

李海燕,徐尚玲,黄延,等. 2013. 合流制排水管道雨季出流污染负荷研究[J]. 环境科学学报, 33(9): 2522-2530

Li H Y, Xu S L, Huang Y, et al. 2013. Pollution loading of overflow in combined drainage channels during rainy season [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 33(9): 2522-2530

合流制排水管道雨季出流污染负荷研究

李海燕^{1,*}, 徐尚玲¹, 黄延², 魏鹏¹

1. 北京建筑大学城市雨水系统与与水环境省部共建教育部重点实验室, 北京 100044

2. 北京市环境保护监测中心, 北京 100048

收稿日期: 2012-12-31 修回日期: 2013-03-26 录用日期: 2013-03-26

摘要: 针对北京城区合流制排水管道雨季溢流及雨后河道水质恶化等问题, 研究了 3 场降雨期间合流制排水系统不同来源的污染物特性及污染贡献. 通过对 2012 年雨季几场降雨的降雨量数据监测与统计发现, 护城河沿岸合流制排水系统累积雨量约 10 mm 时发生溢流. 特大暴雨情况下, 溢流水质的污染物平均浓度高于排水系统旱流污水的污染物浓度, 溢流水质差, 污染物浓度范围为: TN 5.11 ~ 16.36 mg·L⁻¹, TP 4.34 ~ 10.52 mg·L⁻¹, 氨氮 1.88 ~ 12.73 mg·L⁻¹, COD 134 ~ 250 mg·L⁻¹, SS 120 ~ 155 mg·L⁻¹. 管道沉积物在降雨期间对出流水质的污染贡献率分别为: TN 20.9% ~ 44.6%, TP 35.76% ~ 47.3%, COD 46.2% ~ 48.8%, SS 35.7% ~ 79.7%. 控制合流制排水管道沉积物的沉积和冲刷对排水系统的正常运行及削减雨季出流污染负荷具有重要意义.

关键词: 合流制; 雨季溢流污染; 管道沉积物; 污染负荷

文章编号: 0253-2468(2013)09-2522-09 中图分类号: X522 文献标识码: A

Pollution loading of overflow in combined drainage channels during rainy season

LI Haiyan^{1,*}, XU Shangling¹, HUANG Yan², WEI Peng¹

1. Key Laboratory of Urban Storm Water System and Water Environment, Ministry of Education, School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044

2. Beijing Municipal Environmental Monitoring Centre, Beijing 100048

Received 31 December 2012; received in revised form 26 March 2013; accepted 26 March 2013

Abstract: Based on the situations of combined sewer overflow (CSO) and consequent water quality deterioration of urban rivers in Beijing, three rain periods were chosen to study the characteristics and their potential pollution risks from different combined sewage systems. The statistics of rainfall in 2012 show that CSOs usually occur when the accumulated rainfall reaches to 10 mm. In the case of heavy rainstorm, the average concentration of the pollutants in overflow are higher than that of sewage drainage systems in the dry weather. The concentrations of typical pollutants in overflow are as follows: TN 5.11 ~ 16.36 mg·L⁻¹, TP 4.34 ~ 10.52 mg·L⁻¹, NH₄⁺-N 1.88 ~ 12.73 mg·L⁻¹, COD 134 ~ 250 mg·L⁻¹, and SS 120 ~ 155 mg·L⁻¹. The contribution rates of the sediment pollution load to runoff outflow of TN, TP, COD, and SS are 20.9% ~ 44.6%, 35.7% ~ 47.3%, 46.2% ~ 48.8%, and 35.7% ~ 79.7%, respectively. In conclusion, it is important to control the deposition and erosion of sediments in combined sewage systems, which can maintain the normal operation of the drainage system and reduce the effluents' pollution loading in the rainy season.

Keywords: combined system; overflow pollution; sediment; pollution load

1 引言 (Introduction)

城市合流制排水管道溢流污染已成为部分城市改善水体水质的主要制约因素 (Brezonik, 2002;

杨雪等, 2008). 溢流污水中含有大量有毒有害污染物, 若未经有效处理直接排入水体, 不仅会严重破坏水环境功能, 还将危及人类健康. 旱季时, 生活污水及来自不同汇水区的颗粒物进入管道系统, 流

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项 (No. 2012ZX07320-002); 北京市城市雨水系统与与水环境生态技术学术创新团队项目 (No. PHR201106124)

Supported by the Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Management (No. 2012ZX07320-002) and the Program of Beijing Academic Innovation Group in Urban Stormwater System and Water Environmental Eco-Technologies (No. PHR201106124)

作者简介: 李海燕 (1975—), 女, 副教授, E-mail: lihaiyan@bucea.edu.cn; * 通讯作者 (责任作者)

Biography: LI Haiyan (1975—), female, associate professor, E-mail: lihaiyan@bucea.edu.cn; * Corresponding author

量较小时,不足以将全部颗粒物冲刷进入污水处理厂而沉积在管道底部,从而导致管道过流能力的下降.强降雨条件下,伴随着初期冲刷现象的合流制溢流(CSO)携带着再悬浮沉积颗粒产生了高浓度的污染负荷(Tait *et al.*, 2003),Ahyerre 等通过大量现场实验和模型模拟指出,排水管道旱季沉积对受纳水体的污染负荷贡献达到了 30% ~ 80% (Ahyerre *et al.*, 2001; Fan, 2004). Chebbo 等(2004)对法国 Le Marais 地区合流制排水系统的研究表明,在合流制溢流的污染物中,60% ~ 95% 的有机污染物,65% ~ 99% 的锌,90% ~ 100% 的镉、铜、铅都来自管道中的沉积物.针对我国目前排水体制及雨季溢流污染问题,北京、上海等大城市对 CSO 展开了研究并采取了一些终端治理措施,但缺乏污染物输送排放规律、污染负荷及有效控制对策的系统性研究.

综上所述,合流制管道沉积物中赋存污染物的量不容忽视,旱季累积的管道沉积物是雨季受纳水体严重污染负荷的重要组成.从长远看,为确保城市水体雨季安全、维护管道结构的完整性,明确合流制排水管道中沉积物对管道出流的污染影响,可对控制城市水体污染效应研究提出可借鉴的措施.因此,本文针对北京城区合流制排水管道雨季溢流及雨后河道水质恶化等问题,研究 3 场降雨期间合流制排水系统不同来源的污染物特性及污染贡献.

2 研究区域概况及研究方法 (Study area and methods)

2.1 研究区域概况

本研究以北京城区二环临近西南护城河的枣林前街为中心,北至白广路三条,南至通河巷,东至

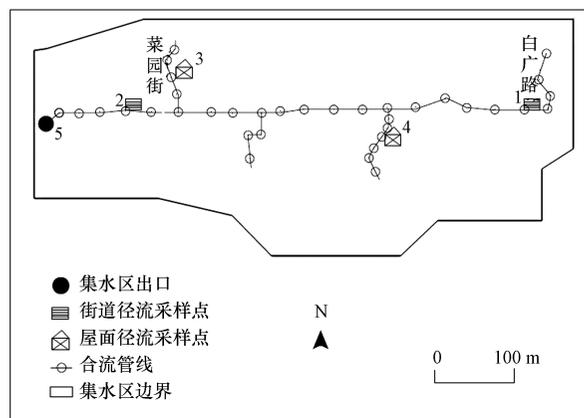


图 1 研究区域及监测点分布图

Fig.1 Map of the experimental catchment and location of the sampling sites

白广路,西临护城河的区域作为研究对象,面积 29 hm^2 ,区域内排水系统为合流制,主管道为 2.2 m \times 1.6 m 的矩形渠道,共有 3 条主要支管,管径为 0.50 ~ 1.25 m 不等.该区域为老城区,人口密度较大,以商业、居住用地为主,道路为沥青路面,双向双车道.区域内管道约 1 ~ 2 a 清通一次,由于研究区域主管道管径较大,旱季基本不堵塞,清淤周期更长,旱季调研时发现支管内有大量沉积物.研究区域及监测点的分布如图 1 所示,其中集水区出口的经纬度为 116.3°E,39.8°N.

本研究区域特点为道路均为沥青路面,道路所含绿地面积占道路的 20%.根据《室外排水设计规范》规定:沥青路面径流系数取值为 0.90,绿地径流系数取值为 0.15,利用面积加权平均的方法(叶镇等,1994)得出综合径流系数及不同下垫面的径流系数,结果如表 1 所示.

表 1 不同下垫面特性

Table 1 Characteristics of the different underlying surfaces			
下垫面	面积/ hm^2	面积率	径流系数
道路	12	40%	0.75
屋顶	9	30%	0.90
绿地	9	30%	0.15
综合径流系数	—	—	0.60

2.2 研究方法

2.2.1 监测方法 旱季时监测研究区域管道生活污水流量及其污染物浓度,每 2 h 于研究区域管道出口断面采集生活污水水样一次,共采集 24 h,总计 12 个样品,同时监测流速、流量、水深指标.降雨前监测河道本底值,即未降雨前河道水体污染物浓度值,降雨过程中监测排水系统道路、屋顶、出口断面径流量及污染物浓度.地表监测方法参照 Chebbo 等(2004)对巴黎城区溢流水质的研究,地表径流自雨水口直接采集.管道总出口监测从溢流开始到结束,每隔 5 ~ 20 min 采集一次水样.

2.2.2 污染物分析测试方法 水样采集、保存和监测方法参考《水和废水监测分析方法指南》(国家环境保护总局,2002).在规定的 24 h 保存时间内对样品中总氮、总磷、氨氮、COD、SS、浊度进行测定,检测方法均采用国标法,其中, TN 采用过硫酸钾消解-紫外分光光度法(紫外分光光度计)测定, TP 采用钼酸铵分光光度法(紫外分光光度计)测定,氨氮采用纳氏试剂分光光度法(紫外分光光度计)测定, COD 采用重铬酸钾法测定, SS 采用 103 ~ 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘干称

重法测定,浊度采用目视比浊法(浊度计)测定。

2.2.3 系统污染物平衡计算方法 降雨期间合流溢流污水中污染物主要来源于生活污水、地表径流及管道沉积物(Gromaire *et al.*, 2001)。本研究按照Chebbo等(2001)所采用的污染物的进出量平衡公式(1)计算研究区域管段沉积物对管道出流的污染贡献量。

$$MPT = MPS + MPR + MPW \quad (1)$$

式中, MPT 为管道出水口总污染负荷(kg), MPS 为管道沉积物污染负荷(kg), MPR 为地表径流污染负荷(kg), MPW 为生活污水中污染物污染负荷(kg)。

基于排水区域总出口水量、水质同步监测确定管道出水口总污染负荷, 旱季时, 通过监测日常污水水量、水质可明确生活污水中污染物污染负荷。监测道路、屋面水质获得地表径流污染物浓度, 通过综合径流系数及下垫面区域面积明确地表径流污染负荷, 通过公式(1)可求得管道沉积物污染负荷。

来自各不同下垫面的地表径流污染负荷 MPR 采用 Gromaire (2001) 提出的方法计算, 计算公式如下:

$$MPR = \sum_i C_i V_i / 1000 \quad (2)$$

式中, V_i 为第 i 种下垫面的径流量(m^3), C_i 为第 i 种下垫面径流污染物的浓度($mg \cdot L^{-1}$), 1000 为单位换算系数。其中, C_i 结合国家室外排水规范中管道系统合理化公式计算, 本研究中 C_i 采用降雨径流全过程样品污染物质量浓度的流量加权平均值, 即 EMC, 具体公式如下:

$$C_i = EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^t C_{it} Q_{it} dt}{\int_0^t Q_{it} dt} = \frac{\sum_{j=1}^n Q_{ij} C_{ij}}{\sum_{j=1}^n Q_{ij}} \quad (3)$$

式中, EMC 为次降雨污染物平均质量浓度($mg \cdot L^{-1}$), M 为整场降雨径流过程中污染物总量(g), V 为相对应的径流总量(L), t 为径流时间(min), C_{it} 指随时间变化的污染物浓度($mg \cdot L^{-1}$), Q_{it} 指随时间变化的径流流量($L \cdot min^{-1}$), n 指径流取样次数, Q_{ij} 指第 j 次取样的径流流量($L \cdot min^{-1}$), C_{ij} 指第 j 次取样时污染物的浓度($mg \cdot L^{-1}$)。

流量 Q 合理化计算公式和 V_i 计算公式如下:

$$Q = \psi \cdot F \cdot q \quad (4)$$

$$V_i = (V_T - V_W) \frac{S_i \Psi_i}{S_i \Psi_T} \quad (5)$$

式中, Q 为第 i 种下垫面雨水出口径流量($L \cdot min^{-1}$), Ψ 为径流系数, F 为汇水面积(m^2), q 为降雨强度($mm \cdot min^{-1}$), V_T 为集水区出口断面次降雨径流总量(m^3), V_W 为降雨相应时段日常污水流量(m^3), S_i 为第 i 种下垫面面积(hm^2), S_T 为 t 时间段集水区总面积(hm^2), Ψ_i 第 i 种下垫面径流系数, Ψ_T 为研究区综合径流系数。

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 三场降雨的降雨特征

通过对 2012 年几场降雨的监测和统计, 发现护城河沿岸合流制排水系统开始发生溢流的累积雨量大约是 10 mm。本研究选择其中 2012 年 7 月 21 日、7 月 31 日和 8 月 27 日等 3 场发生溢流的降雨监测其径流过程, 降雨特征如图 2 和表 2 所示。以 24 h 降雨标准划分, 3 场降雨分别属于特大暴雨、中雨、小雨。由表 2 可知, 7 月 21 日降雨为强度大、长历时降雨, 7 月 31 日降雨为强度小、长历时降雨, 而 8 月 27 日降雨为强度大、短历时降雨。

表 2 3 场降雨特征

Table 2 Characteristics of the rainfall

降雨日期	降雨历时/ /min	降雨量/ /mm	雨峰强度/ ($mm \cdot min^{-1}$)	平均雨强/ ($mm \cdot min^{-1}$)	降雨类型	雨前 干燥期/d
7 月 21 日	95	460	0.65	0.152	特大暴雨	7
7 月 31 日	160	16.9	0.10	0.051	中雨	1
8 月 27 日	40	10.2	0.40	0.134	小雨	12

注: 7 月 21 日降雨从 12:20 开始, 10 min 后管道总出口产生溢流, 95 min 后由于水体水位升高河水倒灌导致无法取样而结束取样过程。

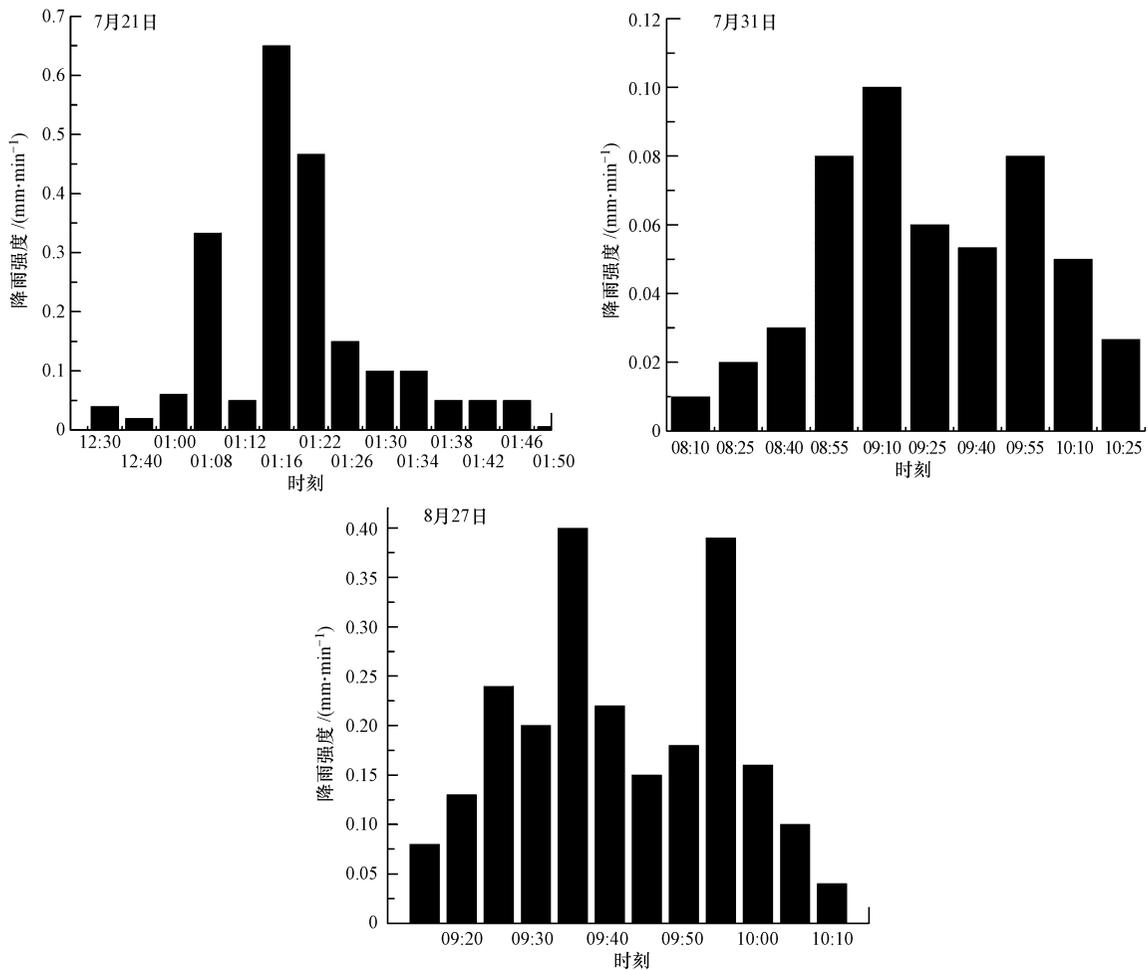


图2 3场降雨过程线

Fig. 2 Process of the rainfall

3.2 合流制管道污染物输出规律

图3~7为7月21日、7月31日和8月27日3场典型降雨过程中,所研究合流制管道出口断面及后两场研究区域道路径流污染物输出过程图。从图3可以看出,随降雨径流的产生,管道出流断面流量迅速升高,污染物浓度呈上升趋势,降雨中后期污染物浓度趋于稳定,但仍远远高于水体本底值,除与大部分地表累积物随径流冲刷汇入管道的因素有关外,高强度降雨条件下增强了管道沉积物被冲刷的程度也是重要原因。

从图4可以看出,管道总出口断面径流中各污染物浓度峰值基本与流量峰值吻合。从图5明显看出,道路1[#]取样点的平均浓度高于2[#]取样点,主要原因在于1[#]取样点靠近主管线的十字路口,人流量、车流量较大,而2[#]取样点靠近支管线路口,人流量及车辆相对较少。且从图4、5比较看出,道路径流中TN、TP污染物浓度峰值出现在降雨初期,道路污染物浓度增加时相应的管道总出口浓度有所上升。其中,TN的变

化最为突出,无论是总出流口还是道路径流后期的浓度明显大于初期径流浓度,这是由于径流雨水中TN主要以溶解态存在,先前附着在地表颗粒物上的污染物被冲刷释放所致;TP则由于主要以颗粒态的形式存在,因而变化缓慢,但总出流口出水中TP变化曲线出现2~3个峰值,最大峰值出现在流量峰值之后,综合分析管道总出流口污染物的来源,可能是当流量到达峰值时管道中沉积物再次悬浮导致TP浓度峰值。从图4还可以看出,管道总出口出水中的COD、SS具有与TN、TP相似的变化趋势,但道路径流中COD、SS初期浓度大于后期浓度。原因可能是地表冲刷冲掉了大部分颗粒污染物而导致降雨后期浓度降低,但总出流口污染物浓度峰值基本与流量峰值吻合,也充分说明了管道沉积物再悬浮在冲刷过程中具有举足轻重的作用。此外,管道总出口出水中污染物浓度远远高于河道污染物本底值,说明合流制溢流污染对城市水体水质的影响不容忽视。

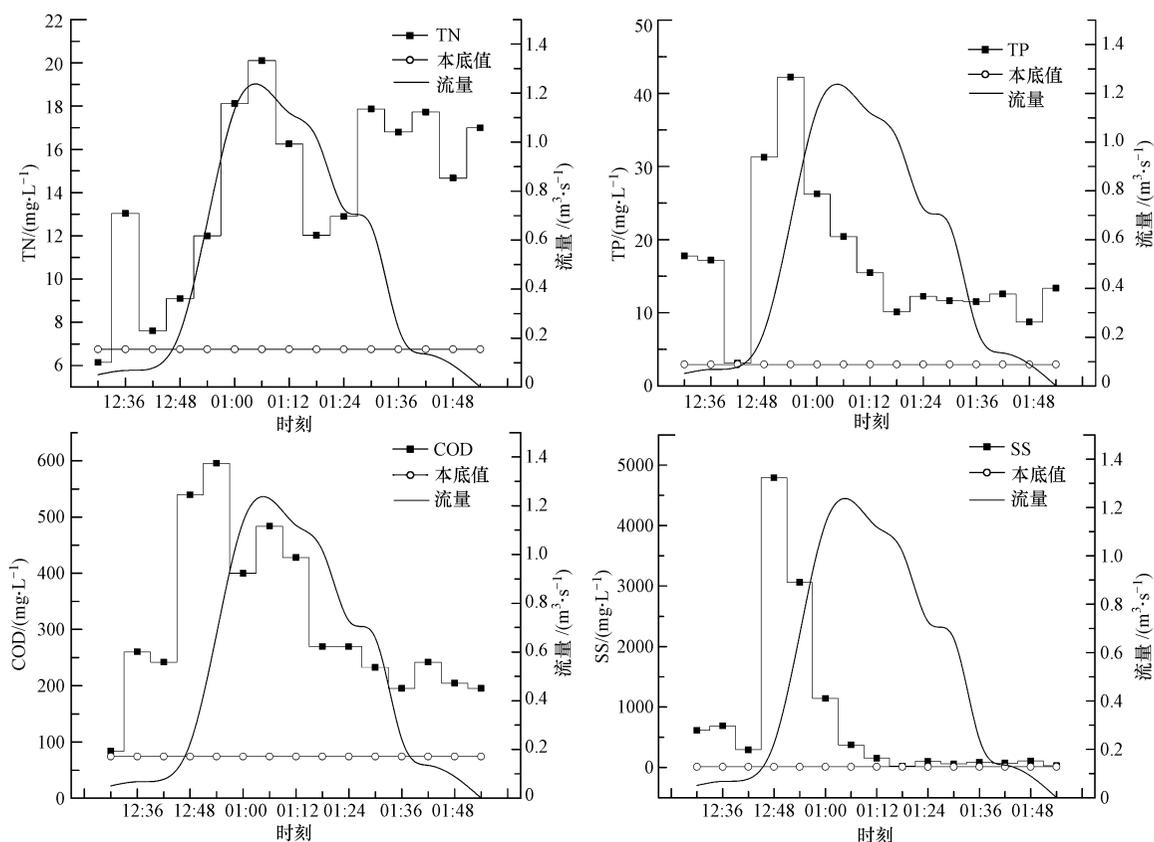


图 3 7 月 21 日管道总出口断面径流量及污染物输出特征

Fig. 3 Flow and characteristics of pollutant output from pipe of total exports section in July 21

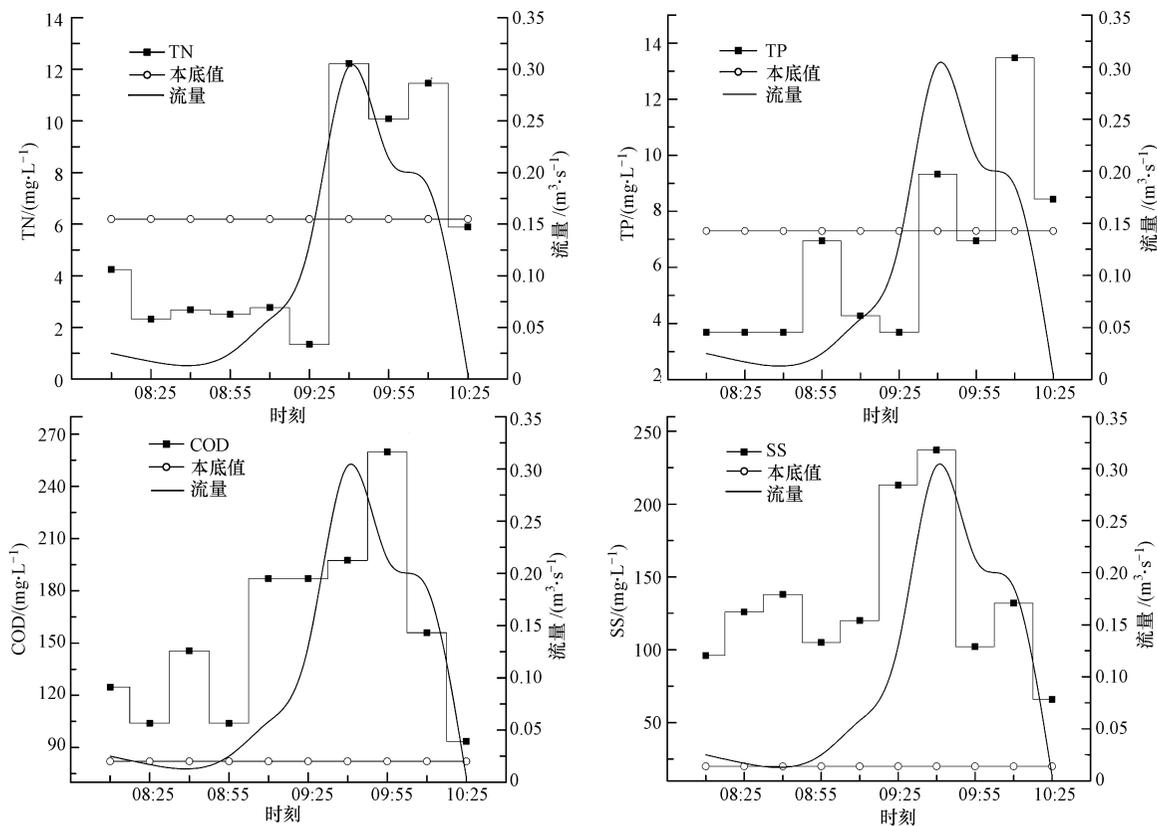


图 4 7 月 31 日管道总出口断面径流量及污染物输出特征

Fig. 4 Flow and characteristics of pollutant output from pipe of total exports section in July 31

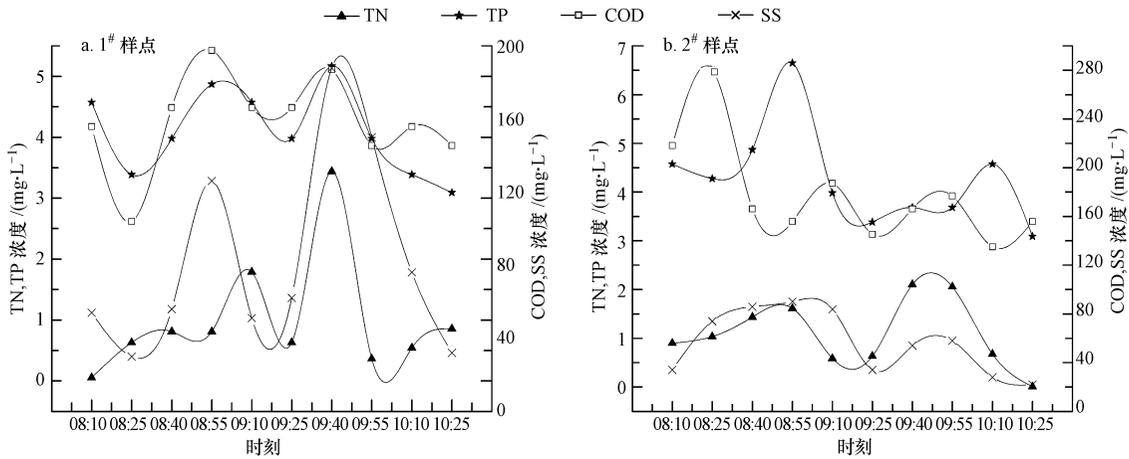


图 5 7月31日道路径流污染物输出特征
 Fig. 5 Characteristics of from pollutants of road runoff in July 31

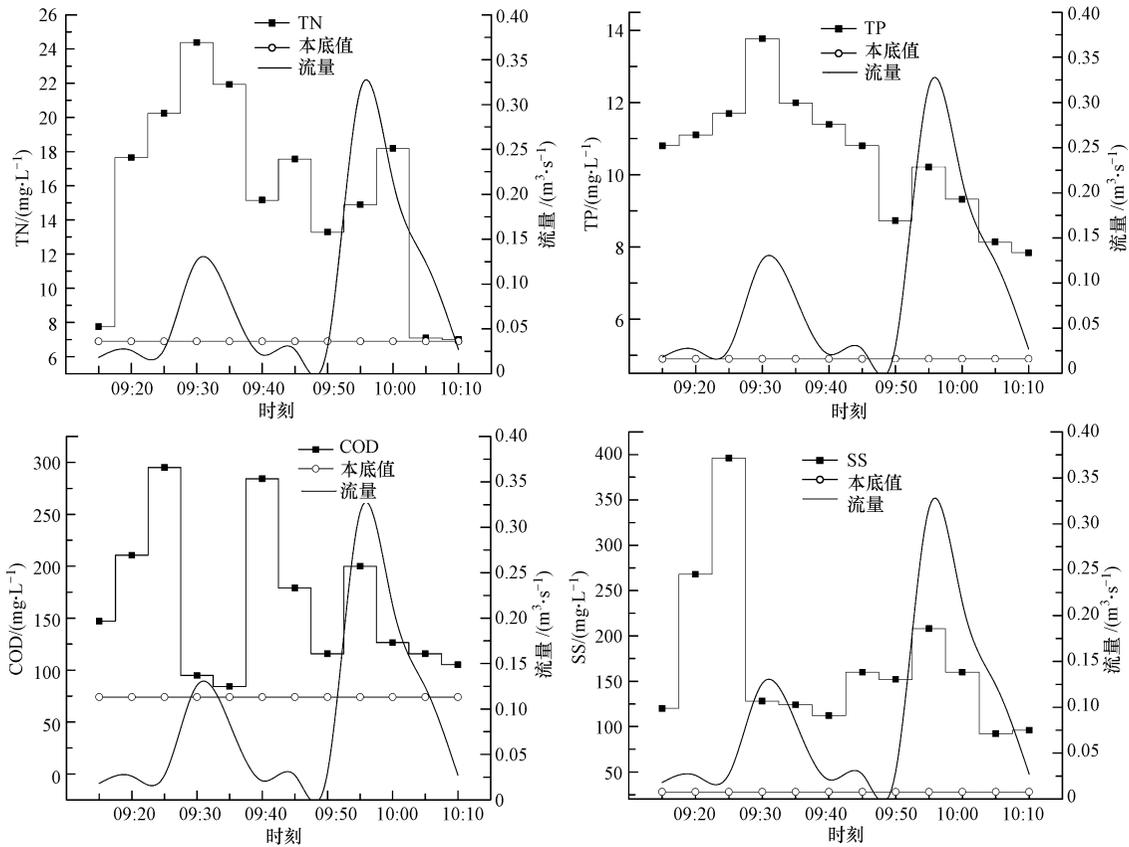


图 6 8月27日管道总出口断面径流流量及污染物输出特征
 Fig. 6 Flow and characteristics of pollutant output from pipe of total exports section in August 27

对于强度大、历时短的8月27日降雨,管道总出口口出水中各污染指标浓度最小值比河道本底值还要高出1.0~3.3倍,对水体水质造成了严重的影响.从图6、7明显看出,随降雨径流的产生管道总出口口断面流量迅速升高,基本在30 min内达到流

量峰值,表现出明显的初期冲刷现象.通过与该场降雨的降雨过程线的比较分析,发现管道总出口口污染物的浓度变化与降雨强度峰值曲线变化趋势基本相同,各污染指标浓度变化均出现两个明显峰值,且后一个峰值浓度低于前一个峰值.由表3可

知,研究区域屋顶降雨径流中 TN、研究区域道路污染物中 TP 的浓度高于地表水环境质量标准 V 类水质(2.0 mg·L⁻¹、0.4 mg·L⁻¹),TP 的平均浓度高于其它研究的上限(0.61 mg·L⁻¹);道路径流中 COD 远高于 V 类水质标准(40 mg·L⁻¹). 可见研究区域地表径流处于较高的污染水平,由于降雨初期强度

较大,地表冲刷作用携带大量污染物进入管道使出流中污染物浓度升高. 此外,较大的降雨强度造成了严重的管道溢流,污水对出流的污染贡献也是监测后期管道总出口污染物浓度明显升高的原因,但随着降雨强度的逐渐降低,污染物浓度呈现降低的趋势.

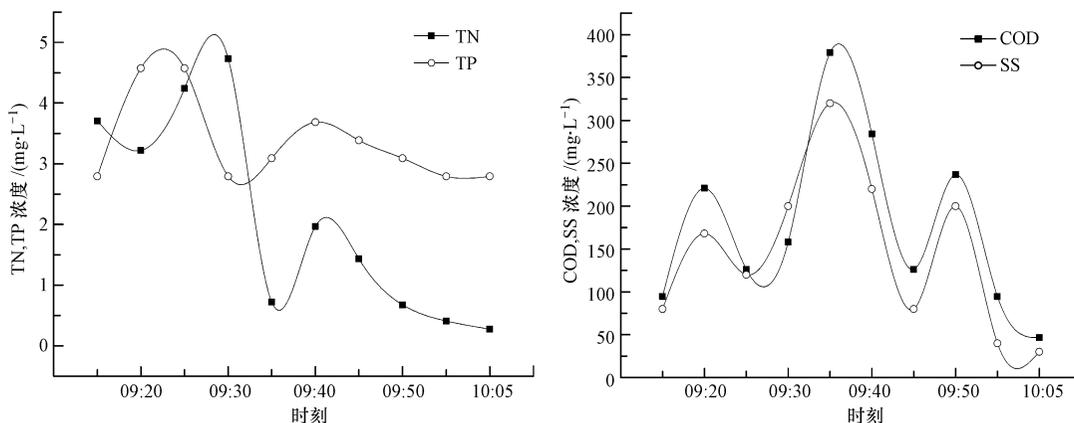


图7 8月27日道路径流取样点2#污染物输出曲线

Fig.7 Characteristics of from pollutants of road runoff in August 27

表3 合流污水及道路、屋面径流污染物浓度

Table 3 Pollutant concentrations in the combined sewage, roads, and roof runoff

降雨日期	来源	污染物/(mg·L ⁻¹)					数据来源
		TN	TP	氨氮	COD	SS	
7月21日	合流污水	15.6	19.10	13.00	377.60	717.3	本研究
	道路	1.15	4.27	0.72	93.10	78.4	
	屋面	4.13	2.09	2.23	20.54	35.6	
7月31日	合流污水	8.80	8.20	5.90	191.50	43.1	本研究
	道路	1.15	4.27	0.72	93.10	78.4	
	屋面	3.57	0.43	1.56	17.31	32.9	
8月27日	合流污水	11.60	7.60	9.60	163.10	95.3	本研究
	道路	2.10	3.40	1.08	106.70	145.8	
	屋面	2.96	1.23	1.64	16.25	32	
	合流污水	12.26~42.10	0.88~3.90	—	87.8~614.0	96.7~684.0	李立青等,2006;任玉芬等,2005
	道路	2.25~11.70	0.49~0.61	—	87~373	92.5~439.0	Tait et al.,2003;杨雪等,2008
	屋面	6.00~8.21	0.17~0.20	—	31~140	29.0~77.9.0	叶镇等,1994

注:由于人力原因未取到7月21日降雨的道路径流水样,其道路径流污染物浓度参考7月31日数据.

综上,当降雨强度足够大时,合流制排水管道溢流污染严重,其中,由于地表冲刷及管道中沉积物被冲刷悬浮造成的污染是重要的污染来源,需对地表径流污染、管道沉积物污染负荷等进行定量分析.

3.3 合流制管道总出流污染的不同来源污染物贡献

3.3.1 地表径流冲刷 地表径流水质受各种因素

的影响,其浓度是不断变化的,为估算地表污染负荷,需记录并测定整场降雨径流中水量变化及各污染指标的浓度变化过程. 通过现场调研发现,屋面多为瓦屋面材料,由于研究区域的管线为主管线,屋面的雨水没有直接流入地表,而直接进入紧接屋面的雨水管道最终汇入总管道,所以地表径流污染物是由道路和屋面径流污染物共同组成的. 利用公式(3)和(4)计算不同下垫面污染物的平均浓度,再

根据地面与屋面所占的面积比计算地表径流污染负荷,结果如表 4 所示。

表 4 地表径流污染物浓度

Table 4 Pollutant concentration in the surface runoff

降雨日期	污染物浓度/(mg·L ⁻¹)					数据来源
	TN	TP	氨氮	COD	SS	
7 月 21 日	2.43	3.36	1.37	62	60.06	本研究
7 月 31 日	2.18	2.60	1.08	60.62	58.90	
8 月 27 日	2.47	2.47	1.32	108	97.03	
	2.40 ~ 6.98	0.28 ~ 1.36	—	43 ~ 314	71 ~ 323.9	赵磊等,2008

3.3.2 不同来源污染负荷定量分析 由污染物进- 污水及管道总出口污染负荷,并进而求出管道沉积物的污染负荷及其贡献率,结果见表 5。

表 5 污染负荷计算表

Table 5 Calculation results of pollution loads

降雨日期	指标	系统输入负荷/kg		系统输出污染总负荷/kg	管道沉积物负荷/kg	沉积物贡献率
		地表径流	生活污水			
7 月 21 日	TN	6.19	18.50	41.88	17.19	41.04%
	TP	8.00	21.03	51.27	22.24	43.37%
	COD	141.90	174.40	1013.60	697.31	68.79%
	SS	250.46	140.87	1925.48	1534.14	79.67%
7 月 31 日	TN	1.56	24.52	32.95	6.874	20.85%
	TP	1.66	18.07	30.70	10.97	35.66%
	COD	38.76	248.28	533.14	246.10	46.16%
	SS	38.52	65.24	161.37	57.60	35.54%
8 月 27 日	TN	2.76	21.34	43.49	19.39	44.58%
	TP	2.61	12.38	28.49	13.50	47.30%
	COD	70.28	220.85	611.43	320.30	52.38%
	SS	101.14	50.16	257.26	105.97	41.10%

为更加直观地判断各种污染源对总出口污染负荷的贡献,分别计算了地表径流、生活污水及管道沉积物污染负荷占总污染负荷的比例。通过统计发现,降雨期间地表径流对富营养化污染物(TN、TP)的贡献率在 4.7% ~ 15.6% 之间,对 COD 的贡献率为 7.3% ~ 14.0%,对 SS 的贡献率为 13.0% ~ 39.3%。日常污水为富营养化污染物的主要产出源,污染物的贡献率为 41.0% ~ 74.4%,COD、SS 的贡献率范围分别为 17.2% ~ 46.6%、7.3% ~ 40.4%。从表 6 可以看出,排水管道中沉积物的冲刷对总出口负荷有较大的污染贡献;TN 污染贡献率为 20.9% ~ 44.6%,TP 为 35.7% ~ 47.3%,COD 为 46.2% ~ 48.8%,SS 为 35.7% ~ 79.7%,可见,管道沉积物是合流制溢流污染的重要污染来源。在高强度的降雨条件下(7 月 21 日、8 月 27 日),管道沉积物再次悬浮污染物的贡献率达到 40% 以上。3 场降

雨条件下管道沉积物对总出口径流中 TN、TP 的污染贡献率排序为:8 月 27 日 > 7 月 21 日 > 7 月 31 日,COD、SS 的污染贡献排序为:7 月 21 日 > 8 月 27 日 > 7 月 31 日,7 月 31 日降雨的雨前干燥期最短、平均雨强最小,对管道总出口口的污染负荷贡献率也最低;而 7 月 21 日降雨平均雨强最大,冲刷能力最强,导致大量地表颗粒物随径流冲刷进入管道的同时也增加了管道中沉积物的再悬浮几率,说明雨前干燥期、平均降雨强度等降雨特性在不同程度上共同影响雨季合流制排水管道溢流污染的程度。

4 结论(Conclusions)

本研究区域合流制排水系统雨季溢流污染问题严重,溢流污水中污染物的浓度远高于地表水环境质量标准(GB 3838—2002)中 V 类水质标准,给

河道带来巨大污染压力. 2012 年雨季的几场降雨数据统计表明, 当累积降雨量达到 10 mm 时发生溢流. 从有限的数据来看, 在不同的降雨条件下, 合流制排水系统溢流的污染来源贡献不同且随机性强, 无论是降雨初期还是后期同样造成污染, 其中, 管道沉积物的冲刷释放在合流制排水管道系统溢流污染中是一重要污染源, 沉积物的不同污染负荷贡献率高达 80%. 由此推断, 管道沉积物所占负荷比例与降雨强度、降雨历时及晴天累计数紧密相关. 由于管道沉积物中污染物释放规律的复杂性, 为更好地控制溢流污染问题, 除加强调蓄设施设置外, 需加强源头控制以减少地表颗粒物进入排水管道, 同时通过加强雨季前管道清淤及机械冲刷等方式削减排水系统污染物输出, 保护城市水体.

责任作者简介: 李海燕 (1975—), 女, 副教授, 主要研究方向为城市雨水径流污染物迁移转化规律. E-mail: lihaiyan@bucea.edu.cn.

参考文献 (References):

- Ahyerre M, Chebbo G, Saad M. 2001. Sources and erosion of organic solids in a combined sewer[J]. *Urban Water*, 2(2):36-45
- Brezonik L P. 2002. Analysis and predictive models of storm water runoff volumes loads and pollution concentration from watersheds in the twins cities metropolitan area Minnesota, USA[J]. *Water Research*, 36:1743-1757
- Che W, Liu Y, Li J Q. 2003. Quality of urban rainwater and pollution control home and broad[J]. *Water and Waste water Engineering*, 29(10):38-42
- Chebbo G, Gromaire M C. 2004. The experimental urban catchment 'Le Marais' in Paris; what lessons can be learned from it? [J]. *Journal of Hydrology*, 299:312-323
- Chebbo G, Gromaire M C, Ahyerre M, et al. 2001. Production and transport of urban wet weather pollution in combined sewer systems: the "Le Marais" experimental urban catchment in Paris[J]. *Urban Water*, 3(1):3-15
- Choe J S, Bang K W, Lee J H. 2002. Characterization of surface runoff in urban areas[J]. *Water Science and Technology*, 45(9):249-254
- Fan C. 2004. Sewer Sediment and Control a Management Practices Reference Guide[M]. Washington D. C.: USEPA. 1-3; 6-8
- 甘华阳, 卓慕宁, 李定强, 等. 2006. 广州城市道路雨水径流的水质特征[J]. *生态环境*, 15(5):969-973
- Gromaire M C, Garnaud S, Saad M, et al. 2001. Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers[J]. *Water Research*, 35(2):521-533
- 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会编. 2002. 水和废水监测分析方法(第4版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社. 107-108; 243-281
- 李立青, 尹澄清, 何庆慈, 等. 2006. 武汉汉阳地区城市集水区尺度降雨径流污染过程与排放特征 [J]. *环境科学学报*, 26(7):1057-1061
- 任玉芬, 王效科, 韩冰, 等. 2005. 城市不同下垫面的降雨径流污染 [J]. *生态学报*, 25(12):3225-3230
- Tait S J, Ashley R M. 2003. Verhoeven R, et al. Sewer sediment transport studies using an environmentally controlled annular flume[J]. *Water Science & Technology*, 47(4):51-60
- 杨雪, 车伍, 李俊奇. 2008. 国内外对合流制管道溢流污染的控制与研究[J]. *中国给水排水*, 24(16):7-11
- 叶镇, 刘鑫华, 胡大明, 等. 1994. 区域综合径流系数的计算及其结果评价[J]. *中国市政工程*, 67(4):43-45, 50
- 赵磊, 杨逢乐, 王俊松, 等. 2008. 合流制排水系统降雨径流污染物的特性及来源[J]. *环境科学学报*, 28(8):1561-1570