

上海中心城区苏州河沿岸排水系统降雨径流水文水质特性研究

程江^{1,2}, 杨凯^{2*}, 黄小芳², 吕永鹏²

(1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; 2. 华东师范大学资源与环境科学学院, 上海市城市化生态过程和生态恢复重点实验室, 上海 200062)

摘要: 为了解城市合流制管道系统降雨径流的水文水质变化过程与特征, 于 2007 年 7~9 月对上海中心城区合流制排水系统 (CSS) 4 类强度降雨 (小雨、中雨、大雨和暴雨) 的降雨量、径流量和污染浓度进行了同步连续监测与分析. 结果表明, 径流过程线滞后于降雨过程线约 15~25 min, 形态与降雨过程线相似, 波动幅度低于降雨过程线. 4 类强度降雨的径流系数分别为: 0.33、0.62、0.67 和 0.73. CSS 基本存在 30/30 标准的降雨径流初始冲刷现象, 污染物浓度过程线滞后于降雨过程线约 30~40 min. 4 类强度降雨径流的 pH 值和重金属 Cu、Zn、Cr、Cd、Pb、Ni 的事件平均浓度 (EMC) 均符合地表水环境质量标准 V 类水要求, COD、BOD₅、NH₄⁺-N 和 TP 的 EMC 的变化范围分别为 225.0~544.1、31.5~98.9、8.9~44.2 和 1.98~3.52 mg·L⁻¹, 平均分别超过 V 类水标准 9.3、5.6、11.7 和 6.1 倍, 接近国外城市 CSS 的平均污染水平. SS 与 COD、BOD₅、NH₄⁺-N 和 TP 在 $p < 0.01$ 水平上均具有一定的正相关性 (R 为 0.359~0.736), 颗粒态有机类和营养类污染物的比例平均为 70.21%.

关键词: 合流制排水系统; 降雨径流; 城市非点源污染; 水文; 水质; 苏州河

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)07-1893-08

Hydrology and Water Quality of Rainfall-Runoff in Combined Sewerage System Along Suzhou Creek in Central Shanghai

CHENG Jiang^{1,2}, YANG Kai², HUANG Xiao-fang², LÜ Yong-peng²

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Key Laboratory of Urbanization and Ecological Restoration, School of Resources and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: In order to obtain the processes of hydrology and water quality of urban combined sewerage system (CSS) in highly urbanized region, the precipitation, discharge and pollutant concentration of four different intensity rainfall (light rain, moderate rain, heavy rain and storm) were measured from Jul. to Sep. 2007 in the Chendulu CSS along Suzhou Creek in Shanghai. The results show that the shapes of runoff graph are similar to rainfall graph, with a weaker fluctuation range and a 15-25 min delay between rainfall and runoff graph. Runoff coefficients of the four different rainfall are 0.33, 0.62, 0.67 and 0.73, respectively. The 30/30 first flush phenomenon is found in Chendulu CSS. The peak of pollutant concentration graph lags rainfall peak about 30-40 min. The pH and event mean concentration (EMC) of Cu, Zn, Cr, Cd, Pb and Ni totally measure up to environmental quality standards V for surface water of China besides COD, BOD₅, NH₄⁺-N and TP, and the EMC of COD, BOD₅, NH₄⁺-N and TP are 225.0-544.1, 31.5-98.9, 8.9-44.2 and 1.98-3.52 mg·L⁻¹, respectively. The rainfall-runoff pollutant concentration in Chendulu CSS is close to those of other foreign cities. At the confidence level of $p < 0.01$, good relationships exist between SS and COD, BOD₅, NH₄⁺-N and TP, respectively, and the average proportion of particulate organic pollutant and nutrient is 70.21%.

Key words: combined sewerage system; rainfall-runoff; urban non-point source pollution; hydrology; water quality; Suzhou Creek

城市化形成的不同于自然地表的“城市第二自然格局”, 改变了城市生态系统的水文、水质过程与特征^[1]. 在点源污染被逐步控制后, 城市地表径流污染作为典型的非点源污染, 已成为城市河流与湖泊等受纳水体的主要污染源, 是局地尺度、区域尺度乃至全球尺度上城市水环境污染、生态系统健康失衡的重要原因^[2~6]. 20 世纪 60、70 年代起, 欧美学者对不同城市屋面、路面和城市功能区小流域, 进行了降雨径流污染特征及成因的大规模调查和研究, 积累了大量基础数据, 在污染物时空分布、初始冲刷效应

与径流模型开发等方面取得了值得借鉴的成果^[7~15]. 国内研究起步于 20 世纪 80 年代^[16], 之后才逐渐引起学者们的广泛关注, 先后在北京^[17~19]、上海^[20]、西安^[21]、澳门^[22]、珠海^[23]、镇江^[24]等城市的路面和屋面小尺度监测区开展了降雨径流水文、水质

收稿日期: 2008-09-29; 修订日期: 2008-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40871016, 70673022); 中国博士后基金项目 (20070420629)

作者简介: 程江 (1977~), 男, 博士后, 主要研究方向为城市水资源与水环境, E-mail: jcheng@sklec.ecnu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: kyang@re.ecnu.edu.cn

特征研究.近年来,城市集水区尺度上的相关研究亦在武汉汉阳区^[25~27]、澳门半岛城区^[28]开展,而对我国城市合流制排水系统降雨径流水文水质的研究还有待进一步加强.为此,本研究通过对上海中心城区成都路合流制排水系统降雨、径流和径流水质过程的多次同步监测,分析了不同降雨强度下,高度城市化区域排水系统降雨径流的水文、水质变化过程及其特征,以期为城市合流制排水系统降雨径流非点源污染的控制与管理提供借鉴.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

上海地区气候温和、雨量充沛、四季分明,属北

亚热带季风性气候.年均气温 15.5℃,多年平均降水量1 149.8 mm,年内分配不均,4~9 月是本区的主要雨期,降雨量占全年降雨量的 70%左右.年均蒸发量为1 351.4 mm.成都路排水系统位于上海市中心城区静安区,苏州河南岸(图 1).系统集水区面积 3.06 km²,边界独立,人口密度 3.36 万人·km⁻².排水体制为雨、污水合流制,晴天时,排水系统中排放的是市政污水,平均 5.85×10⁴ m³·d⁻¹;雨天时,排水系统不仅承担排放市政污水的功能,而且承担着排放集水区降雨径流的功能.系统内公共建筑用地、城市住宅用地、工业用地、道路广场用地、绿地和水面的面积比例分别为 22.60%、31.86%、7.66%、20.59%、17.21%和 0.09%.

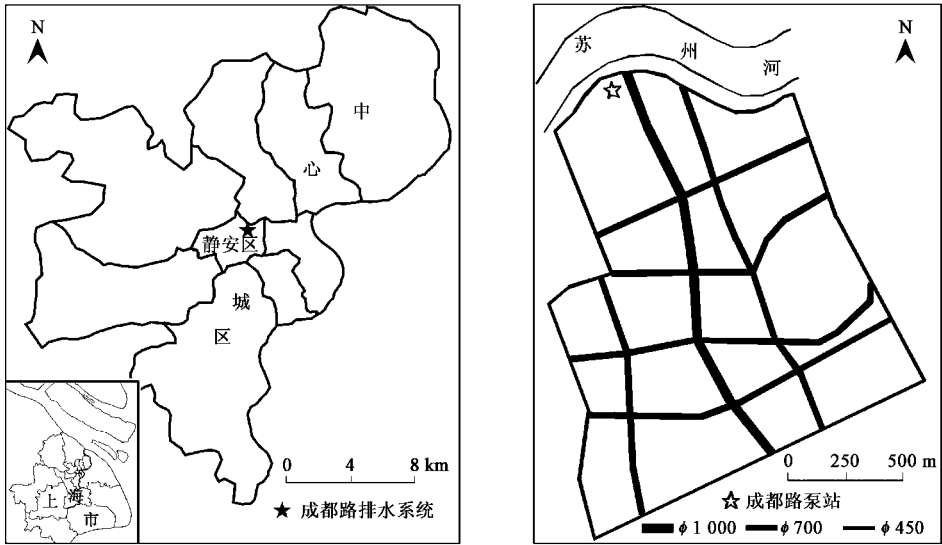


图 1 成都路合流制排水系统区位和管网
Fig.1 Location and pipe network of Chendulu combined sewerage system

1.2 排水系统泵站运行模式

由于地面高程低,成都路排水系统内市政污水和降雨径流均采用泵站强排水模式.成都路泵站设计暴雨重现期为 1 a;排水管网管道坡度 1.5‰;规划与现状排水能力均为 25.795 m³·s⁻¹,其中污水泵 3 台,单台流量为 1.10 m³·s⁻¹,雨水泵 11 台,单台流量为 2.045 m³·s⁻¹.根据泵站集水井实时水位来控制泵站运行模式.运行模式分晴天和降雨 2 大类,其

中降雨模式又分为调蓄模式和溢流模式.晴天时,按晴天模式的水位控制截流泵运行,旱流污水排入市政总管;雨天或预报有雨时,截流泵按降雨模式的水位控制运行;水位达到进调蓄池水位时,按调蓄模式控制雨水泵运行,合流污水排入调蓄池;水位达到溢流水位时,按溢流模式控制防汛泵运行,合流污水直接排入苏州河.各模式下的泵站运行水位见表 1.

1.3 数据采集

表 1 成都路排水系统泵站运行水位/m

运行模式		截流泵		雨水泵		防汛泵	
		开泵水位	关泵水位	开泵水位	关泵水位	开泵水位	关泵水位
晴天		-5.00	-6.00	—	—	—	—
降雨	调蓄	-5.00	-6.00	-5.50	-5.00	—	—
	溢流	—	—	—	—	-3.19	-5.88

2007 年 7 ~ 9 月进行了 10 余次同步监测,共取得 6 次有效降雨量、径流量和径流水质数据.表 2 是对次降雨事件降雨量、降雨历时、平均降雨强度、集中降雨量和集中降雨强度等降雨特征参数的统计结果.降雨量与径流量数据由泵站自动化采集系统获得,降雨数据采集频率为 5 min;泵站各台水泵的启、

闭时间由系统自动记录,径流量通过水泵铭牌流量和运行时间计算得到,并扣除旱流水量;水样采集点位于泵站集水井,人工手动采样,分雨前、雨中和雨后 3 个时段连续采样,雨前和雨后时段的采样间隔为 10 min,雨中视现场降雨强度和合流污水水质的变化情况设定 3 min 或 5 min 的采样间隔.

表 2 监测期间降雨的基本特征

Table 2 Characteristics of rainfall during samplings

降雨事件	降雨日期 /年-月-日	降雨量 /mm	降雨历时 /h	降雨强度 /mm·h ⁻¹	集中雨量 /mm	集中降雨历时 /h	集中降雨强度 /mm·h ⁻¹	2 次降雨间隔 时间 ¹⁾ /d
1	2007-07-09	8.8	5.7	1.5	8.5	1.9	4.5	2
2	2007-07-22	5.7	5.6	1.0	5.6	1.3	4.3	1
3	2007-08-03	23.9	7.3	3.3	19.0	0.8	23.8	4
4	2007-08-05	29.2	1.9	15.4	26.0	0.9	28.9	1
5	2007-08-11	68.9	9.8	7.0	60.0	1.0	60.0	0
6	2007-09-19	12.8	8.9	1.4	5.6	10.7	1.9	0

1) 2 次降雨间隔是指与上次降雨雨量超过 5 mm 降雨事件的间隔时间

1.4 水样分析

水样采集后保存于预先洗净的 1 L 棕色玻璃瓶中,置于 4℃的冰柜中待分析.水质分析指标包括:pH、SS、COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TP,以及重金属 Cu、Cd、Pb、Zn、Cr、Ni,其中 COD、BOD₅、NH₄⁺-N和 TP 为近 10 年来上海城市河流水质的主要污染因子.pH 值由美国 Hach 公司生产的 SENSion156 便携式多参数测量仪现场测定,其余指标均采用文献[29]的标准方法进行.

2 结果与讨论

2.1 降雨径流水文过程

按黄锡荃^[30]的降雨强度分级方法,2007-07-09、2007-08-03、2007-08-05 和 2007-08-11 降雨分别代表了 4 类不同降雨强度,即小雨、中雨、大雨和暴雨.4 场降雨过程均为双峰或多峰类型,存在显著的集中降雨量过程.降雨-径流过程线显示(图 2),虽然 4 场降雨的强度和雨型各异,但径流过程线形态与降雨过程线类似.受城市土地利用变化导致的下垫面硬化、排水管网汇流加速和工程强排水等因素影响,径流过程线波动幅度低于降雨过程线,且间隔较短的降雨峰值或后期降雨峰值产生的径流可被平滑,例如,2007-08-05 降雨过程线出现 3 处峰值,后 2 次径流峰值被平滑,径流过程线显示为单峰.此外,受初损、稳定下渗、滞留、洼蓄、蒸发以及汇流过程共同作用,径流过程线滞后于降雨过程线,滞后时间约 15 ~ 25 min,略大于路面或屋面径流过程线 5 ~ 20 min 的滞后时间^[19].滞后时间随降雨强度,尤其是集中降雨强度的增加而减小.受初损、稳定下渗、洼蓄和

蒸发等导致径流损失因素影响,系统径流系数随降雨强度增加而增加.成都路排水系统内公共建筑用地、城市住宅用地、工业用地和道路广场用地等不透水型下垫面比例达 82.70%,设计径流系数为 0.80,计算显示此次测量期间的小雨、中雨、大雨和暴雨的径流系数分别为 0.33、0.62、0.67 和 0.73,均小于设计值.

2.2 降雨径流水质过程

排水系统降雨径流的污染物来自于降水、城市不同下垫面和排水系统等 3 个方面,其中后两者是主要贡献源^[4~6].降雨过程中排水系统合流污水中不同种类污染物的主要来源虽然各不相同,但 4 类型降雨事件中,COD、SS、TP 和 NH₄⁺-N 的浓度过程线具有较显著的时间特征,即随着降雨径流的产生和径流量的增加,污染物浓度逐渐升高,浓度的峰值滞后于降雨峰值但先于径流峰值,随后污染物浓度逐渐下降,并逐渐趋于稳定(图 3).这主要是由于汇流延时导致了高浓度初期地表径流滞后于降雨过程.成都路排水系统的滞后时间约 30 ~ 40 min,主要受排水系统面积、下垫面类型、管网密度、管网布局、管道直径、坡降、糙率等因素共同影响.

2.3 降雨径流初始冲刷效应

降雨径流的初期污染物浓度高于后期的现象称为初始冲刷效应(first flush effects, FFE)^[11~14].污染物的累积污染负荷与累积径流量构成的无量纲累积的 M(V)曲线的发散程度,可用来判别是否发生 FFE^[11~14].当累积曲线位于对角平衡线左上部分时,说明污染物的排放要快于径流的输出;反之,则污染

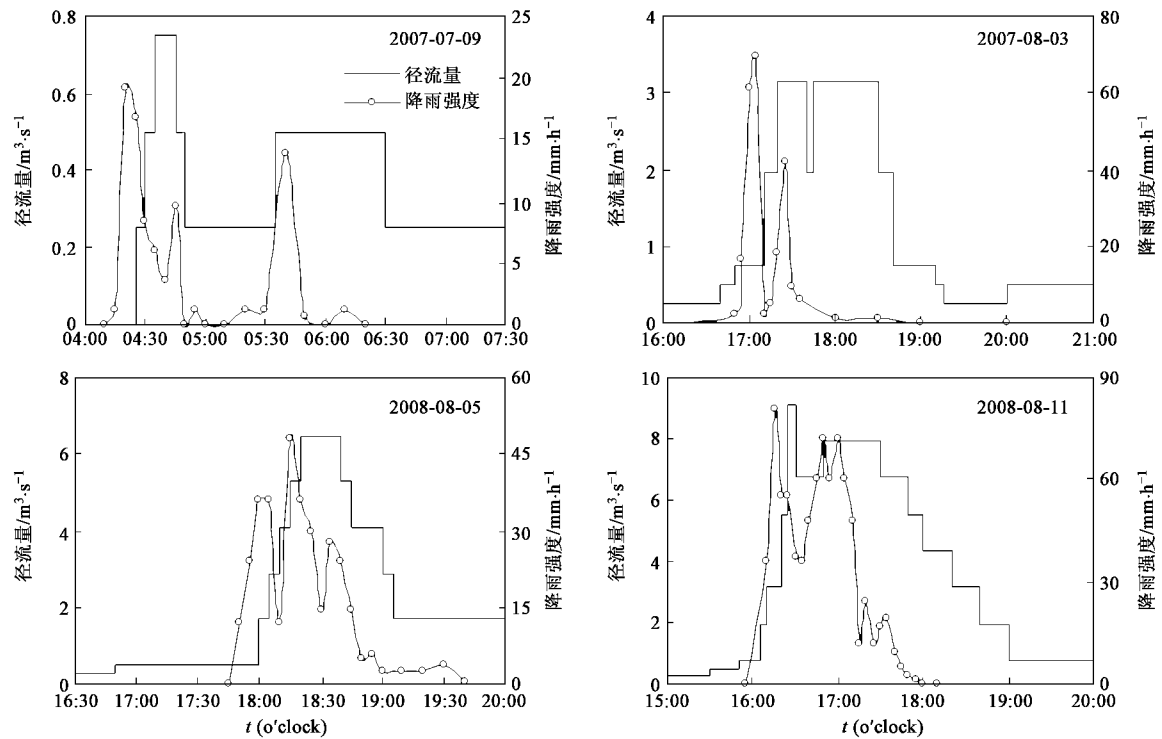


图 2 合流制排水系统降雨-径流水文过程线

Fig.2 Hydrograph of rainfall-runoff in combined sewerage system

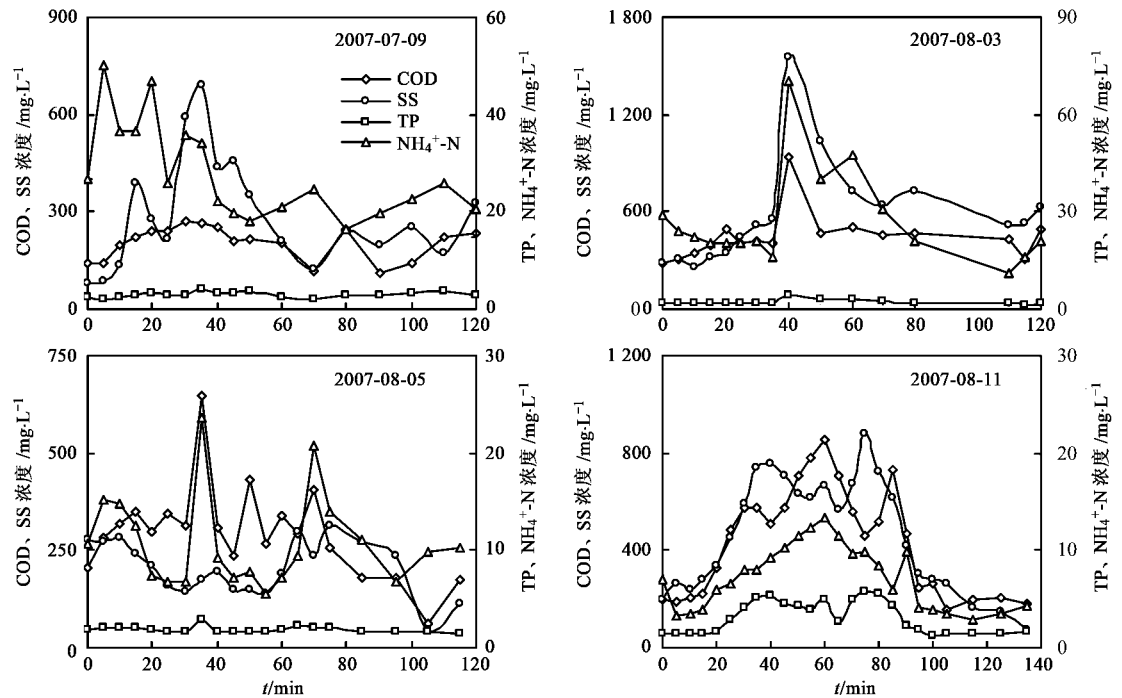


图 3 合流制排水系统降雨径流污染物浓度过程线

Fig.3 Pollutant concentration graph of rainfall-runoff in combined sewerage system

物的排放要慢于径流的输出. 国外已经开展的大量研究中, 判别 FFE 的标准不尽一致, 例如, Geiger^[11]采用 $M(V)$ 曲线与对角线的距离 > 0.2 作为判断标准; Bertrand 等^[13]采用 30/80 标准, 即降雨径流总量

30%的初期径流至少排放 80% 的污染物; Lee 等^[14]提出了 30/30 标准. 由于 Geiger 确定的 $M(V)$ 曲线与平衡对角线距离 > 0.2 可能是一范围, 而不是一点, 所以确定 FFE 存在不确定性; 而 Bertrand 等的标准过于严格, 其对法国 12 个集水区 197 次降雨径流污染 FEE 出现频率的统计中, 对 SS 而言只有 1% 的径流事件存在 30/80 的 FFE; Lee 等的 30/30 标准克服了上述 2 类标准的不足, 目前采用较多^[20], 本研究亦采用此标准.

研究表明降雨路面和屋面径流存在普遍的 FFE^[11~14], 但受到集水区土地利用类型及特征、地表污染累积程度、降水特征、污染物种类等诸多因素的共同作用^[5,26], 使得合流制排水系统是否存在 FFE

还存在争论. 图 4 显示, 4 类降雨强度下, 成都路排水系统降雨径流污染物基本存在 30/30 判断标准的 FFE. 但部分场次降雨中, 对应前期 10% ~ 20% 径流量时, 部分污染物累积曲线位于对角平衡线之下, 表明此时污染物的排放要慢于径流的输出. 这可能是由于排水管道中沉积物尚未被冲刷启动进入径流中的原因造成. 为了使降雨径流污染得到科学合理的管理与控制, 如何定量化表示初始冲刷强度就显得非常重要. 已有研究表明可用累积曲线与对角平衡线的偏差代表初始冲刷的强弱, 用 FF_{30} , 即以累积径流负荷 30% 时的累积污染负荷与 30% 径流负荷之比来表示初始冲刷强度, FF_{30} 值越大, 冲刷强度就越大^[14,20].

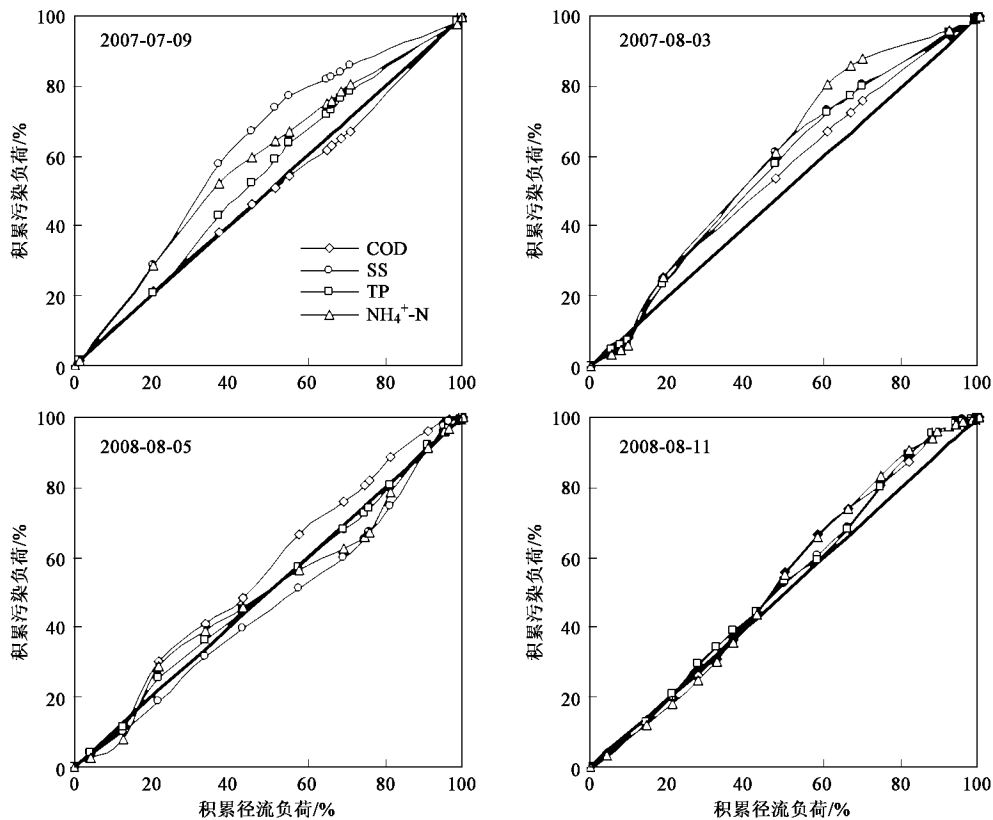


图 4 合流制排水系统的初始冲刷效应

Fig.4 First flush effects in combined sewerage system

计算结果显示(表 3): ① 4 类降雨强度下, 合流污水中各污染物的平均 FF_{30} 为 1.136, 即 30% 的初期径流中, 污染物的排放量相对高于径流输出量 13.60%. COD、 BOD_5 、 NH_4^+-N 、TP 和 SS 的平均初始冲刷强度分别达到 1.113、1.136、1.116、1.127 和 1.187. 其中, SS 的初始冲刷强度最大, COD、 BOD_5 、 NH_4^+-N 和 TP 的初始冲刷强度相对较小, 这主要是由

于 SS 与其他污染物质的来源及主要贡献源的差异, 以及 SS 的易于冲刷的物理特性的决定. ② 2 次降雨间隔时间对初始冲刷强度有着较大影响. 2007-08-05 和 2007-08-11 的降雨量和降雨强度(包括平均和集中降雨强度)均大于 2007-07-09 和 2007-08-03 降雨, 说明前 2 次降雨径流对地表污染物和排水管道沉积物的冲刷溶解能力、冲刷强度大于后 2 次, 但后 2 次

降雨的 2 次降雨间隔天数相对较长(表 2),由于城市地表径流污染和排水管道沉积物具有晴天累积、雨天排放的特征.随着 2 次降雨间隔天数的增加,累积于城市地表和排水管道的污染物数量可能会增

加,因而 2 次降雨间隔天数的增加意味着可被降雨径流初期冲刷的污染物数量在增加,即增加了降雨径流的污染潜力,导致后 2 次降雨的初始冲刷强度亦更高.

表 3 合流制排水系统的初始冲刷强度
Table 3 First flush effect intensity in combined sewerage system

降雨日期	降雨强度	FF ₃₀ (COD)	FF ₃₀ (BOD ₅)	FF ₃₀ (NH ₄ ⁺ -N)	FF ₃₀ (TP)	FF ₃₀ (SS)	平均值
2007-07-09	小雨	1.028	1.104	1.228	1.115	1.510	1.197
2007-08-03	中雨	1.217	1.183	1.212	1.233	1.268	1.223
2007-08-05	大雨	1.252	1.148	1.099	1.093	0.925	1.103
2007-08-11	暴雨	0.956	1.108	0.923	1.067	1.046	1.020
平均值		1.113	1.136	1.116	1.127	1.187	1.136

2.4 降雨径流污染物浓度

4 场降雨事件中 COD、SS、TP 和NH₄⁺-N的变化范围分别为: 156.9 ~ 941.2、115.2 ~ 1 550.6、1.26 ~ 5.70 和 2.86 ~ 70.0 mg•L⁻¹(图 3),与监测期间该系统旱流污水相比(表 4),合流污水中 COD 和 SS 浓度,尤其是最高浓度,远大于旱流污水,TP 浓度与旱流污水大致相当,而NH₄⁺-N浓度则低于旱流污水浓度.排水系统中各类污染物主要来源的不同是这一现象的主要成因,例如: NH₄⁺-N主要来源于生活污水,且生活污水中NH₄⁺-N浓度高于地表和屋面径流; SS 主要来源于下垫面和管道沉积物,且贡献大于生活污水.污染物来源和主要贡献源的差异,使得地表和屋面径流中不同污染物的浓度与旱流污水浓度相比,存在相对高低现象.当降雨地表和屋面径流汇入排水管网后,合流污水中不同类型污染物的浓度便出现“此消彼长”的现象.

对于合流制排水系统而言,由于任意一场降雨的合流污水污染物的浓度过程线随时间存在起伏,虽然受纳水体水质的变化并非同样敏感,但为评价

合流污水对受纳水体的污染强度,可用降雨径流事件平均浓度^[10](event mean concentration, EMC)来对一场降雨的合流污水的污染负荷做出总体评价.表 4 显示:① 4 类降雨强度下,合流污水 pH 值的 EMC 介于 7.13 ~ 7.54 间,偏碱性,符合《国家地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中 V 类水标准;② 重金属 Zn 和 Pb 的 EMC 浓度相对与 Cu、Cr、Cd 和 Ni 较高,但均低于 V 类水标准,与北京市的污染水平相当^[17],高于澳门的分流制排水系统^[28];③ COD、BOD₅、NH₄⁺-N和 TP 的 EMC 均超过 V 类水标准,以 COD 为例,EMC 变化范围为 225.0 ~ 544.1 mg•L⁻¹,与武汉汉阳区合流制排水系统平均 299.2 mg•L⁻¹^[27]和上海杨浦区合流制排水系统 314.1 ~ 614.0 mg•L⁻¹的测量结果相对接近^[31],也接近于国外其他城市排水系统合流污水污染平均水平^[7-9,21];④ COD、BOD₅、NH₄⁺-N和 TP 的 EMC 分别超过 V 类水标准 4.6 ~ 12.6、2.2 ~ 8.9、3.5 ~ 21.2 和 4.0 ~ 7.8 倍,平均分别为 9.3、5.6、11.7 和 6.1 倍.据上海市合流污水管理所统计资料,2000 ~ 2007

表 4 合流制排水系统降雨径流事件平均浓度
Table 4 Events mean concentration of rainfall-runoff in combined sewerage system

降雨日期	pH	COD /mg•L ⁻¹	BOD ₅ /mg•L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg•L ⁻¹	TP /mg•L ⁻¹	SS /mg•L ⁻¹	Cu /mg•L ⁻¹	Zn /mg•L ⁻¹	Cr /mg•L ⁻¹	Cd /μg•L ⁻¹	Pb /μg•L ⁻¹	Ni /μg•L ⁻¹
2007-07-09	7.13	225.0	59.7	35.8	2.98	334.9	0.01	0.22	0.05	0.40	4.45	30.54
2007-08-03	7.10	494.4	98.9	44.2	2.94	944.8	0.16	1.83	0.07	1.46	80.75	56.47
2007-08-05	7.54	382.7	31.5	12.4	1.98	176.4	0.04	0.62	0.04	0.69	35.13	37.29
2007-08-11	7.36	544.1	75.5	8.9	3.52	580.0	0.05	0.69	0.05	0.45	19.88	37.50
旱流污水	7.10	247.7	58.1	53.6	3.54	177.9	0.06	0.26	0.07	0.74	13.15	9.83
V 类地表水	6 ~ 9	40	10	2.0	0.4	—	1.0	2.0	0.1	10	100	—

年成都路排水系统直接排入苏州河的暴雨溢流污水量为 $100.3 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 这将对受纳水体水质造成了严重的冲击性污染; ⑤ SS 的 EMC 高达 $176.4 \sim 944.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 高峰值更大于 EMC 值(图 3). 由于溶解态的重金属在排水系统的输运过程中, 在颗粒态物质的吸附作用下会发生形态的转变, 从溶解态转化为颗粒态^[6], 因此较高的 SS 浓度有利于重金属赋存形态的转化, 这对溶解态重金属的削减有着促进作用.

2.5 降雨径流污染物间的相关性

研究表明地表和屋面径流中的各类污染物之间存在一定的相关关系^[15]. 例如, 澳门城市小流域地表径流中 TSS 与 TN、TP 间的决定系数都达到 $0.95^{[22]}$; 北京文教区路面、屋面和草坪等下垫面降雨径流的 SS 与 COD、TN 的决定系数超过 $0.86^{[18]}$,

同时文教区路面径流中 SS 与有机物、营养物质和阴离子间也有着一定的相关性^[19]. 与上述研究类似, 成都路合流制排水系统降雨径流中 SS 与 COD、 BOD_5 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 TP 之间均在 $p < 0.01$ 水平上具有一定的正相关性(表 5), 并且合流污水中颗粒态污染物的比例达 $45.11\% \sim 93.21\%$, 平均为 70.21% . 这种地表径流中颗粒态营养物质的较高赋存比例现象在其他城市也有出现^[19]. 由于各类型下垫面晴天累积的颗粒态污染物与排水管道的沉积物对合流污水污染具有较高贡献, Chebbo 等^[32] 在英国、比利时、德国和法国等国的研究显示下垫面和排水系统对 SS 的贡献率可达 $56\% \sim 94\%$, 因此利用滞留沉降、生物过滤和土壤渗透等措施控制合流制排水系统降雨径流污染时, 在削减 SS 的同时可有效去除有机物和营养物质.

表 5 各类污染物的相关性¹⁾
Table 5 Correlation coefficients between different pollutants

污染物	COD	BOD ₅	NH ₄ ⁺ -N	TP	SS
COD	1.000 *	0.518 *	0.106	0.555 *	0.736 *
BOD ₅	0.518 *	1.000 *	0.063	0.533 *	0.582 *
NH ₄ ⁺ -N	0.106	0.063	1.000 *	0.210	0.359 *
TP	0.555 *	0.533 *	0.210	1.000 *	0.644 *
SS	0.736 *	0.582 *	0.359 *	0.644 *	1.000 *

1) * 表示在 $p < 0.01$ 水平上显著

3 结论

(1)上海中心城区苏州河沿岸 CSS 的降雨径流过程线形态与降雨过程线相似, 但波动幅度低于降雨过程线, 并滞后于降雨过程线约 $15 \sim 25 \text{ min}$, 且间隔较短的降雨峰值或后期降雨峰值产生的径流可被平滑. 降雨径流的污染物浓度过程线峰值滞后于降雨峰值约为 $30 \sim 40 \text{ min}$. 小雨、中雨、大雨和暴雨的径流系数分别为 0.33 、 0.62 、 0.67 和 0.73 .

(2)CSS 降雨径流污染物基本存在 30/30 标准的初始冲刷效应, 污染物来源、污染物主要贡献源、降雨量和降雨强度是影响初始冲刷强度的重要因素.

(3)4 类降雨径流中 COD、SS、TP 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 变化范围分别为: $156.9 \sim 941.2$ 、 $115.2 \sim 1\,550.6$ 、 $1.26 \sim 5.70$ 和 $2.86 \sim 70.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 径流中不同污染物质来源和主要贡献源的差别, 使不同径流污染物浓度与旱流污水相比具有不同的相对差异.

(4)4 类强度降雨径流的 pH 值和重金属 Cu、Zn、Cr、Cd、Pb、Ni 的 EMC 均低于 V 类地表水标准,

COD、 BOD_5 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 TP 的 EMC 变化范围分别为 $225.0 \sim 544.1$ 、 $31.5 \sim 98.9$ 、 $8.9 \sim 44.2$ 和 $1.98 \sim 3.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均分别超过 V 类地表水标准 9.3 、 5.6 、 11.7 和 6.1 倍, 其中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 COD 为合流污水中最主要的 2 类污染物质.

(5)CSS 降雨径流中的 SS 与 COD、 BOD_5 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 TP, 在 $p < 0.01$ 水平上均具有一定的正相关性, 有机类和营养类污染物中平均 70.21% 为颗粒形态.

致谢: 降雨、泵站流量和泵站运行水位数据得到上海城市排水市中运营有限公司陈华高级工程师、上海市合流污水管理所袁述时高级工程师、张立工程师和江洪助理工程师的大力帮助, 谨致谢忱.

参考文献:

[1] 许世远. 上海城市自然地理图集[M]. 北京: 地图出版社, 2004.
[2] US EPA. Results of the national urban runoff program[R]. US EPA, Washington DC: 1983.
[3] Amir T, Ronald L. Pollution loads in urban runoff and sanitary

- wastewater[J]. *Sci Total Environ*, 2004, **327**: 175-184.
- [4] 杨柳, 马克明, 郭青海, 等. 城市化对水体非点源污染的影响[J]. *环境科学*, 2004, **25**(6): 32-39.
- [5] 李立青, 尹澄清, 何庆慈, 等. 城市降水径流的污染来源与排放特征研究进展[J]. *水科学进展*, 2006, **17**(2): 288-294.
- [6] 郭青海, 马克明, 杨柳. 城市非点源污染的主要来源及分类控制对策[J]. *环境科学*, 2006, **27**(11): 2170-2175.
- [7] Gromaire M C, Garnaud S, Gonzalez S, *et al.* Characterisation of urban runoff pollution in Paris[J]. *Water Sci Technol*, 1999, **39**(2): 1-8.
- [8] Lee J H, Bang K W. Characterization of urban stormwater runoff[J]. *Water Res*, 2000, **34**(6): 1773-1780.
- [9] Gilbert J K, Clausen J C. Stormwater runoff quality and quantity from asphalt paver, and crushed stone driveways in connecticut[J]. *Water Res*, 2006, **40**(4): 826-832.
- [10] Butcher J B. Buildup, washoff, and event mean concentration[J]. *J Am Water Assoc*, 2003, **39**(6): 1521-1528.
- [11] Geiger W. Flushing effects in combined sewer systems[A]. In: *Proceedings of the 4th International Conference Urban Drainage*[C]. Lausanne, Switzerland, 1987. 40-46.
- [12] Saget A, Chebbo G, Bertrand J. The first flush in sewer systems[J]. *Water Sci Technol*, 1996, **33**(9): 101-108.
- [13] Bertrand-Krajewski J L, Chebbo G, Saget A. Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon[J]. *Water Res*, 1998, **32**(8): 2341-2356.
- [14] Lee J H, Bang K W. First flush analysis of urban stormwater runoff[J]. *Sci Total Environ*, 2002, **293**: 163-175.
- [15] Gupta K, Saul A J. Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows[J]. *Water Res*, 1998, **3**: 1244-1252.
- [16] 夏青. 城市径流污染系统分析[J]. *环境科学学报*, 1982, **2**(4): 271-278.
- [17] 车武, 欧岚, 汪慧珍, 等. 北京城区雨水径流水质及其主要影响因素[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2002, **3**(1): 33-37.
- [18] 任玉芬, 王效科, 韩冰, 等. 城市不同下垫面的降雨径流污染[J]. *生态学报*, 2005, **25**(12): 3225-3230.
- [19] 董欣, 杜鹏飞, 李志一, 等. 城市降雨屋面、路面径流水文水质特征研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(3): 607-612.
- [20] 常静, 刘敏, 许世远, 等. 上海城市降雨径流污染时空分布与初始冲刷效应[J]. *地理研究*, 2006, **25**(6): 994-1002.
- [21] 赵剑强. 城市地表径流污染与控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [22] 黄金良, 杜鹏飞, 欧志丹, 等. 澳门城市路面地表径流特征分析[J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(4): 469-473.
- [23] 卓慕宁, 吴志峰, 王继增, 等. 珠海城区降雨径流污染特征初步研究[J]. *土壤学报*, 2003, **40**(5): 775-778.
- [24] 边博, 朱伟, 黄峰, 等. 镇江城市降雨径流营养盐污染特征研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(1): 19-25.
- [25] 李立青, 尹澄清, 何庆慈, 等. 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*, 2006, **16**(7): 1057-1061.
- [26] 李立青, 尹澄清, 孔玲莉, 等. 2次降雨间隔时间对城市地表径流污染负荷的影响[J]. *环境科学*, 2007, **28**(10): 2287-2293.
- [27] 何庆慈, 李立青, 孔玲莉, 等. 武汉市汉阳区的暴雨径流污染特征[J]. *中国给水排水*, 2005, **21**(2): 101-103.
- [28] 黄金良, 杜鹏飞, 欧志丹, 等. 澳门城市小流域地表径流污染特征分析[J]. *环境科学*, 2006, **27**(9): 1753-1759.
- [29] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [30] 黄锡荃. 水文学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [31] 李贺, 李田. 上海高密度居民区合流制系统雨天溢流水质研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(8): 1565-1569.
- [32] Cheebo G, Ashley R, Gromaire M C. The nature and pollutant role of solids at the water-sediment interface in combined sewer networks[J]. *Water Sci Technol*, 2003, **47**(4): 1-10.