

美国雨水管理体系中树木的应用

游宇¹, 车伍^{1,2,3}, 闫攀⁴, 赵杨⁴

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京建筑大学 北京市可持续城市排水系统构建与风险控制工程技术研究中心, 北京 100044; 3. 北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044; 4. 北京雨人润科生态技术有限责任公司, 北京 100044)

摘要: 树木对雨水径流产流过程具有直接的影响,然而我国在城市雨水管理或海绵城市建设相关研究和实践中对树冠的截留作用关注较少,城市范围内已有或可种植的树木所具有的雨水控制潜力未得到足够重视和挖掘。在美国,树木作为一种雨水控制设施已被纳入雨水规划和技术手册中,在削减城市雨水径流、降低工程投资等方面发挥作用。基于美国部分雨水规划、设计手册及相关技术报告,对树木雨水控制功能方面的研究概况、实际应用以及设计要求等进行分析,以期为我国海绵城市建设中充分发挥树木在径流控制方面的作用提供经验和参考。

关键词: 树木; 雨水管理; 绿色基础设施; 海绵城市

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)22-0030-06

Application of Trees in Rainwater Management System in America

YOU Yu¹, CHE Wu^{1,2,3}, YAN Pan⁴, ZHAO Yang⁴

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Sustainable Urban Sewage System Construction and Risk Control, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Beijing Advanced Innovation Centre for Future Urban Design, Beijing 100044, China; 4. Beijing Yuren Rainwater Ecotechnology Co. Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: Urban trees have a direct effect on runoff generation. However, rainfall interception by tree canopy receives little attention in the practices and studies of sponge city construction or urban rainwater management in China. The potential of rainwater control volume by protecting existing trees or planting new trees is undervalued within cities. In America, trees are regarded as rainwater control measures in rainwater plan and technical manual, and trees play an important role in mitigating urban flooding and cost reduction. Based on some American rainwater management plans, design manuals and the relevant technical reports, development survey, practical application and design procedures for trees application in rainwater management system in America were analyzed. It provides experience on the application of trees in sponge city construction and takes maximum advantage of trees in runoff control.

Key words: trees; rainwater management; green infrastructure; sponge city

树木是城市的一种天然海绵体。在降雨过程中,约10%~30%的降雨量被树木的枝干与叶片截留^[1],减少雨水径流量的同时还延缓了径流峰值出

现时间,间接减轻了雨水污染负荷以及土壤侵蚀;树木根系的生长可改善土壤渗透能力,有利于雨水水质净化及水量削减。除了对雨水的控制作用外,树

木还兼有改善城市空气质量、遮阴、节省能耗、美学欣赏、改善鸟类的栖息环境等多方面的生态效益,是一种具有多功能的绿色基础设施。

美国农业局(USDA)在城市树木林冠对雨水的截留作用以及城市行道树经济效益分析等课题上开展了长期、大量的基础研究,结果表明,城市内的树木具有良好的水质水量控制效果,并存在可观的雨水控制经济收益^[2]。美国环保局(EPA)目前已将城市树木林冠纳入绿色雨水基础设施(GSI)中,各州市也从雨水规划、设计以及工程实践等多方面开展应用。

美国雨水管理体系中树木的应用经过数十年的发展积累了一定的经验与成果,并证实了树木作为一种雨水控制设施的可行性与高效性。

1 树木的雨水控制功能研究及实践概况

在城市树木林冠雨水截留研究方向上,加利福尼亚大学与美国农业局的研究人员自 1999 年起较早开展了具有针对性、系统性的研究。纽约市城市森林资源报告中指出,纽约市行道树年均截留雨量约 $337 \times 10^4 \text{ m}^3$,可折合经济效益约 3 560 万美元。2013 年起,流域保护中心(the Center for Watershed Protection, CWP)受美国林业局资助开展了城市树木的雨水收益折算体系研究,通过建立水量平衡模型,科学确定全国范围内不同气候区、不同林冠覆盖等条件下树木的雨水控制效果,此模型的早期版本已于 2016 年率先应用于切萨皮克湾项目中。整体来看,基于这些较早开展的相关研究,美国目前已有大量的实验数据甚至成熟的模型工具支撑树木在雨水管理中的应用,在 2017 年、2018 年,EPA 与 USDA 仍有部分应用研究课题在继续开展。

针对市政分流制雨水排放系统(MS4),1990 年、1999 年 EPA 分别正式颁布了第一阶段、第二阶段的雨水排放规则;2000 年 EPA 发布了《第 II 阶段雨水最佳管理措施国家目录》(以下简称为《目录》),指导第二阶段 MS4 雨水管理规划的编制。《目录》中不同分类措施下包含 120 余项具体措施,其中与树木相关的有 6 种。结合《目录》及部分美国城市雨水管理规划文本,表 1 给出了各类雨水控制措施所对应的 BMP 条目下是否包含树木的清单。从收集的 27 份各城市雨水管理规划文本的具体内容来看,西雅图、波特兰等 7 座城市的 MS4 雨水管理规划文本中,使用树木作为一种 BMP 措施进行雨

水径流管理,具体包括河岸林地建设、行道树种植、志愿植树活动的开展以及对已有树木的保护等。

表 1 分流制排水系统雨水控制措施中树木的应用情况

Tab. 1 Application of trees in the stormwater control measures of MS4

项 目	雨水控制措施	BMP 条目中是否包括树木
雨水阶段 I	公众教育与扩展	×
	公众参与	√
	非法排放的监测与消除	×
	建设区域径流控制	√
	新建/改建场地径流控制	√
	工业园区高危径流控制	×
	市政维护	×
	监测	×
雨水阶段 II	公众教育与扩展	×
	公众参与	√
	非法排放的监测与消除	×
	建设区域径流控制	√
	新建/改建场地雨水径流控制	√
	市政维护	×

自 2007 年起,EPA 发布数份政策备忘录及相关文件鼓励利用绿色基础设施(GI)进行雨水径流管理,并强调将 GI 与合流制溢流(CSO)控制、MS4 许可等联邦管控的项目进行结合。2007 年 EPA 分别发表了《GI 意向声明》及《利用绿色基础设施保护雨水水质》政策备忘录,其中树木、树池被列入 9 种常用绿色基础设施,明确了树木在雨水管理中的重要作用,并大力促进其工程实践。

在新的政策驱动下,纽约、费城、波特兰等数十个城市陆续将树木种植作为雨水控制措施的一种写入绿色基础设施规划,控制源头雨水径流或削减部分 CSO 溢流量;华盛顿特区将林冠覆盖面积增长纳入其 MS4 许可中。为进一步推广树木在雨水管理中的应用,2013 年 EPA 发布《利用行道树控制雨水指南》,指导树木的工程应用;2016 年 EPA 发布《雨水树池技术备忘录》,对雨水树池设计、建设及后期维护进行了详细的介绍。除此之外,自 2015 年起,俄亥俄-肯塔基-印第安纳区域联合委员会开展了《树木与雨水管理设计及政策结合指南》编制工作,此指南的目的在于,指导地方政府决策者促进、增加雨水管理中树木的应用,弥补雨水管理领域对树木雨水控制功能认识的普遍缺失。

从上述分析可见,在深入的研究基础上,美国近

年来为在城市雨水管理方面更加合理发挥树木的雨水控制功能开展了一系列有效的工作。

2 美国 GIS 规划中树木的应用及其效果

绿色基础设施规划是美国各城市在雨水管理新阶段、新要求下使用绿色化策略进行城市径流控制的重要规划,树木作为城市绿色基础设施的组成之一,在控制合流制溢流和场地雨水径流等方面发挥着积极作用。查阅 17 份绿色基础设施规划后发现,利用树木进行雨水径流管理已基本成为美国各城市绿色基础设施规划中的共识,为此基于兰卡斯特、底特律、西雅图、霍博肯、密尔沃基、纳什维尔、奥农达加及费城这 8 座城市的绿色基础设施规划,分析绿色基础设施规划中树木的雨水控制实施效果及设施投资效益。

2.1 树木的雨水控制体积量化方法及实施效果

表 2 总结了 8 份美国城市绿色基础设施规划中树木的雨水控制体积量化方法及实施后可达到的效果。表 2 中,树木的雨水控制体积量化方法可分为

表 2 部分美国城市绿色基础设施规划中树木的雨水控制效果分析

Tab. 2 Analysis of stormwater control effect by trees in American green infrastructure plans

项 目	名称	规划控制总目标	量化方法	种植规模/棵	树木的雨水控制体积在控制总目标中占比/%
2011 年	兰卡斯特绿色基础设施规划	控制 512 hm ² 不透水面内的 25.4 mm 雨水	经验估算	6 250	4
2014 年	底特律绿色基础设施规划	2 年一遇设计降雨下削减 1.06 × 10 ⁴ m ³ 雨水	经验估算	6 762	7
2015 年	西雅图绿色基础设施战略	每年削减 265 × 10 ⁴ m ³ 雨水	经验估算	—	—
2013 年	霍博肯绿色基础设施战略	合流制溢流频次从 5 次/月削减至 4 次/a	—	—	4
2013 年	密尔沃基绿色基础设施战略	每年削减 5 200 × 10 ⁴ m ³ 雨水	经验估算	738 000	9
2009 年	纳什维尔绿色基础设施规划	每年削减 1 300 × 10 ⁴ m ³ 雨水	模型模拟	51 800	20
2010 年	奥农达加绿色基础设施规划	每年削减 94 × 10 ⁴ m ³ 雨水	经验估算	8 500	5
2010 年	费城绿城清水规划	控制 3 900 hm ² 不透水面上的 25.4 mm 雨水	模型模拟	300 000	—

由于控制目标、量化方法及下垫面条件等存在区别,因此在各城市绿色基础设施规划中,树木的应用规模与实施效果也有所差异。表 2 中各城市树木种植规模与其规划区域面积的大小与可绿化空间的多少有关。城市空间内林冠覆盖率提升的分析工作一般由美国林业局主导完成,如兰卡斯特市绿色基础设施规划的附录中就包括由林业局编制的兰卡斯特市林冠覆盖分析报告,目前林业局已经完成 50 余份美国各城市的林冠覆盖分析报告,并为这些城市制定了可实现的林冠覆盖率目标。在不同的规划控制总目标及种植规模下,表 2 中各城市的树木雨水控制体积占规划控制总目标体积的 4% ~ 20%,这说明树木的种植以及城市林冠覆盖面积的增长可获

得良好的雨水控制效果。而且,这些资料清晰地表明,美国的雨水专项规划中,不仅将树木作为雨水控制设施的一种,还具体到树木的种植棵数及其量化的控制效果,对工程实施及城市林木科学化管理具有很好的指导作用。

经验估算与模型模拟两类。经验估算方法主要基于文献数据推测树木雨水控制体积,以西雅图为例,2008 年西雅图公共事业部门发布了树木对雨水径流影响的研究报告,依据此报告结论,西雅图绿色基础设施战略中将树木分为落叶树与常绿树两类,可分别控制林冠覆盖范围内年降雨体积的 11% 与 22.5%;模型模拟方法通过数学模型的连续模拟得出树木的雨水控制体积,纳什维尔绿色基础设施规划中对树木截留作用与蒸腾作用所产生的雨水控制体积分别进行了模拟分析,得出的结论为:树木截留作用与蒸腾作用可分别控制林冠覆盖范围内年降雨体积的 7.3% 与 54.8%。从不同量化方法的分析结果来看,西雅图对树木林冠截留能力的预估略高于纳什维尔,但在纳什维尔市规划中树木蒸腾作用消耗的雨水量约为西雅图市算法中的 5 ~ 6 倍,不同量化方法对树木雨水控制体积最终计算结果影响较大。显然,针对不同城市的具体条件合理地确定量化分析方法,是合理评估树木雨水控制效果的基础。

2.2 树木的雨水控制成本效益分析

成本效益分析是进行规划方案比选和优化的基础,部分城市绿色基础设施规划中设施成本效益的分析结果显示:在源头径流控制或 CSO 控制的单项效益上,树木的投资效益不仅高于传统的灰色基础设施,在现有的众多绿色基础设施中也名列前茅。

图 1 对密尔沃基市绿色基础设施规划中不同雨水设施的成本效益进行了比较(以控制 1 m³ 径流体

积所花费的建设资金为单位;美元兑换人民币汇率按1:6.27折算)。由图1可知,树木的雨水控制建设成本仅为深隧的1/3,其成本效益在10项绿色基础设施中排列第四。图1还表明,由于造价较高或汇水面积较小等,部分绿色基础设施如雨水花园、绿色屋顶的雨水控制成本甚至高于深隧,这尽管只是美国一个城市特例条件下的数据,但也充分说明在工程实施中需要根据实际情况来组合灰绿设施,并通过技术经济分析数据来确定优化方案的重要性,而不是简单地基于概念上的优劣盲目确定方案。

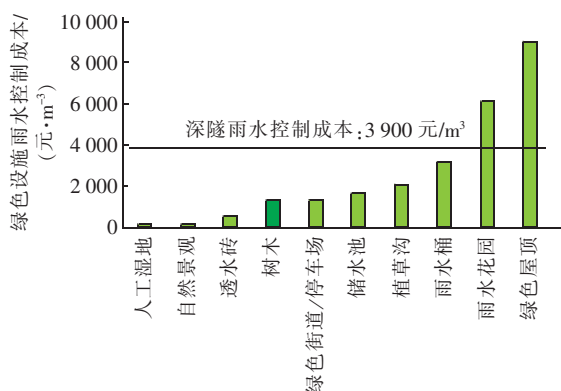


图1 密尔沃基市绿色基础设施规划中不同雨水设施的成本效益分析

Fig.1 Cost effective analysis of stormwater control measures in Milwaukee regional green infrastructure strategies

兰卡斯特绿色基础设施规划中通过估算控制单位CSO溢流体积所花费的项目边际成本,对道路、公园、人行道、停车场、平屋顶、斜屋顶、学校及行道树等8种类型项目在绿色化建设或改造中的CSO溢流控制成本效益进行了评估,其中树木的CSO控制边际成本为313.5元/m³,略低于绿色化改造项目平均CSO控制边际成本(330元/m³)以及灰色基础设施CSO控制边际成本(379.5元/m³)。

需要注意的是,由于中美两国在施工过程中人工费、材料费、机械费等的差异,绿色雨水设施的建设成本差别较大,这些数据的大小及差别只能作为参考。例如,有关资料^[3]显示,我国透水铺装、雨水花园及绿色屋顶的建设成本估算分别为60~200、150~800及300~1000元/m²,而美国密尔沃基市透水铺装、雨水花园及绿色屋顶的建设成本估算分别为130~340、210~840及800~1600元/m²。因此,美国的雨水设施的费用效益分析虽有一定的参考意义,但仍需结合我国本土化数据做进一步的量

化分析和研究。

绿色基础设施规划的整体投资效益评估常采用“三底线法”,即从经济、社会、环境三方面评判规划方案效益。大量研究表明,城市范围内树木的种植可产生显著的综合效益,如2005年McPherson对美国5座城市的树木资源进行成本(建设+运维)、效益(能源节约+CO₂削减+空气质量改善+雨水控制+财产增值)估算时指出,不同城市树木的成本与效益分别为80~400和190~600元/(a·棵),其效益与成本之比在1.37~3.09之间。

上述分析表明,在适宜进行树木种植的市政道路、街区、园区、住区、停车场等区域,树木应被列入优先级技术措施类别。此外,作为一种多功能生态设施,树木具有的雨水控制外的附加价值可提高规划整体效益,为城市创造更健康、舒适的人居环境。

3 美国雨水设计手册中树木的应用

以美国各州、市的19份雨水手册为样本,对雨水设计手册中树木的应用进行分析,可知15份手册将植树或树木保护与雨水花园、透水铺装等并列为雨水控制技术措施的一种,并给出了详尽的设计要求与计算方法。从所掌握的这些资料看,最早在2003年乔治亚州松湖市雨水手册中已经开始应用树木来控制雨水径流,其余涉及树木应用的雨水手册编制年份均在2007年之后。研究表明,美国越来越多的州、市正在尝试将树木的应用编入雨水手册。以佛蒙特州为例,2014年佛蒙特州自然资源局委托某环境咨询公司完成了《场地尺度内树木控制雨水的额度体系与激励措施》的报告,为佛蒙特州雨水手册中树木的应用和量化计算提供了指导性意见。

3.1 场地设计中树木的设计要求及效果估算

3.1.1 树木的设计要求

为了达到对雨水径流的控制效果,树木需要满足一定的设计要求。各州与地方雨水手册中对树木的设计要求不尽相同,主要要求有以下几点:①树木种类与规格。树木种类须符合当地植物名录,且对于现有的树木,胸径应达到10~15cm,对于新种植的树木,落叶乔木胸径应达到4~5cm,常绿乔木或针叶树最低高度为1.8m左右。②树木位置。绿地内树干中心距不透水面边缘的水平距离应在3~6m以内,对于已有树木要求往往取其上限值,新种植树木则相反。③土壤要求。纽约州及圣地亚哥市等雨水手册中对树木所需的土壤体积有具体要求,即

每棵树所需最小土壤体积为 20 ~ 30 m³, 芝加哥雨水手册中则对种植土配比提出了要求。

3.1.2 树木的雨水控制效果估算

在美国, 新建或改造项目中树木的保护与种植所达到的雨水控制效果可通过雨水额度体系进行估算, 明尼苏达州雨水手册中将雨水额度定义为单个或多个雨水设施为达到水量水质目标所削减的径流体积或污染负荷(以下涉及的雨水额度仅针对水

量)。达到设计要求的树木可通过一定的估算方法转换成相应的雨水额度, 表 3 给出了部分州、市雨水手册中树木的雨水额度的估算方法, 主要包括不透水面积削减、雨量体积削减以及径流系数削减三种。目前美国雨水手册中最常用的为不透水面积削减额度。在以场地不透水面积为主要收费依据的雨水收费制度下, 树木所提供的不透水面积削减可直接转换为减少用户所缴纳的雨水费。

表 3 美国部分州、市雨水手册中树木雨水额度的估算方法

Tab. 3 Calculation method of tree stormwater credits in the manual of different states and cities

项目	雨水额度类型	估算方法说明
纽约州雨水管理设计手册(2010 年)	不透水面积削减	已有树木: 50% 林冠面积/棵 新植树木: 10 m ² /棵
华盛顿州雨水管理设计手册(2014 年)	不透水面积削减	已有树木: 常绿乔木, 20% 林冠面积; 落叶乔木, 10% 林冠面积 新植树木: 常绿乔木, 5 m ² /棵; 落叶乔木, 2 m ² /棵
明尼苏达州雨水手册(2017 年)	雨水体积削减	$V = V_{inf} + V_{ET} + V_1$, 式中 V 为树木雨水额度; V_{inf} 为雨水下渗量, V_{ET} 为雨水蒸发量, V_1 为截留量。部分参数: 针叶树场截留量均为 2.2 mm, 落叶树场截留量均为 1.1 mm
佛蒙特州雨水管理手册(2017 年)	雨水体积削减	已有树木: 1.3 mm × 林冠面积; 新植树木: 0.14 m ³ /棵
密歇根州低影响开发手册(2008 年)	径流系数削减	不透水面(道路、屋顶等) CN 值为 98, 状况良好的林地 CN 值为 30 ~ 77
波特兰雨水管理手册(2016 年)	不透水面积削减	已有树木: 胸径为 4 ~ 15 cm, 20 m ² /棵; 胸径 > 15 cm, 40 m ² /棵 新植树木: 阔叶树, 10 m ² /棵; 针叶树, 20 m ² /棵
芝加哥雨水管理手册(2016 年)	不透水面积削减	已有树木: 50% 林冠面积/棵; 新植树木: 5 m ² /棵
圣地亚哥 BMP 设计手册(2016 年)	体积削减	$TCV = SV \times 0.3$, 式中 TCV 为树木雨水额度, SV 为种植土壤体积
纳什维尔雨水管理手册(2016 年)	径流系数削减	硬化面雨量径流系数为 0.95, 林冠覆盖面径流系数为 0.02 ~ 0.10

表 3 数据显示, 每棵已有树木可获得 10% ~ 50% 林冠面积或 20 ~ 40 m² 的不透水面积削减量, 每棵新植树木可获得的不透水面积削减量则在 2 ~ 20 m²。大部分雨水手册中规定树木所获取的不透水面积削减额度不能超过场地内不透水面积的 25%。佛蒙特州雨水手册为林冠截留的雨量体积给出了简单的经验值; 圣地亚哥市仅考虑树木蒸发及下渗部分的雨量体积(分别为种植土体积的 10% 与 20%); 明尼苏达州的设计算法将树木截留、蒸发以及下渗三部分的雨量体积相加得到总的树木雨水额度。某研究报告中指出, 与其他多种算法相比, 明尼苏达州的雨水额度计算方法更为科学合理^[4], 但此算法的缺点在于所需参数较多且计算步骤复杂, 工程应用有一定局限性。少数州、市通过区分下垫面的径流系数或 CN 数来估算树木的雨水额度, 如纳什维尔雨水手册林冠覆盖面的径流系数取值为 0.02 ~ 0.10, 远低于不透水面径流系数, 然而手册中并未进一步明确林冠覆盖面下的土地性质(硬化面或绿化面)。还值得注意的是, 表 3 中给出的设计

手册除了纽约州和密歇根州, 其他地区基本都是近几年新发布的手册。

3.2 工程设计中树木与土壤改良措施的结合

雨水工程实践中树木的应用形式可分为两类: 第一类为普通的树木种植, 主要通过林冠覆盖面截留雨水; 另一类则是树渠等构筑物, 结合树木与土壤改良措施实现雨水控制及树木养护等多重目标。

尽管工程造价远高于普通的树木种植方式, 在纽约、费城、西雅图等城市, 树渠仍作为一种新型雨水工程设施在绿色街道、绿色停车场等项目中被广泛应用。树渠典型构造如图 2 所示。

树渠是通过地下渗透结构连接的雨水处理设施, 在地表以上, 树渠看起来与普通的树池毫无区别, 然而在人行道下, 树渠却承担着将周边汇水面积产生的雨水径流收集、储存、净化及转输的作用。整个树渠系统的结构为, 沿着人行道开挖的长条形渠道, 两侧及底部设置透水土工布, 土壤下层是一定比例混合的碎石与沙砾(结构土), 土壤上层为种植土。在降雨过程中, 道路上的雨水径流通过雨水口

进入树渠,下层土壤间的大孔隙为雨水提供了可观的蓄水空间,雨水在被树木根系吸收的同时缓慢下渗,当超过树渠的蓄水容量时,被净化后的雨水可通过树渠底部的渗管排至附近检查井进入市政管道。

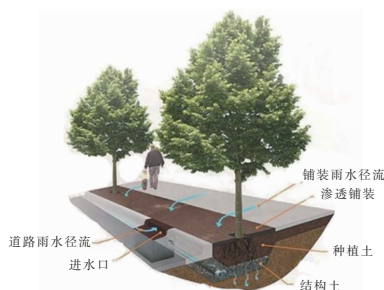


图2 树渠典型构造示意

Fig. 2 Typical structure of tree trench

与传统的树木种植相比,雨水树渠的优点主要有以下两点:①人工改良土壤在满足人行道等硬质路面承载要求的同时降低了土壤的密实度,为树木根系提供良好的生长环境,有利于树木林冠覆盖面积的增长;②土壤渗透性能的提升提高了对周边区域径流的收集能力。在径流污染较严重的地区,根系土壤对水质的净化可部分满足最大日污染负荷总量(TMDL)的控制要求。

4 建议

通过分析研究,并结合我国雨水管理发展现状及海绵城市推进过程中存在的一些问题,提出以下建议:

① 积极开展相关基础研究与应用研究。国内的森林水文学研究区域主要在城市之外,城市内园林植物林冠截留及冠下产流规律研究开展较少,尤其在园林与雨水管理相结合的领域,如林冠截留作用对城市综合径流系数的影响、林冠截留量与年径流总量控制率之间的关系、城市林冠截留作用的发挥与海绵城市建设及其目标的关系等,仅有少量文章进行了初步探索。此外,我国不同地区树木的种类和林冠特征、不同城市林冠覆盖情况与气候条件差异性较大,如何结合不同地区特点,制定我国海绵城市建设树木的应用策略是亟需解决的关键问题之一。基础研究和应用研究的不足,基础理论和数据的缺失,对海绵城市中充分发挥树木的作用构成了障碍。因此,积极开展相关研究具有重要意义。

② 完善指南、规范标准。我国目前缺乏配套的技术标准体系支撑海绵城市建设中树木作用的充

分发挥,应该在上述研究的基础上,尽快在海绵城市相关的水专业技术指南、规范标准以及园林景观相关的规范标准中明确树木控制雨水径流的作用及相关设计要求、计算方法和技术经济参数,以指导在工程实践中的广泛应用。

参考文献:

- [1] 余新晓,张志强,陈丽华,等. 森林生态水文[M]. 北京:中国林业出版社,2004.
Yu Xinxiao, Zhang Zhiqiang, Chen Lihua, *et al.* Forest Ecohydrology [M]. Beijing: China Forestry Press, 2004 (in Chinese).
- [2] McPherson E G, Simpson J R, Peper P J, *et al.* Northeast Community Tree Guide: Benefits, Costs, and Strategic Planting [R]. Albany, CA: US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, 2007.
- [3] 宫永伟,杨一帆,李俊奇,等. 屋顶绿化的效益及成本分析[J]. 环境与可持续发展, 2015, 40(3): 133-137.
Gong Yongwei, Yang Yifan, Li Junqi, *et al.* The analysis of the effect and cost of green roofs[J]. Environment and Sustainable Development, 2015, 40(3): 133-137 (in Chinese).
- [4] Comprehensive Environmental Inc. Tree canopy stormwater implementation & outreach program [EB/OL]. <http://treecanopybmp.org/uploads/files/CEI%20Tree%20Canopy%20Stormwater%20Technical%20Report%202017.pdf>, 2017-06-02.



作者简介:游宇(1994-),男,江西萍乡人,硕士研究生,主要研究方向为城市雨洪控制与管理。

E-mail: buceayy@163.com

收稿日期:2019-02-07