

张洪, 单保庆, 尹澄清. 2008 六叉河小流域不同景观结构中径流磷形态差异分析[J]. 环境科学学报, 28(3): 550-557

Zhang H, Shan B, Q Y, in C, Q. 2008 Phosphorus speciation in the runoff from different land uses in the Liuchahe watershed by Chaohu Lake[J]. Acta Scientiae Circumstantiae 28(3): 550-557

六叉河小流域不同景观结构中径流磷形态差异分析

张洪, 单保庆*, 尹澄清

中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085

收稿日期: 2007-01-05 录用日期: 2007-11-14

摘要: 选取巢湖六叉河小流域, 研究了流域内不同类型景观降雨产流过程中径流磷素的形态差异. 结果表明, 旱地径流中总磷、溶解性总磷、颗粒态总磷、总活性磷、颗粒态活性磷的浓度最高, 水稻田次之, 河道中最低. 颗粒态磷是旱地和水稻田磷素输出的主要形态, 颗粒态活性磷占总活性磷的 80% 以上; 而河道径流中各种磷形态浓度值均较低, 总磷浓度均值在 0.4 mg L^{-1} 以下, 磷素输出以溶解态磷为主. 磷素由旱地经过水稻田向河道传输过程中, 颗粒物浓度显著下降, 河流中颗粒态磷浓度降低至 50% 左右, 活性组分浓度显著降低. 由水塘、沟渠等组成的多水塘系统不仅降低了磷素输出的总量, 而且对活性磷有较强的削减作用, 在非点源流域控制及水源地水质保护方面有重要意义.

关键词: 非点源污染; 径流; 磷形态; 巢湖

文章编号: 0253-2468(2008)03-550-08 中图分类号: X52 文献标识码: A

Phosphorus speciation in the runoff from different land uses in the Liuchahe watershed by Chaohu Lake

ZHANG Hong, SHAN Baoqing, YIN Chengqing

State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

Received 5 January 2007; accepted 14 November 2007

Abstract: Runoff from the Liuchahe watershed, a typical agricultural watershed characteristic by many multipond systems in Southeast China, was evaluated for phosphorus speciation by land use. The runoff from farmland, paddy rice fields and the Liuchahe River was selected for study. Total phosphorus (TP), total dissolved phosphorus (TDP), total particulate phosphorus (TPP), total reactive phosphorus (TRP), particulate reactive phosphorus (PRP) and dissolved reactive phosphorus (DRP) were monitored in the runoff. TP was the highest in the runoff from farmland while it was the lowest in the river, as was other forms of phosphorus except DRP. Particulate phosphorus was the main form of phosphorus in the farmland runoff with TPP/TP ratios from 80% to 90%. During the transportation from farmland to paddy rice field and riverway, both the concentration and forms of phosphorus were changed and particulate phosphorus decreased significantly. As a sink structure of the watershed, the river had better water quality with TP under 0.4 mg L^{-1} and the main component was dissolved phosphorus. The results suggest that the multipond system in the Liuchahe watershed decreases not only total phosphorus but also the reactive component, which is important in controlling nonpoint source pollution and protecting the water quality of Chaohu Lake.

Keywords: nonpoint source pollution; runoff; phosphorus species; Chaohu Lake

1 引言 (Introduction)

近十余年来, 中国湖泊水体的富营养化进程十分迅速. 对我国 50 多个湖泊水库的营养状态调查和评价结果表明, 处于富营养化水平以上的湖泊占 66%, 重富营养化和极富营养化的湖泊占 22% (金

相灿, 2003). 我国东部大型湖泊营养状态不断上升, “三河 (辽河、海河与淮河) 三湖 (滇池、巢湖和太湖)” 流域水污染形势更是严峻.

磷元素是影响湖泊水体富营养化的关键因子之一 (Sharpley et al., 1995; Beckmann et al., 2005). 从来源上看, 超过 50% 的淡水接纳水体中的磷负荷

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (No. 2006CB403306); 天津市科技创新专项资金项目 (No. 06FZZDSH0900)

Supported by the National Basic Research Program of China (No. 2006CB403306) and Special Foundation for Science and Technology Innovation of Tianjin (No. 06FZZDSH0900)

作者简介: 张洪 (1980-), 男, 博士研究生; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: bshar@cees.ac.cn

Biography: ZHANG Hong (1980-), male, Ph.D. candidate; * Corresponding author, E-mail: bshar@cees.ac.cn

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

来自农业流域的非点源污染输出 (Oenema et al., 1998). 流域内磷的产生和迁移过程十分复杂, 它受降雨过程 (降雨类型、雨强和持续时间) 和下垫面因素 (地形、地貌、土壤的物理化学性质、植被特征以及农业实践措施等) 的综合影响. 同时, 磷形态的差异可导致磷的生物可利用性不同 (Shapley et al., 1999), 诊断磷在流域内的来源、迁移转化规律及其归趋行为动态成为非点源污染过程认识与控制的焦点 (Brazier et al., 2005). 近年来, 已有不少学者对农业流域非点源污染进行了降雨产流模拟和原位监测的研究 (单保庆等, 2000; McGeehan et al., 2005). 对于不同土地利用类型负荷输出差异表征也有研究. 但是在径流迁移过程中, 磷形态是否存在空间异质效应, 以及径流与流域河流水质的关系等鲜见报道, 因此, 本研究中选择巢湖北岸中庙镇附近的六叉河小流域, 对降雨产流过程磷输出形态进行降雨原位监控实验, 研究流域不同景观结构径流中磷形态差异, 探讨流域景观结构对径流中磷素含量及其形态的调控作用.

2 实验部分 (Experimental)

2.1 研究区域特征

六叉河流域位于安徽省巢湖北岸中庙附近 (图 1), 流域面积 6.9 km^2 , 流域地貌以低山丘陵为主, 地形呈阶梯状由北向南逐渐降低. 流域年均太阳辐射总量 $4999 \times 10^6 \text{ J m}^{-2}$, 多年平均降水量 940 mm , 蒸发量 1483 mm , 平均气温 $16.1 \text{ }^\circ\text{C}$. 流域内无工业生产, 是我国东部亚热带典型农业高产区. 流域内最为突出的景观特征是大量的水塘与纵横交错的沟渠形成网状的多水塘系统 (The MultiPond Systems).

作为一类特殊的人工湿地, 多水塘系统能有效截流流域农田非点源污染物, 在磷的生物地球化学循环中有着重要作用 (Yip 2001; Shan et al., 2002). 流域土地利用类型主要以旱地和水稻田为主, 悠久的农业耕作历史使得流域各系统内结构单调均一、季相规律明显.

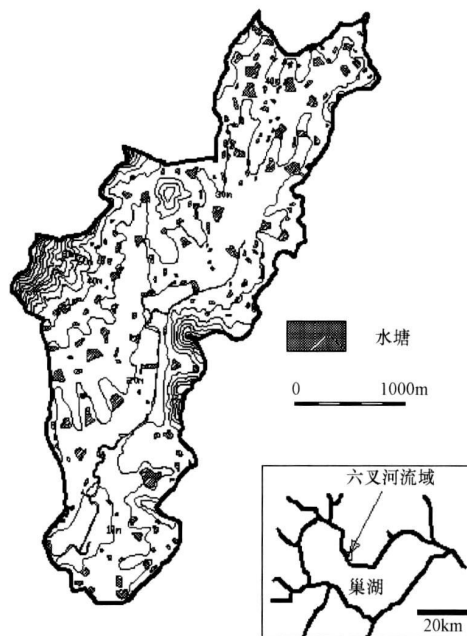


图 1 六叉河流域多水塘系统

Fig 1 The MultiPond System of Liuchahe watershed

2.2 土壤理化特征

由于下垫面性质影响着降雨产流过程, 故实验前期先采集流域不同景观结构表层 (5 cm 深度) 土 (泥) 样, 分析其物理化学性质 (表 1). 分析方法见文献 (鲍士旦, 2000).

表 1 流域不同景观结构土壤的理化特征
Table 1 The soil properties of three sample plots

土地类型	土壤类型	pH	有机质 /(g kg^{-1})	总磷 /(mg kg^{-1})	速效磷 /(mg kg^{-1})	土壤容重 /(g cm^{-3})	总孔隙度	土壤含水量
旱地	黄褐土	6.00	17.310	355.318	12.139	1.35	49.06%	30.46%
水稻田	水稻土	5.70	33.144	434.891	9.707	1.10	58.36%	42.16%
河道	底泥	6.82	45.093	410.538	6.755	1.08	55.72%	46.81%

2.3 降雨产流原位监测

在六叉河流域, 雨季时旱地与水稻田的磷素输出是流域污染物的重要来源, 因此流域调查与降雨径流监测于 2005 年 6~9 月雨季进行. 选取 3 种不同的景观结构进行动态监测, 分别为旱地 (面积约 200 m^2 , 坡度 5° , 无径流输入, 种植作物为芝麻)、水

稻田 (面积约 200 m^2 , 有旱地径流输入, 埂高 10 cm)、河道 (六叉河长约 3 km , 直接流入巢湖, 下游岸边带植被良好, 流域旱地和水稻田径流经过多水塘或沟渠入河).

六叉河流域是江淮地区典型的农业小流域, 流域内水塘星罗棋布 (图 1). 多水塘构成的汇景观结

构可以调节雨水的时空分布,在农业灌溉方面有着重要作用(Yin et al., 1993).由于水塘有较大蓄水能力,流域内的降雨地表径流形成了连续流和间断流2种类型(Yin et al., 2006).连续流通常只有在暴雨情况下产生(一般降雨量大于60mm),旱地产生的径流可以经水稻田、水塘和沟渠流入河道,最后进入巢湖.如果雨量较小,旱地径流就会被稻田、水塘等截留,没有或只有少量进入河道.2005年6月~9月监控的降雨径流事件中,共监测到连续流1场,间断流2场.本研究选取2005年7月11日的连续流(暴雨,降雨量96.5mm,降雨历时150min,旱地、水稻田均产生径流)和2005年8月4日的间断流(中雨,降雨量36.9mm,降雨历时75min,只有旱地产流,水稻田未产流)为代表进行分析,研究六叉河流域不同景观结构径流特征及径流中磷形态变化规律.

2.4 分析方法

降雨径流采样时间根据径流过程来确定.对于旱地和水稻田,降雨产流后以5min为间隔采集径流样,产流30min后改为每10min采集1次,产流60min后每30min采集1次,直至产流结束.根据旱地与水稻田的采样设置,同步采集河流水样.径流样品采集后置于冰箱低温(4℃)保存.试验完毕后立刻在野外实验室(离采样地点约1km)对径流样品中的磷形态进行分析,次降雨事件径流样品的分析工作在24h之内完成.磷形态包括总磷、溶解性总磷、颗粒态总磷、总活性磷、颗粒态活性磷和溶解性磷酸盐,磷形态分类和分析方法见文献(Worsfold et al., 2005; 国家环境保护总局, 2002).

3 结果 (Results)

3.1 总磷随径流过程输出浓度变化分析

流域产汇流过程直接影响着磷的产生与输出过程.产流过程与降雨过程关系密切,受到多种因素的制约.本次研究中7月11日的暴雨事件(降雨量96.5mm),由于雨强较大,旱地和水稻田在降雨后20min开始产流;8月4日的中雨事件(降雨量36.9mm),降雨后1h旱地才出现径流,水稻田因围隔效应未产流.

旱地和水稻田是流域污染物产生的“源”,在这2种景观结构产生的径流中,总磷浓度在产流初期较高,然后逐渐降低,直至变化平缓,总磷浓度变化总体趋势相似.旱地径流中,刚产流时总磷浓度较高,浓度值为 1.8 mg L^{-1} ,总磷输出没有明显的积累过程,如图2所示.旱地与水稻田径流中磷污染物初期效应明显,在产流40min后旱地径流中总磷浓度较之始流时下降65%,而水稻田径流中总磷浓度在产流后20min内下降70%.与旱地径流不同的是,水稻田产流后10~20min时间段内,总磷浓度出现突降点,从 1.1 mg L^{-1} 降至 0.4 mg L^{-1} ,然后又升至 1.0 mg L^{-1} ,并随降雨时间逐渐降低.河流景观结构作为污染物的“汇”,在次降雨水文过程中,总磷浓度均值在 0.4 mg L^{-1} 以下(图2).暴雨事件与中雨事件导致旱地与河道径流中总磷含量差异明显,2次降雨事件中旱地径流均值差异达到 0.84 mg L^{-1} .磷素在从源到汇的传输过程中,总磷浓度明显下降,旱地径流中总磷浓度最高,水稻田次之,

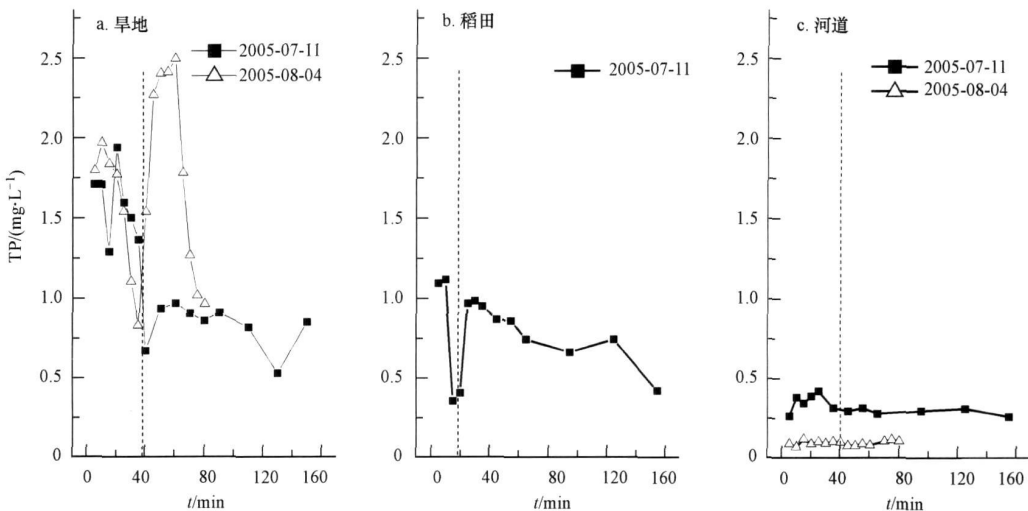


图2 旱地、水稻田和河道径流中总磷含量变化动态

Fig. 2. TP in the runoff from different landscape structures of Lujiahe watershed.

河道最低,这与总磷在多水塘系统传输过程中被削减有关。

3.2 溶解态磷和颗粒态磷随径流过程输出变化分析

径流中溶解性总磷浓度变化情况见图3。旱地径流初期溶解态总磷浓度较高,并随产流过程逐渐降低,但其变化幅度较总磷小。暴雨事件中,溶解性总磷在不同景观结构径流中浓度变化较小,其中旱

地径流溶解性总磷浓度约 0.2 mg L^{-1} ,略高于水稻田与河道 (0.1 mg L^{-1})。而中雨事件虽然降雨量较小,但由于污染物在产流初期土壤的入渗作用明显,且在产流 40 min 内雨强增大,导致旱地溶解性总磷浓度较高,达到了 $0.3 \text{ mg L}^{-1} \sim 0.7 \text{ mg L}^{-1}$,并随降雨产流过程波动较大。而河道径流中溶解性总磷浓度随产流过程变化不明显,维持在 0.1 mg L^{-1} 以下。

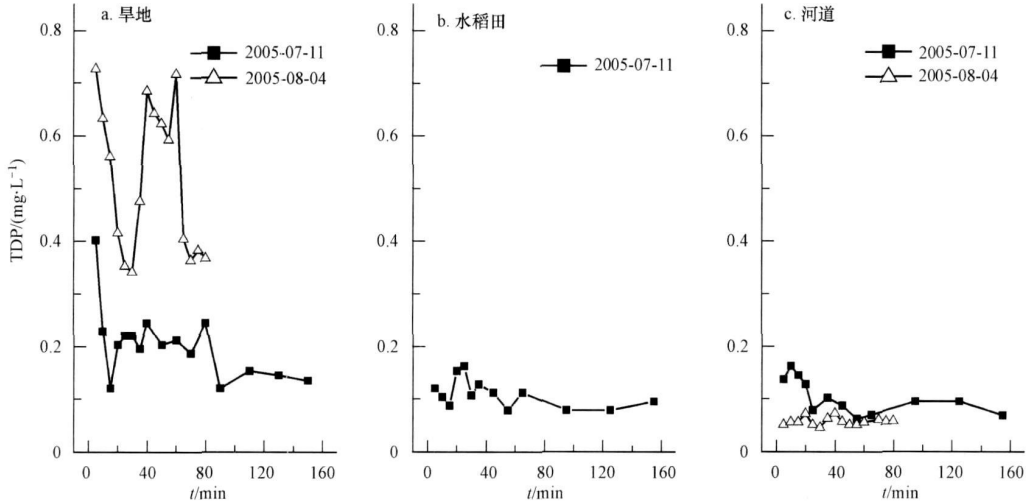


图3 旱地、水稻田和河道径流中溶解性总磷含量变化动态

Fig. 3 TDP in the runoff from different landscape structures of Luchuhe watershed

径流中颗粒态磷浓度变化与总磷的变化趋势相似。对于暴雨事件,在旱地径流中颗粒态磷浓度在产流初期接近 1.5 mg L^{-1} ;产流初期水稻田径流颗粒态总磷浓度小于 1.0 mg L^{-1} ,在产流 20 min 后颗粒态总磷浓度迅速降低,然后又急剧升高再逐步

降低的变化过程,这与水稻田总磷变化趋势一致;河道径流中颗粒态总磷浓度在 0.2 mg L^{-1} 左右,其浓度在产流初期略有上升,随产流过程变化逐渐平缓。而中雨事件中,河道径流颗粒态磷含量较暴雨事件明显降低,如图4所示。

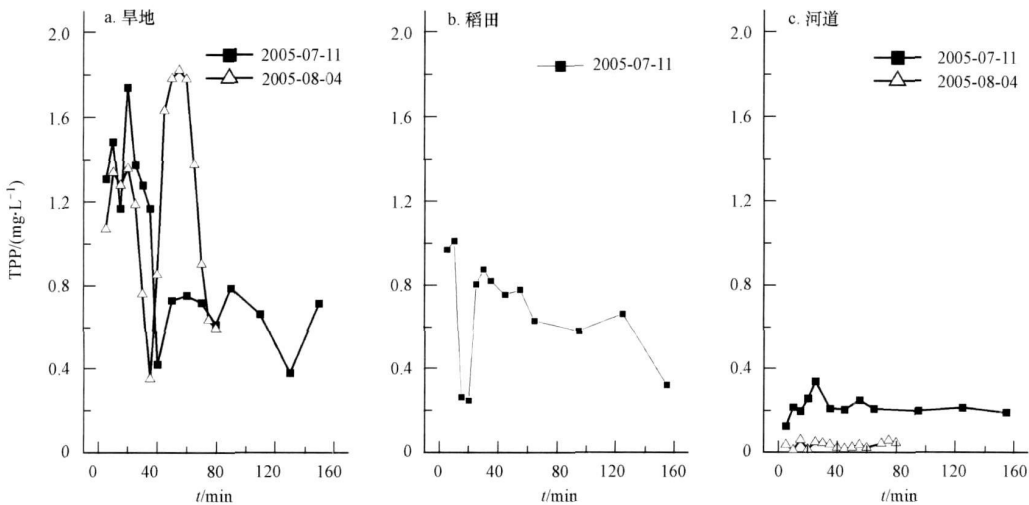


图4 旱地、水稻田和河道径流中颗粒态总磷含量变化动态

Fig. 4 TPP in the runoff from different landscape structures of Luchuhe watershed

分析颗粒态总磷和溶解态总磷与总磷的比例关系后(图5)发现,颗粒态磷是磷素输出的主要形态,其输出过程与降雨产流变化过程同步.在径流初期,旱地和水稻田径流中尽管颗粒态磷浓度差异较大,但占各自总磷的比例基本相同,介于80%~90%之间.但是,从整个降雨事件过程来看,旱地径流中颗粒态

总磷在总磷中的比例呈下降趋势;而水稻田径流中,颗粒态总磷在总磷中的比例于产流初始阶段较高,然后迅速下降,在产流20min后降至最低,后又逐渐上升,其比值关系变化与总磷的变化趋势一致(图2).相对于旱地和水稻田而言,河道径流中颗粒态磷浓度较低,约占总磷浓度的65%左右.

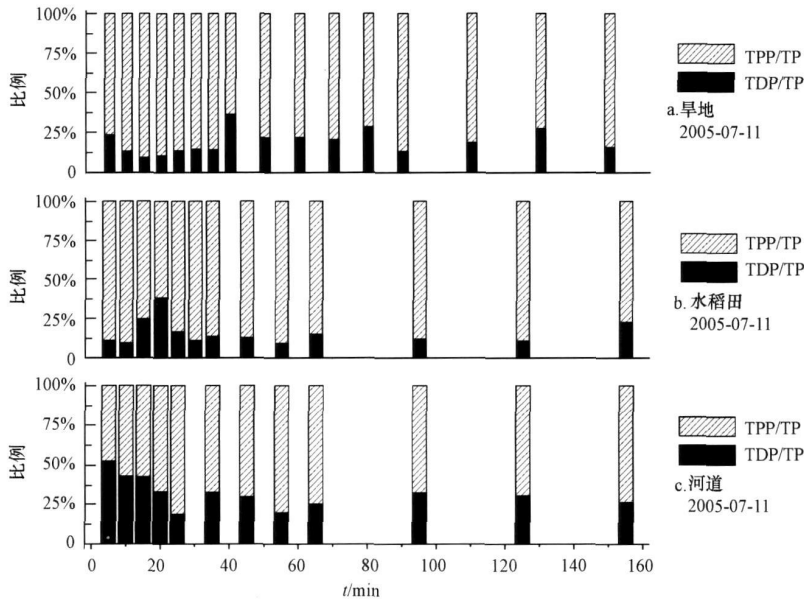


图5 颗粒态和溶解性总磷在径流中的比例变化

Fig. 5 TPP/TP and TDP/TP ratios in the runoff from different landscape structures

3.3 活性磷随径流过程输出变化分析

溶解性活性磷(DRP)在流域不同景观结构径流中的变化情况如图6所示.在旱地径流初期,DRP浓度较高(约为0.25 mg L⁻¹),并随着产流过程逐

渐降低.旱地径流中DRP最高,而水稻田和河道中DRP浓度较低,且在整个降雨事件过程中变化趋势不明显,其浓度维持在0.1 mg L⁻¹以下.

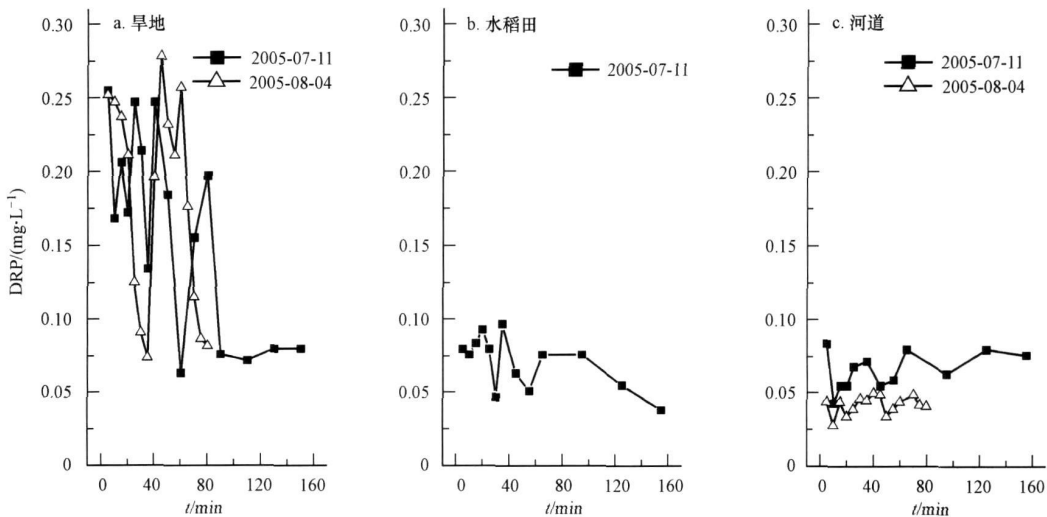


图6 旱地、水稻田和河道径流中溶解性磷酸盐含量变化动态

Fig. 6 DRP in the runoff from different landscape structures of Liuchabe watershed

总活性磷在旱地径流中的浓度最高, 在产流初期高达 2.0 mg L^{-1} , 后随着产流过程降至 0.4 mg L^{-1} 左右, 如图 7 所示. 水稻田径流中总活性磷浓度较早地有较大降低, 产流初期为 0.8 mg L^{-1} ,

在 20 min 后降至 0.1 mg L^{-1} , 然后剧增至 0.7 mg L^{-1} 并随产流过程逐渐降低至 0.2 mg L^{-1} 左右. 河道径流中的总活性磷浓度较低 (0.2 mg L^{-1} 以下), 且在降雨过程中浓度基本无变化.

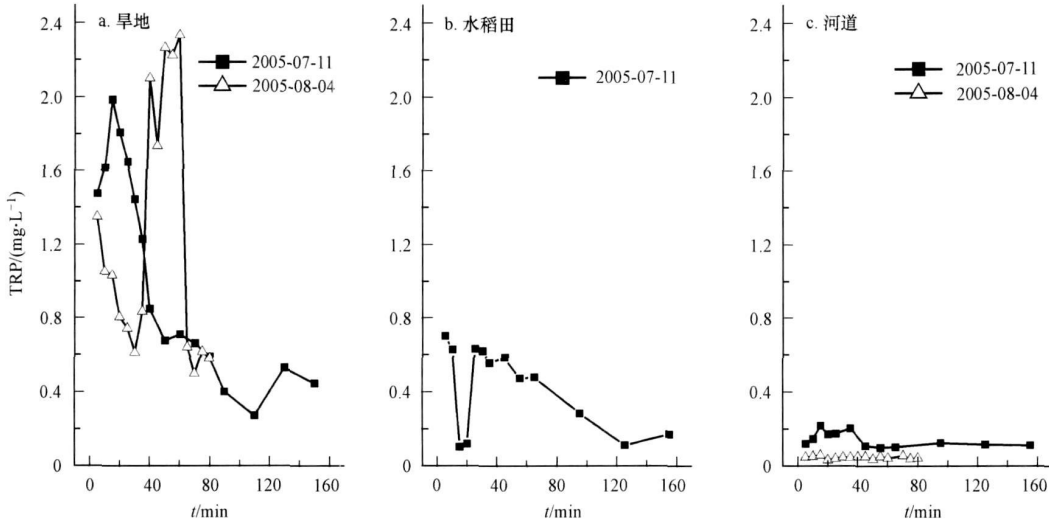


图 7 旱地、水稻田和河道径流中总活性磷含量变化动态

Fig 7 TRP in the runoff from different landscape structures of Liuchahé watershed

对比旱地、水稻田和河道径流中 2 种活性磷形态在总活性磷中的比例变化动态 (图 8) 发现, 旱地与水稻田颗粒态活性磷在径流磷输出中占较大比例, 而河道颗粒态活性磷比例较早地和水稻田低. 在旱地中, 颗粒态活性磷约为总活性磷的 80%, 初期随产流过程略有增加, 然后逐渐下降至初始阶段

水平. 水稻田产流 20 min 后, 由于颗粒态活性磷的减少, 导致径流中溶解态活性磷比例明显上升. 在“汇”结构河道中, 虽然颗粒态活性磷比例仍居于 $30\% \sim 70\%$, 但总活性磷较低, 流域磷输出总量与磷的生物可利用性显著下降. 在旱地、水稻田与河道 3 种景观结构中, 颗粒态活性磷和溶解态活性磷在总

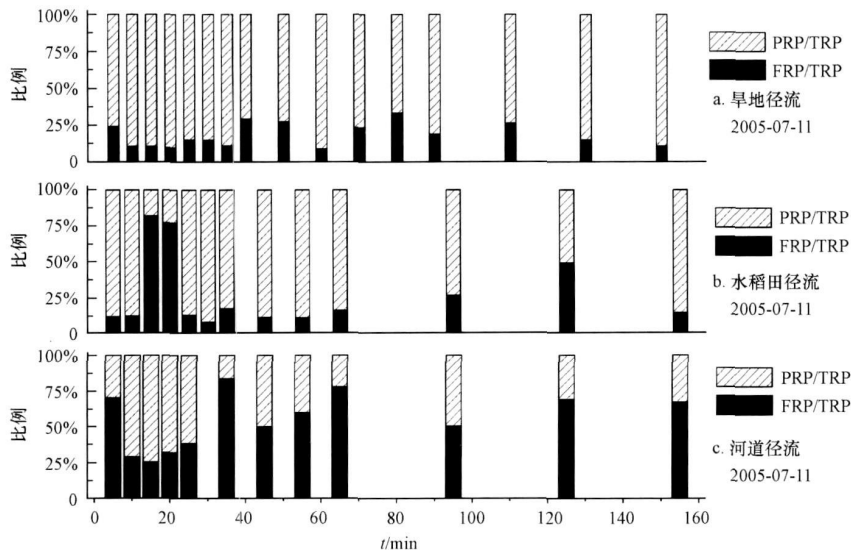


图 8 颗粒态和溶解态活磷在径流中的比例变化

Fig 8 PRP/TRP and DRP/TRP ratio in the runoff from different landscape structures

活性磷中的比例及降雨—产流过程变化趋势均存在明显差异,说明流域多水塘景观结构对于颗粒物有较好的截留作用,不仅降低了磷素输出总量,而且使得其中活性成分大大降低.这对于削减与控制流域面源污染,控制末端水体富营养化意义明显.

4 讨论 (Discussion)

4.1 降雨过程对磷溶出的影响

在六叉河流域,2种降雨径流类型磷的输出差异较大.流域内不同景观结构径流中磷输出过程与产流过程密切相关.在监测的中雨降雨事件中(间断流)降雨初期的雨强有利于污染物入渗,因而在旱地径流后期的磷素输出反而较高.河流景观结构作为污染物的“汇”,连续流情况下磷浓度高于间断流磷素输出.降雨产流过程不仅影响磷输出总量,还影响其中磷组分的含量.颗粒态磷在旱地与水稻田径流中占较大比例,在传输过程中,径流中颗粒态活性磷随颗粒态磷的减少而下降.

水稻田作为一种特殊的“湿地”类型,由于作物生长需要,水稻田土壤经常存在干湿交替过程,其表层易形成结皮现象.稻田施肥使得养分主要集中在水稻田土壤表层,因而结皮中磷含量较高.降雨初期,雨滴的溅蚀作用会破坏表层结皮,使其并以颗粒态的形式输出.结皮被破坏后,由于稻田土壤相对较结实,雨滴对其破坏需要一个过程,故不论是颗粒态总磷还是总磷都降至低点,随着土壤被雨水侵蚀,其磷素输出过程就与旱地磷输出特征相似.

4.2 水塘沟渠的作用

流域景观结构对颗粒态磷有明显的调控作用.旱地径流浓度最高,总磷浓度最高可达 2.6 mg L^{-1} ,河流景观结构作为污染物的“汇”,磷浓度降至 0.5 mg L^{-1} 以下;其中,颗粒态磷浓度下降最为明显,活性磷浓度也大大降低.这是由于水塘、沟渠等组成的多水塘“汇”景观结构,对养分物质有较强的持留作用(付强等,2005).水塘底泥较高的 Fe-A 含量,还为底泥沉积物提供了较强的磷吸附效率.在六叉河流域,水塘沉积水土流失颗粒超过总沉积量的 70%.相似的研究在华北地区也发现(王夏晖等,2005),流域景观结构中生物吸收、颗粒物沉积、入渗、反硝化等都可以有效地降低磷素含量.本试验中旱地径流磷素输出浓度最高,且以颗粒态磷为主.径流进入水稻田后,颗粒发生重力沉降,因而水稻田径流中无论是总磷还是颗粒态磷的浓度

都明显降低.而水稻田径流再经过水塘、沟渠的沉降,颗粒物进一步减少,这不仅降低了总磷浓度,也使得活性磷浓度进一步降低.水塘底泥的吸附和生物自净作用也使得总磷浓度明显降低.径流在流域景观结构的传输过程中,磷负荷得到了大量、高效的削减,磷的形态也发生了较大转化,尤其是活性磷的含量得到了较好的控制.因此,流域水陆交错界面的调控作用对非点源污染在流域中的削减控制及水源水质保护方面有至关重要的作用.

5 结论 (Conclusions)

1) 六叉河流域不同景观结构中径流输出总磷浓度差异明显,旱地总磷输出量最高,水稻田次之,河道最低.旱地径流中,总磷浓度在径流初期较高,浓度值为 1.8 mg L^{-1} ,总磷输出没有明显的积累过程.旱地与水稻田径流中磷污染物初期效应明显,在产流 40 min 内旱地径流中总磷浓度下降 65%以上.河流景观结构作为污染物的“汇”,没有观测到总磷浓度变化,次降雨水文过程总磷浓度均值在 0.4 mg L^{-1} 以下.

2) 磷素在从源到汇的传输过程中,径流总磷浓度发生了较大变化,旱地径流中磷含量最高,河道中最低.不仅如此,磷形态也发生了转化.旱地径流中颗粒态磷浓度占总磷的 90%.水稻田径流中颗粒态磷占总磷的比例稍有下降,其比值关系变化与总磷的变化趋势一致.河道径流中,颗粒态磷浓度降低至 50%左右.

3) 颗粒态磷是旱地和水稻田磷素输出的主要形态.在旱地和水稻田径流中颗粒态活性磷均占 80%以上.河道径流中颗粒物含量较少,磷素输出以溶解态为主.溶解态活性磷浓度在不同景观结构径流中的变化不明显.

4) 由水塘、沟渠等组成的多水塘“汇”景观结构的重力沉降和吸附作用不仅降低了磷素输出的总量,更对活性磷有较强的削减作用,对非点源污染在流域中的削减控制及水源水质保护方面有至关重要的作用.

责任作者简介:单保庆,博士,研究员.主要从事流域水污染过程、流域水环境质量演变与湿地过程、湿地生态工程技术等方面研究.已发表论文 30 余篇,编著专著 2 部.

References

Bao S D 2000. Chemical analysis for agricultural soil[M]. Beijing

- China Agriculture Press 34—35 71—86 (in Chinese)
- Bechmann M E, Bege D, Egested H Q et al. 2005. Phosphorus transfer from agricultural areas and its impact on the eutrophication of lakes: two long term integrated studies from Norway [J]. *Journal of Hydrology* 304: 238—250
- Brazier R E, Heathwaite A L, Liu S. 2005. Scaling issues relating to phosphorus transfer from land to water in agricultural catchments [J]. *Journal of Hydrology* 304: 330—342
- Fu Q, Yin C Q, Ma Y. 2005. Phosphorus sorption capacities of the pond sediments in a headstream agricultural watershed [J]. *Environmental Science* 26(4): 70—76 (in Chinese)
- Jin X C. 2003. The mechanism and control measures of eutrophication in China [Q]. *Zhejiang Xiangshan Scientific Conference* 2—10 (in Chinese)
- McGeachan M B, Lewis D R, Hoxda P S. 2005. Modeling through-soil transport of phosphorus to surface waters from livestock agriculture at the field and catchment scale [J]. *Science of the Total Environment* 344: 185—199
- Oenema O, Roest C W J. 1998. Nitrogen and Phosphorus losses from agriculture into surface waters: the effects on policies and measures in the Netherlands [J]. *Water Science Technology* 37(3): 19—30
- 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)
- Shan B, Yin C, Li G. 2002. Transport and retention of phosphorus pollutants in the landscape with a traditional multipond system [J]. *Water, Air and Soil Pollution* 139: 15—34
- Sharpley A N, Robinson J S, Smith S J. 1995. Bioavailable phosphorus dynamics in agricultural soils and effects on water quality [J]. *Geoderma* 67: 1—15
- Sharpley A N, Gburek W J, Fojnar G et al. 1999. Sources of phosphorus exported from an agricultural watershed in Pennsylvania [J]. *Agricultural Water Management* 41: 77—89
- State Environmental Protection Administration of China. 2002. The methods for water and wastewater monitoring and analysis (4th ed) [M]. Beijing: China Environmental Science Press (in Chinese)
- Wang X H, Yin C Q, Shan B Q. 2005. Control of runoff and retention of diffuse pollutants by sink landscape structures of agricultural watershed [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* 25(3): 293—299 (in Chinese)
- Worsfold P J, Gimbert L J, Manikasingh U et al. 2005. Sampling, sample treatment and quality assurance issues for the determination of phosphorus species in natural waters and soils [J]. *Talanta* 66: 273—293
- Yin C Q, Shan B Q, Mao Z P. 2006. Sustainable water management by using wetlands in catchments with intensive land use [A] // Verhoeven J T A, Belman B, Bobbink R et al. *Wetlands and natural resource management* [Q]. Heidelberg: Springer 53—59
- Yin C Q, Shan B Q. 2001. Multipond systems: a sustainable way to control diffuse phosphorus pollution [J]. *AMBIO* 30(6): 369—375
- Yin C Q, Zhao M, Jin W G et al. 1993. A multipond system as a protective zone for the management of lakes in China [J]. *Hydrobiologia* 251: 321—329

中文参考文献

- 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 34—35 71—86
- 付强, 尹澄清, 马允. 2005. 源头农业区不同类型水塘中水体沉积物磷吸附容量 [J]. *环境科学*, 26(4): 70—76
- 国家环境保护总局编. 2002. 水和废水监测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社
- 金相灿. 2003. 我国湖泊富营养化发生机理与控制技术 [C]. 浙江: 香山科技会议 2—10
- 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
- 王夏晖, 尹澄清, 单保庆. 2005. 农业流域“汇”景观结构对径流调控及磷污染物截留作用的研究 [J]. *环境科学学报*, 25(3): 293—299