

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2011.10.025

高速公路路面径流污染负荷 初期效应的数学解析

李 华¹, 陈玉成², 杨志敏², 毛彦景², 何 娟²

(1. 交通运输部科学研究院, 北京 100029; 2. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400716)

摘要: 在 Geiger 定义的基础上, 通过简易测定雨强, 引入综合污染负荷, 建立了高速公路路面径流初期效应大小、方向、时段的数量化判定方法。以 G75 兰海高速重庆段为例, 研究了 2009-04-30、2009-06-09、2009-08-29 等 3 场降雨事件的初期效应, 发现 2009-04-30 降雨有明显的初期效应, 2009-06-09 降雨则没有, 2009-08-29 降雨则处于临界状态, 2009-04-30、2009-08-29 这 2 场降雨的初期效应分别为 68.11% 和 50.48%, 其相应的初期效应时段分别为 15 min 和 25 min。

关键词: 环境工程; 路面径流; 初期效应; 污染负荷; 高速公路

中图分类号: X734.03

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2011) 10-0141-05

Mathematical Analysis of Pollutant Loading in First Flush of Expressway Runoff

LI Hua¹, CHEN Yucheng², YANG Zhimin², MAO Yanjing², HE Juan²

(1. China Academy of Transportation Science, Beijing 100029, China;

2. College of Resources & Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: The quantity method for determining the first flush effect of expressway surface runoff properties such as amount, direction and period of time was established by simply measuring rain strength and calculating pollution load based on Geiger's definition about the first flush effect. The method developed in this paper was used to investigate the first flush effect of rainfall in April 30, June 9 and August 29, 2009 in the Chongqing section of G75 Lanzhou-Chongqing expressway. It is found that (1) the first flush effect of rain event in April 30, 2009 was occurred remarkably, while the effect was not occurred in June 9, 2009, and the effect in August 29, 2009 was in critical state; (2) the first flush effect of rain events in April 30 and August 29, 2009 are 68.11% and 50.48% respectively, and their period of time are 15 min and 25 min respectively.

Key words: environmental engineering; road runoff; first flush effect; pollutant loading; expressway

0 引言

高速公路迅猛发展, 路面径流对周边环境的影响也日益凸现^[1-3]。公路表面在干燥期能够累积大量的悬浮颗粒、重金属和石油类等有机污染物质, 这些污染物在降雨期间能够被路面的雨水溶解、冲刷和运移, 造成周边接纳水体或路边土壤质量的下

降^[4-5]。公路径流污染在排放时间上不连续, 排放地点上不集中并强烈依赖于当地的气候条件, 因而是一种典型的非点源污染源^[6-7]。国外一些发达国家对公路降雨径流已经开展了 30 多年的研究, 进行了广泛的径流水质特征调查^[8], 为评价公路径流对环境的影响, 径流中污染物累积、排放和迁移过程的模拟, 污染负荷估算以及控制措施的设计和实施的

收稿日期: 2010-03-31

基金项目: 交通运输部西部交通建设科技项目 (20113186701290)

作者简介: 李华 (1976-), 女, 吉林长白人, 副研究员. (lihua8135@126.com)

提供了必要的数据和指导^[9]。

大量的研究表明,路面径流具有明显的初期效应,也称为初期冲刷现象(first flush),是指暴雨径流初始阶段的水质最差,污染物浓度远高于暴雨后期冲刷的径流污染物浓度^[10]。初期效应对于高速公路径流污染控制和治理具有显著的指导作用。一般地,评价是否存在初期效应现象,通常依赖于场次暴雨累积污染物总量与累积径流总量的曲线,即曲线的起始坡度应大于 45°,偏离 45°越大,初期效应越显著^[11-14]。也有研究认为只有整个事件初期 30% 的径流量运移了至少 80% 的污染负荷时才算出现明显的初期效应^[15-17]。Geiger 虽然给出了初期效应的明确定义,但现实中难以直接获取径流总量,尤其是在测定高速公路径流时的交通与雷击风险陡增的情况下,寻找一种更为简易、安全、定量的判定方法就显得尤为重要了^[18-19]。

本研究以 3 场重庆高速公路路面径流为例,在 Geiger 定义的基础上,通过简易测定雨强,引入综合污染负荷,定量判定初期效应的大小、方向及其发生的时段,为针对性地提出重庆地区高速公路路面径流污染控制的对策与措施提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 样品采集

选定 G75 兰海高速为研究对象,该路段 2002 年 6 月建成通车,双向 4 车道,车流量 32 000 veh/d,沥青路面。从 2009 年 1—9 月期间研究区域的较大降雨中,选取 4 月 30 日(春季)、6 月 9 日(夏季)、8 月 29 日(秋季)3 次降雨,在径流形成的 1.0~2.0 h 内,通过采样点附近的导流孔,分别间隔一定的时间,用聚乙烯瓶采集径流水样。

由于条件限制,未能实测路面降雨径流流量,但同步记录了降雨开始时间、径流形成时间、径流终止时间,并使用简易烧杯法,测定了各时段的降雨强度。

1.2 分析测试

路面径流样品的测定中,SS 用重量法(GB1901—89),TN 用紫外分光光度法(GB11894—89),TP 用钼酸铵分光光度法(GB11893—89),COD 用重铬酸盐法(GB11914—89),BOD5 用稀释接种法(GB7488—87),Cu、Zn、Pb 用原子吸收分光光度法(GB7475—87),石油类用红外分光光度法(GB/T16488—1996)。

2 径流初期效应判定方法的建立

2.1 建立监测原始数据结构

分别在降雨 t_1 、 t_2 、 $\dots$ 、 t_n 时刻,监测路面径流中 m 种污染物的浓度 C_{ij} 和相应的雨量 R_j ,得到某次降雨事件的监测原始数据(表 1)。

表 1 某次降雨事件的监测数据结构

Tab. 1 Monitoring data structure of a rainfall event

污染物	采样时刻				GB8978—1996 标准
	t_1	t_2	$\dots$	t_n	
降雨量	R_1	R_2	$\dots$	R_n	
污染物 1 浓度	C_{11}	C_{12}	$\dots$	C_{1n}	S_1
污染物 2 浓度	C_{21}	C_{22}	$\dots$	C_{2n}	S_2
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
污染物 m 浓度	C_{m1}	C_{m2}	$\dots$	C_{mn}	S_m

2.2 累积雨强指数

Geiger 模型中的累积径流总量在高速公路中难以现场获取,而在径流面积一定的情况下,径流量与降雨强度成正比,因此使用累积雨强指数予以替代。其方法为先计算各时段的平均降雨强度

$$q_j = \frac{\Delta R_j}{\Delta t_j} = \frac{R_{j+1} - R_j}{t_{j+1} - t_j} \quad (1)$$

计算累积降雨强度

$$Q_j = \sum_{k=1}^j q_k \quad (2)$$

将 Q_j 归一化成为雨强指数,即

$$w_{Qj} = \frac{Q_j}{\sum_{j=1}^n Q_j} \times 100\% \quad (3)$$

最后计算累积雨强指数

$$U_j = \sum_{k=1}^j w_{Qk} \quad (4)$$

2.3 累积污染指数

Geiger 模型中的累积污染物总量一般采用各单项污染物,因此得到的累积污染物总量与累积径流总量的曲线不止一条^[20-21]。为此,引入“综合污染负荷”概念,将多个污染物的负荷综合成综合污染指数,进而计算累积污染指数,以代替 Geiger 模型中的累积污染物总量。

先计算径流中各时刻、各污染物的加权浓度

$$C_{wij} = \frac{q_j C_{ij}}{\sum_{j=1}^n q_j} \quad (5)$$

根据污水综合排放标准(GB8978—1996)计算

各时刻、各污染物的单项污染指数

$$I_{ij} = \frac{C_{wij}}{S_i} \quad (6)$$

计算各时刻径流污染的综合污染负荷, 即各污染物的平均污染指数

$$I_j = \frac{\sum_{i=1}^m I_{ij}}{m} \quad (7)$$

将 I_j 归一化成为污染指数

$$w_{fj} = \frac{I_j}{\sum_{j=1}^n I_j} \times 100\% \quad (8)$$

最后计算累积污染指数

$$V_j = \sum_{k=1}^j w_{fk} \quad (9)$$

2.4 降雨径流初期效应的方向、大小和时段

绘制“累积雨强指数 U - 累积污染指数 V ”曲线 (图 1)。初期效应的方向根据图 1 的曲线开口与 Bertrand 判定条件予以确定, 即开口朝下且初期 30% 的径流量至少运移 80% 的污染负荷时, 表现为明显的初期效应, 否则没有。初期效应的大小根据累积雨强指数 - 累积污染指数曲线和标准曲线的相异程度来确定。设各时刻的累积雨强指数为 U_1 、 U_2 、 $\dots$ 、 U_n , 累积污染指数为 V_1 、 V_2 、 $\dots$ 、 V_n , 则

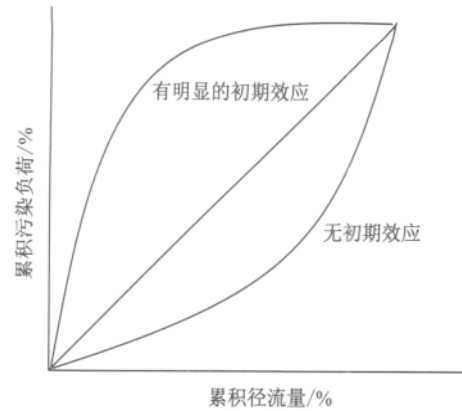


图 1 降雨径流的初期效应分析曲线

Fig. 1 Analysis curve of first flush effect of rainfall runoff

初期效应大小为:

$$P = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (U_j^2 - V_j^2)}{n}} \quad (10)$$

初期效应的时段根据图 1 偏离 45° 的最大值的点予以确定, 即 $\text{Max} (U_j - V_j)$ 对应的时刻。

3 重庆高速公路径流初期效应的定量判定

根据 Geiger 的定义, 确定 2009-04-30、2009-06-09 和 2009-08-29 这 3 场降雨是否存在初期效应。3 场降雨的原始监测数据见表 2、表 3。

表 2 2009-04-30 降雨事件的监测结果 (单位: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

Tab. 2 Monitoring result of rainfall event in April 30, 2009 (unit: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

采样时刻	2:50	2:55	3:00	3:05	3:10	3:20	3:30	3:40	3:50
雨强	32.80	40.50	33.70	24.00	14.10	17.30	15.00	12.70	10.20
SS	880.00	1140.00	550.00	320.00	230.00	110.00	90.00	70.00	54.00
COD	575.88	439.81	208.83	126.28	85.49	60.80	31.10	33.00	22.70
BOD ₅	42.94	44.14	22.49	17.87	12.94	11.08	10.17	9.24	7.75
TN	8.42	7.18	3.40	2.83	2.35	2.11	1.82	1.75	1.66
TP	0.424	0.382	0.207	0.107	0.082	0.078	0.047	0.014	0.009
Cu	0.210	0.206	0.121	0.046	0.028	0.022	0.011	0.009	0.003
Zn	1.680	1.611	0.865	0.554	0.408	0.312	0.266	0.152	0.108
Pb	0.908	0.814	0.525	0.370	0.205	0.174	0.121	0.074	0.055
石油类	3.732	4.005	3.082	2.573	1.329	0.857	0.532	0.473	0.256

注: 雨强单位为 $\times 10^{-3} \text{mm/min}$, 下同。

根据前面介绍的方法, 绘制累积雨强指数 U - 累积污染指数 V 曲线 (图 2、图 3)。本研究中, 3 场降雨的曲线开口均朝下, 同时按照内插法计算, 3 场降雨初期 30% 的径流量分别运移 92.21%、69.37%、78.75% 的污染负荷。综合 2 个条件,

2009-04-30 降雨有明显的初期效应, 2009-06-09 降雨无明显的初期效应, 2009-08-29 降雨则处于临界的初期效应。

根据监测结果与图 2~图 4, 2009-04-30、2009-08-29 这 2 场降雨的初期效应分别为 68.11%

表 3 2009-06-09 降雨事件的监测结果 (单位: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
Tab. 3 Monitoring result of rainfall event in June 9, 2009 (unit: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

采样时刻	10:25	13:30	10:35	10:40	10:50	11:00	11:10	11:20
雨强	55.00	188.00	212.00	165.00	238.00	127.00	80.00	31.00
SS	310.00	480.00	680.00	320.00	570.00	300.00	270.00	190.00
COD	205.70	328.20	382.70	205.60	269.00	149.40	127.00	109.50
BOD ₅	8.43	29.74	34.34	19.82	31.56	11.38	7.54	5.66
TN	6.58	9.47	10.61	8.92	9.24	6.07	4.77	3.55
TP	0.250	0.420	0.780	0.450	0.420	0.350	0.280	0.110
Cu	0.055	0.114	0.186	0.102	0.161	0.088	0.053	0.032
Zn	0.593	1.135	1.616	0.788	1.588	0.617	0.441	0.280
Pb	0.154	0.297	0.611	0.206	0.375	0.260	0.174	0.130
石油类	0.692	1.028	1.266	0.845	0.863	0.604	0.472	0.441

表 4 2009-08-29 降雨事件的监测结果 (单位: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
Tab. 4 Monitoring result of rainfall event in August 29, 2009 (unit: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

采样时刻	4:45	4:50	4:55	5:00	5:10	5:20	5:30	5:40	5:50	6:00
雨强	26.67	61.67	250.00	156.67	96.67	51.67	50.00	156.67	13.33	3.33
SS	120.00	80.00	100.00	60.00	100.00	60.00	60.00	40.00	20.00	20.00
COD	555.11	499.60	500.60	476.04	496.20	472.84	482.83	421.32	484.82	379.79
BOD ₅	2.71	3.08	3.39	3.23	3.55	3.65	3.14	3.03	3.57	3.57
TN	6.40	5.38	6.71	4.05	2.82	3.74	5.07	2.72	1.69	2.00
TP	0.047	0.078	0.101	0.048	0.073	0.067	0.058	0.061	0.045	0.049
Cu	0.034	0.057	0.024	0.041	0.055	0.068	0.074	0.036	0.015	0.043
Zn	0.417	0.749	0.882	0.665	0.812	0.464	0.394	0.420	0.253	0.537
Pb	0.654	0.594	0.522	0.793	0.548	0.778	0.758	0.727	0.658	0.774
石油类	5.138	3.339	4.681	6.362	4.682	3.967	5.672	6.631	4.592	6.341

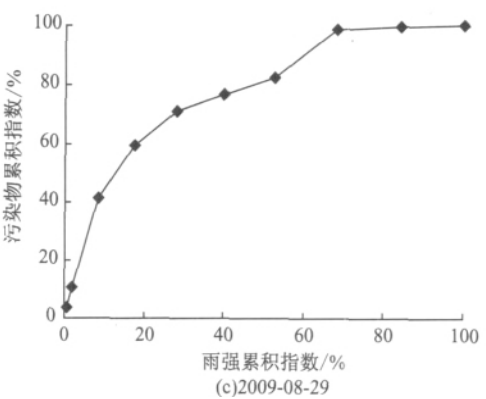
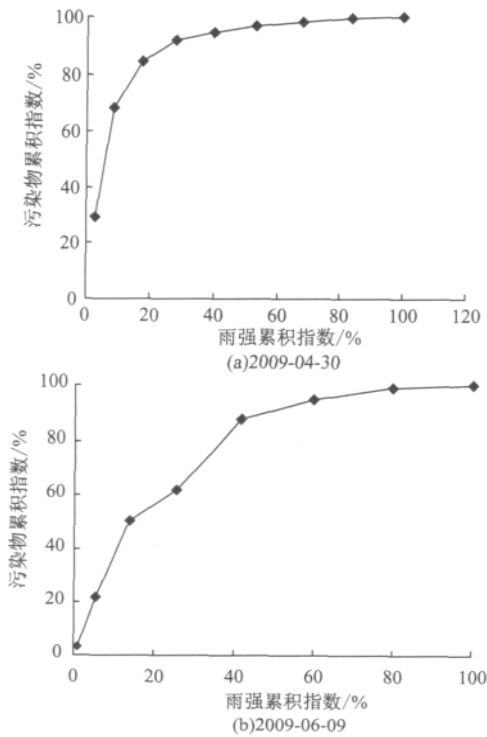


图 2 3 次降雨的初期效应

Fig. 2 First flush effect of 3 rain events

和 50.48%。显然 2009-04-30、2009-08-29 降雨的初期效应时段分别为 15 min 和 25 min。

4 结论

在 Geiger 定义的基础上, 简易测定时段降雨量, 替代累积径流总量; 引入综合污染负荷, 替代累积污染物总量, 从而建立了高速公路路面径流初期效

应大小、方向、时段的定量化方法,克服了 Geiger 模型中累积径流总量难以获取以及单一污染物判定的弊端,其物理含义明确,可操作性强。

在 G75 兰海高速重庆段,2009-04-30 降雨有明显的初期效应,2009-06-09 降雨没有,2009-08-29 降雨则处于临界状态,2009-04-30、2009-08-29 这 2 场降雨的初期效应分别为 68.11% 和 50.48%,其相应的初期效应时段分别为 15 min 和 25 min。

参考文献:

References:

- [1] 陈莹. 高速公路路面径流污染特性的探讨 [J]. 交通部上海船舶运输科学研究所学报, 2004, 27 (1): 41-45.
CHEN Ying. Study on the Pollution Characteristics of Highway Surface Runoff [J]. Journal of Shanghai Scientific Research Institute of Shipping, 2004, 27 (1): 41-45.
- [2] 陈玉成, 李章平, 李章成, 等. 城市地表径流污染及其全过程削减 [J]. 水土保持学报, 2004, 18 (3): 133-136.
CHEN Yucheng, LI Zhangping, LI Zhangcheng, et al. Contamination of Urban Surface Runoff and Its Whole Course Minimization [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2004, 18 (3): 133-136.
- [3] 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.
ZHAO Jianqiang, LIU Shan, QIU Liping, et al. The Characteristics of Expressway Runoff Quality and Pollutants Discharge Rule [J]. China Environmental Science, 2001, 21 (5): 445-448.
- [4] 李贺, 石峻青, 沈刚, 等. 高速公路雨水径流重金属污染特性研究 [J]. 环境科学, 2009, 30 (6): 1621-1625.
LI He, SHI Junqing, SHEN Gang, et al. Characteristics of Metals Pollution in Expressway Stormwater Runoff [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2009, 30 (6): 1621-1625.
- [5] 陆宇, 张雪, 李贺. 高速公路路面径流污染特征分析 [J]. 现代交通技术, 2007, 4 (6): 81-84.
LU Yu, ZHANG Xue, LI He. Analysis on the Characteristics of Highway Stormwater Runoff [J]. Modern Transportation Technology, 2007, 4 (6): 81-84.
- [6] 李华, 陈玉成, 杨志敏, 等. 高速公路路面径流污染影响因素的初步分析 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (5): 146-152.
LI Hua, CHEN Yucheng, YANG Zhimin, et al. Preliminary Analysis of Influencing Factors of Highway Runoff in Chongqing [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (5): 146-152.
- [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.
HUANG Jinliang, DU Pengfei, AO Chitan, et al. Characterization of Urban Roadway Runoff in Macau [J]. China Environmental Science, 2006, 26 (4): 469-473.
- [8] MANGANI G, BERLONI A, BELLUCCI F, et al. Evaluation of the Pollutant Content in Road Runoff First Flush Waters [J]. Water, Air & Soil Pollution, 2005, 160: 213-228.
- [9] 赵金辉, 陈卫. 高速公路降雨径流污染特征及其污染控制 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7 (11): 66-70.
ZHAO Jinhui, CHEN Wei. Highway Runoff Pollution Characteristics and Control Measures [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2006, 7 (11): 66-70.
- [10] GUPTA K, SAUL A J. Specific Relationships for the First Flush Load in Combined Sewer Flows [J]. Water Research, 1996, 30 (5): 1244-1252.
- [11] GEIGER W. Flushing Effects in Combined Sewer Systems [C] // Proceedings of the 4th International Conference on Urban Storm Drainage. Lausanne, Switzerland [s. n.], 1987: 40-46.
- [12] BRUND M, BYRON N L. Guide for Mitigation of Highway Stormwater Runoff Pollution [J]. The Science of the Total Environment, 1987, 59: 467-476.
- [13] DRAPPER D, TOMLINSON R. Pollutant Concentrations in Road Runoff: Southeast Queensland Case Study [J]. Journal of Environmental Engineering, 2000, 126 (4): 313-320.
- [14] LEE B C, MATSUI S, SHIMIZU Y, et al. A New Installation for Treatment of Road Runoff: Up-flow Filtration By Porous Polypropylene Media [J]. Water Science and Technology, 2005, 52 (12): 225-232.
- [15] CHARBENEAU R J, BARRETT M E. Evaluation of Methods for Estimating Stormwater Pollutant Loads [J]. Water Environment Research, 1998, 70 (7): 1295-1302.

(下转第 152 页)

- of Re-vegetation Quality on Highway Slope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28 (1): 115 - 118.
- [13] 袁黎, 陆键, 朱雷雷, 等. 高速公路绿化评价指标体系及评价方法研究 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (3): 150 - 158.
- YUAN Li, LU Jian, ZHU Leilei, et al. Research on the Indexes and Evaluation Method of Expressway Green Landscape [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (3): 150 - 158.
- [14] 胥晓刚. 高速公路路域生态恢复研究 [D]. 四川: 四川农业大学, 2004.
- XU Xiaogang. Ecological Restoration of the Freeway [D]. Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2004.
- [15] 黄建辉, 韩兴国. 生物多样性和生态系统稳定性 [J]. 生物多样性, 1995, 3 (1): 31 - 37.
- HUANG Jianhui, HAN Xingguo. Biodiversity and Ecosystem Stability [J]. Chinese Biodiversity, 1995, 3 (1): 31 - 37.
- [16] 王国宏. 再论生物多样性与生态系统的稳定性 [J]. 生物多样性, 2002, 10 (1): 126 - 134.
- WANG Guohong. Further Thoughts on Diversity and Stability in Ecosystems [J]. Chinese Biodiversity, 2002, 10 (1): 126 - 134.
- [17] 李鹏, 赵忠. 植被根系与生态环境相互作用机制研究进展 [J]. 西北林学院学报, 2002, 17 (2): 26 - 32.
- LI Peng, ZHAO Zhong. Advances on the Interactional Mechanism between Root System and Eco-environment [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2002, 17 (2): 26 - 32.
- [18] 龙健, 江新荣, 邓启琼, 等. 贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究 [J]. 土壤学报, 2005, 42 (3): 419 - 427.
- LONG Jian, JIANG Xinrong, DENG Qiqiong, et al. Characteristics of Soil Rocky Desertification in the Karst Region of Guizhou Province [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42 (3): 419 - 427.
- [19] 史文中, 贺志勇, 张肖宁. 公路景观设计与评价 [J]. 中外公路, 2002, 22 (5): 1 - 3.
- SHI Wenzhong, HE Zhiyong, ZHANG Xiaoning. Landscape Design and Evaluation of Highway [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2002, 22 (5): 1 - 3.
- [20] 汪树玉, 刘国华. 系统分析 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002: 316 - 327.
- WANG Shuyu, LIU Guohua. Systems Analysis [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2002: 316 - 327.
- [21] 陆旭东, 陈建业, 韩继国, 等. 长白山区公路风化岩边坡客土喷播技术研究 [J]. 公路, 2009, (10): 216 - 221.
- LU Xudong, CHEN Jianye, HAN Jiguo, et al. Study on Spraying Technology of Highway Weathered Rock Slope in Changbai Mountain [J]. Highway, 2009 (10): 216 - 221.

(上接第 145 页)

- [16] LEE J H, BANG K W, KETCHUM L H, et al. First Flush Analysis of Urban Storm Runoff [J]. The Science of Total Environment, 2002, 293: 163 - 175.
- [17] YOUSEF Y A, HVITVED-JACOBSEN T, WANIELISTA M P, et al. Removal of Contaminants in Highway Runoff Flowing Through Swales [J]. The Science of the Total Environment, 1987, 59: 391 - 399.
- [18] WU J S, ALLAN C J, SAUNDERS W L, et al. Characterization and Pollutant Loading Estimation for Highway Runoff [J]. Environment Engineering, ASCE, 1998, 124 (7): 584 - 592.
- [19] SANSALONE J J, BUCHBERGER S G. Partitioning and First Flush of Metals in Urban Roadway Storm Water [J]. Environment Engineering, ASCE, 1997, 123 (2): 134 - 143.
- [20] STOTZ G. Investigations of the Properties of the Surface Water Run-off from Federal Highways in the FRG [J]. The Science of the Total Environment, 1987, 59: 329 - 337.
- [21] 甘华阳, 卓慕宁, 李定强, 等. 公路暴雨径流的水质及其污染负荷的初期冲刷分析 [J]. 公路, 2007 (8): 193 - 198.
- GAN Huayang, ZHUO Muning, LI Dingqiang, et al. Analysis of Water Quality and Pollutant Load First Flush of Highway Stormwater Runoff [J]. Highway, 2007 (8): 193 - 198.