

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



2020

Vol.41 No.3
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM _{2.5} 分布格局演变及其影响因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)
中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析	方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)
阳泉市秋冬季 PM _{2.5} 化学组分及来源分析	王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)
泰安市夏季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源	衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)
黄山秋季大气颗粒物理化特性	卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)
北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性	曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)
淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征	王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)
鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析	付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)
浙江省汽车整车制造行业挥发性有机物产排污系数	滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)
基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征	王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)
薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征	牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 燕莹莹, 祁士华 (1107)
精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法	叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)
2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估	施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)
中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势	庞凯莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)
京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单	韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)
在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测	王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵玺乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)
参数选取对畜禽养殖业大气氨排放的影响: 以长三角地区为例	张琪, 黄凌, 殷司徒, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)
乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析	吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)
长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征	李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)
伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素	刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹霜, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)
城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)
基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例	王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)
黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素	梁晓文, 郇田田, 王涛 (1217)
人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析	温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)
滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)
太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997~2017 年)	杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)
汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系	薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)
盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价	王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 刘向阳 (1265)
三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量	陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)
化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响	罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)
利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放	柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)
茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性	范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)
3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性	王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)
新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附	徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)
三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险	方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)
固城湖及出入湖河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估	阚可聪, 谷孝鸿, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)
衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)
北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估	张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)
基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性	马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)
PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性	王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)
中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化	付昆明, 杨宗珏, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)
抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响	代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 亮根祥, 胡双庆 (1401)
多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验	张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志成, 曹思雨 (1409)
剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响	邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)
硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响	何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)
工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析	李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)
耕地土壤重金属健康风险空间分布特征	姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)
黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析	赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)
不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响	李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)
红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征	章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)
有机肥与无机肥配施对潮土 N ₂ O 排放的影响	孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)
冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系	王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)
钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响	鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)
桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应	方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)
外源亚精胺对 As ⁵⁺ 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响	刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩廿, 刘玉荣, 胡红青 (1505)
《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)	

三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量

陈仕奇¹, 龙翼², 严冬春², 高明^{1*}, 黎嘉成¹, 徐国鑫¹, 黄容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: 小流域作为三峡库区非点源污染源, 是缓解水体水质恶化的重点防控对象。在三峡库区选取具有多种土地利用类型的石盘丘小流域为研究对象, 对流域出水口断面水量水质进行连续监测, 分析了小流域氮、磷污染物随降雨径流流失的浓度及形态变化特征, 并计算小流域的污染物流失通量, 分析影响氮、磷养分流失的主要人为和自然因素, 对农业非点源污染特别是三峡库区的农业非点源污染研究具有相当重要的现实意义。结果表明, 流域降雨量随季节变化明显, 降雨多分布在 4~6 月, 为小流域氮、磷流失的主要输出时期, 占全年总氮、总磷负荷的 58.94% 和 67.60%。石盘丘小流域年径流总量为 $8.02 \times 10^4 \text{ m}^3$, 总氮年流失通量为 $5.04 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中以硝态氮 ($2.54 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 为流失主体; 输出总磷为 $0.534 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 可溶性总磷 ($0.422 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 占总磷流失通量的 79.00%。因此, 对于石盘丘小流域来说, 需要注意防范施肥和降雨期重合时水田氮磷流失。

关键词: 三峡库区; 面源污染; 小流域; 氮、磷形态; 流失通量

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1276-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.201909082

Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area

CHEN Shi-qi¹, LONG Yi², YAN Dong-chun², GAO Ming^{1*}, LI Jia-chen¹, XU Guo-xin¹, HUANG Rong¹

(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: As the source of non-point pollution in the Three Gorges Reservoir Area, small watershed is a key control object in alleviating deterioration of water quality. In the Three Gorges Reservoir Area, the Shipanqiu small watershed with various land-use types was selected as the research object, and the water quantity and quality of the outlet section of the watershed were continuously monitored. We carried out analysis of the small watershed runoff loss and nitrogen and phosphorus pollutants with concentration, analyzed the morphology change characteristics of runoff erosion, calculated the small watershed of pollutant emission flux, and analyzed the nitrogen and phosphorus nutrient loss and main human and natural factors, especially in the Three Gorges Reservoir Area of agriculture where nonpoint source pollution research has important practical significance. The results showed that the rainfall in the watershed varied significantly with the seasons, and the rainfall was mainly distributed from April to June, which was the main output period of nitrogen and phosphorus loss in the small watershed, accounting for 58.94% and 67.60% of the total nitrogen and phosphorus load, respectively, in the whole year. The total annual runoff in the Shipanqiu small watershed was $8.02 \times 10^4 \text{ m}^3$, and the annual total nitrogen loss flux was $5.04 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, of which nitrate nitrogen ($2.54 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) was the main part. The total phosphorus output was $0.534 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, and the soluble total phosphorus ($0.422 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) accounted for 79.00% of the total phosphorus flux. The loss flux of total nitrogen was 9.51 times that of total phosphorus, and the non-point source pollution risk of nitrogen was much greater than that of phosphorus. Therefore, for the Shipanqiu small watershed, it is especially important to prevent nitrogen loss in paddy fields when fertilization and rainfall coincide.

Key words: Three Gorges Reservoir area; non-point source pollution; watershed; nitrogen-phosphorus forms; loss of flux

三峡大坝工程建成后环境保护问题一直备受国内外广泛关注, 库区水环境优劣, 不仅直接影响长江中下游经济社会发展, 而且影响三峡库区水环境安全^[1]。造成水体富营养化的主要原因是土壤侵蚀以及小流域地表径流引起的氮磷流失^[2,3]。三峡库区蓄水后, 水流速度减缓, 致使库区水体的自净能力下降, 非点源污染物氮和磷年平均流失通量分别为 36.84 万 t 和 2.95 万 t, 且污染物流失通量与库区径流量显著正相关^[4,5]。每年大量的氮和磷汇入三峡水库, 导致干流水质有下降趋势, 且支流富营养状态愈发严重, 部分已出现局部“水华现象”^[6,7]。因此, 非点源污染问题已经成为三峡水库亟待解决的水污染问题之一。

随着点源污染控制和治理的加强, 非点源污染受到越来越多的关注和研究, 非点源污染问题已成为全球水环境治理面临的巨大挑战之一^[8]。影响非点源污染的因素众多, 如气候特征、地形特征、地貌类型、植被郁闭度和土壤理化性质等^[9~12], 因此对其进行定量化研究难度较大, 现阶段国内外将人工模拟^[13~15]和建模模拟^[16,17]应用于流域面源污染的研究中, 张展羽等^[18]运用 SWAT 模型分析了长江

收稿日期: 2019-09-09; 修订日期: 2019-10-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800101); 重庆市技术创新与应用专项(cstc2018jszx-zdyfxmX0014)

作者简介: 周仕奇(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤面源污染防治, E-mail: 352963593@qq.com

* 通信作者, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

下游岔河小流域氮磷流失时空分布规律,并模拟不同灌溉方式下非点源氮磷流失变化; Jeon 等^[19]运用 HSPF 模型对含有 30% 稻田的农区进行污染负荷研究,计算了稻田水环境中总氮和总磷的积累量. 这些方法虽然简化了面源污染的研究过程,但都存在一定的局限性和滞后性^[20],因此在多尺度下对流域进行大量实际监测显得尤为重要^[21],目前实际监测研究主要集中于不同土地利用方式对流域氮磷流失形态及负荷的影响^[22~24]. 朱波等^[25]对石盘丘小流域不同土地利用类型地块的氮磷形态与排放通量进行连续监测,结果表明居民点、柑橘果园和坡耕地是三峡库区农村非点源污染的主要来源. 吴东等^[26]通过小区对照试验观测分析了自然降雨条件下各退耕模式地表径流与泥沙中土壤养分输出情况并探究了茶园地和板栗林地等与坡耕地氮、磷排放特征差异. 然而从流域尺度下对降雨及地表径流进行连续高频野外采样监测分析来探究 N、P 流失形态及通量之间相关性的研究还较少.

为此,本研究以石盘丘小流域为例,在 2017 年 11 月 22 日至 2018 年 11 月 22 日,对小流域径流集水口水样进行连续高频野外采样与监测分析,通过掌握流域内地表径流氮磷流失的形态变化特征以及流失通量,分析影响氮、磷养分流失的主要人为和自然因素,以期为库区非点源污染的评价和防治提供科学依据,同时监测结果也可用于模型的校准验证,提高模型在流域使用的精确性.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

石盘丘小流域位于重庆市忠县石宝镇(图 1),流域位于东经 108°08′~108°12′和北纬 30°24′~

30°30′之间,地势南部低北部高,属丘陵山区. 流域内海拔在 119~780 m,山地起伏,低山、丘陵、阶地、低洼地和河谷地相间分布. 石盘丘小流域总面积约为 33 hm²,土壤以中性紫色土、水稻土为主,多年平均降雨量为 1 140 mm,每年 5~9 月为雨季,雨量占全年降水总量的 70% 左右. 石盘丘小流域各主要土地利用各类型面积由大到小依次为:旱坡地(15.25 hm²)、柑橘果园(5.51 hm²)、自然林地(4.32 hm²)、水田(4.19 hm²)和菜地(3.07 hm²)占小流域总面积比例分别为 46.2%、16.7%、13.1%、12.7% 和 9.3%. 石盘丘集水区的土地利用、土壤类型以及地貌在三峡库区腹心地带较为典型,可以作为基本水文单元,对库区非点源污染物形态与流失通量进行研究分析.

1.2 样品采集与分析

1.2.1 降雨、流量数据采集

试验区位于中国科学院三峡库区水土保持与环境研究试验站(石盘丘小流域内),布设观测仪器为虹吸式雨量计,实时记录降雨量及降雨过程. 石盘丘小流域出口处设有矩形三角堰,矩形堰的长为 4.5 m、宽为 2 m 和深度为 1.5 m,堰口为 90°倒立等腰三角形口,在堰内监测断面设置水位自动监测仪,可实时记录水位变化,根据水位-流量关系曲线可计算流量.

1.2.2 流域出口断面水样采集及测定方法

石盘丘小流域径流集水口水样采集时间为 2017 年 11 月 22 日至 2018 年 11 月 22 日,采样频率为每天采样一次,断流不采样,共计采得水样 212 个(期间有两个月干旱期,小流域未产流). 水样采集后,在 24 h 内进行试验分析.

测定时需先将样品 pH 调至 7.0 左右,取部分

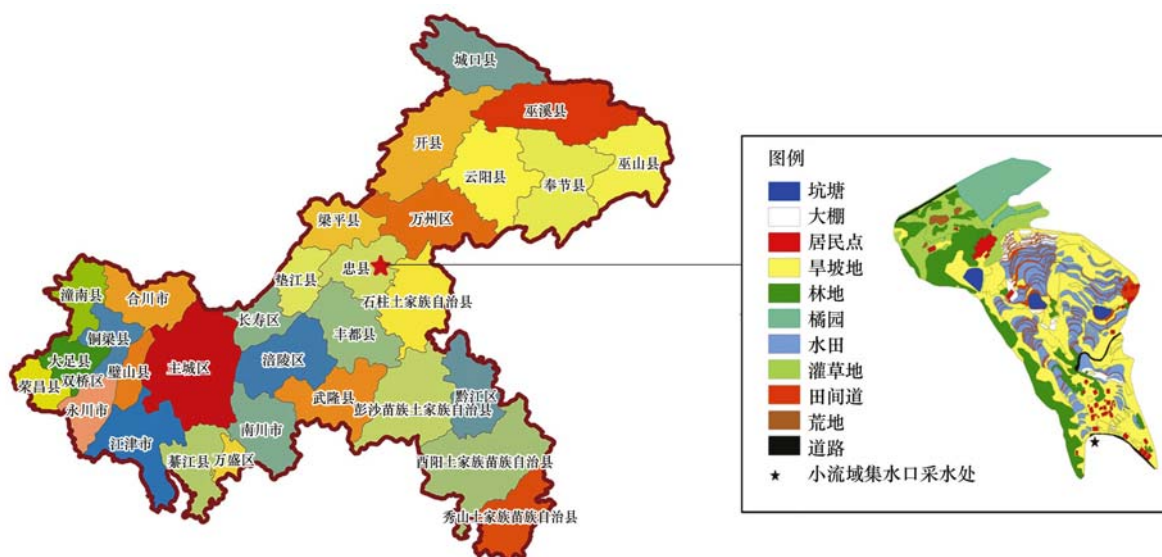


图 1 小流域地理位置及采样示意

Fig. 1 Geographical location and sampling distribution map of the small watershed

水样原液测定总氮(TN)和总磷(TP);再取 200 mL 样品原液过 0.45 μm 滤膜,用于测定硝态氮(nitrate nitrogen, NN)、铵态氮(ammonium nitrogen, AN)、可溶性总磷(total dissolved phosphorus, TDP)和正磷酸盐(PO_4^{3-})等指标.水样中 TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法(GB 11894-89)测定;TP、TDP 和 PO_4^{3-} 采用钼蓝比色法测定(GB 11893-89);AN 采用靛酚蓝试剂比色法测定,NN 采用紫外分光光度法测定.

1.3 数据处理与分析

本试验采用 Excel 2010 进行相关数据统计和计算,Origin 9.0 进行图形制作,采用 SPSS 21.0 进行单因素方差分析和 Pearson 相关性分析,处理间差异采用 Duncan 多重比较法.

2 结果与分析

2.1 石盘溪小流域降雨-流量变化特征

如图 2 所示,2017 年 11 月 20 日至 2018 年 11 月 20 日,石盘丘小流域总降雨量为 1 031.3 mm,曹瑞霞等^[27]通过分析忠县石盘丘小流域近 10 年降雨累积频率估算出枯水年降水量小于 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.因此,本观测年属于枯水年.2018 年 4~7 月和 11 月降雨量达 745.6 mm,占全年降雨量的 72.22%,为该流域的丰水期,期间日降雨量峰值达 77.2 mm(图 2,5 月 6 日);2017 年 12 月至次年 2 月降雨量较小,仅占全年降雨量的 5.09%,为该流域的枯水期.小流域径流总量达 $8.02 \times 10^4 \text{ m}^3$,最大日流量为

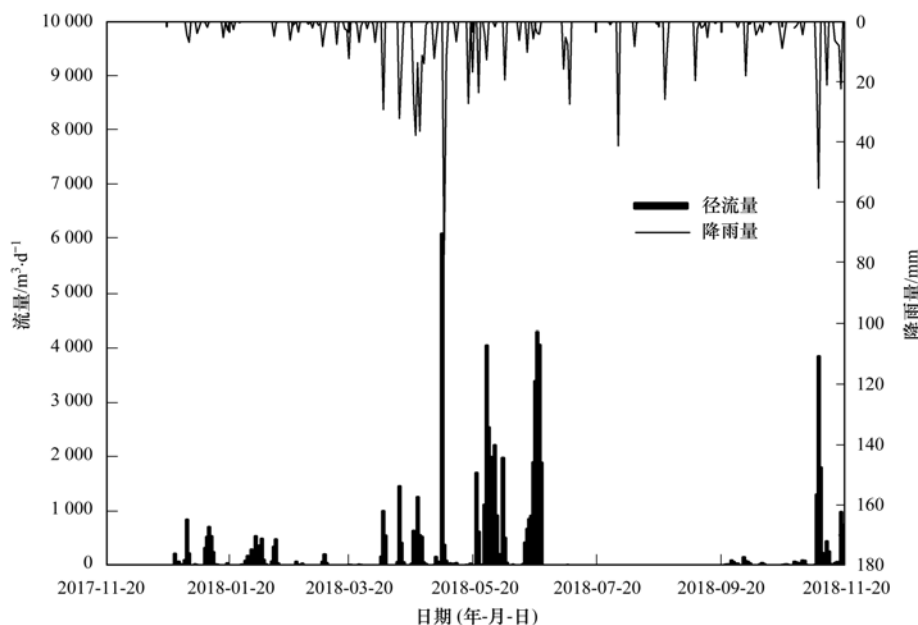


图 2 小流域年度降雨量、流域出口流量变化

Fig. 2 Variations of rainfall and runoff in the watershed

$6.09 \times 10^3 \text{ m}^3$.流量最大的月份出现在 5、6 和 11 月占全年总径流量的 70.36%,分别为 2.18×10^4 、 2.2×10^4 和 $1.24 \times 10^4 \text{ m}^3$;7~8 月处于高温干旱,石盘丘小流域进入断流期;径流量分别为 5.29 m^3 和 0 m^3 .

2.2 石盘丘小流域氮形态流失特征

2017 年 11 月~2018 年 11 月,石盘丘小流域出口监测断面总氮(TN)、硝态氮(NN)和氨氮(AN)的年均排放浓度分别为 2.02、1.02 和 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 3).TN 与 NN 全年共出现 4 次高峰,分别在 2017 年 12 月以及次年的 4、9 与 11 月,其中 TN 最高月平均浓度在 4 月($3.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),但其最大排放浓度出现在 9 月 22 日($11.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),其值为当月平均浓度的 3.7 倍;除未产流月份,TN 最低月平

均浓度现在 2 月($0.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),仅为年均排放浓度的 27.2%.NN 的最高月平均浓度和最低月平均浓度分别为 11 月($2.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)与 1 月($0.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),其浓度排放峰值同样也出现在 9 月 22 日,为 $6.78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.AN 月平均浓度变化与 TN、NN 不同,在观测期内 AN 月均浓度在一定的低浓度范围内($0.054 \sim 0.232 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)小幅波动,月际间无较为明显的峰值.根据地表水环境质量标准(GB 3838-2002),以总氮浓度为水质评判指标,属于地表水水质劣 V 类.

通过对氮形态之间的相关性分析发现,石盘丘小流域出水口的 TN 与 NN($r=0.73, P<0.01$)、AN($r=0.23, P<0.01$)极显著相关;NN 与 AN 极显著相关($r=0.19, P<0.01$)(表 1).

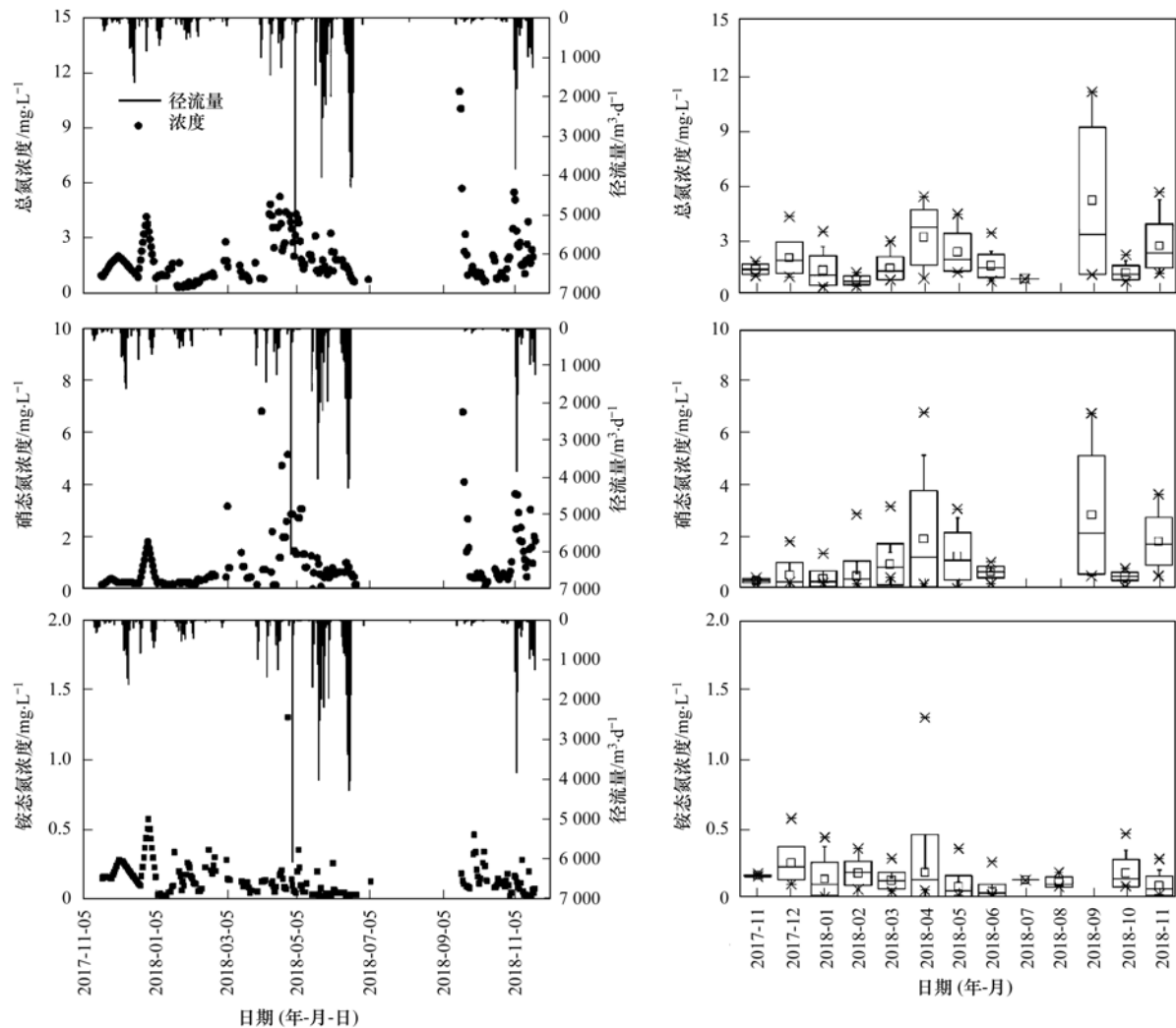


图3 氮素浓度变化以及逐月平均值

Fig. 3 Concentration changes and monthly average of nitrogen species

表1 氮形态之间的相关性¹⁾

Table 1 Correlations among nitrogen species			
	总氮 TN	硝态氮 NN	铵态氮 AN
总氮 TN	1.00	0.73 **	0.23 **
硝态氮 NN	—	1.00	0.19 **
铵态氮 AN	—	—	1.00

1) **表示极显著相关($P<0.01$)

2.3 石盘丘小流域磷形态流失特征

本试验期间,石盘丘小流域出口监测断面出口总磷(TP)、可溶性总磷(TDP)、正磷酸盐(PO_4^{3-})和颗粒态磷(PP)的年均排放浓度分别为0.21、0.17、0.11和0.07 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图4). TP月均浓度在2017年的12月相对较高,为0.319 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,是年均排放浓度的1.5倍;除未产流月份,TP最低月平均浓度出现在2月(0.058 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),仅为年均排放浓度的27.6%. TDP和 PO_4^{3-} 月均浓度在2018年6月达到全年最高,分别为0.246 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和0.187 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. PP月均浓度在2017年12月达到了0.253

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 显著高于其他月份,比年均排放浓度高出3.6倍,排放浓度峰值出现在12月30日,最大排放浓度达0.454 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.按地表水环境质量标准(GB 3838-2002),以总磷浓度为水质评判指标,属于地表水水质劣Ⅳ类.

通过对磷形态之间的相关性分析发现(表2),石盘丘小流域出水口的TP与TDP($r=0.23$, $P<0.01$)、 PO_4^{3-} ($r=0.27$, $P<0.01$)和PP($r=0.90$, $P<0.01$)极显著相关;TDP与 PO_4^{3-} 极显著相关($r=0.48$, $P<0.01$).

2.4 石盘丘小流域氮、磷流失通量特征

氮形态流失通量如图5所示,TN、NN和AN年流失通量分别为5.04、2.54和0.255 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;其中NN和AN分别占TN通量的50.33%和5.06%,NN是AN流失量的将近10倍,因此NN是小流域地表径流氮素流失的主要成分.TN、NN和AN的流失通量变化趋势类似,于2018年5月TN和AN达到全年流失通量的最大值,分别为1.417 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

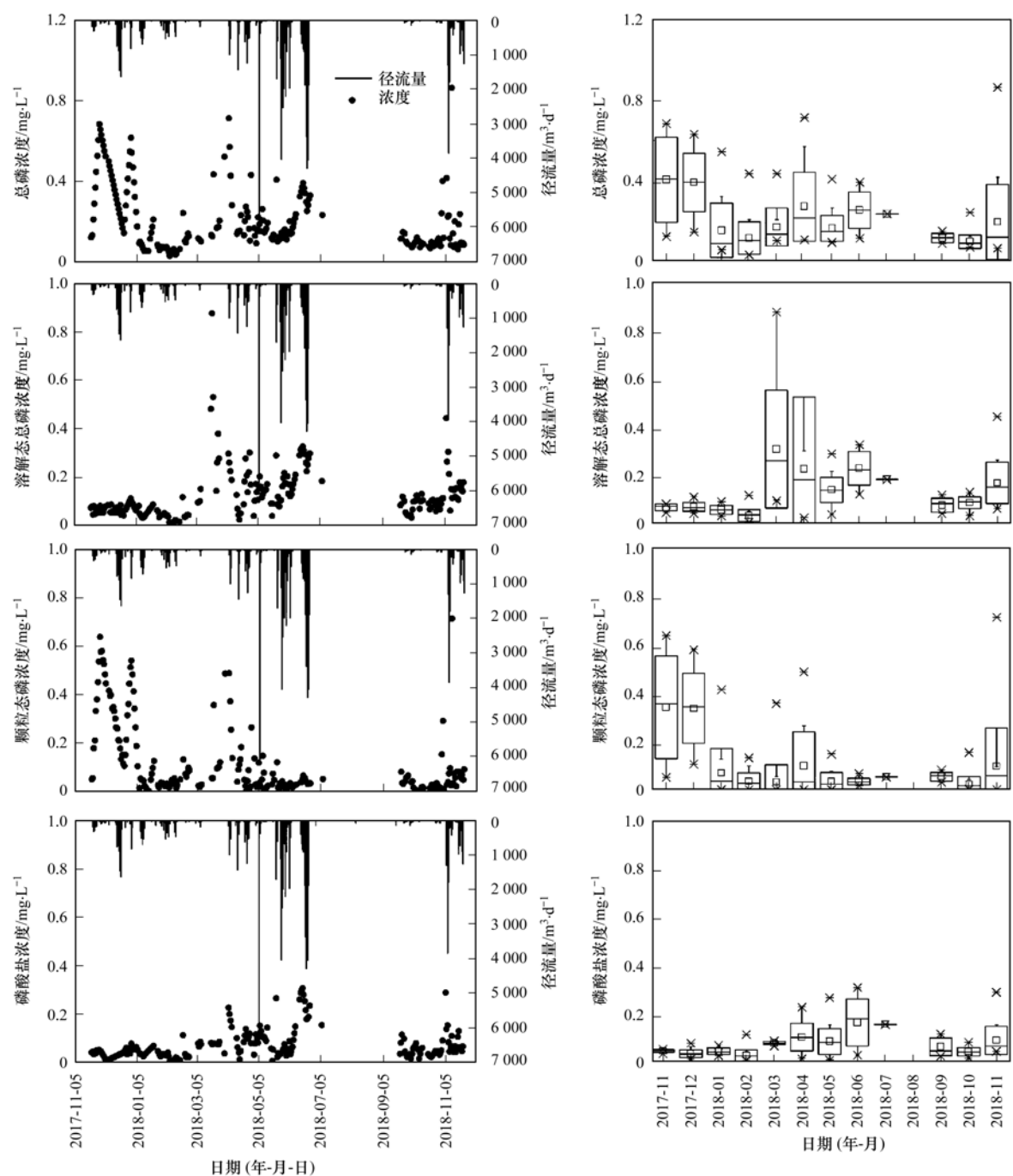


图4 磷素浓度变化以及逐月平均值

Fig. 4 Concentration changes and monthly average of phosphorus species

表2 磷形态之间的相关性

Table 2 Correlations between phosphorus species

	总磷 TP	溶解态总磷 TDP	磷酸盐 PO_4^{3-}	颗粒态磷 PP
总磷 TP	1.00	0.23 **	0.27 **	0.90 **
溶解态总磷 TDP		1.00	0.48 **	0.04
磷酸盐 PO_4^{3-}			1.00	-0.13
颗粒态磷 PP				1.00

和 $0.065 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, NN 在 5 月 ($0.570 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 也达到了较高水平,但是最大值出现在 11 月 ($0.997 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$).

磷形态流失通量如图 6 所示,TP、TDP、 PO_4^{3-}

和 PP 年流失通量分别为 0.534 、 0.422 、 0.27 和 $0.183 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 其中, TDP 占 TP 流失总量的 79.01% ,由此可知,石盘丘小流域磷素流失的形式主要是 TDP 中易溶性的 PO_4^{3-} . TP、TDP 和 PO_4^{3-} 的

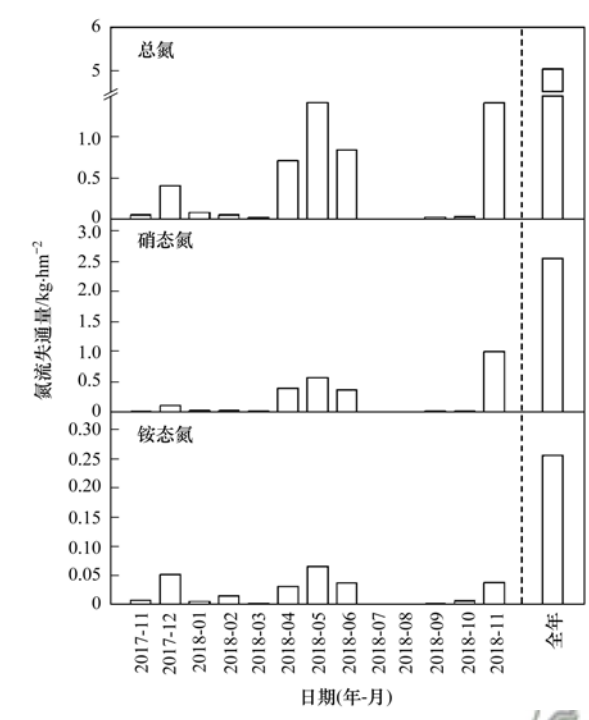


图5 氮素流失通量
Fig. 5 Monthly loss flux of nitrogen

月流失通量从2018年4月开始逐渐增高,在6月达到最大值,分别为0.187、0.165和0.126 kg·hm⁻²; PP月通量在2017年12月达到最大值(0.060 kg·hm⁻²),导致TP也有一定程度的增加,达到0.076 kg·hm⁻²,2018年4~6月PP流失通量变化幅度不大,维持在0.024~0.027 kg·hm⁻²之间.

3 讨论

3.1 小流域氮素各形态流失特征及通量

氮素浓度在观测期内出现了4次峰值,分别出现在2017年12月、2018年的4、9和11月(图3). 崔超等^[28]的研究表明,畜禽养殖业源和种植业源对流域氮、磷排放贡献最大. 因此对当地种植制度的调查可知,2017年与2018年底小流域内坡耕地种植的油菜施入大量基肥,这便导致了TN、NN和AN浓度都达到了一个短暂的峰值. 对小流域内不同土地利用类型下施肥习惯分析得出,4~5月是石盘丘小流域水田、旱坡地和菜地的主要施肥期和耕作期,因此该时期内小流域氮素浓度直线升高. 陈成龙等^[29]对三峡库区王家沟小流域的研究同样证实,在春季作物时期,TN和NN浓度的空间差异会变大. 而在9月下旬,小流域地区经历了近50 d高温干旱天气后,迎来了首次降雨产流,氮素浓度达到又一次高峰. 其中,TN和NN浓度急剧升高,随后又迅速下降. 这是由于经历长时间的高温干旱后,土壤有机质矿化释放了大量无机氮,雨滴打击土壤表层使土壤颗粒结构被破坏,大量的NN溶于雨水并随地表径

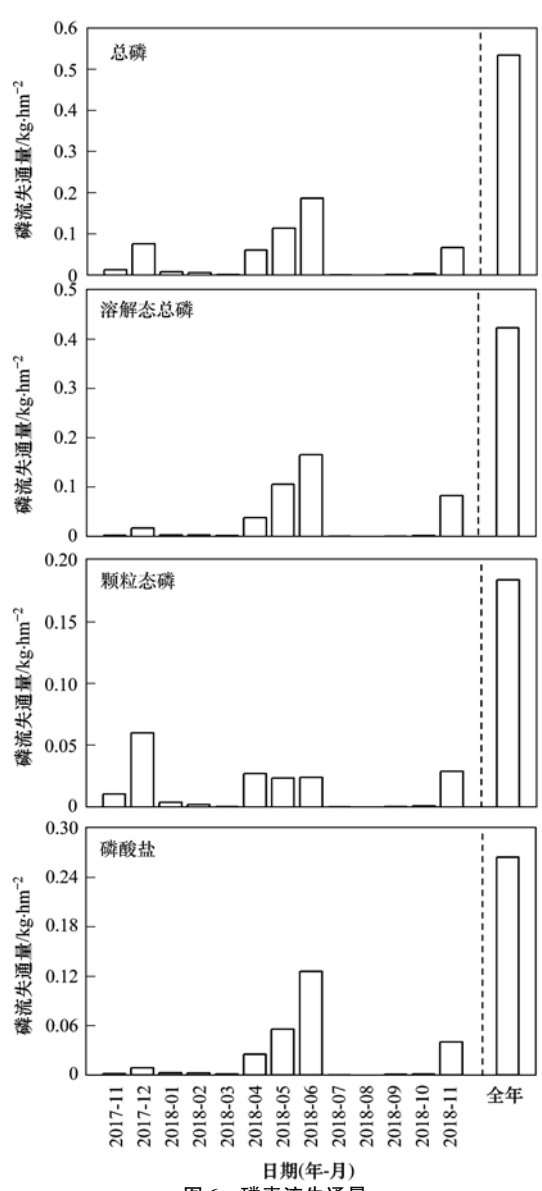


图6 磷素流失通量
Fig. 6 Monthly loss flux of phosphorus

流迁移,从而使地表径流的TN和NN浓度骤增^[30]. 而在随后几天的地表径流中,TN和NN浓度又迅速下降到较低水平,可能是由于随着地表径流地冲刷,表层土壤易于溶入水中的氮素越来越少,同时雨水的下渗作用导致氮素通过壤中流损失,导致径流中氮素浓度迅速降低^[31,32].

其次降雨也是产生面源污染的主要条件,且土壤养分的流失及流失形态受降雨量、降雨强度等降雨条件影响^[33]. 石盘丘小流域雨季降雨多分布在4~6月,该段时间内降雨量占雨季总降雨量的59.68%,流域出口流量更是占全年流量的64.80%,因此为石盘丘小流域氮素主要输出期,贡献了全年总氮负荷的58.94%. 这与张林等^[34]的研究结果相同,其对兰陵溪小流域集水口的氮、磷流失浓度及径流量连续监测表明,氮磷流失浓度高输出时期同为降雨量高峰期. 同时对比前人研究发现降雨强度

和降雨量直接决定了土壤养分的流失强度^[35]。邬燕虹等^[36]通过室内人工模拟降雨试验,发现雨强与红壤裸坡各形态氮素流失量呈显著正相关关系;林超文等^[37]研究了不同施肥方式在不同雨强条件下对土壤养分流失途径及流失量的影响,结果氮损失受雨强影响小,受施肥方式影响大,一次性施肥显著加大了氮的损失量。也正是由于以上的施肥、降雨和气候等因素,造成了每年的3~5月与11~12月TN和NN的月均浓度的离散程度相对较大,而其余时间的月均浓度则在相对较低的范围波动。

NN是小流域内最主要的氮素流失形态,占TN的50.34%,NN流失通量是AN的10倍。华玲玲等^[38]对三峡库区古夫河小流域出口断面氮素的连续监测发现,NN占古夫河TN流失通量的78.63%;吴东^[39]的研究发现,由地表径流所带走的NN占TN比例极高。产生以上结果的原因可能是:土壤中氮素存在形态与其输出迁移的驱动力有关。土壤胶体带负电荷,AN带正电荷与土壤黏粒结合稳定,不容易溶入雨水。在降雨量和雨强较小、地表径流中携带土壤颗粒较少的情况下,AN的流失也较小;而NN带负电荷,与土壤黏粒电荷间存在互斥作用且易溶于水,相对AN来说其随径流迁移的能力强,因此NN是地表径流中氮素流失的主要组成部分。

3.2 小流域磷素各形态流失特征及通量

对比观测期内各形态氮素与磷素浓度变化发现,石盘丘小流域各形态磷素在2018年9月降雨径流中浓度都很低,没有出现类似氮素浓度骤增现象。这是由于紫色土小流域磷素主要流失形态是TDP。相关研究也表明,紫色土旱坡地雨季径流主要输出方式为壤中流,占径流总量的53%以上^[40],且可溶性总磷是壤中流磷素流失的主要形态^[41]。所以即使2018年9月在断流后首次迎来降雨产流,但由于降雨量较小,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TP浓度以及磷素各形态的浓度变化也不明显。

TP和PP在2017年的11月和12月降雨径流量很小但离散程度较高、月均浓度出现峰值,且2017年11月PP占TP的比重最大,这与年尺度上的分析结果不同,原因可能是紫色土表层土壤浅薄,易被剥离、释放出细颗粒结合态^[27],同时坡耕地在作物收获后,表层土壤裸露,此时对其进行翻耕等人为活动造成了土壤松动,分散出大量土壤颗粒,当降雨径流产生后土壤颗粒便随径流迁移,从而导致该时期小流域出水口水流中PP和TP的浓度的提高。左继超等^[42]通过原位观测和模拟试验对比裸露处理与植被覆盖处理,结果表明植被截留、吸收等影

响径流污染负荷。松动的表层土壤经过降雨后逐渐变得质地相对紧密,土壤颗粒便不易随径流迁移,因此PP浓度又逐渐降低,导致该时期TP和PP月均浓度的离散程度较高。

由相关性分析可以看出,TP浓度与PP具有极显著的强相关关系($r=0.90, P<0.01$)。但是2018年4~6月TP和TDP的流失通量不断增大,而PP流失通量在该时期变化平稳,可能是由于该时期小流域内的作物正处于生长旺盛期,作物叶片面积增大以及根系的发育,可以降低表层土壤颗粒随径流流失风险^[43]。王荣嘉等^[44]的试验也表明,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。同时石盘丘小流域底部的水田以及人工湿地系统也对土壤颗粒进行了拦截消化有效减少了PP的流失。

因此防止水土侵蚀是控制磷素流失关键,同时还应该注意耕作时增加土层厚度、提高土壤有机质含量和优化土地利用类型等综合治理措施。

3.3 不同土地利用方式对小流域氮、磷流失影响

朱波等^[25]对2007~2009年石盘丘小流域降雨径流进行了连续监测,其主要分析小流域不同土地利用类型地块的氮磷流失特点(例如:坡耕地、柑橘林地、自然林地、水稻田和居民点等小尺度)。研究结果表明,小流域TN和TP排放浓度与通量均呈现集镇>村落>柑橘果园>坡耕地>水稻田>林地的特点,再将各土地利用类型TN和TP排放通量与土地利用面积相乘,计算得到小流域年均氮、磷流失排放通量分别为 $4.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 与 $1.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;本研究中TN和TP排放通量为 $5.04 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 与 $0.534 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。对比发现实测值与乘积值之间具有差异,说明氮磷流失具有时间、空间变异性,评价氮磷流失的环境效应也有一定的不确定性,不同尺度上氮磷流失通量的不同,以及流失形态的变化,说明径流、泥沙与氮磷的作用机理不同导致驱使流失机制的差异,表明面源污染过程的复杂性^[45]。

村镇居民点、坡耕地和柑橘果园年均氮和磷流失排放通量显著高于小流域集水口处,水稻田则相反,由图1可以看出村镇居民点、坡耕地和柑橘果园位于小流域地势较高处,而水稻田大都位于沟谷、坡底,说明水稻田具有减轻非点源污染净化水质的作用,其根系的反硝化细菌可以在缺氧条件下还原硝酸盐,并且水稻田田埂基本处于封闭状态可以大大减少水土侵蚀现象^[28]。

4 结论

石盘丘小流域出水口汇集的地表径流中,各形

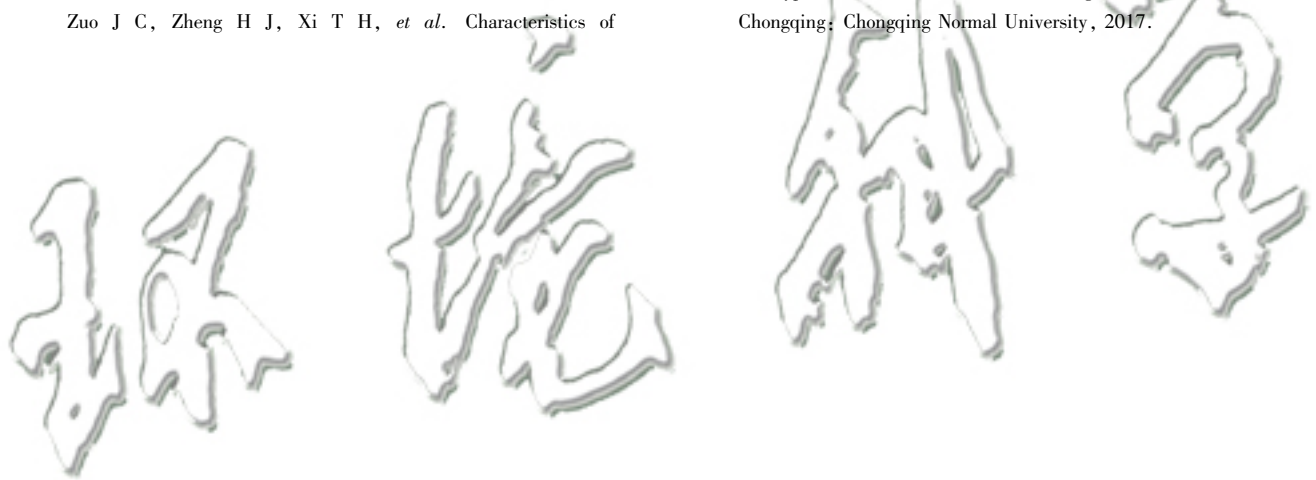
态氮和磷浓度及流失通量较大的月份主要集中在 2017 年末(12 月)与 2018 年 4~6 月和 11 月. 硝态氮是小流域氮素流失的主要形态, 占总氮流失总量的 50.34%; 铵态氮流失量较少, 仅占总氮流失总量的 5.06%. 总氮与硝态氮浓度在监测期间极显著相关($r = 0.73, P < 0.01$). 磷素的主要流失形态是溶解态总磷, 占总磷的 79.01%; 颗粒态磷流失量较小, 占总磷流失总量的 21.99%. 总磷与颗粒态磷浓度在监测期间极显著相关($r = 0.90, P < 0.01$). 小流域内总氮 ($5.04 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的流失通量是总磷 ($0.53 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的 9.51 倍. 坡耕地是面源污染的主要来源, 应避免在雨季表施, 多采用免耕、覆盖耕作和垄耕等保护性耕作措施, 其次在防止水土侵蚀的同时还应该注意耕作时增加土层厚度、提高土壤有机质含量、优化土地利用类型等综合治理措施.

参考文献:

- [1] 刘园园, 史书, 木志坚, 等. 三峡库区典型农业小流域水体氮磷浓度动态变化[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, **36**(11): 157-163.
Liu Y Y, Shi S, Mu Z J, *et al.* Dynamic changes of water nitrogen and phosphorus concentrations in a typical small agricultural watershed of the three-gorges reservoir region[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2014, **36**(11): 157-163.
- [2] 井光花, 于兴修, 刘前进, 等. 沂蒙山区不同强降雨下土壤的氮素流失特征分析[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(6): 120-125.
Jing G H, Yu X X, Liu Q J, *et al.* Characteristics of soil nitrogen loss under different intense rainfalls in Yimeng mountainous area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, **28**(6): 120-125.
- [3] Tim U S, Jolly R. Evaluating agricultural nonpoint-source pollution using integrated geographic information systems and hydrologic/water quality model[J]. Journal of Environmental Quality, 1994, **23**(1): 25-35.
- [4] 胡勇. 三峡库区磷污染现状、来源及控制对策的初步分析[J]. 安徽农业科学, 2008, **36**(3): 1161-1164.
Hu Y. Preliminary analysis of the current situation, source and the countermeasures of phosphorus pollution Three-Gorges Reservoir[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, **36**(3): 1161-1164.
- [5] 李永建, 李斗果, 王德蕊. 三峡工程 II 期蓄水对支流富营养化的影响[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2005, **27**(4): 474-478.
Li Y J, Li D G, Wang D R. Influence of second phase sluice of the three gorges reservoir on the eutrophication of the reservoir-feeding tributaries[J]. Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science), 2005, **27**(4): 474-478.
- [6] 张晟, 郑坚, 刘婷婷, 等. 三峡水库入库支流水体中营养盐季节变化及输出[J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 58-63.
Zhang S, Zheng J, Liu T T, *et al.* Seasonal variation and output of nutrient in tributaries of Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2009, **30**(1): 58-63.
- [7] 郑丙辉, 曹承进, 秦延文, 等. 三峡水库主要入库河流氮营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 1-6.
Zheng B H, Cao C J, Qin Y W, *et al.* Analysis of nitrogen distribution characters and their sources of the major input rivers of Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2008, **29**(1): 1-6.
- [8] Naramngam S, Tong S T Y. Environmental and economic implications of various conservative agricultural practices in the Upper Little Miami River basin[J]. Agricultural Water Management, 2013, **119**: 65-79.
- [9] 冯源嵩, 林陶, 杨庆媛. 百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4537-4543.
Feng Y S, Lin T, Yang Q Y. Temporal and spatial characteristic of nitrogen and phosphorus output in the suburb watershed around the Baihua lake[J]. Environmental Science, 2014, **35**(12): 4537-4543.
- [10] 陈炎辉, 陈明华, 王果, 等. 不同坡度地表径流中污泥氮素流失规律的研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(10): 2423-2430.
Chen Y H, Chen M H, Wang G, *et al.* Effects of slopes on nitrogen transport along with runoff from sloping plots on a lateritic red soil amended with sewage sludge[J]. Environmental Science, 2010, **31**(10): 2423-2430.
- [11] Nadal-Romero E, Regüés D, Latron J. Relationships among rainfall, runoff, and suspended sediment in a small catchment with badlands[J]. CATENA, 2008, **74**(2): 127-136.
- [12] Butler D M, Ranells N N, Franklin D H, *et al.* Ground cover impacts on nitrogen export from manured riparian pasture[J]. Journal of Environmental Quality, 2007, **36**(1): 155-162.
- [13] Cogle A L, Keating M A, Langford P A, *et al.* Runoff, soil loss, and nutrient transport from cropping systems on Red Ferrosols in tropical northern Australia[J]. Soil Research, 2011, **49**(1): 87-97.
- [14] Davis R L, Zhang H L, Lee Schroder J, *et al.* Soil characteristics and phosphorus level effect on phosphorus loss in runoff[J]. Journal of Environmental Quality, 2005, **34**(5): 1640-1650.
- [15] Luo C Y, Gao Y, Zhu B, *et al.* Sprinkler-based rainfall simulation experiments to assess nitrogen and phosphorus losses from a hillslope cropland of purple soil in China[J]. Sustainability of Water Quality and Ecology, 2013, **1-2**: 40-47.
- [16] 丁相毅, 周怀东, 王宇晖, 等. 基于分布式水文模型的三峡库区污染负荷对气候变化的响应研究[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(8): 1991-1998.
Ding X Y, Zhou H D, Wang Y H, *et al.* Impacts of climate change on pollution load in the Three Gorges Reservoir based on a distributed hydrological model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(8): 1991-1998.
- [17] 陈媛, 郭秀锐, 程水源, 等. SWAT 模型在三峡库区流域非点源污染模拟的适用性研究[J]. 安全与环境学报, 2012, **12**(2): 146-152.
Chen Y, Guo X R, Cheng S Y, *et al.* On the applicability of SWAT model to the nonpoint source pollution in the watershed of the three-gorge reservoir[J]. Journal of Safety and Environment, 2012, **12**(2): 146-152.
- [18] 张展羽, 司涵, 孔莉莉. 基于 SWAT 模型的小流域非点源氮磷迁移规律研究[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(2): 93-100.
Zhang Z Y, Si H, Kong L L. Migration of non-point source nitrogen and phosphorus in small watershed based on SWAT model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, **29**(2): 93-100.
- [19] Jeon J H, Yoon C G, Donigan Jr A S, *et al.* Development of the HSPF-Paddy model to estimate watershed pollutant loads in paddy farming regions[J]. Agricultural Water Management, 2007, **90**(1-2): 75-86, doi: 10.1016/j.agwat.2007.02.006.

- [20] 罗娜, 李华, 樊霆, 等. HSPF 模型在流域面源污染模拟中的应用[J]. 浙江农业科学, 2019, **60**(1): 141-145.
- [21] 宋林旭, 刘德富, 肖尚斌. 三峡库区香溪河流域非点源营养盐输出变化的试验研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(8): 990-996.
- Song L X, Liu D F, Xiao S B. Experimental study on nonpoint source nutrient output from Xiangxi basin in Three Gorges Reservoir[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, **20**(8): 990-996.
- [22] 鲁耀, 胡万里, 雷宝坤, 等. 云南坡耕地红壤地表径流氮磷流失特征定位监测[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(8): 1544-1553.
- Lu Y, Hu W L, Lei B K, *et al.* The monitoring of nitrogen and phosphorus loss by surface runoff in sloping red soil fields of Yunan province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, **31**(8): 1544-1553.
- [23] 吴家森, 陈闻, 姜培坤, 等. 不同施肥对雷竹林土壤氮、磷渗漏流失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(2): 33-37, 44.
- Wu J S, Chen W, Jiang P K, *et al.* Effects of different fertilization on seepage losses of nitrogen and phosphorus in the soil under phyllostacys praecox stand [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, **26**(2): 33-37, 44.
- [24] 袁东海, 王兆骞, 陈欣, 等. 不同农作方式红壤坡耕地土壤氮素流失特征[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(7): 863-866.
- Yuan D H, Wang Z Q, Chen X, *et al.* Characteristics of nitrogen loss from sloping field in red soil area under different cultivation practices [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, **13**(7): 863-866.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 等. 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5330-5339.
- Cao R X, Liu J, Deng K K, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus losses and runoff in a typical purple soil watershed in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Environmental Science, 2019, **40**(12): 5330-5339.
- [28] 崔超, 刘申, 翟丽梅, 等. 兴山县香溪河流域农业源氮磷排放估算及时空特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(5): 937-946.
- Cui C, Liu S, Zhai L M, *et al.* Estimates and spatio-temporal characteristics of nitrogen and phosphorus discharges from agricultural sources in Xiangxi River Basin, Xingshan County [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34**(5): 937-946.
- [29] 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.
- [30] 冯小杰, 郑子成, 李廷轩. 紫色土区坡耕地玉米季地表径流及其氮素流失特征[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(1): 43-48, 54.
- Feng X J, Zheng Z C, Li T X. Characteristics of runoff and nitrogen loss in sloping cropland of purple soil during corn growing season [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **31**(1): 43-48, 54.
- [31] 张宇, 荣湘民, 王心星, 等. 覆盖与生态拦截对旱地土壤地表径流和氮素流失的影响[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(2): 15-19.
- Zhang Y, Rong X M, Wang X X, *et al.* Effects of ecology interception and film mulching on surface runoff and nitrogen loss in upland soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, **28**(2): 15-19.
- [32] 林超文, 罗春燕, 庞良玉, 等. 不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响[J]. 生态学报, 2010, **30**(22): 6091-6101.
- Lin C W, Luo C Y, Pang L Y, *et al.* Effects of different cultivation and mulching methods on soil erosion and nutrient losses from a purple soil of sloping land [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, **30**(22): 6091-6101.
- [33] 高海鹰, 黄丽江, 张奇, 等. 不同降雨强度对农田土壤氮素淋失的影响及 LEACHM 模型验证[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(4): 1346-1352.
- Gao H Y, Huang L J, Zhang Q, *et al.* Nitrogen leaching under different rainfall intensities for agricultural soils-laboratory experiments and numerical modeling using LEACHM [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, **27**(4): 1346-1352.
- [34] 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.
- [35] 吴淑芳, 刘政鸿, 霍云云, 等. 黄土坡面细沟侵蚀发育过程与模拟[J]. 土壤学报, 2015, **52**(1): 48-56.
- Wu S F, Liu Z H, Huo Y Y, *et al.* Development of rill erosion on loess slope and its simulation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, **52**(1): 48-56.
- [36] 郭燕虹, 张丽萍, 陈儒章, 等. 坡长和雨强对氮素流失影响的模拟降雨试验研究[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(2): 7-12, 39.
- Wu Y H, Zhang L P, Chen R Z, *et al.* Research on the effect of slope length and rainfall intensity on nitrogen loss in sloping land under artificially simulated rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **31**(2): 7-12, 39.
- [37] 林超文, 罗春燕, 庞良玉, 等. 不同雨强和施肥方式对紫色土养分损失的影响[J]. 中国农业科学, 2011, **44**(9): 1847-1854.
- Lin C W, Luo C Y, Pang L Y, *et al.* Effect of different fertilization methods and rain intensities on soil nutrient loss from a purple soil [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, **44**(9): 1847-1854.
- [38] 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 Gorges Reservoir Area [J]. Environmental Science, 2017, **38**(1): 138-146.

- [39] 吴东. 三峡库区兰陵溪小流域土地利用变化及其养分流失控制[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
- Wu D. Land use changes and its control effect of nutrient loss in Lanlingxi watershed of the Three Gorges Reservoir Area [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2016.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 范晓娟, 张丽萍, 邓龙洲, 等. 植被覆盖和施肥对不同坡长坡地总磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(6): 27-32.
- Fan X J, Zhang L P, Deng L Z, *et al.* Effects of vegetation coverage and fertilization on total phosphorus loss on slope land with different slope length [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **31**(6): 27-32.
- [44] 王荣嘉, 高鹏, 李成, 等. 模拟降雨下麻栎林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.
- [45] 姜世伟. 三峡库区典型小流域面源污染特征研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2017.
- Jiang S W. Study on characteristics of non-point source pollution in a typical small watershed of Three Gorges Reservoir area [D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2017.



CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM _{2.5} Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM _{2.5} During Autumn and Winter in Yangquan City	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM _{2.5} from Taian City During the Summer	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR)	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil	JI Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Typess on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As ⁵⁺ Stress	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)