

城市道路暴雨径流水质特性及控制对策^{*}

于 慧¹ 刘 政² 王书敏^{1,3#} 郝有志³ 蒲清三¹

(1. 重庆文理学院环境材料与修复技术重庆市重点实验室, 重庆 402160; 2. 重庆市南岸区环境监测站, 重庆 400060;
3. 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要 由于暴雨径流冲刷引起的城市面源污染已成为接纳水体污染的主要来源。在综合国内外相关文献的基础上, 分析了城市道路暴雨径流中污染物的赋存形态, 总结了不同环境背景下城市道路暴雨径流污染物的浓度水平, 阐述了城市道路暴雨径流水质的影响因素, 论述了城市道路暴雨径流污染的控制对策, 指出合理确定初期暴雨径流控制量、科学选取/设计控制技术、将暴雨径流控制措施与城市规划有机结合构建调控网络是城市道路暴雨径流污染控制的可行途径。

关键词 暴雨径流 水质 特性 控制对策

Characteristics and control measures of urban road stormwater runoff YU Hui¹, LIU Zheng², WANG Shumin^{1,3}, HAO Youzhi³, PU Qingsan¹. (1. Chongqing Key Laboratory of Environmental Material and Restoration Technology, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160; 2. Environmental Monitoring Station of Chongqing Nan'an District, Chongqing 400060; 3. Key Laboratory of Eco-Environment of Three Gorges Region of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045)

Abstract: Urban nonpoint source pollution caused by rainstorm runoff washing off has been the main pollution source of receiving water body. Based on related literature at home and abroad, the pollutant composition in urban rainstorm runoff as well as their pollution levels under different environment is analyzed. Meanwhile, the factors influencing the water quality of rainstorm runoff are also discussed. Control measures of urban rainstorm runoff are also discussed. Determining initial runoff volume reasonably, selecting and designing control technologies scientifically and integrating urban planning and urban rainstorm runoff control technologies together to form regulatory network would be the feasible way for the control of urban rainstorm runoff pollution.

Keywords: rainstorm runoff; water quality; characteristic; control measures

随着城市化的飞速发展, 地壳表层用地属性构成被快速改变, 硬覆盖率快速提升, 由此引发的城市暴雨径流污染已成为接纳水体的主要污染源; 在城市区域, 交通道路面积广, 负荷重, 道路暴雨径流污染更为突出。国外对于城市道路暴雨径流污染的研究起步较早, 而国内由于长期困于点源污染的整治, 直到 20 世纪 70 年代才开始着手开展针对城市道路暴雨径流的研究^[1]。随着对城市道路暴雨径流污染认识的不断深入, 很多城市先后进行了城市道路暴雨径流污染的研究工作, 如上海^{[2]873}、郑州^{[3]40}、广州^[4]、武汉^{[5]464}、厦门^{[6]333}、重庆^{[7]1445} 等大型城市, 研究结果大大丰富了国内城市道路暴雨径流的基础资料, 及时总结已有的研究成果, 对于城市道路暴雨径流研究的纵深推进很有必要。城市交通道路是城市

区域最主要的不透水下垫面类型, 其早期污染物累积量大、来源广, 由此导致城市道路暴雨径流污染物浓度更高, 污染成分更复杂。鉴于此, 笔者针对城市道路暴雨径流水质的研究现状进行了综合阐述, 以期在城市道路暴雨径流污染的有效防治提供参考。

1 城市道路暴雨径流水质特性研究

1.1 城市道路暴雨径流污染物赋存形态研究

了解城市道路暴雨径流污染物的赋存形态是进行污染控制的首要依据。多数研究认为, 有机物、重金属、磷等污染物主要以固体形式存在, 如李立青等^{[8]2898} 在武汉汉阳城区的调查发现, 城市地表径流颗粒态 TN、COD 和 TP 分别占其总浓度的 65%、58% 和 92%。ZHAO 等^{[5]466} 在武汉动物园进行的

第一作者: 于 慧, 女, 1982 年生, 硕士研究生, 研究方向为城市水环境安全保障。[#] 通讯作者。

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (No. 51409030); 重庆市委项目 (No. cstc2014jcyjA20022); 重庆市教委科技项目 (No. KJ1401120); 重庆文理学院项目 (No. Z2013CH03)。

表 1 城市道路暴雨径流水质统计
Table 1 Statistics of water quality of rainstorm runoff from urban road

参考文献	TSS /(mg·L ⁻¹)	COD /(mg·L ⁻¹)	TN /(mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N /(mg·L ⁻¹)	TP /(mg·L ⁻¹)	Cu /(μg·L ⁻¹)	Zn /(μg·L ⁻¹)	Pb /(μg·L ⁻¹)	Cd /(μg·L ⁻¹)
[11]	10~360	10~300	0~2.54 ¹⁾		0~0.19	0~130.4	0~220.5	0~42.5	0~2
[12]						57.5~159	156.5~634.8	9.2~88.0	
[13]	355	71 ²⁾				191	847	56	0.5
[14]	163	105		0.9	0.29	97	407	170	1.9
[4]	415.7	308	7.32		0.39	140	1 760	118.2	1.6
[15]	394.6	350.9	11.74		0.45				
[16]	42.45~1 487.46	29.07~1 014.55	0.94~21.18	1.16~19.85	0.03~0.56		10~55	3~90	
[17]		122~643		3.7~18.4	0.37~6.50	30~90	540~1 540	4~30	
[18](美国)	59~215	48~130			0.18~0.42	15~43	111~222	13~234	
[18](挪威)	100~150	85~100	2.0~3.0		0.4	50~100	200~500	15~70	
[18](德国)	66~937	63~146				97~104	120~2 000	11~525	
[18](意大利)	140	129				19	81	13	
[19]	92.5	131				61	550	133	0.6

注: 1) 为凯氏氮(TKN); 2) 为总有机碳(TOC)。

降雨径流研究发现,约 61%的总氮以颗粒态存在。王书敏等^{[7]1448}在重庆的研究发现,有机污染物主要以固态形式存在。WEI 等^{[6]536-537}在厦门的研究发现,60%的总氮以溶解态存在。何强等^[9]研究发现,氮素主要以溶解态存在,这与 ZHAO 等^{[5]466}的研究结果不同。土地利用方式、不透水地表功能、卫生管理水平、交通流量以及人口密度等都可能导导致城市道路暴雨径流污染物的赋存形态差异^{[8]2903},因此还需要通过长期的研究积累,总结归纳城市用地格局与道路暴雨径流污染物赋存形态的耦合关系。

1.2 城市道路暴雨径流污染物浓度研究

城市道路暴雨径流污染物浓度与交通负荷、周围环境背景、环境卫生管理水平等密切相关,不同研究地点得出的研究结果差异显著。有研究表明,后期道路暴雨径流水质较初期径流显著改善,尤其是道路坡度较大的情况^{[7]1446-1448}。也有研究发现,城市道路暴雨径流水质甚至劣于生活污水,如陈莹等^{[10]336}对西安城市主干道南二环路暴雨径流的研究发现,其 COD、SS 浓度远高于生活污水,COD 平均质量浓度为 651 mg/L(240~1 640 mg/L),SS 平均质量浓度为 2 128 mg/L(421~7 380 mg/L);BALLOA 等^{[2]876}在上海的研究发现,径流中氨氮浓度远超出《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅴ类标准。笔者总结了不同学者在不同环境背景下得出的城市道路暴雨径流污染物浓度水平(见表 1)。同时,关于城市道路暴雨径流水质的研究大多属于宏观观测范畴,而对于降雨过程中污染物随径流迁移转化的微观过程研究还较少。

1.3 城市道路暴雨径流水质影响因素研究

大气污染状况、气候特征、风速以及人类活动强

度等的区域差异,使得城市道路暴雨径流污染物浓度水平的影响因素非常复杂^[20],针对城市道路暴雨径流水质影响因素的研究主要有以下几个方面。

(1) 降雨雨情因素

降雨雨情因素包括降雨强度、降雨持续时间、前期干旱期、降雨雨型分布等。降雨强度越大,对地表累积污染物的冲刷强度也越大,可能导致污染物浓度的升高,也可能出现过大的暴雨径流稀释污染物浓度使得污染物浓度降低的现象。前期干旱期越长,地表累积污染物越多,可能引起暴雨径流污染物浓度的升高。LEE 等^{[11]888}在韩国江原道研究了高速公路暴雨径流的水质特性,结果发现降雨强度和前期干旱期是影响污染物浓度的主要因素。HUANG 等^[21]在澳门雅廉访流域的调查结果表明,前期干旱期越长、降雨强度越大,污染物浓度越高。马英等^[22]调查了东莞市同沙水库集水区降雨径流的水质特性,结果发现雨前干旱期、最大雨强、不透水率对污染负荷的影响程度最大。颜文涛等^[23]研究了山地城市道路暴雨径流水质特性,结果发现,降雨强度对污染物浓度具有显著影响,降雨强度越大,暴雨径流的污染物浓度越高,其中大坡度路面暴雨径流的污染物浓度受降雨强度的影响最为显著,可能是道路坡度和降雨强度双重影响的结果,这也说明了山地城市道路暴雨径流可能蕴含有更为突出的污染强度。边博^[24]研究认为,前期晴天时间是影响城市径流污染物浓度和赋存形态的主要因子。欧阳威等^[17]研究发现,污染物浓度与前期晴天数、降雨历时均呈正相关关系,而与降雨量、降雨强度呈负相关关系。然而,也有研究指出前期干旱时间与污染物浓度并不存在相关关系^{[10]336}。HELMREICH

表 2 城市道路暴雨径流污染物来源
Table 2 Sources of pollutants in rainstorm runoff from urban traffic road

污染物	污染物来源
颗粒物	人行道、大气沉降、路面磨损、建筑工地、道路养护、车辆、道路周边土壤侵蚀
铁	道路及车辆钢结构生锈
镉	轮胎磨损、杀虫剂
铅	轮胎磨损、含铅汽油、润滑油
镍	柴油、汽油、润滑油、沥青路面、轴衬磨损、金属电镀、制动部件磨损
钠、钙、氯化物	除冰剂
硫酸盐	燃料、除冰剂、路基
铬	电镀金属、制动部件磨损
氟化物	防止除冰剂结块化合物的使用
锌	发动机润滑油、轮胎磨损
石油类	沥青表面沥出物、泄露、溢流、防冻剂
铜	金属电镀、制动及轴承部件磨损、杀虫剂及杀菌剂
氮、磷	肥料使用、大气沉降、地表累积物
烃类	沥青路面、油类燃料
COD	地表累积物、动物活动

等^[13]对慕尼黑高负荷交通道路暴雨径流的研究表明,前期干旱期对污染物浓度没有显著影响,并把这种现象归结于街道清扫、风吹或交通引起的空气扰动流失等因素。

(2) 大气干湿沉降

有研究表明,大气沉降是暴雨径流镉、铜、铅的重要来源^{[25]997},且大气湿沉降占痕量重金属总沉降的 1%~10%,总沉降重金属负荷占流域降雨径流重金属总负荷的 57%~100%^[26]。此外,也有研究表明,大气沉降是居民区暴雨径流重金属污染的主要来源^{[27]310}。

(3) 其他因素

车伍等^[28]在对北京城区道路雨水径流水质的研究中发现,影响道路径流水质的最重要的因素有道路类型、降雨强度、路面污染状况、气温、降雨间隔时间和降雨量等。此外,污染物释放源也是影响道路暴雨径流水质的主要因素。有研究表明,交通工具刹车磨损是铜的来源,建筑墙板是铜、锌、铅、镉的来源,轮胎磨损是锌的来源,材料种类、建筑密度、交通强度^{[25]997}、建筑物喷漆、地表表层渗沥是居民区暴雨径流重金属的主要来源,而交通尾气和金属侵蚀是工业区暴雨径流重金属的主要来源^{[27]310}。LEE 等^{[11]885}和申丽勤等^[18]总结了城市道路暴雨径流污染物的主要来源,如表 2 所示。

2 城市道路暴雨径流控制对策

2.1 初期暴雨径流控制量的确定

初期径流污染物浓度较高,携带了场次降雨径流一半以上的污染负荷,科学确定初期径流量并加

以重点控制意义重大。初期径流控制量识别的主流方法目前以 $M(V)$ 曲线法为主,即对次降雨中的污染物,把累积污染负荷占整个次降雨过程总污染负荷的比值作为纵坐标、把累积径流量占整个次降雨过程总径流量的比值作为横坐标,进而建立 $M(V)$ 无量纲曲线,曲线偏离对角线越多,则初期冲刷现象越明显^[29]。由于该方法具有一定的可操作性,并可以给出初期径流体积比例,在城市道路暴雨径流管理中得到了广泛应用。LI 等^[30]指出,初期 30% 的暴雨径流可以分别携带 TSS、COD、TN 和 TP 负荷的 52.2%~72.1%、53.0%~65.3%、40.4%~50.6% 和 45.8%~63.2%。LUO 等^[31]也建议将 30% 的初期径流作为控制标准。KIM 等^[32]推荐初期径流控制量为 5 mm 降雨。ZHANG 等^{[3]40}指出,居民区屋面、商业区屋面、工业区屋面的初期径流控制量分别为初期 2 mm 降雨、初期 5 mm 降雨、初期 10 mm 降雨,居民区道路为初期 4 mm 降雨,而商业区、工业区道路的暴雨径流应全部收集处理。然而,应用该方法也有未发现初期冲刷现象的案例。SOLLERA 等^[33]在对美国圣何塞 8 场降雨过程的调查中发现,初期冲刷现象并不总是存在。BARRETT 等^[34]的研究发现,高速公路暴雨径流只有微弱的初期冲刷现象。SAGET 等^[35]调查了雨季初期冲刷现象对分流制和合流制排放水质的影响,结果表明初期冲刷现象的发生频率较低,不足以支撑雨季排放污染物处理设计需求。

由此可以看出, $M(V)$ 曲线的应用研究结果差异较大,这可能与初期冲刷现象的定义差异有关。有研究认为占总径流量 20% 的初期径流携带总污

染负荷的 80% 时,初始冲刷现象发生;也有研究认为,占总径流量 25% 的初期径流容纳总污染负荷的 50% 时,存在初始冲刷现象;大多情况下,以 30% 的初期径流携带 80% 的污染负荷应用最多^{[36]2432-2439}。 $M(V)$ 曲线法只给出了初期径流的控制比例,没有明确初期径流的具体体积,且辨识准则的未标准化导致了判断结果的多样化。基于此,对于初期径流量的识别方法,有研究人员提出用秩和检验的方法识别^[37-38]。何强等^{[36]2432-2439}也用最优分割模式进行了初期冲刷现象的识别尝试,无疑为初期径流控制量的科学确定提供了理论参考。

2.2 科学选取/设计控制技术

城市道路暴雨径流的控制技术有生态化技术和非生态化技术两种。生态化技术主要包括雨水花园、生物滞留系统、浅草沟、绿色屋顶、河岸缓冲带等,非生态化技术有渗透路面、沉沙井、弃流池等。一般情况下,城市道路暴雨径流中的重金属、总磷、有机物等污染物主要以颗粒态存在,故 TSS 常被作为城市道路暴雨径流的首要控制指标^{[7]1450},城市道路暴雨径流控制技术对悬浮物或者以悬浮物为主要赋存形态的污染物有较高的去除能力^[39-40],而对于氮、磷等溶解性营养盐的控制效能则还需要进一步稳定和提高,尤其是对溶解性氮的调控效果^[41]。对于城市道路暴雨径流控制措施的选取,可借鉴国外已有的研究成果,并通过研究实践改良国外设计标准,使得控制技术的构建能适应国内的环境背景,真正达到城市道路暴雨径流水质净化的目的。

2.3 科学规划,合理布局控制措施

尽管国外对于城市道路暴雨径流控制技术的研发已有较长历史,但国内关于城市道路暴雨径流控制的技术研发还处于起步阶段,国外技术的中国化还有很长的路要走,国内技术还有一定程度的升级空间,同时,管理部门之间的沟通协调力度不足,使得很多城市绿地的预置功能单一,往往没有发挥其暴雨径流调控的作用。加强城市规划、园林管理、市政管理等城市管理部门之间的沟通与协调、将城市道路暴雨径流污染控制纳入城市化建设的整体规划之中,并根据城市道路暴雨径流污染随机性、分散性的特点,针对性布局小型化、分散式的暴雨径流管理措施,并对管理措施的调控效能进行预评估,进而构建城市道路暴雨径流控制的景观网络体系,是解决城市道路暴雨径流污染的可行途径^[42]。

3 结论与建议

(1) 城市道路暴雨径流是城市面源污染的主要

贡献体之一,其水质影响因素众多,气象条件、卫生管理水平、降雨雨情、交通负荷等因素的变化都会导致径流污染物浓度的波动,不同环境背景下城市道路暴雨径流污染物浓度水平差异较大,但有机物、重金属、磷素等污染物以颗粒态为主要赋存形态是目前普遍认同的研究结果。

(2) 对于城市道路暴雨径流污染的控制,宏观上建议考虑将暴雨径流控制技术与城市规划有机结合起来,使得城市开发与城市道路暴雨径流调控并举,微观上建议恰当选取暴雨径流控制技术,并注重控制技术标准改良和优化;同时,科学识别初期径流的控制量也是城市道路暴雨径流高效管理的重要手段。

参考文献:

- [1] 郑一,王学军.非点源污染研究的进展与展望[J].水科学进展,2002,13(2):105-110.
- [2] BALLOA S,LIU M,HOUB L J,et al. Pollutants in stormwater runoff in Shanghai (China): implications for management of urban runoff pollution[J]. Progress in Natural Science,2009,19(7).
- [3] ZHANG Mulan,CHEN Hao,WANG Jizhen,et al. Rainwater utilization and storm pollution control based on urban runoff characterization[J]. Journal of Environmental Sciences,2010,22(1).
- [4] GAN Huayang,ZHUO Muning,LI Dingqiang,et al. Quality characterization and impact assessment of highway runoff in urban and rural area of Guangzhou, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2008,140(1/2/3).
- [5] ZHAO Jianwei,SHAN Baoqing,YIN Chengqing. Pollutant loads of surface runoff in Wuhan City Zoo, an urban tourist area[J]. Journal of Environmental Sciences,2007,19(4).
- [6] WEI Qunshan,ZHU Gefu,WU Peng,et al. Distributions of typical contaminant species in urban short-term storm runoff and their fates during rain events: a case of Xiamen City[J]. Journal of Environmental Sciences,2010,22(4).
- [7] 王书敏,何强,艾海男,等.山地城市暴雨径流污染特性及控制对策[J].环境工程学报,2012,6(5).
- [8] 李立青,朱仁肖,郭树刚,等.基于源区监测的城市地表径流污染空间分异性研究[J].环境科学,2010,31(12).
- [9] 何强,彭述娟,王书敏,等.城市不同下垫面暴雨径流氮赋存形态分布特性及控制技术[J].土木建筑与环境工程,2012,34(5):141-147.
- [10] 陈莹,赵剑强,胡博.西安市城市主干道路面径流污染及沉淀特性研究[J].环境工程学报,2011,5(2).
- [11] LEE J Y,KIM H,KIM Y,et al. Characteristics of the event mean concentration (EMC) from rainfall runoff on an urban highway[J]. Environmental Pollution,2011,159(4).
- [12] DAVIS B,BIRCH G. Comparison of heavy metal loads in

- stormwater runoff from major and minor urban roads using pollutant yield rating curves[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(8): 2541-2545.
- [13] HELMREICH B, HILLIGES R, SCHRIEWER A, et al. Run-off pollutants of a highly trafficked urban road - correlation analysis and seasonal influences[J]. Chemosphere, 2010, 80(9): 991-997.
- [14] GÖBEL P, DIERKES C, COLDEWEY W G. Storm water runoff concentration matrix for urban areas[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2007, 91(1/2): 26-42.
- [15] 夏宏生, 林芳莉. 广州市城区降雨径流水质特征分析[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(5): 129-131.
- [16] 郭婧, 马琳, 史鑫源, 等. 北京城市道路降雨径流监测与分析[J]. 环境化学, 2011, 30(10): 1814-1816.
- [17] 欧阳威, 王玮, 郝芳华, 等. 北京城区不同下垫面降雨径流产污特征分析[J]. 中国环境科学, 2010, 30(9): 1249-1256.
- [18] 申丽勤, 车伍, 李海燕, 等. 我国城市道路雨水径流污染状况及控制措施[J]. 中国给水排水, 2009, 25(4): 23-28.
- [19] 车伍, 刘燕, 李俊奇. 国内外城市雨水水质及污染控制[J]. 给水排水, 2003, 29(10): 38-41.
- [20] BALL J E, JENKS R, AUBOURG D. An assessment of the availability of pollutant constituents on road surfaces[J]. Science of the Total Environment, 1998, 209(2/3): 243-254.
- [21] HUANG Jinliang, DU Pengfei, AO Chitan, et al. Characterization of surface runoff from a subtropics urban catchment[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(2): 148-152.
- [22] 马英, 马岂文, 万金泉, 等. 东莞不同下垫面降雨径流污染输移规律研究[J]. 中国环境科学, 2011, 31(12): 1983-1990.
- [23] 颜文涛, 韩易, 何强. 山地城市径流污染特征分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(3): 136-142.
- [24] 边博. 前期晴天时间对城市降雨径流污染水质的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(12): 3522-3526.
- [25] DAVIS A P, SHOKOUHIAN M, NI S. Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources[J]. Chemosphere, 2001, 44(5).
- [26] SABINA L D, LIM J H, STOLZENBACH K D, et al. Contribution of trace metals from atmospheric deposition to stormwater runoff in a small impervious urban catchment[J]. Water Research, 2005, 39(16): 3929-3937.
- [27] JOSHI U M, BALASUBRAMANIAN R. Characteristics and environmental mobility of trace elements in urban runoff[J]. Chemosphere, 2010, 80(3).
- [28] 车伍, 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设备, 2002, 3(1): 33-37.
- [29] 王和意, 刘敏, 刘巧梅, 等. 城市暴雨径流初始冲刷效应和径流污染管理[J]. 水科学进展, 2006, 17(2): 181-185.
- [30] LI Liqing, YIN Chengqing, HE Qingci, et al. First flush of storm runoff pollution from an urban catchment in China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(3): 295-299.
- [31] LUO H B, LUO L, HUANG G, et al. Total pollution effect of urban surface runoff[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(9): 1186-1193.
- [32] KIM G, YUR J, KIM J. Diffuse pollution loading from urban stormwater runoff in Daejeon city, Korea[J]. Journal of Environmental Management, 2007, 85(1): 9-16.
- [33] SOLLERA J, STEPHENSON J, OLIVIERI K, et al. Evaluation of seasonal scale first flush pollutant loading and implications for urban runoff management[J]. Journal of Environmental Management, 2005, 76(4): 309-318.
- [34] BARRETT M E, IRISH L B, MALINA J F, et al. Characterization of highway runoff in Austin, Texas, area[J]. Journal of Environmental Engineering ASCE, 1998, 124(2): 131-137.
- [35] SAGET A, CHEBBO G, BERTRAND KRAJEWSKI J L. The first flush in sewer systems[J]. Water Science and Technology, 1996, 33(9): 101-108.
- [36] 何强, 王书敏, 艾海男, 等. 城市暴雨径流初期冲刷现象识别模式[J]. 环境科学学报, 2011, 31(11).
- [37] BACH P M, MCCARTHY D T, DELETIC A. Redefining the stormwater first flush phenomenon[J]. Water Research, 2010, 44(8): 2487-2498.
- [38] BACH P M, MCCARTHY D T, DELETIC A. The development of a novel approach for assessment of the first flush in urban stormwater discharges[J]. Water Science and Technology, 2010, 61(10): 2681-2688.
- [39] 王书敏, 何强, 孙兴福, 等. 两种植被屋面降雨期间调峰控污效能研究[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2012, 35(5): 137-142.
- [40] 孟莹莹, 陈建刚, 张书函. 生物滞留技术研究现状及应用的重要问题探讨[J]. 中国给水排水, 2010, 26(24): 20-24.
- [41] 钱进, 王超, 王沛芳, 等. 河湖滨岸缓冲带净污机理及适宜宽度研究进展[J]. 水科学进展, 2009, 20(1): 139-144.
- [42] 郭青海, 马克明, 赵景柱, 等. 城市非点源污染控制的景观生态学途径[J]. 应用生态学报, 2005, 16(5): 977-981.

编辑: 陈泽军 (修改稿收到日期: 2014-05-24)

(上接第 72 页)

(4) 在不同工况的测量断面下, 地面振动平均振级均低于 GB 10070—88 的限值。

参考文献:

- [1] 李克飞, 刘维宁, 孙晓静, 等. 北京地铁 5 号线地下线减振措施现场测试与分析[J]. 铁道学报, 2011, 33(4): 112-118.
- [2] 栗润德, 张鸿儒, 刘维宁. 北京地铁 1 号线地面振动响应测试与分析[J]. 北京交通大学学报, 2007, 31(4): 31-34.
- [3] 楼梦麟, 贾旭鹏, 俞洁勤. 地铁运行引起的地面振动实测及传播规律分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(3): 282-288.
- [4] 徐忠根, 任珉, 杨泽群, 等. 广州市地铁一号线振动传播对环境影响的测定与分析[J]. 环境技术, 2002(4): 12-14.
- [5] GB 10071—88, 城市区域环境振动测量方法[S].
- [6] GB 10070—88, 城市区域环境振动标准[S].

编辑: 丁 怀 (修改稿收到日期: 2013-12-20)