

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总的污染排放负荷, 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.hjks.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 Xiahui 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@rcees.ac.cn
* 通信作者, E-mail: yanjiang@rcees.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接纳水体,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,以为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4701 km^2 ,下会水文站位于密云区高岭镇,控制流域面积达5340 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2h每30min采样一次,之后每3h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

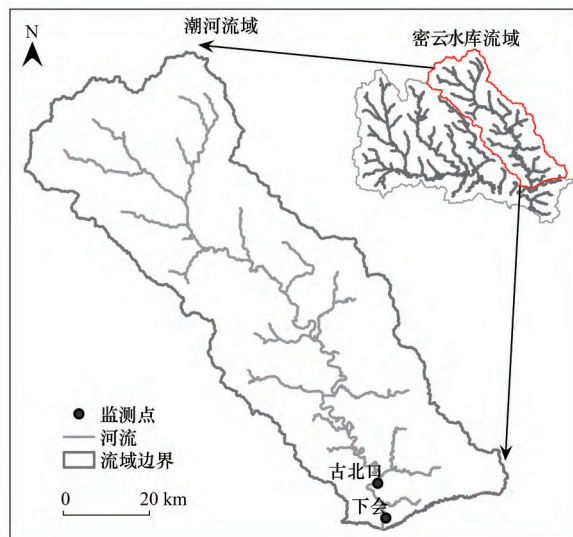


图1 流域位置及监测点

Fig. 1 Location of study catchment and monitoring point

和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

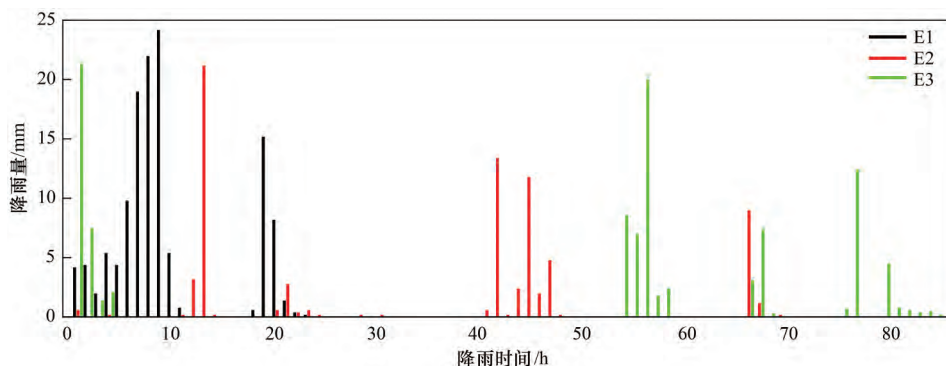


图 2 3 场降雨事件逐小时降雨量

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 $(5.99 \pm 2.3) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

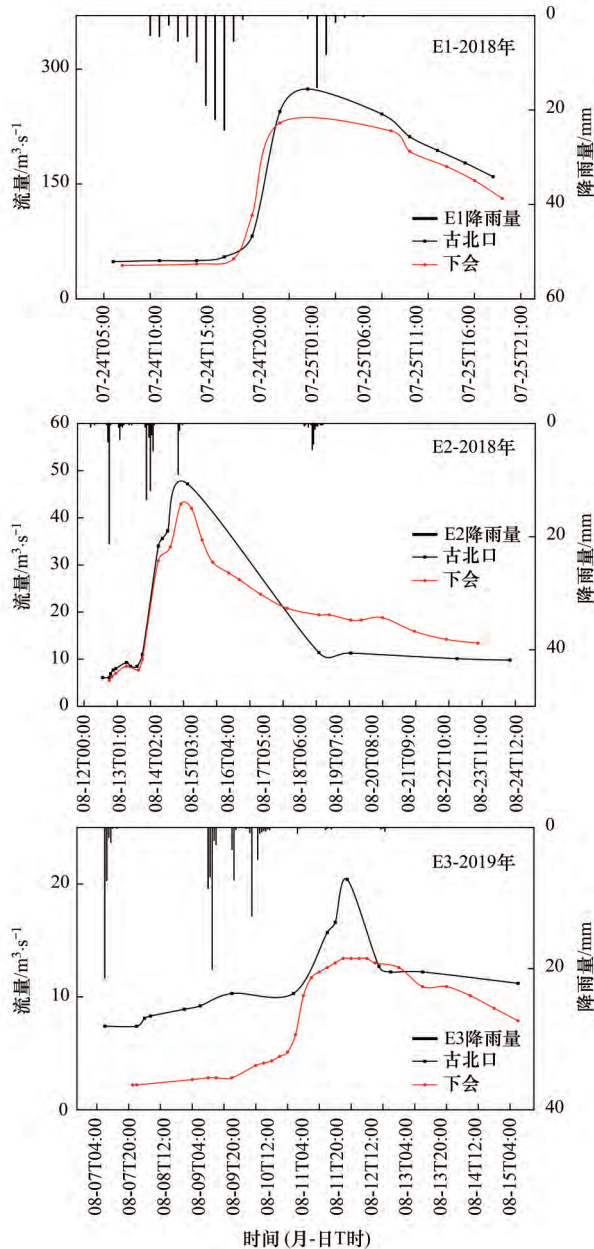


图3 降雨径流响应

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 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 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 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 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 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,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 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 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	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	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($P <$

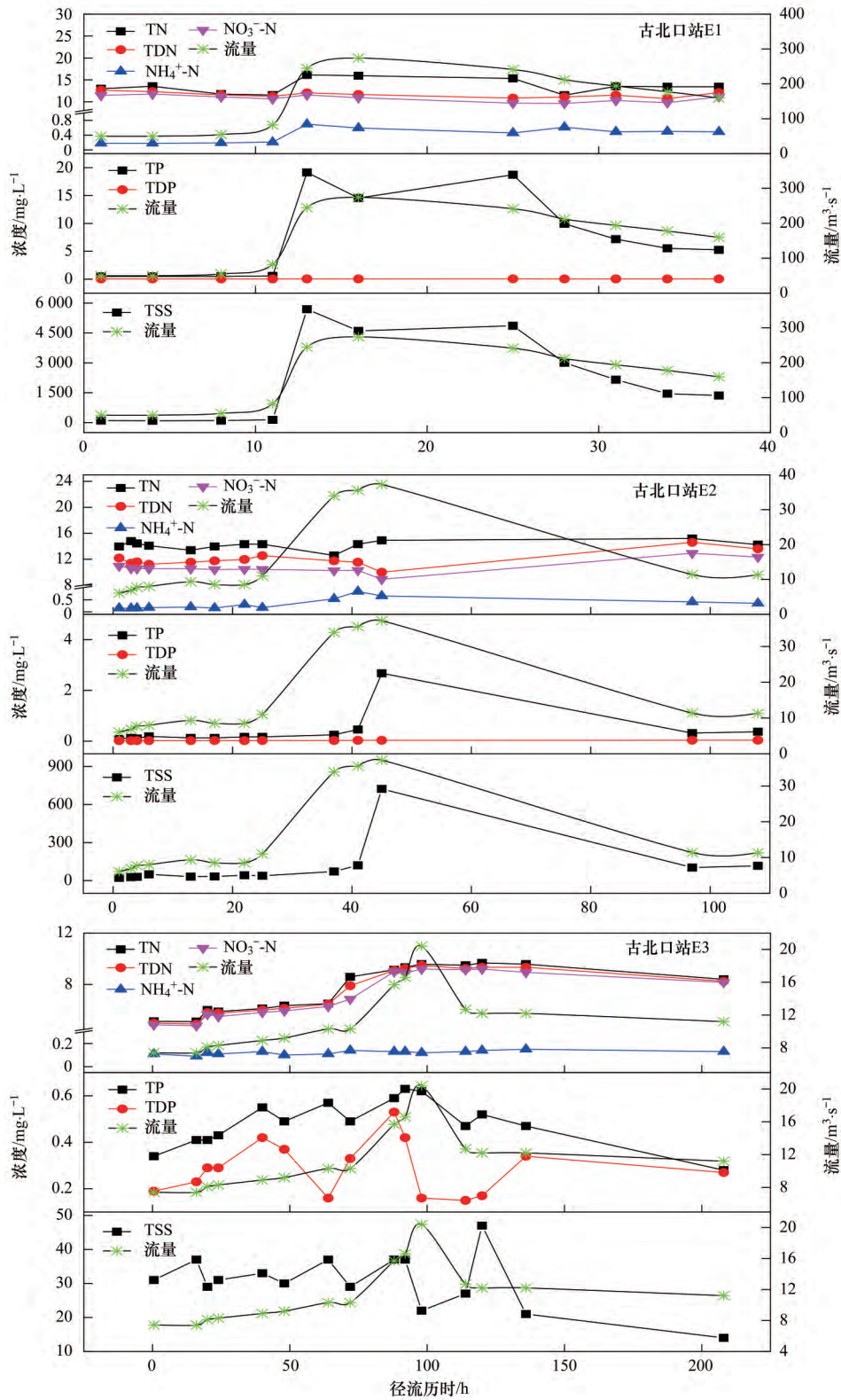


图 4 古北口站不同降雨事件下污染物浓度和流量变化

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

0.01) 其中NH₄⁺-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NH₄⁺-N、TP和TSS与流量之间存在显著正相关性,并且NH₄⁺-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, NH₄⁺-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NO₃⁻-N等污染物与流量呈显著正相关关系.

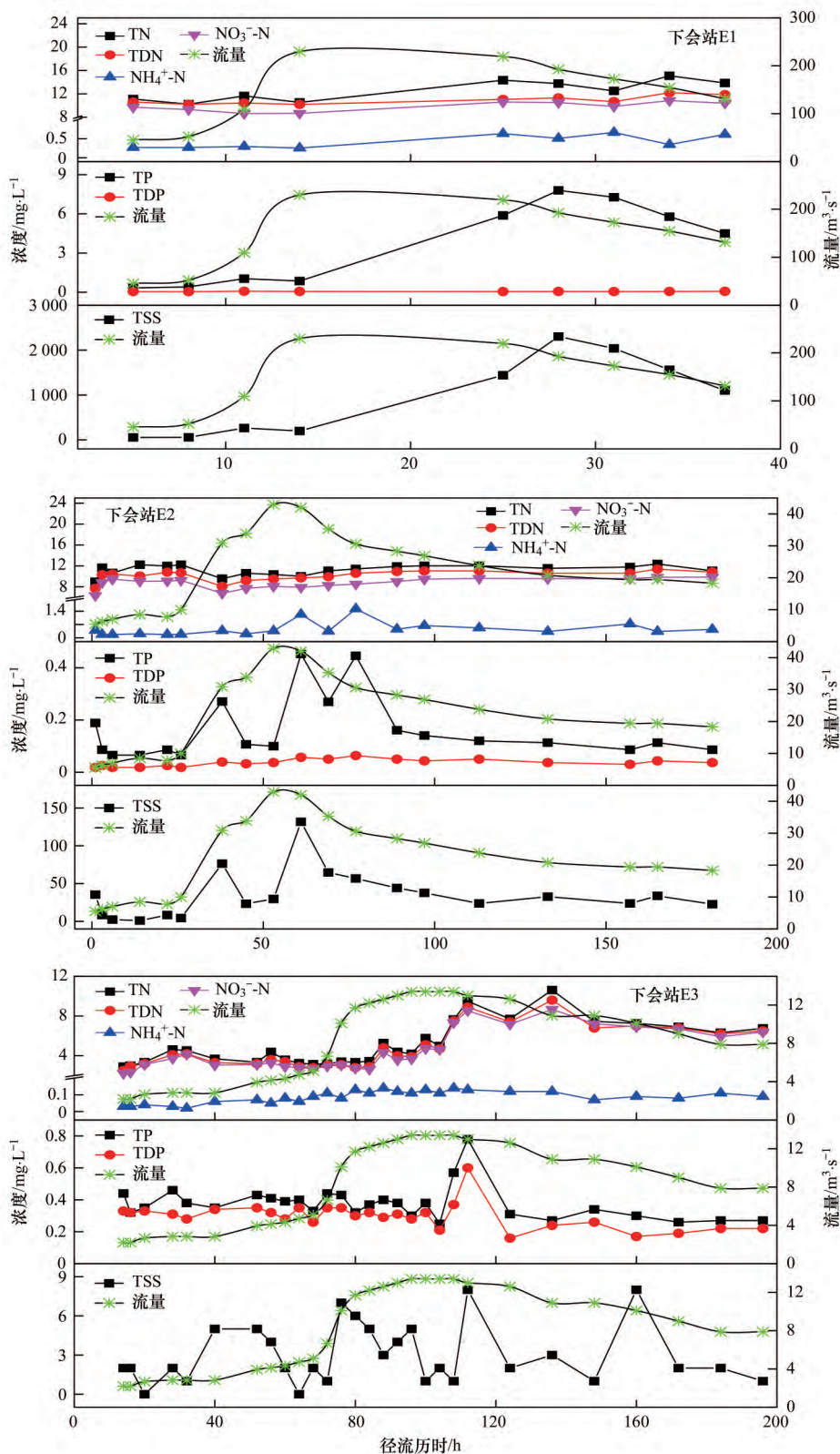


图5 下会站不同降雨事件下污染物浓度和流量变化

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

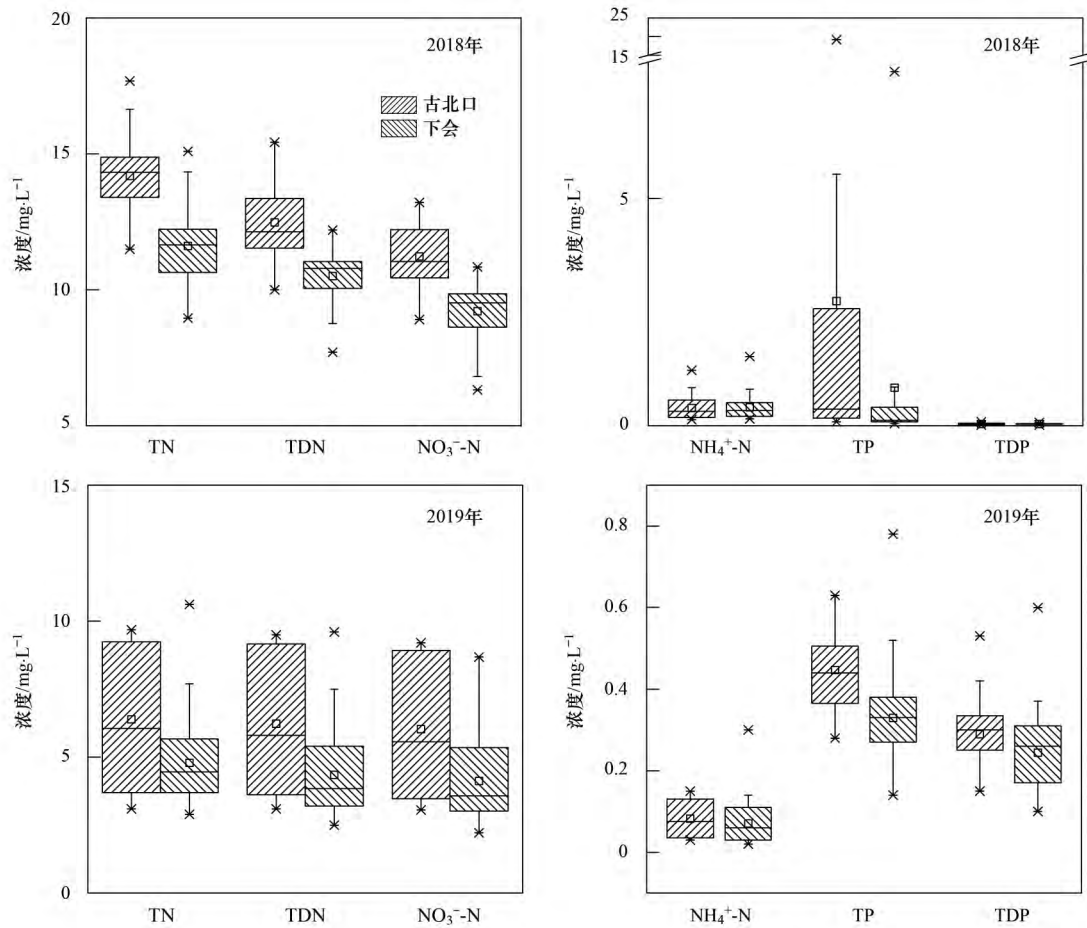


图 6 古北口站和下会站汛期污染物浓度对比

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接纳水体.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**	0.437
	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**	0.790**
	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	0.139
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**	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**	0.786**
	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	0.033
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**	-0.200	

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半湿润地区不同程度的非点源污染过程。

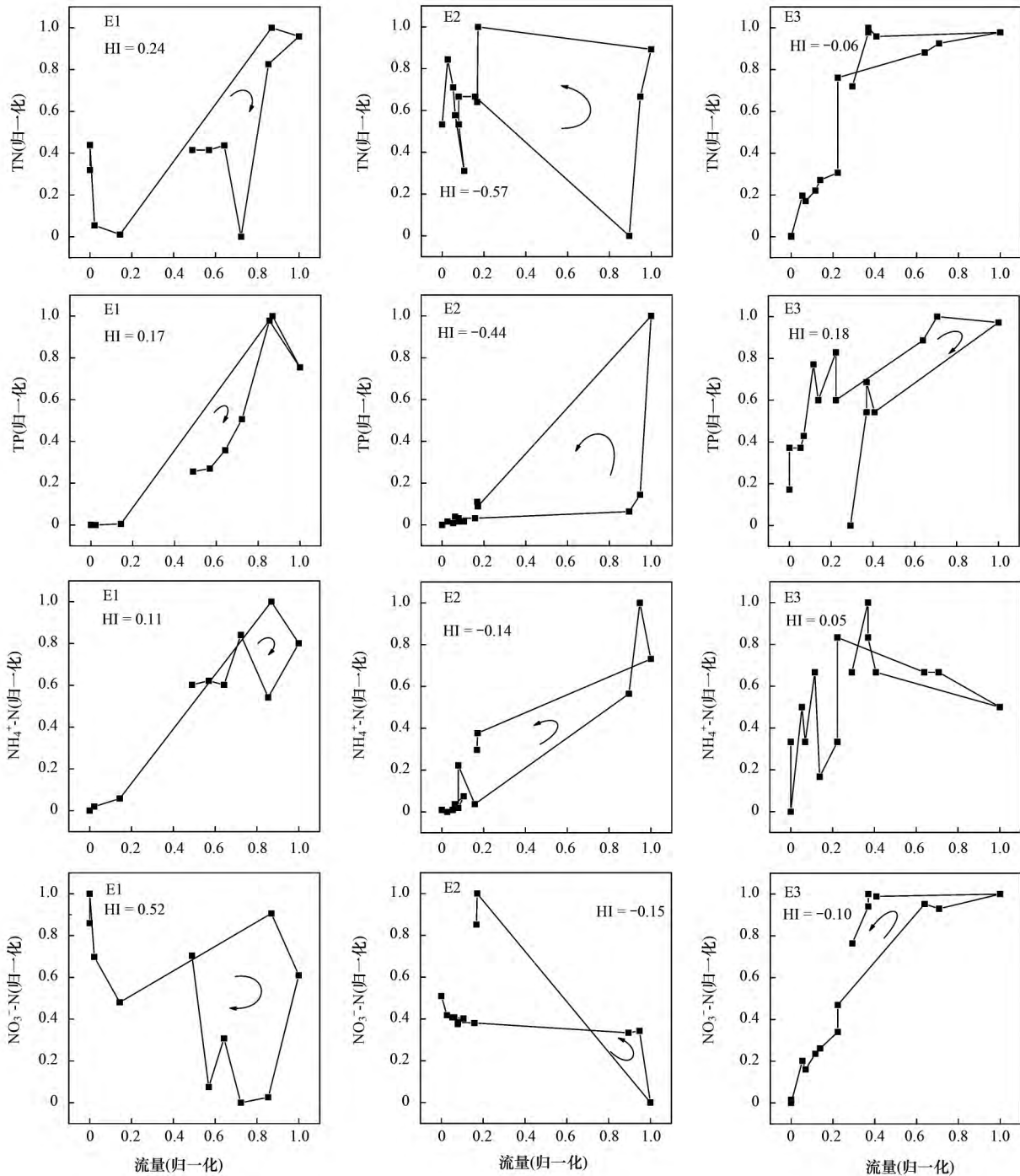
3.2 污染物来源分析和输出特征

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。NH₄⁺-N尽管浓度较低[(0.27±0.25)mg·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NH₄⁺-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NO₃⁻-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自地表沉积物。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NO₃⁻-N分别表现出了较弱的顺时针滞后现象(HI=0.18)和逆时针滞后现象(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NO₃⁻-N和NH₄⁺-N相反的变化趋势反映出不同的污染途径机制,NO₃⁻-N的逆时针效应反映出河道NO₃⁻-N主要由基流贡献,降雨径流稀释了基流中NO₃⁻-N的浓度,后期随壤中流进入水体;NH₄⁺-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NH₄⁺-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带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, 黄志儒, 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.
- [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灞河水质的影响[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] 李振炜, 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.