

城市雨水管理

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.07.016

雨污混接分流制区域河道水质与降雨事件的响应关系

方 燕¹, 傅大康¹, 李继红¹, 胡 斌¹, 崔倩倩²

(1. 昆山市建设工程质量检测中心, 江苏 昆山 215300; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189)

摘 要: 雨污分流制区域存在雨污混接和地表径流污染,降雨仍然是影响河道水质波动的重要因素。以昆山高新区典型雨污分流制区域的大同中心河为研究对象,在连续一年监测河道水质和降雨量数据的基础上,分析了河道水质随降雨强度和降雨间歇期的变化规律。结果表明,河水水质波动幅度与 24 h 降雨量、降雨等级和降雨间歇期有关。当 24 h 降雨量 < 5 mm 时,降雨后河水的 COD 浓度呈下降趋势;当 24 h 降雨量 > 5 mm 时,降雨后河水的 COD 浓度总体较降雨前升高。降雨后河水氨氮浓度的变化受雨水冲刷和稀释的共同作用,当 24 h 降雨量 < 18 mm 时,冲刷和稀释作用达到平衡;当 24 h 降雨量为 18 ~ 22 mm 时,稀释作用大于冲刷作用;当 24 h 降雨量 > 22 mm 时,冲刷作用影响更加明显。随着降雨等级的增大,降雨后河水的氨氮浓度总体呈先增大后减小的趋势,小雨、中雨、大雨、暴雨后氨氮浓度的上升幅度分别为 < 0.2、0.3 ~ 0.5、0.4 ~ 0.7、0.7 ~ 1.0 mg/L;COD 浓度一般先下降随后逐渐上升,且中雨和大雨时降雨径流稀释和管道沉积物冲刷的共同作用效应最为明显,一般在降雨后 4 d 左右 COD 浓度就缓慢上升,小雨、中雨、大雨、暴雨后 COD 浓度的下降幅度分别为 2 ~ 4、5 ~ 9、7 ~ 10、> 10 mg/L。另外,连续性降雨天气以及降雨间歇期过长都会导致降雨事件后河水中污染物浓度变化较大,当降雨间歇期为 1 d 时河水的 COD 和氨氮浓度变化幅度最大;当降雨间歇期为 5 d 时,河水的 COD 和氨氮浓度变化最不明显。

关键词: 降雨; 河道水质; 雨污混接; 面源污染

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)07-0107-07

Relationship between River Water Quality and Rainfall Events in Separate System with Mixing of Rainwater and Sewage

FANG Yan¹, FU Da-kang¹, LI Ji-hong¹, HU Bin¹, CUI Qian-qian²

(1. Kunshan Construction Engineering Quality Inspection Center, Kunshan 215300, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: There are runoff pollution and mixing of rainwater and sewage in areas with separate system. Rainfall is still an important factor affecting the fluctuation of river water quality. Rainfall data and water quality of Datong Central River located in a typical area with separate system of Kunshan High-tech Zone were continuously monitored for one year, and variation in river water quality with rainfall intensity and rainfall interval was analyzed. Results indicated that the fluctuation of river water quality

基金项目: 江苏省海绵城市建设材料与绩效检测工程技术研究中心建设项目(BM2017402)

通信作者: 崔倩倩 E-mail:295401349@qq.com

was related to rainfall in 24 hours, rainfall intensity and rainfall interval. When the rainfall in 24 hours was less than 5 mm, profile of COD in the river water after rainfall was decreasing. When the rainfall in 24 hours was more than 5 mm, COD of the river water after rainfall was generally higher than that before rainfall. Fluctuation of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in the river water after the rainfall was related to the combined effect of erosion and dilution. The erosion and dilution effects were balanced when the rainfall in 24 hours was less than 18 mm, while the dilution effect was greater than the erosion effect when the rainfall in 24 hours was 18–22 mm. The erosion effect was more obvious when the rainfall in 24 hours was more than 22 mm. With the increase of rainfall grade, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in the river water after rainfall increased firstly and then decreased, and the increasing ranges of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ after light rain, moderate rain, heavy rain and storm were $<0.2 \text{ mg/L}$, $0.3 - 0.5 \text{ mg/L}$, $0.4 - 0.7 \text{ mg/L}$ and $0.7 - 1.0 \text{ mg/L}$, respectively. Profile of COD generally decreased firstly and then increased gradually, and the combined effect of runoff dilution and pipeline sediment erosion was most obvious during moderate rain and heavy rain. Generally, COD rose slowly about 4 days after the rainfall, and the decreasing ranges of COD after light rain, moderate rain, heavy rain and storm were $2 - 4 \text{ mg/L}$, $5 - 9 \text{ mg/L}$, $7 - 10 \text{ mg/L}$ and $>10 \text{ mg/L}$, respectively. In addition, continuous rainfall events and excessive rainfall interval would result in a large fluctuation of pollutants concentration in the river water after rainfall events. The maximum fluctuation of COD and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in river water occurred when the interval period was only one day, while the minimum fluctuation occurred when the interval period was five days.

Key words: rainfall; river water quality; mixing of rainwater and sewage; non-point source pollution

径流污染是指在降雨过程中,雨水及其形成的地表径流溶解、冲刷以及搬运一些地表污染物至排水系统,最终排入河道等地表水体中的现象。气候特征、降雨特征、土地利用类型以及排水体制等因素综合影响着这一过程,其中排水体制的影响最为显著,在雨污合流制区域,降雨径流污染的严重性备受关注^[1-2]。然而,在我国很多典型的雨污分流制区域,由于人们意识薄弱、建筑设计缺陷及管理制度不完善等多种原因,分流制排水系统存在明显的雨污混接问题^[3]。当雨水通过不正当的途径混接至污水管网时,一方面可能会导致雨天污水厂负荷较大从而无法正常运行;另一方面污水管网的输送能力被雨水占用,导致污水冒溢污染周边区域^[4]。污水管混接至雨水管会导致大量的氮磷等营养元素、粪大肠菌群等致病菌以及多种有毒有害物质进入受纳河道水体,对水体造成严重污染,进而影响人们的居住环境和身体健康^[5-6]。在雨污分流制区域,降雨不但可以使河道的流量发生较大的变化,而且伴随降雨产生的径流和混接污水会冲刷并携带大量污染物进入河道水体,使河流水质发生明显波动^[7]。因此,研究典型雨污分流制区域不同降雨条件对河道

水质的影响作用,可为河道水环境治理提供有益参考。为探究典型雨污分流制区域河道水质与降雨事件的响应关系,笔者对昆山高新区大同中心河2018年7月—2019年6月的水质变化与当地24 h降雨事件进行了同步监测与分析,研究了河道水质在不同降雨强度和不同降雨事件下的变化规律。

1 研究内容与方法

1.1 区域概况

大同中心河位于江苏省昆山高新区城南圩,属北亚热带南部季风气候区,气候温和湿润,四季雨水充沛,年均降雨量约为1 149.3 mm,年均日照约为1 994.5 h。大同中心河长约140 m,平均河宽约15 m。河周边以商业综合体、小区和待开发区域为主,河道两侧的商业综合体中有各类商铺,商业综合体的东侧有大片住宅区,包括新城柏丽湾小区和新城域小区,总人口约8 000人,小区东北角为新城域小学,河道南侧紧挨吴淞江,南面是大块待开发区域。大同中心河共计17个雨水排水口,接收来自商业综合体以及住宅区的雨水。区域采用雨污分流制,但雨污混接情况复杂,阳台洗衣废水排入雨落管、底商“泔水乱倒”导致雨水管“旱流”问题严重,污水来源

主要为生活污水、日化生产废水和电镀漂洗废水。

1.2 降雨事件统计

2018年7月—2019年6月,在距离大同中心河2.2 km处的昆山市建设工程质量检测中心三分站处的自动气象站对当地几种不同类型的降雨数据,包括24 h降雨量(mm)、降雨历时(min)、连续降雨天数(d)和降雨间歇期(d),进行了一年的观测;同时,对大同中心河的相关水质指标进行了同步监测。图1为一年内观测到的53场降雨事件。

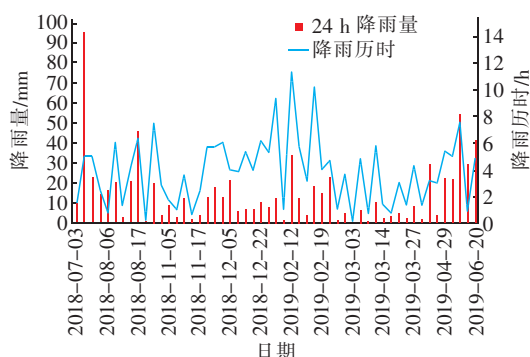


图1 2018年7月—2019年6月的降雨数据

Fig. 1 Rainfall data from July 2018 to June 2019

1.3 河道水质数据监测与分析

1.3.1 水样采集

在以上53场降雨事件后,采集河道水样并进行水质检测。采样断面有两个,分别位于距离大同中心河最南部和最北部15 m有明显水流处。在采样断面上取沿河宽方向的垂线,在垂线上分别于河道的左、右两侧距离河边1 m处采集水样,并将同一断面处的水样混合后再进行水质分析。取南、北两侧水质数据的平均值作为大同中心河在降雨事件后的水质数据。

1.3.2 分析方法

检测的水质指标主要为氨氮和COD。根据《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T 91—2002)和《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),原水水样静置30 min后,用虹吸法取液面下5 cm处以上的水样,得到上清液。对上清液进行氨氮和COD浓度的测定,其中,氨氮采用水杨酸分光光度法测定,COD采用快速消解法测定。

2 结果与讨论

2.1 降雨事件后河道水质变化特征

图2为2018年8月大同中心河的氨氮、COD浓度以及降雨量的监测数据,8月共有6场降雨,其中

有两场小雨(24 h降雨量<10 mm)、三场中雨(24 h降雨量为10~24.9 mm)和一场大雨(24 h降雨量为25~49.9 mm),8月12日—13日和16日—18日为两场连续性降雨,综合来看8月是一年中包含降雨事件、降雨类型和降雨等级最全面的一个月份,因此选择8月的6场降雨事件数据进行分析具有代表性及科学性。从图2可以看出,单场降雨后,氨氮和COD浓度都经历了明显的波动过程。水质波动的原因可能是初期雨水将面源污染物冲入河道,或者雨水稀释河水。水质波动的幅度可能和降雨历时以及降雨类型有关。因此,本研究在此基础上进一步分析了河道水质变化和降雨特征的响应关系。

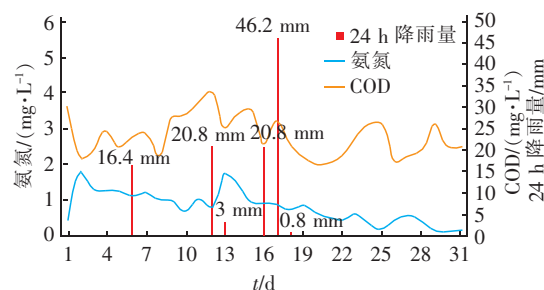


图2 2018年8月的降雨事件和河道污染物浓度变化

Fig. 2 Rainfall events and change of pollutants concentration in river water during August 2018

2.2 河道水质变化与24 h降雨量的关系

为分析河道水质变化与24 h降雨量之间的关系,计算全年53场降雨事件中降雨发生前一天与降雨后一天的COD和氨氮浓度变化差值,如图3所示。可知,河道COD浓度变化受24 h降雨量的影响较大。当24 h降雨量<5 mm时,降雨后河水COD浓度总体呈下降趋势,其中24 h降雨量为2 mm时COD浓度降幅最大,达到8.5 mg/L;当24 h降雨量>5 mm时,降雨后的河水COD浓度总体较降雨前升高,其中当24 h降雨量>10 mm时河水COD浓度上升的幅度总体较降雨量为5~10 mm时要小。这可能是因为当24 h降雨量<5 mm时,雨量不足以形成地表径流,各类地表有机污染物没有被雨水冲入河道,此时雨水的稀释作用使得降雨后河水的COD浓度降低;当24 h降雨量为5~10 mm时,部分污染物被初期雨水带入河道,水质开始急剧恶化;当24 h降雨量>10 mm时,大量地表污染物被地表径流带入河道,但降雨量的增大使得雨水对河道的稀释作用增强,因此虽然河道水质恶化,但污染物浓度的上升幅度则开始逐渐变小。河水的氨氮

浓度变化规律与 COD 浓度略有不同,当 24 h 降雨量 < 18 mm 时氨氮浓度时而升高时而降低,无明显变化规律,但 24 h 降雨量为 10 ~ 18 mm 时氨氮浓度变化幅度较降雨量为 0 ~ 10 mm 时要大;当 24 h 降雨量为 18 ~ 22 mm 时,河水的氨氮浓度降低;当 24 h 降雨量 > 22 mm 时,河水的氨氮浓度又呈上升趋势。这可能也是受降雨的冲刷作用和稀释作用的影响,当 24 h 降雨量 < 18 mm 时,雨水的冲刷作用和稀释作用达到平衡,且随着降雨量的增大,河水的氨氮浓度波动变大;当 24 h 降雨量为 18 ~ 22 mm 时,降雨的稀释作用大于冲刷作用,因此河水的氨氮浓度下降;当 24 h 降雨量 > 22 mm 时,冲刷作用影响更加明显,此时河水的氨氮浓度又趋于上升。

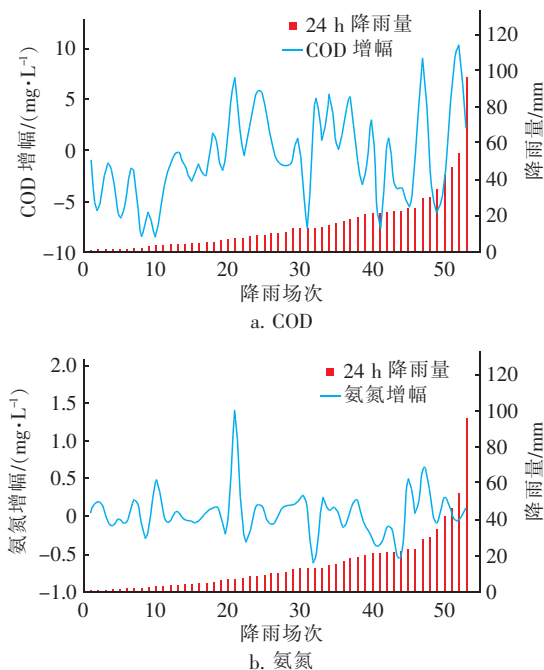


图3 不同降雨量下降雨前后河水中的污染物浓度变化

Fig. 3 Change of pollutants concentration in river water before and after rainfall under different rainfalls

2.3 不同等级降雨事件下的河道水质变化

按照气象部门对降雨等级的划分标准,将全年观测到的 53 场降雨划分为小雨(24 h 降雨量 < 10 mm)、中雨(24 h 降雨量为 10 ~ 24.9 mm)、大雨(24 h 降雨量为 25 ~ 49.9 mm)、暴雨(24 h 降雨量为 50 ~ 99.9 mm),其中小雨 25 场、中雨 21 场、大雨 5 场、暴雨 2 场。选择非持续性降雨事件或受持续性降雨影响较小的降雨事件,在尽可能包含初期雨水污染物浓度范围更广的条件下,针对小雨、中雨和大雨各四次降雨事件及两次暴雨事件,分析降雨后一

周内河道氨氮和 COD 浓度的变化规律。图 4 为降雨后一周内氨氮浓度的变化情况。

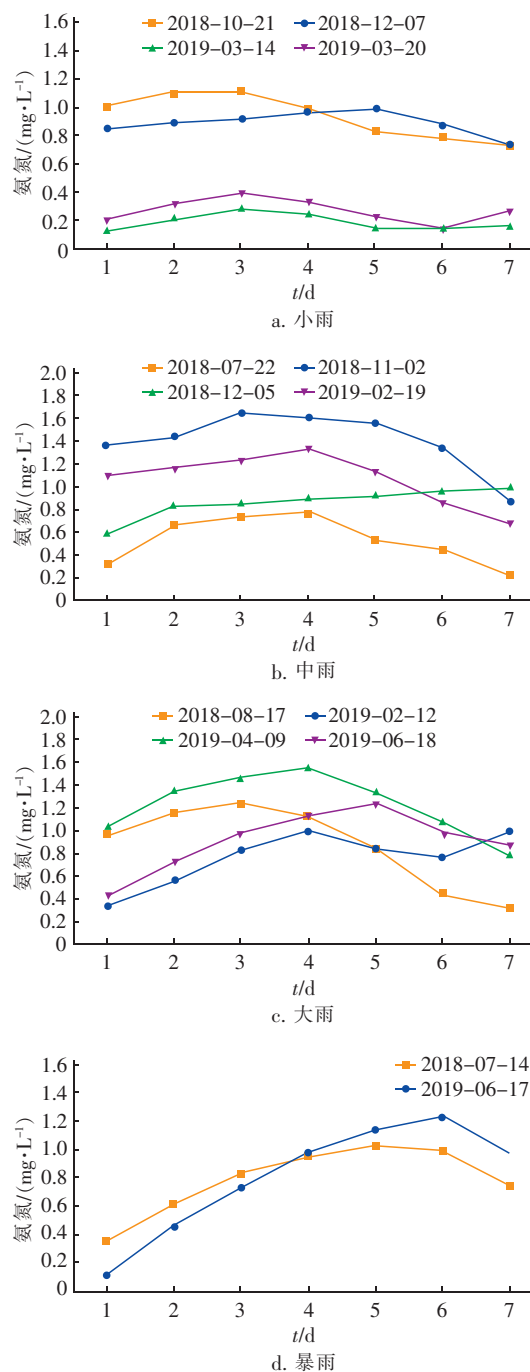


图4 不同降雨等级下氨氮浓度的变化

Fig. 4 Change of ammonia nitrogen concentration under different rainfall grades

从图 4 可以看出,在降雨发生后,河水的氨氮浓度总体呈先上升后下降的变化趋势,这可能是受地表径流的初期效应影响,即在径流初期,与径流量不成比例的大部分污染物被冲刷进入地表水体^[8]。

在径流初期,受排水体制和周边地块性质的影响,雨水径流中携带大量的污染物,使得径流中的氨氮浓度大于基流中的氨氮浓度,所以河水的氨氮浓度增大;一段时间后,一些含氮污染物通过与土壤颗粒结合、沉淀而使得河水的氨氮浓度又逐渐下降并趋于稳定。经比较发现,随着降雨等级的增大,氨氮浓度的上升幅度增大,小雨、中雨、大雨和暴雨时的上升幅度分别为 <0.2 、 $0.3 \sim 0.5$ 、 $0.4 \sim 0.7$ 、 $0.7 \sim 1.0$ mg/L;另外,不同降雨等级下河水氨氮浓度的峰现时间也有所不同,小雨时氨氮浓度峰值一般出现在降雨后前3 d,中雨时一般出现在降雨后3~5 d,大雨时与中雨时差别不大,而暴雨时一般出现在降雨后5~7 d,随着降雨强度的增大,河道氨氮浓度升高的持续时间变长,这可能是由于随着降雨等级的增加,河道水质受地表径流初期效应的影响增大,即降雨等级越高,降雨量和降雨强度越大,径流冲刷携带更多的污染物进入河道,导致河道氨氮浓度上升幅度增大,上升持续时间变长。

图5为降雨后一周内河道COD浓度的变化情况。可以看出,降雨后河水中的COD浓度一般先下降随后逐渐上升,整体来看,降雨事件后COD浓度持续下降4~7 d,且不同降雨等级下的下降规律也有所不同。小雨、中雨、大雨和暴雨事件后河道COD浓度下降幅度分别为2~4、5~9、7~10、 >10 mg/L,受周边地块类型的影响,降雨初期雨水径流中有机物浓度低于河水中的有机物浓度,降雨对河水COD浓度的影响主要取决于雨水径流的稀释作用,随着降雨量和降雨强度的增加,径流总量增大,对河道的稀释作用越明显,所以河水中的COD浓度下降幅度越大^[9];另外,不同降雨等级下的下降持续期也不同,小雨和暴雨事件后COD浓度的下降持续时间一般为6 d左右,随后呈上升趋势,而对于中雨和暴雨,一般在降雨后4 d左右COD浓度就缓慢上升。这可能是受降雨径流稀释和管道沉积物冲刷的共同作用影响,小雨时径流总量较小,径流较缓慢,对管道沉积物的冲刷作用不明显,同时,较长的径流持续时间使得河水COD浓度下降持续时间变长,而暴雨时径流总量较大,降雨径流的稀释作用较明显,也导致径流持续时间及河水COD浓度下降持续时间较长,而中雨和暴雨时的降雨径流稀释和管道沉积物冲刷的共同作用效应最为显著,在降雨初期受到降雨径流稀释作用后很快又受到管道沉积物

冲刷作用,使得河水COD浓度升高。

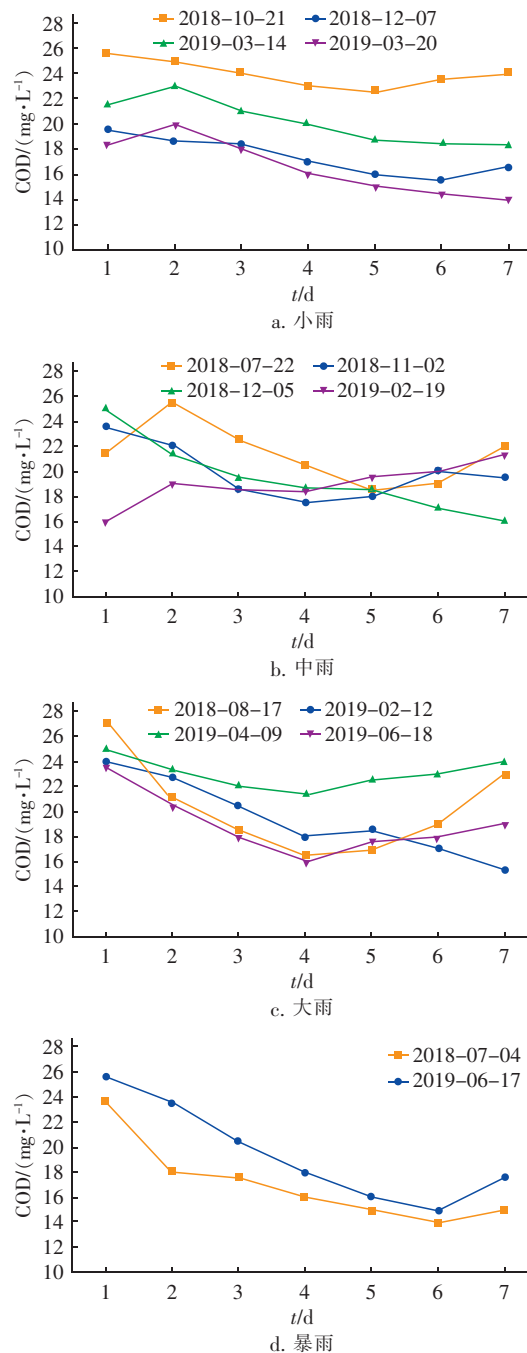


图5 不同降雨等级下COD浓度的变化

Fig. 5 Change of COD concentration under different rainfall grades

2.4 不同降雨间歇期下河道水质的变化

图6为不同降雨间歇期条件下降雨后一周内河道水质的变化,选择四种降雨间歇期,分别为27、17、5和1 d。从图6可以看出,在降雨间歇期为1 d,即持续性降雨时,河道COD和氨氮浓度变化均最

大,这可能是因为连续降雨天气下河道水质受来水影响不间断且没有恢复期,故上升或下降幅度很大;在间歇期为27 d和17 d时,河道COD和氨氮浓度变化幅度相比连续性降雨天气均略小,此时污染物浓度的变化考虑是受雨水管道中积累污染物较多的影响;在间歇期为5 d时,河道COD和氨氮浓度变化较为不明显,可能是由于几日前的降雨冲刷了雨水管道并且河道水质在降雨后已逐渐恢复。总体来说,降雨间歇期对河道水质的影响取决于降雨后径流水质的影响,持续降雨天气下,径流影响不间断导致河道水质受影响程度累加,随着降雨间歇期的增加,累加效应减弱使得影响程度减小,但同时雨水管道中积累的污染物质增大又会导致下一次径流污染物浓度增大。

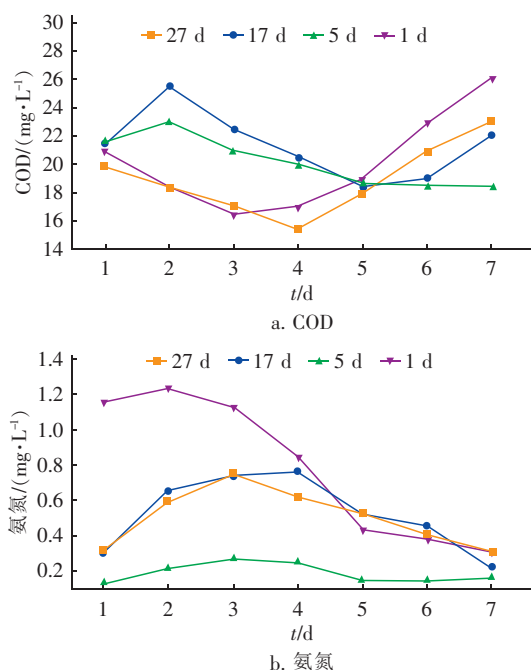


图6 不同降雨间歇期下污染物浓度的变化

Fig. 6 Change of pollutants concentration under different rainfall interval

3 结论

① 大同中心河位于典型的雨污分流制地区,其河道水质变化与24 h降雨量、降雨等级和降雨间歇期有关。当24 h降雨量 <5 mm时,河水COD浓度受降雨稀释作用影响而呈下降趋势;当24 h降雨量 >5 mm时,受降雨冲刷作用影响,降雨后地表污染物随雨水径流进入河道,使得河水COD浓度升高。对于氨氮,当24 h降雨量 <18 mm时,雨水的

冲刷作用和稀释作用达到平衡,且随着降雨量的增大,河道中的氨氮浓度波动变大;当24 h降雨量为18~22 mm时,降雨的稀释作用大于冲刷作用,河水氨氮浓度下降;当24 h降雨量 >22 mm时,雨水冲刷作用影响更加明显,使得河水氨氮浓度上升。

② 不同等级降雨事件后河水污染物浓度的变化情况不同。对于氨氮来说,受地表径流初期效应的影响,降雨后河水中的氨氮浓度总体呈先增大后减小的变化趋势,且随着降雨等级的增加,地表径流初期效应影响增大,河水氨氮浓度上升幅度增加,上升持续时间也变长。小雨、中雨、大雨、暴雨后氨氮浓度的上升幅度分别为 <0.2 、 $0.3\sim0.5$ 、 $0.4\sim0.7$ 、 $0.7\sim1.0$ mg/L;另外,小雨时氨氮浓度峰值一般出现在降雨后前3 d,中雨时一般出现在降雨后3~5 d,大雨时与中雨时差别不大,而暴雨时一般出现在降雨后5~7 d。对于COD来说,降雨后河水COD浓度一般先下降随后逐渐上升,且受周边地块类型的影响,降雨对河道COD浓度的影响主要取决于雨水径流的稀释作用,随着降雨量和降雨强度的增加,径流总量增大,对河道的稀释作用更加明显,COD浓度下降幅度也相应增大,小雨、中雨、大雨、暴雨后COD浓度下降幅度分别为2~4、5~9、7~10、 >10 mg/L。受降雨径流稀释和管道沉积物冲刷的共同作用,小雨时冲刷作用较小和暴雨时稀释作用较大使得降雨后河水COD浓度受到的稀释作用较明显,一般持续下降6 d左右,中雨和大雨时降雨径流稀释和管道沉积物冲刷的共同作用效应最为明显,一般在降雨后4 d左右COD浓度就缓慢上升。

③ 不同降雨间歇期下河水污染物浓度的变化规律也不同。连续性降雨天气以及降雨间歇期过长都会导致降雨事件后河水中的污染物浓度变化较大,连续性降雨天气下河道COD和氨氮浓度变化幅度均最大,分别可达到约10 mg/L和0.9 mg/L;在间歇期为27 d和17 d时,受雨水管道中积累污染物冲刷效应的影响较明显,河道COD和氨氮浓度变化仍然较大,但与连续性降雨天气相比略小;在间歇期为5 d时,河道COD和氨氮浓度变化较为不明显,波动幅度分别为5 mg/L和0.3 mg/L左右。

参考文献:

- [1] 李立青,尹澄清. 雨、污合流制城区降雨径流污染的迁移转化过程与来源研究[J]. 环境科学, 2009, 30(2):

- 368-375.
- LI Liqing, YIN Chengqing. Transport and sources of runoff pollution from urban area with combined sewer system[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(2): 368-375 (in Chinese).
- [2] 曹小磊,荆勇,赵玉强,等. 辽河沈阳段水质现状及面源污染特征分析[J]. *水电能源科学*, 2018, 36(2): 43-46.
- CAO Xiaolei, JING Yong, ZHAO Yuqiang, *et al.* Analysis of water quality and non-point source pollution characteristics of Liaohe River in Shenyang[J]. *Water Resources and Power*, 2018, 36(2): 43-46 (in Chinese).
- [3] 陈新拓,陈琳,余佳,等. 成都市典型黑臭河道水质特征的SWMM模型分析[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(S1): 212-217.
- CHEN Xintuo, CHEN Lin, SHE Jia, *et al.* Analysis on water quality character of typical malodorous river in Chengdu City by SWMM model[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(S1): 212-217 (in Chinese).
- [4] 孟莹莹,李田,王溯. 上海市分流制小区雨水管道混接污染来源分析[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(6): 12-15.
- MENG Yingying, LI Tian, WANG Su. Study on sources of illicit discharge to separate stormwater systems in residential districts in Shanghai[J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(6): 12-15 (in Chinese).
- [5] 徐祖信,王诗婧,尹海龙,等. 污水管网中雨水混接来源的高效诊断方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(3): 384-390.
- XU Zuxin, WANG Shijing, YIN Hailong, *et al.* Cost-effective locating inappropriate rainfall inflow into urban sewer network[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 2017, 45(3): 384-390 (in Chinese).
- [6] 康丽娟,曹勇. 连续降雨条件下典型泵站放江污染特征分析[J]. *水生态学杂志*, 2019, 40(2): 20-26.
- KANG Lijuan, CAO Yong. Effects of sewage discharge from drainage pumping station on receiving river water quality under the condition of continuous rainfall[J]. *Journal of Hydroecology*, 2019, 40(2): 20-26 (in Chinese).
- [7] 王季震,葛雷,陆建红,等. 降雨对减小河流水污染的定量分析研究[J]. *灌溉排水学报*, 2004, 23(2): 17-20.
- WANG Jizhen, GE Lei, LU Jianhong, *et al.* Quantitative analysis of the dystrophication from rainfall[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2004, 23(2): 17-20 (in Chinese).
- [8] 王秀朵,金朝晖,赵乐军,等. 降雨径流对天津景观河道水体的污染分析[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(15): 51-53.
- WANG Xiuduo, JIN Chaohui, ZHAO Lejun, *et al.* Influence of rainfall runoff on landscape river in Tianjin[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(15): 51-53 (in Chinese).
- [9] 庞翠超,吴时强,周杰,等. 城区地表径流面源污染和河道水环境治理的研究[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(12): 175-179.
- PANG Cuichao, WU Shiqiang, ZHOU Jie, *et al.* Nonpoint source pollution from urban runoff and pollution abatement in urban waterways[J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, 35(12): 175-179 (in Chinese).

作者简介:方燕(1982-),女,江苏扬中人,本科,高级工程师,研究方向为化学分析。

E-mail:366560406@qq.com

收稿日期:2019-11-22

修回日期:2020-04-04

(编辑:刘贵春)