

基于源区监测的城市地表径流污染空间分异性研究

李立青^{1,2}, 朱仁肖^{1,2}, 郭树刚^{1,2}, 尹澄清³

(1. 中国地质大学环境学院, 武汉 430074; 2. 中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室, 武汉 430074; 3. 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:通过对汉阳城区 14 个地表源区 4 次降雨径流过程水样的采集与分析, 研究城市地表径流污染空间分异性及其影响因素, 以期对地表径流污染的源区控制提供科学依据。结果表明, 城市地表径流颗粒态 COD、TN 和 TP 分别占 $58\% \pm 17\%$ 、 $65\% \pm 13\%$ 和 $92\% \pm 6\%$, 溶解态 TN 中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 DON 相当。不透水地表功能、交通流量、土地利用、人口密度以及卫生管理水平是影响城市地表径流水质空间分异的主要因素。土地利用对径流污染程度的影响是旧城居民区 > 一般城区居民区/饮食区 > 交通商业区 > 新建区 > 城市绿地, 人口密度高和管理差的旧城区径流污染最重; 道路地表径流污染程度与交通流量呈正相关, 交通流量越高地表径流污染越重, 1 级交通干道 > 2 级干道 > 支路。加强地表卫生的管理, 并对地表径流污染产生的关键源区进行控制是减轻城市地表径流对水环境负面影响的有效途径。

关键词:空间分异; 城市地表径流; 水质; 源区监测; 聚类分析

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)12-2896-09

Research on Spatial Differentiation of Urban Stormwater Runoff Quality by Source Area Monitoring

LI Li-qing^{1,2}, ZHU Ren-xiao^{1,2}, GUO Shu-gang^{1,2}, YIN Cheng-qing³

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Runoff samples were collected from 14 source areas in Hanyang district during four rain events in an attempt to investigate the spatial differentiation and influencing factors of urban stormwater runoff quality. The outcomes are expected to offer practical guidance in sources control of urban runoff pollution. The results revealed that particle-bound proportion of chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) in stormwater runoff were $58\% \pm 17\%$, $65\% \pm 13\%$ and $92\% \pm 6\%$, respectively. The fractions of ammonia, nitrate and dissolved organic nitrogen were homogeneous in dissolved nitrogen composition. Urban surface function, traffic volume, land use, population density, and street sweeping practice are the main factors determining spatial differentiation of urban surface runoff quality. The highest magnitude of urban stormwater runoff pollution was expected in the old urban residential area, followed by general residential with restaurants, commercial and transport area, new developments and green land. In addition, the magnitude of road stormwater runoff pollution is positively correlated to traffic volume, in the following order: the first trunk road > the second trunk road > minor road. Street sweeping and critical source areas controls should be implemented to mitigate the adverse effects of urban stormwater runoff on receive waters.

Key words: spatial differentiation; urban runoff; water quality; source area monitoring; cluster analysis

城市化进程中大量不透水地表的出现, 不仅在量上改变了区域地表径流, 而且在质的方面也对其产生深刻的影响。人类活动在地表空间表现的多样性、复杂性和随机性, 再加上地表径流污染过程的尺度效应, 对其监测研究的尺度不同, 所得的结论不同。集水区开展监测研究主要反映地表径流污染负荷排放特征及其对受纳水体的影响^[1~6]。由于地表径流在空间流动和进入排水管道传输过程中, 受排水系统影响污染物会发生迁移转化^[7,8]。因而利用集水区监测结果反映径流源区水质过程具有一定的局限性。而对于地表径流污染源区控制, 需要开展小尺度的源区监测研究, 鉴别地表径流污染产生的关

键源区及其水质特征, 进而采取具有针对性的控制与管理措施, 是实现城市地表径流污染有效控制的前提。我国已经陆续对城市不透水地表径流污染做了大量的监测研究, 在降雨特征、地表材料和雨 E 燥期对地表径流水质的影响方面取得了很多成果^[9~16]。但多数是针对不透水地表径流污染排放规律及污染特征方面的研究。从不透水地表功能、土地

收稿日期: 2010-01-05; 修订日期: 2010-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40801207); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07315-001, 2008ZX07209-003)

作者简介: 李立青 (1977 ~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为城市地表径流污染控制, E-mail: li-liqing@163.com

利用、交通流量等方面监测研究城市地表径流污染空间分异性还鲜见报道.

本研究通过对武汉市汉阳城区 14 个源区地表径流水质、水量的监测,分析不透水地表功能、周围土地利用、交通流量以及地表卫生管理状况对径流水质的影响,识别造成径流污染的主要原因和关键环节,以期为城市地表径流污染的源区控制与管理提供科学依据.

1 研究区概况与研究方法

1.1 监测源区的基本特征

本次对地表径流污染的监测研究主要集中在武汉市汉阳地区墨水湖以北 10 km² 的主城区,根据地表功能、交通流量、土地利用共选取了 14 个地表径流监测源区,其中 3 个屋面,10 个路面,1 个草坪(见表 1).各监测源区汇水面积的变化范围在 60~1 000 m².

表 1 汉阳地区 14 个地表径流监测源区的基本特征

Table 1 Characteristics of 14 source areas for monitoring urban stormwater runoff

编号	测点位置	周围土地利用/功能
1	五里墩陶瓦屋面	建筑屋面
2	五里墩沥青屋面	建筑屋面
3	七里庙水泥屋面	建筑屋面
4	江汉大学草地	城市绿地
5	五琴路	交通区
6	钟家村路面	商业区
7	马仓湖路 2 号	居民区
8	墨水湖北路	交通区
9	菜市场路面	旧城居民区
10	琴台路	交通区
11	桃花岛	新建居民区
12	汉阳大道	交通商业区
13	马仓湖路 1 号	居民饮食区
14	万家巷路	旧城居民区

1.2 径流水样采集与分析

在 2004 年 6 月 4 日(87.0 mm)、2004 年 6 月 18 日(85.5 mm)、2005 年 4 月 8 日(18.8 mm)、2005 年 6 月 26 日(78.0 mm)对上述 14 个源区进行径流污染监测,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.对于不易测流操作的点,根据自动雨量计对降雨过程监测的结果,采用模型计算流量过程^[17].

城市地表径流污染物组成复杂,本研究主要分析的水质指标为 TSS、COD、TN、TP、TDS、DCOD(溶解性 COD)、DTN(溶解性 TN)、DTP(溶解性 TP)、TDS、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N和PO₄³⁻-P. TSS、COD、TN、TP 和 TDS 原样直接测定,过 0.45 μm 滤膜测定 DCOD、

DTN、DTP、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N和PO₄³⁻-P. 水质分析测定均采用标准分析方法进行^[18].

1.3 数据处理

研究的目的是不同监测源区径流水质空间差异性,并分析影响城市地表径流水质的主要因素.因此,首先计算每个监测源区次降雨径流事件污染物的流量加权平均浓度,然后再对 4 次降雨径流污染物的流量加权平均浓度取平均值,本质上相当于 4 次径流污染负荷的平均值,作为最终评价径流污染程度的指标.

2 结果与分析

2.1 城市地表径流水质特征

2.1.1 城市地表径流水质变化过程

汉阳城区屋面和路面两类不透水地表径流污染排放过程的主要特征是污染物浓度在降雨径流的初期相对较高,中后期污染物的浓度快速下降并趋于稳定.降雨径流初期溶解冲刷作用占主导地位,从而污染物的浓度相对较高,径流中后期,地表污染物持续减少,稀释作用逐渐占主导地位,从而浓度降低.径流中污染物的浓度和达到稳定浓度的时间主要取决于不透水地表污染物的累积程度和降雨特征.

图 1 是 2005 年 4 月 8 日部分典型屋面径流中 TSS、COD、TN 和 TP 浓度与降雨历时的关系.初期径流中 TSS 和 COD 浓度的变化范围在 200~300 mg·L⁻¹,在降雨的后期一般可降到 50 mg·L⁻¹左右.沥青和水泥 2 种屋面材料的水质变化过程基本相同.

图 2 是 2005 年 4 月 8 日部分路面径流中 TSS、COD、TN 和 TP 浓度随降雨历时的变化过程.不同路面初期径流中 TSS、COD、TN 和 TP 都可达到很高的浓度,同屋面相比由于地表污染物累积数量高于屋面,所以径流水质下降没有屋面快,而且污染物达到相对稳定的浓度也要明显高于屋面径流.另外不同路面之间初期径流水质具有明显的差异.

2.1.2 地表径流水质相关性分析

表 2 是对汉阳大道地表径流 TSS、COD、TN、TP、DCOD、DTN、DTP、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P和 TDS 相互之间相关性的汇总.城市地表径流除了 TDP 和 PO₄³⁻-P以外,其他指标之间基本都存在显著的正相关.同 TSS 相关性程度排序为 COD、TP、NH₄⁺-N、DCOD、TN、DTN、TDS、NO₃⁻-N、PO₄³⁻-P 和 TDP.同 TDS 相关性程度由高到低排序为 NO₃⁻-N、DCOD、DTN、NH₄⁺-N、TN、COD、TP、TSS、PO₄³⁻-P 和 TDP.

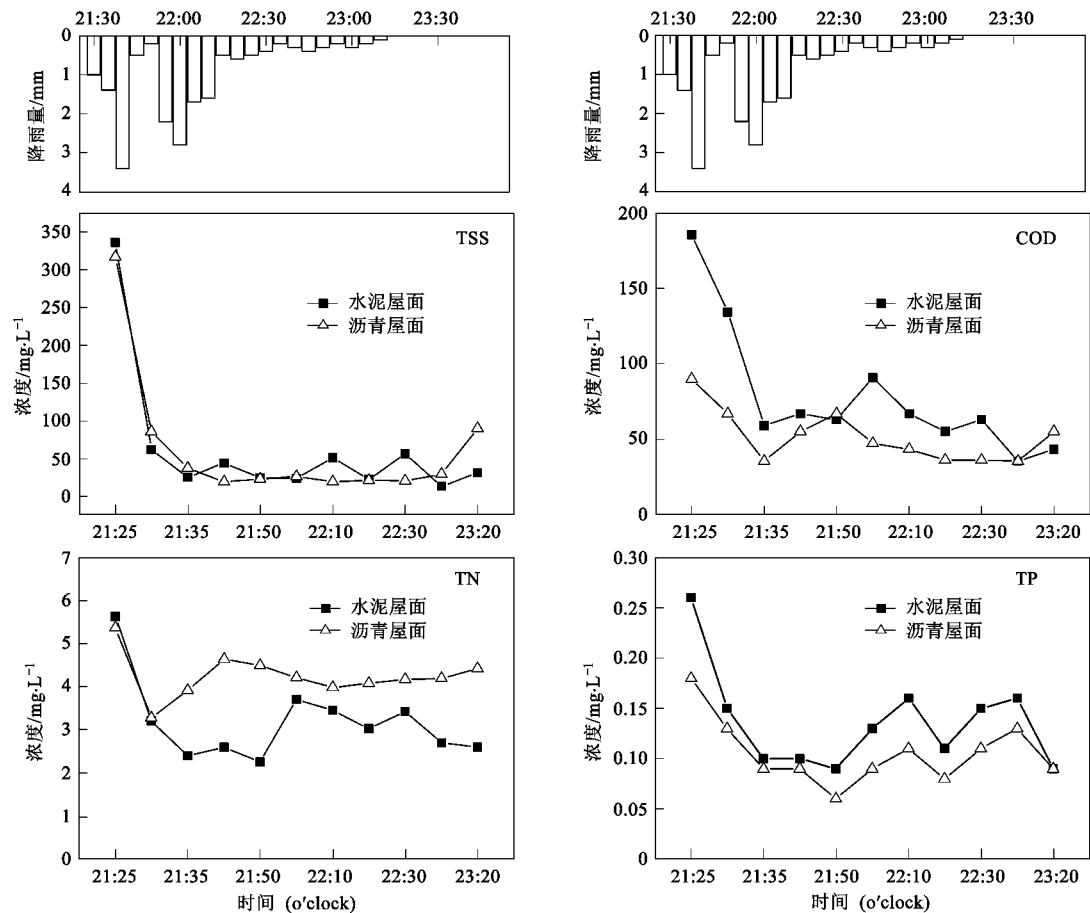


图 1 屋面径流中 TSS、COD、TN 和 TP 浓度随降雨历时的变化

Fig.1 Temporal variation of TSS,COD,TN and TP in runoff from different types of roofs

表 2 汉阳大道地表径流水质指标之间的相关性¹⁾

	TSS	COD	TN	TP	DCOD	TDN	TDP	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	PO ₄ ³⁻ -P
TSS	1.00									
COD	0.82**	1.00								
TN	0.76**	0.94**	1.00							
TP	0.82**	0.86**	0.85**	1.00						
DCOD	0.59**	0.84**	0.85**	0.69**	1.00					
TDN	0.53**	0.76**	0.84**	0.62**	0.82**	1.00				
TDP	0.26**	0.18	0.18	0.13	0.17	0.28**	1.00			
NO ₃ ⁻ -N	0.44**	0.70**	0.77**	0.49**	0.79**	0.94**	0.12	1.00		
NH ₄ ⁺ -N	0.81**	0.88**	0.88**	0.82**	0.84**	0.81**	0.41**	0.8**	1.00	
PO ₄ ³⁻ -P	0.36**	0.30**	0.33**	0.30**	0.22*	0.23*	0.19	0.15	0.48*	1.00
TDS	0.45**	0.74**	0.78**	0.46**	0.89**	0.89**	0.21*	0.92**	0.83**	0.25*

1) ** 表示在 $\alpha = 0.01$ 水平上显著, * 表示在 $\alpha = 0.05$ 水平上显著

2.1.3 城市地表径流污染物形态特征

图 3 是以汉阳大道为代表的城市地表径流污染形态组成.地表径流中 COD、TN 和 TP 主要以颗粒态的形式存在,颗粒态 COD、TN 和 TP 分别为 58%、65% 和 92%,其中颗粒态 TP 占绝对优势.而 35% 的

TN 是以溶解态的形式存在,溶解态 TN 的组成见图 4,DON、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的组成相当,在 10% 左右.另外由图 4 可以看出,汉阳城市地表径流中有机氮占总氮的 75%,是总氮的主要组成. Taylor 等^[19]对澳大利亚城市地表径流中氮素组成的研究表明,

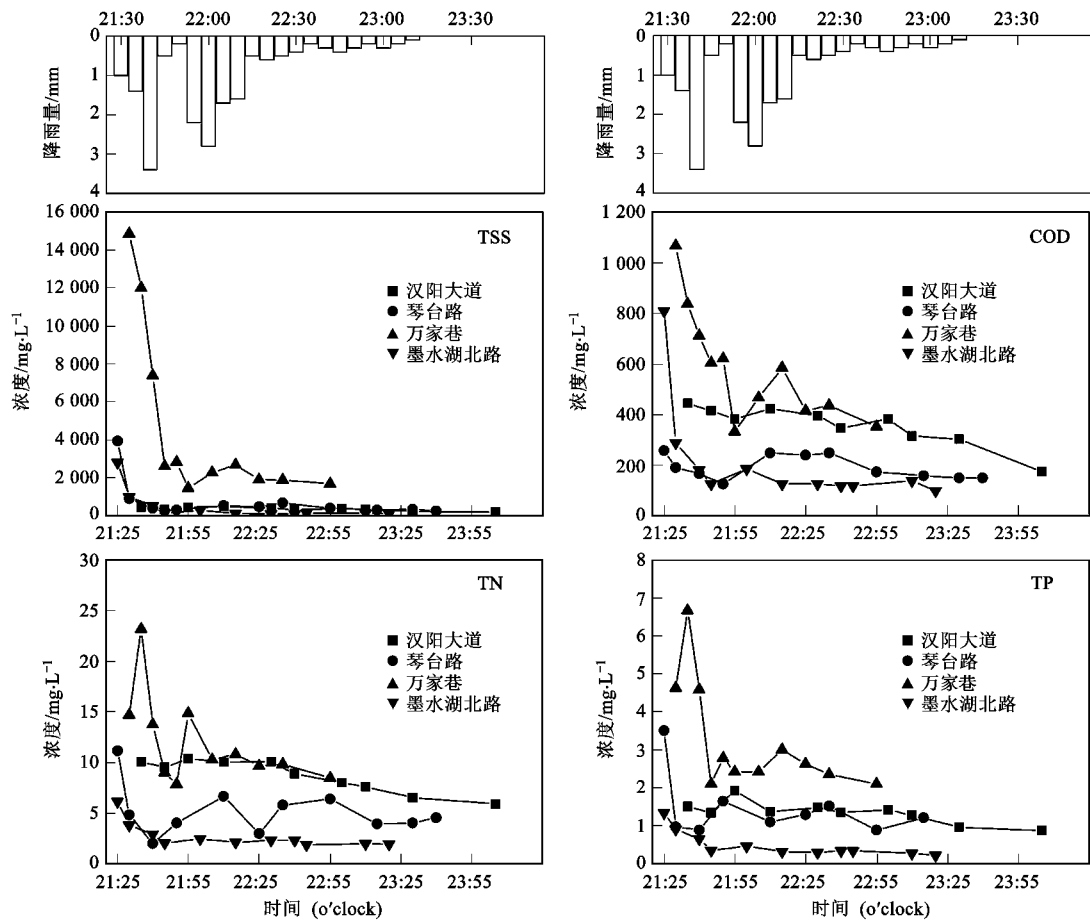


图2 路面径流中 TSS、COD、TN 和 TP 浓度随降雨历时的变化

Fig.2 Temporal variation of TSS,COD,TN and TP in runoff from four roads in different functional areas/land uses

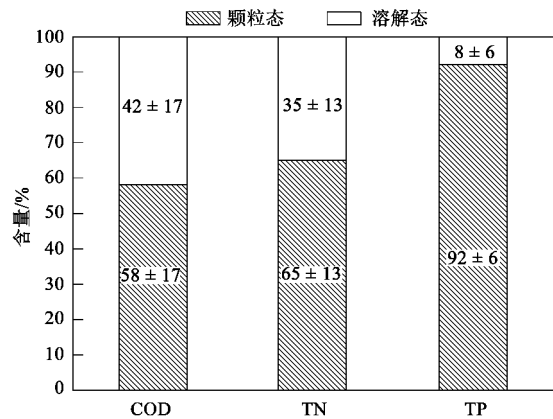


图3 城市地表(汉阳大道)径流中 COD、TN 和 TP 形态特征

Fig.3 Particulate and solute percentages of COD, TN and TP in urban storm flow for Hanyang Street

NO_3^- -N 占 TN 的 36%, NH_4^+ -N 占 13%, 有机氮占 52%。汉阳大道地表径流中 NO_3^- -N 的组成明显低于澳大利亚城市地表径流中的 NH_4^+ -N, 有机氮要高于澳大利亚城市地表径流中的有机氮, 有机氮主要是

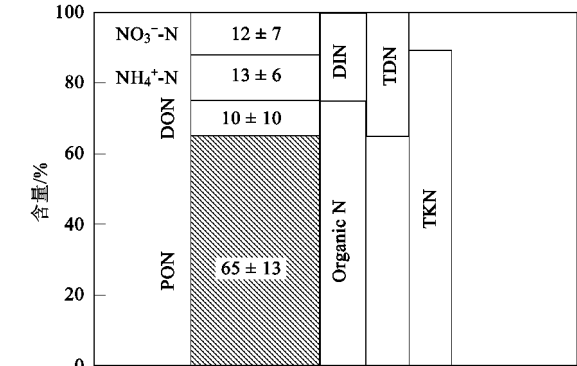


图4 城市地表(汉阳大道)径流中氮素的组成

Fig.4 Nitrogen composition in urban storm flows for Hanyang Street

以颗粒态的形式存在,说明城市地表卫生差,晴天累积的街土和垃圾多,是有机氮比例高的主要原因。

2.2 地表径流水质空间分异聚类分析

表3 是对汉阳城区14个地表源区径流水质的统计。不同类型源区径流水质存在显著差异,同一类型源区不同监测位置也具有明显的差异,城市地表

径流水质在空间上具有明显的分异性(表 4).

以地表径流水质指标 TSS、COD、TN 和 TP 为基础,对 14 个源区地表径流污染特征近行聚类分析,可将 14 个源区聚为 3 类(图 5),同一类源区地表径流污染程度、污染特征相似.第一类地表径流污染程度最低,主要包括建筑屋面和城市绿地;第二类地表

径流污染程度中等,主要包括交通区和新建居民区;第三类地表径流污染最重,主要包括旧城居民区、商业区和居民饮食区.聚类分析结果表明,不透水地表功能、土地利用类型、人口密度、交通流量和地表卫生管理状况是影响城市地表径流水质分异的主要因素.

表 3 汉阳地区地表 14 个源区径流水质
Table 3 Means of TSS, COD, TN, and TP for 14 source areas in Hanyang district

编号	测点位置	土地利用/功能	水质指标/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			
			TSS	COD	TN	TP
1	五里墩陶瓦屋面	建筑屋面	16.3	46.0	1.98	0.08
2	五里墩沥青屋面	建筑屋面	46.7	61.5	4.18	0.34
3	七里庙水泥屋面	建筑屋面	49.7	78.9	2.43	0.09
4	江汉大学草地	城市绿地	66.1	45.6	0.82	0.23
5	五琴路	交通区	194.5	70.8	3.32	0.40
6	钟家村路面	商业区	202.0	232.6	3.59	0.52
7	马仓湖路 2 号	居民区	348.3	328.1	10.35	1.17
8	墨水湖北路	交通区	369.7	172.0	2.82	0.53
9	菜市场路面	旧城居民区	377.9	468.4	7.64	1.40
10	琴台路	交通区	506.2	171.3	3.19	1.27
11	桃花岛	新建居民区	600.0	256.0	6.04	0.57
12	汉阳大道	交通商业区	787.0	557.0	12.00	1.47
13	马仓湖路 1 号	居民饮食区	813.5	780.3	14.51	2.00
14	万家巷	旧城居民区	2728.1	645.4	13.23	2.18

表 4 汉阳地区 14 个源区径流水质空间分异性统计
Table 4 Statistical summaries of water quality constituents for 14 source areas

水质指标	最小值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	最大值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	中值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	平均值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	标准差	变异系数
TSS	16.3	2728.1	359.0	507.6	691.8	1.36
COD	45.6	780.3	202.3	279.6	242.8	0.87
TN	0.82	14.51	3.89	6.15	4.57	0.74
TP	0.08	2.18	0.55	0.88	0.70	0.80

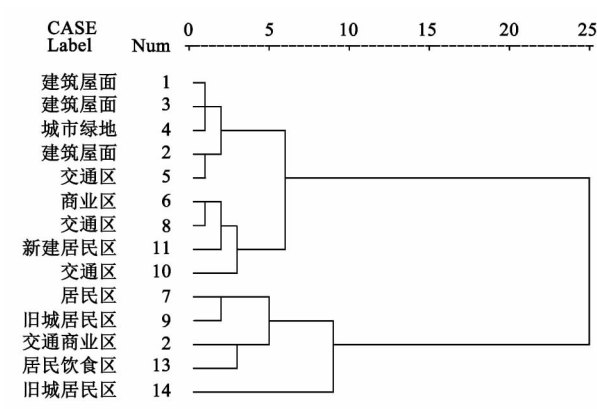


图 5 汉阳城区 14 个地表径流源区水质聚类图

Fig. 5 Hierarchical dendrogram for 14 source areas obtained by Ward's hierarchical clustering method

2.3 城市地表径流水质空间分异性

2.3.1 不透水地表功能对径流水质的影响

城市不透水地表主要分为建筑屋面和路面,由于两者的功能不同,人为活动对两者的影响也不同.对于屋面而言,屋面材料的种类、性质和老化程度以及大气干沉降是影响其径流水质的主要原因.而城市道路,由于受到各种人类活动的直接影响,径流污染受交通流量、人流量、周围土地利用、地表卫生管理水平多种因素影响,径流水质变化复杂.图 6 是对汉阳城区 3 种屋面材料次降雨径流事件污染物浓度的统计结果.汉阳屋面径流污染程度远远低于任何路面监测点,同澳门屋面径流监测结果相当^[16],低于北京屋面径流中对应污染物浓度^[9].这一特点反映了汉阳地区湿润气候条件下大气干沉降小,建筑屋面污染物累积程度低.另一方面汉阳地区的降雨量和降雨次数要明显高于北京,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.另外从图 6 中可以看出,沥青屋面径流

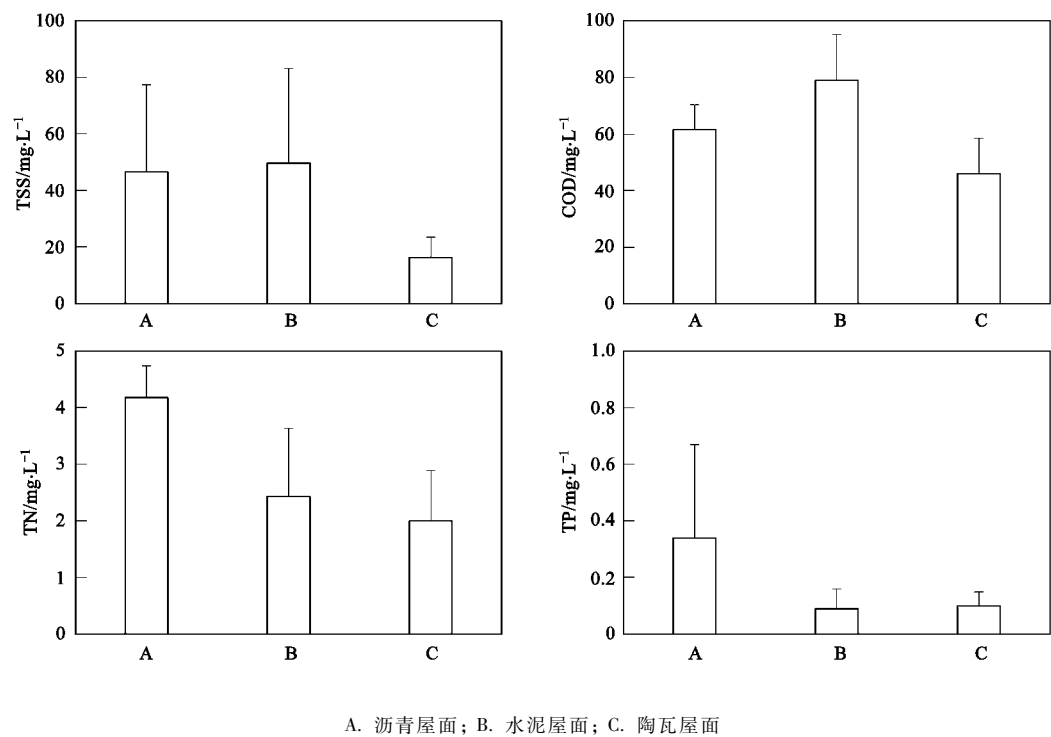


图 6 汉阳城区 3 种材料屋面降雨径流水质比较

Fig. 6 Comparison of three roof runoff quality with different materials

中 TN 和 TP 的浓度是水泥、陶瓦屋面的 2 ~ 3 倍,屋面材料对径流水质具有影响作用.

2.3.2 交通流量对路面径流水质的影响

图 7 是 4 个不同交通流量道路 4 次降雨事件径流中 TSS、COD、TN 和 TP 的平均浓度. 城市路面累积污染物主要来自交通工具的轮胎磨损、汽车尾气

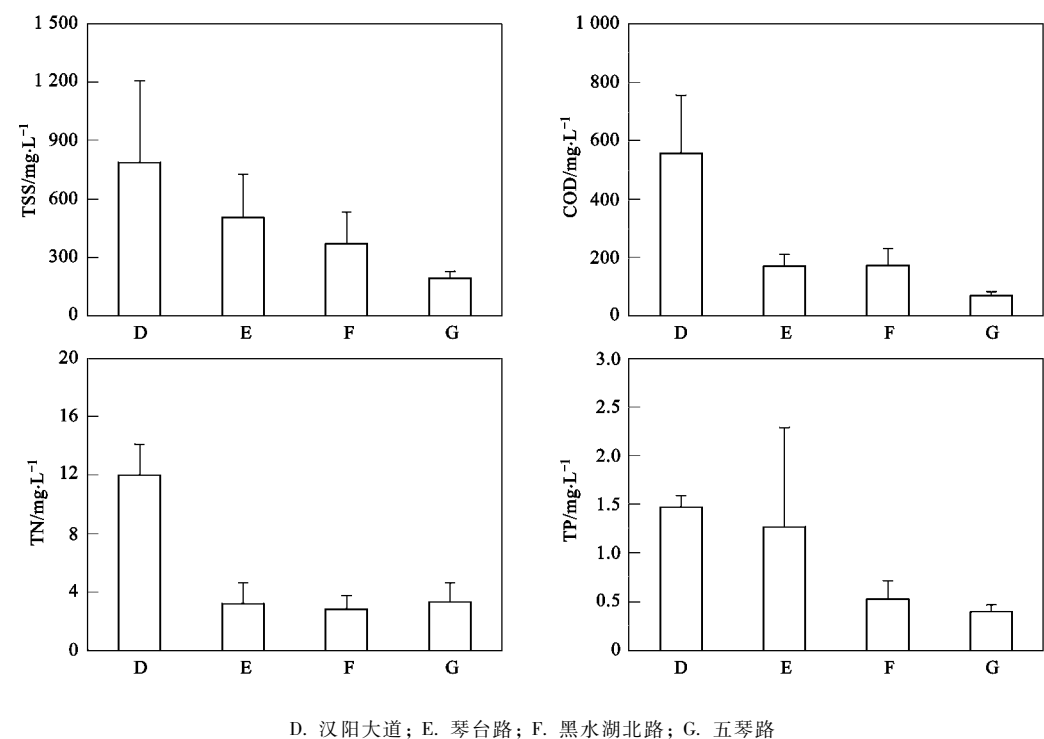


图 7 汉阳城区不同交通流量道路径流水质

Fig. 7 Comparison of four urban roads stormwater quality with different traffic volume

和行人丢弃的散落垃圾.道路级别和功能不同,交通流量不同,路面累积污染物的程度不同,进而影响到径流水质.汉阳大道是汉阳城区的主要交通干道(双向8车道),琴台路和墨水湖北路是汉阳城区的2级干道(双向4车道),五琴路是连接汉阳大道和琴台路的一条支路.汉阳大道监测区是4个道路监测区径流污染最重的,其次是琴台路、墨水湖北路和五琴路,反映了道路功能和交通流量对径流水质的影响.因此,道路交通流量是影响径流水质的主要因素,交通流量越大,污染程度越重.图8是不同道路交通高峰期(07:00~09:00)交通流量与径流水质

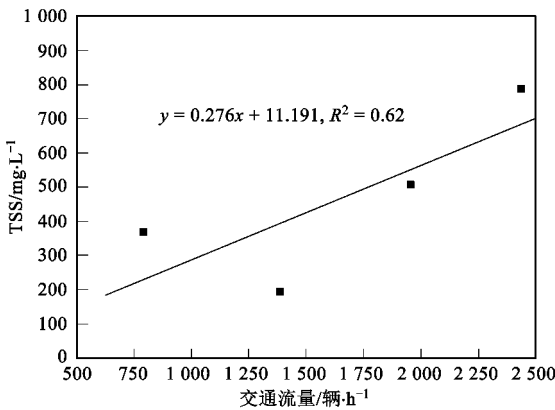


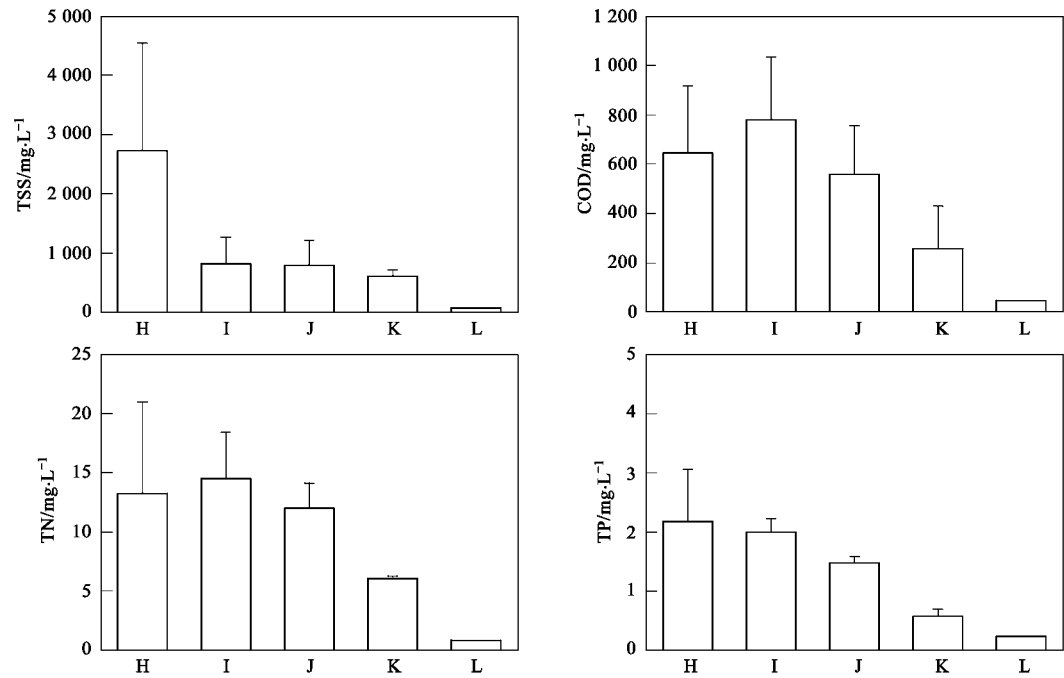
图8 道路交通流量对地表径流中TSS浓度的影响
Fig. 8 Relationship between TSS concentration and traffic volume

的关系.其中,交通流量是指07:00~09:00上班高峰期的双向交通流量,车辆计数为所有机动车辆.

2.3.3 土地利用对地表径流水质的影响

图9是汉阳城区不同土地利用类型径流水质的比较结果.除了城市绿地径流水质较好外,其它4个监测源区径流污染都比较严重,污染程度的顺序依次是旧城居民区(万家巷)>一般城区居民区/饮食区(马仓湖)>交通商业区(汉阳大道)>新建区(桃花岛)>城市绿地(江汉大学草坪).居民区地表径流污染负荷主要来源于居民生活的废弃物残留,这与人们的生活习惯、消费方式特别是饮食方式和习惯有密切的关系.旧城区万家巷人口密集,地表卫生管理水平低下,地表清洁质量相对较差,街土累积明显,是造成径流中大量固体污染物的主要原因.尽管马仓湖路监测点径流中TSS明显低于万家巷测点,但是其COD、TN和TP与万家巷测点相当,即COD/TSS、TN/TSS和TP/TSS高于万家巷.这主要是由于马仓湖路监测区不仅位于居民区,而且是附近居民的饮食区,晴天居民饮食过程中丢弃的垃圾和餐饮垃圾、餐饮用水的随意倾倒是造成径流中污染物,特别是TN和TP很高的主要原因.

汉阳大道的水质已有讨论,需要指出的是它作为一级交通干道,附近又是一小型商业中心,行人流量高也是径流污染较重的原因之一.桃花岛居民区



H. 旧城居民区; I. 居民饮食区; J. 交通/商业区; K. 新建居民区; L. 草坪

图9 汉阳城区不同土地利用降雨径流水质比较

Fig. 9 Comparison of five land use categories runoff quality

属于新建区,人口密度低,卫生设施和管理水平也要好于旧城区,所以径流水质相对较好。

3 讨论

城市地表径流污染是一个涉及多介质、多时空尺度和多污染物的复杂过程。由于人类活动在地表空间配置的多样性、复杂性和随机性,再加上地表径流污染过程的尺度效应,所以监测与研究的尺度不同,监测的结果和说明的问题不同。集水区尺度监测反映的是区域的整体污染特征,而很难识别地表径流污染产生的关键源区及其水质特征,缺乏对源区控制的指导性。Goonetilleke 等^[20]在小尺度汇水单元对城市地表径流的监测研究表明,土地利用及其空间格局对径流污染过程具有重要的影响。城市土地利用类型是对人类活动综合反映的一种定性分类。土地利用类型对径流水质的影响,主要是对影响地表污染物累积过程的各种人类活动的综合。而地表污染物的累积过程与程度,实际上主要与交通流量、人口密度等产生污染的因素有关,另外地表卫生管理是最终决定雨前累积于地表污染物数量的重要因素。

本次监测研究尺度是数百 m^2 的小汇水单元,即对地表径流污染产生的源区进行监测研究,讨论了监测源区所处的功能、周围土地利用、交通流量、行人流量以及地表卫生管理状况对径流水质的影响。尽管在小汇水单元监测的结果具有一定的随机性,但是有利于识别影响城市地表径流污染的主要环节。通过地表径流的监测,同时得到了 14 个地表源区污染物冲刷过程、污染组成、水质综合特征等数据,对开展城市地表径流源区控制具有实践指导作用。汉阳地区由于气候湿润、降雨频繁,屋顶污染物累积周期短,屋面径流水质远优于路面径流水质。交通流量是影响路面径流污染的主要因素之一,汉阳大道作为城区主要交通干道,径流污染最重。土地利用对径流污染有明显的影响作用,万家巷旧城区,人口密度高,地表卫生管理差是其径流污染最重的主要原因。另外汉阳地区居民饮食方式与习惯也是影响径流污染特征的一个原因,特别是对径流中 TN 和 TP 的影响显著。另外在大部分监测源区,径流中污染物的颗粒态组成很高,说明城区地表卫生管理是另一个影响径流污染的因素,有待于加强地表卫生的管理,并对地表径流污染产生的关键源区进行控制是减轻城市化对水环境负面影响的主要途径。

4 结论

(1)城市地表径流中 COD、TN 和 TP 主要以颗粒态的形式存在,颗粒态 COD、TN 和 TP 分别为 58%、65% 和 92%,溶解态 TN 中 DON 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 相当。

(2)地表功能、土地利用、交通流量、人口密度以及地表卫生管理水平是影响城市地表径流水质空间分异的主要因素。

(3)土地利用对径流污染程度的影响为:旧城居民区 > 一般城区居民区/饮食区 > 交通商业区 > 新建区 > 城市绿地,人口密度高和管理差的旧城区径流污染最重。地表径流污染程度与交通流量正相关,交通流量越高地表径流污染越重,1 级交通干道 > 2 级干道 > 支路。

(4)在汉阳城区有待于加强地表卫生的管理,从地表径流污染的源头进行控制是减轻城市化对水环境负面影响的途径之一。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [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,何庆慈,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] 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.
- [6] 程江,杨凯,黄小芳,等. 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[J]. 环境科学, 2009, 30(7): 1893-1900.
- [7] Kafi M, Gasperi J, Moilleron R, et al. Spatial variability of the characteristics of combined wet weather pollutant loads in Paris[J]. Water Res, 2008, 42(3): 539-549.
- [8] 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.
- [9] 车武,欧岚,汪慧贞,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装备, 2002, 3(1): 33-37.
- [10] 李贺,李田,李彩艳. 上海市文教区屋面径流水质特性研究[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 47-51.
- [11] 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.
- [12] 王彪,李田,孟莹莹,等. 屋面径流中营养物质的分布形态研究[J]. 环境科学, 2008, 29(11): 3035-3042.

- [13] 张巍, 张树才, 万超, 等. 北京城市道路地表径流及相关介质中多环芳烃的源解析[J]. 环境科学, 2008, **29**(6): 1478-1483.
- [14] 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.
- [15] 黄金良, 杜鹏飞, 赵冬泉, 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.
- [16] 黄金良, 杜鹏飞, 欧志丹, 等. 澳门屋面径流特征初步研究[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(7): 1076-108.
- [17] Tsihrintzis V A, Sidan C B. Modeling urban stormwater runoff processes using the santa barbara method [J]. Water Resour Manag, 1998, **12**(2): 139-166.
- [18] 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.
- [19] Taylor G D, Fletcher T D, Wong T H, *et al.* Nitrogen Composition in urban runoff—implication for stormwater management [J]. Water Res, 2005, **39**(10): 1982-1989.
- [20] Goonetilleke A, Thomas E, Ginn S, *et al.* Understanding the role of land use in urban stormwater quality management [J]. J Environ Manage, 2005, **74**(1): 31-42.

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjkx.ac.cn>). 该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能, 欢迎广大作者、读者和审稿专家使用. 目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行. 作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面上给出的提示投稿即可. 如果您在使用过程中有问题, 请及时与我刊编辑部联系.

邮政地址: 北京市海淀区双清路 18 号《环境科学》编辑部

邮 编: 100085

电 话: 010-62941102, 010-62849343

传 真: 010-62849343

E-mail: hjkx@rcees.ac.cn

网 址: www.hjkx.ac.cn