

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2019.03.002

中美海绵城市建设中的树木管理比较

车伍^{1,2,3}, 鲍仁强¹, 赵杨⁴, 赵泽坤¹

(1. 北京建筑大学城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室, 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:针对我国在海绵城市建设中未能足够重视城市树木对雨水径流削减功能的问题,在简述中美两国关于城市树木和径流削减关系研究的基础上,比较分析了两国城市树木管理方面的法规、专项规划以及规范标准中涉及雨水管理的相关内容,指出我国目前还存在缺乏对城市下垫面及城市树冠的精细化分析、对城市树冠的生态功能及相关指标重视不足、在树种和种植位置的选择上缺乏对雨水径流控制的考量等问题。建议加强基础资料的积累和公开、深化树木削减雨水径流能力的基础研究以及完善相关规划和规范标准。

关键词:城市树木;树冠;径流削减;雨水管理;海绵城市;美国;中国

中图分类号:TV121+.1;TU85 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2019)03-0007-07

Comparison of tree management in sponge city construction between China and America // CHE Wu^{1,2,3}, BAO Renqiang¹, ZHAO Yang⁴, ZHAO Zekun¹ (1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment (Beijing University of Civil Engineering and Architecture), Ministry of Education, 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 Center for Future Urban Design, Beijing 100044, China; 4. Beijing Yuren Rainwater Ecotechnology Co., Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: In view of the problem of insufficient attention paid to the reduction function of urban trees on rainwater runoff in the construction of sponge cities in China, on the basis of a brief description of the relationship between urban trees and runoff reduction in China and America, this paper compares and analyses the relevant contents of urban tree management regulations, special planning and standards in China and America concerning rainwater management. It is pointed out that there are still some problems in China, such as lack of detailed analysis of urban underlying surface and urban tree canopy, insufficient attention to the ecological functions and related indicators of urban tree canopy, and lack of consideration of rainwater runoff control in the selection of tree species and planting location. It is suggested that the accumulation and publicity of basic data should be strengthened, the basic research on the ability of trees to reduce rainwater runoff should be deepened, and the relevant planning and normative standards should be improved.

Key words: urban tree; tree canopy; runoff reduction; stormwater management; sponge city; America; China

以雨水管理为核心的海绵城市建设已进入到关键阶段^[1-2],国办发[2015]75号等文件也提出了海绵城市建设的战略任务和目标。然而,在试点海绵城市建设中面临土地空间限制、改造代价高等困难和挑战。树木是城市绿地的重要组成部分,也是海绵城市的重要组成部分。充分利用好城市树木的树冠来截留雨水,不仅能够发挥遮阴降温、缓解城市热

岛效应、净化空气等多种生态功能,还能够更好地利用地上空间,减少径流控制设施的规模和投资,减少绿色雨水设施的占地面积和改造成本,可产生可观的经济效益和环境效益。

美国对城区树木的雨水径流削减作用的研究开展较早。1986年,Sanders^[3]评估了俄亥俄州代顿市(Dayton)树木对雨水径流的削减效果,结果表明,城

基金项目:水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07103-002);高精尖创新中心科研项目(UDC2016040100)

作者简介:车伍(1955—),男,教授,主要从事城市雨洪控制与利用等研究。E-mail:chewu812@vip.163.com

市现有树木能够削减 7% 的雨水径流量,如果适度增加树冠覆盖面积,径流削减比例可以提升至 12%。20 世纪 90 年代末,关于城市树木和雨水截留关系的研究开始逐渐增多,加利福尼亚州、马里兰州、俄亥俄州等地区相继开展了针对不同树种和树冠覆盖条件下雨水截留效果的研究,积累了丰富的数据资料。Xiao 等^[4]在加利福尼亚州萨克拉门托(Sacramento)的研究表明,14% 树冠覆盖率下,能够截留 1.8% 的降雨量;Inkiläinen 等^[5]基于 14 场降雨观测,对北卡罗来纳州一定树冠覆盖率下的某住宅区进行了分析,发现可减少 19.9% ~ 21.4% 的径流量;在阿肯色州费耶特维尔(Fayetteville),当树冠覆盖率从 27% 增加到 40% 时,预计将削减 31% 的雨水径流,进而能为该市减少约 4 300 万美元的雨水管理成本^[6]。美国森林组织(American Forests)利用 CITYgreen、i-Tree 等模型对 30 多个主要城市的树冠覆盖及其生态效益进行了分析和评估^[7]。2016 年以来,美国国家森林局(US Forest Service, USFS)还与绿色基础设施中心合作,在北卡罗来纳州、佛罗里达州等 6 个州开展试点,研究如何在雨水管理中充分发挥树木的功能^[8]。

近年来,国内开始有学者对城市树冠的雨水截留功能进行初步研究和探索。车生泉等^[9]利用浸水法对上海市 70 种常见园林植物的冠层截留能力进行了测定和估算,阔叶乔木的雨水截留容量大致在 0.5 ~ 2.5 mm 之间,针叶乔木为 0.85 ~ 5.98 mm,而灌木、地被植物的雨水截留容量平均值为 2 mm 和 1.4 mm;游宇等^[10]对北京 8 种乔木在 16 场降雨中的树冠截留效果进行的现场实测表明,不同树种的树冠削减雨水径流的效果不同,树冠覆盖面积的增加和树种的合理搭配能够有效减少雨水径流量;张磊等^[11]利用 CITYgreen 模型对合肥等 3 个城市建成区树木树冠的生态效益进行了评估,削减径流产生的效益占比最高。尽管如此,如何充分发挥城市树冠的作用来有效地截留雨水,国内在意识、基础研究、树木的管理和工程实践等方面都存在明显不足,

阻碍了在海绵城市建设中更好地发挥树木的作用。

本文从法规、专项规划、规范标准三方面分析中美两国在城市树木管理中有关雨水管理的相关内容,以认识不足、取长补短,推动海绵城市建设中更高效地应用树木、更充分地发挥城市树冠的作用,提高海绵城市建设的投资效益。

1 树木管理法规对雨水径流控制的重视

随着对城市树木综合效益研究的不断深入,美国城市树木管理的立法除了加强对树木的保护外,更重视发挥树木在削减雨水径流、改善空气、节能固碳等多方面的综合效益。2008 年,联邦修订了《合作林业援助法》(Cooperative Forestry Assistance Act),要求开展流域林业援助项目(Watershed Forestry Assistance Program),明确将树木种植作为解决城区水质问题的途径之一,并要求联邦部门为州与城市树冠覆盖面积的提升、树种的选择提供技术和资金支持,促进联邦部门与州、各地方政府以及非营利组织的合作^[12]。

在地方层面上,许多城市相继颁布或修订了适用于城市范围、与联邦法具有同样约束力的树木管理条例,大多是以提升城市树冠覆盖面积为宗旨,进而促进城市树冠生态功能的发挥。查阅美国部分地区树木管理条例中与雨水径流控制相关的内容(表 1),大致具有以下几个共同点:①明确树木具有控制雨水径流的作用;②针对不同用地类型分别规定树冠覆盖指标,并将其作为建设项目审批的前置条件;③要求制定城市树木管理规划,以保证树木管理的可持续发展,为人居环境的改善发挥更多作用。除表 1 列出的城市已经完成树木法规的修订外,西雅图、亚特兰大、路易斯维尔等城市也在积极推动城市树木条例的修订工作,发挥树木在环境、经济、社会等方面的综合效益。

我国与树木种植和保护相关的国家法律法规主要有《城市绿化条例》《城市绿线管理办法》《中华人民共和国森林法》《中华人民共和国森林法实施条例

表 1 美国部分地区树木管理条例中与雨水径流控制相关的内容

名称	颁布年份	要点
圣安东尼奥(San Antonio)树木条例	2010 年	规定树冠覆盖指标和树木等低影响开发设施的雨水费用减免额度计算方式
蒙哥马利县(Montgomery County)树冠条例	2013 年	明确树木的雨水截留功能;申请沉淀物控制许可必须种植一定量遮阴树,否则要额外付费;规定不同用地类型的树冠覆盖要求
华盛顿特区(District of Columbia)市政条例	2016 年	树木等绿化景观应尽可能消纳周边场地产生的雨水径流;超过 10 个停车位的停车场,每 5 个车位需种树 1 棵,以发挥遮阴、削减径流等功能
温特维尔(Winterville)树冠保护条例	2017 年	规定树冠覆盖指标;要求制定树冠覆盖计划,并作为建设项目审批前置条件;树冠覆盖额度获取条件
华盛顿州湖森林公园(Lake Forest Park)树冠条例	2018 年	树冠覆盖指标作为建设项目审批前置条件;每 5 年开展一次树冠覆盖调查

例》《城市古树名木保护管理办法》等。从现行法律法规的内容看,虽然提出了因地制宜、适地适树、尊重生物多样性等原则,但往往比较笼统,几乎没有直接涉及海绵城市及对雨水径流控制的内容。比如2017年修订的《城市绿化条例》第二章第12条规定“城市公共绿地和居住区绿地的建设,应以植物造景为主,选用适合当地自然条件的树木花草”,对如何更好地发挥树木及树冠的生态功能重视不足。

树冠覆盖率是评估城市树木雨水削减作用及其效益的关键指标之一。目前我国各地城市的绿化法规中只有玉溪、蚌埠、唐山等少数城市有乔木覆盖率的量化要求^[13]。从整体来看,我国城市绿化指标仍偏重于对不同类型绿地的绿地率最低值作出规定,很少明确提出城市树冠覆盖率等与园林树木直接相关的指标并纳入法定建设审批和考核中。不可否认,对绿地率的突出强调,在一定发展阶段有其合理性,但在当下城市环境问题凸显、绿地空间不足、绿化质量亟待改善以及海绵城市建设重大需求的背景下,应该对如何发挥城市树冠的生态功能、高效种植和管理树木给予更多关注和更明确的指导。

2 树木规划中的雨水管理

2.1 下垫面及城市树冠的精细化分析

下垫面和树冠覆盖率等数据是规划的重要基础。目前,在USFS的协助下,美国17个州共70余个城市借助高分辨率卫星影像,将下垫面分为现有树冠覆盖、植被潜在覆盖、不透水区域潜在覆盖以及不适合植树4种类型,对城市树冠覆盖情况及种植潜力开展了调查和分析^[14]。表2列举了美国5个城市的下垫面及树冠覆盖评估情况。受气候条件、降雨量以及城市开发强度等多因素影响,各城市可用于植树的土地比例有所不同。不同下垫面条件下树木的径流控制效果存在差异,对树冠覆盖和下垫面性质的精细化分析,有助于评估城市树冠对雨水径流的削减能力,也有助于城市水文的相关分析。

表2 美国5个城市的下垫面及树冠覆盖评估

城市	评估年份	不同类型下垫面面积占比/%			
		现有树冠覆盖	植被潜在覆盖	不透水区域潜在覆盖	不适合植树
巴尔的摩	2007年	27	22	22	29
纽约	2010年	21	18	25	36
匹兹堡	2010年	42	24	9	25
费城	2011年	20	26	24	30
华盛顿	2011年	35	24	26	15

美国许多城市还通过实地调查,统计现有树种数量、种植位置、高度、冠幅、健康状况等,并分析每

个地块的潜在树木种植量,将这些统计信息绘制成电子地图供公众查询。这类调查大多是由城市绿化部门主导,社会团体、普通民众组成志愿者来完成。比如,纽约市在1995—2015年,每10年开展一次树木资源调查,利用专业公司开发的TreeCorder应用程序,以街区为单位,将地理信息技术与现场测量相结合,调查人员能够方便地记录树木的位置、与街道等不透水面的距离等信息,进而获取精确度较高的树木调查资料^[15]。

城市树木资源实地调查也是我国树种规划编制的重要依据,但不足之处主要在于,我国树木资源调查缺少对城市树冠覆盖情况的普遍性调查,更谈不上精细化评估。虽然“绿化覆盖面积”中包含了乔木、灌木、草坪等绿地类型,但使用“树冠覆盖面积”更能突出生态功能较强的乔木。缺少树冠覆盖情况的数据和精细化分析,对优化城市树木的规划和管理,更好地发挥现有树木的生态功能、合理评估现在和将来的城市绿化效益都会形成制约。

对下垫面地表覆盖现状进行分析,关系到海绵城市建设径流系数取值、模型分析、设施规模计算等关键问题^[16]。现状用地平衡表计算法、GIS二调数据解析法以及遥感影像分析是目前海绵城市建设中比较常用的下垫面分析方法^[17]。然而,这些方法并没有对树冠覆盖区域的性质作出清晰的分类,不同树冠覆盖情况下的下垫面径流系数取值等问题也有待进一步研究。

2.2 树冠覆盖率指标的制定与径流控制

美国树木管理规划中涉及多项指标^[18],其中与径流削减联系最紧密的是树冠覆盖率。表3为美国9个城市树冠覆盖率指标,不同城市规划期限、实现目标等因气候条件、城市规模、经济发展水平不同而存在差异。各城市设定的规划期限大都在15a以上,这应该是充分考虑了树木的生长过程,一定程度上也避免为达到提高树冠覆盖率的目标急功近利地进行大树移植等野蛮行为。

表3 美国9个城市树冠覆盖率指标

城市	制定年份	城市树冠覆盖率/%		达成年份
		现状	目标	
波士顿	2006年	29	49	2020年
巴尔的摩	2007年	27	40	2037年
纽约	2010年	21	30	2036年
丹佛	2010年	6	31	2030年
费城	2011年	20	30	2025年
华盛顿	2011年	35	40	2032年
拉斯维加斯	2012年	9	20	2035年
旧金山	2012年	14	20	2032年
西雅图	2016年	28	30	2037年

我国目前只有少数城市的树木规划中明确涉及

树冠覆盖率指标,如青岛提出“到2020年,城区街道树冠覆盖率达到28%,地面停车场乔木树冠覆盖率达到30%”^[19]。可见,大部分城市对树冠的重要性及其多方面的生态功能关注不够。树冠指标的缺失,显然会影响城市绿化质量的提升和综合效益的发挥。

2.3 树种选择、种植方式与径流的削减

毫无疑问,树种的选择会直接影响树冠的大小,进而影响树木的综合效益。除了考虑“适地适树”、景观美化、生物多样性等因素外,美国城市树木规划还特别突出强调基于对树木特性的研究,根据场地具体的生态功能需求,给出适宜的树种,以实现树木效益的最大化。比如,在推动树木在雨水管理中的应用上,哈特福德市(Hartford, CT)《城市树冠覆盖评估与种植规划》(*Urban Tree Canopy Assessment & Planting Plan*)给出的24种绿化推荐树种中,就明确说明有21种具有可观的雨水截留能力^[20]。这不仅是基于多年来对树木截留作用的重视和深入研究,也是执行相关法规中发挥树木削减雨水径流能力的要求。

不同种植方式的树木对雨水系统的影响各不相同。美国主要城市将树冠覆盖率指标细化到各社区,通过综合考虑改善空气、削减径流、景观美化等因素,确定优先种植区域,以产生更大的雨水径流控制效果和投资效益。对于场地尺度种植位置的选择,则在相关手册中作出更细致的规定。以哈特福德市为例,基于对径流控制优先度(runoff priority rating)的分析,该市确定了约3 km²、总计占城区面积6.2%的土地作为控制雨水径流的优先种植区域。

我国城市树种规划更多是确定各自城市的基调树种、骨干树种和一般树种,针对不同用地类型或功能提供推荐树种,包括公园绿地树种、行道树树种和生态风景林树种等,基本没有关注和要求树木的雨水径流削减作用。在大力推进海绵城市建设的当下,这明显暴露出不足。

冠幅大小、叶片形状、枝叶结构等因素都会影响乔木对雨水的截留能力。研究如何使现状树种发挥

出更多功能和更高的效益,新种植的树木更好地适应城市环境、满足不同的功能需求,尽可能地在老城区、道路与广场等硬化程度高的区域优先提升树冠覆盖面积,不仅能够充分发挥树冠的截留能力,也有利于绿化树种的选择和种植向更合理的发展方向。

2.4 径流控制与成本效益分析

成本效益分析是科学规划和种植方案优选的重要手段。在USFS的协助下,美国地方政府利用成本效益分析对树木价值进行评估,以促进城市树木的科学规划、种植和管理。这是非常有意义的工作,对我国有很好的借鉴价值。

表4给出了美国7个城市的树木年均成本效益分析概要。城市树木产生的效益分为节能、固碳、改善空气、削减径流等环境效益以及提升房产价值5项能够量化的内容,成本包括树木的栽植、修剪、病虫害防治、移除、行政管理开支以及基础设施维护费用等。从表4可以明显看出,树木截留雨水、减少地表径流所带来的收益是非常可观的。同时,城市间的效益费用比(benefit-cost ratio)也存在差异。究其原因,一方面,树木种植成本受城市地价、栽植树种、树龄结构等多因素影响;另一方面,通过横向对比各城市相关效益发现,与空气质量改善等效益相比,削减雨水径流产生的效益对总效益有更大的贡献,这也可能是拉斯维加斯等位于干旱区的城市效益费用比偏低的原因之一。进而推论,对于规模较大、降水较丰富的城市,合理增大树冠覆盖率带来的雨水削减以及综合效益可能会更高。因此,应综合考虑城市气候条件、经济发展水平、树木维护成本等实际情况,通过成本效益量化分析来优化树木种植方案,规划每个城市或区域的树冠覆盖率指标。

目前,我国对城市树木效益的量化分析明显不足。结合相关研究成果^[9,21-22]粗略估算,各地区城市树冠对雨水径流的削减比例大致在百分之几到20%多,其上限应该是一个非常可观的数值。具体主要取决于树冠覆盖率、树种及种植方式,以及当地的降雨条件等。显而易见,在绿地面积少、改造难度大的高密度城区,以及硬化面积较大的道路、广场等

表4 美国7个城市树木年均成本效益分析

城市	每棵树的效益/美元	径流削减效益在环境效益中所占比例/%	每棵树的成本/美元	效益费用比
拉斯维加斯	33.24	15.2	28.09	1.18
查尔斯顿(Charleston, SC)	47.04	53.7	34.85	1.35
柯林斯堡(Fort Collins, CO)	70.26	69.9	29.91	2.18
格兰岱尔(Glendale, AZ)	31.00	18.8	12.87	2.41
火奴鲁鲁(Honolulu, HI)	89.53	45.9	30.02	2.98
夏洛特(Charlotte, NC)	69.42	65.9	21.37	3.25
纽约	208.83	51.0	37.28	5.59

特定汇水面增加树冠覆盖率,或采用合理的种植搭配,尽量使树冠能够覆盖更多的不透水面,都可以大幅度提升径流削减比例,充分发挥树冠的作用。这也意味着,在旧城的海绵化改造中,充分发挥树冠这方面的潜力,可减少相当比例的灰色或其他绿色设施投资,减少对绿地面积的需求和大规模改造带来的其他社会成本,这对于当下海绵城市建设中面临的改造成本、改造困难和用地等问题具有重要意义^[23]。不仅如此,作为一种多功能生态设施,树木还能够产生节能、固碳、缓解热岛效应、提升房产价值等其他效益。

3 和雨水管理相关的树木种植规范标准

相关规范标准是城市树木精细化管理的重要支撑,对于促进树木应用于雨水管理也具有重要的指导意义。USFS、美国环境保护署(Environmental Protection Agency, EPA)以及专业协会发布的树木种植手册和规范中,涉及许多和雨水管理相关的内容。

2006年,USFS发布《城市树冠覆盖目标设定指南》^[24]。该指南中以切萨皮克湾(Chesapeake Bay)为例,详细阐述了树冠覆盖评估技术、目标设定标准以及具体实施策略,指导各城市利用地理信息技术分析城市树冠覆盖情况。为进一步推广树木在雨水管理中的工程应用,2013年,EPA发布《将行道树应用于雨水管理》^[25]手册,包括理念与共识、工程技术、激励机制等内容,强调种植树木不只是为了美化环境,还可以提供雨水削减效益和其他生态功能。针对种植土壤、空间、坡度、架空线(overhead wire)和地下设施等影响树木生长的限制因素,EPA又于2016年发布《雨水树池技术备忘录》^[26],推动种植土壤的改良和树池的改进。这不仅能够降低土壤压实度,为树木根系生长提供更多空间,而且有利于收集和储存周边不透水区域产生的雨水径流。

在树种选择方面,美国流域保护中心(The Center for Watershed Protection)于2006年编制了《城市流域林业手册》^[27],涉及林业、水文、景观设计、土壤科学等多个专业。值得注意的是,手册中明确了树木对雨水水量、水质的控制效果。在给定的200余种树种的特性表中,包括和树木雨水径流削减能力密切相关的成熟期冠幅、冠形、生长速率等信息。这对设计人员考虑和计算不同树龄和树种的雨水截留效果、选择合适树种具有很好的指导意义。

对于场地尺度上树木种植位置的选择,主要分为种植在草坪等透水面上的树木和种植在人行道、停车场等不透水面上的树木。地方政府为鼓励业主

合理植树,除了制定法规来保证一定的树冠覆盖面积外,还在相关技术手册中制定了激励措施。通过设定树木种植位置与不透水面的最远距离(通常在3~8m之间),使树冠能够覆盖更多的不透水面。只要满足树木合理种植的距离要求,就能申请减少缴纳雨水费^[28]。

随着我国海绵城市建设的快速推进以及今后常态化的发展需求,给水排水专业和风景园林等专业对相关规范标准进行了修编或新编。但在已有的规范标准中,尚未将树木这种普遍存在且重要的绿色基础设施及其能够发挥的径流削减功能纳入其中。规范标准方面的缺失不利于有效发挥城市树冠截留雨水的潜力,不利于更好地发挥树木的生态功能及综合效益。

4 几点建议

通过上述比较和分析可见,城市树木在生态环境改善、海绵城市建设中的巨大潜力还有待进一步挖掘。我国可以在以下几方面进行完善,以更好地推动树木在海绵城市建设中的应用。

a. 加强相关基础资料的积累和公开。树冠是衡量树木生态效益的重要指标,对径流系数、城市的产汇流也有明显的影响。而城市下垫面的精细化解析既是评价树木对径流削减效果的基础,也是城市水文和海绵城市产汇流分析的重要基础。应利用高分辨率遥感影像解译等技术手段,为获取高精度树冠覆盖及城市下垫面相关数据提供支撑;完善城市园林树木数据库,增加城市树冠这一重要指标,完善树木调查资料的电子化管理和分析。此外,还应建立公共数据平台,促进相关基础资料的公开和共享,为城市树木的优化种植和管理、为海绵城市建设的可持续发展提供支撑。

b. 深化树木削减雨水径流能力的基础研究。不同城市的气候条件、降雨条件、树种组成、树龄结构及树冠覆盖面特征等都存在差异。相较单层结构而言,不同乔木、灌木、地被植物的合理搭配组成的复层结构,截留效果也不尽相同。我国目前关于城市树木对雨水径流控制作用的研究还有较大的局限性,获取的数据难以全面支撑各地城市的推广应用。因此,应加强对不同地区树种、树冠及雨水截留效果的量化研究和评估,进一步促进各地城市绿化树种及种植方式的优化和科学管理,推动海绵城市建设中充分发挥树木的重要海绵作用。

c. 完善相关规划和规范标准。一方面,基于美国城市已有的经验,应将树冠及对径流的控制作用纳入城市树木管理规划和海绵城市专项规划的考量

之中,加强规划前期详细的树木现状分析和部门间沟通协作,制定分期规划目标,确定树木的优先种植区域,尤其注意增加不透水面上的树冠覆盖,充分发挥城市树木的雨水截留潜力和其他生态功能,获取更高的投资回报和生态效益。同时,包括城市树冠指标的城市树种规划的编制应融入海绵城市、雨水管理的理念,给出雨水截留能力强的推荐树种及合理化种植方式。为避免种植方案的简单化和片面性,应注重通过对不同种植搭配方式的成本效益分析来确定优选方案。另一方面,对相关的规范标准进行研究和修订,为海绵城市建设和更充分发挥树冠的综合效益提供技术支撑。如,将树冠覆盖率纳入城市绿化考核和评价标准;海绵城市雨水设施的设计计算应合理考虑树冠的贡献;种植在绿地中的树木应尽可能靠近不透水面,更多地发挥其遮阴、缓解热岛效应和削减径流等功能。

参考文献:

[1] 张伟,车伍. 海绵城市建设内涵与多视角解析[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 19-26. (ZHANG Wei, CHE Wu. Connotation and multi-angle analysis of sponge city construction [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6): 19-26. (in Chinese))

[2] CHE W, ZHANG W. Urbanstormwater management and sponge city concept in China[C]//KÖSTER S, REESE M, ZUO J. Urban Water Management for Future Cities. Heidelberg :Springer, 2019: 3-11.

[3] SANDERS R A. Urban vegetation impacts on the hydrology ofDayton, Ohio [J]. Urban Ecology, 1986, 9(3): 361-376.

[4] XIAO Q, MCPHERSON E G, SIMPSON J R, et al. Rainfall interception by Sacramento' s urban forest [J]. Journal of Arboriculture, 1998, 24(4): 235-244.

[5] INKILÄINEN E N M, MCHALE M R, BLANK G B, et al. The role of the residential urban forest in regulating throughfall; a case study in Raleigh, North Carolina, USA [J]. Landscape & Urban Planning, 2013, 119(6): 91-103.

[6] Arkansas Forestry Commission. Tree canopy in the city of Fayetteville [EB/OL]. (2012-12-10) [2018-11-22]. <https://www.fayetteville-ar.gov/DocumentCenter/View/1143/Fayetteville-UTC-Fact-Sheet-PDF>.

[7] Center for Watershed Protection. Urban tree canopy [EB/OL]. (2015-07-31) [2019-01-12]. <https://www.cwp.org/urban-tree-canopy>.

[8] North Carolina Forest Service. Trees to offset stormwater, case study 02; Apex, NC [EB/OL]. (2018-07-01) [2018-12-23] <https://www.apexnc.org/DocumentCenter/View/24324/Trees-and-Stormwater-Case-Study>.

[9] 车生泉,于冰沁,严巍. 海绵城市研究与应用[M]. 上

海:上海交通大学出版社, 2015: 168-182.

[10] 游宇,车伍,张伟,等. 8 种园林乔木林冠对雨水截留作用的研究 [J]. 中国给水排水, 2018, 34(9): 121-127. (YOU Yu, CHE Wu, ZHANG Wei, et al. Effect of rainfall interception by eight species of garden arbors [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(9): 121-127. (in Chinese))

[11] 张磊,吴泽民,吴文友. 基于 GIS 技术的城市森林生态效益比较:以合肥、蚌埠、马鞍山市为例 [J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(3): 82-86. (ZHANG Lei, WU Zemin, WU Wenyu. Comparison of ecological benefits of urban forests in Anhui Province based on GIS [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(3): 82-86. (in Chinese))

[12] USDA Forest Service. The principal laws relating to USDA forest service state and private forestry programs [EB/OL]. (2011-05-01) [2018-11-05]. <https://www.fs.fed.us/spf/coop/library/SPF-CF%20handbook.pdf>.

[13] 中华人民共和国司法部. 法律法规数据库 [EB/OL]. [2018-12-01]. <http://search.chinalaw.gov.cn/search2.html>.

[14] US Forest Service. Tree canopy assessment [EB/OL]. [2018-09-06]. <http://gis.w3.uvm.edu/utc>.

[15] NYC Parks. New York City street tree map [EB/OL]. (2018-09-28) [2018-10-18]. <https://tree-map.nycgovparks.org>.

[16] 夏军,石卫,王强,等. 海绵城市建设中若干水文学问题的研讨 [J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 1-8. (XIA Jun, SHI Wei, WANG Qiang, et al. Discussion of several hydrological issues regarding sponge city construction [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 1-8. (in Chinese))

[17] 由阳,张洋,朱玲,等. 基于“面向对象的遥感影像分类”的海绵城市下垫面分析方法 [J]. 给水排水, 2018(1): 61-64. (YOU Yang, ZHANG Yang, ZHU Ling, et al. An analysis method of sponge city underlying surface based on “ object-oriented remote sensing image classification ” [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018(1): 61-64. (in Chinese))

[18] BARRON S, SHEPPARD S R, CONDON P M. Urban forest indicators for planning and designing future forests [J]. Forests, 2016, 7(9): 1-17.

[19] 青岛市林业局. 中心城区绿地建设工程 [EB/OL]. (2013-07-25) [2018-11-22]. <http://ly.qingdao.gov.cn/n32205777/n32205892/130725145144203873.html>.

[20] American Forests. Urban tree canopy assessment & planting plan [EB/OL]. (2015-03-01) [2018-09-11]. <https://www.americanforests.org/wp-content/uploads/2015/04/AF-Community-ReLeaf-%E2%80%94Hartford-UTC-Assessment.pdf>.

[21] BERLAND A, SHIFLETT S A, SHUSTER W D, et al. The role of trees in urban stormwater management [J]. Landscape & Urban Planning, 2017, 162: 167-177.

- [22] 游宇. 城市树木对雨水径流的控制效果及应用策略研究[D]. 北京:北京建筑大学,2018.
- [23] 黄津辉,段亭亭. 中国海绵城市开发与加拿大综合雨洪管理对比研究:以多伦多为例[J]. 水资源保护,2017,33(5):5-12. (HUANG Jinhui, DUAN Tingting. Comparative study on sponge city development in China and integrated stormwater management in Canada; a case study of Toronto[J]. Water Resources Protection,2017,33(5):5-12. (in Chinese))
- [24] United States Department of Agriculture Forest Service. Urban tree canopy goal setting[EB/OL]. (2006-03-06) [2018-09-11]. https://www.chesapeakebay.net/documents/UTC_Guide_Final.pdf.
- [25] USEPA. Stormwater to street tree: engineering urban forests for stormwater management[EB/OL]. (2013-09-01) [2018-12-10]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-11/documents/>stormwater2streettrees.pdf.
- [26] USEPA. Stormwater tree: technical memorandum[EB/OL]. (2016-09-01) [2018-09-11]. https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-11/documents/final_stormwater_trees_technical_memo_508.pdf.
- [27] Center for Watershed Protection. Urban watershed forestry manual: part3 urban tree planting guide[EB/OL]. (2006-09-01) [2018-09-11]. https://www.fs.usda.gov/naspf/sites/default/files/urban_watershed_forestry_manual_part3.pdf.
- [28] Urban and Community Forestry, Vermont Department of Forests, Parks & Recreation. Tree credit systems and incentives at the site scale[EB/OL]. (2014-02-28) [2018-12-28]. https://vtcommunityforestry.org/sites/default/files/pictures/site_scale_tree_credits_2014_02_28_final.pdf.

(收稿日期:2019-01-26 编辑:熊水斌)

(上接第6页)

- [31] 李钰婷,张亚雷,代朝猛,等. 纳米零价铁颗粒去除水中重金属的研究进展[J]. 环境化学,2012,31(9):1349-1354. (LI Yuting, ZHANG Yalei, DAI Chaomeng, et al. The advance on removal of heavy metals in water by nanoscale zero-valent iron[J]. Environmental Chemistry, 2012,31(9):1349-1354. (in Chinese))
- [32] 蔡昌凤,徐建平,褚倩,等. 粉煤灰/污泥烧结陶粒的研制与应用[J]. 环境污染与防治,2007,29(1):26-29. (CAI Changfeng, XU Jianping, CHU Qian, et al. Development and application of sintered fly ash/sludge ceramic granules[J]. Environmental Pollution & Control, 2007,29(1):26-29. (in Chinese))
- [33] 章丹. 利用竺山湾底泥制备磁改性轻质陶粒实验研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2014.
- [34] 徐振华,刘建国,宋敏英,等. 污泥、底泥与粉煤灰烧结陶粒的工艺研究[J]. 安全与环境学报,2012,12(4):21-26. (XU Zhenghua, LIU Jianguo, SONG Mingying, et al. Study on sintering process of ceramsite with sludge, sediment and fly ash[J]. Journal of Safety and Environment,2012,12(4):21-26. (in Chinese))
- [35] 高红杰,彭剑峰,宋永会,等. 清淤底泥制作陶粒的方法及其性能分析[J]. 环境工程技术学报,2011,1(4):328-333. (GAO Hongjie, PENG Jianfeng, SONG Yonghui, et al. The method of producing haydite by sediment and the performance analysis[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2011,1(4):328-333. (in Chinese))
- [36] 刘贵云,奚旦立. 利用河道底泥制备陶粒的试验研究[J]. 东华大学学报(自然科学版),2003,29(4):81-83. (LIU Guiyun, XI Danli. Experiment on producing ceramsite with river sediment[J]. Journal of Donghua University(Natural Science), 2003,29(4):81-83. (in Chinese))
- [37] 朱兰保,盛蒂. 污染底泥原位覆盖控制技术研究进展[J]. 重庆文理学院学报(自然科学版),2011,30(3):38-41. (ZHU Lanbao, SHENG Di. Progress in remediation in-situ capping techniques of polluted sediments[J]. Journal of Chongqing University of Arts and Sciences (Natural Science Edition), 2011,30(3):38-41. (in Chinese))
- [38] 陈荷生. 太湖底泥的生态疏浚工程[J]. 水利水电科技进展,2004,24(6):34-37. (CHEN Hesheng. Ecodredging project of sediment in Taihu Lake[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2004,24(6):34-37 (in Chinese))
- [39] 韩涛. 太湖悬浮物和藻类数值模型与实验研究[D]. 南京:河海大学,2008.
- [40] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社,1983:240-250.
- [41] O'CONNOR B L, HARVEY J W. Scaling hyporheic exchange and its influence on biogeochemical reactions in aquatic ecosystems[J]. Water Resources Research, 2008,44(12):W12423.
- [42] THOMAS D B, SCHALLENBERG M. Benthic shear stress gradient defines three mutually exclusive modes of non-biological internal nutrient loading in shallow lakes[J]. Hydrobiologia,2008,610:1-11.
- [43] 李一平,逢勇,吕俊,等. 水动力条件下底泥中氮磷释放通量[J]. 湖泊科学,2004,16(4):318-324. (LI Yiping, PANG Yong, LYU Jun, et al. On the relation between the release rate of TN, TP form sediment and water velocity[J]. Journal of Lake Science,2004,16(4):318-324. (in Chinese))

(收稿日期:2018-12-05 编辑:熊水斌)