

雨水生物滞留设施中植被的设计与养护

陈 焱^{1,2,3,4}, 杨 威^{1,2}, 王健斌³, 潘伟亮^{1,2}

(1. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 3. 澳大利亚国家水敏型城市合作研究中心, 澳大利亚; 4. 澳大利亚蒙纳士大学 可持续发展研究所, 澳大利亚)

摘 要: 生物滞留设施作为一种城市雨水管理措施,因其具备景观舒适性而备受青睐。植物在生物滞留设施中具有重要的作用,而植被的设计与养护将直接影响其功能发挥与运行寿命。国外对生物滞留技术进行了一系列研究,取得了相应的研究成果,并形成了完善的设计规范,但对于植物的科学选择和种植相关研究还十分有限。国内对生物滞留技术的研究也已开展,其中也有对植物的研究,但尚未形成完善的设计体系。为提出适用于国内的植被设计方法和养护措施,通过对外生物滞留设施设计规范(手册)的解读和实地调研,从设计施工和后期养护两方面,针对植物的科学筛选、布局、种植密度、种植时间、覆盖物以及安全因素和植被养护管理等内容分别进行了分析讨论,以期完善国内生物滞留系统的设计技术体系提供参考。

关键词: 生物滞留; 植物; 筛选; 设计; 维护

中图分类号: TU99 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2017)12-0006-06

Design and Maintenance of Vegetation in Bioretention Facilities

CHEN Yao^{1,2,3,4}, YANG Wei^{1,2}, WANG Jian-bin³, PAN Wei-liang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering <Ministry of Education>, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. CRC for Water Sensitive Cities, Australia; 4. Monash Sustainability Institute, Monash University, Australia)

Abstract: Bioretention technology with aesthetic appearance is a promising urban stormwater management measures. Vegetation plays several important roles in bioretention process, whereas design and maintenance of vegetation could direct affect the performance and life span of bioretention. A series of investigations have been conducted abroad, and these studies have achieved corresponding results and established design guidelines or procedures. While the research progress on reasonable selection of bioretention plant and survival is limited. Investigations on bioretention have also been conducted in China, which include plants selection. Unfortunately, there is no mature design guideline to be proposed up to now. In order to establish an appropriate procedure for design and maintenance of vegetation, bioretention design guidelines and manuals in foreign countries were interpreted and field investigation were carried out. Vegetation design, implementation and maintenance including plants selection, layout, planting density, planting time, mulch, safety elements and typical maintenance activities were discussed,

which could provide reference for improving design methodology of bioretention technology in China.

Key words: bioretention; vegetation; selection; design; maintenance

生物滞留系统(亦称雨水生物过滤系统、雨水生物滤池、雨水花园等)因其设计规模、布置和构造的灵活性及整体的美观性而成为一种有效的城市雨水管理措施^[1,2]。典型的生物滞留设施由过滤介质、覆盖物和植物构成,其中植物在生物滞留功能中具有重要的作用,可以减缓水流通过滞留池的流速^[1,3],可直接吸收 NO_x 、重金属、有机污染物等^[2~7],并能增加填料中微生物的活性^[8,9]。此外,生物滞留设施中的植物还可作为动物的栖息地,通过对填料的遮挡从而缓解热岛效应,更为重要的是形成的植物群落可产生显著多样的景观元素,提高当地的生物多样性。但是植被设计不当,反而会影响生物滞留设施的功能发挥和运行寿命。如选用须根细短的植物,不仅不会形成大孔隙结构,反而可能占据空隙造成填料过早堵塞^[10];植物布局设计不当,则会影响生物滞留设施的水文削减效应和污染控制功能,还会增加后期养护管理成本;植被高度设计不当则会影响生物滞留设施的曼宁系数,改变植被冲刷速率^[11],出现植物被雨水“冲跨”现象,影响其存活率。因此,植物的筛选和植被的合理设计是生物滞留设施设计和运行的关键。

目前,国外对生物滞留设施科学、系统的设计方法进行了总结和推广应用,并形成了相关技术手册^[11~13]。但在这些技术指南中仅零散罗列了当地推荐的植物物种,并未对其科学筛选、种植密度和植物布局、养护管理等内容形成完善的植被设计技术体系。由于国内研究起步较晚,特别是首批“海绵城市”建设试点项目的仓促上马,对于生物滞留设施中植被的设计往往直接生搬硬套国外相关设计案例,并未考虑植物的本土性和对气候的适应性,以及东西方美感认知的差异性;甚至直接交由景观设计师根据景观需求进行设计,从而忽略植物的功能性作用。总体而言,目前国内生物滞留设施植被设计缺乏具有指导意义的科学依据和设计技术总结。为此,笔者通过对国外生物滞留设施相关设计规范的解读及实地调研,提出了生物滞留系统的植被设计方法和养护管理措施,以供参考。

1 植物选择

植物选择应根据其生长习性、生理结构特性来

满足生物滞留设施的功能需求。因生物滞留设施干湿期交替运行,植物在具备耐涝特性的同时还能耐旱,以度过较长的干旱期。对于无淹没区的生物滞留系统,植物的耐旱特性尤为重要。纵深发达的根系,可使植物充分吸收利用贮存在土壤中的水分,使植物度过干旱期,同时在有限水分条件下,吸水多少由根系深度决定^[14]。同时,根系结构对生物滞留系统的水力传导率具有显著影响。一般根系发达、须根粗壮的植物能通过膨胀、延伸等作用在土壤中形成大孔隙通道,并能延伸至土壤表面形成优先流,从而维持土壤的渗透性能;而须根细短的植物则会占据土壤中的孔隙通道,并形成“缠绕”作用而减小水力传导率^[4,10]。对于有特殊污染物控制目标的生物滞留系统而言,在植物选择时应考虑植物对污染物的吸收能力。如种植苔草和灌木白千层的雨水生物滤池具有较高的营养物去除能力,特别是可去除96%的 $\text{NO}_x^- - \text{N}$,解决了生物滞留系统中氮的淋洗这一普遍问题^[2]。因此,在植物选择时应优先考虑选用对氮有去除能力的物种^[13]。同时在白千层中发现可通过丛枝菌根真菌的作用,实现植物和根际微生物对重金属的富集^[14],甚至可考虑选择超富集能力的天蓝遏蓝菜以实现对重金属的富集^[2]。

植物类型的选择也会影响景观呈现效果以及公众的接受度。在选择植物时,应选用常绿植物。若选用直生植物如灯心草、苔草等,并辅以灌木和乔木混合种植时,可形成层次分明、主体突出,并与乔、灌木景观协调或互补的立体景观;营造平面景观时,可选用匍匐茎植物,如狗牙根草、过江藤、小金钱草等^[11]。在进行植物筛选时,应选用本土植物,除非是特殊景观需要才能考虑选用非本土和外来植物,但需有植物检疫证,严禁选用能发展为入侵性杂草的植物(如马唐草)。在满足生物滞留设施功能需求外,植物选择还需考虑植物成型后的生物多样性保护和生态价值、区域气候、土壤类型以及降雨条件等其他非生物因素^[11,13]。

因此,在植物选择时,应选用耐涝抗旱、多年生、深须根系、常绿、生长速度快,并能在贫瘠土壤中生长的植物物种,同时满足相应的预期功能目标。具体选择依据^[2,5~7,13]如表1所示。

表1 不同目标下植物选择依据

Tab.1 Plants selection to meet performance objectives

项 目	物种特征及植物选择依据
功能性目标	选用至少 50% 的功能物种,以满足处理目标,并尽可能分散种植
营养物去除	选用根系发达、须根细长植物,即具有较长的总根系长度、高根系表面积、高根系质量、高根茎比的植物,如苔草、马鞍藤、狼尾草、乔派草、蒲公英等;选用生长速度较快,同时能在干旱期存活并具持水能力的植物;选用多样性较高的植物物种和类型,以适应干、湿交替环境,保持较高的除污能力;不宜根据地面表现形状或植物类型相似性来筛选植物物种;不宜选用根系欠发达(即总根系长度和根系质量较小)的植物,或不具有功能作用的粗根系植物;不宜选用固氮植物,以免产生氮的淋洗现象
重金属去除	选用发达根系的有效物种,如苔草、菵草等
病原菌去除	选用发达根系的功能物种,如灌木麦卢卡和白千层及苔草等;选用与低渗透率相关的物种
水文效应	选用具有高蒸腾作用并能在干旱期持水的植物,如乔木;选用多层植被和不同类型的植物来促进蒸腾作用,如由乔木、灌木、莎草、灯心草和牧草构成的植被布局
渗透能力	选用粗根系植物,如灌木白千层等;选用苗壮根茎的植物,以便其在土壤表层进行分布式生长;选用种植密度相对较高的植物;不宜选用细根系植物,特别是无粗根的植物;不宜选用浅根系或稀根系植物,如知风草等

2 植被设计

2.1 植物布局

在植物布局时,选用不同类型的植物物种可提高植物群落的稳定性,并通过“自我选择”作用适应复杂多变的气候。为适应城市植物多样性原则,生物滞留设施每个水文区域宜种植不少于4种植物物种,且应包括不少于50%的功能物种,特别是具有除氮能力的物种^[13,15]。过江藤、五色菊、小金钱草等草本地被植物一般宜布局成混植地被^[10]。而牧草、灯心草、莎草和百合科等草本地被植物应根据景观需求布局为单植(如苔草等)或混植(如狼尾草、拂子茅、知风草等)。若选用灌木和乔木,对于设有预埋排水管的生物滞留设施,应避免直接种植于预埋管周边的土壤中,以防其根系对排水管产生干扰,并远离进、出水区。同时,对于宽度<1.5 m的道路和快速路分隔带设置而成的生物滞留设施,在植被布局时不宜栽种乔木,以免阻碍交通安全和通畅。

植物的平面布局应根据其生理习性进行合理确定。对于大型生物滞留设施,远离进水区的区域在

小降雨事件中可能未被淹没,应选用抗旱性强的植物;对于有一定坡度的生物滞留系统,在较高处也应选用抗旱性强的植物;而对于频繁受淹、进水流速大和泥沙负荷高的进水区,应选用生长速度相对较快的耐涝性植物,以抵御水流的水力冲刷作用,减少土壤表面的侵蚀,并形成滤草带作为预处理单元,截留径流污染物;或是采用碎石堆砌等措施降低水流速度,同时防止其他植物在该区域生长而堵塞进水口。此外,为使水流分布均匀,植物种植时应采用交错布局的品字型种植方式,并垂直于水流方向,以避免短流和优先流的产生。灌木和乔木同时种植时,可实现氮的去除并维持土壤的渗透速率,但应与林下层植物形成立体绿化,景观协调或互补。同时在平面布局时,应考虑其形成的遮阴面积,布局于树阴范围内的植物应选用喜阴性物种。

生物滞留设施作为当地街道景观的一部分,应与周边城市风貌保持一致,在植物布局时应考虑植物生长成形后产生的景观效果,使植被设计层次分明,主体突出。在平面布局时应做到统一性和多样性的平衡,实现有序布局的同时使植被景观具有趣味性。对于因植物选择(如莎草、牧草、芦苇等)而使植被景观呈现凌乱时,可通过收割、修剪等常规养护管理,以及增加公共设施、趣味性指示牌和种植花卉等措施来解决。植物布局在满足生物滞留设施基本功能后,具体的景观格调与细节应由景观设计师进行合理设计,并满足相应的行业标准,如《城市道路绿化规划与设计规范》(CJJ 75—97)的相关规定。

2.2 种植密度

生物滞留设施中的植物在种植时应保持较高的总体种植密度,以促进植物根系和根际微生物与雨水的接触,实现污染物的去除。茂密的植被还可以保护土壤表面孔隙率,促进水流分布,提高植物对污染物的吸收量,增加蒸腾损失(有助于减少径流量,降低降雨频率),并能降低杂草入侵的风险。种植密度应根据植物物种和树干类型来确定。在园林绿化中草坪草或草皮物种可采用籽播、植生带铺设、喷播等种子繁殖方式,以及草块移植和草茎埋植等营养体繁殖方式来种植。但在雨季若采用种子繁殖方式,波动的水位会使种子难以稳定成长,同时种子播撒的随机性也将影响植被布局效果。因此建议采用营养体繁殖方式来种植,具体种植密度可参照当地的园林绿化植物种植技术规范。其余植物应采用育

苗栽种,并选用平均为 300 ~ 500 mm 高的育苗,同时不低于 200 mm,以保证植物在淹没水深(一般设计成 200 ~ 400 mm)中存活,以及不被覆盖物掩埋^[15]。禾草、灯心草、莎草和百合科等物种的种植密度应控制在 12 ~ 16 株/m²;双子叶植物种植密度应控制在 6 ~ 10 株/m²^[11,15]。灌木和乔木的种植密度一般低于 1 株/m²,具体应根据景观需求来确定。小灌木种植密度控制在 1 株/2 m²,较大乔木一般控制在 1 株/5 m²^[13]。按此密度种植后,应保证一年后植物能覆盖生物滞留设施大部分区域,两年后能覆盖 70% ~ 80% 的区域^[11,13],同时也应满足当地新建居住区集中绿地植物种植面积的最低比例要求。

2.3 种植时间

常绿植物的种植应在春天土壤解冻以后、树木发芽以前,或秋季新梢停止生长后霜降以前进行^[13,16];而暖季型草种以春季至初夏尤以梅雨季为宜,冷季型草种以春季和秋季为宜,草块移植和草茎埋植除严冬外均可进行。但在种植前应根据土壤质地、酸碱度和含盐量,采取相应的施肥、石灰酸碱改性和改换土壤等措施。同时,应考虑不同区域不同时间段植物育苗的可获性。因此,在植物种植前必须预留足够的时间。一般应预留 6 个月来确保合适物种育苗的获取^[15]。对于很难繁殖或繁殖速度缓慢,甚至一年只产一季育苗的物种,在植物筛选阶段应提前咨询苗圃专家,避免因植物育苗的可获性而影响最终的植物栽种。为保证植物存活率,栽种前应根据《园林绿化工程施工及验收规范》(CJJ 82—2012)对植物育苗外观质量进行检验。

2.4 覆盖物

植物种植后,撒布覆盖物可对雨水径流中的污染物起到过滤作用,还可避免土壤水分蒸发、土壤侵蚀和杂草生长,并能为土壤中的微生物提供生长基质,甚至还具有吸附、结合重金属等污染物的功能^[2,16~18],但植物茎部周边 50 mm 范围内不应有覆盖物,以免影响植物生长^[15]。

目前在生物滞留设施中使用的覆盖物主要分为有机和无机两种类型。对于有机覆盖物而言,一般采用 2 ~ 3 英寸(50.8 ~ 76.2 mm)易降解的碎硬木(树龄为 6 个月 ~ 1 年)、树叶堆肥或类似物作为覆盖物,促进植物存活,强化重金属去除,并使土壤免受雨水侵蚀,但覆盖深度应限制在 50 ~ 75 mm 内,以免氧气进入土壤受阻而影响植物根系和微生物的

生长;应避免选用难降解的树皮或其他硬木,含杂草种子的有机覆盖物,以及单位质量 > 800 g/m² 的黄麻毡等草垫^[15,16]。对于土壤贫瘠的生物滞留设施,不宜采用碎木屑、树皮这类难降解有机覆盖物,以免造成土壤中营养物的流失而影响植物生长。而同样对于设有溢流水装置的生物滞留设施,也不宜采用碎木屑、树皮等有机覆盖物。因其密度小,容易随水流漂浮至溢流口而造成堵塞,可采用松散的轻型黄麻毡等有机草垫进行覆盖^[15]。若选用无机覆盖物,可考虑采用粒径为 10 ~ 20 mm、最小厚度为 50 ~ 100 mm 的碎石进行覆盖,同时还可减小地形坡度以提高滞留设施的安全性,并维持其设计淹没深度,但应避免选用卵石^[7,15]。优先选用多孔性的碎石(如蛭石、珍珠岩、沸石等),还可实现对磷、重金属等污染物的有效吸附去除^[2,18]。但碎石覆盖在一定程度上限制了植物的分布式生长而影响植被覆盖率,同时还会滞留热量导致土壤温度过高而影响植物正常生长,甚至给土壤表面泥沙沉积物的清除带来困难^[13]。对于因碎石覆盖限制植物分布式生长的问题,可通过增加植物种植密度来补偿。因此,覆盖物的选用应根据土壤性质、溢流口设置,以及径流中污染物情况等因素进行综合考虑。

2.5 安全因素

位于道路和人行道的生物滞留设施在植被设计时应避免隐蔽性场所和开放式绿地,遵循相关设计规范满足视距三角形原理,以符合交通安全要求。植被不得进入道路建筑界限,不得进入交叉视距三角形,在交叉范围内和弯道内侧植树应满足视距要求,不得干扰标志标线,遮挡信号灯以及道路照明,不得有碍交通安全和通畅;对于城市主、次干路中间分车绿带和交通绿地设置而成的生物滞留设施,其植被设计不应设计成草坪等开放式绿地;被人行横道或道路出入口断开的分车绿带,生物滞留设施端部的植被设计也应满足停车视距要求^[19,20]。此外,植被设计还应满足行人横穿十字路口、环形交叉路口等路段所需的视距要求。

3 植被养护

植物对于去除污染物和维持过滤介质的多孔性具有重要作用,因此,植物的健康生长是生物滞留设施处理性能的关键。在植物生长期(一般为头两年^[15])养护频率较高,需进行浇水、杂草清除、枯死株更换、病虫害控制与防治等;特别是植物栽后 26 周

内的养护质量直接决定着植物能否健康生长以及后期养护成本^[11],该时期需要进行常规浇水、灌溉,设置相应保护措施以防高泥沙负荷、高径流量以及强风的影响。早期精细的养护管理可有效降低后期养护频率,减少整个生物滞留设施后期植物更换的可能性,降低维护成本,甚至决定生物滞留设施的运行寿命。若养护管理不到位,特别是出现植物枯死时,

植物体内吸收的污染物将重新释放至土壤中而产生营养物的淋洗现象^[2]。此外,植物在后期生长过程中也会出现枯死株、产生新枝嫩芽,以及植被过于枝繁叶茂而破坏原始绿化成果,应根据当地相关部门的园林绿化养护质量标准进行定期养护管理。根据国外相关设计手册、指南和文献^[7,13,15,21,22],具体植被养护内容和频率如表 2 所示。

表 2 生物滞留设施植被养护

Tab. 2 Typical maintenance activities in vegetation

项 目	养护频率	养护标准
外观度 (LOA) 检查	栽后 3 个月应加强 LOA 检查频率,并建立每 500 m ² 的照片日志; 后期每年 2 次或每次暴雨后(2 年以上重现期降雨强度)定期检查,但出现极度干旱期时应加强检查频率	LOA 检查内容包括植物病害、枯死株、矮化生长与植物衰老情况等,并评估植被的覆盖率;若无法确定植物病态原因时,应及时咨询园林专家; 成型后的植被应满足:植物存活率在 90% 以上;植被覆盖率超过 80%;至少有两种物种;达到原始设计种植密度;生长期内 50% 以上的植物有所长高;植物通过根茎或种子进行了繁殖;无杂草
植物修剪	按设计造型进行修剪,并根据植物的生物学特征,结合不同的种植季节,以不损坏树木自然姿态为前提,同时保持地上地下平衡为原则确定修剪强度	根据当地园林绿化设计规范或养护质量标准确定修剪标准,如剪除枯死枝、病虫枝、过长枝等
植物收割	不定期	根据所处位置决定,若生物滞留设施与道路存在一定的高差,收割后的草坪高度与路面高差应保持在 40 ~ 50 mm,同时不低于设计淹没深度;通过植物收割能促进新枝嫩叶的形成,并彻底去除氮磷,强化对营养物的去除;收割高度应根据不同季节、景观需求、植物生长速度等确定
覆盖物添加与更换	按需	应根据土壤侵蚀情况来确定是否需重新添加覆盖物;在径流重金属负荷高的地区,则需对覆盖物每年更换 1 次
浇水灌溉	栽后 3 个月内:干旱期或首次暴雨过后,每周至少一次;地被植物栽后 4 ~ 5 d 内每天早晚浇水;采用草种种植时,应在种子萌发前每天喷水 1 ~ 2 次。 后期:两周一次,依据季节情况而定;植被成型后,初冬、干旱季节,以及新枝绿芽出现时仍需进行浇水,需水量应根据植物健康情况确定	对于降水量偏少地区,建议每株植物栽后 6 周内每周浇水 2.5 ~ 5.0 L;优先采用喷灌等节水灌溉技术,但灌溉时土壤不可沾污植株;干旱地区或干旱季节,栽种前应先浇水浸地,浸水深度 10 cm 以上;每次浇灌水量应满足植物存活和生长需要
枯死株更换	栽后 3 个月内应根据枯死株情况,及时更换;后期可缩减至每年更换一次	栽后一年内容容易出现 10% 的枯死株,但后期存活率会不断提高;若出现某些植物物种枯死率较高时,应及时更换为其他物种
杂草清除	每三个月或根据景观要求确定,后期可逐渐减少	应人工清除,不宜采用除草剂;若人工清除劳动强度大时,应针对性地喷洒除草剂

4 结语

国外对生物滞留技术的研究起步较早,也有较详细的相关设计规范,但是对于生物滞留设施中植物的科学选择和种植相关研究还十分有限,特别是设计手册中关于植被的设计方法也比较零散。随着我国海绵城市的建设,国内对生物滞留技术也进行了一些研究,但尚未形成植被设计和养护方面的技术体系,导致国内生物滞留设施实践运行中出现植物长势不佳、景观呈现性较差、功能需求未得到体现等问题。

虽然植被设计可直接借鉴国外相关设计案例,但是植物筛选具有显著的本土特性,植被设计也应考虑东西方美感知知的差异性。而且国内外的土壤类型、气象、道路、交通条件不同,道路径流特性也不同,即使完全按照国外设计规范进行植被设计和养护管理,取得的效果也不一定相同。因此,应结合当地的土壤情况、植物生长习性、气象条件、径流特性、周边景观环境等实际情况,研究生物滞留设施的植被设计方法和养护制度,这是该技术在國內推广应用的 key 问题之一。

参考文献:

- [1] Davis A, Hunt W, Traver R, *et al.* Bioretention technology: Overview of current practice and future needs [J]. J Environ Eng, 2009, 135 (3) : 109 - 117.
- [2] LeFevre G, Paus K, Natarajan P, *et al.* Review of dissolved pollutants in urban storm water and their removal and fate in bioretention cells [J]. J Environ Eng, 2015, doi: 10. 1061 / (ASCE) EE. 1943 - 7870. 0000876.
- [3] Hunt W F, Davis A P, Traver R G. Meeting hydrologic and water quality goals through targeted bioretention design [J]. J Environ Eng, 2012, 138 (6) : 698 - 707.
- [4] Hatt B E, Fletcher T D, Deletic A. Hydrologic and pollutant removal performance of stormwater biofiltration systems at the field scale [J]. J Hydrol, 2009, 365 (3/4) : 310 - 321.
- [5] Muerdter C, Özkök E, Li L, *et al.* Vegetation and media characteristics of an effective bioretention cell [J]. J Sustainable Water Built Environ, 2016, doi: 10. 1061 / JSWBAY. 0000804.
- [6] Yang X H, Mei Y, He J, *et al.* Comprehensive assessment for removing multiple pollutants by plants in bioretention systems [J]. Chin Sci Bull, 2014, 59 (13) : 1446 - 1453.
- [7] Hunt W F, Lord B, Loh B, *et al.* Plant Selection for Bioretention Systems and Stormwater Treatment Practices [M]. Singapore: Centre for Urban Greenery & Ecology, 2015.
- [8] Chen X, Peltier E, Sturm B S M, *et al.* Nitrogen removal and nitrifying and denitrifying bacteria quantification in a stormwater bioretention system [J]. Water Res, 2013, 47 (4) : 1691 - 1700.
- [9] LeFevre G H, Hozalski R M, Novak P J. The role of biodegradation in limiting the accumulation of petroleum hydrocarbons in raingarden soils [J]. Water Res, 2012, 46 (20) : 6753 - 6762.
- [10] Le Coustumer S, Fletcher T D, Deletic A, *et al.* The influence of design parameters on clogging of stormwater biofilters: A large-scale column study [J]. Water Res, 2012, 46 : 6743 - 6752.
- [11] Melbourne Water. WSUD Engineering Procedures: Stormwater [M]. Melbourne: Csiro Publishing, 2005.
- [12] Atchison D, Potter K, Severson L. Design Guidelines for Stormwater Bioretention Facilities [M]. Madison: University of Wisconsin, 2006.
- [13] Payne E G I, Hatt B E, Deletic A, *et al.* Adoption Guidelines for Stormwater Biofilter Systems [M]. Melbourne: Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities, 2015.
- [14] 吴永美, 吕炯章, 王书建, 等. 植物抗旱生理生态特性研究进展 [J]. 杂粮作物, 2008, 28 (2) : 90 - 93.
- [15] WSUD Water by Design. Construction and Establishment Guidelines: Swales, Bioretention Systems and Wetlands [M]. Brisbane: South East Queensland Healthy Waterways Partnership, 2010.
- [16] Cahill Thomas H. Low Impact Development and Sustainable Stormwater Management [M]. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2012.
- [17] Gülbaz S, Kazezyilmaz-Alhan C M, Coptly N K. Evaluation of heavy metal removal capacity of bioretention systems [J]. Water Air Soil Pollut, 2015, doi: 10. 1007 / S11270 - 015 - 2640 - y.
- [18] Mei Y, Yang Y H, Jiang R, *et al.* Phosphorus isothermal adsorption characteristics of mulch of bioretention [J]. Thermal Sci, 2012, 16 (15) : 1358 - 1361.
- [19] JTG B 01—2014, 公路工程技术标准 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [20] CJJ 37—2012, 城市道路工程设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [21] Wardynski B J, Hunt W F. Are bioretention cells being installed per design standards in North Carolina? A field assessment [J]. J Environ Eng, 2012, 138 (12) : 1217 - 1220.
- [22] Hunt W F, Lord W G. Urban Waterways: Bioretention Performance, Design, Construction, and Maintenance [M]. Raleigh: North Carolina State University, North Carolina Cooperative Extension Service, 2006.



作者简介: 陈垚 (1983 -), 男, 浙江永康人, 博士, 副教授, 系主任, 从事城市雨洪管理与水污染控制研究。

E-mail: cycque@163.com

收稿日期: 2016 - 11 - 13