

高速公路雨水径流重金属污染特性研究

李贺¹, 石峻青¹, 沈刚², 季晓亮², 傅大放¹

(1. 东南大学市政工程系, 南京 210096; 2. 江苏省长江公路大桥建设指挥部, 南京 210004)

摘要 对南京机场高速公路路面径流中 Cd、Cu、Pb 和 Zn 这 4 种重金属进行了现场取样检测, 重点探讨了重金属污染的出流规律、事件平均浓度 (EMC), 并分析了降雨特征对径流重金属污染的影响。结果表明, 不同类型降雨事件重金属污染出流规律不同。降雨历时短、降雨量小、降雨强度小的降雨事件重金属浓度在一定范围内波动, 在整个径流过程中始终维持在较高水平; 降雨历时长、降雨量大、前期强度大的降雨事件初期污染物浓度高、污染重, 初期效应显著。降雨历时短、降雨量较大具有双峰雨型的降雨事件中重金属出流存在“二次冲刷”现象。计算结果表明, Cd、Cu、Pb 和 Zn 的 EMC 中值浓度分别为 $1.43 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.092 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $38.6 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.51 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。Pb 总体污染程度较严重, Cd、Cu 和 Zn 与国内同类研究相比污染程度较为接近。重金属浓度与降雨特征相关性分析表明, 降雨量对 Cu 的溶解出流影响较大, 前期晴天数对 Zn 在路面的积累影响较大。

关键词 路面径流; 重金属; 出流规律; 事件平均浓度

中图分类号 X734 **文献标识码** A **文章编号** 0250-3301(2009)06- -

Characteristics of Metals Pollution in Expressway Stormwater Runoff

LI He¹, SHI Jun-qing¹, SHEN Gang², JI Xiao-liang², FU Da-fang¹

(1. Department of Municipal Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Yangtze River Highway Bridge Construction Headquarters, Nanjing 210004, China)

Abstract Heavy metal concentrations of Cd, Cu, Pb and Zn were monitored during 10 rainfall runoff events occurred on a representative expressway road in Nanjing. Discharge rule of metal pollution, event mean concentrations (EMC) and the effect of hydrologic characteristics were evaluated. The results indicated that the discharge characteristics were various in different types of rainfall events. The metal concentrations fluctuated in the range of comparatively high levels during the events with short duration, light rainfall and low intensity. In the events with long duration, heavy rainfall and initial high intensity, the initial metal concentrations were high and metal exhibited a pronounced first flush. Second flush effect existed in the events with short duration, medium rainfall and double intensity peaks. The EMCs of Cd, Cu, Pb and Zn were $1.43 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $0.092 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $38.6 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.51 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. EMCs showed that the pollution extent of Pb was serious. Pollution of Cd, Cu and Pb were similar to other domestic reports, but Pb was lower than those studies. Cu and Zn were similar to related foreign studies, but Cd and Pb were lower. Correlation analysis suggested that the influence of rainfall on the discharge of Cu and the influence of antecedent dry period on the accumulation of Zn were significant.

Key words road runoff; heavy metals; discharge characteristics; event mean concentrations

路面雨水径流中含有大量的悬浮颗粒物、有机物、营养盐和重金属等污染物^[1]。与有机污染物不同, 重金属不易降解或破坏并且能在生物体内富集, 具有污染持久、区域广泛、治理困难等特点, 可以通过饮用水和食物链等途径进入人体, 并在人体内积累, 当其达到一定浓度后将对人体产生毒害作用^[2,3]。

自 20 世纪 70 年代美国首先开展路面径流重金属污染的相关调查研究工作后, 许多西方国家相继开展了此方面的工作, 通过路面径流水质监测积累了大量的基础数据, 重金属污染出流规律、事件平均浓度 (event mean concentration, EMC) 及其影响因素等方面的研究较深入。我国此方面研究起步较晚, 赵剑强等^[4]、张亚东等^[5]、甘华阳等^[6]和黄金良等^[7]分别监测了西安、北京和澳门城市道路路面径流重金属污染, 仅甘华阳等^[8]研究了广州高速公路的雨水

径流重金属污染特征。由于路面径流重金属污染的来源复杂、影响因素众多, 其污染特性往往随地域的改变而不同。本研究对高速公路路面雨水径流重金属进行了现场连续监测, 重点探讨了重金属污染的出流规律、事件平均浓度 (EMC), 并分析了降雨特征对径流重金属污染的影响, 以期高速公路路面径流重金属污染控制积累相关研究资料和依据。

1 材料与方法

1.1 取样地点

本研究选取南京机场高速公路禄口令桥段进行取样监测。路面径流经落水管汇集排放, 所取样品为落水管出流。取样点道路特征见表 1。

收稿日期 2008-07-06 修订日期 2008-10-27

基金项目 江苏省交通科技重大计划项目 (TZ0761-010)

作者简介 李贺 (1978 ~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为城市面源污染控制, E-mail: ericlihe@seu.edu.cn

表 1 取样点特征
Table 1 Characteristics of Highway

道路特征	汇水面积/m ²	路面材料	单向车道数	周围用地类型
禄口高架桥	960	沥青	2	居住-交通-耕地

1.2 取样方法

对整场降雨事件采用人工取样,可较完整反映重金属的污染特征.径流形成的前 30 min,用聚乙烯瓶每隔 3~5 min 取样 1 次;在径流形成的 30~60 min 每隔 10~15 min 取样 1 次;此后每隔 30~120 min 取样 1 次直至降雨事件结束.取样间隔时间可视降雨历时和径流流量改变,每次取样均为 1 L.由 JS-2 型虹吸式雨量计(天津气象仪器厂)同步记录降雨特征,雨量计安装地点与取样点直线距离约 500 m.

1.3 测定方法

依照文献[9]中硝酸和 1+1 盐酸溶液的湿式方法消解水样,分别测定 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的浓度. Cu 和 Zn 采用火焰原子吸收光谱法(日本岛津, AA-6800)测定, Cd 和 Pb 采用石墨炉原子吸收光谱法(日本岛津, GFA-6500)测定.所有玻璃器皿使用前均在 1+1 硝酸溶液中浸泡 24 h,消解用酸均为优级纯,水为去离子水.

1.4 事件平均浓度计算方法

污染物浓度随降雨过程变化差异很大.采用事

件平均浓度(EMC)对重金属污染程度进行评估,以流量为权重求得一次降雨重金属径流平均浓度,即以降雨事件总污染负荷与总径流体积比值来表征径流污染^[1].事件平均浓度数学表达式为:

$$FMC = \bar{c} = \frac{M}{V} = \frac{\int_{t_r0} c(t)q(t)dt}{\int_0^{t_r} q(t)dt} \approx \frac{\sum c(t)q(t)}{\sum q(t)} \tag{1}$$

式中, M 为整个径流期间重金属总量; V 为总径流量; $c(t)$ 为随时间变化的重金属浓度; $q(t)$ 为流速; t_r 为径流总持续时间.

2 结果与讨论

2.1 降雨特性

表 2 列出了所考察降雨事件的降雨特征.从中可知,本研究所监测 10 场降雨事件对大、中、小强度降雨具有较好的代表性,为研究结果的可靠性提供了保证.

表 2 监测降雨事件的降雨特征
Table 2 Statistics of rainfalls

事件日期	降雨历时 /min	降雨量 /mm	最大降雨强度 /mm·min ⁻¹	最小降雨强度 /mm·min ⁻¹	平均降雨强度 /mm·min ⁻¹	前期晴天时间 /h
2007-09-03	470	13.9	0.110	0.001 2	0.030	47.0
2007-10-29	215	0.8	0.020	0.000 0	0.004	113.0
2008-02-25	590	8.3	0.050	0.001 7	0.014	645.8
2008-03-06	318	1.2	0.070	0.001 7	0.004	237.0
2008-03-08	620	8.3	0.090	0.000 5	0.013	67.5
2008-03-21	914	14.2	0.078	0.000 4	0.016	105.6
2008-03-29	447	4.4	0.058	0.000 0	0.010	202.1
2008-04-05	163	3.0	0.044	0.002 0	0.018	183.8
2008-04-15	244	6.4	0.046	0.005 0	0.026	186.9
2008-04-20	701	7.7	0.400	0.000 0	0.011	9.0

2.2 重金属出流规律

图 1~图 3 分别给出了 2007-10-29、2008-03-08 和 2008-04-05 三场不同类型的典型降雨事件重金属的出流规律.

由图 1 可见,2007-10-29 降雨事件中 Cd、Cu、Pb 和 Zn 4 种重金属浓度在径流过程中随时间在一定范围内明显波动,其最大值随最大降雨强度的出现而产生,分别达到 4.32 μg·L⁻¹、0.113 mg·L⁻¹、140.1

μg·L⁻¹、1.04 mg·L⁻¹.其中,Pb 超过《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)基本项目标准限值的Ⅴ类标准值,Zn 超过Ⅲ类标准值.随后 4 种重金属浓度波动逐渐减小,但仍维持在较高的浓度水平上.这主要是由于降雨强度小,雨水对路面的冲刷作用较弱,污染物并未全部被初期雨水携带冲出,导致污染物出流浓度一直维持在较高水平,几乎没有初期效应.该出流过程经常发生在降雨历时短、降雨量小、降雨

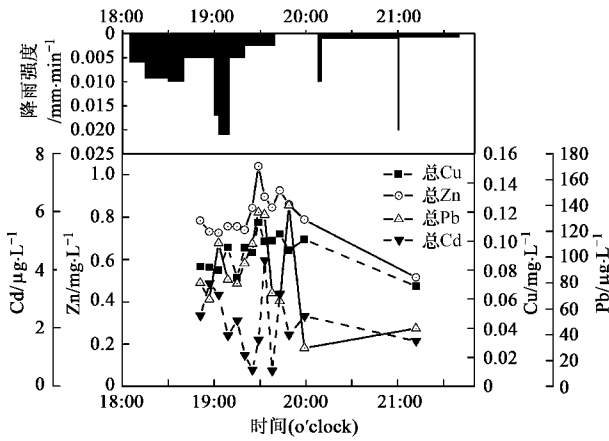


图1 2007-10-29 总重金属出流变化过程

Fig.1 Pollutographs of total heavy metal at 2007-10-29

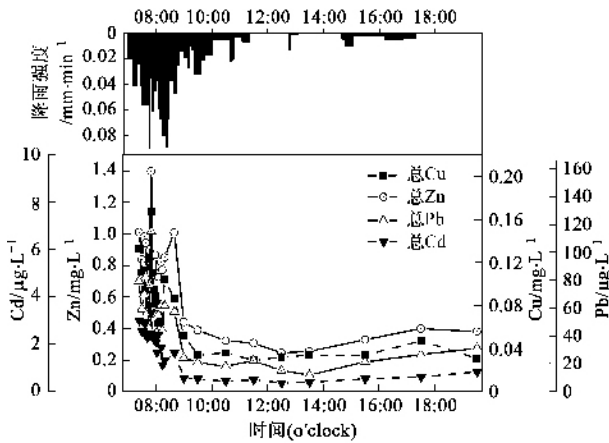


图2 2007-03-08 总重金属出流变化过程

Fig.2 Pollutographs of total heavy metal at 2007-03-08

强度小的降雨事件中.

由图 2 可见,2008-03-08 降雨事件中重金属浓度在经过初期短时间显著波动后迅速达到峰值,Cd、Cu、Pb 和 Zn 峰值浓度分别达到 $3.325\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.167\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $115.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $1.40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 其中 Pb 浓度相对较高,污染较重.随后,因前期冲刷充分,径流形成 1.5 h 后重金属浓度降至较低水平并趋于稳定,此时污染物浓度仅为峰值浓度的 $1/3\sim 1/4$.此外,径流后期重金属出流浓度又略微上升,可能是由于降雨历时长、强度较小时公路交通本身同步于降雨过程产生的污染^[4,10].这种出流过程,初期效应显著,初期污染物浓度高、污染重,频现于降雨历时长、降雨量大、前期强度大的单峰降雨事件中.

由图 3 可见,2008-04-05 降雨事件径流初期重金属浓度便达到峰值,随后逐渐降低并趋于稳定,整个过程初期效应显著.与 2008-03-08 降雨事件所不

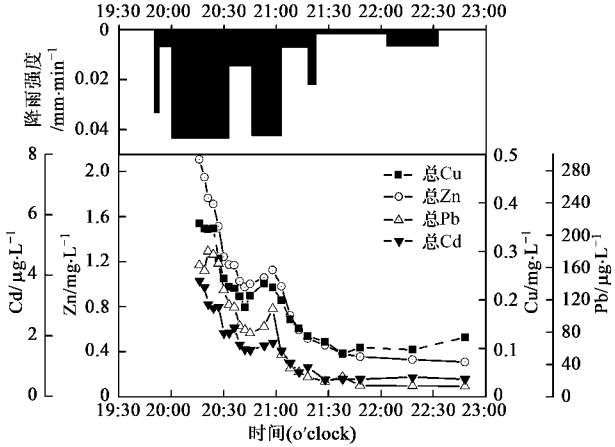


图3 2008-04-05 总重金属出流变化过程

Fig.3 Pollutographs of total heavy metal at 2008-04-05

同的是,该次出流过程中发生了“二次冲刷”现象^[11],表现在图 3 出流过程中重金属浓度出现第 2 个峰值.这主要是由于降雨强度瞬时变大,冲刷作用突然增强所致.这种变化过程常见于降雨历时短、降雨量较大具有双峰雨型的降雨事件中.

2.3 重金属事件平均浓度

受实验设备等条件的限制,本研究未能实测路面降雨径流流量,但采样时记录了降雨开始和径流形成的时间,进而消除了路面径流和降雨之间的滞后性,另外本研究中所研究对象为沥青路面,由于沥青路面在降雨时段内渗量与蒸发量很少,可以忽略不计,因此结果分析中扣除产流时间后,以降雨量权重代替路面径流量来计算路面径流水质的事件平均浓度.10 场降雨事件 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的事件平均浓度(EMC)见表 3.

由表 3 可知,10 场降雨事件中,2007-10-29 Pb 的 EMC 值超出《地表水环境质量标准》Ⅴ类标准值,2007-09-03、2008-02-25 和 2008-03-29 三场降雨事件 Pb 的 EMC 值超出Ⅲ类标准值,Pb 总体污染程度较严重,Pb 主要来源于汽油的使用,我国从 2000 年正式开始使用无铅汽油,但其仍含铅 $0.013\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,而且径流冲刷含带的路面沉积物能反映长久以来的污染情况^[12].Cd、Cu 和 Zn 的 EMC 值均低于Ⅲ类标准值,降雨事件总体污染程度较低.Lee 等^[13]研究表明,雨季初期的径流污染物浓度可达到末期浓度的 1.2~20 倍,不同时期降雨事件的污染物浓度差异较大.限于现场取样执行的季节,本研究所监测 10 场降雨事件获得的 EMC 范围较实际的年平均值尚存在一定的偏差,还有待进一步连续监测研究.

本研究高速公路雨水径流的重金属污染物

表 3 高速公路雨水径流重金属事件平均浓度(EMC)

Table 3 Heavy Metal EMCs of highway runoff

事件日期	Cd/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	Cu/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Pb/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	Zn/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
2007-09-03	2.34	0.048	67.2 ¹⁾	0.36
2007-10-29	2.18	0.099	120.6 ²⁾	0.88
2008-02-25	1.74	0.116	75.4 ¹⁾	1.03 ¹⁾
2008-03-06	2.02	0.150	28.8	0.65
2008-03-08	1.27	0.069	43.0	0.67
2008-03-21	0.89	0.085	34.1	0.55
2008-03-29	0.93	0.139	25.6	0.47
2008-04-05	1.59	0.197	78.1 ¹⁾	0.95
2008-04-15	0.55	0.050	30.8	0.42
2008-04-20	0.54	0.053	25.3	0.33
范围	0.54 ~ 2.34	0.048 ~ 0.197	25.3 ~ 120.6	0.24 ~ 1.03
平均值	1.41	0.101	52.9	0.56
中值	1.43	0.092	38.6	0.51
GB 3838-2002 V 类	10	1.0	100	2.0
GB 3838-2002 III 类	5	1.0	50	1.0

1) 超出《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) III 类标准值 2) 超出《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) V 类标准值

EMC 平均值与国内外同类研究结果比较见表 4。从中可知,与国内同类研究相比,本研究 Cd、Cu 和 Zn EMC 值在同类研究结果范围内,高于澳门和京珠高速的监测结果,低于广州城区道路,而 Pb 均低于三者。本研究的对象是高速公路雨水径流,与高速公路相比,城市路面人为活动的影响较大,因而其径流污染浓度要高于本研究。与国外同类研究相比,Cd 和 Pb 污染程度较低,Cd 略高于文献[16]对法国南特的

实测值而低于其他国外研究结果,Pb 的 EMC 范围与文献[2]所得 Pb 的 EMC 范围接近,而其平均值均低于国外同类研究;Cu 和 Zn EMC 值则与国外同类研究结果较为接近。这是由于影响路面径流污染物浓度的因素较多,主要有路面材料、用地类型、交通量、大气沉降、降雨特征和路面清扫方式等,且作用机制复杂,故本研究所得结果与国内外同类研究存在一定差异。

表 4 高速公路雨水径流重金属事件平均浓度与国内外同类研究的比较

Table 4 Statistical Heavy Metal EMCs of Highway runoff

地点(公路)	汇水面积/ m^2	用地类型	Cd/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	Cu/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Pb/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	Zn/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	文献
美国	—	居住	—	0.033	144	0.14	[1] ²⁾
德国 A81	13 000	农村	5.9	0.097	202	0.36	[14]
德国 A6	25 200	农村	5.9	0.117	245	0.62	
德国 A8	250 000	农村	2.8	0.058	163	0.32	
德国 Weins	550	—	0.9	0.049	137	0.44	[15] ²⁾
美国辛辛那提 Millcreek	300	城市	5 ~ 11	0.043 ~ 0.325	37 ~ 97	0.46 ~ 15.2	[2] ¹⁾
法国南特	3 200	农村旁道	1	0.045	58	0.36	[16] ²⁾
伊朗 Isfahan	2 000 000	—	—	—	314	0.45	[17] ²⁾
美国马利兰 Mount Rainer	5 600	郊区	35	0.11	220	1.18	[11] ²⁾
中国澳门孙逸仙大马路	3 875	商住	—	0.047	122	0.438	[7]
中国广州城区道路	120	居住/交通	1.6	0.16	115.2	2.06	[6] ²⁾
中国广州京珠高速	268.5	菜地	0.7	0.047	70.5	0.29	[8]
中国南京机场高速	960	居住/交通	0.54 ~ 2.34	0.048 ~ 0.197	25.3 ~ 120.6	0.24 ~ 1.03	本研究 ¹⁾
中国南京机场高速	960	居住/交通	1.41	0.101	52.9	0.56	本研究 ²⁾

1) EMC 范围 2) EMC 平均值

2.4 重金属污染影响因素分析

本研究仅以南京机场高速禄口令桥段为对象,路面材料、用地类型、交通量、大气沉降和路面清扫

方式等径流水质影响因素较稳定,故表 5 列出由 SPSS11.5 统计软件计算出的不同降雨特征与径流重金属之间的 Pearson 相关系数,评价各降雨特征对径

流重金属的影响.

表 5 高速公路雨水径流重金属浓度与降雨特征的 Pearson 相关系数

Table 5 Pearson correlation values of heavy metal EMC and rainfall characteristics				
降雨特征	Cd	Cu	Pb	Zn
降雨量	- 0.178	- 0.601 ¹⁾	- 0.253	- 0.424
最大降雨强度	- 0.425	- 0.419	- 0.402	- 0.533
平均降雨强度	- 0.096	- 0.41	- 0.086	- 0.363
前期晴天数	0.186	0.383	0.181	0.631 *

* 在 0.05 水平上显著相关

由表 5 可知,降雨量、最大降雨强度和平均降雨强度与 4 种重金属均呈负相关性,而与前期晴天数呈正相关性.这符合前期晴天数影响重金属在路面的累积,降雨量和降雨强度影响重金属的雨天冲刷出流.降雨量与 Cu 和前期晴天数与 Zn 的相关系数分别达 - 0.601 和 0.631,两者均在 0.05 水平上显著相关.Cu 主要以溶解态形式存在于径流中^[2],降雨量对 Cu 的溶解出流影响较大.Zn 主要来源于轮胎磨损^[2],前期晴天数对 Zn 在路面的积累影响较大.降雨强度在降雨事件中变化较复杂,对 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的影响还有待进一步研究.

3 结论

(1)不同类型降雨事件重金属污染出流规律不同.降雨历时短、降雨量小、降雨强度小的降雨事件重金属浓度在一定范围内波动,在整个径流过程中始终维持在较高水平.降雨历时长、降雨量大、前期强度大的降雨事件初期污染物浓度高、污染重,初期效应显著.降雨历时短、降雨量较大具有双峰雨型的降雨事件中重金属出流存在‘二次冲刷’现象.

(2)Cd、Cu、Pb 和 Zn 的 EMC 中值浓度分别为 1.43 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.092 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、38.6 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.51 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,Pb 总体污染程度较严重.Cd、Cu 和 Zn 与国内同类研究相比污染程度较为接近,而 Pb 低于国内同类研究.Cu 和 Zn 与国外同类研究相比污染程度较为接近,而 Cd 和 Pb 污染程度较低.

(3)降雨特征与径流重金属相关性分析表明,降雨量对 Cu 的溶解出流影响较大,前期晴天数对 Zn 在路面的积累影响较大.

参考文献:

[1] US EPA. Results of national urban runoff program [R]. Washington, DC: Water Planning Division, U. S. Environmental Protection Agency, 1983.

[2] Sansalone J J, Buchberger S G. Partitioning and First Flush of Metals in Urban Roadway Storm Water [J]. J Environ Eng, 1997, 123(2): 134-143.

[3] Dean C M, Sansalone J J, Cartledge F K, et al. Influence of Hydrology on Rainfall-Runoff Metal Element Speciation [J]. J Environ Eng, 2005, 131(4): 632-642.

[4] 赵剑强,闫敏,刘珊,等.城市路面径流污染的调查[J].中国给水排水,2001,17(1):33-35.

[5] 张亚东,车伍,刘燕,等.北京城区道路雨水径流污染指标相关性分析.城市环境与城市生态,2002,16(6):182-184.

[6] 甘华阳,卓慕宁,李定强,等.广州城市道路雨水径流的水质特征[J].生态环境,2006,26(5):969-973.

[7] 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.

[8] 甘华阳,卓慕宁,李定强,等.公路路面径流重金属污染特征[J].城市环境与城市生态,2007,20(3):34-37.

[9] Clesceri L S, Greenberg A E, Eaton A D. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. (20th Ed). Washington, D. C., U. S. A.: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 1998.

[10] 赵剑强,刘珊,邱立萍,等.高速公路路面径流水质特性及排污规律[J].中国环境科学,2001,21(5):445-448.

[11] Flint K R, Davis A P. Pollutant Mass Flushing Characterization of Highway Stormwater Runoff from an Ultra-Urban Area[J]. J Environ Eng, 2007, 133(6): 616-626.

[12] Charlesworth S, Everett M, McCarthy R, et al. Comparative study of heavy metal concentration and distribution in deposited street dusts in a large and a small urban area: Birmingham and Coventry, West midlands, UK[J]. Environ Int, 2003, 29: 563-573.

[13] Lee H, Lau S, Kayhanian M, et al. Seasonal first flush phenomenon of urban stormwater discharges [J]. Water Res, 2004, 38(19): 4153-4163.

[14] Stotz G. Investigations of the properties of the surface water run-off from federal highways in the FRC[J]. Sci Total Environ, 1987, 59: 329-337.

[15] Stotz G, Krauth K. The pollution of effluents from pervious pavements of an experimental highway section: first results [J]. Sci Total Environ, 1994, 146-147: 465-470.

[16] Legret M, Pagotto C. Evaluation of pollutant loadings in the runoff waters from a major rural highway [J]. Sci Total Environ, 1999, 235(1-3): 143-150.

[17] Taebi A, Droste R L. Pollution loads in urban runoff and sanitary wastewater [J]. Sci Total Environ, 2004, 327(1-3): 175-184.