Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖，于兴娜，张毓秀，丁铖，侯思宇

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社

2022年7月

第43卷 第7期

Vol.43 No.7

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第43卷 第7期
2022年7月15日

目 次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析 …… 刘春景，吕建燚，赵汶畅，徐卿，金玉佳(3375)
基于LEAP模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟 …… 庞可，张芊，马彩云，祝禄祺，陈恒蕤，孔祥如，潘峰，杨宏(3386)
基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨 …… 王晓彦，朱莉莉，许荣，高愈霄，朱媛媛，汪巍，刘冰(3396)
厦门港大气$PM_{2.5}$中重金属污染特征及健康风险评价 …… 肖思晗，蔡美君，李香，黄厓，王坚，朱清墩，吴水平(3404)
南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征 …… 张佳颖，于兴娜，张毓秀，丁铖，侯思宇(3416)
晋中盆地主要城市冬季$PM_{2.5}$传输特征分析 …… 王小兰，王雁，闫世明，岳江，郭伟，郝振荣(3423)
鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析 …… 孔祥晨，张连霞，张彩云，王红磊，许晶，郑佳锋(3439)
济源冬季VOCs污染特征、来源和SOAP …… 王芳，李利霞，王红果，赵宗生，张建平，张栋(3451)
长株潭城区8月VOCs污染特征及来源分析 …… 罗达通，张青梅，刘湛，尤翔宇，黄杰，宋云飞，张敬巧(3463)
2019年7月石家庄市O_3生成敏感性及控制策略解析 …… 朱家贤，王晓琦，欧盛菊，张新宇(3473)
华北平原AOD时空演化与影响因素 …… 郭霖，孟飞，马明亮(3483)
基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系 … 郑玉蓉，王旭红，崔思颖，冯子豪，张秀，刘康(3494)
基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征 …… 王耀庭，殷振平，郑祚芳，李炬，李青春，孟春雷，李威(3508)
近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析 …… 陈天宇，刘常清，史小丽，李云，范子武，贾本有，廖轶鹏(3523)
高原湖泊周边浅层地下水:磷素时空分布及驱动因素 …… 杨恒，李桂芳，叶远行，陈清飞，崔荣阳，张丹，陈安强(3532)
三峡水库不同支流库湾蓄水期溶解氧分层特性及差异性 …… 纪道斌，方娇，龙良红，杨正健，赵星星，杨霞，郭亚丽(3543)
典型喀斯特城市湖库溶解性有机质成分特征及来源解析 …… 倪茂飞，周慧，马永梅，苏印，王晓丹，王志康(3552)
骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估 …… 黄家浩，吴玮，黄天寅，陈书琴，项颂，庞燕(3562)
千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素 …… 王吉毅，霍翟，国超旋，朱广伟，龚志军，范亚文，王建军(3575)
泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征 …… 张子涵，张鑫茹，贾传兴，甘延东，王世亮(3587)
降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响 …… 周豪，陈方鑫，罗义峰，龙翼，周继，王小燕，李丹丹，陈晓燕(3597)
典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价 …… 储杨阳，杨龙，周媛，王喜龙，王嗣禹，张敏(3608)
筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响 …… 王洵，张佳佳，袁秋生，胡斌，刘胜(3623)
天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识 …… 刘嘉元，丰玥，杨雪纯，张彦，李德生，刘福德(3635)
地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制 …… 彭珂醒，李瑞飞，周亦辰，卓泽铭，张晋，李梅，李雪(3645)
北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析 …… 门聪，李頔，左剑恶，邢薇，刘梦瑶，魏凡钦，胡嘉敏，谢珍雯，邢鑫，沈杨贵(3656)
微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响 …… 胡嘉敏，左剑恶，李金波，张艳艳，艾翔，龚大惠，张继文，孙丁明(3664)
不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响 …… 任俊，殷鹏，王威振，唐婉莹，尹洪斌，朱丽娟(3672)
微纳米粒径生物炭的结构特征及其对Cd^{2+}吸附机制 …… 马文艳，裴鹏刚，高歌，孙约兵(3682)
不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素 …… 连神海，张树楠，刘锋，刑宏霖，吴金水(3692)
Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能 …… 印学杰，宋小宝，丁陈蔓，冯彦房，杨桢，何世颖，薛利红(3699)
一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及PICRUSt2功能预测分析 …… 李亚男，闫冰，郑蕊，姚丽，隋倩雯，魏源送(3708)
丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性 …… 高春娣，杨箫阳，欧家丽，韩颖璐，程丽阳，彭永臻(3718)
2000~2020年长江流域植被NDVI动态变化及影响因素探测 …… 徐勇，郑志威，郭振东，窦世卿，黄雯婷(3730)
近40年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估 … 陈中星，邱龙霞，陈瀚阅，范协裕，毋亭，沈金泉，邢世和，张黎明(3741)
土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及C、N、P化学计量特征的影响 …… 何宇，盛茂银，王轲，王霖娇(3752)
长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价 …… 张浙，卢然，伍思扬，贾智彬，王宁(3763)
煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性 …… 尚誉，桑楠(3773)
燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价 …… 李强，姚万程，赵龙，张朝，张恩月，苏迎庆，刘庚(3781)
广州市南沙区第四系剖面镉富集特征及生物有效性 …… 王芳婷，包科，黄长生，赵信文，顾涛，曾敏(3789)
黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准 …… 徐梦琪，杨文弢，杨利玉，陈勇林，景灏楠，吴攀(3799)
土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测 …… 张加文，田彪，罗晶晶，吴凡，张聪，刘征涛，王晓南(3811)
添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响 …… 鲁琪飞，叶协锋，韩金，潘昊东，张明杰，王晶，杨佳豪，姚鹏伟，李雪利(3825)
不同稻作系统土壤的CH_4产生潜力与产生途径 …… 沈皖豫，黄琼，马静，张广斌，徐华(3835)
东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程 …… 马静，董文雪，朱燕峰，肖栋，陈浮(3844)
同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素 …… 李媛媛，徐婷婷，艾喆，魏庐潞，马飞(3854)
岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较 …… 肖筱怡，靳振江，冷蒙，李雪松，熊丽媛(3865)
紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤pH的差异响应 …… 王智慧，蒋先军(3876)
有机物料还田对稻田土壤DOM碳源代谢能力的影响 …… 肖怡，李峥，黄容，汤奥涵，李冰，王昌全(3884)
《环境科学》征订启事(3403) 《环境科学》征稿简则(3462) 信息(3493，3655，3834)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第43卷第7期 2022年7月
Vol.43, No.7 Jul., 2022

降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响

周豪[1], 陈方鑫[1], 罗义峰[1], 龙翼[2], 周继[2], 王小燕[1], 李丹丹[1], 陈晓燕[1*]
(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要: 为了探究土地利用优化配置对三峡库区小流域径流过程中磷素流失的影响,选取重庆忠县石盘丘小流域内传统农业模式集水区(CG)和土地利用优化配置后的集水区(EG)为研究对象,分别在两个集水区出口采样,监测降雨事件中径流过程和不同形态磷素,分析土地利用配置对磷流失规律的影响. 结果表明: ① 监测的 10 场降雨径流过程中,EG 的 ρ[总磷(TP)]均低于 CG,两者范围分别为 0.09 ~ 0.75 mg·L^{-1}和 0.13 ~ 2.82 mg·L^{-1}; 相对于 CG, EG 显著降低了 TP 浓度峰值. ② EG 的 TP、可溶性磷(TDP)、无机态磷(DIP)和颗粒态磷(PP)在降雨径流过程中的浓度平均值 EMC 均较 CG 低,且 EG 与 CG 在 TP、TDP 和 DIP 的 EMC 上均呈现显著差异($P<0.05$); 降雨径流过程中两个集水区磷流失的主要形式均为 TDP,但 EG 的 TDP/TP 平均值更大. ③ EG 比 CG 的 TP、TDP、DIP 和 PP 的输出负荷降低 45%、43%、57% 和 47%,EG 和 CG 各形态磷素输出负荷均与径流总量极显著相关($P<0.01$), CG 各形态磷与径流总量线性拟合的斜率为 EG 的 1.66 ~ 1.75 倍, CG 各形态磷素输出负荷对径流量的响应较 EG 更敏感,且降雨径流过程中单位面积产沙量比单位面积产流量更能引起磷素浓度和输出负荷的差异. 优化土地利用配置能有效减少各形态磷素流失,为三峡库区小流域磷流失防控提供参考依据.

关键词: 三峡库区; 集水区; 降雨径流; 土地利用优化配置; 磷流失
中图分类号: X52 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2022)07-3597-11 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202109270

Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff

ZHOU Hao[1], CHEN Fang-xin[1], LUO Yi-feng[1], LONG Yi[2], ZHOU Ji[2], WANG Xiao-yan[1], LI Dan-dan[1], CHEN Xiao-yan[1*]
(1. College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to explore the impact of optimized land use allocation on phosphorus loss in the runoff process of a small watershed in the Three Gorges Reservoir area, a traditional agricultural model catchment area (CG) and a catchment area after optimized land use allocation in the Shipanqiu watershed in Zhong County, Chongqing (EG) were selected as the research object, sampling at the outlets of the two catchment areas, respectively, to monitor the runoff process and different forms of phosphorus in rainfall events and to analyze the influence of land use configuration on the law of phosphorus loss. The results showed that: ① in the 10 monitored rainfall and runoff processes, the ρ[total phosphorus (TP)] of EG was lower than that of CG, and the ranges of the two were 0.09-0.75 mg·L^{-1} and 0.13-2.82 mg·L^{-1}, respectively. Compared with that of CG, EG significantly reduced the peak value of TP. ② The average EMC of TP, total dissolved phosphorus (TDP), dissolved inorganic phosphorus (DIP), and particulate phosphorus (PP) in the process of rainfall and runoff was lower than that of CG, and EG and CG showed significant differences in EMC of TP, TDP, and DIP ($P<0.05$); the main form of phosphorus loss in the two catchment areas in the process of rainfall and runoff was TDP, but the average TDP/TP of EG was larger. ③ The output load of EG was 45%, 43%, 57%, and 47% lower than that of the TP, TDP, DIP, and PP in CG. The output load of EG and CG of various forms of phosphorus was significantly correlated with the total runoff ($P<0.01$). In addition, the slope of the linear fitting of various phosphorus forms in the CG catchment area to the total amount of runoff was 1.66 to 1.75 times that of EG. The output load of various phosphorus forms of CG was more sensitive to runoff than that of EG, and the output per unit area in the process of rainfall and runoff was more sensitive than that of EG. The amount of sand could have caused the difference in phosphorus concentration and output load more than the output per unit area. Optimizing land use configuration can effectively reduce the loss of various forms of phosphorus and provide a reference for the prevention and control of phosphorus loss in small watersheds in the Three Gorges Reservoir area.

Key words: Three Gorges Reservoir area; catchment area; rainfall runoff; optimal allocation of land use; phosphorus loss

三峡库区常年降雨丰富,汇水流域面积 100 万 km^2,是我国战略级水资源库,因此其水环境的安全关系重大[1]. 库区范围内水系纵横且自然资源丰富,农用地和农业人口占比较大、人地关系复杂[2],农业面源污染对三峡库区水体环境安全构成重要威胁[3]. 三峡库区水系周围分布众多农业小流域,在降雨期间,小流域径流汇聚经流域出口入库区水体,泥沙和磷等养分也易随径流流失[4],而磷素流失是农业面源污染的重要原因.

磷素流失途径主要有地表径流、地下淋溶损失和壤中流[5],通常地表径流是主要途径[6,7]. 影响地表径流磷动态变化的因素主要有降雨[8]、土地利用方式[9]、坡面特征[10]、施肥状况[11,12]和土壤理化性质[13],各因素相互关联,其中土地利用方式是磷素流失的基本且关键的影响因素. 有研究发现,耕地是土壤侵蚀的主要来源,其侵蚀强度可达园地的 10 倍[14],与坡耕地相比,退耕还林模式下的茶园地和

收稿日期: 2021-09-30; **修订日期**: 2021-11-17
基金项目: 重庆市技术创新与应用示范(社会民生类重点研发)项目(cstc2018jscx-mszdX0061)
作者简介: 周豪(1996 ~),男,硕士研究生,主要研究方向为面源污染与流域治理,E-mail:2873684009@qq.com
* 通信作者,E-mail:c400716@126.com

板栗林地能够显著减少水土和养分流失[15]. 苟桃吉等[16]在三峡库区王家沟小流域研究发现,相较于旱地,牧草能显著减少径流泥沙中的磷流失,Farkas等[17]在挪威东南部小集水区研究发现将50%的耕作区变为林地,可减少40%的磷,并且土地利用的变化比农业措施的变化能更显著地减少颗粒物和磷的流失,因此优化土地利用配置能有效防治面源污染. 优化土地利用配置除改变土地利用类型和布局外,一般还伴随着措施改造,通过间作[18]和绿肥覆盖[19]能有效减少养分流失,生态塘[20]、人工湿地[21,22]和生态沟渠[23,24]能够有效截留和消纳径流中的磷素. 王晓玲等[25]的研究发现降雨径流结束后TP在生态塘中的去除率达52.3%. 杨波[26]在辽河的研究发现人工湿地在2015~2018年对TP的去除率逐年增加. 张树楠等[27]的研究发现所布设的整条生态沟渠对TP的去除率为69.7%. 以上大多针对土地利用地块尺度在时间上的磷流失变化研究,针对降雨事件导致的径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响的相关研究还有待深入,本研究选取三峡库区石盘丘小流域内传统农业模式和优化了土地利用配置的两个对比集水区,通过监测降雨过程中径流和磷素变化,了解土地利用优化配置对降雨径流过程中的磷流失规律的影响,以期为后续有针对性地采取阻控和管理措施来控制小流域中磷素流失进入库区水体的浓度和负荷提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究所在石盘丘小流域位于重庆市忠县石宝镇新政村(30°24′~30°30′ N, 108°08′~108°12′ E),毗邻三峡库区中游的长江干流,海拔在119~780 m之间,坡度介于5°~25°,属丘陵山区,为湿润季风气候类型,多年均降雨量1 000~1 300 mm, 4~10月为雨季,雨季降雨量达全年的70%,其中6月~8月是其暴雨集中期. 在石盘丘小流域选取两个子集水区:土地利用优化配置后的集水区(EG)和传统农业模式集水区(CG),土地利用分布见图1. EG集水区优化了土地利用配置,面积为29.62 hm^2. EG集水区在上坡位主要为果园和林地,果园林下部分间作食用菌(图1中区域a),部分种植绿肥野豌豆[28]; 中坡位的部分旱地改造为草地,种植牧草野豌豆(图1中区域b),并将山坪塘改造成为生态塘(图1中区域c),塘壁用框格护坡并栽种植物,岸边种植美人蕉和鸢尾,在入水口处布设沉水植物狐尾藻等; 生态塘出口与中下坡位改造的生态草沟相接,生态草沟内布设有挺水植物,且每隔一段距离布设有沉砂池(图1中区域d),下坡位水田与旱地呈阶梯状交替分布,每阶土地的进出水口与生态草沟相连,生态草沟将中下坡位地块串联,长度约400 m,最后流入集水区底部的人工湿地(图1中区域e),人工湿地约100 m^2,布设有美人蕉、茭白、荷花和狐尾藻等净化植物,径流经人工湿地流出集水区经水文站至长江. CG集水区为传统农业模式的集水区,面积为14.43 hm^2,顶部果园及少量林地,中部和底部多为旱地伴有山坪塘,为传统耕作方式. EG和CG的土地利用类型及占比见表1.

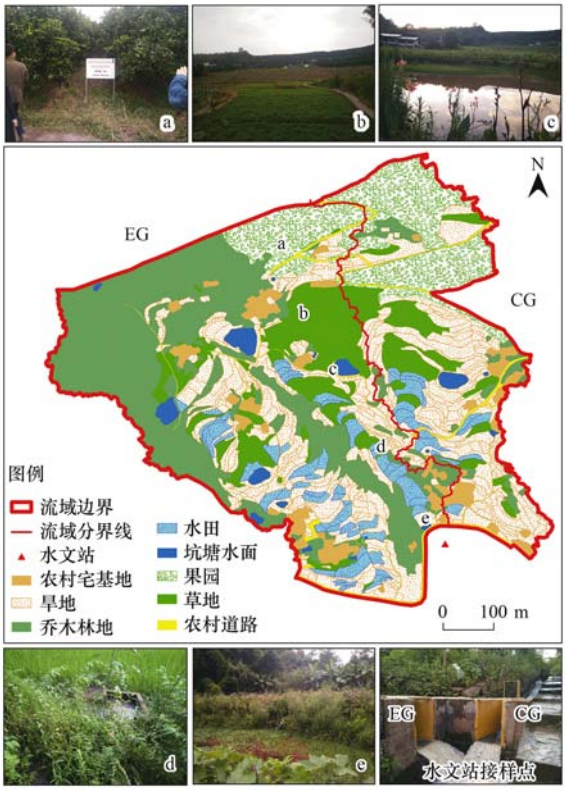

图1 土地利用分布及径流采样点示意

Fig. 1 Schematic diagram of land use distribution and runoff sampling sites

表1 EG和CG集水区土地利用类型

Table 1 Types of land use in EG and CG catchment areas

土地利用类型	EG		CG	
	面积/hm^2	面积占比/%	面积/hm^2	面积占比/%
水田	2.34	7.92	0.76	5.27
旱地	7.01	23.66	5.51	38.22
果园	1.98	6.69	4.09	28.32
乔木林地	11.61	39.19	0.80	5.53
草地	3.85	12.99	1.98	13.73
农村道路	0.62	2.09	0.46	3.19
坑塘水面	0.67	2.28	0.15	1.07
农村宅基地	1.54	5.19	0.67	4.67
合计	29.62	100.00	14.43	100.00

1.2 样品采集与处理

在EG和CG集水区的出水断面处布设巴歇尔

水槽，连接流量自动监测器，实时获取流量数据. 遇降雨在 EG 和 CG 的巴歇尔水槽出口处采集径流样和泥沙样，每 10 min 或 30 min 采集一次，径流量较大时加密采集，直到降雨结束后，再采集 2 ~ 3 次. 每次采集一瓶 500 mL 水样和一桶 10 L 的径流泥沙样，水样及时带回储存于 4℃ 冰箱中，并在 48 h 内进行养分的测定，径流泥沙样等沉淀完全后收集起来 105℃ 烘干，烘干后的泥沙过 0.25 mm 筛待测. 分析项目包括水样中的 TDP、DIP 和径流泥沙中的 PP 等. TDP 和 DIP 通过 0.45 μm 滤膜的水样采用钼蓝比色法测定；PP 采用 $HClO_4$-H_2SO_4 消煮钼锑抗比色法进行测定. 总磷（TP）用水样的 TDP 和径流泥沙中的 PP 相加得到 TP = TDP + PP. 溶解态有机磷（DOP）用差减法得到：DOP = TDP − DIP.

1.3　数据处理

引入 EMC（event mean concentration）来计算单场降雨产流在小流域出口断面输出的磷素浓度平均值[29]，公式如下：

$$\mathrm{EMC} = M/V$$

其中：

$$M = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{C_i + C_{i+1}}{2} \times \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \times (t_{i+1} - t_i)$$

$$V = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \times (t_{i+1} - t_i)$$

式中，EMC 为降雨径流过程中污染物加权后的平均浓度，$mg \cdot L^{-1}$；M 为径流中污染物负荷，g；V 为降雨径流总体积，m^3；C_i 为第 i 次采样的污染物浓度，$mg \cdot L^{-1}$；C_{i+1} 为第 $i+1$ 次采样的污染物浓度，$mg \cdot L^{-1}$；Q_i 为第 i 次采样时监测到的流量，$m^3 \cdot min^{-1}$；Q_{i+1} 为第 $i+1$ 次采样监测到的流量，$m^3 \cdot min^{-1}$；t_i 是第 i 次采样时刻，min；t_{i+1} 是第 $i+1$ 次采样时刻，min.

迁移通量[30]：采样时刻的流量与污染物浓度的乘积，单位为 $g \cdot min^{-1}$.

输出负荷：单位面积上，降雨产流最终输出的污染物总量，单位为 $g \cdot hm^{-2}$.

各项折线图和柱形图采用 Origin 2018 软件完成，数据计算检验采用了 SPSS 21.0 软件. 试验数据间相关程度采用 Pearson 相关性分析，各组试验数据之间差异的显著性检验采用单因素方差分析（one-way ANOVA）.

2　结果与分析

2.1　降雨径流过程中磷素的浓度变化

2019 年 6 ~ 8 月，监测的 10 场降雨事件中 EG 和 CG 集水区径流及各形态磷素浓度变化过程如图 2 所示. 在降雨径流过程中 TP 和 PP 浓度变化较为剧烈，而 DIP 浓度相对平缓. 监测的所有降雨径流过程中的相同时刻，EG 集水区的各形态磷素浓度均小于 CG 集水区. CG 集水区在 6 月 22 日、6 月 28 日、7 月 8 日和 7 月 23 日降雨径流过程中出现明显峰值，而 EG 集水区在 6 月 22 日、7 月 19 日、7 月 23 日、7 月 31 日和 8 月 6 日出现明显峰值，其余降雨径流过程中均为初始浓度即峰值，无论初始浓度峰值还是产流过程中间磷素浓度峰值均出现在径流峰值前. 除了首场降雨径流外，降雨径流过程中 EG 集水区 TP 和 TDP 浓度变化趋势相似，而 CG 集水区 TP 和 PP 浓度变化趋势相似. 在产流的不同阶段，不同形态磷浓度占比会发生改变[31]. 在降雨导致的产流增长初期，所监测的 10 场降雨径流中 CG 集水区均由 PP 浓度占主导，而 EG 集水区只有 4 场前期由 PP 浓度占主导. 产流后期两个集水区均主要由 TDP 浓度占主导.

监测的 10 场降雨径流过程中，EG 集水区的 TP 浓度均低于 CG 集水区，并且显著削减了 TP 浓度峰值. 如图 3 所示，在产流前期，EG 集水区对 TP 浓度削减效果十分明显，随着产流时间的增加，削减效果逐渐减弱. 这 10 场降雨径流过程中 EG 集水区和 CG 集水区 ρ（TP）范围分别为 0.09 ~ 0.75 $mg \cdot L^{-1}$ 和 0.13 ~ 2.82 $mg \cdot L^{-1}$. EG 集水区 TP 浓度最小值为 CG 集水区的 69%，最大值为 CG 集水区的 27%.

表 2 给出了 10 场降雨产流期间不同形态磷素的 EMC，EG 集水区 TP、TDP、DIP 和 PP 的 EMC 平均值分别为：0.19、0.13、0.06 和 0.06 $mg \cdot L^{-1}$；CG 集水区 TP、TDP、DIP 和 PP 的 EMC 平均值分别为：0.37、0.24、0.15 和 0.13 $mg \cdot L^{-1}$，均远远超过水体富营养化警戒线 0.02 $mg \cdot L^{-1}$. EG 集水区在 2019 年 6 月 5 日首场降雨产流的 TP 的 EMC 值最大；而 CG 集水区在 2019 年 6 月 28 日降雨产流的 TP 的 EMC 值最大. EG 集水区 10 场降雨径流 TDP/TP 的范围在 0.47 ~ 0.87，场均为 0.70；CG 集水区 10 场降雨产流中 TDP/TP 的范围在 0.50 ~ 0.76，场均为 0.64，可知该小流域不同土地配置模式下降雨径流过程中磷流失的主要形式是均为 TDP，但 EG 集水区的 TDP 在 TP 中的占比大于 CG 集水区. EG 集水区这 10 场降雨径流 DIP/TDP 的范围在 0.25 ~ 0.67，场均为 0.48；CG 集水区这 10 场降雨径流中 DIP/TDP 的范围在 0.23 ~ 0.84，场均为 0.63；表明该小流域 EG 集水区的可溶性磷主要以有机态磷形式存在，CG 集水区的可溶性磷主要以无机态磷形式存在.

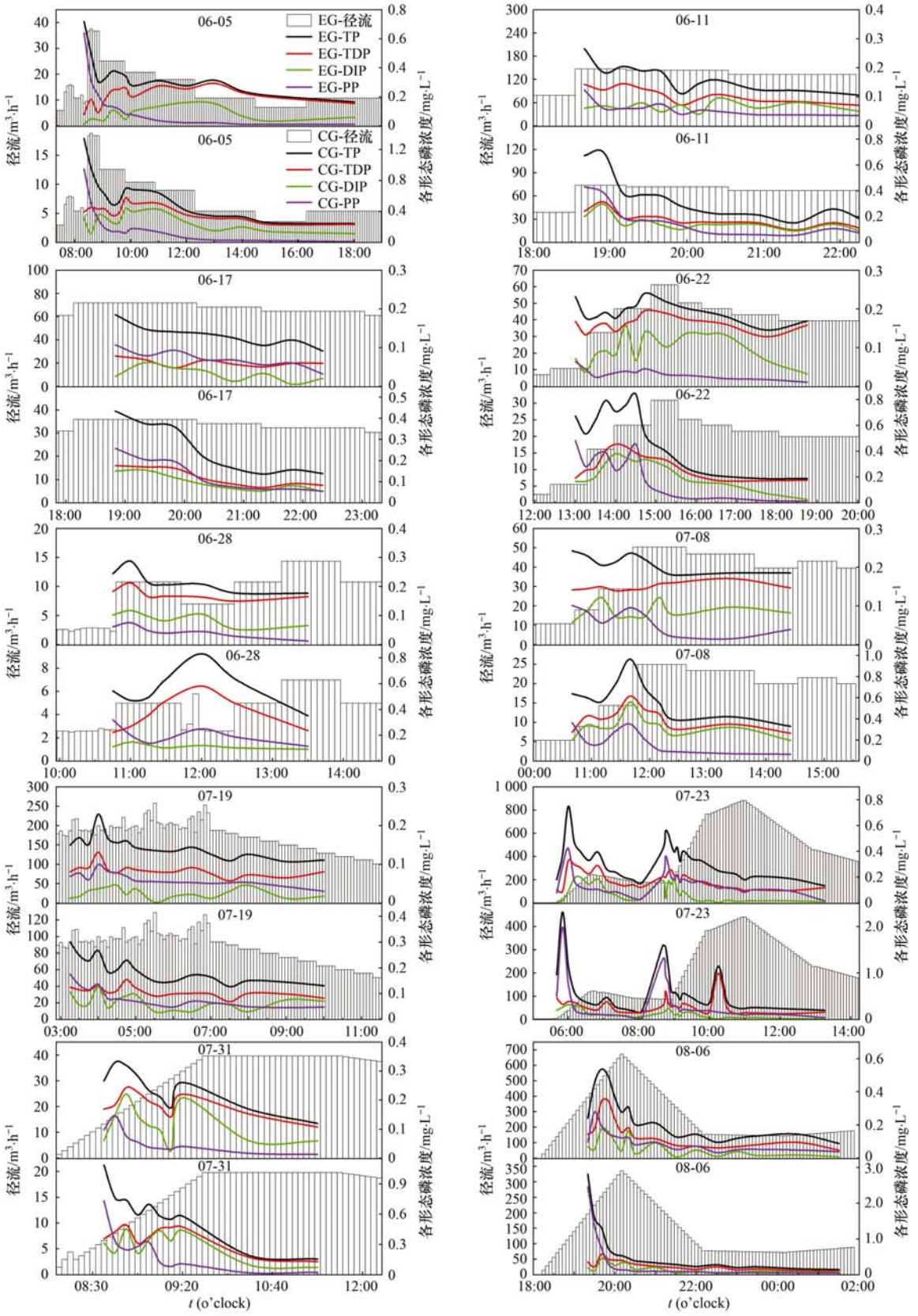

图 2 降雨径流过程中径流和不同形态磷素变化过程

Fig. 2 Change process of runoff and different forms of phosphorus in the process of rainfall and runoff

2.2 不同降雨事件中磷素的输出负荷

如表 3 所示，10 场降雨事件中，EG 集水区较 CG 集水区的 TP、TDP、DIP 和 PP 的输出负荷平均降低了 45%、43%、57% 和 47%. 其中 TP 的输出负荷降低了 22%~60%，TDP 的输出负荷降低了 23%~58%，DIP 的输出负荷降低了 23%~71%，PP 的输

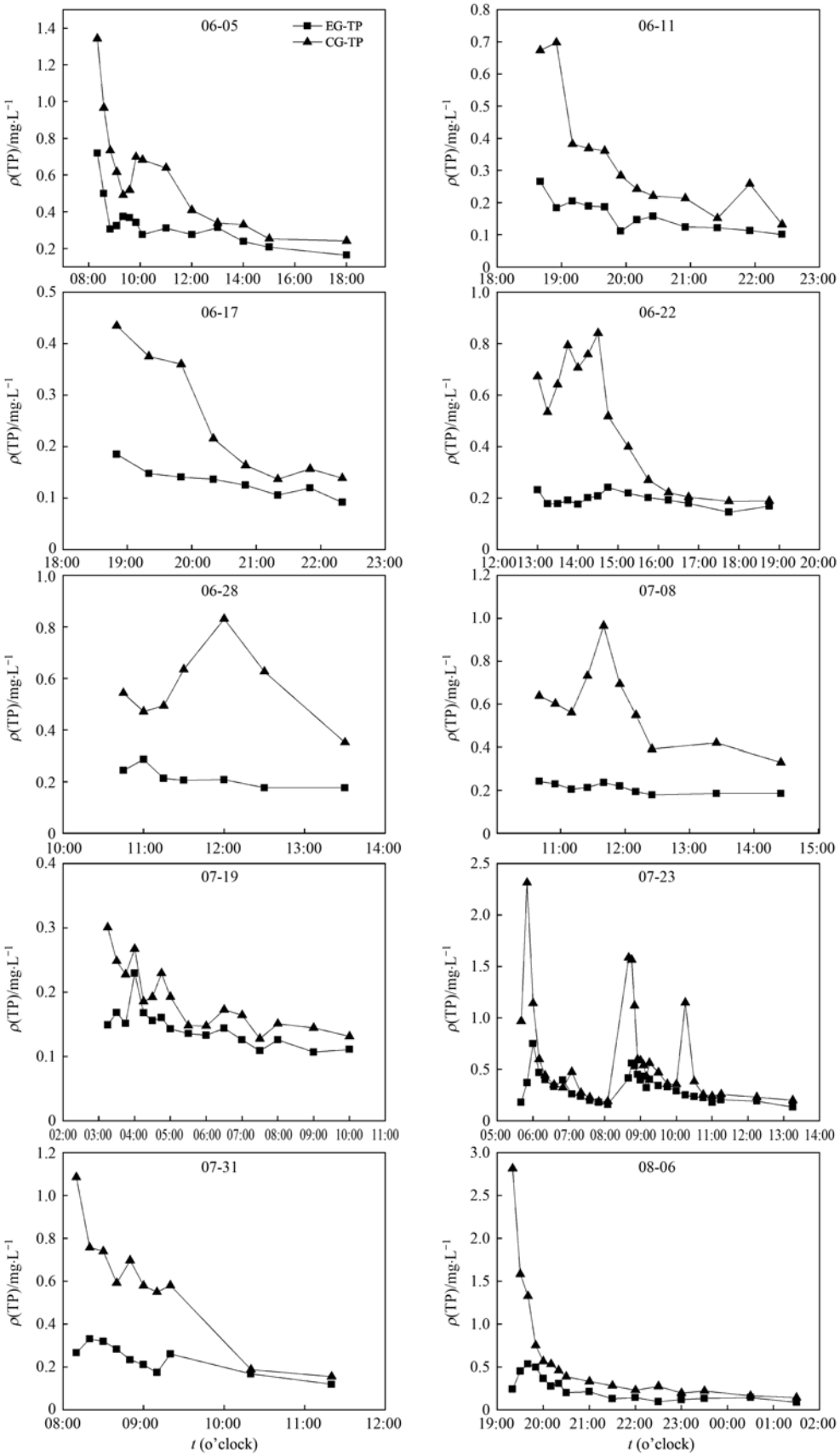

图 3　降雨径流过程中 EG 和 CG 的磷素浓度变化

Fig. 3　Changes in phosphorus concentrations of EG and CG in the process of rainfall runoff

出负荷降低了 21%～80%. 有 5 场降雨事件 DIP 的输出负荷在各形态磷中降幅最大, 4 场降雨事件 PP 的输出负荷在各形态磷中降幅最大. TP、TDP 和 DIP 的输出负荷降幅最大出现在 7 月 8 日的降雨事

表 2 不同形态磷的 EMC[1)]

Table 2 EMC of different forms of phosphorus

日期 (月-日)	EG						CG					
	TP	TDP	DIP	PP	TDP/TP	DIP/TDP	TP	TDP	DIP	PP	TDP/TP	DIP/TDP
06-05	0.29	0.21	0.09	0.08	0.74	0.42	0.49	0.36	0.24	0.12	0.74	0.68
06-11	0.14	0.10	0.06	0.05	0.66	0.67	0.28	0.16	0.13	0.12	0.56	0.84
06-17	0.13	0.06	0.03	0.07	0.47	0.54	0.23	0.11	0.09	0.11	0.50	0.79
06-22	0.19	0.16	0.09	0.02	0.87	0.59	0.36	0.25	0.18	0.10	0.71	0.70
06-28	0.20	0.17	0.08	0.03	0.84	0.47	0.51	0.35	0.11	0.16	0.68	0.31
07-08	0.19	0.15	0.09	0.04	0.80	0.57	0.48	0.36	0.30	0.12	0.76	0.82
07-19	0.14	0.08	0.02	0.05	0.59	0.28	0.17	0.10	0.06	0.07	0.60	0.59
07-23	0.24	0.13	0.03	0.10	0.56	0.25	0.39	0.23	0.05	0.16	0.58	0.23
07-31	0.17	0.15	0.08	0.03	0.85	0.53	0.30	0.23	0.16	0.07	0.75	0.70
08-06	0.23	0.13	0.06	0.09	0.59	0.46	0.47	0.25	0.17	0.22	0.53	0.68
平均值	0.19	0.13	0.06	0.06	0.70	0.48	0.37	0.24	0.15	0.13	0.64	0.63

1)TDP/TP 和 DIP/TDP 无单位；其余的单位为 $mg \cdot L^{-1}$

表 3 EG 与 CG 集水区在降雨径流中的磷输出负荷对比[1)]

Table 3 Comparison of phosphorus output load in rainfall runoff between EG and CG catchment areas

日期(月-日)	TP			TDP			DIP			PP		
	EG	CG	减少比例	EG	CG	减少比例	EG	CG	减少比例	EG	CG	减少比例
06-05	1.4	2.4	42	1.0	1.8	43	0.4	1.2	65	0.4	0.6	40
06-11	2.6	5.3	51	1.7	3.0	41	1.2	2.5	53	0.9	2.3	62
06-17	1.0	2.0	47	0.5	1.0	50	0.3	0.8	66	0.6	1.0	43
06-22	1.6	3.1	49	1.4	2.2	38	0.8	1.6	48	0.2	0.9	77
06-28	0.2	0.5	59	0.2	0.3	50	0.1	0.1	23	0.0	0.1	80
07-08	1.0	2.5	60	0.8	1.9	58	0.5	1.6	71	0.2	0.6	67
07-19	5.7	7.4	22	3.4	4.4	23	0.9	2.6	64	2.3	3.0	21
07-23	27.1	46.0	41	15.2	26.7	43	3.8	6.2	38	11.9	19.3	38
07-31	0.6	1.1	44	0.5	0.8	37	0.3	0.6	52	0.1	0.3	67
08-06	13.8	29.6	53	8.1	15.6	48	3.8	10.6	65	5.7	14.0	59
平均值	5.5	10.0	45	3.3	5.8	43	1.2	2.8	57	2.2	4.2	47

1)减少比例表示 EG 相对 CG 减少的比例,计算为[(CG－EG)/CG]×100%,单位%；其余的单位为 $g \cdot hm^{-2}$

件中；而 TP、TDP 和 PP 的输出负荷降幅最小出现在 7 月 19 日的降雨事件中.

为探究监测的 10 场降雨事件中的磷素输出负荷与径流总量的关系,进行 Pearson 相关性分析,如表 4 所示. 除 CG 集水区的 DIP 输出负荷与径流总量显著相关外($P<0.05$),EG 集水区和 CG 集水区不同形态磷素输出负荷均与径流总量极显著相关($P<0.01$),并且相关系数接近 1,表明具有较好的线性相关关系. 对不同形态磷素输出负荷同径流总量进行线性拟合,发现 CG 集水区 TP、TDP、DIP、PP 和 DOP 的输出负荷与径流总量的斜率 a 值均大于 EG 集水区,分别为 EG 集水区的 1.70、1.72、1.85、1.67 和 1.66 倍. 表明相对于 EG 集水区, CG 集水区各形态磷素输出负荷对径流总量的响应更敏感,径流总量增长幅度相同的情况下, CG 较 EG 集水区磷素输出增长更剧烈.

表 4 EG 与 CG 集水区不同形态磷素输出负荷同径流总量的关系[1)]

Table 4 Relationship between the output load of different forms of phosphorus and the total runoff in the EG and CG catchment areas

集水区	指标	相关系数	拟合方程	a	b	R^2	n
EG	TP	0.988**	$M=aQ+b$	0.233 4	−0.718 5	0.975 7	10
	TDP	0.987**		0.130 4	−0.195 6	0.974 5	10
	DIP	0.914**		0.035 3	0.259 3	0.835 2	10
	PP	0.987**		0.103 0	−0.532 9	0.973 7	10
	DOP	0.980**		0.095 1	−0.454 9	0.960 4	10
CG	TP	0.971**	$M=aQ+b$	0.396 2	−0.886 1	0.942 5	10
	TDP	0.974**		0.223 8	−0.362 7	0.949 6	10
	DIP	0.765*		0.065 4	0.975 9	0.571 3	10
	PP	0.961**		0.172 3	−0.523 4	0.924 2	10
	DOP	0.936**		0.158 2	−1.320 8	0.876 4	10

1)** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关, * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关；其中 M 表示单位面积输出负荷,单位为 $g \cdot hm^{-2}$；Q 表示单位面积径流量,单位为 $m^3 \cdot hm^{-2}$

3　讨论

3.1　径流和泥沙对磷流失的影响

降雨径流过程中，径流是小流域养分流失的主要载体，养分的流失过程与径流的产生和变化过程密切相关[32]. 对 10 场降雨径流过程 EG 和 CG 集水区全部所接样品磷素浓度及迁移通量与对应流量进行 Pearson 相关性分析，如表 5 所示. 不同形态磷素浓度与流量相关程度不如迁移通量与流量的相关程度[33]，在 EG 和 CG 集水区的迁移通量与流量相关性均表现为极显著（$P<0.01$），但 EG 集水区较 CG 集水区的相关系数大，EG 集水区磷素迁移通量与径流流量倾向于线性关系[34]，而 CG 集水区倾向于非线性关系. 为了更好地比较 EG 和 CG 集水区各形态磷素迁移通量随流量的变化关系，两者均进行线性拟合，如图 4.

表 5　不同形态磷素浓度和迁移通量同流量的相关性分析1)

Table 5　Correlation analysis of different forms of phosphorus concentration and migration flux with flow

集水区	流量与浓度					流量与迁移通量				
	TP	TDP	DIP	PP	DOP	TP	TDP	DIP	PP	DOP
EG	0.112	−0.044	−0.215 *	0.191 *	0.189 *	0.900 **	0.868 **	0.515 **	0.892 **	0.909 **
CG	−0.018	−0.083	−0.293 **	0.016	0.211 *	0.665 **	0.727 **	0.578 **	0.418 **	0.555 **

1) * 表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关，** 表示在 0.01 水平（双侧）上显著相关；$n=137$

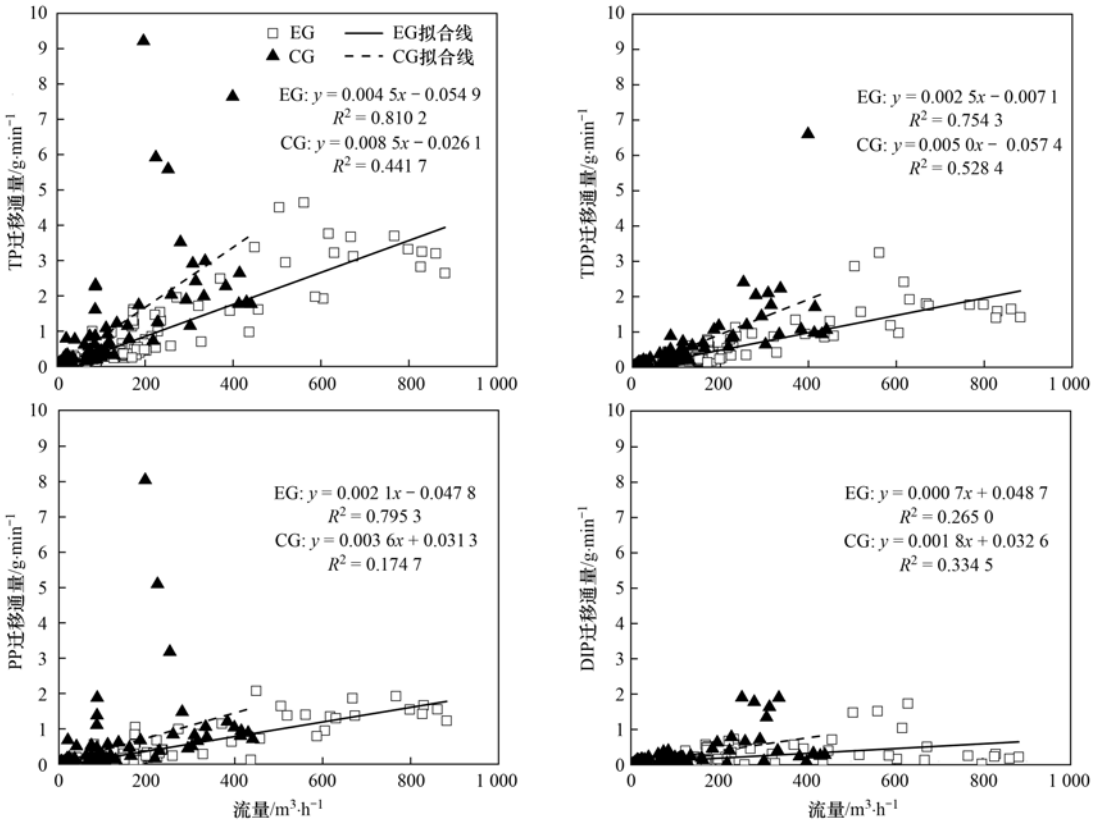

图 4　EG 和 CG 集水区各形态磷迁移通量与流量拟合结果

Fig. 4　Fitting results of the migration flux and flow rate of various forms of phosphorus in the EG and CG catchment areas

CG 集水区 TP、TDP、DIP 和 PP 迁移通量与流量的拟合斜率分别为 EG 集水区的 1.9、2.0、2.6 和 1.7 倍，这与两个集水区输出负荷与产流量拟合斜率的差异具有一致性. 径流流量在产流过程中变化影响了各形态磷素输出速率，造成累积结果也呈现类似现象.

在同场降雨事件中单位面积产流量 CG 集水区与 EG 集水区相差不大，如图 5 所示，在所监测的 10 场降雨事件中，CG 集水区单位面积上产流量为 EG 集水区的 1.06 倍，表明 CG 集水区比 EG 集水区径流系数[35]略大，但这 10 场降雨径流中 CG 集水区的单位面积产沙量达到 EG 集水区的 1.43 倍（$R^2=0.905\,9$）.

如表 6 所示，两个集水区不同形态磷素 EMC 和输出负荷在 EG 和 CG 集水区的差异与单位面积产流量的差异均无显著相关关系，而在 TP 和 PP 的 EMC 值和输出负荷上的差异与单位面积产沙量的差异极显著相关（$P<0.01$）. 综合图 5 和表 6 来看，

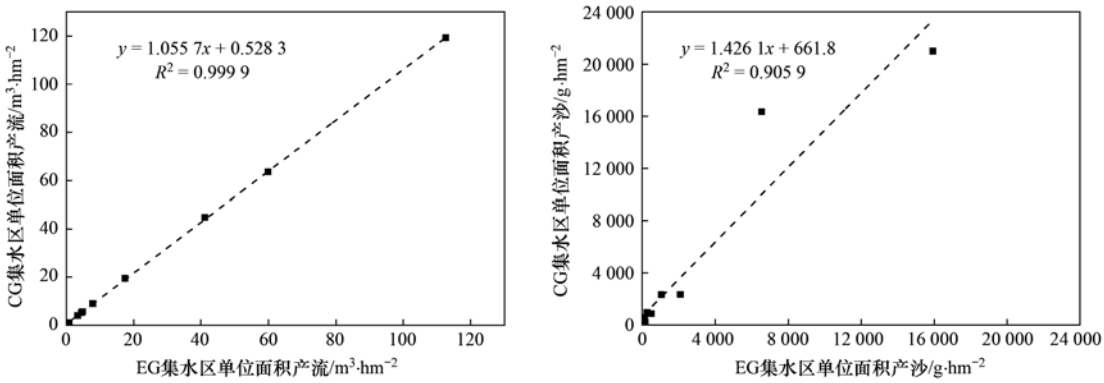

图 5 10 场降雨事件中 EG 和 CG 集水区单位面积产流和产沙关系

Fig. 5 Relationship between runoff and sediment yield per unit area of EG and CG catchment areas in ten rainfall events

降雨事件中磷素浓度和输出负荷差异的影响因素中,单位面积产沙量的差异是比单位面积产流量的差异更重要的因素. 因此优化土地利用配置减轻土壤侵蚀,能有效减少磷流失.

表 6 降雨事件中 EMC 和输出负荷差异与径流和泥沙差异的相关性1)

Table 6 Correlation between differences in EMC and output load and differences in runoff and sediment in rainfall events

	EMC				输出负荷			
	TP 减少比例	TDP 减少比例	DIP 减少比例	PP 减少比例	TP 减少比例	TDP 减少比例	DIP 减少比例	PP 减少比例
泥沙减少比例	0.818 **	0.509	−0.222	0.946 **	0.802 **	0.475	−0.242	0.949 **
径流减少比例	0.466	0.303	−0.176	0.589	0.425	0.266	−0.217	0.583

1)减少比例表示 EG 相对 CG 减少的比例,计算为[(CG − EG)/CG]×100%; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; $n = 10$

3.2 土地利用优化配置对集水区各形态磷素流失的影响

不同土地利用方式的磷素流失情况差别很大. 在石盘丘小流域,有研究发现传统农业模式下柑橘果园和坡耕地是磷流失的重要来源[36]. 陈仕奇等[37]的研究也发现坡耕地和柑橘果园年均磷流失通量大于流域出口处,而水田则相反. 在集水区上坡位,EG 主要为林地以及间作食用菌和覆盖绿肥野豌豆的柑橘果园,而 CG 主要为传统耕作模式的柑橘果园. 林地具有改善水质的作用[38],林地磷流失通量显著低于其它土地利用方式[39],且在园地间作和栽草可以显著减少地表径流中的磷流失[40],因此在上坡位 EG 磷素流失较 CG 少. 在集水区中坡位,EG 部分旱地改造成草地,并汇流至生态塘,下坡位旱地和水田交替分布,沟渠改造为生态草沟,最后集水区出口处还布设有人工湿地; 而 CG 集水区中坡位主要为旱地,水田在单侧分布,下坡位主要为旱地. 梁振春等[41]的研究发现退耕还草对坡地的磷有保持作用,从而减少磷流失对下游水体的影响. EG 集水区中坡位的生态塘岸边的美人蕉和鸢尾[42]以及塘中的狐尾藻[43]能够吸收消纳磷素. 陈成龙等[44]在三峡库区王家沟小流域的研究发现,水田布设的位置和大小对 TP 的拦截效率有显著影响,布设在坡底且完整性较好的稻田布设格局更有利于去除 TP. EG 集水区梯级水田面积占比更大且分布更合理,主要在集水区中下部,因此能够在中途有效拦截消纳磷素,底部的人工湿地最后在末端净化流至集水区出口的磷素[45],达到整体防控效果. 为了解优化土地利用配置对降雨径流过程中不同形态磷素的削减效果,对 EG 和 CG 集水区各形态磷素 EMC 的差异性进行单因素方差分析,如表 7. 降雨径流过程中,EG 集水区与 CG 集水区在 TP、TDP 和 DIP 的 EMC 上均具有显著差异($P < 0.05$),而 PP 和 DOP 的 EMC 差异不显著. 单独从两个集水区各形态磷 EMC 值来看,EG 集水区的 TP 与 TDP、TDP 与 DIP 均无显著差异,而 CG 集水区的 TP 与 TDP、TDP 与 DIP 均差异显著. 因此,在降雨径流过程中,土地利用优化配置对 TP、TDP 和 DIP 的削减效果较其它

表 7 EG 和 CG 集水区各形态磷素 EMC 的差异1)

Table 7 Differences in EMC of various forms of phosphorus in EG and CG catchment areas

指标	EMC	
	EG 集水区	CG 集水区
TP	0.191 ± 0.051bc	0.368 ± 0.12a
TDP	0.134 ± 0.046cde	0.240 ± 0.096b
DIP	0.064 ± 0.026ef	0.149 ± 0.078cd
PP	0.056 ± 0.028f	0.128 ± 0.046cdef
DOP	0.070 ± 0.029ef	0.093 ± 0.071def
TDP/TP	0.697 ± 0.141g	0.641 ± 0.099gh
DIP/TDP	0.478 ± 0.133h	0.634 ± 0.207gh

1)不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),相同小写字母表示差异不显著; TP、TDP、DIP、PP 和 DOP 的单位为 $mg \cdot L^{-1}$; TDP/TP 和 DIP/TDP 无单位

形态磷素更显著,且能够增加 TDP 在 TP 中的贡献.

4　结论

(1)相较于传统农业模式,优化土地利用配置后能够显著削减降雨径流中的总磷浓度峰值,并且在产流前期削减能力较强,但随产流的进行削减效果逐渐减弱.

(2)相对于优化土地利用配置的集水区,传统农业模式集水区各形态磷素输出负荷对径流量更敏感,相同的径流增长幅度下,磷素输出增长更剧烈,并且优化土地利用配置的集水区迁移通量与径流流量倾向于线性关系,而传统农业集水区倾向于非线性关系.而在影响降雨事件中磷素浓度和输出负荷差异的因素中,单位面积产沙量的差异是比单位面积产流量的差异更重要的因素,因此优化土地利用拦截泥沙比减少产流能更大程度减少磷流失.

(3)优化土地利用配置能够改变磷素流失形态占比,降雨径流过程中 EG 集水区的可溶性磷主要以有机态磷形式存在, CG 集水区的可溶性磷主要以无机态磷形式存在.土地利用优化配置的集水区可以显著减少 TP、TDP 和 DIP 流失,并增加 TDP 在 TP 中的占比和增加 DIP 在 TDP 中的占比.

参考文献:

[1] 张艳军, 秦延文, 张云怀, 等. 三峡库区水环境风险评估与预警平台总体设计与应用[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(3): 391-396.
Zhang Y J, Qin Y W, Zhang Y H, *et al*. Overall design and implementation of a system for water environmental risk assessment and early warning in the Three Gorges Reservoir Region[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(3): 391-396.

[2] 梁鑫源, 李阳兵, 邵景安, 等. 三峡库区山区传统农业生态系统转型[J]. 地理学报, 2019, **74**(8): 1605-1621.
Liang X Y, Li Y B, Shao J A, *et al*. Traditional agroecosystem transition in mountainous area of Three Gorges Reservoir Area [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, **74**(8): 1605-1621.

[3] 肖新成, 谢德体, 何丙辉, 等. 基于农业面源污染控制的三峡库区种植业结构优化[J]. 农业工程学报, 2014, **30**(20): 219-227.
Xiao X C, Xie D T, He B H, *et al*. Planting structure optimization based on agricultural non-point source pollution control in Three Gorges Reservoir Region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, **30**(20): 219-227.

[4] 王丹, 邵景安, 王金亮, 等. 近 20a 三峡库区泥沙输移比估算与吸附态氮磷污染负荷模拟[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(15): 167-176.
Wang D, Shao J A, Wang J L, *et al*. Estimation of sediment delivery ratio and modelling of absorbed nitrogen and phosphorus load in Three Gorges Reservoir Area nearly 20 years [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31**(15): 167-176.

[5] 左继超, 郑海金, 奚同行, 等. 自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4178-4186.
Zuo J C, Zheng H J, Xi T H, *et al*. Characteristics of phosphorus output through runoff on a red soil slope under natural rainfall conditions[J]. Environmental Science, 2017, **38**(10): 4178-4186.

[6] 曾立雄, 肖文发, 黄志霖, 等. 三峡库区兰陵溪小流域养分流失特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 3035-3042.
Zeng L X, Xiao W F, Huang Z L, *et al*. Characteristics of nutrient loss of Lanlingxi watershed in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Environmental Science, 2013, **34**(8): 3035-3042.

[7] 范晓娟, 张丽萍, 邓龙洲, 等. 侵蚀程度差异诱发的坡面产流-产沙-总磷流失特征[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(2): 459-468.
Fan X J, Zhang L P, Deng L Z, *et al*. The characteristics of runoff-sediment yield and total phosphorus loss induced by the soils of different erosion degree [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(2): 459-468.

[8] 王帅兵, 宋娅丽, 王克勤, 等. 不同雨型下反坡台阶减少红壤坡耕地氮磷流失的效果[J]. 农业工程学报, 2018, **34**(13): 160-169.
Wang S B, Song Y L, Wang K Q, *et al*. Effects of reverse-slope terrace on nitrogen and phosphorus loss in sloping farmland of red loam under different rainfall patterns[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, **34**(13): 160-169.

[9] 曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应[J]. 环境科学, 2012, **33**(10): 3390-3396.
Zeng L X, Huang Z L, Xiao W F, *et al*. Nitrogen and phosphorus loss in different land use types and its response to environmental factors in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Environmental Science, 2012, **33**(10): 3390-3396.

[10] 陈诚, 郝志邦. 模拟降雨下不同坡度土壤坡面产流产沙特征及磷和钾素流失研究[J]. 水土保持研究, 2017, **24**(2): 70-76, 83.
Chen C, Hao Z B. Research on slope runoff, sediment and P and K loss characteristics on slopes with different gradients under artificial simulation of rainfall[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, **24**(2): 70-76, 83.

[11] 罗东海, 王子芳, 龙翼, 等. 化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1286-1295.
Luo D H, Wang Z F, Long Y, *et al*. Effect of optimized fertilization and biochar application on phosphorus loss in purple soil sloping farmland [J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1286-1295.

[12] 吴小雨, 李天阳, 何丙辉. 长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征[J]. 环境科学, 2021, **42**(6): 2810-2816.
Wu X Y, Li T Y, He B H. Characteristics of runoff-related total nitrogen and phosphorus losses under long-term fertilization and cultivation on purple soil sloping croplands[J]. Environmental Science, 2021, **42**(6): 2810-2816.

[13] 沈奕彤, 郭成久, 金珊, 等. 土壤容重对黑土坡面养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, **30**(1): 26-30.
Shen Y T, Guo C J, Jin S, *et al*. Effect of soil bulk density on nutrient loss of black soil slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, **30**(1): 26-30.

[14] Chen Z J, Wang L, Wei A S, *et al*. Land-use change from arable lands to orchards reduced soil erosion and increased

nutrient loss in a small catchment[J]. Science of the Total Environment, 2019, **648**: 1097-1104.

[15] 吴东, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制[J]. 环境科学, 2015, **36**(10): 3825-3831.
Wu D, Huang Z L, Xiao W F, *et al*. Control of soil nutrient loss of typical reforestation patterns along the Three Gorges Reservoir Area[J]. Environmental Science, 2015, **36**(10): 3825-3831.

[16] 苟桃吉, 高明, 王子芳, 等. 三种牧草对三峡库区旱坡地氮磷养分流失的影响[J]. 草业学报, 2017, **26**(4): 53-62.
Gou T J, Gao M, Wang Z F, *et al*. Effects forages on nitrogen and phosphorus loss from sloping land draining into the Three Gorges Reservoir[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, **26**(4): 53-62.

[17] Farkas C, Beldring S, Bechmann M, *et al*. Soil erosion and phosphorus losses under variable land use as simulated by the INCA-P model[J]. Soil Use and Management, 2013, **29**(S1): 124-137.

[18] 张洋, 樊芳玲, 周川, 等. 三峡库区农桑配置对地表氮磷流失的影响[J]. 土壤学报, 2016, **53**(1): 189-201.
Zhang Y, Fan F L, Zhou C, *et al*. Effects of crop/mulberry intercropping on surface nitrogen and phosphorus losses in Three Gorges Reservoir Area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, **53**(1): 189-201.

[19] 刘瑞, 张宇亭, 王志超, 等. 绿肥覆盖对紫色土坡耕地柑橘园氮磷流失的阻控效应研究[J]. 水土保持学报, 2021, **35**(2): 68-74.
Liu R, Zhang Y T, Wang Z C, *et al*. Control effect of green manure cover on nitrogen and phosphorus loss of citrus orchard on purple soil slope farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, **35**(2): 68-74.

[20] Liu X G, Shao Z Y, Cheng G F, *et al*. Ecological engineering in pond aquaculture: a review from the whole-process perspective in China[J]. Reviews in Aquaculture, 2021, **13**(2): 1060-1076.

[21] Tran H D, Vi H M T, Dang H T T, *et al*. Pollutant removal by *Canna generalis* in tropical constructed wetlands for domestic wastewater treatment[J]. Global Journal of Environmental Science and Management, 2019, **5**(3): 331-344.

[22] 成水平, 王月圆, 吴娟. 人工湿地研究现状与展望[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1489-1498.
Cheng S P, Wang Y Y, Wu J. Advances and prospect in the studies on constructed wetlands[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(6): 1489-1498.

[23] Wang J L, Chen G F, Zou G Y, *et al*. Comparative on plant stoichiometry response to agricultural non-point source pollution in different types of ecological ditches[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(1): 647-658.

[24] Liu Y Y, Li S M, Wang X L, *et al*. Dynamic interception effect of internal and external nitrogen and phosphorus migration of ecological ditches[J]. Water, 2020, **12**(9), doi: 10.3390/w12092553.

[25] 王晓玲, 李建生, 李松敏, 等. 生态塘对稻田降雨径流中氮磷的拦截效应研究[J]. 水利学报, 2017, **48**(3): 291-298.
Wang X L, Li J S, Li S M, *et al*. Study on the interception effects of ecological pond on nitrogen and phosphorus in the rainfall runoff of rice field[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, **48**(3): 291-298.

[26] 杨波. 表面流人工湿地对辽河水质长期净化效果[J]. 水土保持研究, 2021, **28**(1): 373-379.
Yang B. Long-term purification effect of surface flow constructed wetland on water quality of Liaohe River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, **28**(1): 373-379.

[27] 张树楠, 肖润林, 刘锋, 等. 生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应[J]. 环境科学, 2015, **36**(12): 4516-4522.
Zhang S N, Xiao R L, Liu F, *et al*. Interception effect of vegetated drainage ditch on nitrogen and phosphorus from drainage ditches[J]. Environmental Science, 2015, **36**(12): 4516-4522.

[28] 马莉霞, 王琼, 李应德, 等. 野豌豆属栽培牧草根部入侵真菌病害研究进展[J]. 草业科学, 2018, **35**(9): 2241-2251.
Ma L X, Wang Q, Li Y D, *et al*. Research progress on root invading fungal diseases of cultivated forage Vicia species[J]. Pratacultural Science, 2018, **35**(9): 2241-2251.

[29] 罗义峰, 陈方鑫, 周豪, 等. 次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2260-2267.
Luo Y F, Chen F X, Zhou H, *et al*. Effects of different land use practices on nitrogen loss from runoff during rainfall events[J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2260-2267.

[30] 于兴修, 李振炜, 刘前进, 等. 沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征[J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2644-2651.
Yu X X, Li Z W, Liu Q J, *et al*. Output characteristics of rainfall runoff phosphorus pollution from a typical small watershed in yimen mountainous area[J]. Environmental Science, 2012, **33**(8): 2644-2651.

[31] 徐亚娟, 高扬, 朱宁华, 等. 紫色土流域次降雨条件下碳、磷非点源输出过程及其流失负荷[J]. 生态学报, 2014, **34**(17): 5021-5029.
Xu Y J, Gao Y, Zhu N H, *et al*. The dynamic process of carbon and phosphorus losses by runoff and associated loss load in a farmland-dominated watershed of purple soil region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(17): 5021-5029.

[32] 沈茜, 唐家良, 朱波. 紫色丘陵区典型小流域非点源磷迁移特征[J]. 山地学报, 2015, **33**(5): 528-537.
Shen X, Tang J L, Zhu B. Characteristics of non-point-source phosphorus losses in some representative land-use sub-catchments in the hilly area of purple soil[J]. Mountain Research, 2015, **33**(5): 528-537.

[33] 张恒, 曾凡棠, 房怀阳, 等. 连续降雨对淡水河流域非点源污染的影响[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(5): 927-934.
Zhang H, Zeng F T, Fang H Y, *et al*. Impact of consecutive rainfall on non-point source pollution in the Danshui River catchment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, **31**(5): 927-934.

[34] 郭胜, 李崇明, 郭劲松, 等. 三峡水库蓄水后不同水位期干流氮、磷时空分异特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1266-1272.
Guo S, Li C M, Guo J S, *et al*. Spatio-temporal variation of nitrogen, phosphorus in different period in Three Gorges Reservoir after its impoundment[J]. Environmental Science, 2011, **32**(5): 1266-1272.

[35] Zhang J, Yu X L. Analysis of land use change and its influence on runoff in the Puhe River Basin[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, **28**(30): 40116-40125.

[36] 朱波, 汪涛, 王建超, 等. 三峡库区典型小流域非点源氮磷污染的来源与负荷[J]. 中国水土保持, 2010, (10): 34-36.
Zhu B, Wang T, Wang J C, *et al*. Source and load of non-point source nitrous and phosphorus pollution of typical small watersheds in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Soil and Water Conservation in China, 2010, (10): 34-36.

[37] 陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 等. 三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1276-

1285.
Chen S Q, Long Y, Yan D C, *et al*. Characteristics of nitrogen and phosphorus output and loss flux in the Shipanqiu watershed, Three Gorges Reservoir Area[J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1276-1285.

[38] 韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1091-1097.
Han L Y, Huang Z L, Xiao W F, *et al*. Effects of land use and landscape pattern on nitrogen and phosphorus exports in lanlingxi watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. Environmental Science, 2014, **35**(3): 1091-1097.

[39] 邓华, 高明, 龙翼, 等. 石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 251-262.
Deng H, Gao M, Long Y, *et al*. Characteristics of soil nitrogen and phosphorus losses under different land-use schemes in the Shipanqiu Watershed [J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 251-262.

[40] 李婷婷, 韦彩会, 董文斌, 等. 生草栽培与坡度对桂东北坡地果园地表径流氮磷流失的影响[J]. 水土保持研究, 2021, **28**(3): 59-64, 73.
Li T T, Wei C H, Dong W B, *et al*. Effects of sod culture and slope on losses of nitrogen and phosphorus in the surface runoff of orchards of northeast Guangxi[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, **28**(3): 59-64, 73.

[41] 梁振春, 李静, 吴靖, 等. 退耕还林还草对黄土高原坡地磷素的影响[J]. 南方农业学报, 2018, **49**(4): 688-694.
Liang Z C, Li J, Wu J, *et al*. Effects of grain for green project on slope phosphorus in Loess Plateau[J]. Journal of Southern Agriculture, 2018, **49**(4): 688-694.

[42] 吴诗杰, 陈慧娟, 许小桃, 等. 美人蕉、鸢尾、黄菖蒲和千屈菜对富营养化水体净化效果研究[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2016, **40**(1): 98-108.
Wu S J, Chen H J, Xu X T, *et al*. Analysis of purification effect on eutrophic water by *Canna indica* L., *Iris tectorum*, *Lythrum salicaria* L. and *Iris pseudacorus*[J]. Journal of Anhui University (Natural Science Edition), 2016, **40**(1): 98-108.

[43] 刘淼, 陈开宁. 植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2706-2714.
Liu M, Chen K N. Purification effect of submerged macrophyte system with different plants combinations and C/N ratios[J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2706-2714.

[44] 陈成龙, 高明, 倪九派, 等. 三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(5): 1889-1897.
Chen C L, Gao M, Ni J P, *et al*. Influence of spatial pattern of paddy field on the losses of nitrogen and phosphorus in Three Gorges Reservoir Area[J]. Environmental Science, 2017, **38**(5): 1889-1897.

[45] 蒋倩文, 刘锋, 彭英湘, 等. 生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2194-2201.
Jiang Q W, Liu F, Peng Y X, *et al*. Nitrogen and phosphorus removal by integrated ecological engineering treatment system in a small agricultural watershed[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2194-2201.

HUANJING KEXUE Vol. 43 No. 7
Environmental Science (monthly) Jul. 15, 2022

CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China ····· LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, *et al.* (3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model ····· PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, *et al.* (3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method ····· WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, *et al.* (3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in $PM_{2.5}$ in Xiamen Port ····· XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, *et al.* (3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing ····· ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, *et al.* (3416)
Analysis of $PM_{2.5}$ Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter ····· WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, *et al.* (3423)
Temporal Evolution and Source Appointment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019 ····· KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, *et al.* (3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan ····· WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, *et al.* (3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area ····· LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, *et al.* (3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019 ····· ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, *et al.* (3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain ····· GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang (3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an ····· ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, *et al.* (3494)
Spatial-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data ····· WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, *et al.* (3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze ····· CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, *et al.* (3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors ····· YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, *et al.* (3532)
Characteristics and Dfferences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period ····· JI Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, *et al.* (3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region ····· NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, *et al.* (3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perlyfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake ····· HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, *et al.* (3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake ····· WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, *et al.* (3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River ····· ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, *et al.* (3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff ····· ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, *et al.* (3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems ····· CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, *et al.* (3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths ····· WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, *et al.* (3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin ····· LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, *et al.* (3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water ····· PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, *et al.* (3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing ····· MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, *et al.* (3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition ····· HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, *et al.* (3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment ····· REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, *et al.* (3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd^{2+} ····· MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, *et al.* (3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors ····· LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, *et al.* (3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater ····· YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, *et al.* (3699)
Succession and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitritation and ANAMMOX Process ····· LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, *et al.* (3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge ····· GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, *et al.* (3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020 ····· XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, *et al.* (3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years ····· CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, *et al.* (3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst ····· HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, *et al.* (3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt ····· ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, *et al.* (3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area ····· SHANG Yu, SANG Nan (3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area ····· LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, *et al.* (3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China ····· WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, *et al.* (3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province ····· XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, *et al.* (3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility ····· ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, *et al.* (3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan ····· LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, *et al.* (3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems ····· SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, *et al.* (3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas ····· MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, *et al.* (3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three *Caragana* Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment ····· LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, *et al.* (3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas ····· XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, *et al.* (3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils ····· WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun (3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil ····· XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, *et al.* (3884)