

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.12

第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

- 京津冀秋冬季 PM_{2.5} 污染概况和预报结果评估 朱媛媛, 高愈霄, 刘冰, 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 汪巍, 丁俊男, 李健军, 段小丽 (5191)
- 2016 ~ 2017 年采暖期华北平原东部 PM_{2.5} 组分特征及来源解析 张逸琴, 王杰, 高健, 徐仲均, 车飞, 马彤, 杨艳, 刘素, 闫璐璐 (5202)
- 霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 王振彬, 刘安康, 卢文, 杨晓旻, 王红磊, 陈魁, 夏丽 (5213)
- 上海郊区家庭妇女 PM_{2.5} 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 罗燃燃, 戴海夏, 张蕴晖, 乔利平, 马英歌, 周敏, 夏斌, 朱清扬, 赵迎亚, 黄成 (5224)
- 固定污染源可凝结颗粒物测量方法 蒋靖坤, 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 郝吉明 (5234)
- 家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 张嘉妮, 曾春玲, 刘锐源, 姚懿娟, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (5240)
- 抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 竹涛, 吕怡蓉, 边文璟, 牛文凤, 袁前程, 段二红, 于洋, 林军 (5250)
- 新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 李琦路, 吴锦涛, 张颖, 孙玉静, 乔泓钦, 张子伟, 裴梦园, 张孟琼, 任明浩 (5258)
- 成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 方淑红, 朱和祥, 叶芝祥, 印红玲, 孙静 (5265)
- 祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 张百娟, 李宗省, 王昱, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 桂娟 (5272)
- 长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 封梦娟, 张芹, 宋宁慧, 卜元卿, 杨正标, 刘艳华, 郭瑞昕, 陈建秋, 张圣虎 (5286)
- 夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 程丽杰, 黄廷林, 程亚, 张莎莎, 阮昭意, 卢磊 (5294)
- 浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 刘俊萍, 于建全, 李青松, 马晓雁, 杨玉龙, 贾佳 (5302)
- 三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 陈昭宇, 李思悦 (5309)
- 川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 刘堰杨, 孙辉, 刘琛, 王小沁 (5318)
- 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 先宇, 王伟, 方芳, 欧阳文娟, 郭劲松 (5330)
- 九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 黄亚玲, 唐莉, 黄金良, 肖才荣 (5340)
- 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 田娜, 吴燕平, 阳文静 (5348)
- 太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 耿雪, 文帅龙, 孙培荣, 徐楚天, 李大鹏, 黄勇 (5358)
- 太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 方家琪, 祁闯, 张新厚, 韩睿明, 黄和笑, 王卓森, 王国祥 (5367)
- 降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 李晓虹, 雷秋良, 周脚根, 张亦涛, 李影, 胡万里, 武淑霞, 翟丽梅, 王洪媛, 刘宏斌 (5375)
- 外源 Ca²⁺ 和 K⁺ 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 吴丹, 孙萍, 陈广琳, 陈友媛, 彭昌盛 (5384)
- 泽泻 (*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 王团团, 李贝贝, 王赛, 华佩, 陈军, 应光国 (5394)
- 复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 刘冰, 郑煜铭, 李清飞, 赵承美, 魏巍, 张凯 (5401)
- 铅、镉和铜改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 刘婷, 赵钰颖, 林建伟, 詹艳慧, 秦琴 (5411)
- 生物炭结构性对氨氮的吸附特性影响 陈梅, 王芳, 张德俐, 易维明 (5421)
- 溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 王嗣禹, 刘灵婕, 王芬, 季民 (5430)
- 间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 李冬, 刘志成, 徐贵达, 李帅, 张杰 (5438)
- 共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 王茹, 刘梦瑜, 刘冰茵, 赵治国, 袁林江 (5446)
- 阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 魏子清, 劳会妹, 李帅, 张杰 (5456)
- 酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 俞心怡, 向金豪, 刘英, 龚天翼, 张彬辉, 吕文洲 (5465)
- 基于 GEE 的 1998 ~ 2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 娄佩卿, 付波霖, 林星辰, 闭璐, 马瑞雪, 唐廷元 (5473)
- 基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 解雪峰, 濮励杰, 朱明, 吴涛, 许艳 (5484)
- 淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO₂ 和 CH₄ 排放通量的影响 李敬, 黄佳芳, 罗敏, 刘育秀, 谭季, 朱爱菊, 王声钰, 仝川 (5493)
- 养殖塘 CH₄ 排放特征及其影响因素 王娇, 肖薇, 张秀芳, 张弥, 张文庆, 刘强, 陈争, 董保华, 李旭辉 (5503)
- 施肥对高梁地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 严俊霞, 张媛, 焦晓燕 (5515)
- 高硒高镉区土地安全区划方法 王锐, 侯宛苓, 李雨潼, 余涛, 陈娟 (5524)
- 不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 陈树兰, 许晨阳, 耿增超, 王强, 祝乐, 龚园, 拓卫卫 (5531)
- 水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 吴秋梅, 刘刚, 王慧峰, 胡文友, 黄标 (5540)
- 狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 黄健, 朱旭炎, 陆金, 孙雨, 赵兴青 (5550)
- 林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 王蕊, 吴宪, 李刚, 修伟明, 王丽丽, 张贵龙 (5561)
- 粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑
- 粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 常春英, 董敏刚, 邓一荣, 肖荣波, 刘丽丽 (5570)
- 粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 张宁, 张盛, 杨海超, 张建通 (5581)
- 城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响: 以粤港澳大湾区为例 马仕君, 周传斌, 杨光, 赵志岚, 刘懿颀 (5593)
- 粤港澳大湾区丘陵区带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 侯文隽, 龚星, 詹泽波, 刘锋, 黄子航, 杨立宏, 林晓琛 (5604)
- 粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 邓一荣, 陆海建, 董敏刚, 程洲, 庄长伟, 肖荣波, 钟音, 彭平安 (5615)
- 针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 刘千钧, 李想, 周阳媚, 唐杰鹏, 林亲铁, 姚琨 (5623)
- 广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 陈洁宜, 刘广波, 崔金立, 肖唐付 (5629)
- Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 林挺, 罗飞, 朱艳, 杨坤, 郝秀平 (5640)
- 《环境科学》第 40 卷(2019 年) 总目录 (5649)
- 《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)

三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征

曹瑞霞¹, 刘京¹, 邓开开¹, 先宇¹, 王伟¹, 方芳¹, 欧阳文娟², 郭劲松^{1*}

(1. 重庆大学环境与生态学院, 重庆 400045; 2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院三峡生态环境研究所, 重庆 400714)

摘要: 为了解三峡库区典型紫色土小流域径流污染特征, 对新政小流域典型土地利用类型下降雨-径流时间过程和小流域集水区出口径流中氮磷浓度进行动态监测, 监测分析库区小流域氮磷在降雨径流中的流失规律。结果表明, 小流域径流氮磷损失量分别为 $13.69 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $1.50 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。农肥所含氮磷及降雨冲刷是小流域径流污染的主要原因。小流域的总氮(TN)和总磷(TP)平均浓度达 $10.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 远超过富营养化发生标准, 须引起关注。本研究观测的两场降雨中, 8月15日降雨中硝态氮(NN)和颗粒态磷(PP)分别为 69.47 kg 和 6.83 kg, 分别占 TN 和 TP 的 53.91% 和 53.78%; 8月26日降雨中 NN、氨氮(AN)和 PP 分别为 6.68、5.61 和 1.36 kg, 分别占 TN 和 TP 的 37.74%、31.69% 和 57.63%, 表明氮素流失主要通过可溶态的方式, 而磷素迁移则以颗粒态为主。小流域强降雨对于氮磷流失的影响显著。这与紫色土土层薄、耕作频繁、土壤相对疏松等性质有关。

关键词: 三峡库区; 地表径流; 面源污染; 氮磷; 小流域

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)12-5330-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201903091

Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area

CAO Rui-xia¹, LIU Jing¹, DENG Kai-kai¹, XIAN Yu¹, WANG Wei¹, FANG Fang¹, OUYANG Wen-juan², GUO Jin-song^{1*}

(1. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Institute of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environments, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China)

Abstract: To understand the runoff pollution characteristics of the typical purple soil small watershed in the Three Gorges Reservoir (TGR), the rainfall-runoff duration under typical land use types of the Xinzhen watershed and the nitrogen (N) and phosphorus (P) concentrations in the outlet runoff of each catchment were dynamically monitored, and the loss rule of N and P in the rainfall runoff in the small watershed in the TGR was investigated and analyzed. The results showed that the losses of runoff N and P were $13.69 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ and $1.50 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, respectively. N and P in agricultural fertilizers and rainfall scouring were the main causes of runoff pollution in the Xinzhen watershed. The average concentration of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) reached $10.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $1.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, far exceeding the occurrence standard of eutrophication, which should be cause for concern. The nitrate nitrogen (NN) and particulate phosphorus (PP) in the rainfall were 69.47 kg and 6.83 kg on August 15, 2010, accounting for 53.91% and 53.78% of TN and TP, respectively. The NN and AN were 6.68 kg and 5.61 kg, respectively, in the rainfall on August 26, 2010, accounting for 37.74% and 31.69% of TN and PP was 1.36 kg, accounting for 57.63% of TP, indicating that nitrogen loss was mainly through the soluble state, while phosphorus migration was dominated by particulate matter. Heavy rainfall in the Xinzhen watershed had a significant impact on the loss of nitrogen and phosphorus. This was related to the properties of purple soil, such as thin soil layer, frequent cultivation and relatively loose soil.

Key words: Three Gorges Reservoir area; surface runoff; non-point source pollution; nitrogen and phosphorus; small watershed

三峡水库是我国重要的淡水资源库和长江中下游水环境安全的屏障^[1]。紫色土坡耕地是我国西南地区重要的农耕地, 在三峡库区占耕地总面积的 78.7%。紫色土土壤基岩较浅, 土层浅薄, 保肥能力差, 可侵蚀性高, 是三峡库区 N、P 农业面源主要来源地之一^[2~4]。有研究发现, 在紫色土丘陵区每年通过径流、淋洗和泥沙而损失的氮素可高达 $44 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[5]。刘方谊等^[6]发现湖北省三峡库区地表径流磷流失强度达 $1.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。径流氮磷流失所造成的面源污染已引起国内外学者的重视, 但是目前国内的研究多侧重于通过室内模拟降雨条件以及

野外小型径流实验区来观测氮磷流失负荷情况, 集中于不同土地利用方式对 N、P 流失的影响等^[7~10], 对小流域尺度下降雨及径流特征与 N、P 迁移负荷之间相关性的研究还较少。

近年, 由暴雨径流产生的冲击性农业面源污染已引起人们的普遍关注^[11]。降雨径流中夹带大量的氮、磷和有机污染物等营养物质^[12,13]。国内外就

收稿日期: 2019-03-11; 修订日期: 2019-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771520, 41430750)

作者简介: 曹瑞霞(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染处理, E-mail: caoruixiazz@163.com

* 通信作者, E-mail: Guo0768@126.com

降雨过程中土壤养分迁移与流失开展了大量研究工作,结果表明土壤养分迁移是一个复杂的物理化学过程,受降雨特征、下垫面条件、土壤特性等因素的影响^[14,15]。华玲玲等^[16]和张林等^[17]分别在三峡库区古夫河小流域和兰陵溪小流域建立了降雨径流与 N、P 输出负荷之间的关系,结果表明 N、P 迁移量随径流量的增大而增大。同时也表明,降雨事件中流失的 N、P 污染物在其一年迁移的总量中占主导地位^[18]。为此,本文以重庆忠县石宝镇新政小流域为研究对象,通过监测降雨及径流过程特征和径流中氮磷迁移转化特征,统计紫色土小流域典型土地利用类型下,径流过程中 N、P 负荷对年总负荷及进入水体的总量的占比,并明确暴雨径流污染对非点源污染的贡献率,以期为径流过程中养分截留和农业面源污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本文选择重庆忠县石宝镇新政小流域为研究对象,地理位置(108°10'E,30°25'N)如图1。区域属亚

热带东南季风气候,四季分明,年均气温 19.2℃,最高气温 42.1℃,最低气温 5.3℃。雨量充沛,年均降雨量 1 150 mm,无霜期 320 d 左右,日照充足,适宜多种农作物生长。小流域低山起伏,田土错落,呈典型浅丘地貌。小流域内以农业为主,农业种植类型包括坡上果林、坡下旱地、水田和坡脚(三峡库区库岸带)水田。果林种植脐橙,林下生长牧草,旱地种植玉米、小麦、油菜、蔬菜等,水田种植水稻。小流域总面积 45.47 hm²,其中果林 25.3 hm²,旱地 11.3 hm²,水田 8.87 hm²。小流域内土壤类型为紫色土,富含钙、磷、钾等营养元素,一般呈中性或微碱性。实验区土壤基本理化性质如下:pH 7.58、有机质 16.55 g·kg⁻¹、全氮 1.04 g·kg⁻¹、全磷 0.61 g·kg⁻¹、碱解氮 81.68 mg·kg⁻¹、速效磷 104.11 mg·kg⁻¹和速效钾 168.78 mg·kg⁻¹。该小流域 3 面环山,具有较好的封闭性,较完整的沟渠系统,降雨产流后,径流依次进入毛细沟、支沟、干渠,最终通过小流域唯一出口进入长江。毛细沟、支沟为人工开挖的土渠。干渠为人工开挖后修葺的石砌渠,宽 1.3 m,深 1.0 m。

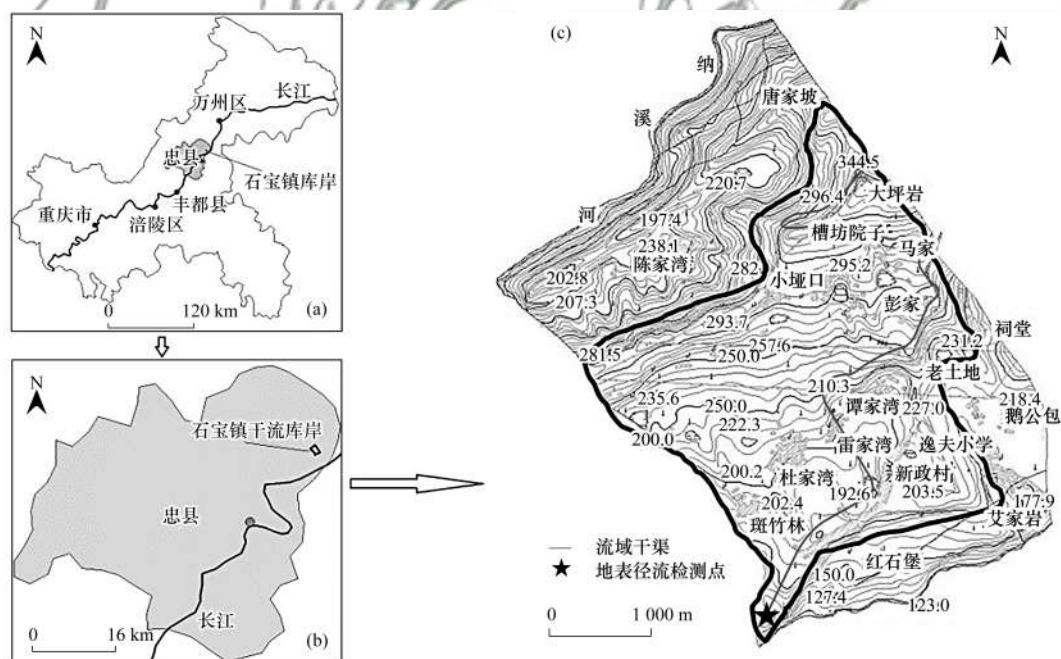


图1 新政小流域地理位置示意

Fig. 1 Location of the Xinzheng watershed

1.2 降雨量和径流量监测

三峡库区水土流失与面源污染实验观测站位于研究区小流域内,可实时监测降雨过程,并实时记录降雨量和降雨历时。因新政小流域具有较为完整的沟渠系统,为准确观测小流域的径流过程和径流量,以小流域唯一出水口为监测点,设置规则直角三角堰,通过配备水位自动监测仪,采样时记录水位变化,根据“水位-流量”关系曲线获得实时流量。

1.3 采样方法及时间

径流受控于降雨特性,前期调研表明该地区能形成径流的降雨主要集中在每年的4~10月。研究选择2~3场能形成明显径流的暴雨进行全过程监测,记录自降雨开始到径流产生的时间,即产流历时。径流产生后,在监测点采集携带泥沙的瞬时水样作为径流样品,前30 min时每5 min采样一次,30~60 min时每10 min采样一次,之后采样时间间隔

视流量变化情况,在 15 ~ 60 min 范围内调整,直至降雨产流结束,并在降雨结束后的 24 h、48 h 采集沟渠内仍然存在的径流样品. 采样时同步记录三角堰水位、流速、采样时间. 采样时在样品中加入 5 ~ 6 滴浓硫酸,并立即将样品送回实验室,放入 4℃ 冰箱保存,48 h 内分析完毕.

1.4 分析方法

水样分析指标包括总氮(TN)、溶解性总氮(DN)、硝态氮(NN)、亚硝态氮(NO_2^- -N)、氨氮(AN)、总磷(TP)和溶解性总磷(DP). TN 和 TP 用摇匀后的水样直接测定;DN、AN、NN 和 DP 用经 0.45 μm 滤膜过滤后的水样测定. TN 和 DN 采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定;紫外分光光度法测定 NN;纳氏试剂分光光度法测定 AN;N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定 NO_2^- -N;过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法测定 TP 和 DP. 溶解性无机氮 = $\text{NN} + (\text{NO}_2^- - \text{N}) + \text{AN}$,颗粒态氮(PN) = $\text{TN} - \text{DN}$,颗粒态磷(PP) = $\text{TP} - \text{DP}$.

1.5 数据处理

径流平均浓度 EMC:由于受降雨强度、污染物本身性质等影响,使得任意径流事件中污染物浓度变化范围较大,随机性强. 在实际降雨-径流过程中,采用次降雨径流平均浓度^[19] (event mean concentration, EMC) 来计算每场降雨的平均浓度,EMC 可表达为:

$$\text{EMC} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{Q_i c_i + Q_{i+1} c_{i+1}}{2} \times \Delta t}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \times \Delta t} \quad (1)$$

式中,EMC 为流量加权平均浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Q_i 和 Q_{i+1} 为两个相邻监测时刻的径流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; c_i 和 c_{i+1} 为第 i 和 $i+1$ 次取样时该养分在径流中的质量

浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Δt 为相邻两次取样时间间隔, s; n 为样品数量.

径流系数 α :是指任意时段内小流域的径流量与该时段小流域降雨量的比值. 该系数综合反映了小流域自然地理因素对降雨形成径流的影响,能较好地反映小流域汇水的过程特点,是衡量小流域产流能力的无量纲量. 径流系数见计算公式(2):

$$\alpha = 0.1 \times \frac{\left(\sum_{i=1}^{n-1} \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \times \Delta t \right)}{\left(\sum_{i=1}^{n-1} \frac{P_i + P_{i+1}}{2} \times A \right)} \quad (2)$$

式中, α 为径流系数; P_i 、 P_{i+1} 为与 Q_i 、 Q_{i+1} 相对应的降雨量, mm; A 为汇水区面积, hm^2 ; Δt 为相邻两次取样时间间隔, s; n 为样品数量; 0.1 为单位换算系数.

径流非点源污染负荷 L 计算:新政小流域三面环山,地理位置较为偏僻,且降雨多从午夜开始,时常存在雷电天气,故难以对每场降雨进行径流监测. 因此,通过年降雨量来估算新政小流域全年径流污染负荷,计算公式如下:

$$L = 0.001 \times \alpha \times P \times A \times \text{EMC} \quad (3)$$

式中, L 为年污染负荷, kg; α 为径流系数; P 为年降雨量, mm; A 为汇水区面积, hm^2 ; EMC 为流量加权平均浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 0.001 为单位换算系数.

实验数据采用 Origin 8.0 和 SPSS 21.0 进行分析和作图.

2 结果与分析

通过忠县气象站点获得新政小流域的年降雨量数据. 1990 ~ 2011 年年均降雨量为 1 171.4 mm,由降雨累积频率发现(图 2),枯水年降水量小于 1 034 mm,丰水年降水量大于 1 340 mm,平水年降水量介于两者之间. 本实验研究观测年 2010 年,年降雨量

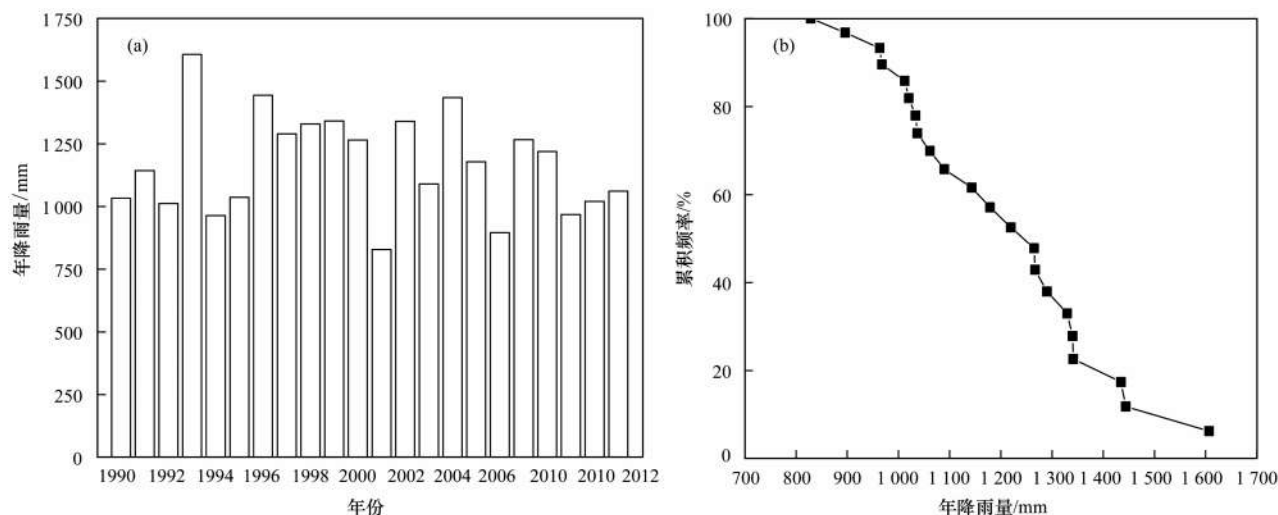


图 2 1990 ~ 2011 年年降雨量及降雨累积频率

Fig. 2 Annual rainfall from 1990-2011 and rainfall cumulative frequency map

为 1 020.4 mm, 属于枯水年, 相对应的频率为 3.96%, 累积频率为 81.88%。

2.1 降雨量与径流量

由图 3 可知, 新政小流域降雨主要集中在 4~10 月, 累积降雨为 789.4 mm, 占全年降雨总量的 85.2%, 8 月和 9 月大暴雨更为集中。全年共降雨 106 场, 平均降雨量 8.76 mm, 降雨历时 (9.85 ± 2.59) h。其中历时小于 10 h 的共 70 场, 大于等于 10 h 的共 36 场。径流量主要受控于降雨特性, 包括降雨量和降雨历时。观测表明只有当次降雨量达到 24 mm 时, 才会产生明显的径流现象。降雨量大于 24 mm 共 11 场, 累积降雨量达 400.4 mm。由图 3 可知全年降雨场次中, 有明显径流的共 11 场。本文选择了两场典型降雨事件来分析径流量和降雨量关系。8 月 15 日最大暴雨事件, 总降雨量为 95.4 mm, 最大雨强为 $26.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 历时 13 h; 8 月 26 日大雨事件, 总降雨量为 35.6 mm, 最大雨强为 $3.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 历时 18 h。

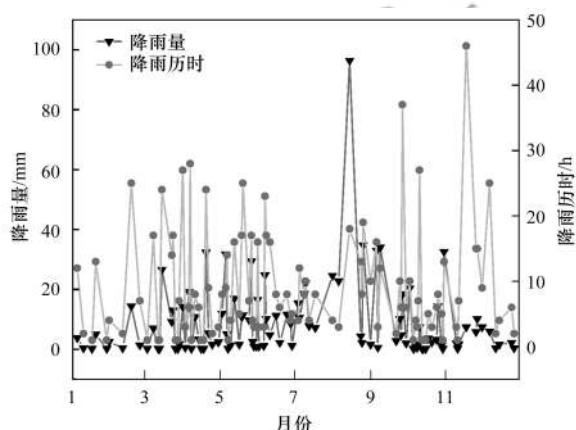


图 3 2010 年新政小流域降雨量及降雨历时

Fig. 3 Rainfall and rainfall duration in the Xinzheng watershed during 2010

图 4 为 8 月 15 日和 8 月 26 日两场降雨的降雨

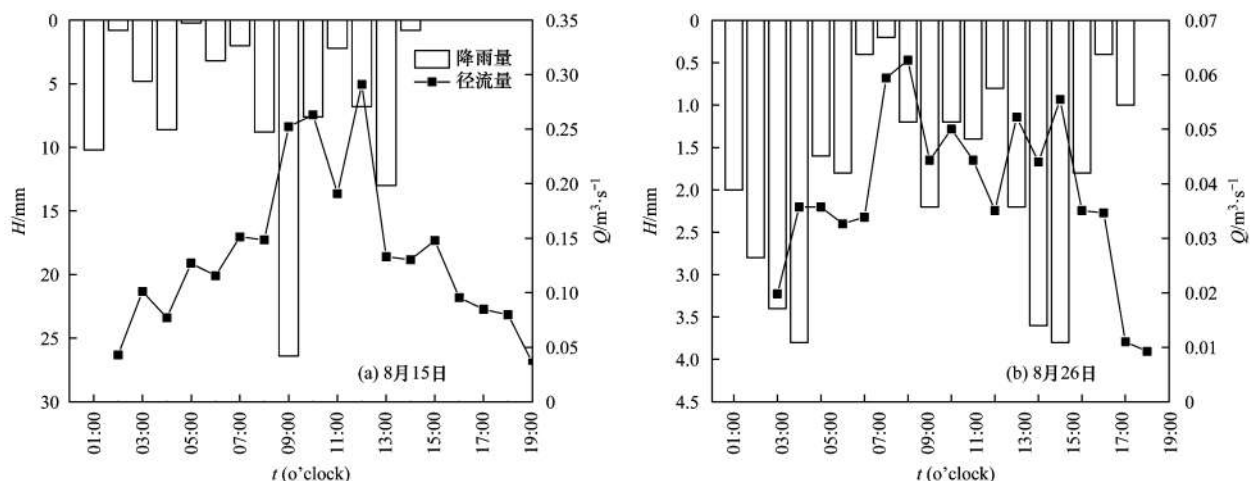


图 4 径流量和降雨量随时间变化

Fig. 4 Graph of runoff and rainfall over time

量和径流量关系。从中可知, 小流域两场降雨事件中径流量在降雨后产生明显的双峰现象, 且曲线响应趋势大致相同。8 月 15 日降雨持续 1 h 后开始产流, 径流的最大峰值出现在降雨量峰值后 3 h, 峰值流量为 $0.291 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 流量峰值出现时降雨总量达 81.6 mm, 累积流量 5738.44 m^3 。8 月 26 日降雨事件表现为突出的“滞后效应”, 径流流量最大峰值为 $0.0627 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 滞后于降雨量峰值 5 h, 本次降雨的瞬时雨强较小, 径流量整体波动范围较小, 几乎对降雨峰值无明显响应。

此外分析可知, 雨强集中的强降雨过程径流峰值出现较早, 径流量和降雨量呈现相似的消长变化特征, 具有一定的正相关关系 (8 月 15 日 $r=0.516$, 8 月 26 日 $r=0.456$), 并且流量峰值滞后于降雨量。出现这一现象的原因与小流域内进行坡耕地改造、有效植被覆盖、土壤持水能力增强有关。分析降雨-径流过程发现, 降雨初期, 监测断面水位迅速上升, 后期水位缓慢下降。前期降雨在小流域内的滞留时间对后期的产流具有重要影响, 使得径流过程呈急涨缓跌特征。这是因为小流域内土壤为紫色土, 土层浅薄, 土层下方是透水性较低的紫色砂页岩。当发生强降雨时, 会首先在地表层迅速形成径流, 然后快速通过表层土到达紫色砂页岩, 但却难以继续下渗, 只能以壤中流的方式顺坡汇入较低处的地表径流中, 进而补充径流的退水水量, 使径流退水时水位呈缓慢下降特征。

2.2 径流氮磷迁移特征

2.2.1 氮迁移特征

径流的形成和变化过程直接影响到养分的流失过程。新政小流域径流氮浓度和径流量关系如图 5 所示。分析发现, 在径流量形成明显峰值之前, 小流域内径流总氮和硝态氮的浓度已形成明显的峰值,

两次降雨前期过程 TN 峰值浓度分别为 $16.96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NN 的峰值浓度分别为 $11.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $3.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而后随降雨时间的延长, 径流总氮和硝态氮浓度平缓降低. 本研究结果与杨帆等^[20]的研究结果相似. 变化的机制在于, 产流初期虽然径流量不大, 但是暴雨产生的初始冲刷效应及稍后的累加效应共同作用, 导致大量污染物随雨水的冲刷汇入径流之中, 径流各形态氮素浓度在短时间内迅速增加达到峰值. 随着降雨径流过

程的延续, 径流量增加, 降雨量、淋溶和壤中流的稀释作用逐渐占主导地位, 径流各形态氮素浓度呈现下降趋势, 并逐渐趋于稳定. 在 8 月 26 日降雨过程后期, 径流 TN 和 NN 出现第二个浓度峰值, 但相较于径流初期峰值浓度较低. 主要有两方面的原因, 一是此阶段径流量逐渐下降, 径流稀释作用降低; 二是壤中流起到主导作用, 其所含氮素浓度相对较高. 因此, 在径流峰值后期, 小流域内径流氮浓度出现缓慢增加的趋势, 呈现第二个峰值.

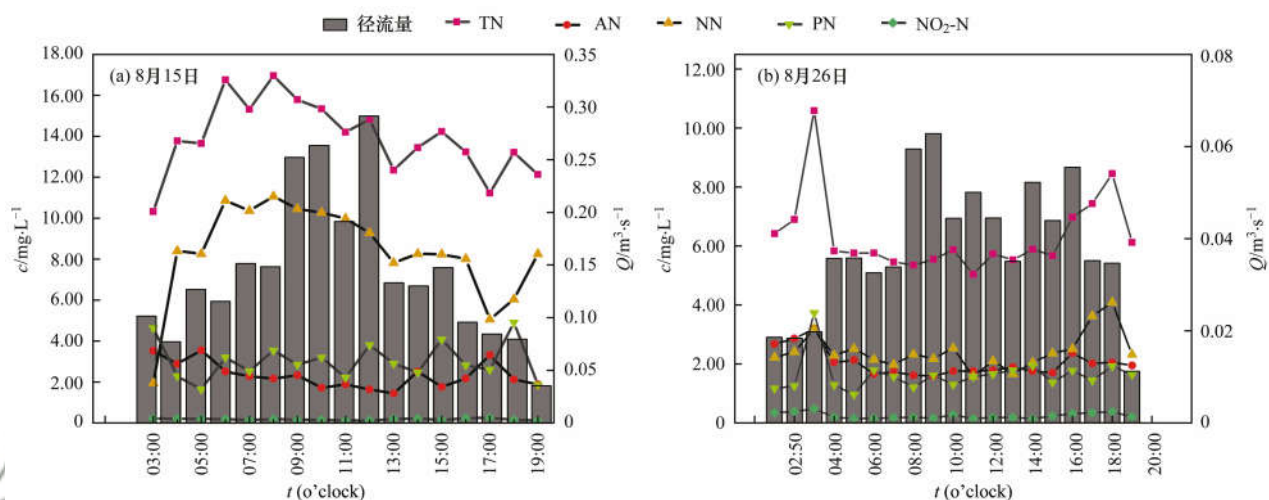


图5 径流含氮和径流量随时间变化

Fig. 5 Graph of runoff N and runoff over time

此外分析还发现, 8 月 15 日降雨径流中氮素浓度总体上高于 8 月 26 日的氮素浓度. 一是由于前者较于后者属于暴雨, 具有历时短冲击负荷大等特点, 径流量的增加导致其夹带的污染物浓度增加. 二是因为两场降雨间隔时间较短, 中间无施肥翻土等行为, 第一次降雨过程中, 由于暴雨初始冲刷效应使得土壤中残留的化肥氮冲刷出来, 土壤中各种形态氮素经过第一次雨水冲刷, 因此导致 8 月 26 日各种氮浓度较低.

本研究还发现 AN 浓度和 PN 浓度前期变化较大, 呈现此消彼长的趋势, 初期 AN 水平较高, 两次降雨峰值浓度分别为 $3.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $3.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随后呈平缓下降趋势, 最小值分别为 $1.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 查阅已有研究可知, 径流 AN 主要通过吸附于土壤表面颗粒进行输移^[21], 在径流过程中所受影响较多, 变化较为复杂, 与径流、淋溶等过程以及土壤类型、植被覆盖和农业措施等有关. 新政小流域属于典型的农业区, 日常耕作施用大量肥料, 有机氮经矿化作用转化为氨氮并富集在土壤表层, 而土壤本身固定氨氮的能力有限, 降雨产流后, 地表冲刷使得小颗粒土壤挟带氨氮随水体迁移, 从而使得径流初期 AN 浓度较高. 随后径流量逐渐降

低, 伴随的各种形态氮素浓度也随之下降, 此时淋溶过程占主导地位, 淋溶氮以 NN 形式为主. 此外, 土壤颗粒对 AN 的吸附作用削弱了壤中流对总径流量中 AN 的补充.

总的来说, NN 变化趋势符合 TN 变化过程 (8 月 15 日 $r=0.899$, 8 月 26 日 $r=0.756$), 说明降雨-径流过程中 NN 控制着 TN 变化, NN 对暴雨事件的响应显著. NN 在土壤中形态较为稳定, 与土壤颗粒之间的作用力较弱, 在雨水的冲刷以及径流的溶解和浸提作用下极易随之流失. 另外, 由图 6 可知, NN 在两场降雨径流过程中分别占 TN 的 20% ~ 70% 和 30% ~ 50%, 主要是由于其在径流过程中受泥沙及其他离子作用的影响较小, 表明径流过程中氮素迁移主要通过 NN 的方式. 由图 6(b) 还发现, 在 8 月 26 日次降雨过程中 AN/TN 值和 NN/TN 值呈波浪形起伏且总体大于 PN/TN, 说明 NN 和 AN 是此次降雨径流氮素流失的主要方式. 综上所述, 新政小流域径流氮素流失的主要途径以可溶态氮为主.

2.2.2 磷迁移特征

小流域径流磷浓度变化如图 7. 观测结果表明, 产流初期, 小流域内径流总磷的浓度已达峰值, 两次降雨-径流过程的总磷峰值浓度分别为 $1.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

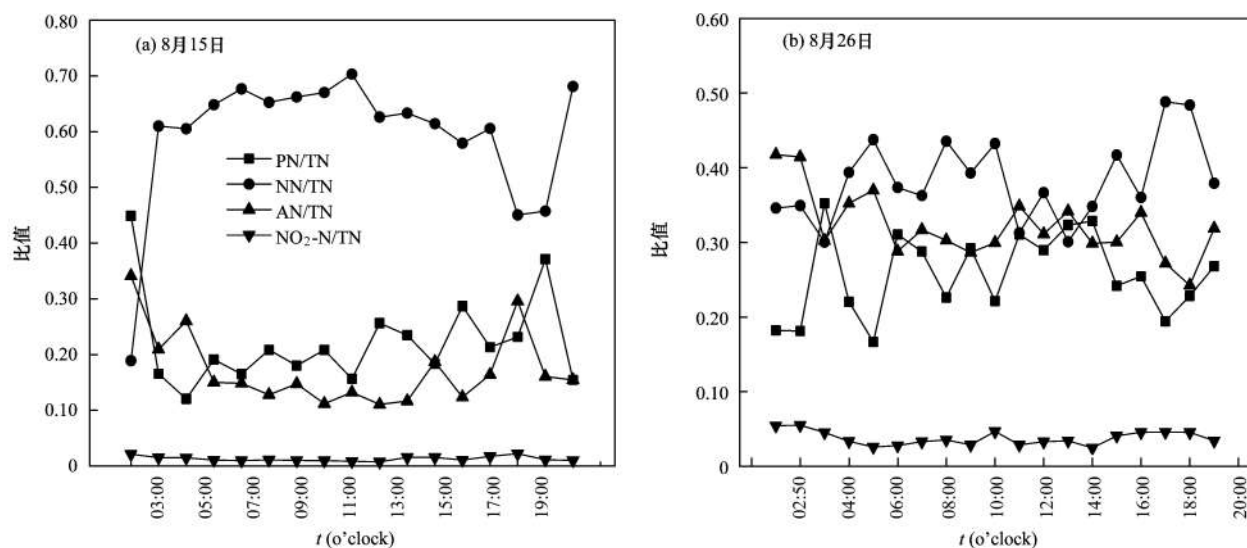


图6 不同形态氮比值在径流过程中的变化

Fig. 6 Variation of different forms of nitrogen ratio during runoff

和 $1.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而后随径流量的增加, 其表现为缓慢下降的趋势, 直到径流量达到峰值以前, 此后, 随着径流量的下降, 径流磷浓度表现逐渐增加的趋势, 直至达到第二个峰值. 分析原因和径流氮变化趋势相似, 径流初期由于暴雨冲刷, 小流域内磷素浓度迅速达到峰值, 后期随着径流量的增加, 壤中流及地下径流成分在增加, 径流与土壤的接触逐渐充分, 径流的浸提力也有所增加^[22], 因此出现第二个浓度峰值. 两场降雨 TP 浓度峰值分别为 $2.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 并且其他磷素指标总体也呈现前者高于后者的特点.

由图 7 可知, 两场降雨过程中 PP 和 TP 呈现相同的变化趋势, DP 的变化趋势与 PP 和 TP 不同, 具体表现为在降雨初期出现峰值, 而后浓度随时间变化相对平缓, 呈波浪形特点. 一是因为 PP 属于次降雨径流过程中大量流失的营养元素之一, 其和土壤颗粒之间存在吸附作用, 在径流冲刷作用下从土壤

颗粒中解吸而流失. 第二, 小流域农业耕作时施用大量肥料, 矿化作用使大量无机磷在土壤表层富集. 径流初期, 大量溶解态磷随着雨水的初始冲刷效应汇入水体, 随后浸出量逐渐稳定. 降雨结束后, 由图 4 和图 7 结合可知, 虽然径流仍不断流出, 但各形态磷素均呈降低的趋势. 分析原因和氮素相同, 降雨带来的冲击负荷消失后, 壤中流和地下径流的稀释作用占主导地位, 仅有少量地表富集水流出, 所以磷素量开始减少.

此外, 有研究发现, 紫色土小流域地表径流磷素流失通常以颗粒态磷为主, 而溶解态磷是壤中流磷素流失的主要形态^[23,24]. 在本研究中, 8月15日降雨初期 PP 浓度相较于 DP 浓度高, 但降雨后期出现 DP 浓度超过 PP 的情况, 这是因为第一场降雨属于暴雨, 雨滴在地表迅速汇集形成地表径流, 降雨径流的强烈冲刷作用, 紫色土表层土壤浅薄, 易被剥离、释放出细颗粒结合态, 径流中 PP 浓度增加; 降雨后

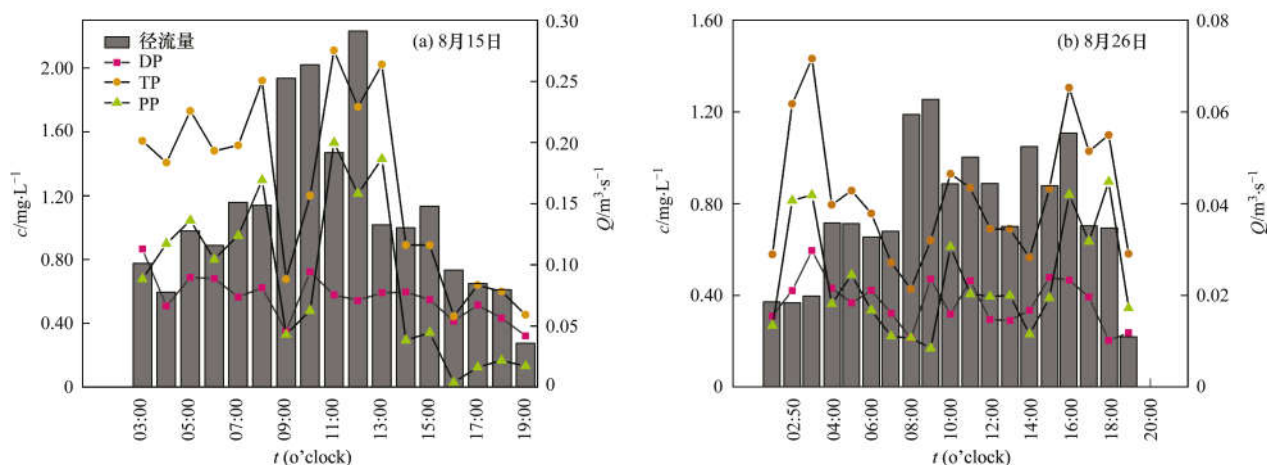


图7 径流含磷和径流量随时间变化

Fig. 7 Graph of runoff P and runoff over time

期雨强减小,对土壤中 PP 的冲击力相应减小而同时壤中流增加,径流的浸提力随之增加,故出现 DP 浓度大于 PP 浓度的情况. 由图 8 发现,8 月 26 日降雨的 PP/TP 和 DP/TP 值范围上下波动,主要是因为两场降雨间隔较近且中间无施肥、翻土等农作活动,降雨后者土壤中残留的磷污染物小于前者. 经过 8 月 15 日次强降雨的冲击,土壤中残留的 PP 浓

度本身较低,再加上 8 月 26 日次降雨量和径流量均较小,壤中流在本次降雨中起主导作用,导致 PP 浓度和 DP 浓度相近.

通过小流域磷素流失负荷计算,两次降雨径流过程中 PP 流失量占 TP 流失量百分比的平均值分别为 53.78% 和 57.63%,略高于 DP 所占 TP 的比值,说明紫色土小流域磷素的迁移形态主要以 PP 为主.

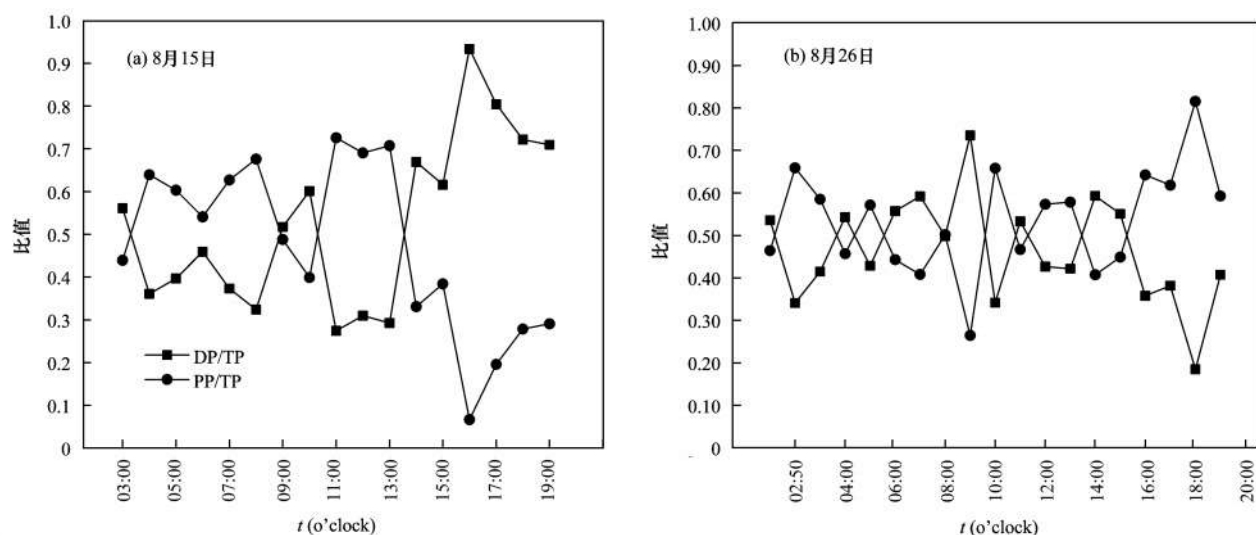


图 8 不同形态磷比值在径流过程中的变化
Fig. 8 Variation of different forms of phosphorus ratio during runoff

3 讨论

3.1 径流系数分析

研究区域小流域径流系数受土地利用类型、下垫面条件、降雨强度等因素影响,反映了小流域内的径流产水能力. 径流系数越大,说明降雨越不易被土壤吸收. 查阅文献发现,潮河流域 1961~2014 年均径流系数为 0.04~0.14^[25],径流量较小,主要受研究区域人类活动和气候因素的影响. 晋西黄土丘陵区圪洞流域年径流系数 0.15~0.3,且呈线性递减趋势,具体原因是由于流域内大面积植树造林,增加了植被截留和入渗,从而减少了径流量^[26]. 广东典型稻田系统年径流系数为 0.47~0.81^[27],其中降雨量是影响径流系数的主要因素. 在本研究中,径流系数在数值上是年径流深和年降雨量的比值,而年径流深又可以通过年径流总量和汇水区面积的比值来得到(即为径流系数=年径流深/年降雨量,年径流深=年径流总量/汇水区面积),因此通过数据汇总并计算可知,新政小流域径流系数为 0.34,高于潮河流域和晋西黄土丘陵区圪洞流域的径流系数,但低于广东典型稻田系统的径流系数,表明除降雨特性以外,小流域内土壤性质、植被覆盖面积,农户耕作方式等都对径流系数产生一定影响.

植被类型及覆盖率作为下垫面条件是影响流域

径流系数的关键因素. 樊才睿等发现^[28],植被截留对降雨具有明显的缓冲作用,可有效地减少径流系数. 左继超等^[29]通过原位观测和模拟实验结果表明,相比于裸露处理,植被覆盖处理径流贡献较少,总磷累积输出量较低,表明植被截留、吸收等影响径流污染负荷. 王荣嘉等^[30]通过实验发现,鲁中南山区典型林地麻栎林的地表径流量、氮磷流失量均小于荒草地,具体有两方面的原因. 一是由于林地枯落物的覆盖层,有效减少土壤中水分的蒸发,土壤水分贮存量因此增加,地表径流减少;二是植被覆盖度增加,根系孔隙增加,促进地表径流下渗,有效减少氮素的流失.

本研究的小流域坡上种植了大量的脐橙(果树)林,坡下主要是旱地和水田,坡面平缓. 坡上果林和林下牧草形成良好的果林生态系统,有效地植被覆盖在提升了土壤固持能力的同时也提升了果林调节吸持径流的能力,大量的地表径流下渗转化为壤中流,从而延长了产流历时过程,降低了径流流失量. 此外,坡下主要是旱地和水田,地势相对较为平缓,并且紫色土土壤空隙较大,大量雨水迅速汇集转化为地下径流和壤中流,地表径流总量降低,从而使径流系数较小.

3.2 新政小流域径流氮磷负荷分析

对两场降雨产生的径流量和氮磷流失负荷统计

计算见表 1。8 月 15 日整个降雨过程产生径流量 9 377.41 m³, 径流流失 TN 和 TP 分别为 133.01 kg 和 12.70 kg, PN 和 PP 分别为 36.98 kg 和 6.83 kg, 分别占 TN 和 TP 的 27.80% 和 53.78%。8 月 26 日

整个降雨过程产生径流量 2 781.68 m³, 径流流失 TN 和 TP 分别为 17.70 kg 和 2.36 kg, PN 和 PP 分别为 4.71 kg 和 1.36 kg, 分别占 TN 和 TP 的 26.61% 和 57.63%。

表 1 新政小流域两场降雨径流过程中养分输出负荷

Table 1 Nutrient output during two rainfall events in the Xinzheng watershed

日期(年-月-日)	累积流量/m ³	负荷/kg							
		TN	AN	NN	PN	NO ₂ ⁻ -N	TP	DP	PP
2010-08-15	9377.41	133.01	24.70	69.47	36.98	1.86	12.70	5.87	6.83
2010-08-26	2781.68	17.70	5.61	6.68	4.71	0.70	2.36	1.00	1.36

根据两场降雨量占年降雨量的比例以及研究区域的地表径流监测结果, 新政小流域观测年的养分流失负荷估算见表 2。通过计算, 小流域内 TN、AN、NN、PN、NO₂⁻-N、DP、TP 和 PP 的

径流负荷分别为 13.69、3.11、6.51、3.76、0.30、0.67、1.50 和 0.83 kg·(hm²·a)⁻¹。以上结果表明, 降雨径流过程对小流域氮磷流失贡献巨大, 须引起重视。

表 2 新政小流域降雨径流过程中养分的年平均浓度和年流失量

Table 2 Annual average concentration and annual loss of nutrients during rainfall in the Xinzheng watershed

污染物	TN	AN	NN	PN	NO ₂ ⁻ -N	TP	DP	PP
浓度/mg·L ⁻¹	10.05	2.28	4.78	2.76	0.22	1.10	0.49	0.61
年流失量/kg·a ⁻¹	622.48	141.41	296.46	170.97	13.64	68.14	30.40	37.74

对降雨期间氮磷流失浓度和径流量的相关性分析结果见表 3, 从中可知 TN 和 NN 与径流量均呈现极显著的正相关关系 ($P < 0.01$), 出现这一结果的原因是: 在降雨-径流过程中 NN 浓度远高于 AN 和 NO₂⁻-N 浓度, 可溶态氮的迁移以硝态氮为主, 使得 TN 和 NN 在整个降雨过程中变化趋势相同。这一结论表明降雨径流是小流域内 TN 和 NN 流失的主要驱动力。AN 与径流量没有明显的相关性, 主要是因为降雨并形成径流的过程中, 小流域水系有较强的曝气效应对 AN 的挥发和氧化作用可能远大于

径流的影响, 同时还有泥沙吸附-解吸过程等影响因子的共同作用。NO₂⁻-N 与径流量呈显著负相关, 主要是由于 NO₂⁻-N 在径流污染中负荷较低且在径流过程中因曝气效应氧化为 NN 所致。PN 和径流量呈显著正相关关系 ($P < 0.05$), 地表冲刷效应使得 PN 随地表径流输出。TP、DP 和 PP 与径流量均呈显著正相关, 但相关性小于 TN 和 NN。分析原因可能是在研究区域内, 土壤中磷素的流失除了受暴雨冲刷产生的影响外, 磷素在降雨径流中的迁移受到植被覆盖度、下垫面等因素的影响较大。

表 3 降雨过程中径流量和养分损失相关性分析结果¹⁾

Table 3 Correlation analysis of runoff and nutrient output in rainfall

项目	TN	AN	NN	PN	NO ₂ ⁻ -N	DP	TP	PP
径流量	0.780 **	0.021	0.796 **	0.534 *	-0.418 *	0.540 *	0.506 *	0.409 *

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

新政小流域年径流氮磷流失量分别为 13.69 kg·(hm²·a)⁻¹ 和 1.50 kg·(hm²·a)⁻¹, 径流氮磷总损失量分别为 622.48 kg·a⁻¹ 和 68.14 kg·a⁻¹。有研究表明径流氮磷污染是造成地表水体富营养的重要原因之一^[31], 也是威胁三峡水环境安全的重要因素。小流域内 TN 和 TP 年平均浓度分别为 10.05 mg·L⁻¹ 和 1.10 mg·L⁻¹, 远高于富营养化发生标准 (TN: 0.2 ~ 0.3 mg·L⁻¹, TP: 0.01 ~ 0.02 mg·L⁻¹), 说明径流氮磷负荷是三峡库区水环境的威胁。因此, 亟待通过土地利用类型的优化配置, 研究推广水土保持耕作法和施肥制度, 建立农田清洁生产的测

报与评价系统、制定农田施肥污染防治措施以及切实实行生态农业政策, 从而实现对径流污染的有效消减。

4 结论

(1) 三峡库区小流域内降雨量和降雨历程是影响径流过程的主导因素, 其次是植被类型和覆盖率。

(2) 三峡库区小流域强降雨对于氮磷流失的影响显著。8 月 15 日降雨中 NN 和 PP 分别为 69.47 kg 和 6.83 kg, 分别占 TN 和 TP 的 27.80% 和 53.78%; 8 月 26 日降雨中 NN、AN 和 PP 分别为 6.68、5.61 和 1.36 kg, 分别占 TN 和 TP 的

37.74%、31.69%和57.63%。表明新政小流域降雨径流过程中可溶态氮(主要是NN)是氮素流失主要方式,PP为磷素流失的主要形式,这与氮磷与土壤颗粒的结合形态以及紫色土土层浅薄、耕作频繁、相对疏松等特征有关。

(3)小流域径流氮磷损失量分别为13.69 kg·(hm²·a)⁻¹和1.50 kg·(hm²·a)⁻¹,TN和TP年平均浓度达10.05 mg·L⁻¹和1.10 mg·L⁻¹。农肥施用及降雨冲刷是引起小流域径流污染的主要原因。亟待通过土地利用类型的优化配置,研究并推广水土保持耕作法和施肥制度,从而实现对径流污染的有效消减。

参考文献:

- [1] Zhang T, Ni J P, Xie D T. Assessment of the relationship between rural non-point source pollution and economic development in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(8): 8125-8132.
- [2] 陈成龙, 高明, 木志坚, 等. 三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系[J]. *环境科学*, 2017, **38**(8): 3254-3263.
Chen C L, Gao M, Mu Z J, *et al.* Characteristics and the relationship of nitrogen and phosphorus in soil and water of different land use types of a small watershed in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3254-3263.
- [3] Ge F L, Zhang J H, Su Z A, *et al.* Response of changes in soil nutrients to soil erosion on a purple soil of cultivated sloping land [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(2): 459-463.
- [4] 罗专溪, 朱波, 汪涛, 等. 紫色土坡地泥沙养分与泥沙流失的耦合特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, **17**(3): 379-383.
Luo Z X, Zhu B, Wang T, *et al.* Artificially simulated coupling characteristics of different sediment nutrient with sediment losses in slopland of purple soil, China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, **17**(3): 379-383.
- [5] 田琳琳, 任光前, 朱波. 紫色土丘陵区农田源头沟渠一氧化氮排放的季节差异及影响因素[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1952-1961.
Tian L L, Ren G Q, Zhu B. Seasonal variation in nitric oxide emission from an agricultural headwater ditch in the hilly purple soil area and the factors influencing emission [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1952-1961.
- [6] 刘方谊, 夏颖, 黄敏, 等. 湖北省三峡库区不同种植模式下农田地表径流氮磷流失特征[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, **35**(6): 550-558.
Liu F Y, Xia Y, Huang M, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus losses from farmlands through surface runoff under different cropping patterns in the Three Gorges Reservoir area of Hubei Province [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, **35**(6): 550-558.
- [7] 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.
- [8] 马骞, 于兴修, 刘前进, 等. 沂蒙山区不同覆被棕壤理化特征对径流溶解态氮磷输出的影响[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(7): 1526-1536.
Ma Q, Yu X X, Liu Q J, *et al.* Effect of physicochemical properties of brown earth under different land cover in the Yimeng mountainous area on the output of dissolved nitrogen and phosphorus in runoff [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(7): 1526-1536.
- [9] 秦延文, 韩超南, 郑丙辉, 等. 三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2152-2159.
Qin Y W, Han C N, Zheng B H, *et al.* Analysis of transport and transformation characteristics between dissolved phosphorus and particulate phosphorus in water of the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2152-2159.
- [10] 何晓玲, 郑子成, 李廷轩. 不同耕作方式对紫色土侵蚀及磷素流失的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, **46**(12): 2492-2500.
He X L, Zheng Z C, Li T X. Effects of tillage practices on soil erosion and phosphorus loss in sloping cropland of purple soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, **46**(12): 2492-2500.
- [11] 孔燕, 冯海涛, 聂菊芬. 抚仙湖流域城镇降雨径流污染特征及排放负荷研究[J]. *环境科学导刊*, 2018, **37**(5): 26-32.
Kong Y, Feng H T, Nie J F. Research on pollution characteristics and emission load of urban rainfall runoff in the Fuxian Lake Watershed, Yunnan [J]. *Environmental Science Survey*, 2018, **37**(5): 26-32.
- [12] 陈玲, 刘德富, 宋林旭, 等. 不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(6): 2151-2158.
Chen L, Liu D F, Song L X, *et al.* Characteristics of nutrient loss by runoff in sloping arable land of yellow-brown under different rainfall intensities [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(6): 2151-2158.
- [13] 段圣辉, 赵钰, 单保庆, 等. 杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3697-3705.
Duan S H, Zhao Y, Shan B Q, *et al.* Research of the stormwater runoff and pollution characteristics in rural area of Yuhang district, Hangzhou [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3697-3705.
- [14] 陈成龙, 高明, 倪九派, 等. 三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1707-1716.
Chen C L, Gao M, Ni J P, *et al.* Nitrogen losses under the action of different land use types of small catchment in Three Gorges Region [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1707-1716.
- [15] Wu L, Peng M L, Qiao S S, *et al.* Assessing impacts of rainfall intensity and slope on dissolved and adsorbed nitrogen loss under bare loessial soil by simulated rainfalls [J]. *CATENA*, 2018, **170**: 51-63.
- [16] 华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 等. 三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 138-146.
Hua L L, Li W C, Zhai L M, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus emissions in the Gufu River small watershed of the Three Georges Reservoir Area [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 138-146.
- [17] 张林, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区兰陵溪小流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 792-799.
Zhang L, Huang Z L, Xiao W F, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus output in runoff and rainfall runoff in

- Lanlingxi Watershed, Three Gorges Reservoir Area [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 792-799.
- [18] 王超, 赵培, 高美荣. 紫色土丘陵区典型生态-水文单元径流与氮磷输移特征[J]. *水利学报*, 2013, **44**(6): 748-755.
Wang C, Zhao P, Gao M R. Characteristics of nitrogen and phosphorus transportation through runoff in a typical ecological-hydrological unit of hilly area of purple soil [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **44**(6): 748-755.
- [19] Sansalone J J, Buchberger S G. Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1997, **123**(2): 134-143.
- [20] 杨帆, 蒋铁锋, 王翠翠, 等. 西湖龙泓涧流域暴雨径流氮磷流失特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 141-147.
Yang F, Jiang Y F, Wang C C, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in rainstorm runoff [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 141-147.
- [21] 崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 等. 高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 555-560.
Cui Y J, Liu D F, Song L X, *et al.* Phosphorus output characteristics under different rainfall-runoffs in Gaolan River [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 555-560.
- [22] 周崧, 和树庄, 胡斌, 等. 滇池柴河小流域暴雨径流氮磷的输移过程研究[J]. *环境科学与技术*, 2013, **36**(1): 162-168.
Zhou S, He S Z, Hu B, *et al.* Transportation process of ammonia nitrogen in storm runoff of Chaihe River Watershed [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **36**(1): 162-168.
- [23] 鲜青松, 唐翔宇, 朱波. 坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2843-2849.
Xian Q S, Tang X Y, Zhu B. Transport of nitrogen and phosphorus from sloping farmland with thin purple soil overlying rocks [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2843-2849.
- [24] 韩晓飞, 高明, 谢德体, 等. 减磷配施有机肥对紫色土旱坡地磷素流失的消减效应[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2770-2778.
Han X F, Gao M, Xie D T, *et al.* Reduction effect of reduced phosphorus fertilizer and combining organic fertilizers on phosphorus loss of purple soil sloping field [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2770-2778.
- [25] 程娅娜, 王中根, 刘丽芳, 等. 近50年潮河流域降雨-径流关系演变及驱动力分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, **16**(2): 45-50.
Cheng Y S, Wang Z G, Liu L F, *et al.* Analysis of rainfall-runoff variations and the driving factors identification over the past 50 years in Chaohe River Basin [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, **16**(2): 45-50.
- [26] 任娟慧, 任波, 郑秀清, 等. 1964~2012年晋西黄土丘陵区圪洞流域径流变化分析[J]. *水电能源科学*, 2018, **36**(11): 18-21.
Ren J H, Ren B, Zheng X Q, *et al.* Temporal changes of annual runoff in Gedong Basin of Loess Hilly Region in Western Shanxi Province during 1964-2012 [J]. *Water Resources and Power*, 2018, **36**(11): 18-21.
- [27] 宁建凤, 姚建武, 艾绍英, 等. 广东典型稻田系统磷素径流流失特征[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, **35**(3): 257-268.
Ning J F, Yao J W, Ai S Y, *et al.* Characteristics of phosphorus runoff losses from typical paddy fields in Guangdong Province, China [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, **35**(3): 257-268.
- [28] 樊才睿, 李畅游, 孙标, 等. 放牧制度对草地产流产沙及氮磷流失的影响[J]. *生态学报*, 2018, **38**(4): 1446-1457.
Fan C R, Li C Y, Sun B, *et al.* Characteristics of sediment content and phosphorus and nitrogen loss in surface runoff from different grazing grasslands [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(4): 1446-1457.
- [29] 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 X, *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.
- [30] 王荣嘉, 高鹏, 李成, 等. 模拟降雨下麻栎林地地表径流和壤中流及氮素流失特征[J]. *生态学报*, 2019, **39**(8): 2732-2740.
Wang R J, Gao P, Li C, *et al.* Characteristics of surface flow and interflow and nitrogen loss in *Quercus acutissima* forest land under simulated rainfall [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(8): 2732-2740.
- [31] 谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 等. 汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1760-1769.
Xie J C, Zhao X L, He B H, *et al.* Analysis of the characteristics of nitrogen and phosphorus emissions from agricultural non-point sources on Hanfeng Lake Basin [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1760-1769.

CONTENTS

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM _{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain	ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)
Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze	WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)
Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM _{2.5} in Housewives in Rural Shanghai	LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)
Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment	ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)
VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises	ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)
Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang	LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)
Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengdu	FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)
Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains	ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River	FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)
Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn	CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)
Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province	LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)
Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau	LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)
Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)
Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland	FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)
Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton-and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake	GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)
Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake	FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)
Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed	LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)
Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area	WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)
Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i>	WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)
Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)
Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments	LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)
Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen	CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)
Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems	WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)
Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)
Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode	WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)
Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)
Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances	YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)
Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018	LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)
Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model	XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)
Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO ₂ and CH ₄ Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China	LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)
Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds	WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)
Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field	YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)
Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas	WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)
Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil	CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)
Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils	WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)
Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area	HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)
Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cbbL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China	WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)
Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570)
Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)
Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)
Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China	HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)
Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)
Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil	LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)
Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China	CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)
Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection	LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)
INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40	(5659)