

城市公园绿地海绵适宜性评价与优化策略研究 ——以济南市英雄山七里山片区为例

Sponge Suitability Evaluation and Optimization Strategy of Urban Park Green Space—Taking the Yingxiong Mountain—Qili Mountain Area of Jinan City as an Example

董 晶^{1,2} 杨庆贺³ 肖华斌^{1,4} 夏甜甜^{1*}
DONG Jing^{1,2} YANG Qinghe³ XIAO Huabin^{1,4} XIA Tiantian^{1*}

(1.山东建筑大学建筑城规学院, 山东济南 250101; 2.笛东规划设计(北京)股份有限公司, 北京 100029; 3.山东农业大学后勤管理处, 山东泰安 271018; 4.山东建筑大学生态规划与景观设计研究所, 山东济南 250101)

(1. School of Architecture and Urban Planning, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong, China, 250101; 2. DDON Planning & Design Inc., Beijing, China, 100029; 3. Logistics Management Office, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong, China, 271018; 4. Institute of Ecological Planning and Landscape Design, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong, China, 250101)

文章编号: 1000-0283(2022)01-0056-09
DOI: 10. 12193 / j. laing. 2022. 01. 0056. 008
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2021-06-28
修回日期: 2021-12-06

摘 要

城市绿地是海绵城市建设的主要载体之一,相较于城市绿地中的城市广场用地、城市附属绿地、城市防护绿地,城市公园绿地具有较高的雨洪管控潜力,但因现行的城市公园绿地海绵改造建设过程中缺少对选址和时序的考量,造成其雨洪管控能力未能有效发挥。为充分发挥城市公园绿地的雨洪管控能力,研究基于德尔菲法和层次分析法构建了城市公园绿地海绵适宜性评价体系,得出城市公园绿地海绵适宜性评价结果,提出区域层面城市公园绿地优化策略。通过SWMM(Storm Water Management Model)模型进行情境模拟,对比不同情境数据发现:相较于城市公园绿地现状系统模拟结果,适宜海绵建设区域优化后总径流量削减约5.12%,高峰径流量削减约19.605%;较适宜海绵建设区域优化后总径流量削减约19.02%,高峰径流量削减约23.645%。模拟数据表明区域层面的海绵优化策略可以有效提高城市公园绿地雨洪管控能力。基于区域层面的海绵优化策略,提出场地层面的城市公园绿地海绵优化引导建设策略。城市公园绿地海绵适宜性评价与优化流程有望指导未来不同类型城市绿地海绵的优化建设。

关键词

城市公园绿地; 海绵适宜性评价; 德尔菲法; 层次分析法; 雨水管理模型; 优化策略

Abstract

Urban green space is one of the main carriers of sponge city construction. Compared with urban square land, urban subsidiary green space, and urban protective green space in urban green space, urban park green space has a higher potential for storm and flood control. However, due to the current urban green space, the lack of consideration of site selection and time sequence construction for sponge construction during the transformation and construction of the sponges in parks and green spaces has resulted in the failure of effective use of the rain and flood management and control capabilities of urban parks and green spaces. In order to give full play to the rain and flood management and control capabilities of urban parks and green spaces, the study constructed an urban park green space sponge suitability evaluation system based on the Delphi method and analytic hierarchy process. The results of urban park green space sponge suitability evaluation results were proposed and the regional level urban park green space optimization was proposed strategy. The SWMM (storm water management model) model is used to conduct scenario simulation and compare different scenario data. It is found that compared with the current system simulation results of urban parks and green spaces, the total runoff volume after optimization of the suitable sponge construction area is reduced by about 5.12%, and the peak runoff volume

董 晶

1994年生/女/吉林德惠人/硕士/助理工程师/研究方向为地景规划与生态修复

杨庆贺

1977年生/男/山东济宁人/高级工程师/研究方向为风景园林工程与管理

肖华斌

1980年生/男/山东泰安人/教授、硕士生导师/研究方向为地景规划与生态修复

夏甜甜

1991年生/女/山东烟台人/讲师/研究方向为风景园林植物景观设计

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: xiatiantian19@sdjzu.edu.cn

基金项目:

山东省自然科学基金“基于多源数据融合的城市绿色基础设施空间响应机理及规划技术逻辑”(编号: ZR2019MEE048); 山东省高等学校青创科技支持计划“区域绿色基础设施协同调控与生态安全格局构建创新团队”(编号: 2020KJG004); 国家自然科学基金“生态正义对城市绿地布局的影响机制及发展预测研究——以日照市主城区为例”(编号: 51808320); 国家自然科学基金“城市水系廊道生态系统服务供需均衡评价研究”(编号: 51908332)

is reduced about 19.605%; After the optimization of the more suitable sponge construction area, the total runoff is reduced by about 19.02%, and the peak runoff is reduced by about 23.645%. The simulation data shows that the sponge optimization strategy at the regional level can effectively improve the rain and flood management and control capabilities of urban parks and green spaces. Based on the sponge optimization strategy at the regional level, this paper proposes a site-level urban park green space sponge optimization guide construction strategy. The suitability evaluation and optimization process of urban park green space sponges is expected to guide the optimization of different types of urban green space sponges in the future.

Keywords

urban park green space; sponge suitability evaluation; Delphi method; analytic hierarchy process; storm water management model; optimization strategy

城镇化是人口向城镇集中、推动城镇发展的过程。据统计,中国常住人口城镇化率由1978年的17.92%提升到2018年的59.58%,城市建设用地从2004年的28 308 km²增至2018年的55 155.5 km²^[2]。随着城市建设用地的不断扩张,城市不透水面积逐渐增加,削减了雨水的下渗量,阻断雨水自然循环过程,导致城市内涝风险提高。住房和城乡建设部于2010年对32个省的351个城市的内涝情况调研显示,自2008年,有213个城市发生过不同程度的积水内涝,占调查城市的62%。为有效缓解城市内涝、水质恶化等水环境和水生态问题,在《2012低碳城市与区域发展科技论坛》中“海绵城市”的概念被首次提出,指城市像海绵一样,在适应环境变化和应对自然灾害等方面具有良好的“弹性”,通过自然渗透、自然积存、自然净化,可降低雨水的产汇流,恢复城市原始的水文生态特征,使地表径流尽可能达到土地开发前的自然状态^[3-4]。

随着海绵城市理念的广泛应用,海绵城市已成为各领域的研究热点。现今海绵城市的相关研究不仅限于不同水文模型模拟验证海绵设施的雨水调节能效方面,更加关注海绵城市在规划和建设实践层面的作用^[5-6]。其中,国外学者更多关注于海绵城市建设的流程,例如C J Martin^[7]等学者在研究中发现,

影响低影响开发效果的因素包括选址、设施选择、设计、建造、后期维护等,并进一步证明了低影响开发的选址是决定其建设效果的最重要因素。而国内学者的研究主要关注于海绵城市建设适宜性与其在城市绿地研究方面,例如宋晨怡等^[8]在相关研究中构建了海绵城市建设评价指标体系,基于ArcGIS得出用地的建设适宜性格局,从而提出基于海绵城市建设格局的城市建设发展规划;考虑到海绵适宜性在不同城市功能区中的差异,许青等^[9]认为海绵城市建设中还应充分考虑城市功能区的差异,不同功能区的海绵设施建设效果、难易程度以及后期维护要求的差异显著,因此应根据不同功能区海绵城市推进过程、建设难易顺序等安排建设时序;而在城市功能区中,城市绿地空间可有效利用雨洪资源,同时具有较高的雨洪管控潜力,张云路等^[10]通过研究提出城市绿地雨洪管控规划方法,最终划定城市海绵绿地空间布局。

国内外学者的探索足以说明在海绵城市建设过程中,其适宜性布局起到决定性作用,科学选址可以更有效地发挥海绵的雨洪管控效果。此外,结合不同功能海绵设施建设的效果与难易程度,筛选适合不同功能区的海绵设施,时序性引导建设海绵设施,可以达到加

强海绵城市建设效果。

城市绿地作为海绵城市建设中的重要载体,目前的研究多从微观层面进行场地的海绵绿地建设,缺少对区域整体绿地的海绵建设适宜性选址与建设时序研究。因此,文章选取城市公园绿地进行研究,基于德尔菲法和层次分析法构建城市公园绿地海绵适宜性评价体系,得出城市公园绿地的海绵适宜性布局,提出区域层面上城市公园绿地海绵优化策略,并模拟验证优化策略的雨洪管控效果,从而提出场地层面的城市公园绿地海绵优化引导策略。

1 公园绿地海绵适宜性评价体系构建

1.1 指标筛选与优化

城市公园绿地具有较强的雨洪管控潜力,其中雨水下渗与存蓄潜力较高。根据《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》(简称技术指南)和《济南市海绵城市绿地设计导则》(简称设计导则)中对于公园绿地海绵建设要求,选取公园绿地对雨水的下渗、存蓄和利用三个方面的指标进行适宜性评价^[11-12]。基于德尔菲法和层次分析法将初步筛选的公园绿地海绵适宜性评价指标设计成公园绿地海绵适宜性评价指标重要性调查问卷,问卷采用Likert

五级量表评分法进行评价,即用1~5分代表指标的重要程度。向高校教师、规划设计单位工程师、科研院所研究人员等不同领域专家发放了50份调查问卷^①,整理与统计有效问卷45份,计算出各指标得分的均值、标准差和变异系数(变异系数为标准差与均值的比值)。从指标重要性的角度,一般认为均值大于3的指标才能保留;从认知差异的角度,用德尔菲法中的变异系数来衡量专家对指标评价的一致性,一般认为当变异系数大于0.25时,表示专家对指标的评价结果具有明显差异,指标因子的选取有待商榷。对公园绿地空间海绵适宜性评价指标进行再次筛选、剔除、调整、优化补充等工作,最终确定绿化面积、坡度、植物生长状况、公园水系等11项评价指标,得出城市公园绿地海绵适宜性评价指标体系。

1.2 确定指标权重

对调查问卷中专家打分的结果进行AHP层次分析和主成分分析确定评价指标的权重^[13-14],最终得出11个指标因子相对客观的权重值(表1)。

1.3 建立评价模型

基于加权求和法构建公园绿地海绵适宜性评价综合模型见公式(1):

$$E_i = \sum_{k=1}^n w_k \times y_k \quad (1)$$

研究区域的公园绿地海绵适宜性评价模型见公式(2)-(5)。

式中,为第i个评价单元的城市绿地空间

$$E_{\text{雨水下渗潜力}} = w_{\text{绿化面积}} \times y_{\text{绿化面积}} + w_{\text{坡度}} \times y_{\text{坡度}} + w_{\text{植物种植结构}} \times y_{\text{植物种植结构}} + w_{\text{土壤类型}} \times y_{\text{土壤类型}} \quad (2)$$

$$E_{\text{雨水存蓄潜力}} = w_{\text{下沉绿地}} \times y_{\text{下沉绿地}} + w_{\text{耐涝性、耐污性植物}} \times y_{\text{耐涝性、耐污性植物}} + w_{\text{绿化面积}} \times y_{\text{绿化面积}} + w_{\text{公园水系}} \times y_{\text{公园水系}} + w_{\text{与城市水系位置关系}} \times y_{\text{与城市水系位置关系}} \quad (3)$$

$$E_{\text{雨水利用潜力}} = w_{\text{雨水利用率}} \times y_{\text{雨水利用率}} + w_{\text{公园绿化面积所占比例}} \times y_{\text{公园绿化面积所占比例}} \quad (4)$$

$$E_{\text{城市公园绿地海绵适宜性评价结果}} = w_{\text{雨水下渗潜力}} \times y_{\text{雨水下渗潜力}} + w_{\text{雨水存蓄潜力}} \times y_{\text{雨水存蓄潜力}} + w_{\text{雨水利用潜力}} \times y_{\text{雨水利用潜力}} \quad (5)$$

海绵适宜性综合指数值,是该指标标准化处理的值,为该评价单元第k个指标的权重。

2 济南市英雄山—七里山片区公园绿地海绵适宜性评价

2.1 研究区域基本概况

根据济南市海绵城市建设的实践以及相应编制的《济南市海绵城市试点区域控制性详细规划》,选取海绵城市建设项目较为集中,但城市内涝问题较为严重的英雄山片

区和七里山片区作为研究区域。济南市英雄山—七里山片区位于济南市中南部,是济南政治、经济、文化中心地带,研究区域北至经十路,南至二环南路,东至舜耕路,西至阳光新路郎茂山路,总面积约1 625.09 hm²。英雄山—七里山片区春季少雨,夏季多雨,年平均降雨量592.5 mm,南部多为低山丘陵,包括马鞍山、英雄山、七里山、郎茂山等,西部、北部地势平坦,区域整体呈南高北低趋势(图1)。除郎茂山大部分、英雄山局部、七里山小部分

表1 城市公园绿地海绵适宜性评价指标权重值
Tab. 1 Urban park green space sponge suitability evaluation index weight value

目标层 Target layer	标准层 Standard layer	标准层权重 Standard layer weight	指标层 Index layer	指标层权重 Index layer weight
公园绿地雨水下渗、存蓄与利用潜力	雨水下渗潜力	0.1741	绿化面积	0.5525
			坡度	0.1173
			植物种植结构	0.0506
			土壤类型	0.2796
	雨水存蓄潜力	0.4768	下沉绿地	0.0800
			耐涝性、耐污性植物	0.0321
			绿化面积	0.3206
			公园水系	0.1259
			与城市水系位置关系	0.4414
			雨水利用率	0.7500
			公园绿化面积所占比例	0.2500
雨水利用潜力	0.3491			

①专家涵盖风景园林、园林、环境工程以及给排水专业,其中高校教师20人,主要来自重庆大学、哈尔滨工业大学、西安建筑科技大学、山东建筑大学等,其中具有博士学位或副教授及以上职称15人;科研院所和规划设计单位30人,主要来自山东省城乡规划设计研究院、济南市市政工程设计研究院(集团)有限公司、济南市园林规划设计研究院等,其中具有副高级职称及以上20人。

山体坡度在13°以上外, 区域整体坡度较为平缓, 坡度多低于8° (图2)。

2.2 雨水下渗潜力评价

雨水下渗潜力各评价指标是在具体分析实际调研数据, 总结前人经验, 咨询专家, 调研访谈等相结合的基础上, 进行评价指标等级划分, 具体划分如表2。

(1) 坡度。坡度直接影响雨水的自然渗透过程, 坡度越小雨水的下渗潜力越大, 越适宜海绵建设。基于ArcGIS对研究区域DEM数据进行坡度分析, 得到最大坡度为29.7°。对坡度进行分级, 得出坡度指标海绵适宜性评价空间分布结果。

(2) 绿化面积。基于Landsat遥感影像解译结合实地调研, 确定城市公园绿地范围及公园绿化面积, 绿化面积所占比例较大的城市公园绿地, 其雨水下渗潜力也相对较高。对绿化面积比例进行分级, 得出绿化面积指标海绵适宜性评价空间分布结果。

(3) 植物种植结构。通过实地调研, 发现研究区域内城市公园绿地植物种植结构分为两种: 双层植物种植结构和三层植物种植结构, 其中乔木层以松树 (*Pinus*)、侧柏 (*Platyclusus orientalis*)、国槐 (*Styphnolobium japonicum*)、五角枫 (*Acer mono*) 等为主, 植物生长状况良好, 枝叶繁茂; 灌木层以冬青 (*Ilex chinensis*)、大叶黄杨 (*Buxus megistophylla*)、小叶女贞 (*Ligustrum quihoui*) 等为主, 灌木存活率较高; 地被与草坪层以萌生力较强的紫花地丁 (*Viola philippina*)、铺地柏 (*Sabina procumbens*) 和麦冬 (*Ophiopogon japonicus*) 为主, 但草坪层生长情况较差, 土壤裸露。雨水下渗潜力大小排序为: 三层植物种植结构>双层植物种植结构>单层植物种植结构。对植物种植结构指标进行分级, 得出植物种植结构指标海绵适宜性

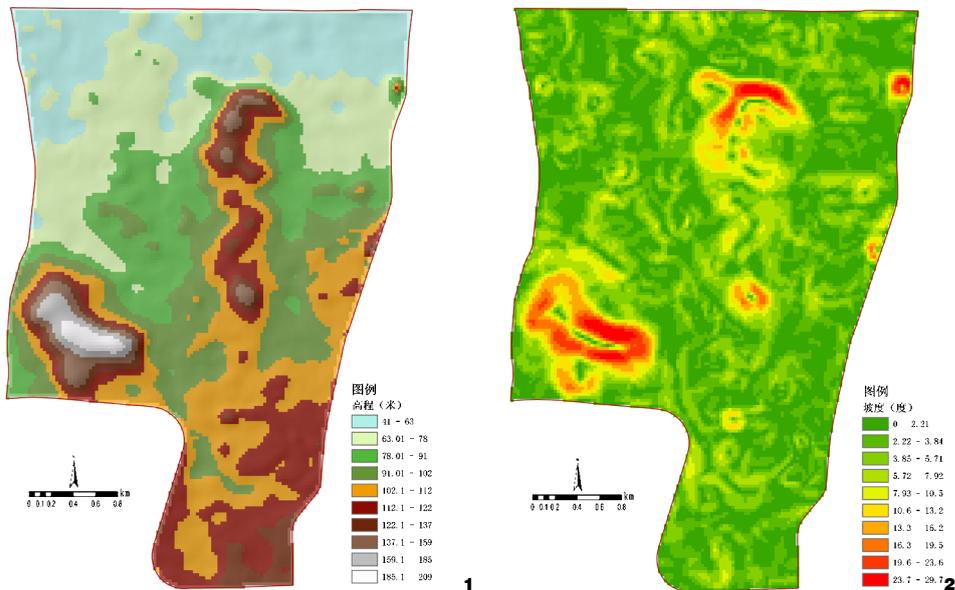


图1 济南市英雄山—七里山片区高程分析
Fig. 1 Elevation analysis of Yingxiong-Qili Mountain Area of Jinan City

图2 济南市英雄山—七里山片区坡度分析
Fig. 2 Slope analysis of Yingxiong-Qili Mountain Area of Jinan City

评价空间分布结果。

(4) 土壤类型。依据济南市土壤类型分布概况, 获取研究区域土壤类型主要包括褐

土类、淋溶褐土、褐土性土, 其中褐土类雨水渗透性最佳, 其次是淋溶褐土, 最后是褐土性土。对土壤类型指标进行分级, 得出土壤类型

表2 城市公园绿地雨水下渗潜力评价指标等级划分
Tab. 2 Classification of evaluation indexes of rainwater infiltration potential of urban parks and green areas

指标因子 Index factor	分级 Grading	赋值/分 Assignment
坡度/°	<8	10
	8~15	6
	16~25	4
	>25	0
绿化面积/hm ²	<10	2
	10~30	4
	31~50	6
植物种植结构	>50	10
	三层植物种植结构	10
	双层植物种植结构	6
土壤类型	单层植物种植结构	2
	褐土类	10
	淋溶褐土	4
	褐土性土	2

指标海绵适宜性评价空间分布结果^[15-16]。

基于上述4项单因子海绵适宜性评价结果，经加权叠加得出城市公园绿地雨水下渗潜力评价结果（图3）。城市公园绿地雨水下渗高潜力区域集中在英雄山公园，而雨水下渗低潜力区域集中在七里山公园和舜玉公园，此外，泉城公园和郎茂山公园的绝大部分区域属于雨水下渗较高潜力区域。

2.3 雨水存蓄潜力评价

雨水存蓄潜力各评价指标是在具体分析实际调研数据，总结前人经验，咨询专家，调研访谈等相结合的基础上，进行评价指标等

级划分，具体划分如表3。

(1) 下沉绿地。下沉绿地具有一定的雨水存蓄能力，本研究认为具有下沉绿地的城市公园绿地的雨水存蓄潜力大于不具有下沉绿地的城市公园绿地。对下沉绿地面积所占比例进行分级，得出下沉绿地指标海绵适宜性评价空间分布结果。

(2) 公园水系。公园水系是雨水的主要存蓄载体，可存蓄大量雨水，故具有水系的公园绿地雨水存蓄潜力大于不具有水系的公园绿地。通过对公园水系面积指标进行分级，得出公园水系指标海绵适宜性评价空间分布结果。

(3) 耐涝性、耐污性植物。植物耐涝性、耐污性是城市公园绿地雨水存蓄的前提条件。实地调研城市公园绿地植物的主要种类^[17]并重分类，将植物耐涝性、耐污性进行分级，得出耐涝性、耐污性植物指标海绵适宜性评价空间分布结果。

(4) 与城市水系位置关系。城市公园绿地与城市水系位置直接影响雨水存蓄潜力，通过调研发现雨水可就近排入城市水系的公园绿地，其雨水存蓄潜力高^[18]。对城市公园绿地与城市水系位置关系进行分级，得出与城市水系位置关系指标海绵适宜性评价空间分布结果。

基于上述4项单因子海绵适宜性评价结果，经加权叠加得出城市公园绿地雨水存蓄潜力评价结果（图4）。城市公园绿地雨水存蓄高潜力区域集中在英雄山公园、郎茂山公园和泉城公园少部分区域；而雨水存蓄较低潜力区域集中在泉城公园部分区域，此外，舜玉公园和七里山公园的大部分区域则属于雨水存蓄低潜力区域。

2.4 雨水利用潜力评价

雨水利用潜力各评价指标是在具体分析实际调研数据，总结前人经验，咨询专家，调研访谈等相结合的基础上，进行评价指标等级划分，具体划分如表4。

(1) 雨水利用率。城市公园绿地雨水利用率越高，其雨水利用潜力也越高，通过调研公园绿地的实际雨水利用率，将其分级，得出雨水利用率指标海绵适宜性评价空间分布结果。

(2) 公园绿化面积所占比例。城市公园绿化面积所占比例越高，植物灌溉用水越多，雨水利用潜力越大，也就越适宜海绵化提升建设^[19]。对公园绿化面积所占比例进行分级，得出公园绿化面积所占比例指标海绵适宜性

表3 城市公园绿地雨水存蓄潜力评价指标等级划分

Tab. 3 Classification of evaluation indexes for rainwater storage potential of urban parks

指标因子 Index factor	分级 Grading	赋值/分 Assignment
下沉绿地	下沉绿地	10
	非下沉绿地	2
公园水系	具有公园水系	10
	不具有公园水系	2
耐涝性、耐污性植物	既具有耐涝性又具有耐污性植物	10
	具有耐涝性，但不具有耐污性植物	6
	不具有耐涝性，但具有耐污性植物	4
	既不具有耐涝性也不具有耐污性植物	0
与城市水系位置关系	雨水可直接排入城市水系	10
	雨水不能直接排入城市水系	4

表4 城市公园绿地雨水利用潜力评价指标等级划分

Tab. 4 Classification of evaluation indexes of rainwater utilization potential in urban parks

指标因子 Index factor	分级 Grading	赋值/分 Assignment
雨水利用率	< 30%	2
	30%~40%	6
	41%~50%	8
	> 50%	10
公园绿化面积所占比例	< 65%	2
	65%~75%	6
	76%~85%	8
	> 85%	10

评价空间分布结果。

基于上述两项单因子海绵适宜性评价结果,经加权叠加得出城市公园绿地雨水利用潜力评价结果(图5)。城市公园绿地雨水利用高潜力区域集中在英雄上公园、泉城公园和郎茂山公园,而雨水利用低潜力区域集中在舜玉公园,此外,七里山公园则属于雨水利用较低潜力区域。

2.5 海绵适宜性评价结果

在对雨水下渗潜力、雨水积蓄潜力、雨水利用潜力评价的基础上,进行加权叠加,得出城市公园绿地海绵适宜性评价结果(图6)。其中城市公园绿地适宜海绵建设区域主要分布于英雄上公园和泉城公园的部分区域;郎茂山公园部分区域,以及英雄山公园和泉城公园的大部分区域属于较适宜海绵建设区域;而较不适宜海绵建设、不适宜海绵建设区域主要位于七里山公园和舜玉公园,以及泉城公园的少部分区域。

3 济南市英雄山—七里山片区公园绿地海绵提升情景模拟

3.1 研究区域模型概化

根据研究区域的地形、坡度及流域划分等,确定模型中各子汇水区的边界,并作出如下假设:(1)假设研究区域的每个子汇水区内任意点的降雨强度和降雨量均相同;(2)模型的构建仅考虑研究区域内的雨水,不考虑研究区域外雨水流入的径流量^[20]。在以上两个假设的前提下,依据济南市英雄山片区、七里山片区的平面图、实际坡向、排水方向,将研究区域概化为10个子汇水区、1个雨量计、1个节点、1个管渠和1个出水口,参考SWMM模型手册和相关文献设定研究区域其他地面特征参数^[21](表5)。

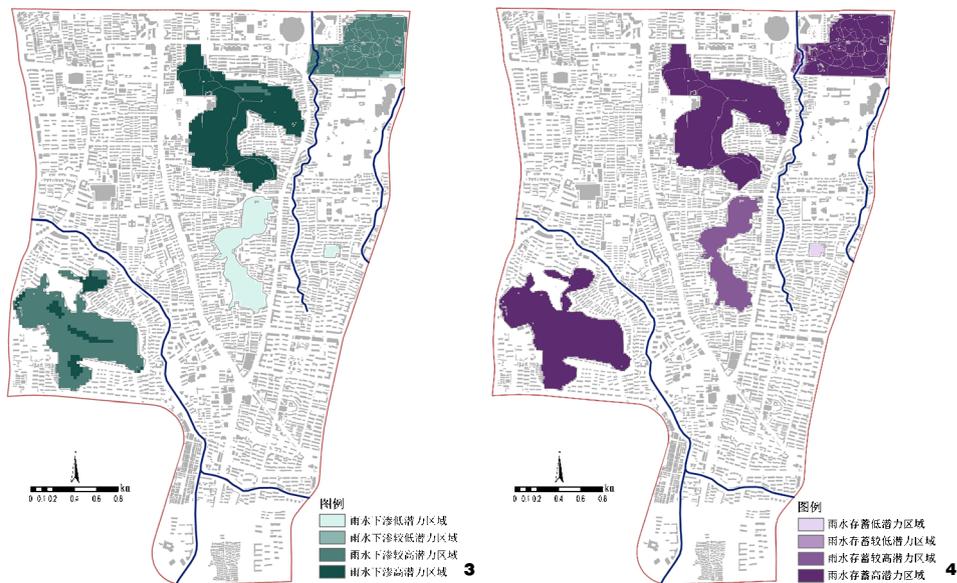


图3 城市公园绿地雨水下渗潜力评价结果
Fig. 3 Evaluation results of underwater infiltration potential of urban park green space

图4 城市公园绿地雨水积蓄潜力评价结果
Fig. 4 Urban park green space rainwater storage potential evaluation results

根据研究区域夏季暴雨期间雨量较大、降雨时间长特点,雨强度设定为一年一遇,降雨历时设定为2 h,采用芝加哥雨型,雨峰系数取 $r=0.4$,时间间隔为1 min,降雨量的计算基于济南市短历时暴雨强度公式,见式(6)^[22]。

$$i = \frac{35.0185 \times (1 + 1.6868 \times \lg T)}{(t + 27.7543) \times 0.9973} \quad (6)$$

式中, T 为设计重现期(a); t 为降雨历时(min); i 为暴雨强度(mm/min)。

3.2 海绵优化情景对比

结合济南市英雄山—七里山片区城市公园绿地的实地调研情况,以及考虑到SWMM模型中海绵设施模块的类型限制因素,最终确定该片区城市公园绿地优化选用海绵设施有

表5 SWMM模型相关参数表
Tab.5 SWMM model related parameter list

相关参数 Related parameters	参数取值/计算方法 Parameter value /Calculation method
土壤入渗	Horton模式
流量计算	动力波
时间步长	1 min
径流系数	0.69
透水区填注量	5.08 mm
不透水区填注量	1.524 mm
不透水区曼宁系数	0.013
透水区曼宁系数	0.15

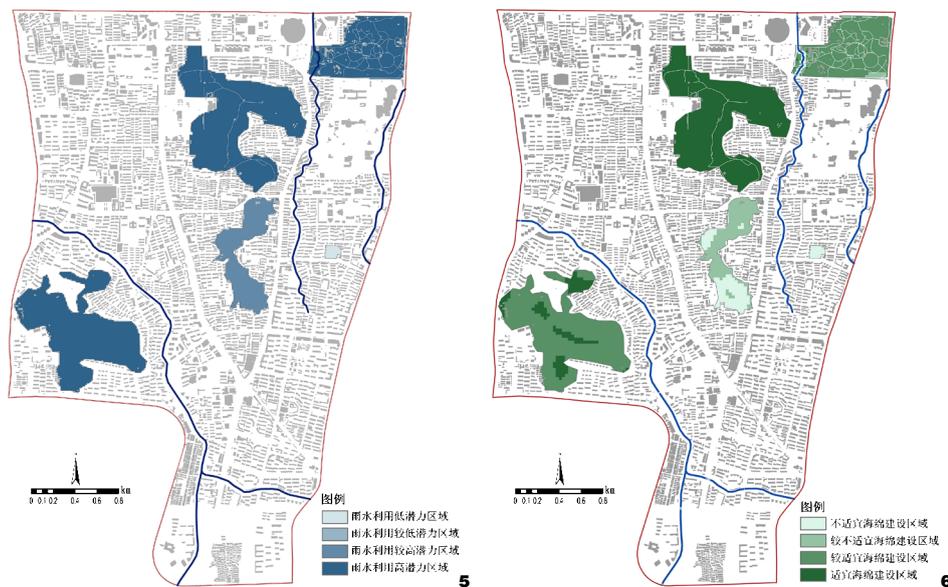


图5 城市公园绿地雨水利用潜力评价结果
Fig. 5 Urban park green space rainwater utilization potential evaluation results

图6 城市公园绿地海绵适宜性评价结果
Fig. 6 Evaluation results of sponge suitability in urban park green space

生物滞留设施、雨水花园和下沉式绿地。

区域内英雄山公园和七里山公园已完成部分山体的生态修复, 但为有效提升区域内城市公园的雨洪调节能力, 未来还需针对适宜海绵建设的英雄山公园内的绿地进行海绵优化, 增加海绵设施建设从而改善(提升)绿地的雨水下渗、存蓄与利用潜力; 而七里山公园不适宜海绵建设, 应在保护现状的基础上减少人为干扰, 从而保障七里山公园在区域尺度上的雨洪调节作用。此外, 区域内未进行生态建设或海绵建设的公园绿地有泉城公园、郎茂山公园和舜玉公园, 其中泉城公园属

于适宜海绵建设区域, 郎茂山公园和舜玉公园属于不适宜海绵建设区域。因此泉城公园还需增加海绵绿地, 从而提高雨水存蓄量与利用率, 而郎茂山公园和舜玉公园不能进行海绵建设。此外, 考虑到海绵优化建设的时序性, 将适宜海绵建设区域规划为近期建设区域, 较适宜海绵建设区域规划为远期建设区域。

结合海绵建设适宜性评价结果与区域内城市公园绿地现状分析进行分期海绵优化情景设计。情境一为城市公园绿地现状; 情境二为近期优化适宜海绵建设区域, 主要位于英

雄山公园东侧和泉城公园南侧部分区域; 情景三是在情景二的基础上, 远期优化较适宜海绵建设区域, 范围为英雄山公园和泉城公园50%以上的区域面积。

(1) 城市公园绿地现状。运用SWMM模型模拟得出城市公园绿地现状的雨水总径流量712.83 m³/s, 高峰径流量为298.651 m³/s。

(2) 近期优化适宜海绵建设区域。将生物滞留设施、雨水花园和下沉式绿地三种海绵设施, 均匀分布于城市公园绿地适宜海绵建设区域, 对城市公园绿地适宜海绵建设区域进行优化提升, 优化总面积约为11.78 hm²。运用SWMM模型模拟对比现状与优化适宜海绵建设区域后的城市公园绿地雨水径流和峰值流量情况。对比发现相较于城市公园绿地现状模拟结果, 情景二优化后的总径流量削减约5.12%, 且高峰径流量削减约19.605% (表6)。

(3) 远期优化较适宜海绵建设区域。经模拟验证海绵优化情景二具有明显的雨水径流和峰值流量削减效果, 因此在海绵优化情景二的基础上, 进行海绵优化情景三的模拟。再次将生物滞留设施、雨水花园和下沉式绿地三种海绵设施均匀分布于城市公园绿地较适宜海绵建设区域, 优化总面积约为110.59 hm²。运用SWMM模型模拟现状与优化较适宜海绵建设区域后的城市公园绿地雨水径流和峰值流量情况, 对比发现相较于城市公园绿地现状模拟结果, 情景三优化后的总径流量削减约

表6 情景模拟数据与现状模拟数据对比表格
Tab. 6 Comparison table of scenario simulation data and current simulation data

情境 Situation	总径流量 Total runoff yield / (m ³ /s)	总径流量削减率 Total runoff reduction / %	高峰径流量 Peak runoff outflow / (m ³ /s)	高峰径流量削减率 Peak runoff reduction / %
情境一	712.83	—	298.651	—
情境二	676.32	5.12	240.1	19.605
情境三	577.24	19.02	228.034	23.645

19.02%，且高峰径流量削减约23.645% (表6)。

经模拟数据对比发现城市公园绿地的海绵优化情境具有明显的雨洪管控效果，且海绵优化的时序性规划建设具有更显著的雨洪管控效果。进而验证城市公园绿地海绵优化在科学选址的基础上，合理进行时序性海绵优化建设，可以最大化地发挥雨洪管控效果。因此，区域尺度上城市公园绿地海绵优化建设可参照上述时序性海绵优化步骤进行。

4 济南市英雄山—七里山片区典型公园绿地海绵提升优化策略

泉城公园位于片区适宜海绵建设区域，因此选取泉城公园作为城市公园绿地海绵改造研究案例。泉城公园绿地面积较大，但不能有效滞留、汇集雨水径流，导致雨水下渗量低、利用率低等问题，在雨洪调节中并没有起到积极作用。基于泉城公园内部雨水径流角度，提出公园的海绵改造策略。

源头集水区需提升绿地的雨水滞留和存蓄能力。将源头集水区内的绿地改造为下沉式以提高泉城公园的下渗量、雨水存蓄量以及雨水利用率。中段转输区需增强绿地雨水的传输作用。在园路两侧、草坪边缘等区域增设植草沟、渗渠等具有雨水传输功能的海绵设施，将雨水传输至下沉式绿地或公园水体中，从而实现旱季雨水的收集、净化与回用。末端集水区需提高公园水体、大面积绿地的雨水收集能力。将绿地改为下沉式绿地，在绿地内增设雨水花园、蓄水池等海绵设施 (图7-9)。此外，在夏季暴雨时，海绵设施因汇集大量的雨水径流超出水量标准时，通过溢流管将多余的雨水排放至市政管网。

5 结论与讨论

经情境模拟对比验证，城市公园绿地海



图7 泉城公园下沉式绿地海绵优化示意
Fig. 7 Sinking green space sponge optimization of Quancheng Park

图8 泉城公园生物滞留设施海绵优化示意
Fig. 8 Bioretention facility sponge optimization of Quancheng Park

图9 泉城公园绿地现状 (左) 与海绵优化 (右)
Fig. 9 Quancheng Park Status (left) and sponge optimization (right)

绵优化策略可有效提高公园绿地的雨洪管控能力。相较于现状系统的雨水径流和峰值流量，不论是优化适宜海绵建设区域，还是优化较适宜海绵建设区域，优化后的雨水径流和峰值流量均有明显削减；且在适宜海绵建设区域优化的基础上，完成较适宜海绵建设区域优化后的雨水径流和峰值流量削减幅度显著提高。这证明了本研究提出的城市公园绿地海绵优化策略的有效性，同时也验证了基

于城市公园绿地海绵适宜性评价结果实施海绵优化的科学性，以及海绵优化时序建设的合理性。本研究将城市公园绿地与海绵城市体系结合，构建了公园绿地海绵适宜性评价体系，虽然在指标选取、权重设定等方面具有一定的主观性，但对海绵城市规划与建设具有明确的指导意义，对未来济南市其他区域的城市公园绿地海绵优化及其他类型绿地优化均具有借鉴意义，并有望指导未来各大城市的

绿地海绵优化建设工作。此外,在未来大数据环境支持下,将环境行为数据、开放互联网数据和实际监测数据相融合,有助于建立高精度空间资料数据库,构建更加科学的评价体系,从而可以更加准确地评价城市公园绿地的海绵适宜性,有助于促进海绵城市规划设计与建设管理工作。 

参考文献

- [1] 李浩. 城镇化率首次超过50%的国际现象观察——兼论中国城镇化发展现状及思考[J]. 城市规划学刊, 2013(1): 43-50.
- [2] 仇保兴. 海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J]. 建设科技, 2015(1): 11-18.
- [3] 董晶. 城市绿地海绵适宜性评价体系构建与优化策略研究——以济南市英雄山—七里山片区为例[D]. 济南: 山东建筑大学, 2019.
- [4] 李兰, 李锋. “海绵城市”建设的关键科学问题与思考[J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2599-2606.
- [5] WYNN T M, DEBUSK K M. Storm-Water Bioretention for Runoff Quality and Quantity Mitigation[J]. Journal of Environmental Engineering, 2011, 137(9): 800-808.
- [6] 赵冬泉, 邢薇, 佟庆远, 等. 基于数字排水技术的城市雨洪控制方案设计与评估[J]. 中国给水排水, 2010, 26(16): 74-77.
- [7] MARTIN-MIKLE C J, de BEURS K M, JULIAN J P, et al. Identifying Priority Sites for Low Impact Development (LID) in a Mixed-use Watershed[J]. Landscape and Urban Planning, 2015, 140: 29-41.
- [8] 宋晨怡, 杨天翔. 基于GIS的三峡库区海绵城市建设适宜性评价与分区划定研究[J]. 给水排水, 2018, 54(12): 108-113.
- [9] 许青, 贾忠华, 罗毓, 等. 基于功能区差异的海绵城市适宜性研究——以扬州市为例[J]. 中国农村水利水电, 2018(05): 53-57.
- [10] 张云路, 李雄, 邵明, 等. 基于城市绿地系统优化的绿地雨洪管理规划研究——以通辽市为例[J]. 城市发展研究, 2018(01): 97-102.
- [11] 住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)[R]. 北京: 住房和城乡建设部, 2014.
- [12] 济南市城市园林绿化局, 济南市园林规划设计研究院. 济南市海绵城市绿地设计导则: 山地与平原复合型城市绿地低影响开发雨水系统构建[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2016.
- [14] 刘瑞雪, 彭媛媛. 基于层次分析法的城市滨海绿地植物景观评价[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(4): 288-293.
- [15] 李方正, 胡楠, 李雄, 等. 海绵城市建设背景下的城市绿地系统规划响应研究[J]. 城市发展研究, 2016(07): 39-45.
- [16] 龚子同. 中国土壤系统分类: 理论·方法·实践[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [17] 申世广, 范晨璟, 王浩, 等. 基于土地适宜性评价的黑虎山风景区保护与利用[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(2): 202-206.
- [18] 肖华斌, 盛硕, 刘嘉. 基于景观生态安全格局评价的佛山市生态基础设施构建研究[J]. 中国园林, 2017, 33(11): 118-122.
- [19] 李海霞. “海绵城市”理念下的城市园林绿地建设策略探析[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2017, 33(12): 23-24.
- [20] 王雯雯. 基于SWMM的低冲击开发模式水文效应模拟评估[D]. 北京: 北京大学, 2011.
- [21] 刘颂, 毛家怡, 沈洁. 基于SWMM的场地绿色雨水基础设施水文效应评估——以同济大学校园为例[J]. 风景园林, 2017(1): 60-65.
- [22] 孔祥瑞, 陈淑芬, 李梅, 等. 济南短历时暴雨强度公式研究[J]. 山东建筑大学学报, 2013, 28(5): 445-448.