

水泵强制排水系统合流制溢流的污染源解析

李 田, 戴梅红, 张 伟, 钱立鹏

(同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 在对上海市某截流式合流制系统服务范围内的地表径流、生活污水、雨天截流、溢流的水质与水量进行同步监测的基础上, 根据排水管网水力模型确定系统储存的生活污水量, 采用输入输出质量平衡法初步分析了该系统雨天总出流(溢流加截流)与溢流过程的 SS, NH_4^+-N 来源, 结合降雨特性比较分析了雨天总出流、溢流的污染源解析结果的差异, 与雨天总出流的污染负荷构成相比, 2012 年 6 场降雨溢流事件的溢流 SS, NH_4^+-N 负荷中, 地表径流的贡献率分别下降了 10.2%~25.1%, 4.5%~11.0%, 生活污水贡献率分别降低了 0.3%~1.5%, 6.0%~30.7%, 管道沉积物贡献率则分别增长了 11.2%~25.4%, 6.8%~37.2%。研究成果直接确定了对水体造成危害的溢流污染的来源, 为合流制溢流污染控制、城市水环境保护策略的制定提供了依据。

关键词: 合流制溢流; 雨天出流; 输入输出质量平衡法; 管道储存水量; 源解析

中图分类号: X522

文献标志码: A

Pollutant Source Apportionment of Combined Sewer Overflows for a Pump Lifting Drainage System

LI Tian, DAI Meihong, ZHANG Wei, QIAN Lipeng

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Origins of pollution loads of SS, NH_4^+-N from total wet weather flows and the overflows from a pump lifting-combined sewer system in Shanghai were analyzed with the method of the entry-exit mass balance, respectively, based on simultaneously quantity and quality monitoring of surface runoff, sanitary sewage, intercepted wet weather flow and sewer overflow. Compared with the origins of SS, NH_4^+-N in wet weather flow from 6 monitored rainfall/overflow events, the origins of the two pollutants in CSO were different: the surface runoff contribution decreased by 10.2%~25.1% and 4.5%~11.0%, respectively; the sanitary

sewage contribution decreased by 0.3%~1.5% and 6.0%~30.7%, respectively; while the sewer deposits contribution increased by 11.2%~25.4% and 6.8%~37.2%, respectively. Reasons of the difference were analyzed. The results provide a better method to apportion wet weather pollution suffered by urban receiving water, and help to make reasonable decisions to control CSO pollution.

Key words: combined sewer overflows; wet weather flows; entry-exit mass balance method; sewer storage quantity; source apportionment

随着我国城镇污水收集和处理率不断提高, 合流制排水系统雨天溢流(CSO)日益成为雨季城市接纳水体水质恶化的主要原因^[1-5]。多年的研究表明, 合流制排水系统雨天溢流污染主要有 3 个来源: 生活污水、地表径流和管道沉积物^[6-9]。旱流污水颗粒物在低流速状态中的沉淀以及地表径流颗粒物在低强度降雨事件下的沉积是管道沉积物产生的主要来源^[10], 管道沉积物对溢流中常规污染物负荷的贡献作用明显^[6]。为了有效地控制污染、改善城市水环境质量, 对 CSO 污染源进行解析具有重要意义。国内外研究人员很早就开始对合流制排水系统雨天总出流(wet weather flow, WWF)污染物质的产生及传输过程进行了研究, 并提出采用系统输入输出质量平衡法(Entry-exit Mass Balance)对 3 个主要来源的贡献率进行定量分析^[11-15], 上述工作偏重排水管道中污染物的传输、转化机理研究, 而对合流制系统雨天溢流污染来源的定量化研究鲜有报道。

上海市中心城区的排水系统多为水泵强制排水系统, 泵排系统污染物质的冲刷、输送以及排放情况主要取决于截流泵和雨水泵的运行状况。此外, 这类排水系统非降雨日的运行水位通常明显高于雨水泵停泵水位, 造成溢流量中可能存在较多的非降雨

过程产生的生活污水. 定量研究 CSO 中污染负荷的来源, 与国外研究报道的系统雨天总出流的污染负荷源解析结果相比具有更明确的实用意义, 因为被截流的雨天水量并不直接造成受纳水体的污染. 本文以上海市某合流制水泵强制排水系统为考察对象, 以对城市水环境造成直接污染的雨天溢流污染负荷来源为研究目标, 在调查研究系统内地表径流、生活污水、雨天截流、溢流的水质与水量特性的基础上, 采用系统输入输出质量平衡法分别探讨了合流制的 WWF, CSO 污染负荷的来源, 并对比分析了 3 个污染源在不同特性降雨事件中对 WWF, CSO 的贡献比例.

1 材料与方法

1.1 研究系统与分析方法

选择上海市某截流式合流制排水系统 A 为研究对象, 该系统为水泵强制排水系统, 服务面积约为 1.18 km², 其中市政道路、屋面和绿地的分数分别为 45.6%, 43.8% 和 10.6%. 用地类型为老式住宅与商业混合用地, 建筑和人口密度均较高, 区域内卫生环境条件较差, 管道污染物沉积状况比较严重. 该系统与相邻排水系统没有水力联系, 属于封闭系统. 为满足现行的《室外排水设计规范》的要求, 系统内新建小区中的排水管道多数分为污水、雨水 2 个系统.

为提高地表径流水质调查数据的代表性, 按车流密度和服务类型的不同, 在汇水区域内选取 3 处道路雨水口人工采集道路径流样品, 在降雨径流的初期每 5 min 采集一个样品, 后期采样时间间隔为 10~15 min, 具体根据降雨强度大小而定, 水样用 1 L 水样瓶存储. 由于 A 系统内的绿地多数在居住小区中, 公共绿地极少(仅占总面积 1.34%), 以区域内一新建分流制小区雨水管道出流代表屋面、庭院、绿地的径流水质, 采样点布置在小区雨水干管出口处, 水样采集方法与路面径流相似, 采样过程中用速度-面积流量计(NIVUS PCM4)同步测定管道中的径流流量.

生活污水样品通过在排水泵站前池安装自动采样仪(ISCO 6712)自动采集, 设定“2 h 等间隔采样”. 雨天截流、溢流水样通过同一台采样仪, 按照以下程序采集: 自截流/雨水泵启动开始, 最初的 60 min 内每隔 10 min 采集一个样品, 之后的 120 min 每隔 20 min 采集一个样品, 再之后每隔 30 min 采集一个样品, 直至截流/排涝泵关闭, 每个样品体积为 900 ml.

研究区域内的降雨量、泵站运行水位、雨水泵、污水泵运行状况等参数由泵站配置的数据采集系统(SCADA)获得.

水质分析项目: COD, SS, TN, TP, NH₄⁺-N 质量浓度, 分析方法参照文献[16], 所有的水质指标参数均通过过程样的监测获得次降雨事件的污染物事件平均质量浓度(EMC).

1.2 研究方法

1.2.1 输入输出质量平衡法

输入输出质量平衡法基于管道系统进-出质量守恒原理, 认为合流制排水系统雨天出流总水量(WWF, 包括截流与溢流)携带的污染物负荷是生活污水、地表径流以及管道沉积物负荷的加和, 其数学表达式如下:

$$m_{MT} = m_{MR} + m_{MD} + m_{MS} \quad (1)$$

式中: m_{MT} 为排水系统输出的污染物质量, kg; m_{MR} 为地表径流携带的污染物质量, kg; m_{MD} 为生活污水的污染物质量, kg; m_{MS} 为管道内冲刷出的沉积物质量, kg.

水泵强制排水系统雨天有截流、溢流 2 种运行模式, 相比于重力自流系统, 泵排系统旱天较高的运行水位导致在降雨发生时系统中储存有较多的非降雨过程产生的生活污水. 因此, 对于整场降雨而言, 生活污水携带的污染物负荷是新增生活污水与降雨刚发生时系统中已储存生活污水的污染物负荷总和, 雨天排放污染物负荷是被截流的和溢流过程排放的污染物负荷总和.

1.2.2 系统水量平衡法

A 系统是封闭的合流制系统, 雨天系统内水量平衡公式如下:

$$V_1 + V_2 = V_R + V_D \quad (2)$$

式中: V_1 为截流泵截流的雨、污水量, m³; V_2 为溢流泵排放的雨、污水量, m³; V_R 为地表径流量, m³; V_D 为生活污水(包括降雨发生前系统存储生活污水量), m³.

截流泵/溢流泵排放的污染物负荷可通过监测次降雨事件中截流/溢流水质变化过程结合对应时段的流量乘积后分段累加得出. 其中, 截流泵的流量由泵站配置的电磁流量计(KROHNE SC100AS, MAG-XE ABB)实时监测获得; 泵站 SCADA 系统记录了溢流泵启闭时刻与运行水位, 结合 A 系统的综合径流系数($\phi=0.71$)与雨天系统水量平衡公式(式 2), 经校核确定了溢流泵的实际流量. 2012 年 4~10 月期间先后 5 次监测了非降雨日生活污水水

质、水量过程,综合分析得出 A 系统在一日中不同时段的生活污水排放负荷,作为总出流、溢流时段新增生活污水污染物负荷的估算依据。

2 结果与分析

2.1 泵站运行情况及管道储存水量

A 系统前池池顶标高 4.5 m,池底标高-3.4 m。泵站运行规则见表 1。由表 1 可知,A 系统雨天截流泵的正常启动水位为 1.0 m,导致降雨发生时系统中可能储存了大量非降雨过程产生的生活污水;雨天截流泵启动水位与雨水泵启动水位之间的高差高达 1.7 m,降雨日管道中可储存大量径流;而由于泵站尚未实现实时控制,雨水泵停车水位很低,一旦发生溢流,系统所存储的大量雨、污水将排入河道。截流泵、雨水泵启动水位相对重力流系统实际运行水位高,造成管道中储存大量雨污水的现象是长三角地区水泵强制排水系统中的基本情况。王溯等^[17]借助排水管网水力模型软件(Infoworks CS)建立了 A 系统总储存水量与运行水位的关系(图 1),据此可准确计算不同水位情况下管道内的储存水量。

表 1 A 系统泵站的运行规则

Tab.1 Operational regulation of pump station A

截流泵早流水位/m		截流泵降雨水位/m		雨水泵水位/m	
开车	停车	开车	停车	开车	停车
1.5	-1.5	1.0	-2.2	2.7	-1.3

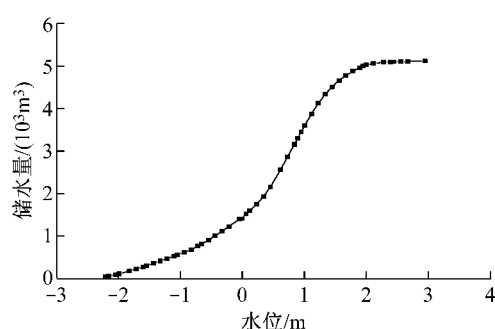


图 1 A 系统储水量与运行水位关系

Fig.1 Curve of storage volume to water level of pump station suction basin

2.2 A 系统降雨径流、雨天出流水质特征

2.2.1 降雨事件监测

2012 年 6~9 月期间对 8 场有效降雨径流过程、6 场降雨的泵站截流、溢流过程进行了连续监测,相关降雨事件特征如表 2 所示。按照 12 h 内降雨总量衡量,考察的降雨事件涵盖了小雨、中雨、大雨和暴

雨,其中 8 月 8 日为累计降雨量大于 100 mm 的大暴雨。

表 2 监测的降雨事件特征

Tab.2 Characteristics of monitored rainfall events

降雨日期	降雨量/mm	降雨历时/h	雨峰强度/ (mm · (5 min) ⁻¹)
2012-06-23	12.4	3.50	1.3
2012-06-26	17.5	4.17	0.8
2012-07-06*	31.5	3.08	3.5
2012-07-12	9.9	0.92	3.0
2012-08-02	4.0	1.33	0.6
2012-08-08*	111.1	25.58	4.9
2012-08-13*	28.4	2.17	5.0
2012-08-20*	42.7	3.00	2.8
2012-09-07*	15.7	0.75	4.0
2012-09-09*	15.9	0.83	6.6

注: * 表示同步采集到泵站溢流水样,SCADA 系统每 5 min 记录一次累计降雨量。

2.2.2 降雨事件的污染物排放过程

以 2012 年 8 月 20 日降雨事件为例分析地表径流、泵站截流和溢流中污染物质量浓度变化特征(图 2~4)。道路径流污染物排放存在明显的初期冲刷效应(图 2a),小区径流污染物质量浓度随着径流流量的增减而相应变化(图 2b),这与文献^[3,6,15]研究的道路径流、重力自流系统污染物出流情况一致。图 4 给出了泵站截流、溢流过程中 SS 和 NH₄⁺-N 质量浓度的变化过程,图中雨、污水泵流量过程分别根据雨水泵启闭时刻、污水泵电磁流量计实测数据绘制。从图 4 可以看出,水泵强制排水系统出流流量及污染物的输出过程由截流泵、雨水泵的运行情况控制,与降雨特性的关系不像重力流系统那样直接。雨水泵开启后,管道中流速陡增,对管道沉积物产生明显的冲刷作用。与截流过程的雨污水水质相比,溢流过程中 SS 质量浓度显著增加且长时间处于较高水平, NH₄⁺-N 质量浓度急速下降而后趋于稳定,由此可推断生活污水、地表径流、管道沉积物 3 个来源在截流、溢流 2 个不同运行模式下对排放的污染负荷的贡献率有所不同。

由于雨水口连接管的流量太小,现场实测流量困难,所以通过 InfoWorks CS 软件中的坡面流模型计算监测降雨事件中道路径流流量的变化过程以结合实测水质过程获得道路径流的 EMC。系统内地表径流污染物 EMC 值是结合市政道路、小区的径流水质及相应用地面积的分数加权平均得出。多次降雨事件的实测污染物 EMC 的平均值与生活污水的平

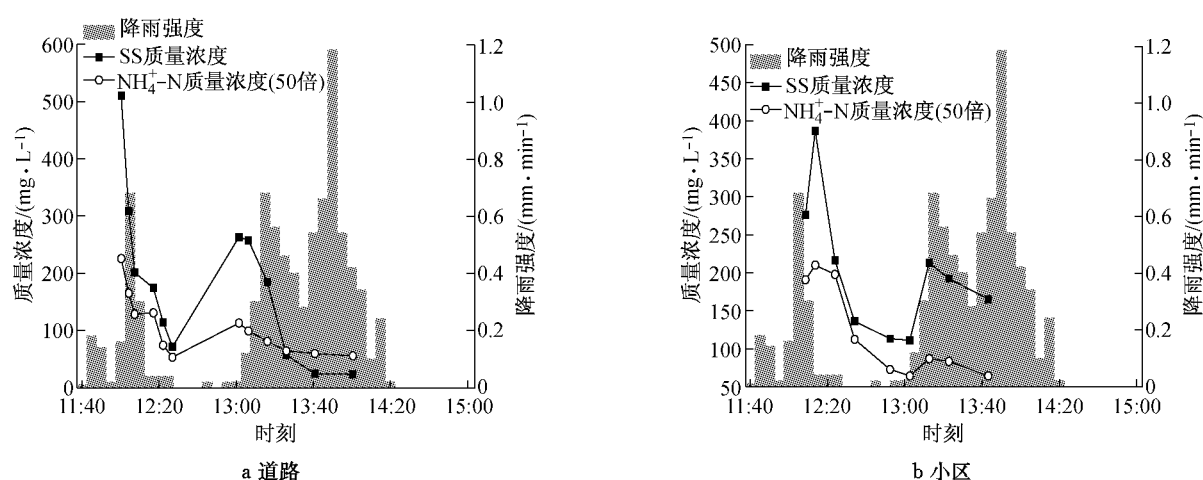


图 2 污染物质量浓度与降雨强度的变化

Fig.2 Pollutograph of runoff versus rainfall intensity

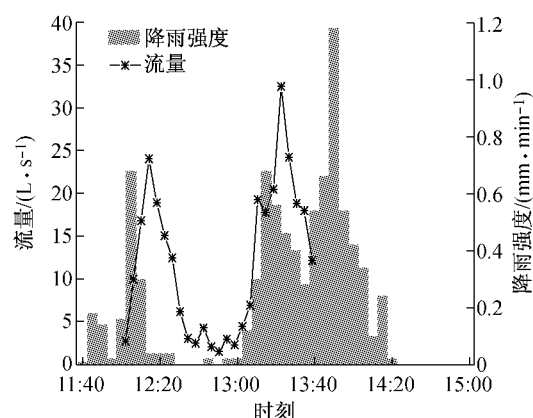


图 3 小区出流量与降雨强度的变化

Fig.3 Flow rate versus rainfall intensity in a district

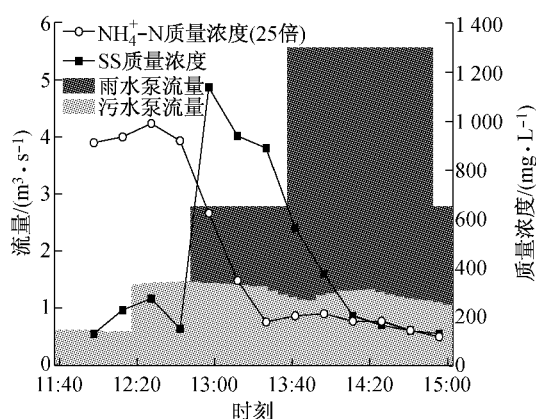


图 4 雨水和污水泵流量及污染物质量浓度的变化

Fig.4 Pollutograph/flow pattern of intercepted sewage and sewer overflows

均质量浓度见表 3。表 3 表明,在溢流尚未发生之前,截流的雨污水 SS 质量浓度较低,低于道路径流。

2.3 雨天总出流、溢流污染来源分析

2.3.1 雨天总出流

在准确测算 A 系统管道储存水携带的污染物负荷的基础上,以整场降雨为考察对象,采用系统输入

表 3 各监测指标污染物平均质量浓度

Tab.3 EMC of monitored pollutants

监测对象	(mg·L ⁻¹)				
	COD	SS	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP
生活污水	380	104	33.66	46.7	4.21
道路 1 径流	201	187	2.11	5.82	0.82
道路 2 径流	178	159	2.5	4.94	0.75
道路 3 径流	136	110	1.91	9.08	0.68
小区径流	84	102	2.39	8.37	0.37
泵站截流	253	128	24.39	31.70	1.83
泵站溢流	387	324	10.72	23.17	2.55

输出质量平衡法对 A 系统雨天总出流污染物负荷进行源解析,其中地表径流污染物负荷是径流污染物事件平均浓度均值与次降雨径流量的乘积;管道系统中储存生活污水量携带的污染物负荷是降雨开始到雨水泵关闭时刻系统内污染物负荷的差值,具体数值可通过降雨始、末时刻管道储存水量与水质实测数据获得,其中储存水量由图 1 确定,管道储存水质采用降雨开始、雨水泵关闭时刻实测的出水口水质(图 4)。截流、溢流、不同时段新增生活污水排放负荷的确定方法如 1.2 节所述,管道沉积物遭侵蚀带来的污染物负荷由式(1)计算得到。图 5 的直方图直观地呈现了各次降雨事件总出流负荷中 3 个污染源的贡献比例;不同降雨出流事件的地表径流、生活污水、管道沉积物对 SS 质量分数的平均贡献率分别为 49.9%,5.6%,44.5%;对 NH₄⁺-N 质量分数的平均贡献率分别为 21.6%,52.0%,26.4%。由图 5 还可以看出,同一污染源在不同降雨事件中对出流中特定污染物的贡献有很大不同,同一污染源在特定的降雨事件中对 SS、NH₄⁺-N 质量分数的贡献也有明显的差异。

2.3.2 雨天溢流

为了确定溢流污染负荷来源组成,利用系统输

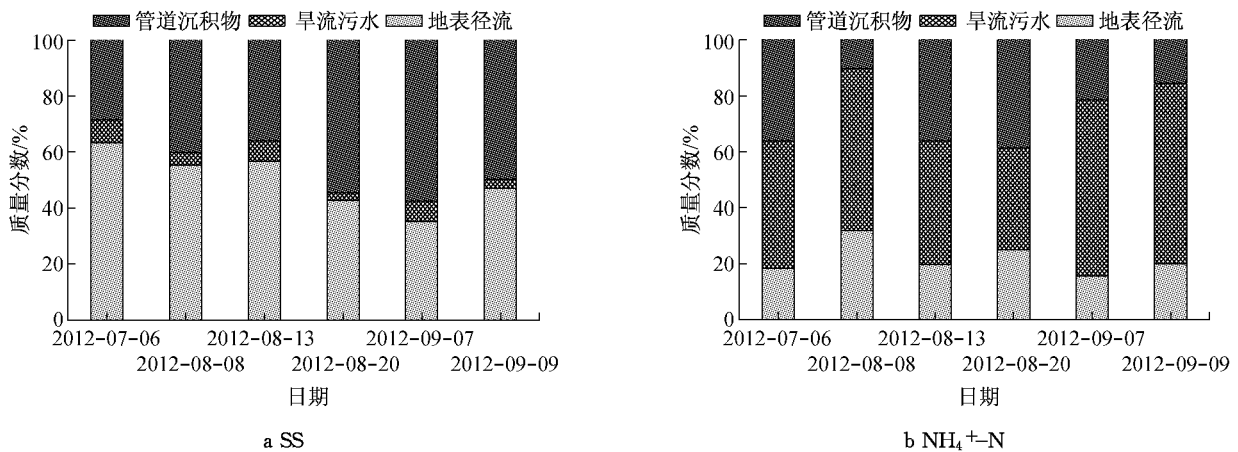


图 5 总出流的污染物来源

Fig.5 Source apportionment of pollutants for WWF

入输出质量平衡法解析 A 系统雨天溢流的 SS, NH_4^+-N 负荷来源. 溢流雨污水污染负荷的源解析结果如图 6 所示. 表 4 详细地统计了 6 次降雨事件中地表径流量(V_{runoff})、生活污水量(V_{dry})、管道储存污水量(V_{sto})和泵站截流(V_{int})、溢流量(V_{over}). 其中, 溢流期间地表径流、生活污水负荷是总出流中的相关负荷与雨水泵开启前截流时段地表径流、生活污水负荷的差值, 各降雨事件截流时段地表径流负荷由被截流的地表径流量与径流污染物事件平均质量浓度均值确定, 截流时段生活污水负荷由截流的生活污水量与相应时段生活污水水质确定. 根据雨水泵开启之前截流时段进入管网中的地表径流

总量与生活污水总量的比值可确定被截流量中地表径流、生活污水的分数. 溢流期间排出的总污染物负荷可通过实测溢流水质与溢流量、溢流期间截流量得出; 雨水泵开启后 3 个污染源对溢流、截流的污染负荷平均贡献率是相同的. 最后, 由式(1)得到管道沉积物携带的污染物负荷. 6 次溢流事件中 $31.9\% \pm 14.5\%$ 的 SS、 $15.7\% \pm 9.5\%$ 的 NH_4^+-N 来自地表径流, $4.7\% \pm 3.3\%$ 的 SS 与 $38.8\% \pm 18.1\%$ 的 NH_4^+-N 来源于生活污水(包括降雨过程新增污水和管道储存污水), $63.4\% \pm 16.6\%$ 的 SS 与 $45.5\% \pm 17.3\%$ 的 NH_4^+-N 来自管道沉积物.

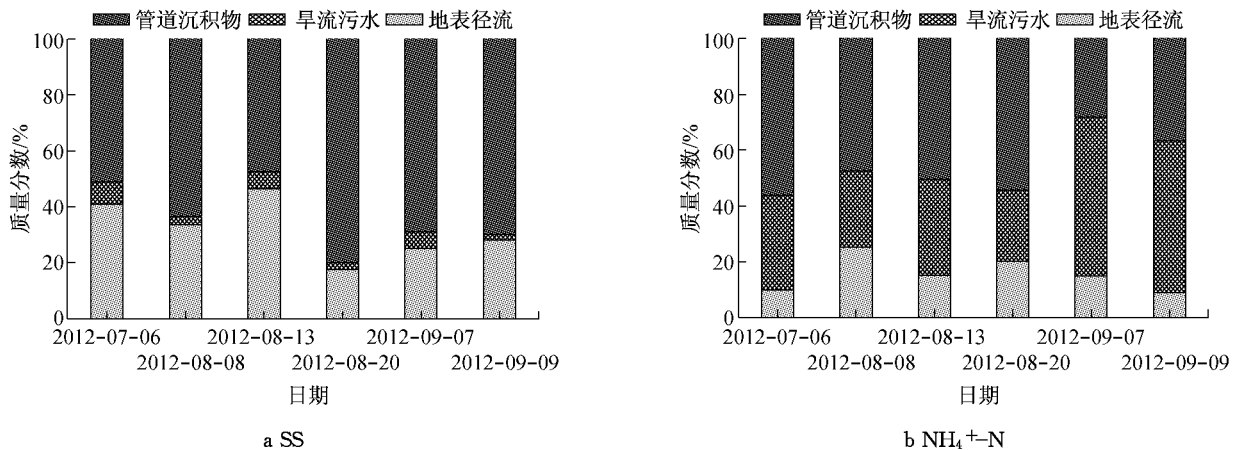


图 6 溢流的污染物来源

Fig.6 Source apportionment of pollutants for CSO

2.3.3 讨论

对照图 5a, 6a 及图 5b, 6b 可知, 对于合流制系统雨天污染来源分析, 以溢流过程为考察对象与以总出流为考察对象相比, 地表径流、生活污水贡献率降低, 管道沉积物贡献率提高. 相对于雨天总出流的污染物源解析结果, 6 场降雨雨天溢流 SS, NH_4^+-N

的来源中, 地表径流贡献率分别下降了 $10.2\% \sim 25.1\%$, $4.5\% \sim 11.0\%$; 旱流污水贡献率分别降低了 $0.3\% \sim 1.5\%$, $6.0\% \sim 30.7\%$; 管道沉积物贡献率分别增长了 $11.2\% \sim 25.4\%$, $6.8\% \sim 37.2\%$. 溢流发生之前截流的初期地表径流污染程度比较严重, 对降雨强度不大的长历时降雨, 溢流发生之前截

表 4 出流事件中各部分水量

Tab.4 Different sections of water volume in wet weather discharge events

m³

日期	溢流发生前被截流量		截流期间总水量		整个降雨过程 总 V_{int}	V_{over}	溢流期间 V_{int}	V_{int} 与 V_{over} 比值	系统中已有 V_{dry} 与 V_{int} 比值
	V_{runoff}	V_{dry}	V_{runoff}	V_{dry}					
2012-07-06	1 175	185	5 570	880	1 360	15 820	3 905	0.09	0.68
2012-08-08	10 080	4 920	10 020	4 890	15 000	95 560	24 925	0.16	0.05
2012-08-13	690	225	4 355	1 390	915	9 190	1 800	0.10	1.27
2012-08-20	2 630	1 260	5 190	2 485	3 890	29 080	9 820	0.13	0.37
2012-09-07	555	175	4 150	1 320	730	10 250	2 470	0.07	1.55
2012-09-09	1 025	440	3 110	1 330	1 465	9 830	2 670	0.15	0.41

流过程持续进行,会使地表径流中大量污染物被截流因而降低了其对溢流的贡献率。同样,长时间截流后才发生溢流的降雨事件,溢流量中管网存储的生活污水明显减少,因而降低了生活污水对溢流污染负荷的贡献率,特别是对 NH_4^+-N , TN 这些主要来自生活污水的污染物。持续的前期截流使得溢流占总出流水量的分数减少,而溢流时段才产生的沉积物冲刷带来的污染负荷相对稳定,由此导致沉积物对溢流污染负荷的贡献比例增大。

2012 年 8 月 8 日, 8 月 20 日和 9 月 9 日 3 场降雨事件不同污染源的贡献率按照雨天总出流过程和溢流过程分别估算所得结果相差较大: 相对于雨天总出流的污染来源构成, 对雨天溢流 SS, NH_4^+-N 负荷组成, 地表径流贡献率分别下降了 19.1%~25.1%, 4.8%~11.0%, 生活污水贡献率分别降低了 1.2%~1.5%, 10.5%~30.7%, 管道沉积物贡献率分别增长了 20.3%~25.4%, 15.8%~37.2%。由表 3 的分析可知, 3 场降雨均为初期强度较小且持续时间较长的降雨, 溢流发生前的截流量占溢流量的比例大, 系统中储存生活污水量占溢流前总截流量的比例小。这种情况下降雨前系统存储的生活污水对溢流所能提供的 NH_4^+-N 负荷减少, 而沉积物侵蚀带来的 SS 负荷增加集中于降雨出流过程的溢流时段。对于雨峰靠前的强降雨, 径流水量的增加速率快, 溢流事件迅速发生, 前期截流的影响很小, 雨天总出流、溢流 2 个过程的污染负荷来源相差不大。因此, 对溢流发生之前截流时段长的降雨事件, 本文提出的溢流污染源解析方法较现有的总出流污染源解析方法能更准确地描述受纳水体承受的污染负荷的来源。

3 结论

(1) 对于水泵强制排水合流制系统, 以直接对受纳水体造成污染的溢流为考察对象进行污染负荷的

源解析, 与现有的以雨天总出流作为考察对象相比, 可以排除截流量与溢流水量的比值变化和管网中储存的生活污水量对解析结果的影响, 可获得比较准确的结果。

(2) 相对于雨天总出流的污染源解析结果, 在 A 系统 2012 年 6 场溢流事件的 SS, NH_4^+-N 质量负荷来源中, 地表径流平均贡献率分别下降了 18.0%, 6.0%; 生活污水平均贡献率分别降低了 0.9%, 13.3%; 管道沉积物平均贡献率分别增长了 18.9%, 19.3%。

(3) 溢流污染负荷与总出流污染负荷的源解析结果之间的差异受降雨特性以及排水系统特性的影响, 对降雨强度小、历时较长的降雨溢流事件简单地总出流污染的源解析对受纳水体实际承受的污染来源而言会明显低估管道沉积物的贡献率, 而高估地表径流与生活污水的贡献率。

参考文献:

- [1] Su'arez J, Puertas J. Determination of COD, BOD, and suspended solids loads during combined sewer overflow (CSO) events in some combined catchments in Spain [J]. Ecological Engineering, 2005, 24: 201.
- [2] Even S, Mouchel J M, Servais P, et al. Modelling the impacts of combined sewer overflows on the river Seine water quality [J]. Science of the Total Environment, 2007, 375(1/3): 140.
- [3] F Diaz-Fierros T, Puerta J, Suarez J, et al. Contaminant loads of CSOs at the wastewater treatment plant of a city in NW Spain [J]. Urban Water, 2002, 4(3): 291.
- [4] McPherson T N, Burian S J, Turin H T, et al. Comparison of the pollutant loads in dry and wet weather runoff in a southern California urban watershed [J]. Water Science and Technology, 2002, 45(9): 225.
- [5] Soonthornnonda P, Christensen E R, Boudjou U, et al. An evaluation of separating combined sewers and its effect on water quality in the Greater Milwaukee, Wisconsin area [C]// Proceedings of the 80th Annual Water Environment Federation Technical Exhibition and Conference. San Diego: Water Environment Federation, 2007: 7080-7100.

(下转第 1525 页)