

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期
Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素	李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)
新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM _{2.5} 的影响	逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)
基于网格的长三角 PM _{2.5} 分布影响因素及交互效应	黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)
ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用	李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)
中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析	赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 丁志健, 王格慧 (3127)
四川盆地 PM _{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析	李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)
河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用	邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)
九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应	黄亚玲, 黄金良 (3156)
滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性	袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)
白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析	张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)
镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价	原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)
洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险	刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)
苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价	白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)
武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价	朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)
升金湖湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析	崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)
青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析	寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)
三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析	何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)
哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子	路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)
湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应	居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)
补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征	赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海森, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)
蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征	李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)
长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例	马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)
长江下游居民区降水地表径流的污染特征	郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)
潮河流域降雨径流事件污染物输出特征	包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)
不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响	单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)
基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估	秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)
蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性	李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸣 (3348)
污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布	王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)
基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因	杜彩丽, 李中泓, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)
石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析	唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月月, 陈怡雯, 周帅 (3375)
一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水	吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)
外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能	唐义, 马懿文, 万金泉, 王艳, 叶刚 (3392)
臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响	吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)
间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张富国, 张杰 (3405)
提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响	古柏铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)
低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析	钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)
矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化	张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)
2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氮排放的影响	王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)
麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氮挥发排放的影响	韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)
水肥管理对热带地区双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)
耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径	杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)
铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响	赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)
农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价	陈莹, 刘汉燚, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)
亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例	刘旭, 王训, 王定勇 (3507)
深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征	林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)
同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选	周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)
两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复	袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)
青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征	刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)
成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析	刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)
土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异	席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)
《环境科学》征订启事 (3315)	
《环境科学》征稿简则 (3357)	
信息 (3391, 3441, 3564)	

潮河流域降雨径流事件污染物输出特征

包鑫^{1,2}, 江燕^{1,2*}, 胡羽聪^{1,2}

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在半干旱半湿润地区, 非点源养分污染的发生主要由降水径流事件驱动, 伴随这些短暂脉冲事件流失的养分量决定着一年的总污染排放负荷, 因此研究汛期降雨径流事件下水体污染动态特征是半干旱半湿润地区污染负荷模拟及控制的关键。以北京市密云水库上游的潮河流域为研究区域, 2018 年和 2019 年汛期进行古北口站和下会站的降雨径流过程水质水量同步监测。结果表明: ①监测的 3 场降雨事件 (E1、E2 和 E3) 中, E1 的降雨量和强度最大, 相应的流量和污染物浓度最高; ②不同降雨事件下, 污染物浓度及其变化不同。大暴雨事件和暴雨事件 (E1、E3) 下, 总氮 (TN)、氨氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、总磷 (TP) 和悬浮物 (TSS) 的浓度与流量变化过程相似; 大雨事件下 (E2), 总氮 (TN)、氨氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、总磷 (TP) 和悬浮物 (TSS) 的浓度与流量变化过程相似, 硝氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 浓度变化与流量相反; ③不同降雨事件下, 不同形态污染物浓度及其变化不同。降雨侵蚀强烈 (E1、E2), 颗粒态污染物浓度变化明显, 与悬浮物 (TSS) 呈显著正相关关系; 降雨未引起土壤侵蚀 (E3), 氮磷形态以溶解态氮 (TDN) 和溶解态磷 (TDP) 为主, 浓度变化主要与流量有关; ④不同降雨事件下, 不同站点的流量和污染物浓度不同。强降雨侵蚀事件在古北口表现更明显, 引起流量和总磷 (TP)、悬浮物 (TSS) 的变化幅度更大。以上结果可以用来确定降雨事件引发的非点源污染物输出特征, 为该地区的汛期水质预测与控制提供参考。

关键词: 潮河流域; 降雨径流事件; 非点源污染; 污染负荷; 污染物动态

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3316-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202009181

Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed

BAO Xin^{1,2}, JIANG Yan^{1,2*}, HU Yu-cong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In semi-arid and semi-humid areas, the occurrence of non-point source nutrient pollution is mainly driven by rainfall-runoff events, and nutrient loss under rainfall events determines annual total pollution load. Therefore, research on riverine nutrient dynamics under rainfall-runoff events in flood seasons is critical for simulating and controlling pollution load in semi-arid and semi-humid areas. The Chaohe River watershed, upstream watershed of Miyun Reservoir in Beijing was considered as study area, water quantity and quality of rainfall-runoff process at Gubeikou and Xiaohui stations were monitored synchronously in flood seasons in 2018 and 2019. The results indicated the following: ① Among the three rainfall events (E1, E2, and E3), E1 had the highest precipitation and rainfall intensity, and the corresponding discharge and pollutant concentrations were the highest. ② Under different rainfall events, the pollutant concentrations and their variations were different. The variations of concentrations of total nitrogen (TN), ammonia ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrate ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), total phosphorus (TP), and total suspended solids (TSS) were similar to the discharge process under the heavy rainstorm event (E1) and the rainstorm event (E3). The concentrations of total nitrogen (TN), ammonia ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), total phosphorus (TP), and total suspended solids (TSS) were similar to the discharge process under the heavy rain events (E2), but the variations of nitrate ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) concentrations were opposite to those in the discharge process. ③ The concentrations and variations of different forms of pollutants were different under different rainfall events. Under the event of strong rainfall erosion (E1 and E2), the concentrations of particulate pollutants varied significantly, being positively correlated with that of total suspended solids (TSS). For the rainfall event that did not cause soil erosion (E3), the forms of nitrogen and phosphorus were dominated by total dissolved nitrogen (TDN) and total dissolved phosphorus (TDP) respectively, whose variations were mainly related to discharge. ④ The discharge and pollutant concentrations at each station varied under different rainfall events. Heavy rainfall erosion was more obvious at Gubeikou station, causing significant variations in discharge, TP, and TSS. Therefore, these results can be used to determine migration patterns of non-point source pollutants caused by rainfall-runoff events and provide references for water quality prediction and control in flood seasons.

Key words: Chaohe River watershed; rainfall-runoff events; non-point source pollution; pollution load; pollutant dynamics

非点源污染是当前各国流域水体污染的主要类型, 识别污染来源与定量评估水体变化是水质目标管理的关键^[1]。农业非点源污染是当前非点源污染研究的重点^[2], 降水是农业非点源污染发生的关键驱动力, 引起地表沉积污染物汇入受纳水体使水质

收稿日期: 2020-09-18; 修订日期: 2020-12-17

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0201206, 2019YFB2102901, 2019YFB2102902)

作者简介: 包鑫 (1994 ~), 男, 硕士, 主要研究方向为流域非点源污染, E-mail: xinbao_st@cees.ac.cn

* 通信作者, E-mail: yanjiang@cees.ac.cn

恶化^[3]. 由于降雨特征和下垫面条件等因素的时空差异性,不同降雨径流事件引发的非点源污染动态过程差异显著^[4].

目前在我国南方湿润地区开展的降雨径流事件下污染物流失研究较多,如三峡库区流域、洱海流域、太湖流域、香溪河流域及西湖龙泓洞流域等地区,分别从降雨量、降雨历时及强度等降雨特征出发,研究不同下垫面条件对径流产生和污染物迁移等方面的影响,计算氮磷等污染物的平均浓度(EMCs)及输出负荷,进而分析降雨径流过程中污染物与其它因素的关系,并通过模型量化分析污染状况^[5~10]. 半干旱半湿润地区流域的非点源污染主要由汛期暴雨事件引起,相对于湿润地区机制更复杂,首先降雨形成的坡面径流将污染物冲刷至受纳水体,同时动能较大的雨滴击打地面造成土壤颗粒剥离与分散,并且坡面径流的紊动作用提高了径流对泥沙的携带能力,从而增加颗粒态污染物的输出^[11,12],另外考虑到降雨过程中包气带含水量是否达到田间持水量,以及降雨强度与土壤入渗率的动态关系,半干旱半湿润地区形成了独特的“蓄满-超渗产流”模式加剧了非点源污染过程的复杂性与研究难度^[13,14]. 当前有研究者在沂河孟良崮流域、白洋淀流域、陕西灞河流域、崂山水库流域和于桥水库流域等区域,基于野外降雨事件监测开展了非点源污染输出特征研究,分析各自气候特征区降雨径流事件下的污染物迁移规律^[15~18].

潮河位于华北半干旱半湿润地区,作为密云水库重要的入库河流之一,其水质关系着首都地区的饮用水安全,由于潮河流域上游工业点源较少,该流域水环境质量主要受农业非点源污染威胁^[19]. 对潮河流域的径流变化进行分析,并通过流域非点源污染模型等模拟方法,在年或月尺度进行非点源污染过程模拟、污染物负荷估算及污染源解析等研究,是潮河流域非点源污染的主要研究方式^[20~24]. 尽管模型方法已比较成熟,但在潮河流域等高分辨率水文水质数据相对缺乏的半干旱半湿润地区应用时,仍有提高的空间. 常规水质监测为每月一次,这种低频次的水质监测难以获取短历时的强降雨事件中的特征水样. 相应地,非点源污染研究也多在月尺度上进行分析,忽略了汛期降雨事件对污染物迁移和河流水体的显著影响,此类研究也相对较少. 然而潮河等半干旱半湿润地区流域的降雨主要集中在汛期,这种强降雨事件驱动大量的氮磷等非点源污染进入水体. 因此,在汛期进行高频次的降雨事件水文水质监测,研究污染物浓度在洪水过程中的变化,是探究流域非点源污染输出特征和提高模型模拟精度的

关键.

鉴于此,本文以降雨径流过程中汇入河道的污染物为研究对象,进行河道水质水量同步监测,提高监测采样频次以收集降雨径流过程中的特征水样,从而获取流域的水文特征和污染物浓度,并增设监测站点进行结果验证和对比. 通过分析污染物类型以及浓度与降雨和流量的动态关系,掌握非点源污染的影响因素及动态输出特征,通过完善该流域降雨事件非点源污染研究,以期构建流域污染物浓度预测方法及水质评估提供重要参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究以北京市密云水库上游的潮河流域为例,潮河流域地处北纬 $40^{\circ}27' \sim 41^{\circ}32'$ 和东经 $116^{\circ}17' \sim 117^{\circ}12'$ 之间,发源于河北省丰宁县,流经古北口进入北京市密云区,在辛庄附近汇入密云水库,是密云水库最主要的入库河流之一,约占密云水库控制流域面积的 30%. 所在区域属暖温带大陆季风型半干旱半湿润气候,年平均降水量 490 mm,降水多以暴雨形式出现且集中在 6~9 月,多年平均径流量为 1.8 亿 m^3 . 潮河流域是一个典型的农业耕作区,以林地、草地和耕地为主,占流域总面积的 98% 以上. 目前潮河水质为 II、III 类,点源污染较少,农业生产活动产生的氮、磷是水体非点源污染的主要原因. 潮河流域自上而下建有大阁、古北口和下会这 3 个水文站,其中古北口水文站位于河北省和北京市密云区交界处,控制流域面积为 4 701 km^2 ,下会水文站位于密云区高岭镇,控制流域面积达 5 340 km^2 .

1.2 监测与采样

本研究于 2018 年及 2019 年汛期,在潮河流域下游河道进行水质水量同步监测,采集降雨事件中的河流水样. 降雨初期 2 h 每 30 min 采样一次,之后每 3 h 采样一次,降雨结束后根据水位变化情况调整采样频次并继续采样,以确保监测涵盖洪水过程的起涨段、峰顶段和退水段. 为了反映污染物在河道内迁移状况,在潮河流域设置了 2 个监测断面,分别位于古北口水文站和下会水文站,每个断面布设一个采样点(图 1).

1.3 水样分析

水样均用预先处理好的 500 mL 聚乙烯塑料瓶采集,并于 4℃ 冷藏保存带回实验室分析. 水样测试指标包括总氮(TN)、总磷(TP)、溶解态氮(TDN)、溶解态磷(TDP)、硝氮(NO_3^- -N)、氨氮(NH_4^+ -N)和悬浮物(TSS). 各指标测定方法均符合中华人民共

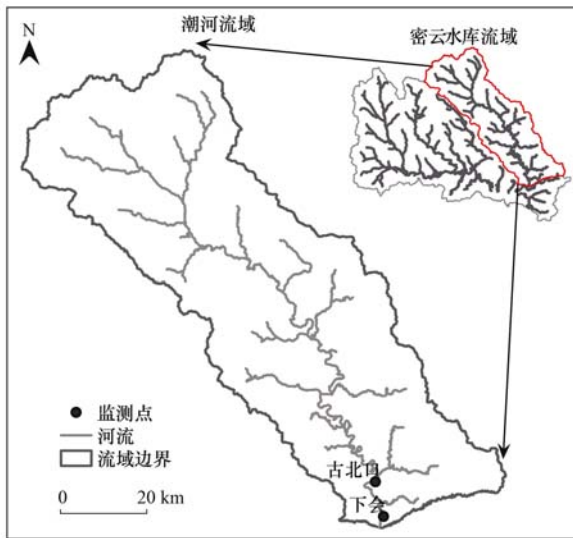


图1 流域位置及监测点

Fig. 1 Location of study catchment and monitoring point

国环境保护行业标准,其中 TN 和 TDN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 (HJ 636-2012); TP 和 TDP 采用钼酸铵分光光度法 (GB 11893-89); NO_3^- -N 采用紫外分光光度法 (HJ/T 346-2007); NH_4^+ -N 采用纳氏试剂分光光度法 (HJ 535-2009); TSS 采用重量法 (GB 11901-89)。

1.4 数据来源及处理

降雨量、河水流量及污染物浓度是本研究使用的主要数据,其中降雨量的数据来源包括采样点布设的翻斗式雨量计以及中国气象数据网中国地面气象站逐小时观测资料中的密云上甸子站数据 (<https://data.cma.cn/>); 流量数据由水文站提供。污染物浓度由水样处理后经实验室分析得到。

前期土壤湿度是影响降雨径流产生的重要因素之一,前期降雨指数 (API) 可以用来定量描述雨前土壤的湿度状况,从而进行不同降雨事件之间的比较。API 计算公式为^[25]:

$$\text{API} = \sum_{i=1}^n k^i \times P_i$$

式中, P_i 为降雨事件前 1, 2, ..., i ($i = 14$) 的降雨量 (mm), k 为消退系数, 本研究中取 0.85。

污染物浓度波动情况分析采用相对标准偏差 (RSD) 方法, 可以消除由浓度数量级不同导致的误差, 其计算公式为:

$$\text{RSD} = \frac{S}{\bar{x}} \times 100\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}}{\bar{x}} \times 100\%$$

式中, S 为标准偏差 SD, $\bar{x}$ 为平均值。

污染物平均浓度 EMCs 用以描述由降雨径流引发的污染物迁移对河流水质的影响程度。对于本研

究中的潮河流域, 基流污染负荷不可忽略, 包括上游点源排放以及地下径流携带的污染物。因此将降雨径流事件开始前, 河流相对稳定的污染物浓度作为基流浓度, 当降雨事件发生引起水体流量上升, 此时浓度变化由降雨径流过程引起^[26]。则降雨径流负荷为总负荷减去基流负荷, 即:

$$W = W_T - W_B$$

另有:

$$W_T = \sum_{i=1}^{i=n-1} \frac{c_i + c_{i+1}}{2} \times \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \times \Delta t_i$$

$$W_B = c_B \times Q_B \times \Delta t_i$$

$$Q = \sum_{i=1}^{i=n-1} \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \times \Delta t_i$$

式中, W 为降雨径流负荷 (kg), W_T 为总污染负荷 (kg), W_B 为基流负荷 (kg), c_i 为污染物在样本 i 的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), Q_i 为样本 i 的流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), Δt_i 是样本 i 和 $i+1$ 的时间间隔 (s), c_B 为降雨前基流浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), Q_B 为基流流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), Q 为径流量 (m^3)。因此污染物平均浓度 EMCs ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 为:

$$\text{EMCs} = W_T / Q$$

滞后现象 (hysteresis) 能够反映流量和污染物浓度之间的非线性关系, 也能够为污染物来源途径提供解释。将相对应的流量和污染物浓度变化趋势作图分析, 若二者之间存在滞后现象, 变化轨迹将为圈状图形, 称之为滞后圈 (hysteresis loop), 滞后圈为顺时针说明浓度峰值出现在涨水段, 为逆时针说明浓度峰值晚于流量峰出现^[27]。为了量化描述滞后现象程度, 便于不同事件之间的对比, 提出了滞后指数 (hysteresis index, HI)。首先对流量和浓度进行归一化处理:

$$\text{Normalised } Q_i = \frac{Q_i - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}}$$

$$\text{Normalised } c_i = \frac{c_i - c_{\min}}{c_{\max} - c_{\min}}$$

式中, Q_i 和 c_i 为样本 i 的流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) 和浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), $Q_{\max}$ 和 $Q_{\min}$ 为一场降雨径流事件中的最大和最小流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), $c_{\max}$ 和 $c_{\min}$ 为该场降雨径流事件中的最大和最小浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。之后计算滞后指数 HI, 其计算公式为:

$$\text{HI} = \frac{1}{n} \sum \text{HI} - Q_i = \frac{1}{n} \sum (c_{\text{RL}} - Q_i - c_{\text{FL}} - Q_i)$$

式中, $c_{\text{RL}} - Q_i$ 为归一化后的流量 Q_i 在涨水段对应的归一化浓度, $c_{\text{FL}} - Q_i$ 为退水段对应的归一化浓度, n 是选择的样本点数量, 本研究以归一化流量的每 5% 为间隔进行一次计算。HI 取值范围在 -1 ~ 1 之间, 值越接近 1 说明滞后现象越明显, 形成的滞后现

象关系图越饱满. HI 值符号为正说明为顺时针滞后现象, 污染物主要来源于地表冲刷; 符号为负说明为逆时针滞后现象, 污染物主要随壤中流迁移.

流量和污染物浓度之间的相关性研究采用 Spearman 秩相关分析方法, 在 α 值为 0.01 的显著性水平下检验, 在 SPSS 22.0 软件中进行.

2 结果与分析

2.1 降雨及水文特征

监测期内共发生 3 场降雨事件, 各场降雨和流量特征见表 1. 以 24 h 降雨量计, 发生于 2018 年的 E1 为大暴雨、E2 为大雨, 发生于 2019 年的 E3 为暴

雨. 图 2 展示了这 3 场降雨事件的逐小时降雨量情况, 结合表 1 的降雨量等数据可以发现, E1 降雨量更大且时间短促, E2 发生 3 次较明显的降雨过程但降雨总量较小, 尽管 E3 降雨量大于 E2, 但是其降雨历时更长且分散. 这 3 场降雨是半干旱半湿润地区汛期常见的降雨类型, 具有短历时、强降水等主要特征, 为强度较大的径流侵蚀过程提供了驱动力. E1 (大暴雨) 降雨总量、雨强最大, 降雨前土壤湿度更高, 形成了 3 场降雨事件中最大的洪水过程, 古北口和下会两个监测站点实测最大流量分别达到 $274 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $230 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. 尽管 E3 (暴雨) 降雨总量和 API 均大于 E2 (大雨), 但 E3 的最大流量小于 E2.

表 1 降雨和流量特征
Table 1 Characteristics of rainfall and discharge

事件	日期 (年-月-日)	降雨总量 /mm	最大雨强 /mm·h ⁻¹	API	降雨历时 /h	径流历时/h		实测最大流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	
						古北口站	下会站	古北口站	下会站
E1	2018-07-24	127.6	24.1	71	17	37	37	274.0	230.0
E2	2018-08-11	76.4	21.2	20	24	108	181	47.2	42.9
E3	2019-08-06	103.8	21.3	28	26	208	196	20.4	13.4

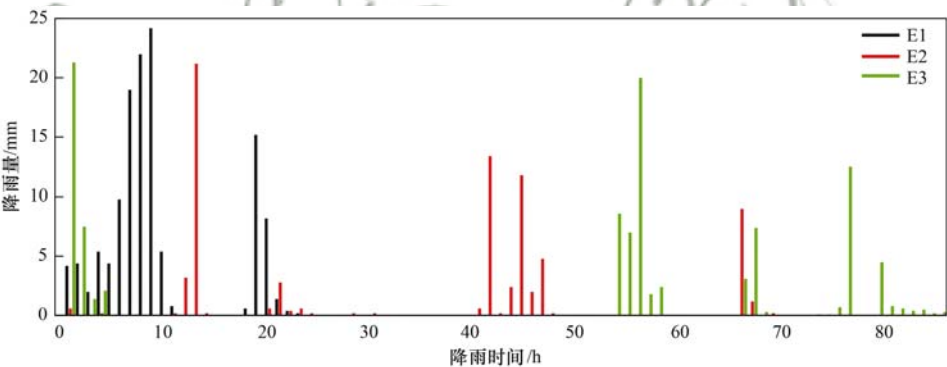


图 2 3 场降雨事件逐小时降雨量
Fig. 2 Hourly rainfall depths for three evaluated rainfall events

图 3 显示了 2018 年和 2019 年汛期流量与降雨量的时间响应关系. 从流量过程线看, 2018 年 E1 和 E2 事件表现出的两次峰值形状较明显并且差异显著, E1 表现出“陡涨陡落”的特征, 持续时间短但变化剧烈, 而 E2 洪水过程时间较长; 2019 年 E3 洪峰流量较小, 流量变化相对平稳. 比较图 3 中降雨和流量峰的出现时间, 即降雨事件发生后流量峰的响应速度, 可以发现大致为 $E1 > E2 > E3$.

2.2 流量和浓度及变化特征

由于降雨特征差异和采样点下垫面条件不同, 形成了不同的降雨-径流-污染过程, 导致不同程度的非点源污染输出. 图 4 和图 5 分别为古北口站和下会站 3 场降雨事件下的污染物浓度过程线. E1 中 TN 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度与流量变化过程相似, TDN 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度变化不明显; TP 和 TSS 浓度变化范围较广, 二者浓度变化曲线相似; TDP 浓度较低且变

化幅度较小, 为 $0.05 \sim 0.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 下会站污染物浓度峰滞后于流量峰. E2 古北口站的 TN 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度随流量上升, TDN 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度变化与流量相反; 下会站氮素浓度随流量上升, 但 TN、TDN 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度在洪水初期略有下降; TP 和 TSS 浓度变化在洪水过程中变化明显, 二者浓度变化曲线与流量过程线接近; TDP 浓度小幅度上升. E3 氮素浓度均随流量上升明显, 其中 TN、TDN 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度过程线高度相似; TP、TDP 和 TSS 浓度略有波动, 仍表现出随流量的增减趋势. 从流量峰和浓度峰时间关系上看, 二者在古北口站的出现时间相近, 但下会站的污染物浓度峰晚于流量峰出现.

对比这 3 场降雨事件, E1 和 E2 代表的 2018 年汛期降雨事件的流量和污染物浓度均大于 2019 年的 E3, 如 2018 年 TN 浓度为 $(12.68 \pm 1.73) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 2019 年 TN 浓度为 $(5.99 \pm 2.3) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

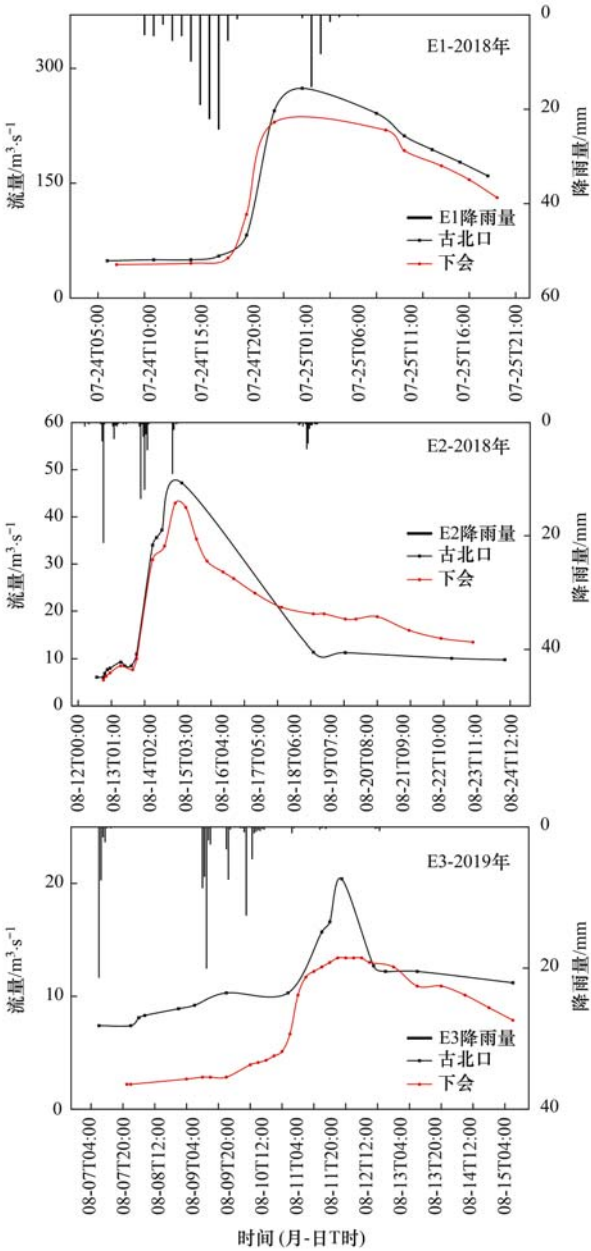


图3 降雨径流响应

Fig. 3 Response between rainfall and runoff

E1 是径流和浓度过程最明显的一次降雨事件,其 TP 和 TSS 浓度数量级相对其它事件更高、变化范围更大,TP 峰值浓度约为 E2 的 7 倍和 E3 的 30 倍, TSS 峰值浓度为 E2 的 8 倍和 E3 的 121 倍. 整体上看, TN、TDN 和 NO_3^- -N 的汛期浓度变化相对稳定, 浓度分别为 (9.58 ± 3.91) 、 (8.56 ± 3.22) 和 $(4.56 \pm 1.99) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 表 2 为降雨事件的流量和污染物浓度的相对标准偏差,反映了二者在降雨径流过程中的变化幅度. 整体上看,各指标相对标准偏差最大分别是 TSS 和 TP,而 TN、TDN 和 NO_3^- -N 最小,即颗粒态污染物变化更明显. E1 和 E2 中颗粒态污染物变化幅度较大,而 E3 中 TDN 和 TDP 等溶解态污染物的浓度变化幅度更大.

图 6 比较了古北口站和下会站两个监测站点相同时期水体污染物浓度特征,整体上看古北口站的浓度较高,且浓度范围更广;而对于同一个站点不同年份的汛期浓度,在 2018 年汛期浓度更高.

2.3 EMCs 与负荷

通过将降雨事件总污染物负荷分为基流负荷与地表径流负荷,进而对不同场次降雨事件的 EMCs 和污染负荷情况进行了统计(表 3). E1 和 E2 的 TSS 和 TP 的 EMCs 更高,最高分别达到了基流浓度的 23.59 倍和 18.72 倍,该浓度极值发生于古北口站 E1; E3 中 TSS 和 TP 的 EMCs 未达到其在 E1、E2 中相对基流浓度的水平,相反地, E3 中氮素 EMCs 浓度更高,最高为 NH_4^+ -N, 达到基流浓度的 3.33 倍. 同样,由于较高的污染物 EMCs,降雨径流负荷占据了总负荷中相当高的比重, E1 和 E2 中的 TSS 和 TP 输出负荷约达到总负荷的 98%, E3 中 NH_4^+ -N 输出负荷达到 92.4%. 降雨径流负荷占比最低为 42.0%,为古北口 E1 的 TDP 负荷.

2.4 污染物浓度与流量和 TSS 的相关性分析

各污染物浓度和流量及 TSS 之间的相关性分析

表 2 不同降雨事件下的流量和污染物浓度相对标准偏差

Table 2 RSD of discharge and nutrient concentrations in response to the storm events

事件	点位	流量	浓度						
			TN	TDN	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	TP	TDP	TSS
E1	古北口	0.54	0.12	0.05	0.46	0.07	0.96	0.10	0.98
	下会	0.46	0.14	0.07	0.40	0.08	0.82	0.17	0.88
E2	古北口	0.79	0.05	0.09	0.69	0.09	1.74	0.28	1.74
	下会	0.56	0.09	0.10	0.78	0.12	0.73	0.34	0.90
E3	古北口	0.33	0.24	0.24	0.13	0.24	0.21	0.40	0.26
	下会	0.51	0.40	0.42	0.41	0.44	0.28	0.28	0.77
平均		0.53	0.17	0.16	0.48	0.17	0.79	0.26	0.92

结果见表 4, 污染物浓度与流量的相关性可以反映浓度与流量的共变趋势, 与 TSS 的关系可以说明污

染物的来源和形态特征. 整体上看, 除 TDP 之外的各污染物均与流量和 TSS 有显著的相关性 ($P <$

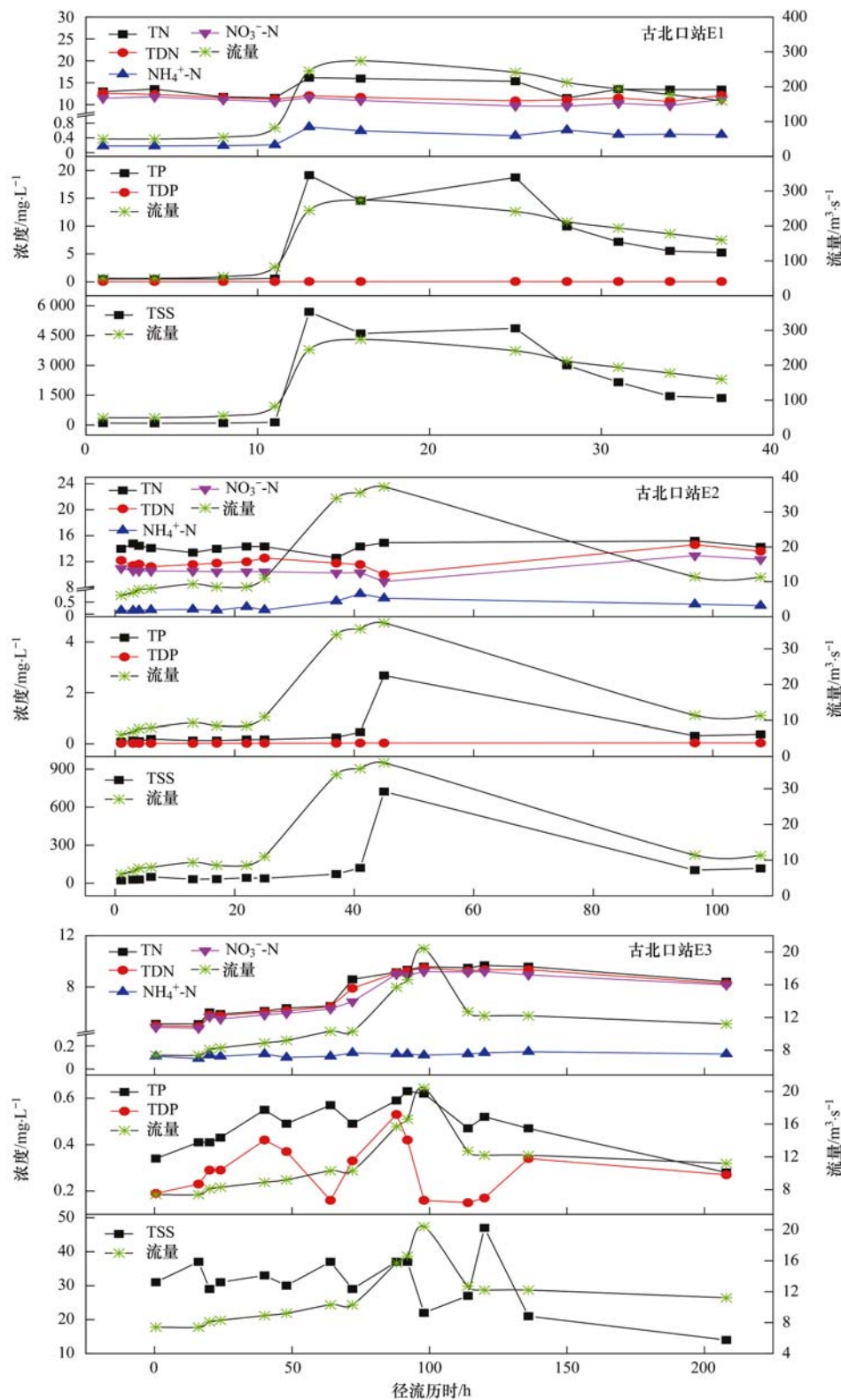


图 4 古北口站不同降雨事件下污染物浓度和流量变化

Fig. 4 Temporal changes in nutrient concentrations and discharge during different rainfall events at Gubeikou station

0.01), 其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与二者的相关系数最高, 分别为 0.763 和 0.747. E1 事件古北口站的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 和 TSS 与流量之间存在显著正相关性, 并且 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 与 TSS 也有显著的相关关系, 而这三者的相关性在下会站也表现出来, 相关系数达到 0.983 ($P <$

0.01); E2 古北口站和下会站的相关性情况相似, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、TDP 和 TSS 之间存在显著相关性, 并且它们与流量之间也表现出正相关关系; E3 中各污染物未表现出与 TSS 的相关关系, 而 TN、TDN 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 等污染物与流量呈显著正相关关系.

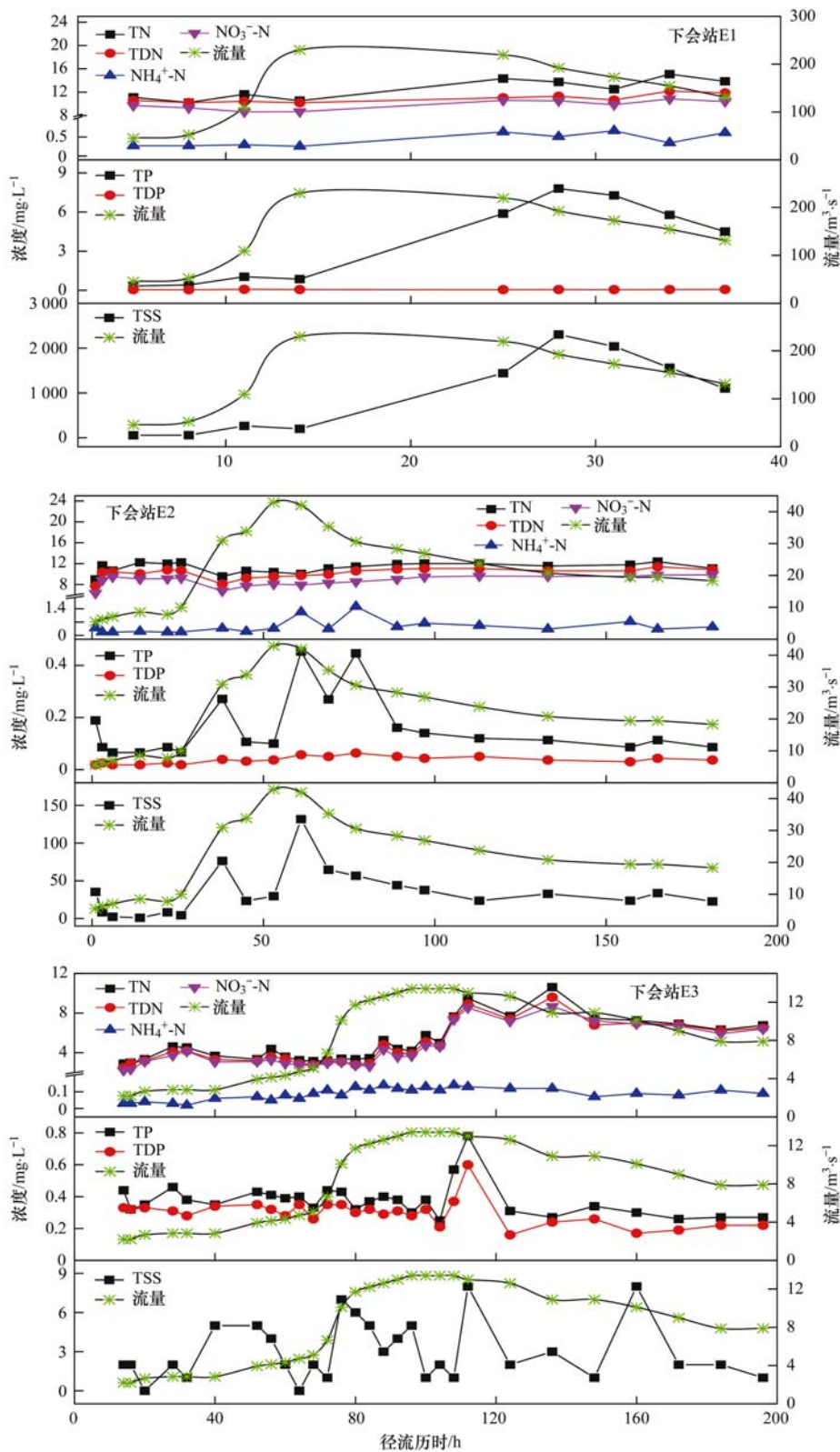


图 5 下会站不同降雨事件下污染物浓度和流量变化

Fig. 5 Temporal changes in nutrient concentrations and discharge during different rainfall events at Xiahui station

3 讨论

3.1 非点源污染发生的影响因素

非点源污染以降雨事件作为驱动因素,还受土壤含水量、地形地势、植被覆盖和土壤类型等因素影

响^[28]. 本研究中的监测点位固定,且监测期仅为相邻两年的汛期,时间较短,土地利用和土地覆被(LUCC)不会发生较大改变,因此降雨量、雨强等降雨特征以及土壤含水量,是本研究的径流和非点源污染的主要影响因素. 有研究表明,半干旱半湿润地

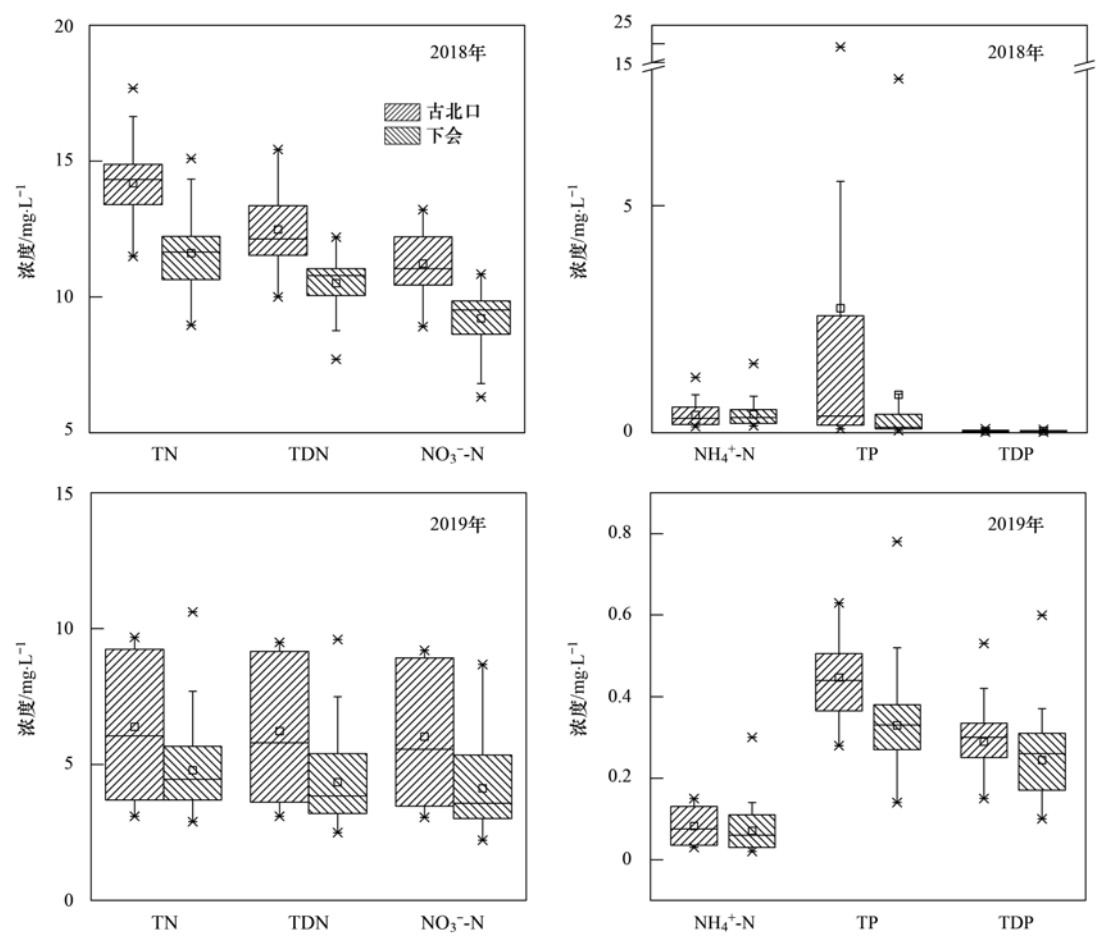


图6 古北口站和下会站汛期污染物浓度对比
Fig. 6 Comparison of nutrients concentrations in flood season at Gubeikou station and Xiahui station

表3 不同降雨事件下的 EMCs 和污染负荷比例

Table 3 EMCs and ratio of pollution loads in response to storm events									
指标	事件	点位	TN	TDN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TP	TDP	TSS
EMCs/mg·L ⁻¹	E1	古北口	14.38	11.38	0.51	10.44	11.98	0.06	3 443.78
		下会	12.73	10.86	0.45	9.81	4.18	0.06	1 098.68
	E2	古北口	14.60	12.18	0.49	10.77	1.07	0.03	294.21
		下会	11.30	10.31	0.56	8.84	0.18	0.04	42.92
	E3	古北口	8.39	8.19	0.13	7.92	0.47	0.29	26.68
		下会	6.43	6.02	0.10	5.79	0.36	0.28	3.36
EMCs/基流浓度	E1	古北口	1.12	0.89	2.83	0.88	18.72	0.86	23.59
		下会	0.93	0.91	1.45	0.92	4.06	1.00	6.00
	E2	古北口	0.99	0.92	3.27	1.00	11.89	1.50	14.47
		下会	1.26	1.34	1.44	1.40	0.95	2.00	1.21
	E3	古北口	1.64	1.64	1.18	1.63	1.38	1.53	1.27
		下会	2.22	2.41	3.33	2.61	0.82	0.85	1.68
降雨径流负荷/总负荷/%	E1	古北口	59.5	49.2	83.8	48.4	97.6	42.0	98.1
		下会	55.7	55.2	72.4	55.3	89.9	57.2	93.2
	E2	古北口	69.0	66.7	90.7	69.3	97.5	82.0	97.9
		下会	81.5	82.6	83.9	83.3	75.7	89.8	80.8
	E3	古北口	60.7	60.8	45.5	60.6	53.2	57.9	49.0
		下会	88.4	89.3	92.4	90.2	68.9	69.4	84.7

区流域产流模式相对复杂,既有包气带含水量达到田间持水量时产生的蓄满产流,还存在降水强度大于下垫面下渗能力时形成的超渗产流^[29,30]. 根据表1, E1 的降雨量和雨强最大,引起了流量和 TSS 浓度较大的变化幅度,说明这种短时强降雨类型在一定程度上形成了超渗产流,携带了大量地表沉积污染物随之迁移至受纳水体. 尽管 E2 的降雨量和 API 均小于 E3,但 E2 的流量和污染物浓度变化更大,说

表 4 各污染物浓度和流量或 TSS 的相关分析¹⁾

Table 4 Spearman correlation coefficients between nutrient concentrations and discharge, TSS

事件	流量							TSS					
	TN	TDN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TP	TDP	TSS	TN	TDN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TP	TDP
古北口	E1	0.525	-0.415	0.856 **	-0.428	0.945 **	0.369	0.957 **	0.515	-0.400	0.822 **	-0.418	0.984 **
	E2	0.148	0.015	0.942 **	-0.517	0.880 **	0.805 **	0.891 **	0.249	-0.033	0.918 **	-0.363	0.982 **
	E3	0.897 **	0.929 **	0.561	0.940 **	0.667 **	0.017	-0.119	-0.155	-0.222	-0.198	-0.146	0.401
下会	E1	0.317	0.142	0.276	0.300	0.600	0.600	0.550	0.700	0.678	0.762	0.650	0.983 **
	E2	-0.311	-0.190	0.494	-0.332	0.617 **	0.745 **	0.665 **	-0.402	-0.156	0.682 **	-0.397	0.948 **
	E3	0.560 **	0.493 **	0.871 **	0.522 **	-0.176	-0.185	0.218	0.045	-0.033	0.234	-0.049	0.004
整体		0.622 **	0.618 **	0.763 **	0.626 **	0.459 **	-0.035	0.726 **	0.723 **	0.727 **	0.747 **	0.715 **	0.445 **

1) **表示 $P < 0.01$, 显著相关

明径流和浓度响应受降雨特征影响外,还与汛期整体降雨情势有关,E2 前期雨量充足使土壤含水量提高,有利于径流产生并冲刷污染物,另外 E3 相对分散的降雨过程也使其未产生较大的降雨-径流过程.因此降雨特征及土壤含水量的差异引起了半干旱湿润地区不同程度的非点源污染过程.

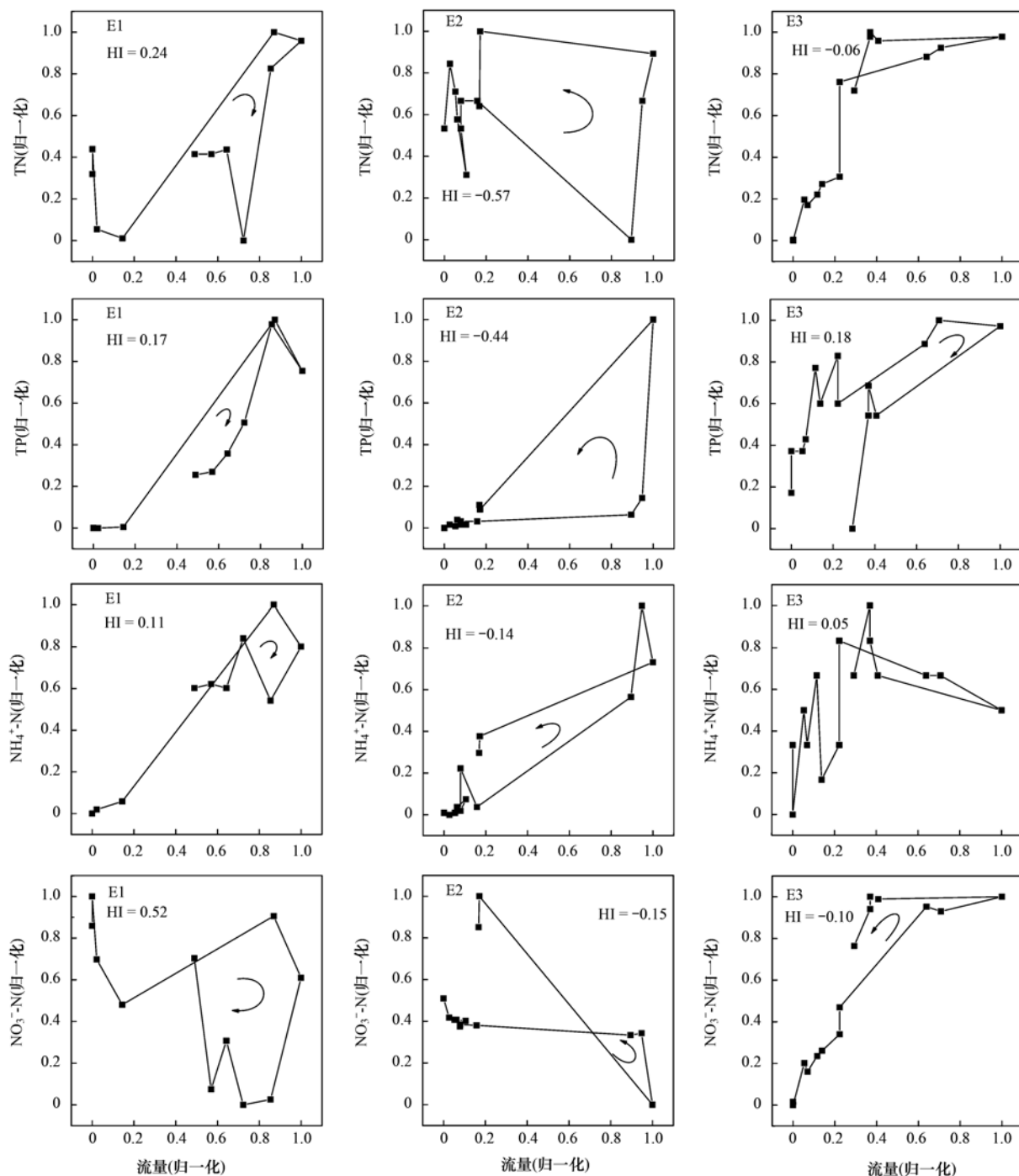
3.2 污染物来源分析和输出特征

有研究表明非点源污染过程中磷素主要以颗粒态形式迁移至水体^[31],本研究中 E1 和 E2 的 TP 等指标较高的相对标准偏差也验证了这一观点(表 2),并且它们与流量表现出了较高的共变趋势(表 4),强调了降雨径流侵蚀对颗粒态污染物迁移的作用,说明汛期降雨径流事件引起的颗粒态污染物进入水体是该流域非点源污染的主要形式. NH_4^+ -N 尽管浓度较低 $[(0.27 \pm 0.25) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}]$,但变化范围较大(E1 和 E2 更明显),并且其浓度与流量过程线变化相一致,说明地表径流冲刷引起了 NH_4^+ -N 的迁移.降雨-径流事件中污染物浓度随流量的变化关系见图 7,变化轨迹呈圈状即滞后圈,实际上二者在变化过程中也表现出了滞后现象,即不同污染物浓度峰与流量峰在时间上的先后顺序,本研究在作图分析的基础上定量分析了滞后现象的程度,即滞后指数 HI.由于古北口站和下会站各污染物变化情况整体相似,所以此处未列出下会站情况. E1 中污染物浓度均表现出顺时针滞后现象,其中 NO_3^- -N 的 HI 最高为 0.52,形成的滞后圈也最饱满.李振炜等^[32]通过选取汛期有代表性的降雨事件进行了降雨径流作用下的磷素污染物特征分析,发现最大雨强降雨事件下径流污染响应迅速的结论,这与 E1 表现相同,说明 E1 造成地表沉积的大量污染物随径流迅速释放,在发生时间上早于流量峰,此时污染物来源主要来源地表沉积物. E2 中污染物浓度均表现出逆时针滞后现象,TN 和 TP 的 HI 值分别为 -0.57 和 -0.44.但是颗粒态污染物是 E2 中变化较明显的污染物,考虑到 E2 的流量相比于 E1 要小,是由于

泥沙等颗粒的迁移运动滞后于水流,导致吸附于泥沙的部分污染物浓度上升滞后,这一结果与秦耀民等^[17]的研究发现相近. E3 中 TP 和 NO_3^- -N 分别表现出了较弱的顺时针滞后现象($\text{HI} = 0.18$)和逆时针滞后现象($\text{HI} = -0.10$),说明二者的来源不同.由于 E3 事件 TSS 浓度较低,因此未发生严重的泥沙现象,降雨主要以径流和壤中流形式进入水体. Du 等^[25]在河北柳河小流域的研究中发现,氮素中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 相反的变化趋势反映出不同的污染途径机制, NO_3^- -N 的逆时针效应反映出河道 NO_3^- -N 主要由基流贡献,降雨径流稀释了基流中 NO_3^- -N 的浓度,后期随壤中流进入水体; NH_4^+ -N 的顺时针效应表明其与降雨径流形成的非点源污染有关,由地表径流冲刷至水体导致河道 NH_4^+ -N 浓度上升,这项研究发现也可用来解释 E3 中污染物的情况.因此降雨径流过程中,不同的径流冲刷强度引起了污染物不同形式的迁移过程.另外,考虑到洪水过程中径流量上涨将引起水动力的改变,这一变化将对河底底泥产生一定的扰动,导致河流底泥沉积物磷素等污染物的释放^[33].李文超等^[34]对凤羽河流域进行了氮素输出的特征分析,得出基流是该流域氮素输出的重要途径.在本研究中,地表径流污染负荷占总负荷比例的 42%~98%(表 3),对于 E1 和 E2 而言磷素是主要的污染负荷输出,而氮素在 E3 总负荷中占比较大.因汛期降雨事件对流域非点源污染负荷输出发挥了重要的影响作用,因此在进行制定流域水质管理措施时要充分考虑到汛期降雨事件对水质及年负荷的影响.

3.3 监测点特征差异分析

在流域出口设立监测断面,可以获取该断面控制的流域内污染物负荷的输出情况.本研究选择了一个流域上下游的两个断面(图 1),上游古北口站监测断面反映潮河流域在河北省境内的污染情况,下游下会站监测断面代表潮河流域出口情况.但是上述结果表明,两个监测站点之间的流量和浓度存



图中箭头表示滞后圈变化方向

图7 古北口站污染物浓度和流量的滞后现象

Fig. 7 Hysteresis patterns of nutrient concentrations and discharge at Gubeikou station

在一定差异. 由于两个站点之间相距不远, 因此由空间差异引起的降水等气象条件, 以及下垫面特征差异不是产生流量、浓度差异的主要原因. 上述情况的出现可能是由于古北口站监测断面位于天然河道, 水质受气象水文条件及生物化学循环影响较大; 而下会站监测断面位于属于硬化河道, 相对稳定的河岸及河底状况能够有效减弱径流冲刷, 并抑制流量增加引起的河床扰动, 并且下会站河段两侧较好的岸边带条件一定程度上降低了坡面径流强度.

4 结论

(1) 不同降雨条件下的流域径流响应速度为 $E1 > E2 > E3$, 其中短时强降雨 E1 的洪峰流量最大, 污染物浓度也更高. 暴雨 E3 事件的流量和污染物浓度均小于大雨 E2 事件, 说明降雨量、降雨强度等降雨特征不是影响汛期非点源污染的唯一因素.

(2) 降雨径流携带的污染物和基流污染物之间的浓度差异是汛期降雨径流对水质产生影响的主要

原因,强降雨使地表污染物大量释放到河流水体中,出现较高 EMCs。

(3)滞后现象可以用来判定污染物的来源方式和迁移路径,顺时针滞后现象反映污染物来源于地表径流冲刷,逆时针滞后现象表明污染物随壤中流迁移。

参考文献:

- [1] 单保庆,王超,李叙勇,等. 基于水质目标管理的河流治理方案制定方法及其案例研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(8): 2314-2323.
- Shan B Q, Wang C, Li X Y, *et al.* Method for river pollution control plan based on water quality target management and the case study[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(8): 2314-2323.
- [2] 娄和震,吴习锦,郝芳华,等. 近三十年中国非点源污染研究现状与未来发展方向探讨[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(5): 1535-1549.
- Lou H Z, Wu X J, Hao F H, *et al.* Research progress of non-point source pollution in China over the past 30 years and discussion of the future direction development[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(5): 1535-1549.
- [3] 程先,陈利顶,孙然好. 考虑降水和地形的京津冀水库流域非点源污染负荷估算[J]. 农业工程学报, 2017, **33**(4): 265-272.
- Cheng X, Chen L D, Sun R H. Estimation of non-point source pollution loads of Beijing-Tianjin-Hebei region considering precipitation and topography[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, **33**(4): 265-272.
- [4] 关荣浩,马保国,黄志僖,等. 冀南地区农田氮磷流失模拟降雨试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(3): 581-589.
- Guan R H, Ma B G, Huang Z X, *et al.* Experimental study of simulated rainfall on nitrogen and phosphorus loss from farmland in Southern Hebei Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(3): 581-589.
- [5] 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.
- [6] 李晓虹,雷秋良,周脚根,等. 降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5375-5383.
- Li X H, Lei Q L, Zhou J G, *et al.* Effect of rainfall intensity on the content of nitrogen and phosphorus components in Plateau Areas: A case study of the Fengyu River watershed[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5375-5383.
- [7] Lin C, Ma R H, Wu Z P, *et al.* Detection of the sensitive inflowing river indicators related to non-point source organic pollution: a case study of Taihu Lake[J]. *Journal of Environmental Informatics*, 2018, **32**(2): 98-111.
- [8] 张一楠,黄介生,伍靖伟. 香溪河流域非点源污染负荷分析及治理措施探究[J]. 中国农村水利水电, 2017, (8): 132-135, 141.
- Zhang Y N, Huang J S, Wu J W. Analysis and treatment measures on non-point source pollution of Xiangxi River[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017, (8): 132-135, 141.
- [9] Ma X, Li Y, Li B L, *et al.* Nitrogen and phosphorus losses by runoff erosion: field data monitored under natural rainfall in Three Gorges Reservoir Area, China[J]. *CATENA*, 2016, **147**: 797-808.
- [10] 杨帆,蒋轶锋,王翠翠,等. 西湖龙泓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.
- [11] 包鑫,江燕. 半干旱半湿润地区流域非点源污染负荷模型研究进展[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(2): 674-684.
- Bao X, Jiang Y. Research progress on non-point source pollution models for semi-arid and semi-humid watershed[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(2): 674-684.
- [12] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等. 雨滴打击对黄土坡面细沟侵蚀特征的影响[J]. 农业机械学报, 2015, **46**(8): 104-112, 89.
- Shen H O, Zheng F L, Wen L L, *et al.* Effects of raindrop impact on rill erosion characteristics on loess hillslope[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, **46**(8): 104-112, 89.
- [13] Jiang Y, Liu C M, Li X Y. Hydrological impacts of climate change simulated by HIMS models in the Luanhe River basin, North China[J]. *Water Resources Management*, 2015, **29**(4): 1365-1384.
- [14] Jiang Y, Liu C M, Li X Y, *et al.* Rainfall-runoff modeling, parameter estimation and sensitivity analysis in a semiarid catchment[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2015, **67**: 72-88.
- [15] Li Z W, Zhang G H, Yu X X, *et al.* Phosphorus loss and its estimation in a small watershed of the Yimeng mountainous area, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(3): 1205-1216.
- [16] Liu R M, Wang J W, Shi J H, *et al.* Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **468-469**: 1069-1077.
- [17] 秦耀民,李怀恩. 基于降雨事件监测的非点源污染对瀋河水质的影响[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(5): 1173-1180.
- Qin Y M, Li H E. Impact of nonpoint source pollution on water quality of the Bahe River based on rainfall events monitor[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(5): 1173-1180.
- [18] 马东,杜志勇,吴娟,等. 强降雨下农田径流中溶解态氮磷的输出特征——以崂山水库流域为例[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(7): 1228-1233.
- Ma D, Du Z Y, Wu J, *et al.* Characterization of dissolved nitrogen and phosphorus transportation in farmland runoff under heavy rain-take Laoshan Reservoir watershed as example[J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(7): 1228-1233.
- [19] 庞树江,王晓燕. 流域尺度非点源总氮输出系数改进模型的应用[J]. 农业工程学报, 2017, **33**(18): 213-223.
- Pang S J, Wang X Y. Application of modified diffuse total nitrogen export coefficient model at watershed scale[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, **33**(18): 213-223.
- [20] Geng R Z, Sharpley A N. A novel spatial optimization model for achieve the trade-offs placement of best management practices for agricultural non-point source pollution control at multi-spatial scales[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **234**: 1023-1032.

- [21] 耿润哲, 王晓燕, 庞树江, 等. 潮河流域非点源污染控制关键因子识别及分区[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(4): 1258-1267.
Geng R Z, Wang X Y, Pang S J, *et al.* Identification of key factors and zonation for nonpoint source pollution control in Chaohe River watershed [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(4): 1258-1267.
- [22] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, 等. 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响[J]. 生态学报, 2014, **34**(6): 1559-1567.
Guo J T, Zhang Z Q, Wang S P, *et al.* Applying SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a watershed of northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(6): 1559-1567.
- [23] 李明涛, 王晓燕, 刘文竹. 潮河流域景观格局与非点源污染负荷关系研究[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(8): 2296-2306.
Li M T, Wang X Y, Liu W Z. Relationship between landscape pattern and non-point source pollution loads in the Chaohe River watershed [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(8): 2296-2306.
- [24] 唐芳芳, 徐宗学, 徐华山. 潮河流域非点源污染关键区识别及其管理措施研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2012, **48**(5): 497-504.
Tang F F, Xu Z X, Xu H S. Identification of non-point source pollution and assessment of management measures in the Chao River basin [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2012, **48**(5): 497-504.
- [25] Du X Z, Li X Y, Hao S N, *et al.* Contrasting patterns of nutrient dynamics during different storm events in a semi-arid catchment of northern China [J]. Water Science & Technology, 2014, **69**(12): 2533-2540.
- [26] Kämäri M, Tattari S, Lotsari E, *et al.* High-frequency monitoring reveals seasonal and event-scale water quality variation in a temporally frozen river [J]. Journal of Hydrology, 2018, **564**: 619-639.
- [27] Lloyd C E M, Freer J E, Johnes P J, *et al.* Technical Note: testing an improved index for analysing storm discharge-concentration hysteresis [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, **20**(2): 625-632.
- [28] Alvarez-Cobelas M, Angeler D G, Sánchez-Carrillo S. Export of nitrogen from catchments: a worldwide analysis [J]. Environmental Pollution, 2008, **156**(2): 261-269.
- [29] 刘金涛, 宋慧卿, 张行南, 等. 新安江模型理论研究的进展与探讨[J]. 水文, 2014, **34**(1): 1-6.
Liu J T, Song H Q, Zhang X N, *et al.* A discussion on advances in theories of Xinanjiang model [J]. Journal of China Hydrology, 2014, **34**(1): 1-6.
- [30] 芮孝芳. 产流模式的发现与发展[J]. 水利水电科技进展, 2013, **33**(1): 1-6, 26.
Rui X F. The discovery and development of runoff formation models [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, **33**(1): 1-6, 26.
- [31] 张丽, 邹鹰, 陆海明, 等. 流域非点源磷素输出负荷估算方法研究[J]. 水文, 2013, **33**(6): 11-15.
Zhang L, Zou Y, Lu H M, *et al.* A method for non-point source phosphorus load estimating in river basin [J]. Journal of China Hydrology, 2013, **33**(6): 11-15.
- [32] 李振伟, 于兴修, 刘前进, 等. 沂蒙山区典型小流域特殊降雨的磷素输出特征[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1152-1158.
Li Z W, Yu X X, Liu Q J, *et al.* Output characteristics of non-point phosphorus from a typical small watershed in Yimeng Mountainous area under the special rainfall [J]. Environmental Science, 2012, **33**(4): 1152-1158.
- [33] 鲍林林, 李叙勇. 河流沉积物磷的吸附释放特征及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(2): 350-356.
Bao L L, Li X Y. Release and absorption characteristics of phosphorus in river sediment and their influential factors [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(2): 350-356.
- [34] 李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 等. 流域氮素主要输出途径及变化特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5375-5382.
Li W C, Lei Q L, Zhai L M, *et al.* Seasonal changes of the pathways of nitrogen export from an agricultural watershed in China [J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5375-5382.

CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM _{2.5} Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM _{2.5} in the Yangtze River Delta Based on Grids	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM _{2.5} Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groundwater NO ₃ ⁻ -N in Agricultural Region of Qingdao	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)