

生物滞留系统介质土的理化性质比较研究

王书敏^{1,2,3}, 黄克舒^{1,2}, Allen P. Davis³, 范功端², 李忠华¹,
邓滔¹, 代成义¹, 谭丽菁¹

(1. 重庆市环境材料与修复技术重点实验室, 重庆 402160; 2. 福州大学 土木工程学院,
福建 福州 350116; 3. 马里兰大学 土木与环境工程系, 美国)

摘要: 为了解国内外生物滞留系统介质土理化性质的异同, 梳理归纳了国内外技术规范、导则等对生物滞留系统介质土的相关说明, 并以美国马里兰州生物滞留系统实际应用场地为例, 检测分析了其介质土的粒径时空分布特点。研究表明, 深圳市、厦门市和湖南省的规范中生物滞留系统介质土的渗透系数低于国外, 而介质土层深度高于国外; 国内建议介质土组分为高砂低有机质, 而国外还在此基础上进一步对氮和磷的含量、阳离子交换容量等指标做了详细说明。马里兰州生物滞留系统介质土的主要组分是砂(62%~86%), 且表层土的黏土和细砂含量(17%和31%)高于底层土(10%和26%), 表层土的砾石和粗砂含量(14%和38%)低于底层土(21%和42%)。

关键词: 生物滞留系统; 介质土; 理化性质

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)17-0133-06

Comparison of Physical-chemical Properties of Soil Media in Bioretention System

WANG Shu-min^{1,2,3}, HUANG Ke-shu^{1,2}, Allen P. Davis³, FAN Gong-duan²,
LI Zhong-hua¹, DENG Tao¹, DAI Cheng-yi¹, TAN Li-jing¹

(1. Chongqing Key Laboratory of Environmental Material and Restoration Technology, Chongqing 402160, China; 2. Department of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland at College Park, USA)

Abstract: In order to understand the similarities and differences of physical-chemical properties of soil media in bioretention system at home and abroad, the technical specifications and guidelines at home and abroad for soil media in bioretention system were summarized. Meanwhile, the particle size spatial and temporal distribution characteristics of the soil media were analyzed in bioretention system in Maryland, USA. It was found that the permeability coefficient of soil media in Shenzhen City, Xiamen City and Hunan Province was lower than that of foreign countries, while the depth of the media was higher compared with that of foreign countries. Soil media with high sand content and low organic matter proportion were recommended in China. However, the contents of nitrogen and phosphorus, cation exchange capacity and other indexes were further described in detail in foreign countries. Sand was the

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51409030); 重庆高校创新团队建设计划项目(CXTDX201601037); 永川区社会民生科技创新专项(Ycstc.2017cb7001); 重庆市技术创新与应用示范项目(社会民生类)(cstc2018jscx-msybX0016)

main component (62% – 86%) of the soil media in the bioretention systems in Maryland. The clay content (17%) and fine sand content (31%) of the topsoil were higher than that in underlying soil (10% and 26%), but the gravel content (14%) and coarse sand content (38%) of the topsoil were lower than that of the underlying soil (21% and 42%).

Key words: bioretention system; soil media; physical-chemical property

生物滞留系统是海绵城市建设的重要技术之一,其安装灵活、成本较低,近几年得到了大量普及应用;然而,国内生物滞留系统的建设中由于介质土的规范指引不明确,介质土的盲目配制导致应用中系统运行堵塞现象突出。

回填介质土是生物滞留系统的关键部分,其理化性质在很大程度上决定了生物滞留系统的运行效能。国外在城市雨洪管理上起步较早,在长期的研究、实践基础上,国外一些地区已经形成适合当地环境特点的生物滞留系统介质土配制导则、规范;相比之下,尽管国内也出台了部分生物滞留系统介质土的配制技术导则,但其科学性尚需在实践中进一步检验。鉴于此,笔者比较分析了国内外关于生物滞留系统介质土的代表性规范、导则,并以美国马里兰州的10个生物滞留系统为例,分析了其介质土的粒径分布特点,旨在通过介质土的比较研究,阐明国内外关于生物滞留系统介质土配制模式的异同,为介质土的优化配制提供参考。

1 介质土的配制及渗透能力

恰当的渗透能力是生物滞留系统介质土配制首先考虑的要素^[1]。介质土的渗透能力可通过介质

土的科学配制实现,一般情况下,介质土的渗透系数和深度以及设施表面积/集水面积三者共同影响生物滞留系统的渗透性能,结合实际合理分配三者的水平是保证系统渗透能力良好且稳定的关键。此外,随着生物滞留系统运行时间的延长,会发生一定的堵塞而导致渗透系数下降,合理的介质土级配设置和植物根系的根刺作用可以有效防止渗透系数的下降^[2]。

针对以上3个设计因素,不同地区根据当地的气候环境、植物类型、径流特征等因素确定了适合当地雨水管理需求的参数赋值,如表1所示。可知,由于区域环境差异,各个地区的参数取值并不一致。根据本研究所引用的文献,对于渗透系数的取值,国内略低于国外;对于介质土层深度的要求,国外(马里兰州除外)略低于国内。这可能是由于国内外在介质土配制过程中选材不同造成的,例如,深圳市使用具有较低液压传导性的过滤介质,其渗透速率整体要求在较低的范围内;FAWB推荐的介质土成分主要为不同粒径的砂,其渗透速率的波动范围较大;北卡罗莱纳州则详细地推荐了去除各种污染物的渗透速率,使建设目的性更明确。

表1 介质土配制参数赋值

Tab. 1 Parameter values for bioretention system media

项 目	渗透系数/ (mm · h ⁻¹)	设计深度	表面积/集水面积
FAWB ^[3]	100 ~ 300	> 0.5 m	集水面积为表面积的 50 倍
华盛顿州 ^[4]	26 ~ 305	> 18 英寸 (46 cm, 保证去除基本污染物); > 24 英寸 (61 cm, 提高氮、磷的去除效率)	—
马里兰州 ^[5]	> 38	0.46 ~ 1.4 m	集水面积 < 1 英亩 (0.4 hm ²)
北卡罗莱纳州 ^[6]	25 ~ 150	> 0.38 m	—
WSUD ^[7]	36 ~ 180	0.3 ~ 0.7 m	集水面积为表面积的 50 倍
深圳市	10 ~ 36	0.4 ~ 0.8 m	集水面积 < 0.5 hm ²
厦门市	> 36	0.5 ~ 1.2 m	—
长沙市	> 10.8	0.85 m	表面积在 30 ~ 40 m ² 之间

注: 深圳市的数据来自《低影响开发雨水综合利用技术规范》(SZDB/Z 145—2015);厦门市的数据来自《厦门市海绵城市建设技术标准图集(试行)》(DB3502/Z 5009—2016);长沙市的数据来自《长沙市海绵城市建设规划与设计导则(试行)》(DBCJ 004—2017),下同。

2 介质土的理化性质

介质土的理化性质直接影响生物滞留系统的运行效能,且介质土的 pH 值、有机质含量、粉/黏粒含量、孔隙度等与渗透速率显著相关,其中,介质土中的有机质可以保证植物正常生长,提供反硝化必需的碳源以增强硝态氮的去除效率,但过量的有机质也增加了氮、磷营养物淋沥的风险^[8]。本研究对比了澳大利亚、美国、中国部分地区对介质土理化性质的要求。结果发现,国内外对介质土的 pH 值(中偏弱酸)和有机质含量(10% 以内)大都做了具体要求,可能是因为 pH 值为中性时,营养元素的可利用性最高,是多数植物的最佳生长环境,并且微生物活性普遍较高^[9-10]。另外,国外对介质土理化性质的规定较国内略微详细,例如,FAWB 同时要求介质土的氮含量 <1 000 mg/kg、磷含量 <80 mg/kg、有机质含量 <5%^[3];北卡罗莱纳州规定介质土的磷指数为 10~30、阳离子交换能力 >10 meq/100 g、有机质含量为 3%~5% (体积比)^[6];华盛顿州不仅对介质土的 pH 值(5.5~7.0)、阳离子交换能力(>5 meq/100 g)、有机物含量(1%~8%)进行了规范说明,还规定草酸铵萃取物磷与草酸铵萃取物铁和铝的物质的量之比 <0.25,以确保通过保持过剩的铁和铝含量使介质土具有吸附和沉淀磷的能力^[4];马里兰州推荐介质土中添加 20% (体积分数)的树叶堆

肥,较高的堆肥量含有大量的有机质,树叶堆肥的有机质具有良好的微生物利用性^[11],可以保证介质土的有机物含量达到 1.5%~4.0%^[5]。国内深圳市仅规定介质土的 pH 值在 5.5~6.5 之间、有机质含量在 3%~5% 之间;厦门市仅推荐介质土中添加炉渣,有机质含量在 5%~10% 之间;长沙市仅推荐介质土中添加沸石、瓜子片、改良种植土。

3 介质土组分构成

介质土组分构成是决定介质土理化性质的先决条件,为此统计了国内外部分城市和地区的生物滞留系统介质土组分构成情况,见表 2。可知,由于各个地区土壤类型以及规范出台时间不同,所推荐的介质土粒度组成也有所差异,总体来说,砂等无机组分所占比例最大,黏土等细颗粒有机组分所占比例最小,采用较高比例的砂组分满足渗透需求的同时,掺入少量的黏土和粉土优化系统去除污染物的性能。国内的海绵城市技术导则大都参考了国外规范和运行经验,高砂含量(35%~88%)、低有机质含量(15% 以下)的特点较明显,同时在中研究中也发现,介质土高砂低有机质的构成特点有利于径流蓄排和水质净化,这可能是由于高比例砂保证了介质土适当的渗透性及过滤性,少量有机质既能满足植物生长需求、缓冲 pH 值,又可防止有机质和营养性污染物的淋沥释放,保证了污染物吸附净化能力^[12]。

表 2 介质土组分构成

Tab. 2 Composition of bioretention system media

项 目	介质土的组成及配比
罗艳红 ^[12]	河砂为 90%、粉煤灰为 5%、有机物为 5% (质量分数)
胡爱兵 ^[13]	砂为 65%、壤质砂土为 25%~30%、营养土为 5%~10% (质量分数)
深圳	黏土 <10%、粉质土为 30%~55%、沙质土为 35%~60%
厦门	砂为 60%~85%、黏土 ≤5%、有机质为 5%~10% (质量分数)
湖南	粗砂为 85%~88%、细砂为 8~12%、腐殖土为 15% 左右
北卡罗莱纳州 ^[6]	砂为 85%~88%、细骨料(粉土和黏土)为 8%~12%、有机质为 3%~5%
特拉华州 ^[14]	砂为 33%、泥炭为 33%、有机质为 33% (体积分数)
马里兰州 ^[5]	砂为 50%、表土为 30%、树叶堆肥为 20% (体积分数)
FAWB ^[3]	洗净与分级良好的砂,其中粉土与黏土 <3%、有机质 <5% (质量分数)
华盛顿州 ^[4]	堆肥为 35%~40%、细砂或实用砂为 60%~65% (体积分数)
威斯特摩兰郡 ^[15]	表土为 50%、砂或豆砾石为 30%、堆肥为 20% (体积分数)
WSUD ^[7]	黏土为 5%~15%、粉质砂 <30%、砂为 50%~70%
德国 ^[16]	细粒或中砂无粗砂或砾石材料,黏土 + 粉砂 <10%
英国 ^[17]	砂质壤土或壤土砂,砂为 35%~60%、粉土为 30%~50%、黏土为 10%~25%
多伦多 ^[18]	砂为 85%~88%、粉土 + 黏土为 8%~12%、有机质为 3%~5% (质量分数)

注: 湖南的数据源自《海绵城市建设技术:渗透技术设施》(湘 2015SZ103—1)。

国外对于介质土构成的要求最显著的区别在于 有机组分的含量,较早的规范往往要求高有机质含

量(例如,英国规定淤泥含量为30%~50%,黏土含量为10%~25%),高有机质含量有利于植物生长,但容易堵塞;新出台的规范大多要求低有机质含量(如澳大利亚等)。美国马里兰州的介质土规范要求直接对混合后的土壤进行筛分,选取粒度在0.02~0.04英寸(为0.5~1.0 mm)的混合土作为介质土,并且混合土中黏土含量<5%。美国特拉华州使用的砂是清洗混凝土砂且细度模数 ≥ 2.75 ,砂应以二氧化硅为主成分,不允许使用碳酸钙、白云石砂、辉绿岩或10号灰色岩等材质替代砂。美国华盛顿州推荐砂的优良级配是按照相关规范的要求制定的(ASTM D2478—98),与国标《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)相比,相同之处在于土样分类依据都是粒度百分比含量,但美国的标准略显细致精密^[19]。FAWB推荐使用清洗过的天然级配砂或者混合土,与华盛顿州大体相似。

4 生物滞留系统介质土的粒径分布

为进一步理清国外生物滞留系统介质土的粒径分布情况,以美国马里兰州的10个实际应用场地为例,分析其介质土的粒径分布情况。10个实际应用场地分别记作1~10号,运行时间分别为10、10、14、14、14、14、4、8、20、20年,服务区用地分别为广场、广场、公路、停车场、公路、停车场、道路和屋顶、屋顶和人行小道、停车场、停车场。采用钻孔采样器在每个场地上进行分层采样,冷冻干燥、充分研磨后机械过筛测定粒径分布。为便于分析,将结果分为4个粒径段进行分析,即砾石(>2.0 mm)、粗砂(0.3~2.0 mm)、细砂(0.075~0.3 mm)和黏土(<0.075 mm)。

4.1 介质土的整体粒径分布特征

10个场地介质土的整体粒径分布情况见图1。

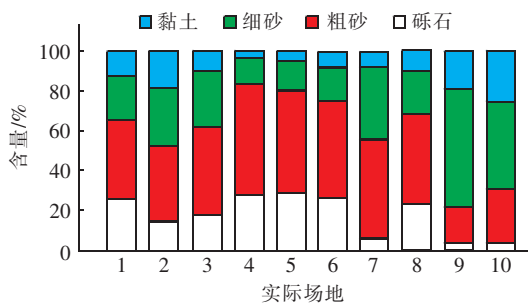


图1 10个场地介质土的平均粒径分布

Fig.1 Average particle size distribution of bioretention system media in ten sites

由图1可知,砂是介质土的主要组分(62%~86%),其中,1~8号场地以粗砂为主,占介质土总量的38%~56%,9号和10号以细砂为主,约占介质土总量的59%和44%。同时,9号和10号的砾石含量很低,仅为3%和4%,而1~8号的砾石含量较高,占介质土总量的6%~29%。

4.2 介质土粒径随运行时间的分布特征

分析了不同运行时间下介质土的粒径分布情况,如图2所示。对于黏土和细砂组分,运行4年系统的黏土和细砂含量分别为8%、36%,而运行20年系统的黏土和细砂含量分别为22%、52%,这与Davis等人^[20-21]在马里兰州采集运行近20年的生物滞留系统的介质土组分(50%建筑砂、20%~30%树叶覆盖物和20%~30%表层土)相一致。表层土是生物滞留系统发挥作用的主要部分,这一现象可能是运行过程中径流输入和植物根系作用耦合的结果,运行时间越长,颗粒污染物的累积量越多,植物根系分泌物累积越多。粗砂含量则表现出不同的变化趋势,年限越短,含量越高,这可能反映出了马里兰州在生物滞留系统构建方面的指导理念发生了变化,粗砂组分提高,更有利于维持系统较好的渗透能力,防止系统运行堵塞。

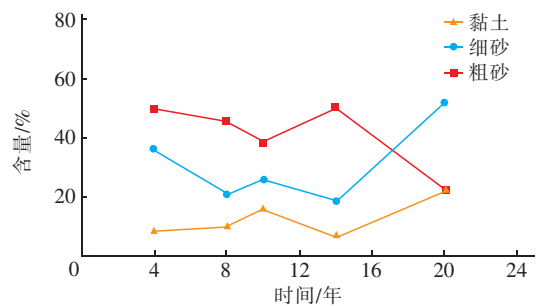


图2 介质土粒径的时间分布特征

Fig.2 Temporal distribution of particle size in bioretention system media

4.3 介质土粒径的垂向分布特征

在纵深方向上沿程采集了每个生物滞留系统的介质土样,沿程深度从上往下依次为0~10、10~20、20~40 cm和40 cm至底部,分析了每个系统介质土的粒径垂向分布特征,如表3所示(限于篇幅,仅列出5个场地的数据)。可知,对于粒径<0.075 mm的黏土组分,总体上,在表层含量最高,越往底部含量越低,可能是表层土为植物生长区,也是系统截留、生物净化污染物的主要发生区,综合作用下形

成了表层土较高的黏土含量。细砂组分含量也总体上呈现出表层土高(31%)、底层土低(26%)的特点(9号场地除外)。砾石组分和粗砂组分含量的垂向变化特征基本一致,均为越往底层含量越高,表层土的砾石和粗砂含量分别为14%和38%,而最底层的砾石和粗砂含量分别为21%和42%,由此可以看出,在生物滞留系统的垂直空间上从上到下粒径逐渐变大,保证了系统空间稳定,这与Hsieh等人^[22]的研究结果相一致。

表 3 介质土粒径的垂向分布特征

Tab. 3 Vertical distribution characteristics of particle sizes of bioretention system media

场地 编号	深度/cm	砾石 比例/%	粗砂 比例/%	细砂 比例/%	黏土 比例/%
1	0~10	14.0	42.7	30.9	12.4
	10~20	16.5	43.5	29.7	10.3
	20~30	23.2	45.7	24.7	6.4
	30~40	14.0	42.7	30.9	12.4
2	0~10	12.7	37.0	30.6	19.7
	10~20	15.1	38.2	28.1	18.6
	20~30	16.7	35.9	29.3	18.1
	30~40	13.5	39.1	29.2	18.2
3	0~10	14.0	42.7	30.9	12.4
	10~20	16.5	43.5	29.7	10.3
	20~30	23.2	45.7	24.7	6.4
4	0~10	22.1	55.2	17.1	5.6
	10~20	22.2	62.4	13.1	2.3
	20~30	28.6	56.0	13.0	2.3
	30~40	37.7	49.6	10.5	2.2
5	0~10	27.6	46.9	17.2	8.3
	10~20	30.6	48.2	15.3	5.8
	20~30	29.6	52.6	14.7	3.1
	30~40	26.6	57.8	13.0	2.6

5 结论

① 比较分析了国内外生物滞留系统介质土的理化性质,研究发现,国内的介质土渗透系数低于国外,而国外的土层深度设计略低于国内;国内介质土的高砂含量(35%~88%)和低有机质含量(15%以下)特点突出,而国外在有机质含量的要求方面,早期较高、近期较低(一般要求5%以下)。

② 对马里兰州生物滞留系统实际应用场地介质土的粒径分布特征分析表明,砂是介质土的主要组分(62%~86%),表层土的黏土和细砂含量(17%和31%)高于底层土(10%和26%),而表层土的砾石和粗砂含量(14%和38%)低于底层土

(21%和42%),同时,近期建造的生物滞留系统其黏土和细砂含量(8%和36%)均低于早期系统(22%和52%)。

参考文献:

[1] Guo H, Lim F Y, Zhang Y, *et al.* Soil column studies on the performance evaluation of engineered soil mixes for bioretention systems[J]. *Desalin Water Treat*, 2015, 54(13): 3661–3667.

[2] Takaijudin H, Ghani A A, Zakaria N A. Challenges and developments of bioretention facilities in treating urban stormwater runoff: A review[J]. *Pollution*, 2016, 2(4): 489–508.

[3] Payne E, Hatt E B, Deletic A, *et al.* Adoption Guidelines for Stormwater Biofiltration Systems[M]. Melbourne: Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities, 2015.

[4] Hinman C. Low Impact Development: Technical Guidance Manual for Puget Sound[M]. Puget Sound: Puget Sound Action Team, 2005.

[5] Schueler T R, Claytor R A. Maryland Stormwater Design Manual[M]. Maryland: Maryland Department of the Environment Water Management Administration, 2000.

[6] Hunt W F, Lord W G. Bioretention Performance, Design, Construction, and Maintenance[M]. Raleigh: North Carolina Cooperative Extension Service, 2006.

[7] Melbourne Water. WSUD Engineering Procedures: Stormwater[M]. Melbourne: CSIRO Publishing, 2005.

[8] 胡阳, 邓艳, 蒋忠诚, 等. 岩溶坡地不同植被类型土壤水分入渗特征及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(3): 597–604.

Hu Yang, Deng Yan, Jiang Zhongcheng, *et al.* Soil water infiltration characteristics and their influence factors on karst hill slopes under different vegetation types[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(3): 597–604 (in Chinese).

[9] 王杨. 不同酸度土壤硝化和反硝化活性的差异[D]. 大连: 大连交通大学, 2014.

Wang Yang. Difference in the Activity of Nitrification and Denitrification with Different Soil Acidity[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2014 (in Chinese).

[10] 刘文莉, 张崇邦, 管铭, 等. 不同植物种类、碳氮源供给和 pH 对人工湿地真菌反硝化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 1030–1036.

Liu Wenli, Zhang Chongbang, Guan Ming, *et al.* Effects of plant species, carbon and nitrogen amendments and

- pH on potential fungal denitrification in constructed wetlands[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2017, 23(4): 1030 – 1036 (in Chinese).
- [11] 刘恩玺, 高桥辉昌, 刘彩霞. 树木剪枝堆肥与传统堆肥对土壤化学性质的影响[J]. *林业与环境科学*, 2016, 32(2): 68 – 72.
- Liu Enxi, Takahashi Terumasa, Liu Caixia. The effect of compost made from pruning materials and traditional compost on soil chemical properties[J]. *Forestry and Environmental Science*, 2016, 32(2): 68 – 72 (in Chinese).
- [12] 罗艳红. 雨水生物滞留设施对道路径流中氮磷的控制效果研究及应用[D]. 北京: 北京建筑大学, 2013.
- Luo Yanhong. The Study of Remove Nutrient in Road Runoff and Application Research of Engineering Bioretention[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2013 (in Chinese).
- [13] 胡爱兵, 李子富, 张书函, 等. 模拟生物滞留池净化城市机动车道路雨水径流[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(13): 75 – 79.
- Hu Aibing, Li Zifu, Zhang Shuhan, *et al.* Simulated bioretention pond for improving quality of stormwater runoff on urban traffic road[J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(13): 75 – 79 (in Chinese).
- [14] Lucas W C. *Green Technology: The Delaware Urban Runoff Management Approach* [M]. Wilmington: Delaware Department of Natural Resources and Environmental Control Division of Soil and Water Conservation, 2004.
- [15] Westmoreland Conservation District. Bioretention in clay soils[EB/OL]. [2019 – 01 – 04]. <http://wcdpa.com/tech-services/stormwater-management/stormwater-primer-entry-page/>.
- [16] German Association for Water, Wastewater and Waste. *Planning, Construction and Operation of Facilities for the Percolation of Precipitation Water* [M]. Hennef: German Association for Water, Wastewater and Waste, 2005.
- [17] Ballard B W, Kellagher R, Martin P, *et al.* *The SUDS Manual* [M]. London: Construction Industry Research & Information Association, 2007.
- [18] Toronto and Region Conservation Authority. *Low Impact Development Stormwater Management Planning and Design Guide* [M]. Downsview: Toronto and Region Conservation Authority, 2010.
- [19] 何平. ASTM D2487 土的分类标准介绍[J]. *岩土工程技术*, 2015, 29(4): 201 – 204.
- He Ping. The introduction of ASTM D2487 for classification of soil [J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2015, 29(4): 201 – 204 (in Chinese).
- [20] Davis A P, Shokouhian M, Sharma H, *et al.* Water quality improvement through bioretention media: nitrogen and phosphorus removal[J]. *Water Environ Res*, 2006, 78(3): 284 – 293.
- [21] Davis A P. Field performance of bioretention: hydrology impacts[J]. *J Hydrol Eng*, 2008, 13(2): 90 – 95.
- [22] Hsieh C, Davis A P. Evaluation and optimization of bioretention media for treatment of urban storm water runoff[J]. *J Environ Eng*, 2005, 131(11): 1521 – 1531.



作者简介: 王书敏(1980 –), 男, 山东泰安人, 博士, 副教授, 主要研究方向为城市暴雨径流调控。

E-mail: wangshumin5103@sina.com

收稿日期: 2019 – 02 – 24