植被浅沟用于处理径流雨水的研究进展

李海燕　魏　鹏　吴　桐　张　悦　张　雪

（城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室北京建筑大学　北京　100044）

摘　要　针对植被浅沟的研究现状概述了植被浅沟的分类，分析了种植土及植被层的选择、水力特性、污染物去除效果、种植土层的污染物积累及变化规律、模型研究等进展，指出了植被浅沟目前设计、运行中存在的问题，为植被浅沟的应用和进一步研究提供借鉴。

关键词　植被浅沟　水力特性　去除效果　污染物积累　模型　进展

植被浅沟（grassed swale）又称植草沟（vegetated swale）或生态浅沟（bioswale），是一种开放式的、兼具景观效果的表沟渠排水系统[1]，与传统的道路绿化方式相比，具有较高的生态价值[2]。最初的植被浅沟主要作为冲刷防控措施应用于农业面源侵蚀控制中[3]，随后植被浅沟作为一种有效的面源污染控制措施被广泛应用在世界各地的雨洪管理体系中，如美国的 BMP（Best Management Practices）、LID（Low Impact Development）体系、英国的 SUDS（Sustainable Drainage Systems）体系、澳大利亚的 WSUD（Water Sensitive Urban Design）体系等。由于植被浅沟属于地表排水设施，因此与传统的“边沟—雨水口—管网”直排体系相比，从根本上解决了传统排水体系存在的雨污混接问题，且构造简单、设计灵活，与其他雨水处理设施具有良好的衔接性能，既可以作为集中式雨水处理系统中源头控制措施的预处理单元，也可以作为污染物中途控制措施的汇水单元。植被浅沟具有足够长度且对种植土进行了适当的土壤改良时，甚至可以作为独立的高效雨水处理设施[4]。

1　植被浅沟概述

1.1　植被浅沟的分类

根据植被浅沟的构造以及水力特性可将其分为 3 种类型：标准传输型浅沟（standard swale）、干式浅沟（dry swale）和湿式浅沟（wet swale），结构见图 1，其中干式浅沟和湿式浅沟又可归为水质控制型浅沟[5]。

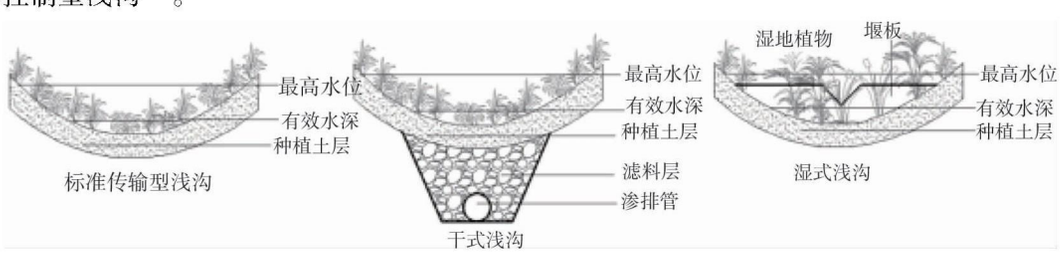

图 1　三种植被浅沟结构图

标准传输型植被浅沟构造最为简单，属于开阔的、具有一定抗冲刷能力的植被型水渠，主要用于径流雨水的传导和预处理；湿式浅沟与其构型类似，但其内多栽种耐淹、抗倒伏的湿地植物，且由于加装了溢流堰板或消能坝等设施，具有较长的水力停留时间，并长期保持湿润或淹没状态；干式浅沟又称渗滤浅沟（infiltration swale），其结构最为复杂，底层由于增加了具有良好透水性能的填料层，大大强化了浅沟的传输与渗透性能，也避免了因浅沟积水对植物造成损伤，同时滤料间空隙也可以起到一定的蓄渗效果，增加了浅沟的持流能力，为进一步提升其运行稳定性[6]，可在滤料层与过渡层之间加设砂滤过渡层。

按照浅沟的水力特性可将其分为以排水为主的水平流型浅沟和水质控制为主的垂直流型浅

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

沟，垂向流浅沟与水平流浅沟相比，其对土壤的渗透性能要求更高，而且在运行中易发生堵塞进而导致去除效果下降。设计时水平流植被浅沟主要通过浅沟的粗造程度来确定其水力学特性，而垂直流浅沟更倾向于作为渗透设施进行计算。

为了便于对植被浅沟进行设计和管理，美国流域保护中心（Center for Watershed Protection）根据植被浅沟设计径流控制率（50%和75%）的差别对水质控制型浅沟进行了更为详细的分类，分别对应1级和2级两个等级标准，对径流削减率及径流中TN、TP的EMC值去除效果得要求详见表1。

表1　不同设计等级的植被浅沟对径流削减率及对N、P的去除效果要求（%）

浅沟类型	径流削减		TP		TN1	
	级标准	2级标准	1级标准	2级标准	1级标准	2级标准
传输型浅沟	10	20	15	15	20	20
干式浅沟	40	60	20	40	20	35
湿式浅沟	0	0	20	40	20	35

1.2　植被浅沟种植土及植被的选择

种植土是决定植被浅沟运行效果的重要单元，承担了绝大部分污染负荷去除的任务，且要兼顾保持土壤湿度和消解污染物，一定程度上还影响植被浅沟的水力特性。目前国内植被浅沟种植土以回填土为主，而美国、德国、澳大利亚等已先后对植被浅沟种植土的PH、有机质含量、组成等做出了具体的规定（表2）。国外也有一些学者开始研究利用粗颗粒（>25mm）植物、餐厨及混合堆肥产物作为浅沟表层种植土的替代品[8]，结果表明，该替代品能有效去除径流中的溶解态有机物及重金属，且具有高孔隙率，有良好的蓄渗效果，同时孔隙间的生物膜能有效降解污染物，其疏松特性也利于植物根系的发育，是植被浅沟种植土的良好选材。

表2　植被浅沟种植土参数推荐值[9,10]

	PH	有机质%	土质配比			磷指数%	离子交换系数 meq/g	渗透性 m/s
			沙粒%	粉砂%	粘土%			
BMP	5.2－6.5	1－5	60－80	10－20	10－20	10－20	0.1	7×10－6
DWA	6－8	1－3	<10	<90	<10	/	/	10－3－10－5

植物在植被浅沟系统中发挥着重要作用，植物的叶片可有效截留和吸附浅沟中的污染物质，延缓浅沟内径流流速，防止冲刷侵蚀现象的发生；此外，植物的根系可对沉淀物起到固定作用，防止颗粒物再悬浮现象的发生，同时起到降解有机物、吸收营养盐的作用。植物在地下形成的跟孔结构能够有效防止土壤板结和堵塞现象的发生，植物根系庞大的比表面积为微生物生长提供了巨大的吸附空间，同时其分泌物为微生物生存提供了必要的能源[11]。当植物不足时植被浅沟很可能成为污染物的释放源，有较高的硝酸盐溶出风险[12]，因此植被对维持浅沟的排水性能和污染物去除效果有着重要的意义。

浅沟植被宜就地取材，多选择当地植物，靠地下根茎繁殖的禾草科类植物对植被浅沟的运行有着十分积极的意义，特别是对于地下水位较高的地区，应优先选择[13]。FatemehKazemia等人[2]的研究发现栽种开花植物能够有效增加浅沟中无脊椎生物种群数量，提升植被浅沟的物种多样性，且当中等高度植物覆盖率较高时（如低矮灌木），能使植被浅沟具有更好的微生态环境。Greg Mazer等人的研究表明[14]，长期保持一定淹没水位会导致浅沟内生物量降低，因此湿式浅沟应优先考虑栽种耐淹植物。植物栽种后一般需要3个月的时间才能形成稳定的根系，浅沟稳定运行则可能需要一年时间[15]，期间对植物的正常维护尤为重要。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2 植被浅沟对径流水量的控制及其水力特性研究

2.1 对径流的削减

植被浅沟的水力性能在不同强度的降雨中有着不同的体现，在小降雨事件中，植被浅沟以渗透性能为主；中等强度的降雨事件中浅沟以延缓、消纳径流为主；对于高强度降雨，植被浅沟则更加体现传输特性。有很多学者都对植被浅沟水力特性进行了研究，研究结论见表3。Davis[16]等人通过对马里兰地区4．5年中52场降雨中植被浅沟对径流削减效果的分析，给出了植被浅沟能够完全控制的降雨事件的阈值公式：P =0．07×D+0．35 cm（式中：P－降雨量，cm；D－降雨历，h），并指出植物型消能坝能够有效提升植被浅沟对中等强度降雨的控制效果，且暴雨事件中也不会出现因滞留而引起的出水流量大于入水流量的现象。

季节变化会显著影响植被浅沟的径流削减效果，新罕布什尔大学的研究报告[15]指出，与夏季的运行状况相比，植被浅沟在冬季的平均水力停留时间减少了近12min，进而导致径流削减效果降低。Roseen[17]等人对植被浅沟夏季和冬季的径流削减效果的对比研究也得到了类似结论。Fach[18]等人的研究认为，这主要是由于冬季积雪中的大量粉尘堵塞了浅沟的种植土层孔隙，降低了土壤的通透性，而非土壤冻结所致。

表3 植被浅沟对径流的削减效果研究

研究者	Rushton[19]	Deletic[20]	Backstorm[21]	Barett[22]	Ackerman[23]
汇水面积 ha	0．1	/	/	/	0．16
浅沟宽度 m	1．2	1．0	/	/	1．1
年净流量 m3	3130	28553	/	/	/
年均径流削减率%	30	45．7	33	47	45

2.2 对径流峰值的削减

由于植被浅沟对径流的迟滞作用，径流峰值在迟滞时间内发生的下渗作用会显著降低浅沟的出流峰值量。Wu[24]等人认为，植被浅沟对径流峰值的削减效果介于10%－20%之间，该结论得到了Ackerman[23]等人模型研究的验证。Rushton[19]等人也证实了这一结论，但也指出该作用可能导致植被浅沟的出水流量大于入水流量。Roseen[17]等人对植被浅沟夏季和冬季对峰值削减效果的对比研究表明，冬季的径流峰值削减效果明显小于夏季。新罕布什尔大学的研究报告[15]也指出，冬季植被浅沟对径流峰值的削减效果衰减了近18%。

3 植被浅沟对污染物的去除与净化作用

地表径流以一定流速流经植被浅沟时，经过一系列复杂的生物、物理、化学过程，植被浅沟可以去除大部分颗粒态污染物和部分溶解态污染物，国内外很多学者利用EMC均值法对其去除效果进行了研究（结果见表4）。然而研究过程中未将植被浅沟表面的直接降雨量考虑进去，因此污染物去除率的计算值与实际情况相比往往偏大。Stagge等[25]人对利用N－EMC（减去浅沟表面降雨量）均值法对马里兰地区4．5年的45场降雨中植被浅沟对SS、NO3－、TKN、TN、TP等污染物的去除效果进行了监测，并分析了植物型消能坝对浅沟污染物去除效果的影响（表5）。可以看出，利用EMC和N－EMC计算得出的植被浅沟去除率有较大差距，植物型消能坝能够有效提升植被浅沟的污染物去除效果，硝酸盐类污染物去除效果的提升效果尤为明显。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 4　植被浅沟对污染物的去除效果研究（EMC）（%）[26-30]

污染物指标	标准传输浅沟	干式浅沟	湿式浅沟
SS	40－70	＞90	74
COD	28－50	50－65	/
NH4＋－N	25－35	40－60	/
COD	－25－25	30－50	31
TP	20－40	70－80	－89－40
TN	10－40	40－50	40

表 5　传输型植被浅沟对污染物去除率（N－EMC）（%）

	SS	TKN	NO3⁻	NO2⁻	TN	TP	Cl	重金属			
								Pb	Cu	Zn	Cd
无植物型消能坝	44．1	－47．0	－19．6	63．2	－5．7	－27．5	－1740	37	42	52．9	71．6
有植物型消能坝	82．7	－106	71．7	67．1	77．2	14．7	－104	61．6	74．5	88．4	41．4

季节的变化由于对浅沟植被的覆盖率、生物量等性能的影响而影响植被浅沟的污染物去除效果。Roseen[17]对传输型植被浅沟的研究结果表明：植被浅沟对溶解态氮的去除效果几乎不随季节变化，而对 TP、Zn、SS 和石油类化合物的去除效果在冬季则显著降低，其中 Zn 的去除率降低现象尤为明显，具体，结果见表 6。backstrom[31]对冬季浅沟出水水质的监测发现径流中 Cu、Zn 及 Pb 的去除率都高达 90% 以上，但是对溶解态的 Cu、Zn 去除效率极低（分别为 －40% 和 －150%）。新罕布什尔的研究也指出[15]，植被浅沟在冬季对 SS 和溶解态 Zn 的去除效率有明显降低，但是对其油类污染碳氢化合物的去除效果略有提升，提升幅度约为 10%。

表 6　传输型植被浅沟不同季节的污染物去除效果分析

去除率%	SS	DIN	TP	Zn	TPH
年均去除率	60	－13	－40	88	67
夏季去除率	68	－5	/	92	60
冬季去除率	13	－13	－64	17	77

注：表中年均去除率为一年中所有场次降雨的污染物去除效果均值
DIN：dissolved inorganic nitrogen（溶解态无机氮）TPH：total petroleum hydrocarbons（总石油烃）

4　植被浅沟种植土污染物积累及迁移特性研究

植被浅沟作为城市道路排水设施，同样具有使用寿命，但目前并没有相关的规范对此作出要求，欧美等发达国家的一些植被浅沟已有 20－30 年的运行时间，面临着较大的污染物积累和迁移风险，部分学者对植被浅沟中重金属的积累量进行了调查（见表 7）。backstrom[31]发现植被浅沟表层沉积的颗粒物中污染物含量均未超过土壤污染浓度限值，其中 PAH 含量仅为 0．03mg/Kg，绝大部分污染物积累在植被浅沟的种植土中，只有约 0．5－3．3% 的重金属在植物体内富集。Wigington 等[32]的研究表明，多数重金属在浅沟表层 5 cm 的种植土壤中沉积。Ingvertsen[33]则认为，在 5－30cm 的种植土层范围内，部分重金属的含量随土壤深度的变化关系并不明显，且重金属在植被浅沟中的积累量与径流汇水路面的车流量无明显相关性。他根据土壤中重金属的累积速度进行了推测，认为种植土层至少还可以继续使用 13 年以上（使用年限 20－30 年），达到使用年限后可作为建筑用土加以利用，且不超过规范中规定的限值。后续研究表明[34]，重金

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

属在种植土中的迁移与其中 TOC 含量有很强的相关性，当土壤中有机质含量过高时，会增大重金属的淋出风险。土柱淋洗实验发现，植被浅沟种植土中重金属浸出风险由大到小依次为：Cr、Cu、Cd、Zn。

表 7　植被浅沟中重金属的积累量

数据来源	使用时间（yr）	采样浅沟数量	重金属积累量（mg/kg）				
			Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
Ingvertsen[33]	6 – 16	8	0. 84	39	34. 5	64	151. 5
Jiri Marsalek[35]	>5	2	/	/	/	/	375
Li[36]	4	1	/	/	60	499. 5	321. 5
Biasioli[37]	/	214	/	96	55	90	125
Jensen[38]	16 – 26	4	0. 53	74. 5	356	96. 5	231. 5
Akbar[39]	/	35	1. 4	/	87	233	135
Lancaster[40]	/	/	/	/	23	65	68

5　结论

植被浅沟作为一种简单、高效的面源污染控制技术措施在已得到广泛应用，通过合理的设计，植被浅沟能与各种雨水利用设施灵活衔接，具有广泛的使用前景。目前在设计及运行中依然存在一些问题：虽然研究表明季节变化对植被浅沟对的水力特性及污染物去除效果均有一定影响，但仍未能将去除效果与温度建立起明确的对应关系，也没有提出改善植被浅沟在冬春等植被覆盖率较低的时期对污染物的去除效果的方法；植被浅沟对污染物的去除效果方面的研究还停留在常规污染物质的检测上，对于 PAH，细菌及 BOD 等去除效果的研究还较少，在对处理设施水质控制要求日益严格的今天，需要更多的对微污染控制效果进行分析；

硝酸盐的去除一直是植被浅沟技术的难点，虽然研究表明植物型消能坝能够有效提升植被浅沟对硝酸盐去除效果，但仍未能从机理方面做出解答；植被浅沟技术的模型研发仍处于起步阶段，有必要对模型参数进行必要的简化并提高其精度，以便于使植被浅沟技术能够得到有效推广。

参 考 文 献

[1] Laurent M. A , Bernard A. E, Indrajeet C. Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2012, 104: 101 – 113.

[2] KazemiFatemeh, BeechamSimon, GibbsJoan. Streetscape biodiversity and the role of bioretention swales in an Australian urban environment [J]. Landscape and Urban Planning, 2011 (101) 2: 139 – 148.

[3] Center forWatershed Protection (CWP). Stormwater Fact Sheets – Grass Channel, 2001.

[4] DepartmentofEcology. Selecting Best ManagementPractices for Storm – water Management. WaterQualityProgram – Urban Nonpoint Unit. 1996.

[5] Anne Arundel County, MD. StormwaterManagement Practices and Procedures Manual, 2006.

[6] Peng Cheng yao, Zhang jie, Li Dong, et al. Strategies for Enhancing the Efficiency of Bioretention Swales and Basins for Urban Stormwater Management in Temperate Region [J]. Journal of DonghuaUniversity (English Edition). 2011, 28 (2): 152 – 157.

[7] Battiata Joseph, Collins Kelly, HirschmanDavid, et al. Therunoff reduction method [J]. Journal of Contemporary

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Water Research and Education, 2010, 1 (146): 11 – 21.

[8] Charlesworth SM, Nnadi E, Oyelola O, et al. Laboratory based experiments to assess the use of green and food based compost toimprove water quality in a Sustainable Drainage (SUDS) device such as a swale [J]. Science of the Total Environment. 2012, 424: 337 – 343.

[9] BorstM, S. D. Struck AM., S. Muthukrishnan, et al. Swale performance for stormwaterrunoff [C]. 2nd National Low Impact Development Conference. 2007: 182 – 190.

[10] DWA. 2005. Standard DWA? A 138E: Planning, construction and operationof facilities for the percolation of precipitation water.

[11] 王书敏，于慧，张彬. 生物沟技术在城市面源污染控制中的应用研究进展 [J]. 安徽农业科学. 2011, 39 (3): 1627 – 1629. (Wang Shumin, Yu Hui, Zhang Bin. Research Progress of the Application of Bioswales in Urban Non – point Source Pollution Control [J]. Journal of Anhui Agri. Sci. 2011, 39 (3): 1627 – 1629. (in Chinese))

[12] Henderson C, GreenwayM, PhillipsI. Removal of dissolved nitrogen, phosphorus and carbon from stormwater by biofiltrationmesocosms [J]. Water Science and Technology. 2007, 55 (4): 183 – 191.

[13] Plant Selection for Vegetated Swales [J]. Land and Water. 2006, 50 (2): 28 – 30.

[14] Mazer Greg, Booth Derek, Ewing Kern. Limitations to vegetation establishment and growth inbiofiltrationswales [J]. Ecological Engineering. 2001, 17: 429 – 443.

[15] Roseen R, Ballestero TP, Houle JJ. University of New Hampshire StormwaterCenter 2007 Annual Report [R]. Durham: UNH Stormwater Center, 2007: 28 – 29.

[16] Davis Allen P, StaggeJames H, JamilEliea, et al. Hydraulic performance of grass swales for managing highway runoff [J]. Water Research. 2012, 46 (20): 6775 – 6786.

[17] Roseen Robert M, Ballestero Thomas P, Houle James J, et al. Seasonal Performance Variations for Storm – Water Management Systems in Cold Climate Conditions [J]. Journal of Environmental Engineering. 2009, 135 (3): 128 – 137.

[18] Fach Stefan, Engelhard Carolina, WittkeNina, et al. Performance of infiltration swales with regard to operation in winter times in an Alpine region [J]. Water Science & Technology. 2011, 63 (11): 2658 – 2665.

[19] Rushton Betty T. Low – Impact Parking Lot Design Reduces Runoff and Pollutant Loads [J]. Journal of Water Resources Planning and Management. 2001. 127 (3): 172 – 179.

[20] Deletic A. Modelling of water and sediment transport over grassed areas [J]. Journal of Hydrology. 2001, 248 (1): 168 – 182.

[21] Backstrom M. Sediment transport in grassed swales during simulated runoff events [J]. Water Science and Technology. 2002: 45 (7): 41 ~ 49

[22] BarretME. Performance comparison of structural stormwater best management practices [J]. Water Environment Research. 2005, 77 (1): 1061 – 4303.

[23] Ackerman D, Stein ED, Evaluating the effectiveness ofbest management practices using dynamic modeling [J]. Journal of Environmental Engineering. 2008, 134 (8): 628 – 639.

[24] WuJS, AllanCJ, Saunders WL, et al. Characterization and pollutant loading estimation forhighway runoff [J]. Journal of Environmental Engineering. 1998, 124 (7): 584 – 592.

[25] Stagge James H, Davis Allen P, Jamil Eliea, et al. Performance of grass swales for improving water quality fromhighwayrunoff [J]. Water Research. 2012, 46 (20): 6731 – 6742.

[26] WinstonR J, Luell SK. Mitigating the effects of bridge deck runoff: A case study using bioretentionandbioswale [C]. World Environmental and Water Resources Congress, 2010: 2994 ~ 3005

[27] Davis AP, ShokouhianM, Sharma H, et al. Water quality improvement through bioretention media: Nitrogen and phosphorus removal [J]. WaterEnviron. Res. 2006: 78 (3), 284 ~ 293.

[28] 张茹，周文斌，今可礼. 深圳茜坑水库生态草沟对非点源污染去除效率的评价 [J]. 南昌大学学报, 2009, 33 (1): 56 – 60. (Zhang Ru, Zhou Wenbin, Jin Keli. Field evaluation of a grassed swale for control

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

non – point source pollution at Shenzhen Xikeng reservoir [J]. JournalofNanchangUniversity, 2009, 33 (1): 56 –60. (in Chinese))

[29] Infrastructure and Management Division (City of Ottawa). 20 year performance evaluation of grass swale perforated pipe drainage systems. 2008

[30] Metropolitan Council. Minnesota Urban Small Sites BMP Manual. 2001

[31] Backstrom M. Grassed swales for stormwater pollution control during rain and snowmelt [J]. Water Science and Technology. 2003, 48 (9): 123 – 132.

[32] Wigington P J, Randall C W, Grizzard T J. Accumulation of selected tracemetals in soils of urban runoff drainswales [J]. Water Resour. Bull , 1996, 22 (1): 73 – 79.

[33] Ingvertsen Simon T, CederkvistKarin, Régent Yoann, et al. Assessment of Existing Roadside Swales with Engineered Filter Soil: I. Characterization and Lifetime Expectancy [J]. Journal of Environmental Quality, 2012, 41 (6): 1960 – 1969.

[34] Ingvertsen Simon T, CederkvistKarin, Marina B. Jensen, et al. Assessment of Existing Roadside Swales with Engineered Filter Soil: II. Treatment Efficiency and in situ Mobilization in Soil Columns [J]. Journal of Environmental Quality. 2012, 41 (6): 1970 – 1981.

[35] Marsalek Jiri. Advances in urban stormwater and agricultural runoff sourcecontrols [M]. German: Kluwer Academic Publishers, 2001.

[36] Li H, Davis AP. Heavy metal capture and accumulation in bioretentionmedia [J]. Environmental Science and Technology. 2008, 42 (14): 5247 – 5253.

[37] BiasioliM, Grcman H, Kralj T, et al. Potentially toxic elements contamination in urban soils: a comparison of three European cities [J]. Journal of Environmental Quality. 2007, 36 (1): 70 – 79.

[38] Jensen MB, HolmPE, Laursen J, et al. Contaminant aspects of blackish surface deposits on highway roadsides [J]. Water, Air and Soil Pollution. 2006, 175 (1): 305 – 321.

[39] AkbarKF, Hale WHG, Headley AD, et al. Heavy metal contaminationof roadside soils of northern England [J]. Soil Water Res. 2006, 1 (4): 158 – 163.

[40] Lancaster Cory D, BeutelMarc W, David. Evaluation of Roadside Infiltration to Manage Stormwater Runoff in Semi-arid Eastern Washington [J]. Environmental Engineering Science, 2009, 26 (5): 935 – 940.

本研究由北京建筑大学城乡建设与管理产学研联合研究生培养基地资助

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net