

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

李立青^{1,2}, 尹澄清^{2*}

(1. 中国地质大学环境学院, 武汉 430074; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 2003~2006 年通过对武汉市汉阳城区不同尺度降雨径流、市政污水的监测, 结合环境地球化学方法, 研究雨、污合流制城区降雨径流污染的形成、迁移转化过程及污染来源。结果表明, 雨、污合流制城区地表径流汇入排水系统, 经排水系统传输, 污染程度显著增加。屋面径流中 TSS 和 COD 浓度(EMC)的平均值分别为 18.7 mg/L 和 37.0 mg/L, 路面径流中 TSS、COD 浓度(EMC)的平均值分别为 225.3 mg/L 和 176.5 mg/L, 而在集水区出口处径流中 TSS、COD 浓度(EMC)的平均值分别为 449.7 mg/L 和 359.9 mg/L; 污染物的组成也发生了明显的改变, 颗粒态 COD 增加了 18%, 有机污染增强。研究还发现, 城市地表、雨水口、生活污水管和合流管道沉积物中 P、Fe 含量具有明显分异特征, 可以利用沉积物中 P/Fe 识别集水区尺度降雨径流污染成因与来源。据此对集水区出口 2 次径流污染来源计算, 56% ± 26% 的悬浮物来自城市地表与雨水口, 44% ± 26% 的悬浮物源于生活污水的沉积物。生活污水中污染物对降雨径流污染的贡献是通过在合流管道中形成沉积发生的。雨、污合流管道在降雨径流污染形成过程中发挥了转化器和加重径流污染的作用。减少合流管道中沉积物的形成是削减径流污染负荷的途径之一。

关键词: 城市降雨径流污染; 雨污合流制; 污染来源; 悬浮物; P; Fe; 汉阳地区

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)02-0368-08

Transport and Sources of Runoff Pollution from Urban Area with Combined Sewer System

LI Li-qing¹, YIN Cheng-qing²

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Sampling and monitoring of runoff and sewage water in Wuhan urban area with combined sewer system were carried out during the period from 2003 to 2006, to study the transport and sources of runoff pollution at the catchment scale coupled with environmental geochemistry method. The results showed a change in quality between the runoff entering the sewer network and the combined storm water flow at the sewer's outlet. A significant increase was observed in the concentrations of total suspended solids (TSS), volatile suspended solids (VSS), COD, TN, and TP, and in the proportion of COD linked to particles. During the runoff production and transport, the concentrations of TSS and COD increased from 18.7 mg/L and 37.0 mg/L in roof runoff, to 225.3 mg/L and 176.5 mg/L in street runoff, and to 449.7 mg/L and 359.9 mg/L in combined storm water flow, respectively. The proportion of COD linked to particles was increased by 18%. In addition, the total phosphorus (P) and iron (Fe) contents in urban ground dust, storm drain sediment, sewage sewer sediment and combined sewer sediment were measured to identify the potential sources of suspended solids in the combined flow. The urban ground dust and storm drain sediment were rich in Fe, whereas the sewage sewer sediment was rich in P. The P/Fe ratios in these groups were significantly distinct and able to differentiate them. A calculation of the two storm events based on the P/Fe ratios showed that 56% ± 26% of suspended solids in combined flow came from urban ground and storm drain. The rest were originated from the sewage sewer sediments which deposited in combined sewer on the dry weather days and were eroded on the wet weather days. The combined sewer network not only acts as a transport system, but also constitutes a physicochemical reactor that degrades the quality of urban water. Reducing the in-sewer pollution stocks would effectively control urban runoff pollution.

Key words: urban runoff pollution; combined sewer system; pollution sources; suspended solids; P; Fe; Hanyang District

城市降雨径流污染过程是指降雨及其形成的地表径流对地表污染物的溶解、冲刷和搬运, 汇入排水系统, 在排水系统中传输, 最终排入受纳水体而形成的污染过程。这一过程涉及多介质、多时空尺度和多污染物的复杂过程。区域气候、降雨特征, 土地利用类型、强度, 不透水面积的比例, 排水体制以及城市规划管理等因素都对城市降雨径流污染的形成具有

重要的影响。美国环保局(USEPA)率先开展了城市降雨径流污染的调查研究^[1]。随后国外学者对此进行了广泛的研究和探讨。国内随着点源污染控制力

收稿日期: 2008-02-18; 修订日期: 2008-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(40801207)

作者简介: 李立青(1977~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为城市降雨径流污染控制, E-mail: liliqing@163.com

* 通讯联系人, E-mail: cqyin@163.com

度的加强,城市降雨径流污染的研究和控制也步入实施阶段.北京、武汉、上海、澳门等城市正在开展降雨径流污染的调查研究和控制工作^[2~8].由于城市地表功能和人类活动的多样性,决定了城市降雨径流污染过程的复杂性和污染来源的多样性.其中排水体制在城市径流污染过程中占有很重要的地位,特别是雨、污合流制城区降雨径流污染的严重性备受关注^[9~11],法国学者利用污染物质守恒原理对其形成过程和来源开展过研究^[12,13].而国内对这一问题的定量化研究鲜见报道.

本研究通过对城区地表径流和集水区排放口处径流的监测,分析了雨、污合流制城区降雨径流污染的形成和迁移转化过程.同时,从环境地球化学的角度,以集水区尺度颗粒物-降雨径流传输系统为主线,通过测定颗粒物中P、Fe和Al含量的分异,对城市降雨径流污染的形成和来源进行解析,从而探讨了雨、污合流制城区降雨径流污染负荷的形成过程和形成机制,为有效减少城市降雨径流污染负荷提供科学依据.

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

汉阳地区地处亚热带大陆季风性(湿润)气候区,雨量丰沛,多年平均降雨量1344 mm.每年4~9月是本区的主要雨期,占全年降水量的70%左右.

本研究选择在武汉市汉阳地区的十里铺集水区进行监测,见图1.十里铺集水区是墨水湖北岸汉阳主城区的一部分,具有一定代表性和适宜进行径流监测.十里铺集水区的面积是1.3 km²,土地利用以居民区为主,人口密度13200人·km⁻²,不透水面积的比例为85%.排水体制是雨、污合流制.在晴天时排水系统中排放的是市政污水,主要是居民生活污

水和一部分商业用水.在雨天时,排水系统不仅承担着排放市政污水的功能,而且承担着排放降雨径流的功能.

1.2 监测点布设

本次降雨径流污染的监测点分为2类,一类地表径流监测点,包括汉阳大道地表监测点和屋面监测点,主要监测地表径流污染的特点,其中屋面监测点3个,分别为不同的屋面材料:沥青、水泥和陶瓦;另一类是集水区径流排放口监测点,主要监测地表径流经排水管道传输后的污染特征.监测点分布位置见图1.

1.3 监测降雨特征

降雨观测点有2个,分别为武汉动物园测点和万家巷测点,见图1.2003~2006年共监测有效降雨16场.对十里铺集水区进行了12次降雨径流污染的全过程监测,对汉阳大道地表进行了6次降雨径流全过程监测,降雨特征见文献[4].2004-06-04和2004-06-18对3个屋面(陶瓦、沥青和混凝土)径流监测点采样分析,降雨量分别为87.0 mm和85.5 mm.

2006年为了研究集水区降雨径流污染成因和来源的问题,又对十里铺集水区进行了2次采样,主要监测和采集径流中悬浮物,2次降雨时间为2006-06-24和2006-07-09,降雨量分别为25.5 mm和80.0 mm,雨前晴天数分别为30 d和14 d.

1.4 样品采集与分析

1.4.1 样品采集

当发生降雨径流时,在十里铺集水区监测断面采集径流水样,降雨产流时即开始采样,在初期径流1 h内采样间隔是5 min,其后采样间隔根据径流情况增加为10 min或20 min.在采集水样的同时,测定流速和记录水位,计算流量.对于地表汇水单元汉阳大道和屋面的采样,从降雨产生径流开始每隔5 min或10 min取径流水样1个,直至径流水质趋于稳定,同时测定流量.

为了掌握集水区市政污水的水质、水量变化特点以及定量化市政污水的污染负荷,在2003年和2004年按季度对十里铺集水区的市政污水进行水质、水量的监测,共进行了8次采样监测.为了使监测具有代表性,每次监测时间为1 d,根据作息规律和生活污水的排放规律,白天12 h每2 h采样和测流1次,夜间每4 h采样和测流1次.

为了研究城市降雨径流污染的来源,2006年6~7月对十里铺集水区沉积物和降雨径流悬浮物进

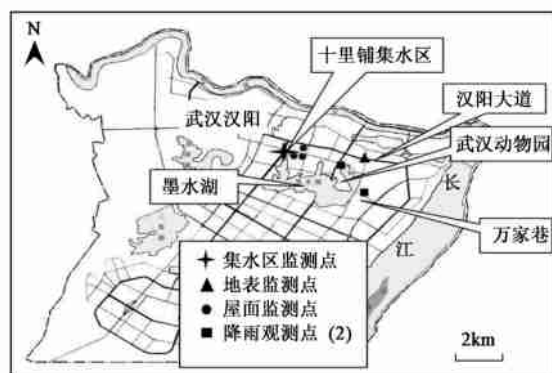


图1 研究区位置与监测点分布示意

Fig. 1 Location of the study site and the monitoring points

行采集. 分不同土地利用类型, 利用吸尘器共采集 9 个地表沉积物样; 对地表雨水口沉积物采样 13 个; 污水管道中沉积物样品 3 个, 雨、污合流管道中沉积物样品 6 个. 2006-06-24 和 2006-07-09 的降雨径流过程中, 在十里铺集水区径流排放口共收集悬浮物 16 个.

1.4.2 分析方法

城市降雨径流污染物组成复杂, 本研究主要分析的水质指标为 TSS、VSS (volatile suspended solids)、COD、TN、TP、DCOD (溶解性 COD)、DTN (溶解性 TN)、DTP (溶解性 TP). 其中 VSS 是 TSS 中在 450 °C 时可挥发部分, 表征悬浮物中有机污染物的含量. 水样 TSS、VSS、COD、TN 和 TP 原样直接测定, 过 0.45 μm 滤膜测定 DCOD、DTN 和 DTP. 水质分析测定均采用标准分析方法进行^[14], 其中 VSS 采用马弗炉 450 °C 烧失法.

2006-07-10 和 2006-08-03 这 2 次降雨径流事件中, 分别对汉阳大道路面和十里铺集水区采集的水样进行了颗粒物的粒径测定, 粒径测定采用激光粒度仪.

沉积物/悬浮物样品风干测定, 其中沉积物样品测定粒径 < 0.15 mm 部分 (100 目), 悬浮物全部过 100 目筛分析. 沉积物/悬浮物分析指标包括有机质含量 (volatile solids content, VSC)、全磷 (P)、Fe、Al. VSC 采用马弗炉 450 °C 烧失法, 全磷 (P)、Fe、Al 采用 HClO₄-HF 消解, 过 0.45 μm 滤膜, ICP-AES 测定.

1.5 数据处理

由于降雨特征、集水区特征和污染物本身性质的影响, 一次降雨径流污染过程水质、水量变化范围大. 为了表征一次降雨事件监测区径流污染程度, 采用污染物的流量加权平均浓度 (event mean concentration, EMC), 即总污染量与总径流量之比. 假如一次径流的持续时间为 t_r , 那么 EMC 可表达为:

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^{t_r} c_t q_t dt}{\int_0^{t_r} q_t dt} \cong \frac{\sum c_t q_t \Delta t}{\sum q_t \Delta t} \quad (1)$$

式中, EMC 为一次径流污染的平均浓度 (mg/L); M 为整个径流过程中污染物的量 (g); V 为径流总量 (m^3); t 为时间 (min); c_t 为 t 时刻污染物的浓度; q_t 为 t 时刻径流流量 (m^3/min); Δt 是采样间隔时间 (min), t_r 是指降雨径流持续时间 (min).

对十里铺集水区、汉阳大道地表监测区和屋面监测点的每次监测, 利用式 (1) 计算每一次径流中污

染物的流量加权平均浓度 (EMC), 即事件平均浓度.

2 结果与分析

2.1 城市降雨径流污染迁移转化过程

2.1.1 降雨径流污染物浓度变化特征

图 2 是不同监测尺度降雨径流中 TSS、COD、TN 和 TP 迁移过程中浓度 (EMC) 的变化特征. 降雨径流从屋面、地表一直到集水区的出口污染物的浓度都表现为不同程度的增加. 屋面降雨径流 TSS、COD、TN 和 TP 浓度 (EMC) 的平均值分别为 18.7、37.0、1.43 和 0.15 mg/L, 6 次路面降雨径流监测, TSS、COD、TN 和 TP 浓度 (EMC) 的平均值分别为 225.3、176.5、5.04 和 0.62 mg/L, 12 次集水区出口降雨径流 TSS、COD、TN 和 TP 浓度 (EMC) 的平均值分别为 449.7、359.9、20.6 和 3.11 mg/L; 8 次对集水区市政污水监测, TSS、COD、TN 和 TP 浓度 (EMC) 的平均值分别为 43.1、147.1、26.01 和 3.08 mg/L. 汉阳地区屋面径流污染程度最轻. 屋面径流和路面径流汇入排水系统, 经排水系统传输, 当径流在集水区出口排放时, 污染物浓度显著增加, TSS 和 COD 浓度是路面径流的 2 倍左右, TN 和 TP 浓度是路面径流的 5 倍左右, TN 和 TP 浓度增加幅度明显高于 TSS 和 COD. 降雨径流污染程度的增加不可能完全由于其与生活污水混合引起的, 而是在管道传输中有新的污染来源. 另外, 城市降雨径流污染物浓度的变化范围大, 不同次降雨径流水质的影响具有明显的差异性^[14].

2.1.2 径流中污染物组成与形态的变化特征

城市降雨径流污染在排水系统迁移、传输过程中, 不仅污染程度大幅度增加, 而且污染物组成也发生了明显的改变. 图 3 是对城市降雨径流污染迁移过程中污染物形态的比较. 城市降雨径流经排水系统传输后, 颗粒态 COD 增加了 18%, 而颗粒态 TN 和 TP 存在不同程度的降低, 分别降低了 11% 和 9%. 降雨径流颗粒态 COD 的增加与径流冲刷排水系统沉积物有关, 而溶解态 TN 和 TP 的增加主要是地表径流进入排水系统中与生活污水的混合引起的.

图 4 是对城市地表径流 (汉阳大道) 和集水区降雨径流过程悬浮物 (TSS) 中挥发性物质 (VSS) 变化过程的比较 (监测时间 2006-06-26). 地表径流和集水区径流 VSS 在降雨径流的冲刷过程中都呈下降趋势, 但是集水区降雨径流 VSS 的含量明显高于地表径流. 地表径流 VSS 变化范围为 25% ~ 33%, 平均为 27%, 集水区径流 VSS 变化范围为 27% ~ 44%, 平均为 39%. 因而城市降雨径流污染迁移过程中不

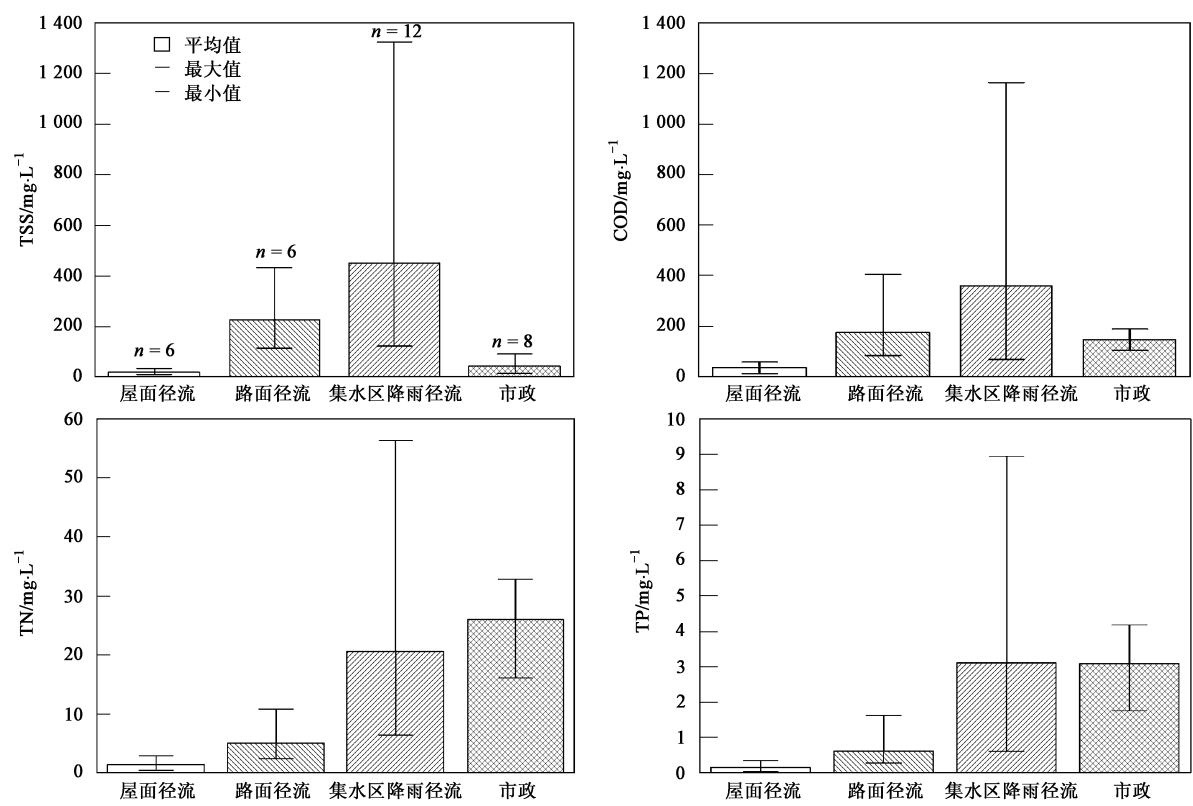


图 2 城市降雨径流迁移转化过程污染物浓度变化特征

Fig. 2 Range of event mean concentrations of TSS, COD, TN, and TP for roof runoff, street runoff, combined storm water flow, and the dry weather flow

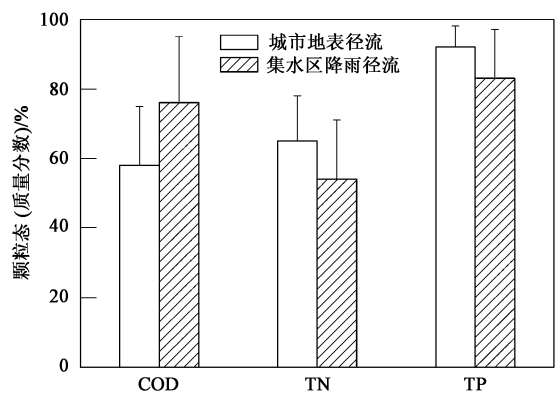


图 3 城市降雨径流污染迁移过程中污染物形态变化特征

Fig. 3 Proportion of pollutants linked to particles for street runoff and combined storm water flow

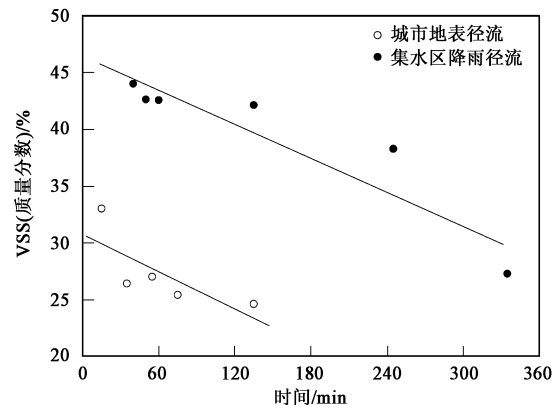


图 4 城市降雨径流污染过程悬浮物中 VSS 的含量变化

Fig. 4 Variation patterns of VSS for street runoff and combined storm water flow

仅 TSS 的含量增加,而且 TSS 中的可挥发物质(VSS)也增加,有机污染程度加强。

2.1.3 径流中颗粒物粒径特征

表 1 是对汉阳道路面径流和集水区径流颗粒物表面积平均粒径、体积平均粒径、 $d_{0.1}$ 、 $d_{0.5}$ 和 $d_{0.9}$ 的统计。降雨径流从城市地表经排水系统迁移过程

中颗粒物粒径波谱增宽,主要表现为 $d_{0.9}$ 从 164.2 μm 增加到 245.1 μm ,增加了 80.9 μm 。颗粒物粒径增大说明降雨径流在排水系统迁移过程中有新的颗粒物加入,这主要是因为地表径流在排水系统传输过程中,流量加大、流速增大,相应地径流的剪切力增加,可以携带更多、更大粒径的颗粒物。

表 1 路面径流和集水区径流中颗粒物粒径特征

Table 1 Grain sizes of suspended solids in street runoff and combined storm water flow

径流类型	表面积平均粒径/ μm	体积平均粒径/ μm	$d_{0.1}/\mu\text{m}$	$d_{0.5}/\mu\text{m}$	$d_{0.9}/\mu\text{m}$
路面径流($n=30$)	19.8 ± 8.9	78.5 ± 35.2	13.1 ± 5.9	53.8 ± 23.5	164.2 ± 70.8
集水区径流($n=30$)	29.2 ± 11.0	104.6 ± 29.2	16.7 ± 6.3	67.4 ± 22.8	245.1 ± 80.2

2.2 城市降雨径流污染来源识别

2.2.1 沉积物/悬浮物 VSC、P、Fe 和 Al 含量特征

通过分析城市地表、雨水口、排水管道中沉积物的 VSC、P、Fe 和 Al 含量特征,同降雨径流悬浮物的 VSC、P、Fe 和 Al 含量对比,进而识别城市降雨径流污染可能发生的过程及其污染来源.

图 5 是对不同来源沉积物和悬浮物 VSC、P、Fe 和 Al 含量的比较.不同来源的沉积物/悬浮物中 VSC 和 P 的含量存在明显的差异.其中来源于生活污水管道中沉积物 VSC 和 P 的含量最高,VSC 含量为 29.9%,P 含量为 4.30 mg/g ;其次是降雨径流悬

浮物,VSC 含量为 19.0%,P 含量为 2.66 mg/L ;城市地表和雨水口沉积物 VSC 和 P 含量水平相当,且最低.生活污水管中沉积物表现出富含有机物和磷的特征.而降雨径流中悬浮物的有机物和磷含量介于污水管与合流管、城市地表和雨水口之间.对于 Fe、Al 而言,地表沉积物 Fe 含量最高,为 46.97 mg/g ,降雨径流中 Fe 的含量同雨水口、污水管和合流管沉积物 Fe 含量相当;而沉积物/悬浮物 Al 的含量表现为降雨径流悬浮物最高,为 59.72 mg/g ,地表沉积物 Al 含量最低为 30.59 mg/g ,其它 3 种沉积物的 Al 含量相当.

根据沉积物/悬浮物中 VSC 和 P 含量的差异性,

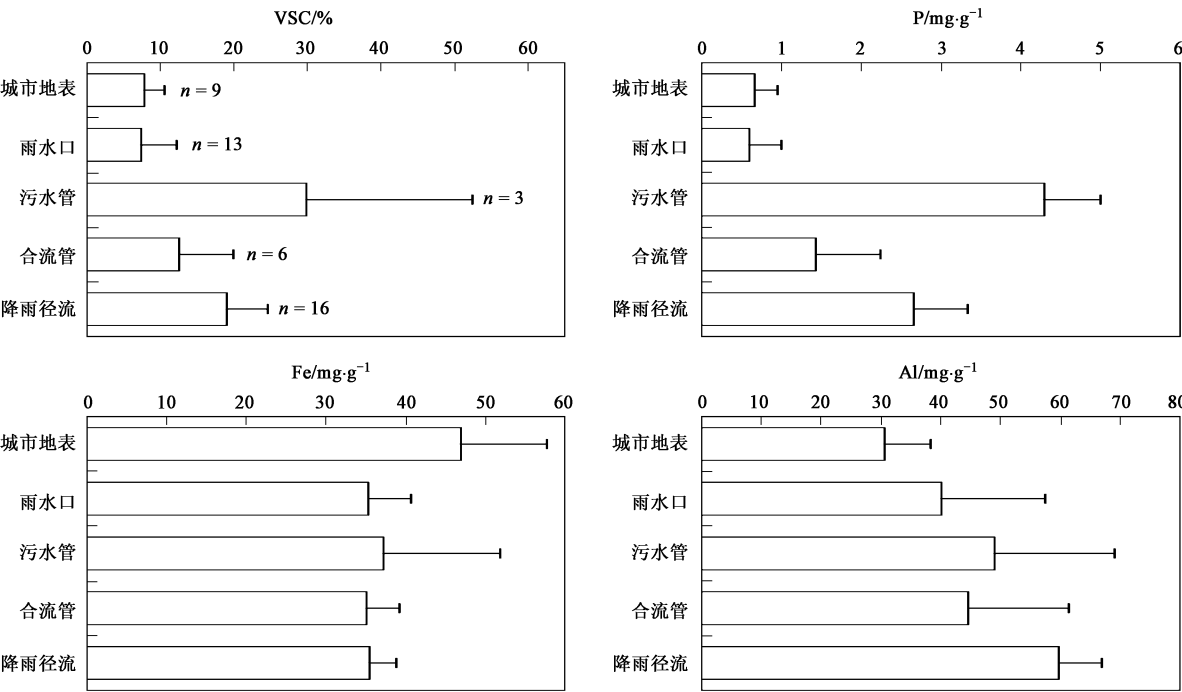


图 5 不同类型沉积物/悬浮物中 VSC、P、Fe 和 Al 的含量特征

Fig. 5 Contents of VSC, P, Fe and Al in different types of sediments

城市降雨径流中悬浮物的来源是上述其它 4 种沉积物的混合.为了减少由于降雨径流对颗粒物冲刷和搬运的分选性而引起沉积物/悬浮物 VSC、P、Fe 和 Al 含量的差异,利用 P/Fe 和 P/Al 进一步识别降雨径流污染物的来源.图 6 是城市地表、雨水口、污水管道、合流管道沉积物以及降雨径流悬浮物中 P/Fe 和 P/Al 的变化范围.5 种不同类型的沉积物和悬浮

物中 P/Fe 和 P/Al 存在明显差异.利用 P/Fe 和 P/Al 可以明显地表征和区分不同类型的沉积物.城市地表沉积物 P/Fe 的变化范围为 0.006~0.026.雨水口中沉积物 P/Fe 更多地继承了城市地表沉积物的 P/Fe 特征,同城市地表沉积物 P/Fe 具有重叠性,P/Fe 的变化范围为 0.009~0.038.源于生活污水管道沉积物的 P/Fe 明显高于城市地表和雨水口沉积物的

P/Fe, 变化范围为 0.08~ 0.21. 合流管道沉积物和降雨径流悬浮物中 P/Fe 高于城市地表和雨水口沉积物的 P/Fe, 低于生活污水管道沉积物的 P/Fe. 合流管道沉积物中 P/Fe 的变化范围为 0.015~ 0.074. 降雨径流悬浮物 P/Fe 的变化范围为 0.054~ 0.12, 同合流管道沉积物 P/Fe 重叠程度最高. 沉积物和悬浮物中 P/Al 与 P/Fe 的特征相似(图 6). 根据沉积物和悬浮物中 P/Fe 和 P/Al 的特征可以说明, 合流管道中沉积物的来源是城市地表、雨水口和生活污水管道中的沉积物, 降雨径流悬浮物不可能完全来自城市地表和雨水口, 而是城市地表、雨水口和合流管道沉积物的混合, 根据 P/Fe 和 P/Al 可以定量评价不同类型沉积物对降雨径流悬浮物的贡献.

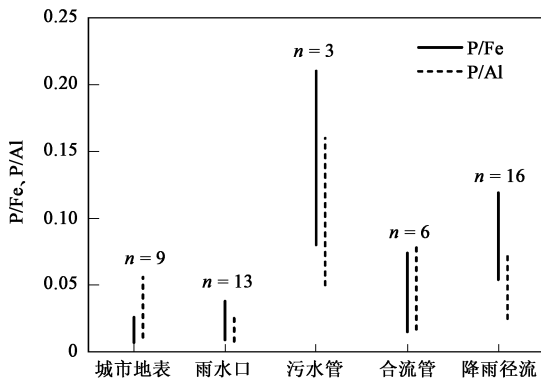


图 6 不同类型沉积物 悬浮物 P/Fe 的变化范围

Fig. 6 Ranges of the P/Fe ratios in different types of sediments

2.2.2 城市降雨径流污染来源解析

沉积物/悬浮物 P/Fe、P/Al 不仅可以区分不同来源的沉积物, 而且可以表征沉积物/悬浮物之间的相互关系. 利用 P/Fe、P/Al 可以建立识别城市降雨径流污染来源的模型. 图 7 是城市降雨径流污染来源的 P/2(Fe+ Al) 识别模型. 当降雨径流悬浮物中 P/2(Fe+ Al) 增加时, 污染来源于城市地表与雨水口沉积物比例在减少. 根据 2006-06-24 和 2006-07-09 这 2 次降雨径流悬浮物中 P/2(Fe+ Al) 平均值, 计算了降雨径流污染的来源. 降雨径流中 56% ± 26% 的悬浮物来自城市地表与雨水口的沉积物, 44% ± 26% 的悬浮物源于生活污水的沉积物. 而生活污水中污染物对降雨径流的贡献是通过在合流管道中形成沉积, 在雨天时受降雨径流侵蚀、携带形成. 可见合流制城区生活污水在合流管道的沉积与城市地表和雨水口沉积物对降雨径流污染贡献相当. 因而, 雨、污合流制管道在晴天累积的沉积物在降雨径流污染形成过程中具有很重要的作用.

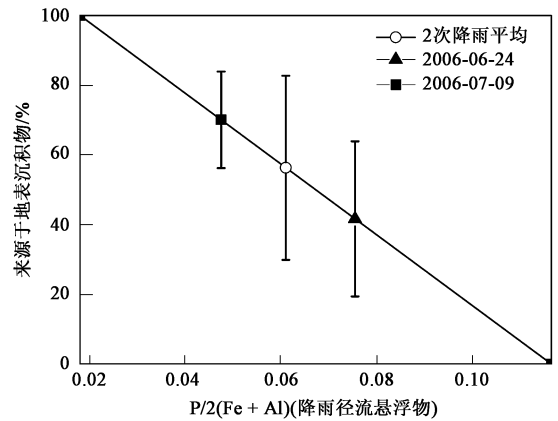


图 7 城市降雨径流污染来源 P/2(Fe+ Al) 识别模型

Fig. 7 Model for determining the contributions of different sources to the suspended solids in combined storm water flow

城市降雨径流污染的不同来源是相对变化的. 对 2006-06-24 和 2006-07-09 降雨径流污染来源分别解析, 见图 7. 2006-06-24 降雨径流污染来源于生活污水沉积物的比例高于 2006-07-09. 这样的差异可以用 2 次降雨径流悬浮物中 P/Fe 的变化特征进一步说明(图 8). 2006-06-24 降雨径流悬浮物的 P/Fe 明显高于 2006-07-09, 表明 2006-06-24 径流悬浮物相对含 P 量高于 2006-07-09, 说明前一场降雨径流污染来源于生活污水沉积物的比例高于后一场降雨. 降雨径流污染不同来源的相对变化与雨前晴天污染物累积期有关. 2006-06-24 日降雨前晴天累积数为 30 d, 而 2006-07-09 降雨前的晴天累积天数为 14 d. 晴天累积天数越长, 生活污水中污染物在合流管道中的沉积作用越显著. 因此, 雨前干燥期越长, 降雨径流污染来源于生活污水沉积物的比例越高.

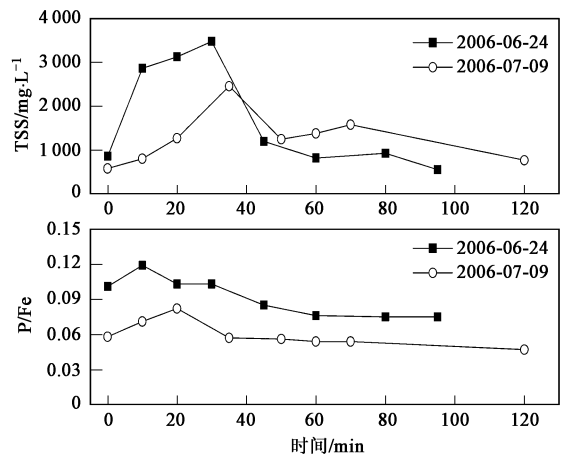


图 8 集水区降雨径流污染过程中 TSS 与 P/Fe 的变化特征

Fig. 8 Variation patterns of TSS and the P/Fe ratio measured

at catchment outlet

3 讨论

3.1 城市降雨径流的污染程度

城市降雨径流污染的形成过程包括污染物累积过程和污染物冲刷过程, 是一个涉及多介质、多时空尺度和多污染物的复杂过程. 城市不透水地表, 包括屋面、道路、停车场、庭院等, 是城市降雨径流污染的主要来源之一. 由于不透水地表的功能和人为活动不同, 不同城市或同一城市不同类型的地表径流污染程度不同. 表 2 是对汉阳地区屋面径流和路面径流污染特征同其他城市监测结果的比较^[2, 13, 15]. 汉阳地区屋面径流水质相对较好. 同北京屋面径流监测结果比较, 汉阳地区屋面径流中污染物 TSS、COD、TN、TP 明显低于北京屋面初期径流中对应污染物浓度. 这一特点反映了汉阳地区湿润气候条件下大气干沉降小, 建筑屋顶污染物累积程度低. 另一方面汉阳地区的降雨量和降雨次数明显高于北京, 降雨的频繁冲刷, 屋顶污染物累积周期短也是其径流水质相对较好的主要原因之一. 汉阳地区路面径流污染程度低于北京市, 同上海市相当. 汉阳地区 (1 344 mm) 与上海市 (1 200 mm) 年降雨量相当, 高于北京市. 高的降雨量意味着雨前晴天累积程度低, 同时稀释作用强, 因而径流水质相对较好. 但是高降雨量意味着高的污染负荷. 同巴黎市区高密度居住区路面径流水质监测结果相比, 汉阳地区、北京市、上海市地表径流污染物浓度高出 1 倍以上, 反映了

我国城市地表径流污染程度的严重性.

表 2 汉阳地区屋面和路面径流污染特征
同其他城市比较

Table 2 Comparison of roof and street runoff pollution characteristics between Hanyang District and other cities						
径流类型	城市	监测降雨次数	水质指标 mg·L ⁻¹			
			TSS	COD	TN	TP
屋面径流	汉阳 ¹⁾	2	18.7	37.0	1.43	0.15
	北京市 ²⁾	1	—	457	12.2	0.43
	巴黎	31	17	27	—	—
路面径流	汉阳	6	225.3	176.5	5.04	0.62
	北京市 ²⁾	5	826~4 866	332~2 480	7.9~16.5	1.9
	上海	21	251	336	7.74	0.57
	巴黎	31	97	135	—	—

1) 汉阳屋面径流是 2 次降雨 3 个监测点的平均值; 2) 北京市屋面与路面径流的污染特征是初期径流的监测结果

将汉阳地区的集水区尺度研究结果同上海、澳门、巴黎和韩国大田进行比较^[7, 8, 10, 13], 见表 3. 汉阳地区降雨径流污染程度低于上海的监测结果, 反映了集水区人口密度对径流污染的影响. 人口密度高, 人为活动频繁使得地表污染物累积数量增加; 同时人口密度高意味着生活污水排放量大, 加大了合流管道中沉积物的数量, 进而增加了降雨径流污染程度. 同韩国大田相比, 人口密度基本相同, 降雨径流污染程度相当. 同巴黎相比, 汉阳和上海降雨径流污染程度远高于巴黎市, 对于正处于快速城市化的中国应加强对其的重视.

表 3 不同城市集水区降雨径流污染特征比较

Table 3 Comparison of urban runoff pollution characteristics at catchment scale between Hanyang District and other cities

城市	集水区基本特征				监测降雨次数	水质指标 mg·L ⁻¹			
	面积 km ²	人口/人·km ⁻²	土地利用	排水体制		TSS	COD	TN	TP
汉阳	130	132	居民区	合流制	12	449.7	359.9	20.6	3.11
上海	144	370	居民区	合流制	8	684.0	614.0	29.8	3.0
巴黎	42	295	居民区	合流制	31	221	331	—	—
韩国大田	136	120	居民区	合流制	5	536.1	467.7	16.5	13.5
澳门	13.65	—	商住混合区	分流制	5	309.4	198.2	8.73	1.69

汉阳地区屋面径流和路面径流经雨、污合流管道传输, 在集水区出口径流的污染程度加重. 上海和巴黎的监测结果同样反映了地表径流经排水系统传输, 排放时污染物浓度升高, 说明雨、污合流制排水系统在城市降雨径流污染形成过程中发挥着重要的作用. 这一点可以通过对比汉阳地区和上海市同澳门分流制集水区的监测结果得到佐证.

3.2 城市降雨径流污染的形成过程

城市降雨径流冲刷城市地表沉积物, 经雨水口, 进入排水管道, 最终排入受纳水体. 降雨径流在经过

雨水口和排水管道中, 同时对雨水口和排水管道形成冲刷. 当雨水口和排水管道中有污染物累积时, 降雨径流便对其形成冲刷、搬运. 因此城市降雨径流污染的形成过程复杂, 来源多样. 对于雨、污合流制城区降雨径流污染的最终来源主要是城市地表累积的各种污染物和生活污水中的悬浮物, 而生活污水中悬浮物是通过在合流管道中发生沉积而形成. 因而这两类污染物在组成上具有明显的差异, 地表沉积物有一部分是来源于裸露地表的表土和大气的干沉降, 具有粘土的组成特征, 而生物污水沉积物主要来

源于日常生活产生的污染物。

本研究以集水区尺度颗粒物降雨径流传输系统为主线, 通过在城市地表、雨水口、生活污水管道和合流管道收集沉积物进行分析, 并同降雨径流中悬浮物进行比较, 可以更清楚地理解污染物在整个城市地表环境中的分配机制和迁移转化过程。研究发现地表沉积物 Fe 的含量高于生活污水沉积物, 具有富 Fe 的特征, 而生活污水沉积物中 P 的含量和有机质的含量高于地表沉积物, 具有富 P 的特征(图 6), 从而可以利用 P 与 Fe 的比值很好地区分这两类沉积物(图 7)。另外 P 和 Fe 都是颗粒结合态元素, 具有保守性, 因而为颗粒物(污染物)示踪提供了保证。同时利用 P/Fe 可以消除降雨径流对于颗粒物冲刷的分选效应。因此利用 P/Fe 可以成功识别降雨径流污染来源。生活污水中污染物对降雨径流污染的贡献是通过在合流管道中形成沉积、被侵蚀发生的。雨、污合流管道在降雨径流污染形成过程中发挥了转化器的作用。

雨、污合流管道对降雨径流的污染作用, 一方面表现为径流中污染物浓度的升高, 这也是雨、污合流制城区降雨径流污染严重的主要原因。另一方面在径流污染组成也发生了明显的改变, 颗粒态污染物的比例增加, 而且有机污染严重。因而减少雨、污合流管道中沉积物的形成, 对于削减合流制城区降雨径流污染负荷具有重要的意义。

4 结论

(1) 雨、污合流制城区降雨径流在形成、迁移和传输过程中, 污染程度显著增加, 颗粒态 COD 的比例升高, 有机污染增强。

(2) 城市地表、雨水口、生活污水管和合流管道沉积物中 P、Fe 含量具有明显的分异性, 城市地表、雨水口沉积物表现为富 Fe 的特征, 而污水管沉积物具有富 P 的特征, 利用 P/Fe 可以识别集水区尺度降雨径流污染来源。

(3) 根据 2 场降雨的计算结果, 降雨径流中 56% $\pm$ 26% 的悬浮物来自城市地表与雨水口的沉积物, 44% $\pm$ 26% 的悬浮物源于生活污水的沉积物, 生活污水中污染物通过在合流管道中沉积进而被侵蚀形成降雨径流污染物。

致谢: 感谢中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室开放基金课题项目(2008-002)和中国地质大学(武汉)2008 年“优秀青年教师资助计划”提供的研究经费资助。

参考文献:

- [1] US EPA. Results of the national urban runoff program. Final Report (Vol. 1) [R]. Washington DC: US EPA Water Planning Division, 1983.
- [2] 车武, 刘燕, 李俊琦. 北京城区面源污染特征及其控制对策[J]. 北京建筑工程学院学报, 2001, 18(4): 5-9.
- [3] 李立青, 尹澄清, 何庆慈, 等. 汉阳城市集水区尺度径流污染过程与初期冲刷特征[J]. 环境科学学报, 2006, 26(7): 1057-1061.
- [4] 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.
- [5] 单保庆, 陈庆锋, 尹澄清. 塘-湿地组合系统对城市旅游区降雨径流污染的在线截控作用研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(7): 1068-107.
- [6] 赵建伟, 单保庆, 尹澄清. 城市旅游区降雨径流污染特征——以武汉动物园为例[J]. 环境科学学报, 2006, 26(7): 1062-1067.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Suarez 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(3): 201-219.
- [10] Kim G H, Yur J H, Kim J K. Diffuse pollution loading from urban stormwater runoff in Daejeon City, Korea [J]. Journal of Environmental Management, 2007, 85(1): 9-16.
- [11] Kafi M, Gasperi J, Moilleron R, et al. Spatial variability of the characteristics of combined wet weather pollutant loads in Paris[J]. Water Research, 2008, 42(3): 539-549.
- [12] Chebbo G, Gromaire M C, Ahlyerre M, et al. Production and transport of urban wet weather pollution in combined sewer systems: the “Marais” experimental urban catchment in Paris [J]. Urban Water, 2001, 3: 3-15.
- [13] Gromaire M C, Gamaud S, Saad M, et al. Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers[J]. Water Research, 2001, 35(2): 521-533.
- [14] 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, 2002.
- [15] 林莉峰, 李田, 李贺. 上海市城区非渗透性地面径流的污染特性研究[J]. 环境科学, 2007, 28(7): 1430-1434.