

城市降雨屋面、路面径流水文水质特征研究

董欣, 杜鹏飞*, 李志一, 喻峥嵘, 王锐, 黄金良

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要:为研究城市硬质下垫面径流的水文过程与污染物浓度变化特征, 对北京市 2006 年 6~8 月的 4 场降雨进行路面和屋面水文、水质过程同步分析. 结果表明, 径流曲线与降雨过程线形状类似, 波动幅度相对较小, 滞后于降雨过程线 5~20 min, 屋面径流系数在 0.80~0.98 之间; 路面径流系数在 0.87~0.97 之间. 径流污染物的浓度是由累积排放规律决定的, 路面径流的污染物浓度高于屋面径流, 径流中 COD、TN、TP 的浓度均超过地表水环境质量标准 V 类水要求. 各类污染物之间的相关性均处于显著性水平 $R=0.1$ 以上, 屋面径流颗粒物与有机物和阴离子之间的相关关系较大 (>0.5), 而与氮磷等营养物质的相关系数较小 (<0.5); 路面径流中, TN、TP 与颗粒物的相关性有所增加. 径流中各类物质大多存在初期冲刷现象, 并受到污染物种类、下垫面特征、降雨强度和雨型等因素的影响. SS 初期冲刷现象较其它几类污染物更为明显, 路面较屋面更容易形成初期冲刷, 低强度降雨不容易形成有机物和营养物质的初期冲刷现象. 控制初期径流污染是北京市径流管理的有效措施.

关键词:城市径流; 降雨-径流水文过程; 场次平均浓度; 相关系数; 初期冲刷效应

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)03-0607-06

Hydrology and Pollution Characteristics of Urban Runoff: Beijing as a Sample

DONG Xin, DU Peng-fei, LI Zhi-yi, YU Zheng-rong, WANG Rui, HUANG Jin-liang

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The purpose of this study is identification and characterization of hydrological process of urban runoff, as well as concentration variation of pollutants in it. Samples were collected in 4 rainfall events in Beijing from Jun. 2006 to Aug. 2006. Hydrology and pollution of the rainfall-runoff process were analyzed on roof and road. Study results show that the shapes of hydrological curves of runoff, despite for a 5~20 min delay and a milder tendency, are similar to rainfall curves. Runoff coefficients of roof are 0.80~0.98, while 0.87~0.97 of road. Event mean concentrations (EMC) of pollutants are influenced by build-up and wash-off features, which leads to a higher concentration in road runoff than in roof runoff. Major pollutants that excess the water quality standards are COD, TN, and TP. Evident correlations (>0.1) are found between pollutants. Correlation with particles are higher for COD and SO_4^{2-} (>0.5), while lower for nutrients (<0.5). First flush effects (FFE) are found and affected by several factors, such as pollutant variety, types of land covers, and rainfall intensity. FFE are found more intense in SS, more frequently in road runoff, and more difficult to form for COD and nutrients with low rainfall intensity. Therefore, control of first period of runoff would be an effective approach for runoff management in Beijing.

Key words: urban runoff; rainfall-runoff hydrology; event mean concentrations; correlation coefficient; first flush effects

20 世纪 60 年代中期起, 国际社会就意识到城市地表径流等非点源污染将成为城市水环境的主要威胁. 发达国家开展了大量的城市地表径流污染研究^[1], 包括对降雨场次污染物平均浓度 (EMC)^[2]、初期冲刷效应 (first flush effect)^[3] 以及不同下垫面地表径流污染特征影响因素^[4] 等的研究. 在我国的大中型城市, 城市污水和工业废水逐渐得到有效地控制. 降雨径流携带的污染物排入城市水系是形成城市河道污染的重要原因, 但我国对径流污染的研究远远滞后于美国和欧盟国家. 起步于 20 世纪 80 年代的地表径流污染特征研究, 直到 2000 年以后才引起学者们的广泛关注. 目前, 我国先后在北京^[5]、武汉^[6]、澳门^[7] 等地区开展了径流污染特征的研究, 积累了一些径流污染基础数据. 但当前国内的研究仍处于零散状态, 时空连续性和系统性较差, 仍旧需要大量

相关基础性研究, 才能对我国城市径流污染的普遍特征作出合理有效的识别和分析. 另外, 目前的研究仍未能同步分析降雨-径流的水文过程与对应的水质变化, 不利于后期利用模型或其它手段进行污染负荷的估算及控制措施的制定. 本研究通过对北京市 2006 年 6~8 月降雨-径流水文水力、水质过程的同步监测分析, 以降雨、径流、污染水平在单场次降水过程中的变化及相关关系为主要内容, 描述了径流的特征. 研究成果对我国径流污染基础数据的积累、相关城市非点源污染控制模型的应用和径流管理措施的制定都有一定意义.

收稿日期: 2007-03-08; 修订日期: 2007-05-22

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2006CB403407)

作者简介: 董欣 (1983~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为城市面源污染特征与相关模型, E-mail: dx@mails.thu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: dupf@tsinghua.edu.cn

1 材料与方法

1.1 研究区域

北京地处暖温带半湿润地区,属大陆性季风气候,四季分明,冬季干燥,春季多风,夏季多雨,秋季晴朗温和.年平均气温 12℃,年降水量 644 mm,蒸发量 1 842 mm,蒸发量远大于降水量.

研究共设置 2 处采样点,分别收集屋面和路面汇流雨水,2 处代表了城市降雨产生地表径流和非点源污染的主要途径.屋面、路面采样点均位于清华大学学生生活区,采样点所在区域属于城市文教区,机动车交通量小于平均水平,但人口密度和自行车交通量较大.屋面采样点所属的建筑物为 6 层宿舍楼,建于 2002 年,占地面积 1 557 m².屋面材料为红色铺装方砖,整个屋面被分割为若干个区域,通过

14 个落水管排水.采样点所在的汇水区呈矩形,长 12 m,宽 8 m,共有 2 处落水管,相互对称.路面采样点位于校园内南北方向的主干道路,路面材料为沥青,道路宽 7.0 m,横坡坡度约 0.3%,纵坡坡度约 1%.道路径流沿地形顺坡自然流动,间隔设有矩形雨篦,通过雨篦下方的方形暗渠排水.

1.2 样品采集

分别采集 2006 年 6~8 月 4 场降雨的径流水样.降雨期间,用 25 L 聚乙烯盆收集屋面落水管出口径流,用 19 L 聚乙烯盆收集路面雨篦汇集的径流.采样间隔约为 5 min.样品采集具体情况如表 1 所示.

同时在距采样点 300 m 空旷处安置虹吸式雨量计(JS-1 型),同步获得场次雨量过程线.

1.3 样品分析

表 1 样品采集情况

Table 1 Information of sample collection

采样日期	降水时间	降雨历时/min	降水量/mm	雨强/mm·min ⁻¹	屋面样品数/个	路面样品数/个
2006-06-28	20:10~22:00	110	25.33	0.230	10	14
2006-07-12	18:25~19:45	80	21.65	0.271	6	10
2006-08-01	17:10~18:40	90	21.62	0.240	11	13
2006-08-08	20:50~23:00	130	24.90	0.192	13	21

根据雨量计记录的雨量累积数据,计算不同时刻的降雨强度.根据每次的采样耗时与容器容积计算出瞬时径流量,作为采样起止时刻中值的瞬时径流量.这样,就可以定量描述降雨-径流的水文水力过程.

水样收集后立即冷藏保存,次日起进行水质分析.水质监测项目包括:pH、SS、COD、TOC、TN、TP、Cl⁻、SO₄²⁻以及 Cu、Mn、Sb、Fe 等重金属.pH 分析使用美国 Hach 公司生产的 SENSion156 便携式多参数测量仪;COD 分析采用分光光度法;TOC 使用总有机碳分析仪分析;Cl⁻、SO₄²⁻采用液相色谱分析方法;重金属使用 ICP 离子色谱分析;SS、TN、TP 分析方法采用《水和废水监测分析方法》(第四版)的标准方法(SEPA, 2002).保证水质分析在采样 72 h 内完成,其中 pH、COD 等项目保证在 24 h 内完成.每个水样的分析结果代表采样起始、终止时刻的中间时刻的污染物浓度值,从而实现水量与水质的同步监测.

2 结果与讨论

2.1 降雨-径流水文水力过程

图 1 依次表示 4 场降雨过程及屋面、路面径流的产生过程.4 场降雨的降水量比较接近,均在 20~

30 mm 之间,但降雨强度和雨型各不相同.第 1 场降雨的强度峰出现在末期,第 2、3 场出现在降雨初期,第 4 场没有明显的峰值,雨型呈锯齿形波动.

结果显示,径流曲线的形态与降雨过程线类似,但波动幅度低于降雨过程线,消除了降雨过程线中的某些峰值.例如,07-12 降雨过程线为距离较近的双峰,在屋面和路面径流过程线中则都显示为单峰.另外,径流过程线稍滞后于降雨过程线,滞后时间为 5~20 min.这种现象是由蒸发、滞留、渗透作用共同造成的.夏季地面温度较高,在降雨初期部分雨水落到地表就立刻蒸发;地表的粗糙性决定了一部分雨水会被滞留在原处,局部凹陷也会干扰正常汇流;另外,即使是硬质下垫面,也会有少量的雨水向下渗透.由于以上 3 种作用,径流必然会滞后于降雨一段时间发生,同样的,径流量也很难与降雨量相等.

径流系数是径流量与降雨量的比值,用于表征一定地表条件对降雨的响应特性.我国现行规范中对屋面和道路的设计径流系数均为 0.9^[8],实际的径流系数还可能受到汇水面积划分方法、雨水口设置、降雨强度等因素的影响^[9].依照所监测的 4 场降雨计算(如表 2 所示),屋面的径流系数在 0.80~0.98 之间,均值为 0.86,稍小于规范设计值;路面的

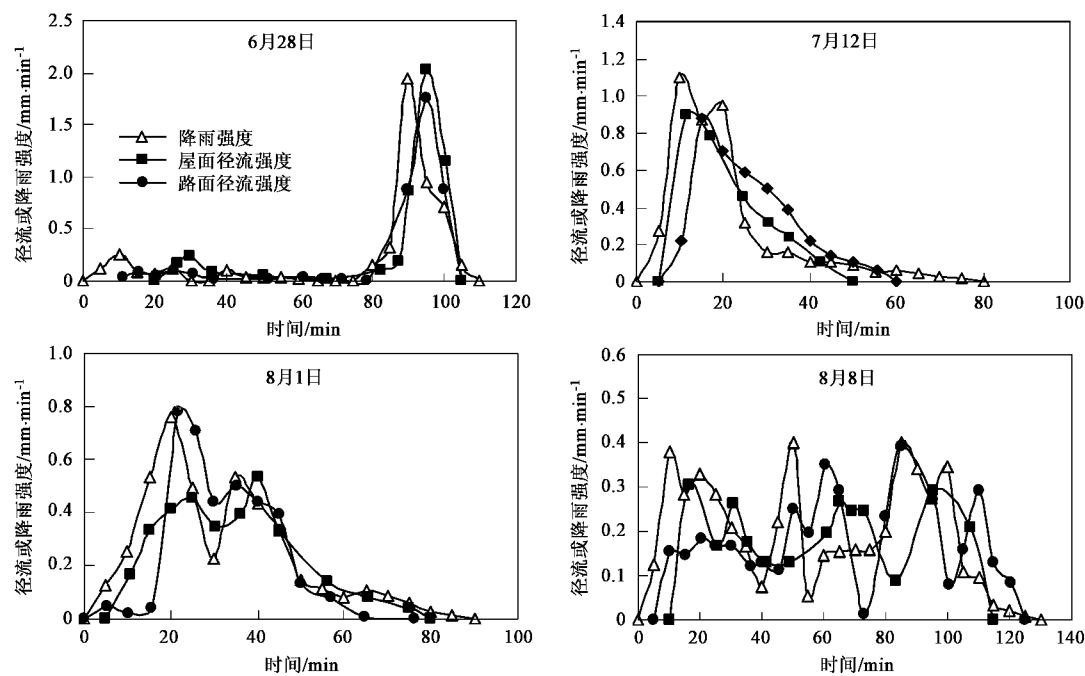


图 1 降雨-径流水文水力过程

Fig.1 Hydrology and hydraulics of rainfall-runoff process

表 2 屋面径流产生量与径流系数

Table 2 Roof runoff and runoff coefficient

采样日期 /月-日	平均降雨强度 /mm·min ⁻¹	最大降雨强度 /mm·min ⁻¹	降水量/mm	屋面径流量 /mm	屋面径流 系数	路面径流量 /mm	路面径流 系数
06-28	0.230	1.949	25.33	24.646	0.97	22.875	0.90
07-12	0.271	1.100	21.65	17.411	0.81	19.003	0.88
08-01	0.240	0.762	21.62	18.249	0.84	20.924	0.97
08-08	0.192	0.400	24.90	19.831	0.80	21.676	0.87

径流系数在 0.87 ~ 0.97 之间,均值为 0.90,与设计规范中基本相等.

2.2 场次平均浓度(EMC)

在单场降雨过程中,污染物的浓度可能变化很剧烈,但受纳水体的水质变化并非同样敏感^[10].因此,尽管单一场次降雨过程的径流中污染物浓度变化较大,场次平均浓度(event mean concentration, EMC)仍然是描述径流污染特征的首要指标. EMC 的定义式为单场降雨的污染物总负荷除以径流总量^[11, 12].

表 3 分别表示了屋面径流、路面径流的污染水平,括号外为径流中每种污染物的浓度范围,括号内为该污染物的 EMC. 研究结果显示屋面径流和路面径流的 pH 值 EMC 均在 7.0 ~ 8.5 之间,处于中性稍偏碱的状态. 金属物质除 Mn、Fe 个别场次检出外,

大部分低于 0.01 mg/L 的检出限,污染程度轻微. 有研究者^[13]对公路和金属材料屋面进行的研究中报告了金属物质的污染水平,但本研究选取的是文教区监测点,路面材料与交通干线类似,但机动车交通量的区别较大,屋面材料与金属材料屋面的差异性较大,所以金属类物质的污染源较少.

屋面径流中,第 1 场降雨中的 COD、TOC、TN、TP、Cl⁻、SO₄²⁻ 等指标均显著高于后 3 次降雨的相应指标. 这是由非点源的累积排放特征决定的. 由于北京地区的降雨量 70% 以上集中在 6 ~ 9 月,从秋季到次年春季,污染物主要处于累积阶段;夏季降雨频繁,污染物主要处于排放阶段. 另外屋面除了受到空气干沉降的影响外,受其他人类活动的影响极少,北京地区的空气以降尘为主要特征,所以在两次降雨之间,颗粒物可以获得较大程度的补充,而其他类型

表 3 径流中的污染物浓度/mg·L⁻¹
Table 3 Pollutants in urban runoff/mg·L⁻¹

下垫面	采样日期 /月-日	pH	SS	COD	TOC	TN	TP	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
屋面	06-28	7.07 ~ 7.75 (7.31)	4.5 ~ 109.4 (24.15)	44.67 ~ 472.2 (262.56)	21.17 ~ 130.68 (81.34)	6.70 ~ 39.33 (21.94)	0.53 ~ 4.68 (2.69)	1.99 ~ 9.84 (3.33)	24.18 ~ 124.64 (36.30)
	07-12	7.34 ~ 8.62 (7.97)	33.8 ~ 51.3 (41.19)	38.29 ~ 130.8 (87.81)	16.33 ~ 56.44 (35.03)	2.96 ~ 7.72 (5.81)	0.02 ~ 0.2 (0.06)	0.53 ~ 2.40 (0.96)	14.07 ~ 37.39 (24.57)
	08-01	7.5 ~ 9.08 (7.65)	0 ~ 12.4 (2.93)	31.91 ~ 92.53 (55.79)	15.06 ~ 33.61 (18.74)	1.41 ~ 5.23 (2.38)	0 ~ 0.21 (0.05)	0.18 ~ 2.57 (0.93)	2.97 ~ 18.16 (5.49)
	08-08	6.69 ~ 7.55 (7.15)	0 ~ 162.73 (39.71)	0 ~ 162.7 (57.81)	6.19 ~ 27.44 (13.62)	1.34 ~ 4.31 (2.89)	0.02 ~ 0.11 (0.05)	0.77 ~ 3.06 (1.73)	10.65 ~ 28.29 (19.00)
	均值	7.52	27.00	115.99	37.18	8.26	0.71	1.74	21.34
路面	06-28	7.16 ~ 8.17 (7.95)	10.9 ~ 377.1 (39.21)	124.4 ~ 370.1 (238.65)	33.39 ~ 100.85 (37.33)	5.71 ~ 24.06 (9.64)	0.12 ~ 3.71 (0.66)	2.12 ~ 21.7 (2.89)	21.7 ~ 64.2 (28.75)
	07-12	7.57 ~ 8.21 (8.00)	60.3 ~ 388.6 (95.49)	127.6 ~ 268.0 (177.01)	27.21 ~ 78.48 (38.51)	5.05 ~ 10.27 (7.30)	0.16 ~ 1.46 (0.51)	1.07 ~ 7.72 (2.42)	26.9 ~ 73.8 (38.39)
	08-01	7.89 ~ 8.57 (8.31)	46.1 ~ 492.9 (146.96)	22.33 ~ 268.0 (100.68)	17.79 ~ 86.83 (37.72)	2.63 ~ 9.24 (4.32)	1.42 ~ 0.15 (0.58)	0.63 ~ 4.68 (1.35)	6.67 ~ 27.9 (11.66)
	08-08	6.71 ~ 7.33 (7.24)	4.8 ~ 357.4 (46.41)	114.8 ~ 1 410 (363.45)	23.56 ~ 511.0 (79.86)	3.56 ~ 6.61 (4.31)	0.01 ~ 0.82 (0.23)	2.50 ~ 7.11 (2.77)	17.4 ~ 38.7 (20.91)
	均值	7.88	82.02	219.95	48.36	6.39	0.49	2.36	24.93
V 类水		6 ~ 9	—	≤40	—	≤2.0	≤0.4	≤250	≤250

的污染物均在后期降雨中明显降低。

路面径流中,污染物浓度则没有呈现出明显的降低趋势,这是由于路面受到的人类活动干扰强度大频率高造成的.各种污染物都可以快速补充,平时的街道保洁清扫也会清除部分污染,污染源的种类和数量具有更大的不确定性.因此,污染物浓度与场次降雨的间隔、前期的街道清扫都有很紧密的联系,从而削弱了气候特征对污染水平的影响。

按照《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) V 类水的要求,屋面径流的 COD、TN、TP 超标,3 种污染物的 EMC 最大超标倍数分别为 6 倍、10 倍和 6 倍,峰值浓度最大超标倍数分别为 10 倍、19 倍和 11 倍.路面径流的 COD、TN、TP 也超标,3 种污染物的 EMC 最大超标倍数分别为 8 倍、4 倍和 2 倍,峰值浓度最大超标倍数分别为 35 倍、22 倍和 9 倍。

2.3 污染物的相关关系

研究表明,径流中的各种污染物之间有一定的相关关系^[14].通过计算污染物之间的相关系数 R,可以表征污染物的相关关系。

$$R_{X,Y} = \left| \frac{C_{ov}(X,Y)}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} \right|$$

式中, R_{X,Y} 为 2 种污染物的相关系数; C_{ov}(X,Y) 为 2 种污染物浓度的协方差; σ_X、σ_Y 为 2 种污染物各自的标准差。

本研究以 SS、TOC、TN、TP 和 SO₄²⁻ 分别代表颗

粒物、有机物、营养物质和阴离子研究径流中各种污染物之间的相关关系,4 场降雨污染物之间相关系数的均值如表 4 所示.结果表明,各类污染物之间的相关性均处于显著性水平 R = 0.1 以上.屋面径流中,颗粒物与有机物和阴离子之间的相关关系较大(>0.5),而与氮磷等营养物质的相关系数较小(<0.5);路面径流中,营养物质与颗粒物的相关性有所增加,但仍小于有机物和阴离子与颗粒物的相关性.所以说,在控制路面径流污染时使用滞留沉降系统可以同时有效地去除有机物、营养物质和阴离子,但在控制屋面径流时,对氮磷等营养物质的协同去除能力会有所降低,需考虑使用其它手段单独去除.目前国际上比较典型的是采用生物过滤或渗透系统,由于屋面径流 TN、TP 之间的相关系数也不高

表 4 各类污染物的相关系数

下垫面	污染物	相关系数 R				
		SS	TOC	TN	TP	SO ₄ ²⁻
屋面	SS	1	0.603	0.308	0.249	0.706
	TOC	0.603	1	0.627	0.349	0.675
	TN	0.308	0.627	1	0.327	0.589
	TP	0.249	0.349	0.327	1	0.329
	SO ₄ ²⁻	0.706	0.675	0.589	0.329	1
路面	SS	1	0.586	0.567	0.432	0.740
	TOC	0.586	1	0.560	0.411	0.616
	TN	0.567	0.560	1	0.618	0.735
	TP	0.432	0.411	0.618	1	0.420
	SO ₄ ²⁻	0.740	0.616	0.735	0.420	1

(<0.5),在选择控制措施时还要进行综合考虑.

2.4 污染物的初期冲刷效应

如果污染负荷增长速率超过径流量的增长速率,则说明存在污染物冲刷效应.一些研究者发现,降雨初期径流中更容易产生上述冲刷效应^[3,15],这种现象被称为初期冲刷效应(first flush effects, FFE).本研究分析了各类污染物是否存在初期冲刷效应,如图2所示,其中以SS表征颗粒物;以TOC表征有机物;以TN表征营养物质;以 SO_4^{2-} 表征阴离子.曲线位于对角平分线左上部分,则说明存在初期冲刷效应;反之,则不存在.结果表明:①各类物质大多存在初期冲刷现象.②初期冲刷效应与污染物种类具有相关性.SS不论在屋面径流图还是路面径流图中与对角线的偏离程度均最大,初期冲刷现象最为明显,这一点在其他国家研究者的研究中也得到了印证^[16].TN初期冲刷效应不显著,可能是由于

降雨淋洗大气中的 NH_4^+-N 占TN的主要部分.③初期冲刷效应与下垫面特征有关.屋面径流中部分污染物在个别场次或个别场次的某阶段无初期冲刷效应,而路面径流中所有污染物均在各场降雨种存在不同程度的初期冲刷效应,说明路面较屋面更容易形成初期冲刷.④污染的冲刷过程与降雨强度和雨型有关.06-28降雨初期的强度较小,在这种情况下,屋面上容易被冲刷的颗粒物和溶解性离子产生初期冲刷效应,且初期冲刷现象较其它几场雨更明显;而有机物和营养物质不容易被冲刷,不存在初期冲刷现象,但它们在其它几场初期就出现降雨强度峰值的降雨中均从开始就存在初期冲刷效应.

影响污染物排放特征和FFE程度的因素很多.流域或集水区土地利用类型及特征(面积和形状)、地表污染物的累积程度、降水特征、排水体制、2次降水间隔的时间、污染物种类等都在影响着污染物

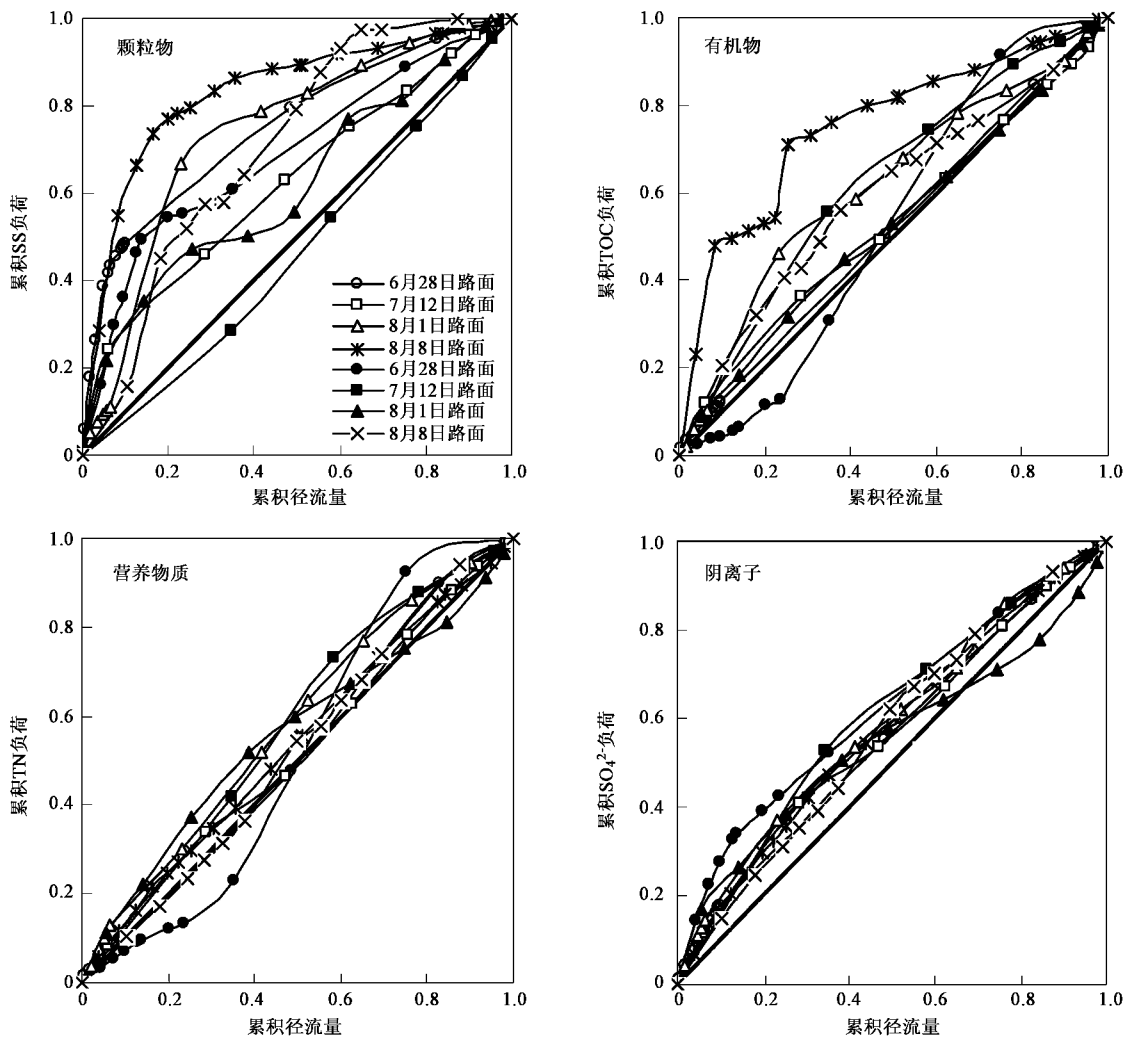


图2 污染物的初期冲刷效应
Fig.2 First flush effects in roof runoff

的输出与 FFE 的程度^[17].但是要想在这些因素与 FFE 之间建立确定的关系也是十分困难的^[18].尽管如此,在实验的基础上识别特定区域和气候特征条件下径流 FFE 的存在性及其特征在径流污染的管理中仍是很有意义的.对于北京地区而言,控制初期径流污染将成为比较有效的治理措施.

3 结论

(1)径流曲线的形态与降雨过程线类似,波动幅度相对较小,或消除降雨过程线中的某些峰值.径流曲线滞后于降雨过程线 5~20 min,屋面的径流系数在 0.80~0.98 之间;路面的径流系数在 0.87~0.97 之间,与设计规范中基本相等.

(2)径流污染物的浓度是由累积排放规律决定的,路面径流的污染物浓度高于屋面径流,且涉及的影响因素更为复杂.路面径流与屋面径流中 COD、TN、TP 的浓度均超过地表水环境质量标准 V 类水要求.

(3)各类污染物之间的相关性均处于显著性水平 $R=0.1$ 以上.屋面径流中,颗粒物与有机物和阴离子之间的相关关系较大(>0.5),而与氮磷等营养物质的相关系数较小(<0.5);路面径流中,营养物质与颗粒物的相关性有所增加.所以说,在控制路面径流污染时使用滞留沉降系统可以同时有效的去除有机物、营养物质和阴离子,但在控制屋面径流时,对氮磷等营养物质的协同去除能力会有所降低,需考虑使用其它手段单独去除.

(4)径流中各类物质大多存在初期冲刷现象,并受到污染物种类、下垫面特征、降雨强度和雨型等因素的影响.SS 初期冲刷现象较其它几类污染物更为明显,路面较屋面更容易形成初期冲刷,低强度降雨不容易形成有机物和营养物质的初期冲刷现象.

参考文献:

[1] Smullen J T, Shallcross A L, Cave K A. Updating the U. S. nationwide urban runoff quality database[J]. Wat Sci Tech, 1999, 39(12): 9-16.

[2] USEPA. Results of the Nationwide Urban Runoff Program: Volume I-Final Report[R]. United States Environmental Protection Agency, NTIS Accession Number: PB84-185552, National Technical Information Service, U. S. Department of Commerce, Springfield, Virginal 22161, 1983.

[3] Gupta K, Saul A J. Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows[J]. Wat Res, 1996, 30: 1244-1252.

[4] Chang M, McBroom M W, Beasley R S. Roofing as a source of nonpoint water pollution[J]. J Environ Manag, 2004, 73: 307-315.

[5] 车武,刘红,汪慧贞,等.北京市屋面雨水污染及利用研究[J].中国给水排水,2001,17(6): 57-61.

[6] 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,2006,26(7): 1057-1061.

[7] 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.

[8] GB 50015-2003,建筑给水排水设计规范[S].

[9] 高婷.城市道路雨水口设计分析[J].中国给水排水,2006,22(12): 55-58.

[10] Deletic A. The first flush load of urban surface runoff[J]. Wat Res, 1998, 32: 2462-2470.

[11] Sansalone J J, Buchberger S G. Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water[J]. J Environ Eng ASCE, 1997, 123: 134-143.

[12] Charbeneau R J, Barretti M. Evaluation of methods for estimating stormwater pollutant loads[J]. Wat Environ Res, 1998, 70: 1295-1302.

[13] Barrett M E, Irish L B, Malina J F, et al. Characterization of highway runoff in Austin, Texas, Area[J]. J Environ Eng, 1998, 124(2): 131-137.

[14] Kim G, Yur J, Kim J. Diffuse pollution loading from urban stormwater runoff in Daejeon city, Korea[J]. J Environ Manag, 2006, 7: 10-16.

[15] Deletic A. The first flush load of urban surface runoff[J]. Wat Res, 1998, 32: 2462-2470.

[16] Lee J H, Bang K W. First flush analysis of urban storm runoff[J]. Sci Total Environ, 2002, 293: 377-388.

[17] 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): 288-293.

[18] Lee J H, Bang K W. Characterization of urban storm runoff[J]. Wat Res, 2000, 34: 1773-1780.