第 25 卷第 11 期
2005 年 11 月

环 境 科 学 学 报
Acta Scientiae Circumstantiae

Vol. 25 ,No. 11
Nov. , 2005

高 超,朱继业,朱建国,等. 不同土地利用方式下的地表径流磷输出及其季节性分布特征 [J]. 环境科学学报,2005,25(11):1543 - 1549
GAO Chao, ZHU Jiye, ZHU Jianguo, *et al*. Phosphorus exports via overland runoff under different land uses and their seasonal pattern [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(11): 1543 - 1549

不同土地利用方式下的地表径流磷输出及其季节性分布特征

高 超[1,2,*],朱继业[1],朱建国[2],宝川靖和[3],王登峰[1],周娟娟[1],高 翔[1],窦贻俭[1]

1. 南京大学城市与资源学系,南京 210093
2. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室,南京 210008
3. 日本国际农林水产业研究中心,筑波 305-8686

收稿日期:2005-04-11 **修回日期**:2005-08-09 **录用日期**:2005-08-10

摘要:在太湖流域利用为期 3 年的田间试验研究了不同土地利用方式下的土壤侵蚀和径流磷流失特征. 结果表明,径流量和土壤侵蚀量都是竹园 < 板栗园 < 蔬菜地 < 玉米-油菜轮作. 旱耕地上玉米-油菜轮作和蔬菜种植条件下磷的主要流失途径为泥沙搬运,磷的年均流失量分别为 2.67 kg·hm^{-2}和 2.79 kg·hm^{-2},而竹园和板栗园则分别只有 0.28 kg·hm^{-2}和 0.66 kg·hm^{-2}. 土壤侵蚀和磷流失主要发生在 6～8 月降雨集中分布的梅雨和台风季节. 旱地上板栗园与玉米-油菜轮作 2 种利用方式的经济收益接近,但前者土壤侵蚀和磷流失量分别只有后者的 6.7 %和 24.7 %,在太湖地区种植板栗是值得鼓励的土地利用方式. 稻田水旱(水稻-油菜)轮作条件下,磷主要随农田排水流失,降雨时间和施肥等农事活动的间隔长短在很大程度上决定了磷的年流失量,3 次最大的流失事件中磷的流失量可达到全年磷流失的 70 %以上. 稻田水旱轮作方式磷的年均流失量为 0.93 kg·hm^{-2},分别只有旱地玉米-油菜轮作和蔬菜地的 34.8 %和 33.3 %. 因此,根据不同土地利用方式下磷输出量的差异及其季节分布特征合理调整土地利用格局,并在暴雨集中期尽量减少施肥和翻耕等农事活动,可以降低农田生态系统磷的输出.

关键词:农业非点源污染; 土地利用方式; 地表径流; 养分流失; 磷

文章编号:0253-2468(2005)11-1543-06 **中图分类号**:X131.3 **文献标识码**:A

Phosphorus exports via overland runoff under different land uses and their seasonal pattern

GAO Chao[1,2,*], ZHU Jiye[1], ZHU Jianguo[2], Yasukazu HOSEN[3], WANG Dengfeng[1], ZHOU Juanjuan[1], GAO Xiang[1], Dou Yijian[1]

1. Department of Geography, Nanjing University, Nanjing 210093
2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Nanjing 210008
3. Japan International Research Center for Agricultural Science, Tsukuba 305-8686, Japan

Received 11 April 2005; **received** in revised form 9 August 2005; **accepted** 10 August 2005

Abstract: Sediment and phosphorus losses via overland runoff from erosion plots under different land uses were studied in an agricultural watershed in the Taihu Lake area in eastern China. Runoff and erosion rates followed the order of bamboo forest < chestnut orchard < vegetable field < corn/rapeseed rotation, while phosphorus exportation followed the order of bamboo forest < chestnut orchard < corn/rapeseed rotation < vegetable field. Sediment attached phosphorus accounted most of the P exported under corn/rapeseed rotation and vegetable fields, indicating that erosion control was the most effective way to reduce phosphorus losses from uplands. Distinct seasonal pattern of phosphorus losses was observed, with 60.9 %～84.7 % of annual phosphorus loss happened during monsoon and typhoon season (from June to August). Cost/benefit analysis of different land uses showed that chestnut and corn/rapeseed rotation provided similar economic returns. Considering the risk of soil erosion and P losses, chestnut farming was worth encouraging in Taihu Lake region for the benefit of non-point source pollution control. For the paddy field under rapeseed/rice rotation, phosphorus was mainly exported with runoff and drainage water. Annual P losses were mainly decided by the amount of precipitation and its coincidence with fertilization. Three heavy rainfall events immediately following fertilization accounted as high as 70 % of annual

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(No. G1999011806);中国科学院土壤与农业可持续发展国家重点实验室和日本国际农林水产业研究中心资助项目

作者简介:高 超(1962 —),男,副教授(博士),E-mail: chgao@nju.edu.cn; *通讯作者(责任作者)

Foundation item: National Key Project (No. G1999011806); supported by the State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture and the Japan International Research Center for Agricultural Science

Biography: GAO Chao (1962 —), male, associate professor (Ph. D.), E-mail: chgao@nju.edu.cn; * **Corresponding author**

P exports. The results of this study indicated that phosphorus exports from agro-ecosystem could be significantly cut down by optimizing land use patterns and by reducing tillage practices during those sensitive periods.

Keywords: agricultural nonpoint source pollution; land use; overland runoff; nutrient losses; phosphorus

地表径流引起的土壤侵蚀和氮、磷等养分的流失既导致土壤质量的退化,又是农业非点源污染的重要发生形式(Novotny, 1999),定量地对比研究不同土地利用方式下的土壤侵蚀量和养分流失量可以为制订针对性的管理措施提供科学依据. 其研究结果一方面可直接用于指导土地利用结构和农业结构的优化调整,以达到改善土壤质量和减少非点源污染输出的目的;另一方面可以为在更大范围内模拟非点源污染的输出提供基础资料. 因为非点源污染具有广域性和随机性等特点,人力和财力的限制使得通常无法在较大范围内进行全面的监测工作.

利用人工控制的径流小区试验是定量研究不同土地利用方式下土壤侵蚀和养分流失特征的常用方法(Kumar *et al*., 1997; Zöbisch *et al*., 1999). 这种试验方法又可分为 2 种类型,其一是人工模拟降雨法,其优点是试验条件易于控制,便于研究不同管理方式和地形条件下的土壤侵蚀和养分输出. 例如,单保庆等和黄满湘等都利用模拟降雨法分别研究巢湖地区和北京郊区氮、磷的输出特征和机理(单保庆等,2000;黄满湘等,2003). 康玲玲等(1999)和陈皓等(1991)分别研究了不同雨强条件下黄土地区土壤养分流失规律. 其二是在自然降雨条件下进行的定位试验,经过长期观测,不仅可以对比研究不同土地利用方式下的土壤侵蚀和养分流失特征,还可用于分析农事活动和天气条件影响下侵蚀和流失的季节性变化(Barton *et al*., 2004). 我国学者也已进行了不少径流小区的试验工作,但多采用模拟降雨的方法,较少利用长期定位试验研究自然降雨条件下不同土地利用方式的养分输出及其季节性变化. 本研究通过在太湖流域丘陵区的长期径流小区试验,一方面比较不同土地利用方式下自然降雨-径流过程导致的土壤侵蚀和磷输出量的差异;另一方面揭示非点源污染物输出的季节性变化规律.

1 研究地点与试验方法(Site, material and methods)

试验区位于太湖之滨的江苏省宜兴市,所有试验均布置在一个以农业利用为主的小流域内(31°20′N, 119°51′E)或其附近. 试验区地处中亚热带北缘过渡地带,四季分明,雨量充沛,气候温和湿润,无霜期平均为 239 d. 年平均气温 15.7 ℃,全年平均雨日 136 d,日降雨 ≥50 mm 的暴雨每年出现 2～3 次,大都出现在梅雨期和台风季节. 常年 6 月份暴雨最多,其次为 8 月份. 多年平均降雨量为 1 277.1 mm,多年平均径流深 408.6 mm,年径流系数为 0.35. 小流域内主要分布有黄棕壤以及由此发育形成的水稻土. 水稻田主要为单季稻-油菜轮作,旱地土壤种植油菜、玉米、蔬菜、果树等粮食作物和经济作物.

根据研究区的土地利用特点,在小流域内旱地上选择竹园、板栗园、蔬菜地和旱地(玉米-油菜轮作)等 4 种典型方式,建立了 8 个径流小区(每种利用方式 2 个重复). 小区长为 10 m,宽 4～6 m,8 个径流小区均位于坡脚部位,所处地形坡度基本相同(4°左右). 小区四周以塑料板分隔,在每个小区的下端出口处建立形状规则的分流池以收集暴雨后的径流和泥沙,每次暴雨事件后立即记录各小区产生的径流量(根据分流池中径流的体积计算)并采集径流样品,然后排干径流池并收集池底的泥沙. 采集的径流样品立即放入冰箱冷冻保存,直到送试验室分析. 泥沙样品风干后称重,以便计算土壤侵蚀量. 径流样品测定总磷(TP)和溶解态活性磷(DRP). 用 0.45 μm 的滤膜过滤径流样品,未过滤的径流样品经消解后测定 TP,过滤后的样品用于测定 DRP. 风干的侵蚀土壤经磨细、消化后测定其中的全磷含量. 径流中不同形态的磷和土壤基本物理化学性质的测定均采用相关标准分析方法(鲁如坤,1999).

在小流域出口附近选择一块近长方形(53.5 m ×14.5 m = 775.8 m^2)的稻田,其土地利用方式为单季稻-油菜轮作. 稻田四周田埂用塑料薄膜深埋以便与其它田块隔开,在稻田旁边建一大型分流池,记录降雨、灌溉和烤田期间稻田的排水量. 稻田排水的采样、保存和分析方法与旱地径流小区相同,并由此计算水稻和油菜种植期间农田排水中的磷排放量.

在小流域设有雨量计,记录试验期间的降雨强度和降雨量. 试验期间各试验地保持原有耕作方式,但要求农户记录全年的施用化肥和有机肥的品种、数量和施肥时间,以估算不同土地利用方式下的氮、磷施用量. 各径流小区的土壤基本理化性质及不同土地利用方式下的施肥量见表 1.

表 1　径流小区土壤理化性质及施肥量

Table 1　Properties of soils in the erossion plots and annual fertilizer application rates

土地利用类型	pH	土壤机械组成			有机质含量 /(g·kg⁻¹)	全氮含量 /(g·kg⁻¹)	全磷含量 /(g·kg⁻¹)	有效磷含量 /(mg·kg⁻¹)	磷肥年施用量 /(kg·hm⁻²)
		1～0.05 mm	0.05～0.002 mm	<0.002 mm					
竹园	4.9	17.20 %	64.70 %	18.10 %	87.9	5.92	0.51	20.1	0.7
栗园	6.2	24.00 %	59.30 %	16.70 %	44.9	2.78	1.05	26.4	23.7
旱地*	5.4	7.40 %	66.70 %	25.90 %	9.23	0.94	0.59	12.9	65
菜地	5.3	12.20 %	63.70 %	24.10 %	27.5	2.11	1.09	48.7	83.1
稻田	6.6	2.30 %	71.80 %	25.90 %	48. 6	3.21	1.18	29.4	67.8

*旱地的利用方式为玉米-油菜轮作

2　结果(Results)

2.1　旱地不同土地利用方式下的土壤侵蚀和养分流失

从 2001 年 7 月初至 2004 年 6 月底的 3a 时间里,旱地径流小区记录到有明显产流的降雨事件共 38 场,由此计算了观测期间的年均径流量和土壤侵蚀量.监测结果显示,不同土地利用方式下产生的地表径流量和由此引起的土壤侵蚀量差异明显(图 1).无论是径流量还是土壤侵蚀量都是竹园 < 板栗园 < 蔬菜地 < 玉米-油菜轮作.即竹园的径流量和土壤侵蚀量最少,板栗园的径流量和土壤侵蚀量也较低,只略高于竹园.而玉米-油菜轮作的利用方式下,径流量和土壤侵蚀量大大高于竹园和板栗园,其径流量分别是竹园和板栗园的 5.3 倍和 3.2 倍,土壤侵蚀量分别是竹园和板栗园的 57.8 倍和 15.0 倍.蔬菜地的径流量和土壤侵蚀量虽大大高于竹园和板栗园,但低于玉米-油菜轮作的利用方式.

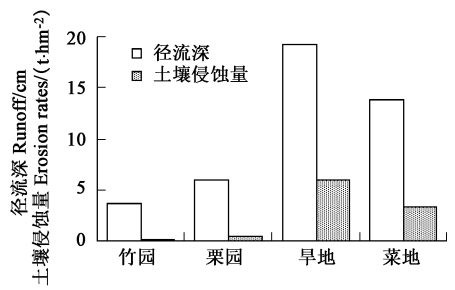


图 1　不同土地利用方式下的年均径流深和土壤侵蚀量

Fig. 1　Average annual runoff and soil olsses from different land uses

图 2 是旱地上不同土地利用方式下的年均磷流失量.由图可见,竹园和板栗园的磷流失量都比较低,分别为 0.28 kg·hm⁻²和 0.66 kg·hm⁻²,而玉米-油菜轮作的利用方式下,磷的流失量达到 2.67 kg·hm⁻²,分别是竹园和板栗园的 9.7 倍和 4.1 倍.蔬菜地的径流量和土壤侵蚀量都低于玉米-油菜轮作的旱地,但磷的流失量略高(2.79 kg·hm⁻²).竹园和板栗园流失的磷以水相为主,竹园和板栗园水相磷分别占流失总磷的 74.7 %和 69.6 %.而玉米-油菜轮作和蔬菜地磷的流失途径主要为泥沙搬运,侵蚀土壤中的磷(固相磷)分别占流失总磷的 69.9 %和 69.6 %.

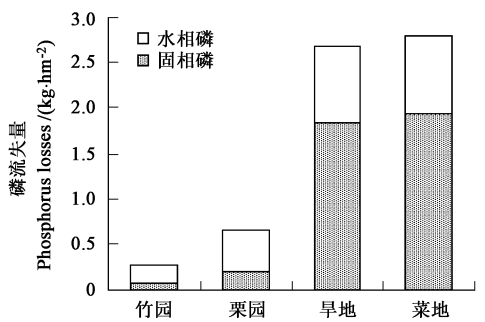


图 2　不同土地利用方式下的年均磷流失量

Fig. 2　Average annual phosphorus losses from different land uses

试验区降雨多出现在梅雨期和台风季节,常年 6 月份暴雨最多,其次为 8 月份.研究区多年平均降雨量为 1 277.1 mm,而 6～8 月的平均降雨总量为 574.3 mm,占全年降雨总量的 45 %,而径流、土壤侵蚀和养分流失也主要发生在此期间.在 3 a 的观测期间,11 月均没有发生径流事件,1 月、2 月和 10 月的径流量也很小,而 6～8 月期间径流和养分流失比较集中(图 3、图 4),3 个月期间竹园、板栗园、玉米-油菜轮作和蔬菜地 4 种利用方式下产生的平均地表径流深分别为 23.8,40.3,103.1 和 79.9 mm,分别占全年的 65.6 %,67.4 %,53.6 %和 57.8 %,其中 8 月份 4 种利用方式下产生的地表径流量均为全年最高,约占全年总量的 30 %左右.6～8 月期间竹园、板栗园、玉米-油菜轮作和蔬菜地 4 种利用方式下随径流流失的水相磷分别为 0.12,0.31,0.48 和 0.59 kg·hm⁻²,分别占全年水相磷总量的 57.0 %,67.5 %,57.3 %和 69.2 %.

2.2　水旱轮作条件下的养分流失

水稻田由于比较平坦,加之植稻期间田埂基本

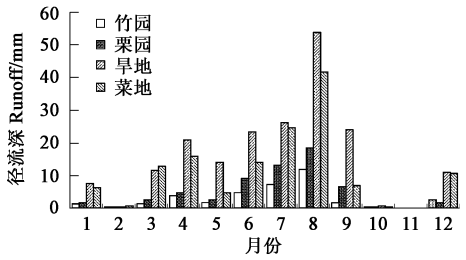


图 3 地表径流量的季节性分布

Fig. 3 Seasonal distribution of overland runoff

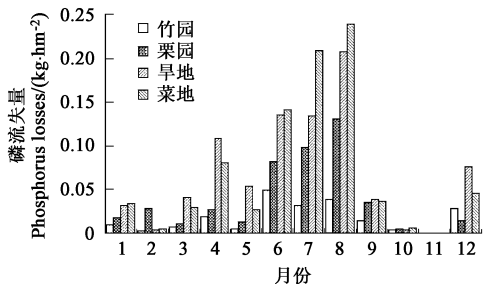


图 4 径流中水相磷流失量的季节性分布

Fig. 4 Seasonal distribution of P loss via overland runoff

处于封闭状态,因此,土壤侵蚀现象远比旱地要轻.但植稻期间水分管理要比旱地复杂得多,除降雨时可能会有排水外,过量的灌溉和烤田期间也会大量排水,从而发生磷的流失. 在太湖流域丘陵山区,稻田水旱轮作(水稻-油菜)的作物是单季稻在 6 月上旬移栽,至 11 月上旬收割,紧接着开始油菜移栽,至次年 5 月底油菜收割,周期正好为 1 年. 本次稻田水旱轮作观测试验始于 2001 年 5 月的稻季之前,至 2003 年 5 月油菜收割,为期 2 年的试验期内各种植了 2 季水稻和油菜. 2001 年和 2002 年试验区的年降水量分别为 1 382. 7 mm 和 1 489. 7 mm,均高于多年平均值(1 277. 1 mm). 根据监测结果,2001～2002 年水稻-油菜种植期磷随地表径流和农田退水的流失量为 0. 86 kg·hm^{-2},而 2002～2003 年水稻-油菜种植期为 1. 01 kg·hm^{-2}(表 2),年平均值为0. 93 kg·hm^{-2}.

监测结果表明,无论是稻作期间还是油菜种植期,少数几次大的流失事件往往决定了磷的年流失总量. 例如 2002 年稻季最大的 1 次流失事件(6 月 13 日)中磷的流失量为 0. 33 kg·hm^{-2},占整个稻季磷流失量的 39. 8 %. 而 3 次最大流失事件中磷的流失量为 0. 59 kg·hm^{-2},占整个稻季磷流失量的 72. 0 %. 这些大的流失事件并不一定发生在最大的降雨事件中,如果大量施肥之后立即有降雨发生,则会导致磷的大量流失. 6 月 13 日大量的磷流失就发生在水稻刚移栽不久,稻田里刚刚施用了大量的基肥和追肥.

表 2 试验期间稻田地表径流和农田排水导致的磷流失量

Table 2 Phosphorus losses from the paddy field plot via runoff and drainage water

试验期	磷流失量/(kg·hm^{-2})
2001 年水稻种植期	0. 34
2001～2002 年油菜种植期	0. 52
2002 年水稻种植期	0. 82
2002～2003 年油菜种植期	0. 19

3 讨论(Discussion)

研究区所在的苏南地区化肥施用水平较高,农田生态系统的磷收支普遍处于盈余状态(高超等,2000). 实验区的稻田水稻-油菜轮作和旱地玉米-油菜轮作的磷肥施用量都超过 60 kg·hm^{-2},蔬菜地磷肥施用量超过 80 kg·hm^{-2}(表 1). 频繁的施肥和翻耕等农事活动都会加剧表层土壤中磷的流失. 前人的研究结果表明(Ryden *et al*., 1973; Summers *et al*., 1993; Sharpley *et al*., 1994; 王晓燕,2003),由于土壤尤其是含磷量不高的亚表层土壤具有较强的固磷能力,土壤渗漏水中的磷浓度一般很低,地表径流的溶解和搬运是土壤磷流失的主要途径. 农田径流中的磷一般以颗粒态为主(75 %～95 %)(Sharpley *et al*., 1994),由于易被侵蚀的细粒粘土矿物和土壤有机质本身含磷量较高并能够吸持大量的磷,因而在侵蚀过程中,粘土和有机胶体等细粒部分更易被剥离和搬运,从而导致径流泥沙中的磷含量高于被侵蚀土壤中的含磷量,即所谓的磷富集现象(Pierzynski *et al*., 1994). 表层土壤中的磷在侵蚀过程中的流失一方面导致土壤肥力的丧失,另一方面会导致水体中磷的富集. O'Hara 等人(1993)的研究结果表明,旱地上流失的颗粒态磷至少有 40 %会进入受纳水体. 充分认识不同土地利用方式下磷流失量的差异及其季节性分布特征,才能制定相应的控制措施,以减少农田生态系统中磷的输出.

磷流失量主要决定于径流量、土壤侵蚀量以及径流和侵蚀土壤中的磷含量. 本次径流小区试验结果表明,土地利用方式对径流磷输出的主要影响表现在两个方面. 一方面是不同土地利用方式下产生的径流量和土壤侵蚀量有显著的差异. 竹园和板栗园由于人为扰动较少,地表凋落物丰富,表土层的有机质积累较多,有利于降雨的下渗并降低地表径流的流速(Gao *et al*., 2004),径流量和土壤侵蚀量都

比较低,因而磷的流失量也少.而在旱地上油菜-玉米轮作的利用方式下由于翻耕等人为扰动较为频繁,表土层的有机质含量较低,土壤结构受到破坏而容易板结,不利于降雨的下渗,因此产生较多的地表径流和土壤侵蚀,磷的流失量也大大高于竹园和板栗园.另外,油菜和玉米的换茬正值 5 月底 6 月初降水比较集中的时节,此时地表的裸露和耕作导致地表径流大大增加并加剧了土壤侵蚀.相比之下,蔬菜地的作物换茬期发生在降水较少的季节,且土壤有机质含量高于旱地,因此蔬菜地的径流量和土壤侵蚀量虽高于竹园和板栗园,但低于玉米-油菜轮作的利用方式.

另一方面,不同土地利用方式下土壤磷素含量及其存在形态的差异也是决定磷流失的重要因素.竹园和板栗园土壤侵蚀量较少,但表土中有效磷含量较高,因此径流中的磷浓度相对较高,流失的磷以水相为主.蔬菜地的径流量和土壤侵蚀量都低于玉米-油菜轮作的旱地,但由于前者的施肥量和表土的磷素水平都高于后者,因而径流中的磷浓度和侵蚀土壤中磷的含量较高,所以磷的流失量略高于后者.总的来说,玉米-油菜轮作和蔬菜地磷的流失途径主要为泥沙搬运,约占总量的 70 %左右.说明所有有利于控制水土流失的措施也是减少旱地磷输出的有效手段.

在对比了旱地不同土地利用方式下的土壤侵蚀和磷流失量的基础上,我们还通过调查分析了上述不同土地利用方式的投入-产出情况.根据试验期间种子、化肥和农药的用量和价格,计算了这些投入的成本.劳动力的成本则根据不同土地利用方式下投入的劳动力数和当地劳动力的机会成本(农民做临时工的日平均报酬)计算.再根据试验期间的农产品产量和价格计算产出率,最后得到不同土地利用方式下的净收益(表 3).由表 3 可见,蔬菜种植的净收益最高,而竹园的收益最低,板栗园和玉米-油菜轮作的收益比较接近.由于毛竹生长对耕层土壤质量和灌溉水供应能力的要求较低,而蔬菜的需求量有限,这 2 类利用方式一般不会做大的调整.板栗园和玉米-油菜轮作 2 种利用方式的收益相近,但前者土壤侵蚀和磷流失量分别只有后者的 6.7 %和 24.7 %.因此,在备受水体富营养化困扰的太湖流域,这些试验数据可为当地的农业结构调整提供有用信息.政府可采取适当措施(比如只需提供少量补贴),鼓励农民选择那些环境友好的利用方式,以减少农业非点源污染物的输出.

表 3　旱地上不同土地利用方式的投入-产出分析

Table 3　Cost/benefit analysis of different land uses

土地利用	成本/(元·hm^{-2}·a^{-1})					产出/(元·hm^{-2}·a^{-1})	净收益/(元·hm^{-2}·a^{-1})
	劳动力	种子	化肥	农药	总成本		
竹园	909.0		384.0		1 294.5	4 509.0	3 216.0
板栗园	2 127.0		1 138.5	573.0	3 838.5	10 597.5	6 759.0
旱地	3 829.5	1 359.0	2 206.5	1 005.0	8 400.0	15 520.5	7 120.5
蔬菜地	6 361.5	714.0	3 327.0	714.0	11 118.0	42 361.5	31 243.5

此外,根据不同土地利用方式下磷输出的差异对景观格局进行优化配置,也可以起到减少非点源污染物输出的效果.在耕地和水体之间设置宽广的植被缓冲带是西方发达国家控制非点源污染的重要手段.我国土地资源十分紧缺,在采取此类工程措施的时候除了考虑生态效益外,还必须有利于最大程度地发挥土地资源的生产力.由于竹园和栗园的水土流失和磷输出都很低,因此,在坡地下部靠近河道的部位种植板栗等经济林果也可以起到植被缓冲带的作用,而且还有可观的经济效益,是一种比较易于推广的方法.

水旱轮作是苏南地区水稻田的典型利用方式,2 年的试验结果并没有显示哪种利用方式下磷更容易流失(表 2),这与前人研究结果不尽一致.马立珊等(1997)根据 1987～1988 年期间在太湖流域进行的田间实验结果,得出磷肥施用在旱作期间磷的流失量较小的结论.本次试验期间并没有改变农户原有的利用方式,稻作期间与旱作期间磷肥施用量基本相当.试验结果表明油菜种植期的磷流失量既有小于稻作期的情况,也会大于稻作期(表 2),这主要与降雨量及降雨时间和施肥等农事活动的间隔长短有关.

与旱地上的玉米-油菜轮作及菜蔬地相比,水稻田磷的流失量只有前者的 30 %左右.考虑到稻作期间水稻田还消纳了一定量来自灌溉水中的磷,因此,尽管水稻田的磷肥施用量高于旱地玉米-油菜轮作,但前者磷的净输出要比后者小得多.前人研究结果表明(马立珊等,1997;徐琪等,1998;晏维金等,

1999),在水肥管理措施得当的情况下,通过水循环从稻田生态系统流失的氮、磷等养分甚至低于随雨水和灌溉水输入的养分量,即水稻田与其它人工湿地一样可以对营养物质起拦截和净化作用.因此,注意保护水耕农田,尤其河道附近的水田,也可以减少营养物质从农田的输出.

除了农事活动的影响外,气象条件对土壤侵蚀和磷流失的影响也十分明显.由于在降雨集中分布的梅雨和台风季节最易发生径流事件和水土流失,在此期间进行的翻耕和施肥等农事活动会大大增加养分从农田生态系统的输出.因此,应当有意识地减少暴雨集中期的农事活动,这样既能减少农民的肥料损失,也可有效地控制农业非点源污染.

4 结论(Conclusions)

1) 旱地不同土地利用方式下径流量和土壤侵蚀量都是竹园 < 板栗园 < 蔬菜地 < 玉米-油菜轮作,磷流失量则是竹园 < 板栗园 < 玉米-油菜轮作蔬菜地.玉米-油菜轮作和蔬菜地磷的流失途径主要为泥沙搬运,控制水土流失是减少旱地磷输出的重要手段.

2) 旱地土壤侵蚀和磷随地表径流的流失主要发生在 6～9 月降雨集中分布的梅雨和台风季节,在此期间,应特别注意减少和避免那些会加剧土壤侵蚀和磷流失的农事活动.

3) 旱地上板栗园和玉米-油菜轮作 2 种利用方式的经济收益接近,但前者土壤侵蚀和磷流失量分别只有后者的 6.7 %和 24.7 %.在倍受水体富营养化困扰的太湖流域,采取适当措施鼓励农民选择环境友好的利用方式,可以减少农业非点源污染物的输出.

4) 稻田水旱轮作条件下,降雨时间和施肥等农事活动的间隔长短在很大程度上决定了磷的年流失量.3 次最大的流失事件中磷的流失量即占全年磷流失的 70 %以上.总体上稻田水旱轮作方式下磷的年均流失量分别只有旱地玉米-油菜轮作和蔬菜地的 34.8 %和 33.3 %.

致谢:宜兴市宜城镇农技站的吴国鞋先生承担了大量的野外实验管理工作,特在此表示衷心感谢.

参考文献(References):

Barton A P, Fullen M A, Mitchell D J. 2004. Effects of soil conservation measures on erosion rates and crop productivity on subtropical Ultisols in Yunnan Province, China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 104: 343—357

Chen H, Zhang S. 1991. Nitrogen and phosphorus movement from loess tillage under modeling: the rainfall-runoff erosion processes [J]. Scientia Geographica Sinica, 11(2): 142—148 (in Chinese)

Gao C, Zhang T L. 2000. Agricultural soil phosphorus dynamics in Taihu Lake watershed and it environmental impact [J]. Rural Eco-Environment, 16(4): 24—27 (in Chinese)

Gao C, Zhu J G, Zhu J Y, *et al*. 2004. Nitrogen export from an agriculture watershed in the Taihu Lake area, China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 26: 199—207

Huang M X, Zhang S, Zhang G L, *et al*. 2003. Losses of nitrogen nutrient in overland flow from farmland in Beijing under simulated rainfall conditions [J]. Acta Geographica Sinica, 58(1): 147—154 (in Chinese)

Kang L L, Zhu X Y, Wang Y Z, *et al*. 1999. Research on nutrient loss from a loessial soil under different rainfall intensities [J]. Acta Pedologica Sinica, 36(4): 536—543 (in Chinese)

Kumar R, Ambasht R S, Srivastava A, *et al*. 1997. Reduction of nitrogen losses through erosion by Leonotis nepetaefolia and Sida acuta in simulated rain intensities [J]. Ecological Engineering, 8: 233—239

Lu R K. 1999. Agro-chemical Analytical Methods for Soils [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press (in Chinese)

Ma L S, Wang Z Q, Zhang S M, *et al*. 1997. Pollution from agricultural non-point sources and its control in river system of Taihu Lake, Jiangsu [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 17(1): 39—47 (in Chinese)

Novotny V. 1999. Diffuse pollution from agriculture-a worldwide outlook[J]. Water Science and Technology, 39(3): 1—13

O'Hara S L, Street F A, Burt T P. 1993. Accelerated soil erosion around a Mexican highland lake caused by prehispanic agriculture [J]. Nature, 362, 48—51

Pierzynski G M, Sim J T, Vance G F. 1994. Soil and Environmental Quality [M]. Lewis Publisher: CRC Press, Inc

Ryden J C, Syers J K, Harris R F. 1973. Phosphorus in runoff and streams [J]. Advance in Agronomy, 25: 1—45

Shan B Q, Yin C Q, Bai Y, *et al*. 2000. Study on phosphorus load from a watershed with rainfall simulation method [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 20(1): 33—37 (in Chinese)

Sharpley A N, Withers P J A. 1994. The environmentally-sound management of agricultural phosphorus [J]. Fertilizer Research, 39: 133—146

Summers R N, Guise N R, Smirk D D. 1993. Bauxite residue increases phosphorus retention in sandy soil catchments in Western Australia [J]. Fertilizer Research, 34: 85—94

Wang X Y. 2003. Nonpoint Source Pollution and Its Management [M]. Beijing: The Oceanic Press (in Chinese)

Xu Q, Yang L Z, Dong Y H. 1998. Rice field Ecosystem in China [M]. Beijing: China Agriculture Press (in Chinese)

Yan W J, Yin C Q, Sun P, *et al*. 1999. Phosphorus and nitrogen transfers and runoff losses from rice field wetlands of Chaohu Lake [J]. Chinese Journal Applied Ecology, 10(3): 312—316 (in Chinese)

Zöbisch M A, Richter C, Heiligtag B, *et al*. 1999. Nutrient losses from cropland in the Central Highlands of Kenya due to surface runoff and soil erosion [J]. Soil & Tillage Research, 33: 109—116

中文参考文献:

陈　皓,章　申. 1991. 黄土地区氮磷流失的模拟研究[J]. 地理科学,11(2):142—148

高　超,张桃林. 2000. 太湖地区农田土壤磷素动态及流失风险分析[J]. 农村生态环境,16(4):24—27

黄满湘,章　申,张国梁,等. 2003. 北京地区农田氮素养分随地表径流流失机理[J]. 地理学报,58(1):147—154

康玲玲,朱小勇,王云璋,等. 1999. 不同雨强条件下黄土性土壤养分流失规律研究[J]. 土壤学报,36(4):536—543

鲁如坤. 1999. 土壤农业化学分析方法[M],北京:中国农业科技出版社

马立珊,汪祖强,张水铭,等. 1997. 苏南太湖水系农业面源污染及其控制对策研究[J]. 环境科学学报,17(1):39—47

单保庆,尹澄清,白　颖,等. 2000. 小流域磷污染物非点源输出的人工降雨模拟研究[J]. 环境科学学报,20(1):33—37

王晓燕. 2003. 非点源污染及其管理[M]. 北京:海洋出版社

徐　琪,杨林章,董元华. 1998. 中国稻田生态系统[M]. 北京:中国农业出版社

晏维金,尹澄清,孙　濮,等. 1999. 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,10(3):312—316

《环境科学学报》对论文各部分内容的要求

1. **论文题名**:论文题名要简练并明确反映论文内容,一般在 20～25 字以内;题名所用每一词语必须考虑到有助于选定关键词;应避免使用不常见的缩略词、首字母缩写字、字符、代号和公式等.

2. **论文摘要**:摘要应是对论文内容不加注释和评论的简短陈述,应以第 3 人称写,避免使用"本文研究了……","作者研究了……"等字样;摘要应以过去时态阐明研究工作的目的、实验方法或研究方法、结果和最终结论,其重点是结果和结论;摘要应具有独立性和自含性,即不阅读全文也能够获得必要的信息;摘要应是一篇完整的短文,包含与论文同等数量的主要信息,供读者确定有无必要阅读全文,亦供文摘等二次文献采用;摘要应做到文字精炼、准确,避免自我评价,篇幅一般控制在 300 字以内,最长不超过 500 字;除实在无法变通外,摘要中不宜出现图、表、化学结构式以及非公知公用的符号和术语;英文摘要应与中文对应,无语言表达错误,符合英文语言习惯;为便于国际交流,英文摘要可适当详细、篇幅适当加长.

3. **关键词**:中英文关键词一般 3～8 个;应尽量使用主题词;应避免将词组作为关键词.

4. **引言**:可单列标题,亦可不单列标题,无字数限制. 引言应简要说明研究工作的目的、范围、相关领域的前人工作和知识空白、理论基础和分析,以及本研究的设想、研究方法和实验设计、预期结果和理论/工程意义等. 引言不要与摘要雷同,不要写成对摘要的注释. 引言中应着重论述本研究的创新点,一般教科书中已有的知识,在引言中不必赘述. 行文要有根有据,要提供必要的引文出处,以便于评审专家审核.

5. **正文**:正文部分应明确阐述所采用的研究方法与技术路线,明确交待所用实验方法与实验材料、实验仪器和实验条件. 对于以收集和处理已有数据资料为主的论文,则应详尽报告数据资料来源及其统计处理方法、关键参数的修正及取值、计算时所用的软件等. 应准确、完整地表述所得结果,以便于同行参考(如涉及技术秘密不宜交待,则不应投稿). 所报告的结果必须是本次实验得到的,或经过本次数据资料的收集、统计处理后获得的,不能报告文献上已发表或内部资料上已有的数据. 结果部分原则上应单独设一节,不宜笼统放入"结果与讨论"中. 如作者认为有必要,可在报告完结果之后再设"结果分析"、"讨论"、"分析与讨论"等,但所有的分析与讨论必须围绕本次实验结果进行,不能围绕文献上的结果进行讨论,不能写成对相关文献观点的总结. 在解释或讨论实验结果/数据处理结果时,如有必要引用文献上的数据或学术观点,应给出引文. 应正确处理文字与图、表的关系,文中应避免文字叙述与图、表内容的重复,各节应先见文字后见图表,避免节标题后紧跟图或表.

6. **结论**:结论是本文作者通过实验或资料分析得出的最终、总体的结论,必须明确、完整、精炼且具有条理性(最好分条叙述). 不能将结论写成论文内容简介. 本刊要求研究论文所报道的必须是作者(或作者群体)在本次研究中所获得的原创性研究成果,不能作出没有本次实验数据支持的结论,不能引述文献上的结论. 如果导不出明确、有说服力的结论,也可以不给出结论而进行必要的讨论.

7. **致谢**:可在致谢部分对项目资助机构、为作者完成项目或完成本文提供过帮助地机构或个人提出感谢.

8. **参考文献表**:引用他人观点、数据、图表及引用他人实验方法、公式时必须注明出处(参考文献或注解). 尚未公开发表的数据资料不能作为参考文献引用,只能以页下注解的形式列出出处. 因论证需要,作者已发表的内容需纳入本文的,亦应已引文方式予以标注. 引文标注及文后参考文献表的著录格式应符合 GB 7714 - 87(《文后参考文献著录规则》)的规定. 自 25 卷 8 期起,本刊引文标注和参考表著录格式采用"著者 - 出版年"制. 在引用文献后应立即在括号内标注著者、出版年份,不排引文序号. 具体要求见另文. 为便于国际交流,本刊要求作者分别著录中文参考文献表和英文参考文献表. 其中,中文参考文献表仅著录原始文种为中文的文献;英文参考文献表除著录原始文种为英文的文献外,还应将原始文种为中文的文献条目译成英文(对于期刊或文集,其英译以原文献的英文摘要为准).