

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.12.021

提升防涝韧性的城市调蓄空间量化方法研究

陈诗扬, 程小文

(中国城市规划设计研究院, 北京 100044)

摘要: 通过“蓄排并举”提升城市防涝韧性是应对日益凸显的城镇内涝风险的重要手段。如何量化城市调蓄空间需求是落实蓄排平衡策略的首要问题。将三个国外城市规划中调蓄空间总量的计算方法与国内相关标准导则进行对比研究,分析这些方法在我国内涝防治韧性规划中的适用性。对比发现荷兰UWBM-SDF方法符合我国内涝防治标准中保证特定重现期下不发生内涝事件的要求,适合估算城市防涝韧性建设的长期总体调蓄目标。介绍了UWBM-SDF蓄排平衡曲线法在国内规划实践应用中的两个案例,提出了适合国内防涝韧性需求的城市调蓄空间量化方法的研究方向。

关键词: 蓄排平衡; 韧性; 调蓄空间; 内涝防治; 水文模型; 城市规划

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)12-0132-07

Study on Quantifying Urban Storage Capacity from the Perspective of Enhancing Resilient Pluvial Flood Protection

CHEN Shi-yang, CHENG Xiao-wen

(China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100044, China)

Abstract: The combination of “storage & discharge” is an essential measure to handle the looming pluvial flood risks in Chinese cities. Therefore, how to quantify the required urban storage capacity becomes the priority for the implementation of “storage & discharge” strategy. This paper summarizes storage capacity calculation methods from urban planning of three countries, and compares them with the relevant Chinese standard and guidelines. The applicability of these methods is then assessed in the context of resilient pluvial flood protection planning. The result shows that the Dutch UWBM-SDF method aligns the principle in the Chinese standard of pluvial flooding prevention, which requires a city free of pluvial flood events under certain return period. UWBM-SDF can facilitate the quantification of long-term overall required storage capacity, and it has been applied in two Chinese case studies. In the end, the paper provides the future research direction towards the quantification method of storage capacity which fit the requirements of pluvial flood protection in Chinese cities.

Key words: storage & discharge balance; resilience; storage space; pluvial flood protection; hydrological model; urban planning

快速的城市化和日益显著的气候变化带来严峻的内涝风险挑战^[1],如何在城市开发和更新中合

基金项目: 财政部基本科研业务费专项资金项目(CZ-2022009); 国家重点研发计划项目(2021YFC3001405)

通信作者: 陈诗扬 E-mail: shiyang.chen07@gmail.com

理保护自然调蓄空间、处理好城水的关系是新型城镇化发展阶段城市规划的关键问题之一。在科学布局城市调蓄空间之前,需要对特定场景下的调蓄总量进行合理估算^[2],但既有的规范导则尚未提出具有可操作性的指导方法^[3-4]。

在对美国、新西兰、荷兰城市规划中调蓄空间总量计算方法进行研究的基础上,对比国内相关标准与导则的要求,分析各种方法的规划原理及适用条件,并将荷兰的UWBM-SDF蓄排平衡曲线法应用于国内两个规划实践中,总结适合国内防涝韧性需求的城市调蓄空间量化方法的研究方向。

1 调蓄空间量化方法

城市雨水调蓄空间或设施具有削减洪峰流量、减少径流污染、提升景观效果等作用^[5-6]。美国丹佛市将调蓄设施按服务面积分为区域类、子区域类、源头类三种^[6];新西兰奥克兰地区水敏性设计中针对区域、流域、社区、地块提出不同的调蓄策略^[7];荷兰采用优先源头调蓄的策略应对洪涝问题^[8]。

1.1 美国丹佛全谱调蓄设计方法

美国传统的雨洪管理注重控制径流峰值流量,现行法规中要求使用低影响开发策略模拟开发前的水文特征,以实现城市开发对自然水文循环影响的最小化^[6]。科罗拉多州丹佛市的暴雨排水标准手册(USDCM)提供了全谱调蓄设施的设计方法,通过源头减排措施与防涝调蓄设施的综合设计,解决传统调蓄设计中多个独立汇水区水文过程线的相互叠加导致整个流域范围内流量增加的问题^[6]。全谱调蓄量控制的降雨事件涵盖了低强度降雨到引起百年一遇洪水的强降雨,使得径流水文过程线接近开发前的情景。

全谱调蓄量组成如图1所示^[6]。

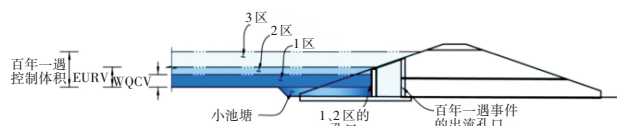


图1 美国丹佛全谱调蓄量组成示意图

Fig.1 Schematic diagram of the compositions of full spectrum detention

全谱调蓄量的底部容积是调蓄和缓慢释放的过量城市径流量(EURV),EURV是开发前后径流体积的差值,通常是水质控制量(WQCV)的2~3倍;全谱调蓄量的顶部容积被设计成将开发后百年一

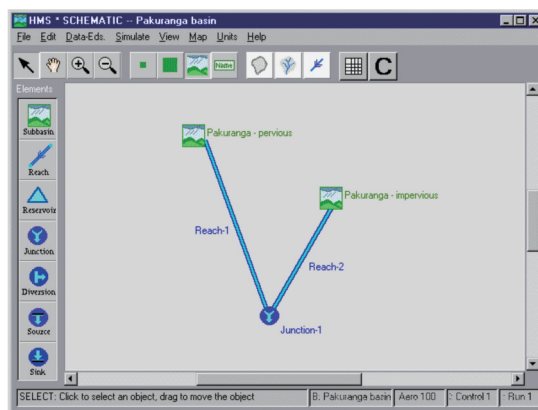
遇洪峰流量减少至开发前百年一遇洪峰流量值的90%,进而使得下游受纳河流接近开发前的状态^[6]。

百年一遇的全谱调蓄总量计算方法有三种:公式法、UD-Detention计算表法、水文径流过程线模型法(CUHP/SWMM)。公式法中全谱调蓄总量通过降雨量、不透水率、土壤类型确定。计算表法使用改良Puls调洪计算法评估设施的调蓄能力,适用于各种滞留池、蓄留池等调蓄设施。模型法底部容积EURV通过公式计算,顶部容积使用CUHP或SWMM模型模拟开发前后水文过程线确定。三种方法中只有模型法可以评估多个调蓄设施串并联布置的情形^[6]。

1.2 新西兰奥克兰地区调蓄量计算方法

新西兰首都奥克兰市的雨水管理设施设计导则(T10)中对防涝调蓄设施体积的计算给出了指导方法^[9]。T10中将水质体积(Water Quality Volume, WQV)和水量控制体积(Water Quantity Control)进行了区分,其中WQV近似年径流总量控制率对应的径流控制体积。水量控制体积量化原则是在设计相关设施后,保证开发前后径流峰值流量与径流总量不变,通常使用2年一遇、10年一遇、100年一遇三个场景进行模拟核算。模拟需符合《奥克兰区域暴雨径流模拟指南》(TP108)中的相关要求^[10]。

TP108提供了两种算法:软件模拟法和图像法。软件模拟法中,使用HEC-HMS软件将流域径流概化为透水和不透水两个子流域的径流汇入一个节点[见图2(a)],输入24h的设计暴雨进行洪峰模拟。图像法假设流域为均一化特征,使用经验曲线查找特征峰值流量[见图2(b)],然后通过公式计算峰值流量。图像法计算的峰值流量比软件模拟法稍高,径流总量则略低。



a. HEC-HMS模型概化

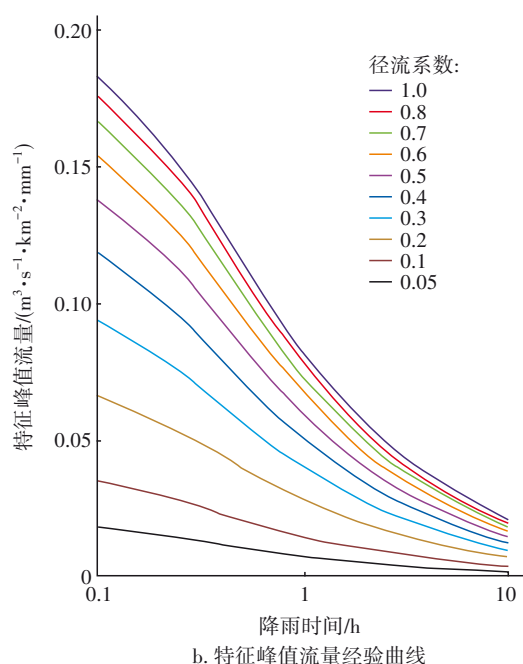


图2 新西兰调蓄量计算方法

Fig.2 Detention calculation method of New Zealand

1.3 荷兰水测评工具与 UWBM-SDF 方法

荷兰的防涝策略经历了从以往单一排水模式转变为蓄留、滞留、排放三级防涝策略^[8, 11-12]。这一策略顺序意味着水优先尽可能长时间蓄留在土壤或地表以防止内涝;如有必要,将临时滞留雨水;若无法调蓄,则采取排放措施。此策略可防止区域水系统防涝责任的转移。代尔夫兰水董事会推荐其辖区内使用水测评工具计算开发项目的调蓄需求^[13]。依据水量平衡原理,将模型简化为降水分布在几个板块上,如土壤、地表、泵站抽排部分。水测评工具通过计算不同重现期(10年一遇、25年一遇、50年一遇、100年一遇)和气候变化场景(2050年)下空间开发前后的开放水体水位上升量,确定地表最小调蓄需求^[14](见图3)。该水测评工具只适用于简单的空间开发调蓄量的快速计算^[14]。

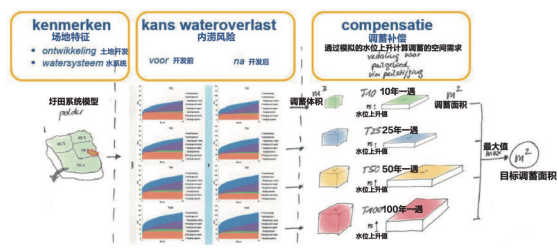


图3 代尔夫兰水董事会水测评工具

Fig.3 Water test tool of Delfland Water Board

针对区域层面的防涝目标,南荷兰省在气候适应性建设公约中要求将私人土地上一次短时强降雨(100年一遇,70 mm/h)产生的大部分降水径流(50 mm)就地蓄滞;规划区内发生特大降水(250年一遇,90 mm/h)时雨水径流不会对建筑物和设施造成破坏^[15]。

荷兰三角洲研究院(Deltares)开发的气候韧性城市工具箱(Climatic Resilient City Toolbox, CRCT)可以对有复杂空间特征的城市调蓄总量与开发地块调蓄需求进行量化^[4, 16]。该工具箱的调蓄量量化通过基于水量平衡原理的水文模型(UWBM)计算得到^[17]。模型的概化图如图4所示。

UWBM模型描述了所有可能的城市水量和相关的水资源组分,包括降雨径流、浅层地下水(饱和与不饱和区)、地表水和污水(合流制排水和分流制排水),并对降雨径流、下渗、渗漏等水文过程进行模拟。UWBM将土地利用性质分为屋顶、不透水铺装、部分透水铺装、未铺装、开放(地表)水体五个类型。不同类型的地表径流最终汇入开放水体导致水位变化,地表水体和地下水根据水位关系进行水量交换,泵站抽排和进入污水处理厂的水量将从体系中被移除。通过历史长序列(如30年)的降雨和蒸发数据,对城市水系统各个组分进行连续动态计算。

特定重现期下的调蓄需求可以通过 UWBM 中 SDF(Storage-Discharge-Frequency)蓄排平衡模块计算得到。SDF曲线是关于调蓄能力和排涝能力在不同径流重现期情况下的平衡关系曲线^[18]。UWBM首先模拟长历时降雨序列下开放水体水位上涨的变化,将其与目标水位的差值 $D(t)$ 转换为整个区域面积上的调蓄量深度 $S(t)$;随后对 $S(t)$ 进行极值分析,确定年度最大值或峰值超过阈值的极值,并将这些极值使用概率分布函数(Gumbel, GEV)进行拟合,或使用Weibull的数学期望经验频率公式 $T=m/(N+1)$ (N 为样本容量, m 为样本中大于或等于某阈值的个数)进行重现期估算,在给定泵站抽排量 Q 和城市流域的特征输入值下,计算出不同重现期 $T=x$ 年时所需的调蓄量 $S(T=x|Q)$;对不同的 Q 进行多次模拟,生成SDF曲线(见图5),即不同防涝重现期下调蓄-排放平衡曲线。

考虑到城市调蓄量和排放量(泵排量与自排量)对防涝存在互补关系,即调蓄量越多,需要的排

放量就减少,反之亦然。强降雨时管网系统的排水能力有限,过大提高泵站抽排量并不能有效解决内涝问题,甚至会增加下游的洪涝风险。因此,在评

估流域现状抽排能力和城市未来的发展趋势后,确定总体排涝能力,进而在城市防涝重现期目标下确定所需的调蓄能力。

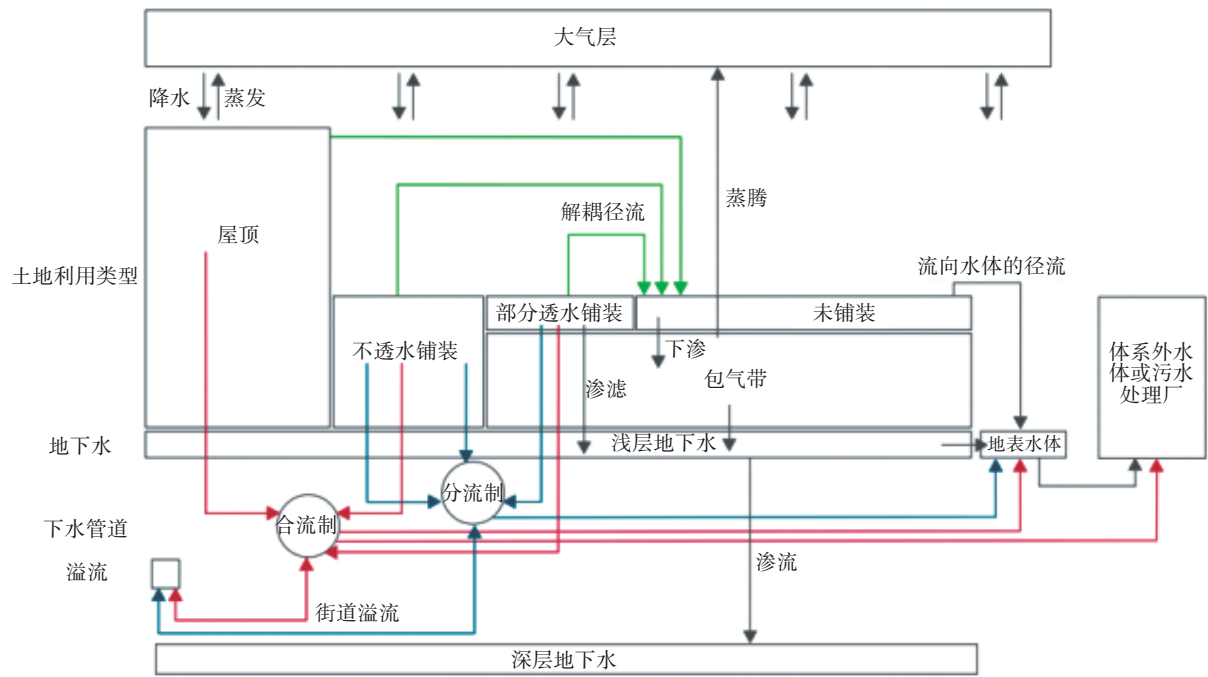


图 4 UWBM 模型机理概化示意

Fig.4 Schematic diagram of UWBM

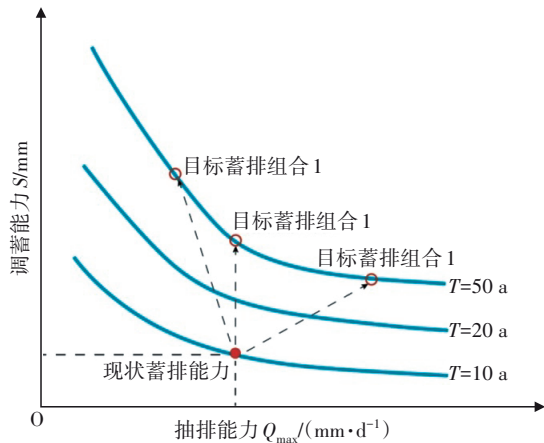


图 5 SDF 曲线

Fig.5 SDF curves

2 调蓄空间量化方法评估

综合分析上述三个国家的调蓄量计算方法并对比国内内涝防治和海绵城市相关标准导则,对各方法的原理和适用条件进行总结,结果见表 1。

从原理角度看,美国丹佛、新西兰奥克兰、荷兰代尔夫兰区域的计算方法均以开发前后径流(体积或峰值)差异来确定调蓄量需求,符合海绵城市

建设的要求;而荷兰的 UWBM-SDF 方法计算特定重现期下不发生内涝事件的调蓄量需求,更符合内涝防治技术规范的要求。

从计算方法上看,通过开发前后径流差异的计算原理适用于子流域的调蓄需求,其背后的逻辑为先将城市流域划分为多个子流域或开发区域,再计算各自调蓄量需求,该方法符合城市防涝建设项目的管控逻辑;而计算特定重现期下调蓄需求的方法,则可以先计算城市总体调蓄需求,再通过径流路径分析和子流域划分将总体目标分配到各个子流域,该方法符合城市防涝的规划逻辑。两种方法的思路见图 6。

从适用条件上看,UWBM-SDF 采用数十年的历史小时降雨数据进行连续模拟,更科学地考虑了城市或子区域应对连续降雨时的实际调蓄需求,避免了因设计降雨历时较短而导致的调蓄量估计值较低的弊端;另外,UWBM-SDF 对土地利用类型的分类比其他方法更为细致,对多种城市水文过程均有模拟,适合于从城市尺度到场地尺度的调蓄量化模拟。

表1 美国、新西兰、荷兰调蓄量计算原理和适用条件与我国相关标准导则内容的对比

Tab.1 Comparison of the essence and application conditions of storage calculation methods from U.S.A, New Zealand and the Netherlands with those in Chinese relevant standards and guidelines

项 目		原理	雨水输入	适用对象(流域特征/设施)	是否与源头控制措施调蓄量合并
美国	公式法	低强度降雨到引起百年一遇洪水的强降雨,使得径流水文过程线接近开发前的情景	无	单一设施,小于10英亩(1英亩≈4 046 m ² ,下同)	是
	UD-Detention 计算表法		无	单一设施,小于1平方英里(1平方英里≈259 hm ² ,下同)	
	水文径流过程线模型法(CUHP/SWMM)		100年一遇2 h降雨(面积小于15平方英里);或6 h降雨(面积不小于15平方英里)	多个调蓄设施串并联布置的情形,大于10英亩	
新西兰	软件模拟法	设计相关设施后,保证开发前后径流峰值流量与径流总量不变	2年、10年、100年一遇24 h的设计暴雨过程	流域径流概化为透水和不透水两个子流域的径流汇入一个节点	否
	图像法		2年、10年、100年一遇24 h的设计暴雨量	流域特征均一	
荷兰	水测评工具 ^[14]	假设径流最终汇入开放水体,通过计算超过目标控制水位的内涝事件重现期确定对应的调蓄量需求,并计算开发带来影响的调蓄补偿	10、50、100年一遇,2050年气候变化场景	开发建设项目	是
	UWBM-SDF ^[17]	假设径流最终汇入开放水体,通过计算超过目标控制水位的内涝事件重现期确定对应的蓄排平衡曲线	长历时小时降雨(如30年)	五个土地利用类型,对城市、城市子汇水分区、建设场地适用	
中国	《城镇内涝防治技术规范》(GB 51222—2017)	在城市规模对应的重现期下,保证居民住宅和工商业建筑物的底层不进水,以及道路中一条车道的积水深度不超过15 cm			
	①年径流总量控制率对应设计降雨容积法; ②水量平衡法	维持场地开发前后水文特征不变,包括径流总量、峰值流量、峰现时间等	日降雨量及月度降雨量	城市/子流域/设施	仅为源头设施

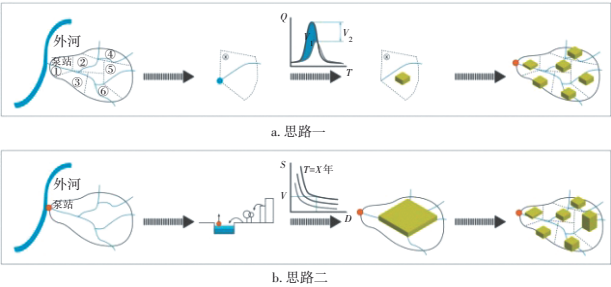


图6 两种城市调蓄空间量化方法思路

Fig.6 Thinking of two quantification methods of urban storage spaces

3 案例研究

3.1 南京秦淮区防涝调蓄总量估算

根据调蓄量化方法评估分析结果,荷兰的UWBM-SDF曲线方法适用于国内的防涝规划总体调蓄量估计。将该方法应用于南京市秦淮区防涝计算中,通过对49 km²的秦淮区降水、土壤、河道水系、泵站等特征的统计,使用UWBM进行10年水文过程动态模拟,得到秦淮区的0.2、1、2、5、10、20、50、100年的SDF曲线(见图7)^[3-4]。秦淮区现状抽

排能力约387 mm/d,在内涝防治规划中50年一遇的重现期要求下,可以得到86 mm的调蓄总量目标。从蓄排平衡曲线上看,与增大调蓄量相比,增大现状抽排量需要更大的调整,而且会给下游带来更严重的洪水风险,因此,秦淮区的防涝长期目标宜保持现状抽排量,调蓄总量增至86 mm。UWBM-SDF也可进一步对子分区进行调蓄量计算,进而进行设施布局^[3-4]。

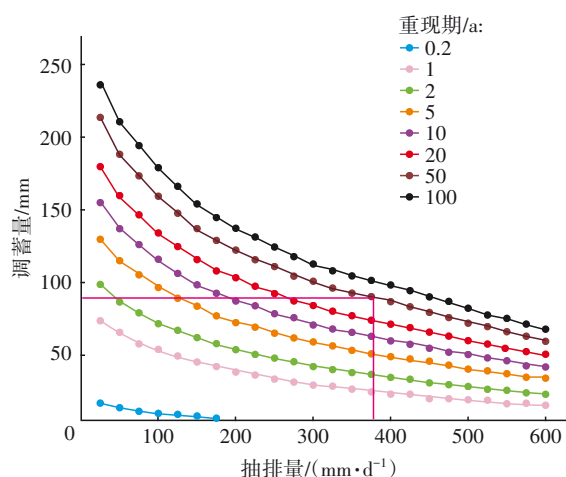


图7 南京市秦淮区SDF曲线与调蓄目标

Fig.7 SDF curves and storage objective of Qinhuai District, Nanjing City

3.2 湘潭市中医院气候适用性防涝调蓄量估算

UWBM-SDF方法也可以应用于开发项目中,并结合气候变化场景进行韧性规划,具体案例可参考湘潭市中医院概念设计(见图8)^[19]。

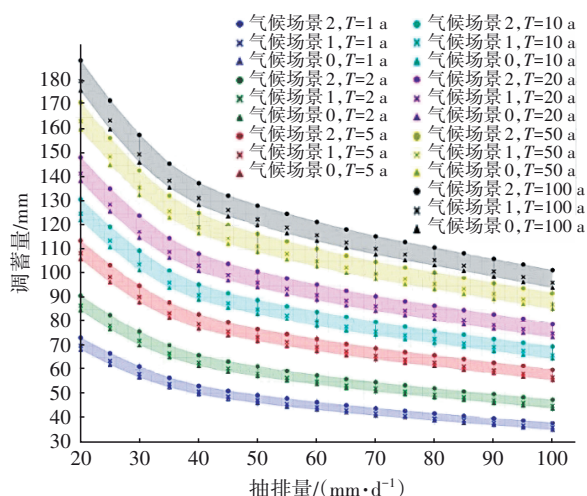


图8 湘潭市中医院地块气候变化场景下的SDF曲线

Fig.8 SDF curves of Xiangtan Chinese Medicine Hospital for climate change scenarios

该项目不仅计算了当前场景下的蓄排平衡曲线,还估算了两个未来气候变化引起的蓄排平衡曲线上移,进而考虑极端情况下的调蓄需求增量。《第三次气候变化国家评估报告》中预测湘潭市所在华中地区年降水量以每10年6.5~20.3 mm的速度增加,若取现状(气候场景0)年降水量为1500 mm,则到2050年降雨量增幅下限为1.2%(气候场景1)、上限为4%(气候场景2)。在模型中可调整历史小时降雨数据的增幅进而模拟2050年两个气候变化场景调蓄需求量的变化。模型计算结果显示,该场地因气候变化导致的调蓄需求量最大增幅在8%左右。

4 结论

总结美国、新西兰、荷兰的调蓄空间量化方法,发现计算原理可以分为两种:①通过保证开发前后水文过程尽可能不变来计算调蓄需求量;②通过保证特定重现期下不发生内涝事件来计算调蓄需求量。对应的规划思路也可以分为两种,一是从开发项目管控出发,将城市划分为不同子汇水区,通过每个汇水区的调蓄量需求计算来达到整体防涝效果;二是从整体规划出发,先计算城市或子区域整体防涝需要的调蓄总量,再结合汇水分区和径流路径进行调蓄量的分配与空间布局。

美国、新西兰和荷兰的调蓄空间量化方法均未有我国城镇内涝防治标准中关于积水深度的具体要求,但是荷兰UWBM-SDF方法符合我国内涝防治标准中保证特定重现期下不发生内涝事件的要求,可以估算城市防涝韧性建设的长期总体目标,更接近我国规划管控的逻辑,并具有指标分解进而对开发地块进行管控的潜力。

SDF曲线有助于决策者协调调蓄与排放的量化组合方式,对城市防涝具有重要的指导价值。UWBM-SDF方法在国内的适应性还需从地形地势、水系特点等角度开展研究,未来可以从调整径流排放边界条件、针对地形地势耦合不同子区域产汇流等方向进行不同类型城市的推广性研究。

参考文献:

- [1] 王伟武,汪琴,林晖,等. 中国城市内涝研究综述及展望[J]. 城市问题, 2015(10): 24-28.
WANG Weiwu, WANG Qin, LIN Hui, et al. Summarization and prospect for the studies on China's urban water logging [J]. Urban Problems, 2015(10):

- 24–28 (in Chinese).
- [2] VOSKAMP I M, VAN DE VEN F H. Planning support system for climate adaptation: composing effective sets of blue-green measures to reduce urban vulnerability to extreme weather events [J]. *Building and Environment*, 2015, 83: 159–167.
 - [3] CHEN S Y. *Sponge Design: A Study on Comprehensive Sponge City Design Approach* [D]. Delft: Delft University of Technology, 2020.
 - [4] CHEN S Y, VAN DE VEN F H, ZEVENBERGEN C, *et al.* Revisiting China's sponge city planning approach: lessons from a case study on Qinhuai District, Nanjing [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, 9: 1–17.
 - [5] SCHUCH G, SERRAO-NEUMANN S, MORGAN E, *et al.* Water in the city: green open spaces, land use planning and flood management—an Australian case study [J]. *Land Use Policy*, 2017, 63: 539–550.
 - [6] Urban Drainage and Flood Control District, Denver, Colorado. Urban storm drainage criteria manual: volume 2 structures, storage, and recreation [EB/OL]. [2022–04–02]. <https://mhfd.org/resources/criteria-manual-volume-2/>.
 - [7] LEWIS M, JAMES J, SHAVER E, *et al.* Water sensitive design for stormwater (GD 2015/004) [EB/OL]. [2022–04–02]. <http://content.aucklanddesignmanual.co.nz/project-type/infrastructure/technical-guidance/Documents/GD04 WSD Guide.pdf>.
 - [8] Ministry of Infrastructure and Environment Affairs, Ministry of Economic. National water plan (2016–2021) [EB/OL]. (2015–12–14) [2022–04–02]. <https://www.government.nl/documents/policy-notes/2015/12/14/national-water-plan-2016–2021>.
 - [9] Auckland Regional Council. Stormwater management devices: design guidelines manual [EB/OL]. [2022–04–02]. <http://www.aucklandcity.govt.nz/council/documents/technicalpublications/TP10Stormwater management devices design guideline manual 2003.pdf>.
 - [10] Auckland Council. Guidelines for stormwater runoff modelling in the Auckland Region [EB/OL]. [2022–04–02]. <https://knowledgeauckland.org.nz/media/1691/tp108-stormwater-runoff-modelling-auckland-1999.pdf>.
 - [11] RITZEMA H P, STUYT L C P M. Land drainage strategies to cope with climate change in the Netherlands [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 2015, 65(S1): 80–92.
 - [12] HOOIMEIJER F, VAN DER TOORN V W. *More Urban Water: Design and Management of Dutch Water Cities* [M]. London: CRC Press, 2014: 8–14.
 - [13] Hoogheemraadschap Van Delfland. Berekenen met de watersleutel [EB/OL]. [2022–04–02]. <https://www.hhdelfland.nl/regelen/watertoets-ruimtelijke-plannen/berekenen-watersleutel/>.
 - [14] Hoogheemraadschap Van Delfland. Veel gestelde vragen over de watersleutel [EB/OL]. [2022–04–02]. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiTs8KCo-32AhVzwQIHHagsBG0QFnoECAIQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.hhdelfland.nl%2Fpublish%2Fpages%2F1760%2Fveel_gestelde_vragen_over_de_watersleutel_1.pdf&usg=AOvVaw3JEEvZuikWsx-a6Kjd2vJ.
 - [15] Provincie Zuid-Holland. Zuid-Holland convenant klimaatadaptief bouwen bijlage A. 1 programma van Eisen, 17 [EB/OL]. [2022–04–02]. <https://www.zuidholland.nl/publish/pages/21795/convenantklimaatadaptiefbouwen.pdf>.
 - [16] VAN DE VEN F H M, SNEP R P H, KOOLE S, *et al.* Adaptation planning support toolbox: measurable performance information based tools for co-creation of resilient, ecosystem-based urban plans with urban designers, decision-makers and stakeholders [J]. *Environmental Science & Policy*, 2016, 66: 427–436.
 - [17] BROLSMA R, VERGROESEN T. Urban water balance model [EB/OL]. [2022–04–02]. <https://publicwiki.deltares.nl/display/AST/Urban+Water+balance+model>.
 - [18] VAN DE VEN F H M. CIE 5510 Water Management in Urban Areas [M]. Delft: TU Delft Microweb EDU, 2016: 174–180.
 - [19] VAN DE VEN F H M, BROLSMA R, HULSMAN H, *et al.* Climate risk and vulnerability assessment, and the Xiangtan climate resilient toolbox [EB/OL]. [2022–04–02]. <https://www.adb.org/sites/default/files/linked-documents/52230-001-sd-04.pdf>.

作者简介:陈诗扬(1996–),男,安徽铜陵人,硕士,助理工程师,主要研究方向为城市蓝绿空间规划设计、韧性城市与海绵城市规划等。

E-mail: shiyang.chen07@gmail.com

收稿日期: 2022–04–29

修回日期: 2022–05–05

(编辑: 丁彩娟)