

中国城市LID技术设施的成本效益区域差异

李大龙^{1,2,3}, 贾绍凤^{1,2*}, 吕爱锋^{1,2}, 朱文彬^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:随着城市化进程不断加快,人口和城市规模不断扩张,对现代城市雨洪管理提出了新要求。本文运用情景分析法研究中国城市典型低影响开发(Low Impact Development, LID)技术设施的成本效益。分别以80%与95%降雨场次控制率对应的场次降雨为情景,以30年为服务期计算技术设施的雨水管理效益。研究发现:北方城市的建安成本与维护费用均值高于南方城市,同时受区域降雨量差异的影响,南方城市LID技术设施的雨水处理效益普遍高于北方。而北方城市之间效益差异亦较大,其中京津冀地区及西北地区的城市雨水处理效益尤低。不同技术设施之间差异表现为:原地入渗设施的雨水处理成本在6~188元/m³之间,显著高于具有汇流功能的设施。对降水较少的北方城市建议采用成本低、效果好的下沉式绿地结合雨水湿地的方式;对雨量大、雨强高的南方城市建议采用生物滞留设施结合调节塘的方式,可增大调蓄能力达到降雨场次控制率的要求,同时能够净化地面径流、增强雨水下渗。

关键词:城市雨洪管理;低影响开发(LID);成本效益;情景分析;中国

1 引言

城市化发展是国家经济发展、社会进步的衡量指标之一。但是城市建设过程中原来的自然地貌被改变,自然透水下垫面转变为不透水表面,降低了城市对自然降水的下渗蓄积及净化能力,使得降水对城市的负面影响越来越大:径流面源污染加重,洪涝灾害发生风险上升(Hapuarachchi et al, 2011; 刘勇等, 2015)。匡文慧等(2016)研究发现,亚洲城市地表不透水总面积占城市建成区面积的64%,部分城市接近80%,过高的不透水面积比给城市雨洪管理带来了前所未有的挑战。

城市化发展带来的雨洪管理问题是一个世界性难题。为解决这一问题各国家提出了一系列的技术措施及管理方式,包括1972年美国提出的最佳管理措施(BMPs)、低影响开发措施(LID)、1999英国年提出的可持续排水系统(SUDS)、澳大利亚的水敏

感性城市设计(WSUD)等(Ashley et al, 2013; Lee et al, 2013; Entry, 2014)。其中具备多重功能与多目标实现、场地设计和源头控制原理相结合的低影响开发理念(LID),被新西兰、韩国和中国等国家广泛学习和借鉴(车伍等, 2014)。中国城市化水平从1949年的10.6%提高到2013年的53.7%。随着城市化率的提高,水资源短缺与洪涝灾害问题逐年加重,已成为城市建设和发展中亟待解决的问题(户园凌, 2012)。2013年12月,习近平总书记在中央城镇化工作会议讲话中首次提出海绵城市建设理念:“在提升城市排水系统时,要优先考虑把有限的雨水留下来,优先考虑利用自然力量排水,建设自然积存、自然渗透、自然净化的海绵城市”。海绵城市建设的重点是结合LID理念,采取源头就地入渗,借助于中途、末端等设施来达到调蓄雨水的目的(刘文等, 2015)。中国幅员辽阔,各地地形地貌、土壤下垫面及气候条件差异较大,如何将城市雨洪管理

收稿日期:2017-04;修订日期:2017-10。

基金项目:中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-301)[Foundation: Key Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.KFZD-SW-301]。

作者简介:李大龙(1991-),山东潍坊人,博士研究生,研究方向为水文学与水资源,E-mail: lidalong2013@126.com。

通讯作者:贾绍凤(1964-),湖南龙山人,研究员,博导,研究方向为水资源和区域可持续发展,E-mail: jiasf@igsrr.ac.cn。

引用格式:李大龙, 贾绍凤, 吕爱锋, 等. 2017. 中国城市LID技术设施的成本效益区域差异[J]. 地理科学进展, 36(11): 1402-1412. [Li D L, Jia S F, Lv A F, et al. 2017. Regional difference of cost effectiveness of low impact development (LID) technical facilities in Chinese cities [J]. Progress in Geography, 36(11): 1402-1412.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.11.009

LID设施因地制宜地应用于国内城市,充分发挥海绵城市的效能,需要对每项技术设施效益的区域差异进行评估,以便优化配置。

目前,国内对LID设施成本效益的研究较少,缺乏这方面数据资料的积累。国外的成本效益数据可能与国内有较大差距,尚需比较研究和验证(陈韬等,2014)。通常情况下可通过场地实验、模型模拟等方法研究设施的效益(Cipolla et al, 2016; Wang et al, 2016)。考虑到研究周期和条件的局限性,本文在保证准确性和高效性的前提下,运用情景分析法对各技术设施的效益进行定性与定量的分析,为构建合理的雨洪管理配置模式提供数据支持,助力城市雨洪管理现代化建设。

2 数据及方法

2.1 数据说明

本文研究区为中国31个省会城市,研究数据包括各城市1951-2014年逐日日降雨量数据,数据来源于中国地面国际交换站气候资料日值数据集(V3.0),中国主要地区的降雨过程时程分型数据(殷水清等,2014)。城市雨洪管理LID技术的各项建造设计参数和成本数据主要参考:住建部印发的《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2014)、《建筑与小区雨水利用技术规范》GB 50400-2006、《雨水集蓄利用工程技术规范》GB/T 50596-2010(中华人民共和国住房和城乡建设部,2010)、《透水砖路面技术规程》CJJ/T 188-2012(中华人民共和国住房和城乡建设部,2012)、《种植屋面工程技术规程》JGJ155-2013(中华人民共和国住房和城乡建设部,2013)、《雨水综合利用》10SS705及全国主要省市地区的《园林绿化工程消耗量定额》、《工程量清单项目计量规范》、《建设工程预算定额综合单价表》、《主要省市建安工程造价指标》等(北京市住房和城乡建设委员会,2013;中华人民共和国住房和城乡建设部,2006;中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2013;中国建设造价工程信息网,2016a;中国建设造价工程信息网,2016b)在内的多项标准规范及指南文件。

2.2 研究方法

本文运用的主要研究方法是一定情景下的技术效果分析,具体包括统计分析法、文献查阅法、对

比分析法等。首先利用气象资料及相关文献资料分析研究区的降雨类型及分布特征,然后依据城市LID设施规范文件及建筑行业标准规范,确定设计情景下的不同技术措施的结构物理参数(土壤下渗速率及物理储水体积等);结合降雨数据与设施的建造数据,计算不同降雨情景下LID设施作为降雨入渗下垫面所能服务的汇流面积以及蓄渗、净化雨水量;最后估算各省市LID设施的建安成本和运行维护成本,结合雨水管理设施效果计算其运行期间的成本效益,并从空间上对比分析不同城市LID设施的运行效益,以便为地区、城市雨洪管理规划提供数据支持。

2.2.1 研究区设计降雨情景及典型雨型的统计分析

(1) 城市雨洪管理LID技术的初衷是控制城市水质面源污染(United States Environmental Protection Agency, 2000)。美国很多地区常以年均降雨总量或年均降雨场次的百分比(年均值指多年平均值,取至少30年的长时间序列降雨资料统计而得)作为面源污染的控制指标,如80%~90%的年均降雨总量,80%~95%的年均降雨场次等(王虹等,2015)。从自然降雨情景来说,场次降雨更加接近于真实情况,所以本文采用降雨场次的控制指标进行计算。林小鹏(2009)对中国小时雨量资料的分析研究发现,90%以上的降雨是一天一次,日雨量和次雨量都服从T分布,因此研究过程中假设每个雨日发生一次降雨过程。通过对31个城市1951-2014年逐日大于2 mm的日降雨量进行统计分析(将降雨量日值按雨量由小到大进行排序,统计降雨总场次中某一百分比的降雨场次及其对应的降雨量),得到各城市的降雨场次控制率及其对应的场次降雨量。借鉴国外80%~95%的年均降雨场次为最优控制范围,因此着重分析80%、95%降雨情景下的城市雨水控制效果。

(2) 根据已有研究统计分析中国各城市的典型雨型数据。本文主要参考殷水清等(2014)对中国降水过程时程分型研究,按流域将中国分为5个区域(松花江区、黄河区、长江1区、长江2区、东南诸河区),对每个区域进行相应的雨型划分(表1-2),由于乌鲁木齐、拉萨在划分区以外,分析其年降水量及降水时间特征发现与黄河区的城市相近,所以将这2个城市归入黄河区雨型进行计算。结合雨型与场次降雨数据计算各城市不同降雨情景下的平均雨强数据,为开展LID设施蓄渗雨水等指标的计算提

供数据支撑。

2.2.2 LID技术设施的效果及成本计算

(1) 雨水处理效果计算

本文选取LID的典型技术设施包括:透水砖铺装、屋顶种植、下沉式绿地、生物滞留设施、雨水湿

地、调节塘。各项设施的建造设计数据来源于住建部印发的指南《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》以及相关文献、行业标准规范,据此汇总建造设计物理参数,各参数值具有一定的范围,本文计算过程取其中间值(表3)。

根据LID设施的设计参数,结合雨型和降雨数据可以计算场次降雨情景下的蓄渗水量。计算过程遵循雨量平衡原理,一定降雨情景下设施服务面积内的雨水径流汇入设施内,当水量超过设施集蓄和渗透能力时,开始溢出该计算区域,在此情景下各水文要素之间均存在着水量平衡关系(李俊奇等, 2004),计算公式为:

$$V-S-Z-Q=U2+G2-U1-G1 \tag{1}$$

式中: V 为计算时段内进入设施的雨水径流量/ m^3 ; S 为计算时段内设施底部的雨水下渗量/ m^3 ; Z 为计算时段内设施的雨水蒸发量/ m^3 ; Q 为计算时段内设施内的雨水溢流外排量/ m^3 ; $G1$ 为计算时段开始时设施种植填料层空隙的水量/ m^3 ; $G2$ 为计算时段结束时设施种植填料层空隙的水量/ m^3 ; $U1$ 为计算时段开始时设施表层空间蓄水量/ m^3 ; $U2$ 为计算时段结束时设施表层空间蓄水量/ m^3 。

表1 各雨型降雨历时及不同时段
降雨量分布(殷水清等, 2014)
Tab.1 Rainfall duration and rainfall distribution of
different hyetographs(Yin et al, 2014)

雨型	降雨历时分配/%	雨量分配/%
I型	0~40	72
	40~60	14
	60~100	14
II型	0~40	33
	40~60	39
	60~100	28
III型	0~40	24
	40~60	16
	60~100	60
IV型	0~40	42
	40~60	21
	60~100	37

表2 不同地区各雨型百分比及降雨历时统计值(殷水清等, 2014)
Tab.2 Statistics of rainfall duration and percentage of events for different hyetographs nationwide for
China and for each region(Yin et al, 2014)

分区	雨型	雨型百分比/%	平均降雨历时/h	(0%~40%)/h	(40%~60%)/h	(60%~100%)/h
松花江区	I型	43.6	21.8	8.72	4.36	8.72
	II型	20.8	22.9	9.16	4.58	9.16
	III型	19.3	24.0	9.60	4.80	9.60
	IV型	16.4	24.0	9.60	4.80	9.60
黄河区	I型	46.2	15.7	6.28	3.14	6.28
	II型	22.0	17.7	7.08	3.54	7.08
	III型	14.7	24.0	9.60	4.80	9.60
	IV型	17.2	24.0	9.60	4.80	9.60
长江1区	I型	52.5	17.7	7.08	3.54	7.08
	II型	20.0	17.2	6.88	3.44	6.88
	III型	11.8	24.0	9.60	4.80	9.60
	IV型	15.6	24.0	9.60	4.80	9.60
长江2区	I型	44.2	19.4	7.76	3.88	7.76
	II型	23.0	20.0	8.00	4.00	8.00
	III型	15.3	24.0	9.60	4.80	9.60
	IV型	17.5	24.0	9.60	4.80	9.60
东南诸河区	I型	42.9	24.0	9.60	4.80	9.60
	II型	21.5	24.0	9.60	4.80	9.60
	III型	19.3	24.0	9.60	4.80	9.60
	IV型	16.3	24.0	9.60	4.80	9.60

表3 LID设施的主要设计物理参数

Tab.3 Design parameters of low impact development (LID) facilities

技术设施	透水铺装	屋顶种植	下沉式绿地	生物滞留设施	雨水湿地	调节塘
设施结构层渗透系数/(mm/h)	360	40	40	40	40	40
容积/(m ³ /m ²)	0.095	0.105	0.21	0.55	0.68	1.62
表面蓄水层高度/mm	无	无	150	250	400	1500
TSS去除率/%	85	75	60	85	70	60
寿命周期/a	10	15	15	15	30	30
维护成本/(%/a)	5	8	5	8.5	5	5

注：TSS是总悬浮固体，此处指水体中的总悬浮物。

由于计算的是场次降雨情景下的雨水蓄渗情况，蒸发量较小，故 Z 可以忽略；同时可视开始时段设施表层无蓄水，即 $U_1=0$ 。另外，由于部分设施具备透过结构层继续下渗能力，部分设施具有防渗功能不支持深层下渗，具备下渗能力的设施也存在因不同的地质条件、施工条件导致下渗能力不一等复杂问题(伍海兵等, 2015)，所以本文假设所有设施都不具备深层下渗能力，只讨论设施结构层及以上部分的蓄渗情况，即 $S=0$ 。 G_1 为开始时段设施种植填料层空隙的水量，按照《园林绿化行业管养规范标准》(北京市质量技术监督局, 2003)中的土壤适宜含水量数据取值，南方城市取15%，北方城市取12%为初始值进行计算。水量示意图1，最终水量公式为：

$$V-Q=U_2+G_2-G_1 \tag{2}$$

计算时段内设施的蓄渗量计算，此处的蓄渗量为下渗到结构层空隙中的水量，如式所示：

$$G=K\cdot A\cdot T \tag{3}$$

式中： G 是结构层蓄渗水量； T 是计算时间，根据一场降雨的历时确定； A 是设施面积； K 是结构层的渗透系数/(mm/h)，根据技术措施的构造及土壤条件不同，式中的 K 取值各异，主要有以下2种情况：

一是一般结构层包括人工填料、种植土层，各层的 K 值不同，以 K 值较小的为准。

二是计算下渗雨量过程中，当降水强度 q 小于 K 时，以降雨强度值为准： $k=q$ ，反之以 K 为准。当进入设施的径流量大于同时间的土壤渗透量或结构

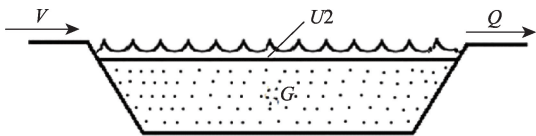


图1 水量示意图

Fig.1 Schematic diagram of water balance

层蓄满后，多余径流必然在设施内形成蓄水层 U_2 ，当 U_2 超过设施表层蓄水空间时，就会发生溢流，溢流量为 Q 。

(2) 雨水处理成本效益计算

计算雨洪管理LID设施的成本效益，首先需要计算设施运行时间内的总成本，包括建筑安装成本和运行维护费用，这部分成本依据相关建筑预算定额文件及清单计价规范进行计算。另外为更加科学地对不同设施的成本效益进行比较，需将其服务时间通过最小公倍数法调整为相同的时间长度。通过查阅各项设施的运行寿命周期数据，确定30年为共同的服务时间(表3)，由于各技术设施运行时间较长，在进行成本和维护费用计算时要考虑资金的时间价值(宁静等, 2006)，并按折现率7%计算30年时间段内各项设施的建安成本及运行维护总费用现值(车伍等, 2006)。最后结合设施服务面积内处理的雨水体积，分析单位体积雨水处理所需的成本。

3 结果与分析

3.1 LID技术设施蓄渗雨量效果分析

3.1.1 原地入渗设施蓄渗雨量效果分析

由于透水铺装、屋顶种植属于原地蓄渗设施，没有自身面积以外的雨水汇集，所以只分析场次降雨情景下设施自身蓄渗雨量的效果。

原地蓄渗设施构造容积较小，能够消纳的雨水体积有限。在设施运行服务期内，场次降雨情景下设施的雨水蓄渗情况见图2。由图可知，同一城市中屋顶种植与透水砖铺装的蓄渗效果差异不大，前者略高于后者，主要是由于其容积不同所致。2项设施在80%、95%的降雨场次控制率对应的降雨情景下不会产生溢流，效果较好。在空间分布上，31个城市的雨水蓄渗量表现出西北、东北及华北地区

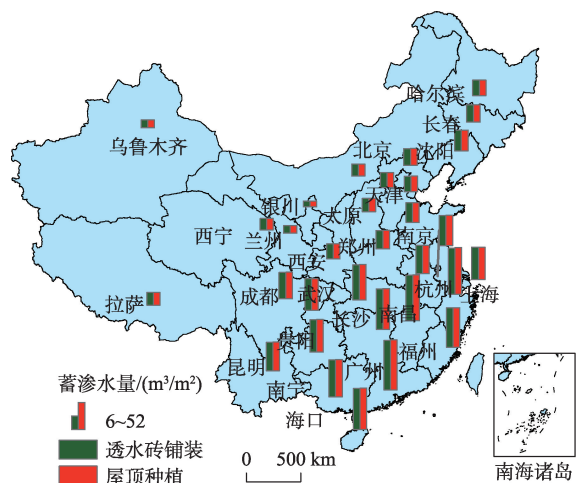


图2 30年服务期内原地入渗设施总蓄渗雨量

Fig.2 Total rainfall infiltration of in situ infiltration facilities for all climatic regions in 30-year service period

城市(如:乌鲁木齐、兰州、哈尔滨、北京),低于东部及东南沿海城市(如:上海、广州、海口)。因此建议降雨相对较少的东北、西北地区,可适当降低设计标准,以节约成本。

3.1.2 汇流功能设施蓄渗雨量效果分析

(1) LID设施汇流面积分析

LID设施主要通过对降雨的蓄渗调节降低地表径流,缓解降雨初雨污染。设施蓄渗调节能力越大其能够服务的汇流面积也越大。因此设施的最大汇水面积可以作为评价其蓄渗减排效果的指标。汇水面积取决于设施的设计参数及所在城市的降水情况。利用已有数据计算分析80%和95%降雨场次控制率情景下不同设施在不发生溢流的条件下能服务的最大汇流面积,并使用汇流面积与设施面积比值来表示其相对大小,结果见图3a、3b。由

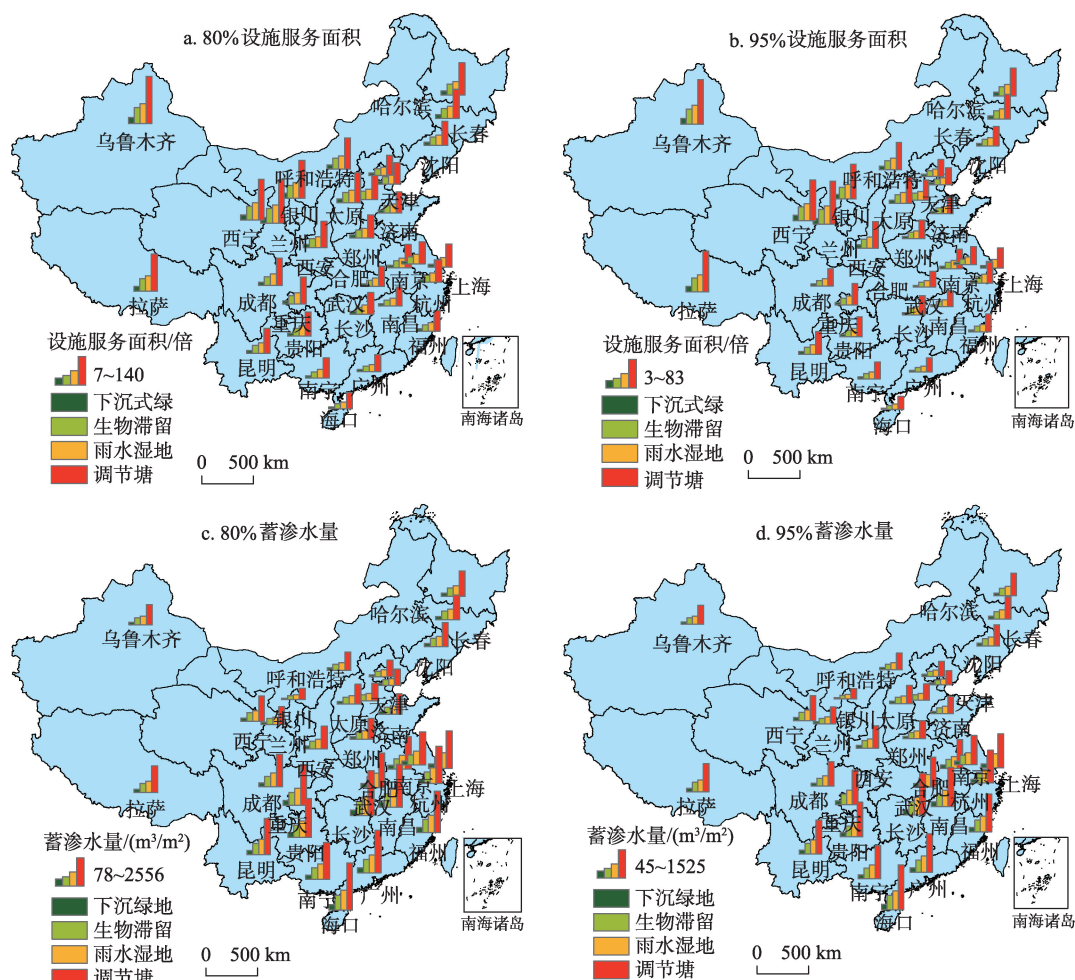


图3 30年服务期内80%与95%降雨情景下设施服务面积与自身面积比值及设施总蓄渗水量

Fig.3 Ratio of the confluence area to the facility area and total rainfall infiltration of low impact development (LID) facilities in 30-year service period under 80% and 95% rainfall scenarios

图可知,在不同降雨情景下,设施中调节塘的比值最大,说明调节塘可调蓄较大汇流面积内的降水而不发生地表径流。另外,雨水湿地的比值仅次于调节塘,略大于生物滞留池,下沉式绿地最小。在空间分布上可以看出,西北、东北地区的城市比值较大,而南部和东部沿海城市普遍较小,受区域降水差异的影响较大。值得注意的是,京津冀地区城市虽然年均降雨量不多,但其场次降雨量较大,汇流面积相对较小,应相应地提高区域雨水调蓄能力。对比不同降雨情景可知,在降雨场次控制率要求较低的情景下其调蓄效果更好,说明LID设施的调蓄能力有限,设施之间可通过协调建设,使其雨水调蓄能力得到优化。

(2) 汇流功能设施蓄渗雨量效果

借助城市多年降水数据,计算汇流面积内各设施30年服务期的总雨水蓄渗量,结果见图3c、3d。由图可知,受自身容积的影响,调节塘蓄渗雨量最多,下沉式绿地最少。在空间分布上,蓄渗水量的差异受城市降水和设施汇流面积共同影响,西部城市虽然降水量少,但设施汇流面积大,相应的蓄渗水量也多。从整体上看,蓄渗量受降水的影响较大,表现为东部沿海、长江以南城市的蓄渗水量高于北方和西部城市。此外,80%降雨场次控制率情景的蓄渗水量高于95%的情景。由于各项技术设施雨水净化效果是在雨水蓄渗的基础上进行计算的,其空间分布特征与雨水蓄渗相似,只存在设施之间的差别,在此不再赘述。

3.2 LID设施蓄渗、净化雨水成本效益分析

对比LID技术设施服务期内的总成本数据可知屋顶种植、生物滞留设施成本较高;其次是雨水湿地、透水砖铺装、调节塘;下沉绿地成本最低。在空间分布上,各城市间由于人工、材料、机械台班费用不同存在一定的差别(图4),成本费用较高的城市主要包括北京、天津、上海、广州、海口、银川、西宁和兰州。

利用LID设施30年服务期内的总成本费用与蓄渗雨量数据,计算其单位体积雨水处理的成本。借助设施的TSS去除率(表3),可计算单位体积雨水去除TSS所需成本。

通过计算得到屋顶种植与透水砖铺装单位体积雨水处理的成本(图5)。从图5可知,大部分城市的单位体积雨水处理成本较高,最低成本6元/m³出

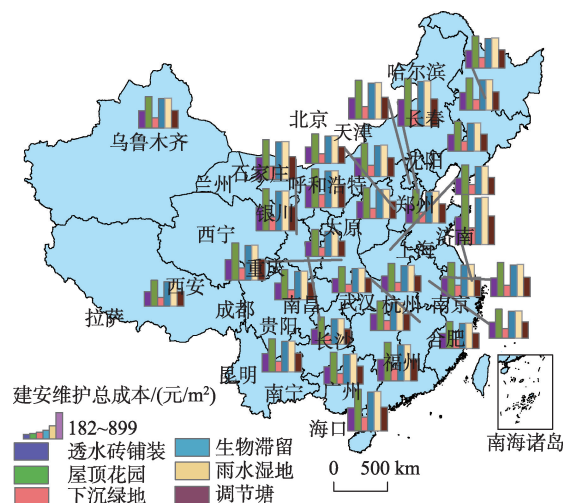


图4 30年服务期内设施建筑安装及运行维护总成本费用

Fig.4 Total cost of installation and maintenance of low impact development (LID) facilities in 30-year service period

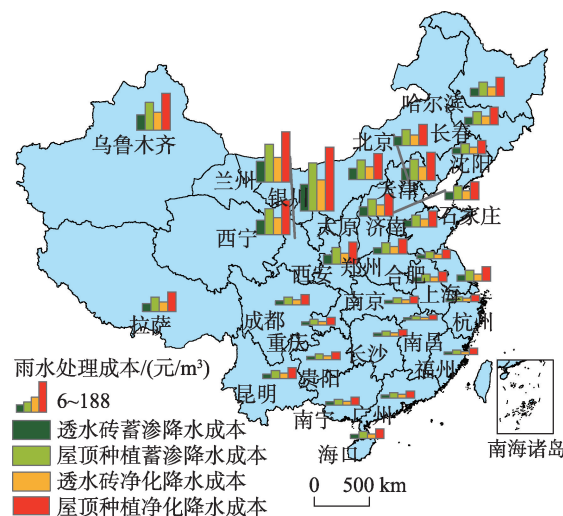


图5 30年服务期内原地入渗设施单位
体积雨水处理成本

Fig.5 Cost of unit volume rainwater treatment by low impact development (LID) facilities in 30-year service period under 80% and 95% rainfall scenarios

现在南昌市,最高值出现在银川市188元/m³。在空间分布上,南方城市的成本显著低于北方城市,中东部小于西北部城市。其原因有2个方面:一是降水量较小的西北地区城市,原地入渗设施利用率较低,蓄渗水量较少导致成本较高,而南方城市便不会出现这种情况。二是城市建筑安装造价费用较高也增加了雨水处理的成本。污染物净化成本略高于蓄渗成本,空间分布特征与蓄渗成本相似。

汇流雨水入渗方式相对于原地雨水入渗在处理成本上显示出较大的优势(图6a、6b),通过分析可

以发现,其单位体积雨水的成本费用在80%降雨场次控制率情境下为0.1~3.8元/m³,95%情景下在0.2~6.5元/m³之间。在各技术设施中,生物滞留设施、下沉式绿地成本较高,雨水湿地较低,调节塘成本最低。在空间分布上,北方城市的蓄渗水量的成本高于南方城市,京津冀及西北地区城市成本高于其他北方城市。

单位体积的雨水净化成本取决于2个方面,一是技术设施的雨水蓄渗能力,二是技术设施的TSS去除率。综合两者的数据,计算出净化雨水的成本(图6c、6d)。各项设施TSS去除率的差异为:下沉式绿地的处理成本高于其他措施,生物滞留设施与雨水湿地相接近,调节塘成本最低。在空间分布上,单位体积雨水净化成本北方城市显著高于南方城市,且北方城市技术设施之间的成本差异亦大于

南方城市。

4 讨论

4.1 降雨雨量控制指标比较

本文针对城市雨洪管理LID技术设施展开研究,目的是对中国各城市的雨洪管理(LID)设施进行成本效益分析,为各城市推荐适宜的技术设施提供数据支持。

在分析不同降雨情景时采用降雨场次控制率对应的设计降雨量,虽然中国海绵城市建设指南是以年径流总量控制率对应的设计降雨量来设计的,但其实两者本质上是相通的,都是对一定范围降雨量的控制。海绵城市指南文件中未对年径流总量控制率提出统一的要求,仅将中国大陆大致分为5

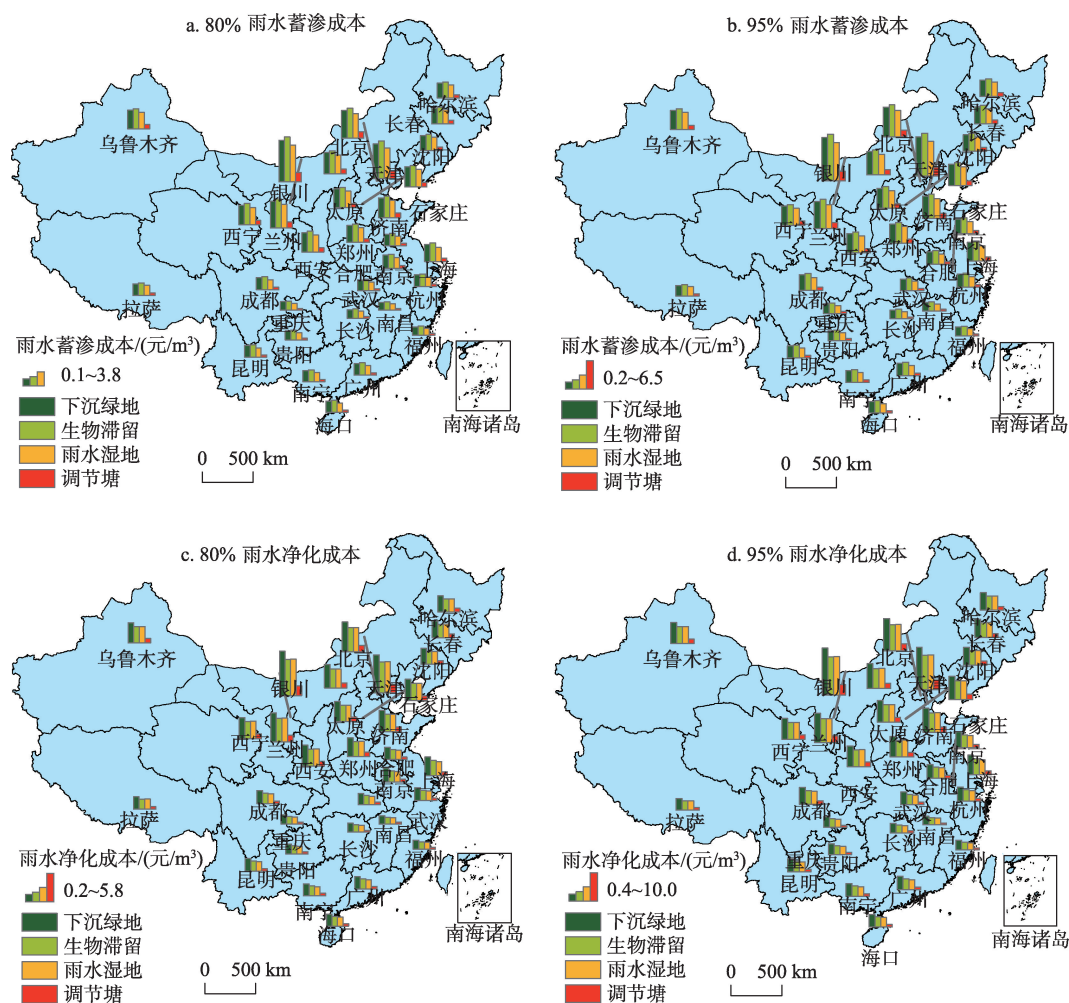


图6 30年服务期内80%与95%降雨情景下设施单位体积雨水蓄渗、净化成本

Fig.6 Cost of unit volume rainwater storage and infiltration, rainwater purification by low impact development (LID) facilities in 30-year service period under 80% and 95% rainfall scenarios

个区,并给出了各区年径流总量控制率的最低和最高值。为探讨二者关系,选取 10 个城市对其降雨场次控制率(80%~95%)与年径流总量控制率对应的设计降雨量控制范围(表 4)进行比较分析。

通过对比发现,两者设计降雨量的最低值是相近的,最大值表现出降雨场次控制率大于“指南”中径流总量控制率对应值,说明国外降雨场次控制率指标对降雨量控制要求高于国内,按照国内标准来建设 LID 设施在雨量大的情景下效果相对差一些,但花费较少。另外,对雨型及时程分布的分析是为了说明不同城市区域降雨强度的差异,主要用于计算在一定降雨情景下 LID 设施的蓄渗能力能否应对不同雨型下的降雨强度。通过计算发现,各项 LID 设施在设计降雨情景下对于各种雨型控制良好,几乎没有发生因雨强过大而产生超渗溢流的情况,受雨型的影响较小。原因在于:一是由于降雨控制目标主要通过控制频率较高的中、小降雨事件而实现,中、小降雨的雨量、雨强普遍较低。二但是本文所利用的雨型及时程数据时间分辨率较低,不能很好地反映短历时、强降雨的情景,最终并未对蓄渗雨量产生很大影响。

4.2 LID 设施应用效果分析

进一步通过设定不同的降雨情景分析各设施的表现。以设施的雨水蓄渗效果、净化效果及相应的成本费用作为分析指标,可以发现:在空间上设施的雨水处理效果表现为南方城市优于北方城市(南方城市汇流设施单位雨水处理成本均值在 1.5 元/m³左右,北方城市在 2.9 元/m³左右),且北方城市之间成本差异较大,京津冀和西北地区城市的成本

高于周边城市。主要原因为北方城市的年均降水量较少,北方城市的成本费用均值较高。此外由于京津冀地区的场次降雨量较高,容易发生水涝,但同时因年均降雨量少、设施利用率低、成本较高,使得其运行效益偏低。这与 Sang 等(2017)研究中指出的城市雨洪管理受降水地域差异的影响很大,东部沿海与海河流域易发生降雨灾害的研究相一致。这就要求在进行雨洪设施配置时,在满足基本控制指标的同时更应考虑其运行效益。原地入渗设施的蓄渗效果有限且其成本费用较高,北方城市尤甚。究其原因主要是难以汇集周边雨水,同时自身构造中蓄渗雨水的体积较小,在遇到强降雨的情况下容易蓄满产流。另外,由于本文未考虑雨水的深层下渗也是低估其蓄渗效果的原因之一。因此,对于原地入渗设施建议在建造过程中可考虑使用成本更低廉、利用效率更高的设施进行替代。对于具备汇流功能的 LID 技术措施,在 80%降雨场次控制率的情景下,各项设施的雨水蓄渗效益优于 95%情景。技术设施之间构造的差别,导致蓄渗雨水的体积不同,蓄渗雨水越多其蓄渗单位体积雨水的成本越低。因此,所有设施中调节塘的效益最好,其次是雨水湿地、生物滞留设施,最后是下沉式绿地。

通过 LID 设施处理后的雨水有 2 个去处:一是入渗到地下补充表层土壤水分及深层的地下水;二是收集回用。两者都属于雨水资源化再利用。但仅从投资上看,LID 设施的花费较高,但是其蓄渗节约的水量对于水资源短缺地区(特别是北方地区)的生态环境及社会经济具有重要的作用。以北京为例,每年流失的雨水超过 10 亿 m³,而南水北调工程北京年均受水为 10.5 亿 m³。如能将流失的雨水收集起来回收利用,必将在一定程度缓解北京水资源的紧缺问题(贺斌, 2015)。另外,LID 设施还具有生态补水、净化污水、缓解洪涝、增加地产价值、减少排水费用等效益,所以其总体经济收益为正,具有很高的推广价值。

4.3 不同城市 LID 设施适宜性分析

考虑到雨洪管理设施场地的适宜性、实用性、美观性等要求,在选择技术设施时要做到具体情景具体分析。在降雨较少及降雨场次控制指标要求低的情景下,下沉式绿地能满足大部分城市降雨场次控制率的要求,且成本费用低于其他技术设施,所以较适合于对降雨场次控制率要求较低的城市。在空间分布上,由于南北方城市降雨的区域性

表 4 部分城市年降雨场次控制率与年径流总量控制率对应的设计降雨量范围

Tab.4 Design rainfall of rainfall event capture ratio and runoff volume capture ratio in some Chinese cities

城市	降雨场次控制率/mm	径流总量控制率/mm
长春	16.2~35.3	21.4~26.6
北京	23.1~51.3	22.8~33.6
郑州	20.4~47.0	23.1~34.3
武汉	23.6~55.1	24.5~43.3
上海	20.3~44.0	22.2~33.0
长沙	21.7~45.1	21.8~31.6
福州	22.7~48.5	24.1~35.7
南宁	23.2~51.4	23.5~40.4
乌鲁木齐	10.0~19.5	13.0~15.0
拉萨	12.7~21.4	12.3~14.7

差异,南方城市大雨量、高强度的降水对雨洪管理设施提出了更高的要求,特别是在降雨场次控制率较高的降雨情景下,大部分南方城市的雨洪管理LID技术设施不能满足场次控制率的要求,此时雨洪管理仅靠下渗是不够的,必须增加调蓄能力强的技术设施,如调节塘,同时需要通过多项设施组合或者减少汇流面积、提高储水体积等方式提高调蓄能力,减少地表径流量。

本文中的雨洪管理LID技术设施建造设计参数根据住建部印发的《海绵城市建设技术指南—低影响开发雨水系统构建(试行)》及其他行业标准规范,各项参数取其中等标准,缺少对不同环境、情景下的动态化参数研究;同时由于各地区下垫面的复杂性及差异性,本文未考虑雨水深层下渗导致了对LID技术设施雨水蓄渗效果的低估。针对以上不足,期望能在今后的研究中提出解决方法,得到更加详实的分析结果,为推动建设现代化城市雨洪管理系统提供支撑。

5 结论

通过对雨洪管理LID技术设施的成本及效果分析,本文得出以下主要结论:

(1) 受降水及建安维护费用的区域差异影响,南方城市LID技术设施的雨水处理效益优于北方城市;但北方城市之间效益差异较大,京津冀和西北地区城市的雨水处理成本高于其他城市。

(2) 与具备汇流功能的设施相比,原地入渗设施蓄渗效果有限且其建造和维护费用较高,建议在设计建造过程中使用低成本、渗透性高的材料,以控制成本,还可考虑使用成本更低、利用效率更高的设施辅助或替代。

(3) 在较低的降雨场次控制率情景下,构造简单成本较低的下沉式绿地能满足大部分城市的雨水控制指标要求。对于较高的降雨场次控制率指标,普通的下渗设施已不能满足基本要求,需要结合调蓄设施建设而达到控制效果。

参考文献(Reference)

北京市质量技术监督局. 2003. DB11/T 213-2003 城市园林绿化养护管理标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社. [Beijing Municipal Administration of Quality and Technology Supervision. 2003. DB11/T 213-2003 code for manage-

ment of landscape greening in city and town[S]. Beijing, China: China Architecture & Building Press.]

北京市住房和城乡建设委员会. 2013. 2012年北京市建设工程预算定额[M]. 北京: 中国建筑工业出版社. [Beijing Municipal Commission of Housing and Urban Rural Development. 2013. 2012nian Beijingshi jianshe gongcheng yusuan ding'e[M]. Beijing, China: China Architecture & Building Press.]

车伍, 李俊奇. 2006. 城市雨水利用技术与管理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社. [Che W, Li J Q. 2006. Chengshi yushui liyong jishu yu guanli[M]. Beijing, China: China Architecture & Building Press.]

车伍, 闫攀, 赵杨, 等. 2014. 国际现代雨洪管理体系的发展及剖析[J]. 中国给水排水, 30(18): 45-51. [Che W, Yan P, Zhao Y, et al. 2014. Development and analysis of international updated stormwater management systems[J]. China Water & Wastewater, 30(18): 45-51.]

陈韬, 李业伟, 张雅君. 2014. 典型城市雨水低影响开发(LID)措施的成本—效益分析[J]. 西南给排水, 36(2): 41-46. [Chen T, Li Y W, Zhang Y J. 2014. Dianxing chengshi yushui diyingxiang kaifa (LID) cuoshi de chengben-xiaoyi fenxi[J]. Southwest Water & Wastewater, 36(2): 41-46.]

贺斌. 2015. 李俊奇: 算好海绵城市这本经济账[N]. 中国财经报, 2015-02-14(003). [He B. 2015. Li Junqi: Suanhao haimian chengshi zheben jingjizhang[N]. China Financial and Economic News, 2015-02-14(003).]

户园凌. 2012. 低影响开发雨水系统综合效益的分析研究[D]. 北京: 北京建筑工程学院. [Hu Y L. 2012. Analytical study on the overall benefits of LID stormwater system [D]. Beijing, China: Beijing University of Civil Engineering and Architecture.]

匡文慧, 陈利军, 刘纪远, 等. 2016. 亚洲人造地表覆盖遥感精细化分类与分布特征分析[J]. 中国科学: 地球科学, 46(9): 1162-1179. [Kuang W H, Chen L J, Liu J Y, et al. 2016. Remote sensing-based artificial surface cover classification in Asia and spatial pattern analysis[J]. Science China: Earth Sciences, 59(9): 1720-1737.]

李俊奇, 车伍, 池莲, 等. 2004. 住区低势绿地设计的关键参数及其影响因素分析[J]. 给水排水, 30(9): 41-46. [Li J Q, Che W, Chi L. 2004. Critical parameters and influencing factors analysis on low elevation greenbelt in residential area[J]. Water & Wastewater Engineering, 30(9): 41-46.]

林小鹏. 2009. 中国降雨特性分析与模拟[D]. 北京: 北京师范大学

- 大学. [Lin X J. 2009. Characterization and simulation of precipitation in China[D]. Beijing, China: Beijing Normal University.]
- 刘文, 陈卫平, 彭驰. 2015. 城市雨洪管理低影响开发技术研究与利用进展[J]. 应用生态学报, 26(6): 1901-1912. [Liu W, Chen W P, Peng C. 2015. Advances in low impact development technology for urban stormwater management [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 26(6): 1901-1912.]
- 刘勇, 张韶月, 柳林, 等. 2015. 智慧城市视角下城市洪涝模拟研究综述[J]. 地理科学进展, 34(4): 494-504. [Liu Y, Zhang S Y, Liu L, et al. 2015. Research on urban flood simulation: A review from the smart city perspective[J]. Progress in Geography, 34(4): 494-504.]
- 宁静, 李田. 2006. 上海市降雨特性统计与雨水存储池容积计算[J]. 中国给水排水, 22(4): 48-51. [Ning J, Li T. 2006. Statistics on rainfall properties and capacity calculation of rainwater storage tank in Shanghai[J]. China Water & Wastewater, 22(4): 48-51.]
- 王虹, 丁留谦, 程晓陶, 等. 2015. 美国城市雨洪管理水文控制指标体系及其借鉴意义[J]. 水利学报, 46(11): 1261-1271, 1279. [Wang H, Ding L Q, Cheng X T, et al. 2015. Hydrologic control criteria framework in the United States and its referential significance to China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 46(11): 1261-1271, 1279.]
- 伍海兵, 方海兰. 2015. 绿地土壤入渗及其对城市生态安全的重要性[J]. 生态学杂志, 34(3): 894-900. [Wu H B, Fang H L. 2015. Research progress on soil infiltration of green space and its importance for municipal ecological security[J]. Chinese Journal of Ecology, 34(3): 894-900.]
- 殷水清, 王杨, 谢云, 等. 2014. 中国降雨过程时程分型特征[J]. 水科学进展, 25(5): 617-624. [Yin S Q, Wang Y, Xie Y, et al. 2014. Characteristics of intra-storm temporal pattern over China[J]. Advances in Water Science, 25(5): 617-624.]
- 中国建设造价工程信息网. 2016a. 城市住宅建安工程造价指标数据[EB/OL]. 2016-07-01[2017-04-19] <http://www.cecn.gov.cn>. [China Engineering Cost Network. 2016-07-01. Chengshi zhuzhai jianan gongcheng zaojia zhibiao shuju [EB/OL]. 2016-07-01[2017-04-19] <http://www.cecn.gov.cn>.]
- 中国建设造价工程信息网. 2016b. 建筑实物工程量人工成本信息表[EB/OL]. 2016-07-01[2017-04-19] <http://www.cecn.gov.cn>. [China Engineering Cost Network. 2016b. Jianshe shiwu gongchengliang rengong chengben xinxi biao [EB/OL]. 2016-07-01[2017-04-19] <http://www.cecn.gov.cn>.]
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2013. GB 50500-2013 建设工程工程量清单计价规范[S]. 北京: 中国计划出版社. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2013. GB 50500-2013 code of valuation with bill quantity of construction works[S]. Beijing, China: China Planning Press.]
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2006. GB50400-2006 建筑与小区雨水利用工程技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. 2006. GB50400-2006 engineering technical code for rain utilization in building and sub-district[S]. Beijing, China: China Planning Press.]
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2010. GB/T 50596-2010 雨水集蓄利用工程技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. 2010. GB/T 50596-2010 technical code for rainwater collection, storage and utilization[S]. Beijing, China: China Planning Press.]
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2012. CJJ/T 188-2012 透水砖路面技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. 2012. CJJ/T 188-2012 technical specification for pavement of water permeable brick [S]. Beijing, China: China Architecture & Building Press.]
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2013. JGJ 155-2013 种植屋面工程技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. 2013. JGJ 155-2013 Technical specification for planted roof[S]. Beijing, China: China Architecture & Building Press.]
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2014. 海绵城市建设技术指南: 低影响开发雨水系统构建(试行)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. 2014. Haimian chengshi jianshe jishu zhinan: Diyingxiang kaifayushui xitong goujian[S]. Beijing, China: China Architecture & Building Press.]
- Ashley R, Lundy L, Ward S, et al. 2013. Water-sensitive urban

- design: Opportunities for the UK[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Municipal Engineer*, 166(2): 65-76.
- Cipolla S S, Maglionico M, Stojkov I. 2016. A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM[J]. *Ecological Engineering*, 95: 876-887.
- Entry J A. 2014. The impact of stormwater treatment and best management practices on nutrient concentration in the Florida everglades[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 225(1): 1758.
- Hapuarachchi H A P, Wang Q J, Pagano T C. 2011. A review of advances in flash flood forecasting[J]. *Hydrological Processes*, 25(18): 2771-2784.
- Lee J M, Hyun K H, Choi J S. 2013. Analysis of the impact of low impact development on runoff from a new district in Korea[J]. *Water Science & Technology*, 68(6): 1315-1321.
- Sang Y F, Yang M Y. 2017. Urban waterlogs control in China: More effective strategies and actions are needed[J]. *Natural Hazards*, 85(2): 1291-1294.
- United States Environmental Protection Agency. 2000. Low impact development (LID): A literature review[R]. EPA-841-B-00-005. Washington D C: Office of Water.
- Wang M, Zhang D Q, Adhityan A, et al. 2016. Assessing cost-effectiveness of bioretention on stormwater in response to climate change and urbanization for future scenarios[J]. *Journal of Hydrology*, 543: 423-432.

Regional difference of cost effectiveness of low impact development (LID) technical facilities in Chinese cities

LI Dalong^{1,2,3}, JIA Shaofeng^{1,2*}, LV Aifeng^{1,2}, ZHU Wenbin^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Nature Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Process, CAS, Beijing 100101, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: With accelerating urbanization, population growth, and urban expansion, modern urban stormwater management faces new challenges. Based on the scenario analysis method, this study analyzed the cost-effectiveness of China's urban low impact development (LID) technical facilities. We calculated the benefits of different facilities under 80% and 95% rainfall event control rate scenarios respectively in the 30-year service period. The results show that the cost of construction and maintenance in the northern cities are higher than those in the southern cities. Benefits of stormwater management in the southern cities are generally higher than those in the northern cities. In addition, within the northern cities, benefits of urban stormwater management are lower in Beijing, Tianjin, and northwest regions. For different facilities, the cost of stormwater management for in situ infiltration is between 6 and 188 yuan/m³, significantly higher than the technical facilities with confluence function. Due to their low cost and reasonable effectiveness, combined sunken green area and rainwater wetland are suggested for northern cities with low precipitation. In the southern cities with more rainfall and strong rainfall intensity, it is recommended to use biological retention facilities in combination with regulating ponds. These methods not only can increase the storage capacity to meet the requirements of rainfall control rate but also can increase the rainwater infiltration and help purifying rainwater on the ground.

Key words: urban stormwater management; low impact development (LID); cost-effectiveness; scenario analysis; China