P, and from mulberry garden P 1.1 kg hm⁻² in 4 months. In terms of forms of P moved with runoff, about 70% ~ 80% was found to be Particle P (PP), while the rest (20% ~ 30%) was dissoluable P (DP). Of the dissoluable, inorganic P (DIP) accounted for only 30% ~ 40% while organic P (DOP) for about 60% ~ 70%. Mechanisms of runoffs were closely related to land use patterns and determined strength, frequency and amount of runoffs. Flooded paddy field is surrounded by ridges, and embedded with a plowpan below the cultivation horizon developed after long term rice cultivation. Thus flooded paddy field is recognized as a closed system for runoff. But runoff would occur occasionally in case of heavy rainshowers that lead to overflow of the overlying water, and the runoff flow from flooded paddy field is defined as "occasional runoff". In the case of vegetable field or paddy under winter wheat, the field is open to free runoff as long as there is rain because it is not protected by ridges. This type of runoff is called "open runoff". As mulberry gardens in this area are usually located on upland with varying degrees of slope in the rural area or along both sides of canals or rivers, runoff in this case is accelerated by the gravity and could carry more particles with faster velocity from the upper to the bottom along the slope, which is defined as "intensified runoff".

The break point of P runoff losses from the two types of paddy fields tested was P 25 ~ 30 mg kg⁻¹(Olsen-P). The present average soil available P in paddy soils in this region was around P 12 ~ 15 mg kg⁻¹, which is still far below the break point under the current management practice in this region. As long as the regular fertilization regime is maintained, paddy fields will not pose a source of non-point source P pollution within the next 5 ~ 10 year. Therefore, setting up a "Paddy field Ring" around villages and/or town, vegetable bases/or mulberry gardens should be an ecological and valuable means for controlling the non point source P pollution with runoff.

Key words Soil phosphorus; Runoff; Break point; Non-point source pollution; Paddy field ring