

基于全生命周期的海绵设施雨洪管理 成本与效益模拟研究

徐海顺, 高景

(南京林业大学 风景园林学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 针对当前海绵城市建设的成本与效益问题,以江苏省某市的新建医疗中心二期工程为例展开研究。基于场地现状确定不同类型的海绵设施组合,使用SWMM对场地在不同降雨条件与不同海绵设施组合下的雨洪管理效果进行模拟,最后基于全生命周期进行成本与效益评价。结果表明:海绵设施可有效加强城市雨洪管理,可使峰值径流量减小53.32%~70.14%,使出水口流量减小6.67%~53.33%;不同海绵设施的雨洪控制能力和成本效益值与暴雨强度呈反比,其中基于透水下垫面的海绵设施的单位面积径流控制量与成本效益值均高于基于不透水下垫面的海绵设施。研究成果对于场地尺度下的海绵城市规划设计具有参考价值。

关键词: 海绵城市; 全生命周期成本; 成本效益评估; 雨洪管理模型(SWMM)

中图分类号: TU992; TV213.9 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2022)03-0012-08

Simulation of stormwater management cost-benefit of sponge city construction based on life cycle cost

XU Haishun, GAO Jing

(College of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: In view of the cost-benefit evaluation of the current sponge city construction, the second construction phase of a new hospital in a city in Jiangsu Province is taken as an example to carry out the research. Different sponge city facility combinations are chosen in accordance with the various situations of the construction site. Storm water management model (SWMM) is adopted to conduct simulations of the stormwater management effects of different sponge city facility combinations under various rainfall conditions at the site, and then the cost-benefit evaluation is conducted based on life cycle cost. The results show that sponge facilities can effectively strengthen urban stormwater management, reduce peak runoff by 53.32% - 70.14% and outlet flow by 6.67% - 53.33%. The stormwater management capacity and cost-benefit value of different sponge city facilities are negatively correlated with the intensity of the rain-storm. Among them, the runoff control amount and cost-effectiveness per unit area of the sponge facilities with permeable subsurface are higher than those with impermeable subsurface. The research results are of referential value for the design of sponge cities on the site scale.

Key words: sponge city; life cycle cost; cost-benefit evaluation; storm water management model (SWMM)

1 研究背景

近年来,全球气候变化使极端降雨事件增多,而快速城市化导致城市下垫面不透水率增大,从而显

著改变了城市的自然水文过程^[1],致使城市面临着更为严峻的雨洪问题^[2-3]。在此背景下,海绵城市概念应运而生,研究与实践证明,海绵城市建设发挥了较好的城市雨洪管理综合调控效能,降低了城市

收稿日期:2021-07-31; 修回日期:2022-01-18

基金项目:教育部人文社会科学研究青年基金项目(20YJCZH190);江苏高校优势学科建设工程项目“风景园林学”(PAPD)

作者简介:徐海顺(1981-),男,江苏靖江人,博士后,副教授,硕士生导师,研究方向为海绵城市与景观水文。

内涝风险,改善了水生态环境^[4-7]。梁芊等^[8]使用SWMM模拟分析了海绵措施在不同初始含水状态下的径流控制效果,结果发现海绵设施在不同状态下均有较好的径流控制率;Yang等^[9]开发了由暴雨驱动的分析框架,并在实地集水区进行了测试,发现海绵设施显著降低了集水区雨水溢出的风险;Zhai等^[10]利用ArcGIS和SWMM平台研究了多尺度海绵城市的空间配置对雨洪管理的影响,发现海绵城市在提供生态系统服务的同时减少了雨洪径流量和峰值流量。

经过数年的试点建设,我国海绵城市建设的后评价时期已经来临,需要对已有的海绵城市试点建设项目进行经验总结^[11-12]。章林伟^[13]通过对各试点城市海绵建设项目成本的估算,预计我国海绵城市建设平均投资约为 1.6×10^8 元/ km^2 ,建设成本相对较高。石战航等^[14]的研究也表明,海绵建设会使项目工程成本有所增加。较高的建设成本在一定程度上制约了海绵城市的发展,部分缺乏政府财政支持的地区无法较为完善地完成海绵城市改造^[15]。全生命周期评价方法可以全面地描述海绵城市建设的综合费用,已成为业内进行成本计算的主要方法^[16-17],但在实际的运用过程中其对工程费用和价格数据收集的要求较高,较难保证研究的准确性^[18]。本文以江苏省某市的新建医疗中心二期工程为例,参照已完工的一期工程实际支出对场地海绵城市建设进行全生命周期成本与效益计算,利用SWMM模型对不同海绵设施组合进行雨洪模拟,最后利用成本效益评估方法评估不同海绵设施组合方案的成本效益。对海绵城市进行成本效益评估可以协助海绵城市建设的规划设计过程^[19-20],为“全域海绵”建设提供更加科学的指导。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

研究区位于江苏省海绵城市建设示范城市,项目用地面积为 $51\,887\text{ m}^2$,其中建筑占地面积为 $17\,738\text{ m}^2$,绿地面积为 $12\,799\text{ m}^2$,硬质路面面积为 $21\,350\text{ m}^2$ 。场地内存在一大型单体建筑,建筑占地面积为 $14\,894\text{ m}^2$,占项目总用地面积的28.70%。建筑四周环绕道路和广场,绿地总体比例较小,绿地率仅为24.67%,并以碎片化分布于道路和广场周边。整个场地下垫面的不透水比例为75.33%,硬质面积较大且相对集中,因而场地内的径流系数较高,致使雨水径流的流量大且速度快。

2.2 数据来源

2.2.1 降雨数据获取 根据该市气象站1980-2015年连续的气象水文资料,该市降雨时空分布不均衡,70%以上降雨量集中于6-9月份,且具有汛期暴雨频繁、非汛期中小雨较多的降雨时空特征。结合海绵城市“小雨不积水,大雨不内涝”的设计目标,选取常规降雨和暴雨两种降雨情景进行模拟。依据该市的海绵城市专项规划(2016-2030年),选取年径流总量控制率为80%时对应的37.05 mm降雨量为常规降雨雨量控制目标值,雨型选取根据该市气象站历史降雨数据,使用PC(pilgrim & corde-ry)法生成的180 min设计雨型。该市城区短历时降雨大多发生在3 h以内,所以本文采用该市新180 min暴雨强度公式,选取1、5、10 a 3种重现期下的设计暴雨过程,暴雨强度公式为:

$$i = \frac{9.5(1 + 0.719 \lg T)}{(t + 11.2)^{0.619}} \quad (1)$$

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

2.2.2 子汇水区划分 场地现状采用雨污分流排水体制。雨水排水管以地下管网通过调整管道坡度形式顺接到排水主干管道上。主管网管径主要为DN300,管内坡度主要为0.2%,覆土深度均在1 m以下。地面径流经过雨水算过滤,通过雨水井汇集,排向城市管网。北侧的雨水通过雨水井汇集,排向西侧的城市管网,南侧的场地通过地表径流汇集之后排入城市雨水管网。根据建筑与道路形态、建筑屋面类型、场地竖向标高、排水管网布局等,将场地分为两个排水分区,分别排向场地南、北的城市管网,两个排水分区再细化为19个子汇水区。研究区场地排水主管网径流走向及子汇水区划分如图1所示。

2.2.3 海绵设施组合确定 首先依据场地高程,结合场地内存在较大面积单体建筑、绿地碎片化、绿地总体面积较小且缺乏雨水收集设施的情况,确定场地内采用植草沟、雨水花园、透水铺装、绿色屋顶、地下式蓄水模块等5类海绵设施。蓄水模块用于集中回收利用场地内的大型单体建筑的屋面雨水,埋于地下,不占地面空间,且95%的空间为镂空空间,具有超强的蓄水能力^[21]。结合不同海绵设施的主要功能、建设成本和研究区海绵设施实施的难易程度,构建4种海绵设施的组合方案,即组合1:绿色屋顶、透水铺装(基于不透水下垫面);组合2:雨水花园、植草沟(基于透水下垫面);组合3:绿色屋顶、透水铺装、雨水花园、植草沟;组合4:绿色屋顶、透水

铺装、雨水花园、植草沟、蓄水模块。

根据 SWMM 用户手册、文献[21]及该市海绵城市专项规划(2016-2030年),进行不同海绵设施的参数设置(表1),并将场地内各海绵设施的规模下限值设定

为:下沉绿地率30%~40%、透水铺装率45%、绿色屋顶率40%;依据场地排水需求,确定绿色屋顶面积为8 128.20 m²、雨水花园为2 853.39 m²、植草沟为2 733.64 m²、透水铺砖为6 663.63 m²。

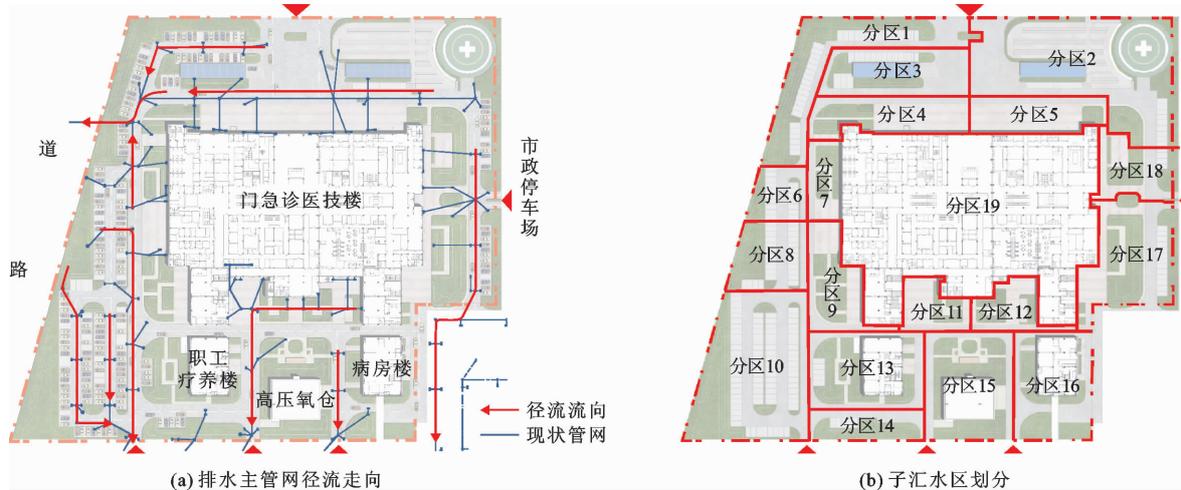


图1 研究区场地排水主管网径流走向及子汇水区划分示意图

表1 各海绵设施主要参数设置

透水铺装		绿色屋顶		雨水花园		植草沟	
参数	参数值	参数	参数值	参数	参数值	参数	参数值
表面洼蓄深度/mm	2	表面洼蓄深度/mm	4	表面洼蓄深度/mm	4	蓄水深度/mm	400
表面糙率	0.02	植被覆盖率/%	0.8	植被覆盖率/%	0.7	植被覆盖率/%	0.8
铺装厚度/mm	100	表面糙率/%	0.15	表面糙率/%	0.3	表面糙率/%	0.25
铺装层孔隙比/%	0.15	土壤孔隙率/%	0.3	土壤孔隙率/%	0.3	洼地边坡	5
铺装层透水率/(mm·h ⁻¹)	500	种植土壤厚度/mm	100	种植土壤厚度/mm	550		
蓄水层厚度/mm	200	种植土壤田间持水率/%	0.2	种植土壤田间持水率/%	0.2		
蓄水层孔隙比/%	0.4	垫层孔隙比/%	0.5				
暗渠偏移高度/mm	100	排水垫层厚度/mm	70				

2.3 研究方法

2.3.1 SWMM 水文模拟 SWMM(storm water management model)是目前业内应用最为广泛的雨洪模拟模型^[22]。本文SWMM模拟所需的模型参数(表2)、降雨数据、场地相关数据等以实地测量为主,并结合模型用户手册、文献[23]和该市海绵城市专项规划(2016-2030年)的参考数值最终确定。

由于缺少雨后实测数据,本研究参考基于径流系数的城市雨洪模型参数率定方法^[24],根据《室外排水设计标准(2021年)》,结合该场地土地硬化面积大、土壤渗透系数低的特点,选择参考径流系数的较大值进行计算,分别为:绿地0.15、硬质下垫面0.95、屋面0.95,最后得到场地的综合径流系数为

0.75。对场地建立模型后,使用常规降雨情景下的37.05 mm降雨量进行模拟验证,最后得到场地的径流系数也为0.75,验证了本研究所设定的模型参数的合理性。

2.3.2 海绵方案全生命周期成本计算 全生命周期成本包括工程项目的建设成本与运行维护成本,可以较为全面地反映产品整个生命周期的成本^[25],其计算方法如下^[26]:

$$LCC = C_{\text{capital}} + \sum_{t=1}^n PV_{O\&M_t} \quad (2)$$

$$PV_{O\&M_t} = \frac{FV_{O\&M_t}}{(1+i)^t} \quad (3)$$

$$FV_{O\&M_t} = C_{\text{capital}} \cdot p \cdot (1+r)^t \quad (4)$$

式中:LCC(life cycle cost)为全生命周期成本,10⁴

元; C_{capital} 为材料等初始成本, 10^4 元; n 为生命周期年限, a ; t 为年份; $PV_{O\&M_t}$ 为在第 t 年的运行维护成本的现值, 10^4 元; $FV_{O\&M_t}$ 为在第 t 年的运行维护成本的未来价值, 10^4 元; i 为折现率; r 为通胀率; p 为年运行维护费占初始成本的比率。

在考虑通胀率和折现率后,可以计算海绵设施维护成本的未来价值和现值。现有研究通常将运行维护成本设定为初始成本的百分比。参照该项目已经完工的一期海绵设施的投资额及已有研究成果,最终确定 n 为 30 a^[27]、 p 值为 3%^[28]、 i 值取 6%^[29]、 r 值取 3%^[30]。

表2 本文 SWMM 模型水文参数取值

参数类型	参数名称	选择值(类型)
曼宁系数	不透水区曼宁系数	0.015
	透水区曼宁系数	0.240
	管道曼宁系数	0.014
洼地蓄水深度	不透水区洼地蓄水深度/mm	1
	透水区洼地蓄水深度/mm	5
子面积演算	类型选择	Outlet
	改造前演算百分比/%	子汇水区现状
	改造后演算百分比/%	100
Horton 渗透参数	覆盖草皮最大入渗率/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	76.2
	裸土最大入渗率/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	40.0
	最小入渗率/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	3.3
	衰减系数/ h^{-1}	4
	干燥天数/d	7

2.3.3 海绵方案成本效益计算 采用成本效益定量分析方法,系统评价海绵方案的成本效益。成本效益价值是衡量经济-有效性的综合价值。计算方法如下^[31]:

$$B/C = \frac{B}{C} \quad (5)$$

式中: B 为海绵城市的经济效益或某些表征量。 C 为整个生命周期成本。 B/C 值为成本效益值。在相同投资条件下, B/C 值越大,其有效性越高。这种方法的关键是选择合适的指标来量化效益和成本,并使用合适的方法进行计算。

根据蓄水模块对雨水回收再利用的功能,参照该市居民常用价格汇编,确定医院用水价格为 3.07 元/t。利用 2016-2020 年该市 5 a 降雨数据计算得出蓄水模块 5 a 的雨水收集量为 37 303 m^3 ,据此推测出未来 30 a 的雨水收集量。参照全生命周期计算方式,确定未来通胀率为 3%,最终计算出包含蓄

水模块的海绵设施组合为医疗中心节约的水费价格为 108.96×10^4 元,在全生命周期成本中扣除后即 为蓄水模块的净成本。最后,将不同海绵设施组合下的径流控制率作为产出效益,将其与全生命周期成本相结合,计算得出成本效益值。

3 结果与分析

3.1 不同海绵设施组合的雨洪调控效应评价

3.1.1 径流量对比 对不同重现期降雨条件下,场地建设开发前、开发后以及各海绵设施组合的土壤入渗量、地表径流量和地表蓄水量进行模拟,结果见图 2。对比图 2 中的地表径流量可知,场地进行建设开发后,地表径流量将大幅增加,以常规降雨为例(图 2(a)),地表径流量从开发前的 310 m^3 增加至开发后的 1 372 m^3 ,径流量占降雨量的比例也从开发前的 16.5% 增加至开发后的 73.0%;增加海绵设施后场地下垫面类型并未大幅变动,土壤入渗量无法恢复到开发前的水平,但场地的地表蓄水量显著增加,也可以有效减少地表径流量。组合 1 在各降雨情景下的径流量控制效果均优于组合 2。这是由于场地内不透水面积较大,组合 1 的海绵设施面积大于组合 2。

不同重现期降雨条件下各海绵设施组合的地表径流过程线见图 3。由图 3 可以看出,同一重现期降雨条件下不同海绵设施组合对峰值径流量的控制效果存在差异。在常规降雨条件下(图 3(a)),无海绵设施时场地径流量峰值为 0.67 m^3/s ,增加海绵设施后峰值径流量最低可下降至 0.20 m^3/s ,基本满足“小雨不积水”的设计目标;在 $P=10$ a 的暴雨情景下峰值径流量最大为 4.67 m^3/s (图 3(d)),很难保证场地不出现积水内涝现象。增加海绵设施后,场地的雨水调蓄能力增强,峰值径流量得到有效削减。在常规降雨条件下,峰值径流量可减小 70.14%,而在暴雨情景下,海绵设施对雨水的滞蓄能力饱和和较快,峰值径流量仅能减小 53.32%~59.92%,表明海绵城市的雨洪控制能力与降雨强度呈负相关。

3.1.2 出水口流量对比 场地周边并无水系,场地内地表径流只能通过市政管网排放。不同重现期降雨条件下各海绵设施组合的出水口流量过程线见图 4。由图 4 可知,在无海绵设施情景下,出水口峰值流量在 0.15~0.29 m^3/s ,部分管道在降雨峰值期已进入满载排水状态,且管道多余的雨水基本可在雨后 1 h 内排尽,整体呈现峰值流量大、排放速度快的特点。增加海绵设施后,组合 1 与组合 2 在不同重现期降雨条件下的出水口流量平均削减率分别为

8.51%和20.00%,采用多种海绵设施问题的组合3与组合4的平均削减率则为27.59%~53.33%。由于组合2中的植草沟与雨水花园具有较好的雨水拦蓄能力,虽然组合2的海绵设施面积小于组合1,但组合2的出水口流量削减能力要优于组合1。另外,无海绵设施情况下,场地出水口的排放量峰值与雨水峰值同时出现,组合1在各种降雨条件下均不具备使出水口流量峰值滞后的能力,而组合2、组合3和组合4在常规降雨与1年一遇降雨条件下可以将出水口流量峰值延迟30~45 min,可以有效减缓雨水管网的排水压力。

3.2 全生命周期成本与效益评价分析

3.2.1 全生命周期成本分析 不同海绵设施组合的全生命周期成本计算如表3所示。表3中的计算结果显示,综合考虑材料价格、设计费、土方价格和维护成本后,各海绵设施的单位面积全生命周期成本从高至低依次为:透水铺装(1583元/m²)、雨水花园(1139元/m²)、绿色屋顶(1076元/m²)、植草沟(825元/m²)。由于透水铺装材料费用较高,其单位面积全生命周期成本最高,约为植草沟单位面积全生命周期成本的两倍,而绿色屋顶与雨水花园所需的材料相似,二者的单位面积全生命周期成本接近。

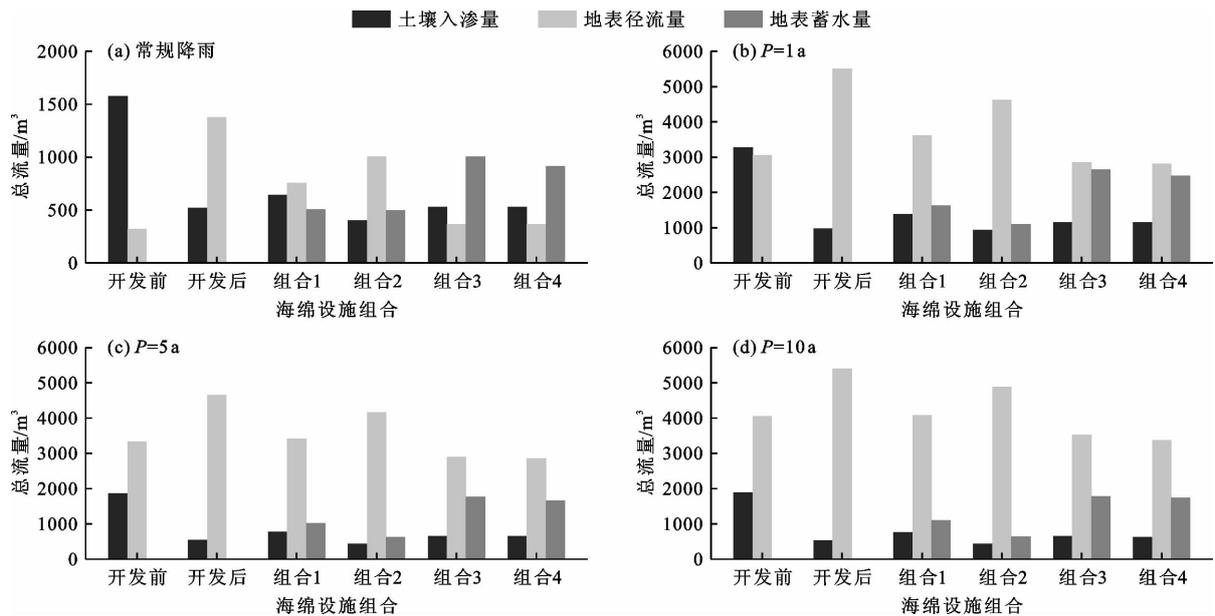


图2 不同重现期降雨条件下场地开发前、后及各海绵设施组合的雨洪调控效果对比

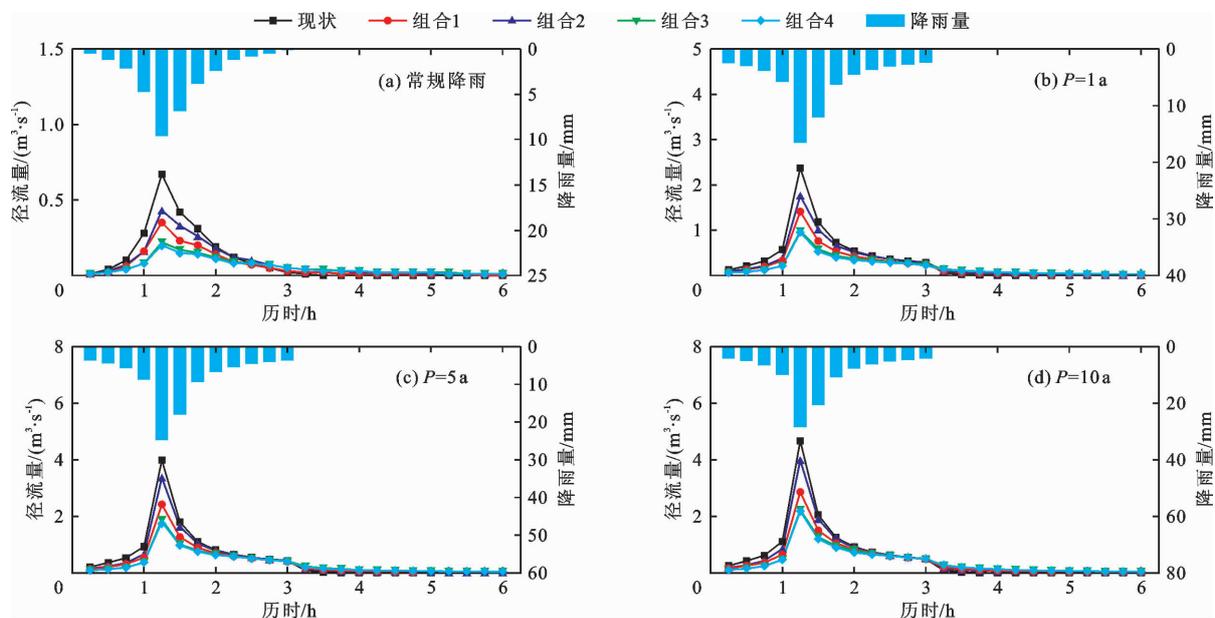


图3 不同重现期降雨条件下各海绵设施组合的地表径流过程线

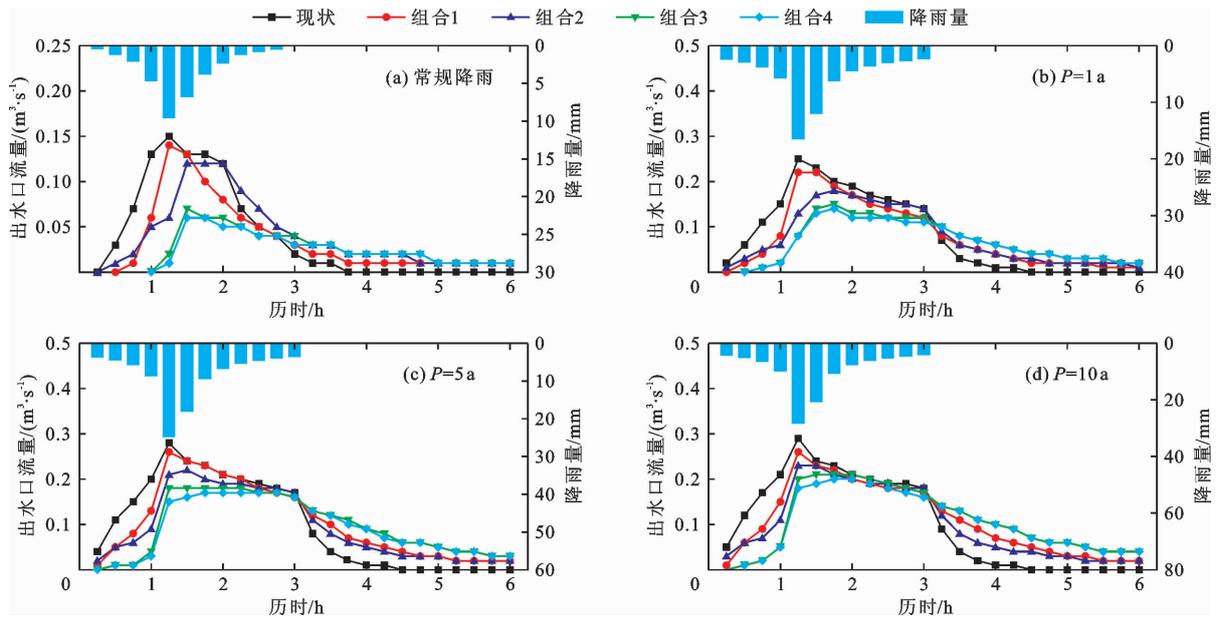


图 4 不同重现期降雨条件下各海绵设施组合的出水口流量过程线

表 3 不同海绵设施组合的全生命周期成本计算表

海绵设施	面积/ m ²	初始造价/ 10 ⁴ 元	土方价格/ 10 ⁴ 元	维护成本/ 10 ⁴ 元	全生命周期成本/ 10 ⁴ 元	单位面积全生命周 期成本/(元·m ⁻²)
绿色屋顶	6646.00	132.92	79.75	502.19	714.86	1076
透水铺装	6663.63	199.91	99.95	755.29	1055.15	1583
雨水花园	2269.80	45.40	41.61	171.51	258.52	1139
植草沟	1792.80	26.89	19.50	101.60	147.99	825
蓄水模块		50.00	6.30	188.91	245.21	

3.2.2 全生命周期效益分析 增加海绵设施后场地在不同重现期降雨条件下的径流控制量、单位面积径流控制量、成本效益值如表 4 所示。对表 4 中的全生命周期成本效益计算结果分析如下:

(1) 由于组合 1 的海绵设施面积大于基于透水下垫面的组合 2, 所以组合 1 的径流控制量大于组合 2, 但组合 1 的单位面积径流控制量相对较低, 在常规降雨条件下为 0.046 73 m³/m², 为 4 个海绵设施组合中的最小值, 约为组合 2 单位面积径流控制量的 1/2。

(2) 随着降雨量的增加, 各海绵设施的单位面积径流控制量逐渐增加且组合 1 增速快于组合 2, 但组合 1 的单位面积径流控制量一直小于组合 2。将组合 1 与组合 2 的海绵设施相结合的组合 3 在不同重现期降雨条件下的径流控制量相对于组合 1 增加了 41% ~ 42%, 证明了采用多类型海绵设施的必要性。组合 3 与组合 4 的单位面积径流控制量介于组合 1 与组合 2 之间, 且组合 4 略大于组合 3。组合

4 在组合 3 已有海绵设施的基础上增加了蓄水模块, 其在常规降雨条件下的径流控制能力与组合 3 相似, 而在暴雨情景下, 组合 4 的径流控制能力略高于组合 3, 且径流控制效果随着降雨强度的增加而逐渐增加。

(3) 成本效益值为径流总量削减率与全生命周期成本的比值, 该值越高, 证明其经济性越高。组合 1 的成本效益值在不同降雨情景下均为 4 种组合的最小值, 其在常规降雨条件下的成本效益值为 0.025 61%/10⁴ 元, 仅为组合 2 的 38.40%。组合 2 在常规降雨条件下的成本效益值为 0.066 70%/10⁴ 元, 在暴雨情景下的成本效益值为 0.023 64%/10⁴ 元 ~ 0.039 62%/10⁴ 元之间, 在各种降雨情景下均为 4 种组合中的最大值, 证明了基于透水下垫面的海绵设施的经济性。

(4) 随着降雨量的增加, 各海绵设施组合的成本效益值均有所减小, 表明随着降雨量的增加, 各海绵设施组合的径流控制率均有所下降。在不同暴雨

情景下,组合1的成本效益值分别为组合2的48.80% ($P=1$ a)、57.41% ($P=5$ a)、58.76% ($P=10$ a)。占比的增加表明组合1的径流控制能力受降雨强度的影响小于组合2。组合3的成本效益值在不同重现期降雨条件下为组合2的50.81%~67.55%,均高于组合1。组合4比组合3多采用了蓄水模块,在全生命周期成本中扣除蓄水模块的蓄水量所对应的水费后,其成本效益值仍略高于组合3,但不可忽视组合4所具有的雨水回收利用功能的积极作用。

表4 不同海绵设施组合的单位面积径流控制量与全生命周期成本效益值

降雨重现期/a	海绵设施组合	径流控制量/ m^3	单位面积径流控制量/ $(m^3 \cdot m^{-2})$	成本效益值/ $[\% \cdot (10^4 \text{元})^{-1}]$
常规降雨	组合1	622	0.04673	0.02561
	组合2	372	0.09157	0.06670
	组合3	1012	0.05825	0.03389
	组合4	1012	0.05825	0.03347
1	组合1	1020	0.07664	0.01934
	组合2	480	0.11815	0.03962
	组合3	1440	0.08289	0.02220
	组合4	1460	0.08404	0.02023
5	组合1	1250	0.09392	0.01515
	组合2	500	0.12307	0.02639
	组合3	1770	0.10189	0.01745
	组合4	1800	0.10361	0.01595
10	组合1	1330	0.09993	0.01389
	组合2	520	0.12800	0.02364
	组合3	1880	0.10822	0.01597
	组合4	2030	0.11685	0.01549

4 讨论

本研究按照研究区场地现状对其进行精细化SWMM模拟,模型参数依据已建成的一期工程海绵设施数据进行设定,并使用雨洪模型参数率定方法对模型参数进行验证,具有科学性与准确性。全生命周期评价对所需数据收集的要求较高^[18],而本研究依据已完工的一期工程实际支出对场地进行全生命周期成本计算,具有一定真实性。

研究发现植草沟、雨水花园等构造较为简单的下沉式绿地的成本效益值较高,这与多数已有相关

研究的研究结果相似^[12,27]。本文研究结果显示,虽然透水铺装对径流的控制能力较好,但其建设成本较高,维护难度大,成本效益值相对较低,这与部分已有研究结果相悖^[32-33]。本研究推测可能是由不同研究所采用的透水铺装构造不同而导致其雨洪控制效果及建造维护成本均不同所致,也可能是由不同研究所用雨洪模型的模拟精度与成本效益计算方法不同所致。海绵设施组合的雨洪调控效果受场地现状、设施类型和降雨强度等多种因素影响,因此有必要结合场地现状与控制目标,因地制宜地进行海绵城市设计。

5 结论

(1)透水铺装和绿色屋顶组合可使雨水较快下渗,因而其对地表径流的控制效果较好,植草沟与雨水花园的雨水积蓄能力使其可以更有效地缓解城市雨水管网压力。

(2)海绵设施的雨洪控制效果与降雨强度呈反比。在暴雨情景下,海绵设施对城市内涝与管网排水压力的缓解作用有限。有必要在海绵城市设计时结合各种降雨情景尤其是极端降雨情景进行考虑。

(3)从单位面积的成本效益值考虑,基于透水下垫面的雨水花园与植草沟具有更高的经济性与有效性,包含透水铺装的组合的成本效益值最低。

(4)蓄水模块在减缓城市用水压力的同时,其雨水回收利用能力带来的经济效益几乎可抵消其全生命周期成本,因而可以适当增加对蓄水模块的投资建设。

参考文献:

- [1] LI Yangsheng, ZHAO Xinfei, CUI Yi, et al. Oxidation-induced structural transition of two-dimensional iron oxide on Au(111) [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(20): 204003.
- [2] 姜仁贵,韩浩,解建仓,等.变化环境下城市暴雨洪涝研究进展[J].水资源与水工程学报,2016,27(3):11-17.
- [3] 俞孔坚,李迪华,袁弘,等.“海绵城市”理论与实践[J].城市规划,2015,39(6):26-36.
- [4] 仇保兴.海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J].给水排水,2015,51(3):1-7.
- [5] 车生泉,谢长坤,陈丹,等.海绵城市理论与技术发展沿革及构建途径[J].中国园林,2015,31(6):11-15.
- [6] 常晓栋,徐宗学,赵刚,等.基于SWMM模型的城市雨洪模拟与LID效果评价——以北京市清河流域为例[J].水力发电学报,2016,35(11):84-93.

- [7] FENG Shuxian, YAMAMOTO T. Preliminary research on sponge city concept for urban flood reduction: A case study on ten sponge city pilot projects in Shanghai, China[J]. *Disaster Prevention and Management*, 2020, 29(6): 961–985.
- [8] 梁芊,杨艳娜,冯文凯,等. 基于LID的SWMM模型在雨洪控制中的应用[J]. *太原理工大学学报*, 2020, 51(3): 380–388.
- [9] YANG Yuanyuan, LI Jing, HUANG Qiang, et al. Performance assessment of sponge city infrastructure on stormwater outflows using isochrone and SWMM models[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 597(5): 126151.
- [10] ZHAI Jun, REN Jing, XI Miao, et al. Multiscale watershed landscape infrastructure: Integrated system design for sponge city development[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 60: 127060.
- [11] 车伍,赵杨,李俊奇. 海绵城市建设热潮下的冷思考[J]. *南方建筑*, 2015(4): 104–107.
- [12] 高珊. 基于工程成本与雨洪调控效益分析的西宁市LID设施优选研究[D]. 北京:北京林业大学, 2020.
- [13] 章林伟. 海绵城市建设概论[J]. *给水排水*, 2015, 51(6): 1–7.
- [14] 石战航,赵江. 海绵道路建设成本核算及控制建议——以西咸新区四条路建设为例[J]. *建设科技*, 2017(21): 75–77.
- [15] 张毅. 海绵城市建设的几大困惑与对策分析[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(12): 7–11.
- [16] 芦琳. 两种典型城市雨水LID技术生命周期评价研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2013.
- [17] FORASTE J A, GOO R, THRASH J, et al. Measuring the cost-effectiveness of LID and conventional stormwater management plans using life cycle costs and performance metrics[C]// 2011 Low Impact Development Conference, Philadelphia, Pennsylvania, 2015.
- [18] 李沐寒,唐爽. 低影响开发成本效益研究内容与方法进展综述[J]. *华中建筑*, 2021, 39(8): 1–5.
- [19] DOS SANTOS M F, BARBASSA A P, VASCONCELOS A F. Low impact development strategies for a low-income settlement: Balancing flood protection and life cycle costs in Brazil[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 65: 102650.
- [20] 邵明,李雄,戈晓宇,等. 海绵城市视角下SUSTAIN模型在城市绿地设计中的应用[J]. *工业建筑*, 2017, 47(5): 56–61.
- [21] 王信刚,王婉. 蓄水模块型雨水收集利用——以无锡国联乐园为例[J]. *园林*, 2015(7): 32–35.
- [22] 芮孝芳,蒋成煜,陈清锦,等. SWMM模型模拟雨洪原理剖析及应用建议[J]. *水利水电科技进展*, 2015, 35(4): 1–5.
- [23] 李春林,胡远满,刘森,等. SWMM模型参数局部灵敏度分析[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(4): 1076–1081.
- [24] 刘兴坡. 基于径流系数的城市降雨径流模型参数校准方法[J]. *给水排水*, 2009, 35(11): 213–217.
- [25] LI Yu, HUANG Jinhui Jeanne, HU Maochuan, et al. Design of low impact development in the urban context considering hydrological performance and life-cycle cost[J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2020, 13(2): e12625.
- [26] WANG Mo, ZHANG Dongqing, ADHITYAN A, et al. Assessing cost-effectiveness of bioretention on stormwater in response to climate change and urbanization for future scenarios[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 543(Part B): 423–432.
- [27] 周冠南,梅超,刘家宏,等. 萍乡市西门片区海绵城市建设水文响应与成本效益分析[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(9): 10–17.
- [28] XIE Jiaqiang, CHEN Hao, LIAO Zhenliang, et al. An integrated assessment of urban flooding mitigation strategies for robust decision-making[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2017, 95: 143–155.
- [29] 桑培东,张鹏. 海绵城市项目应用PPP模式的VFM评价[J]. *工程管理学报*, 2017, 31(6): 61–65.
- [30] MEI Chao, LIU Jiahong, WANG Hao, et al. Integrated assessments of green infrastructure for flood mitigation to support robust decision-making for sponge city construction in an urbanized watershed[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 1394–1407.
- [31] 舒安平,田露,王梦瑶,等. 北京海绵城市雨水措施效益评估方法及案例分析[J]. *给水排水*, 2018, 54(3): 36–41.
- [32] 郑志宏,段晓涵,赵飞. 基于暴雨洪水管理模型的低影响开发设施应用研究[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(9): 32–40.
- [33] 李沐寒,尹海伟,孔繁花,等. 南京市鼓楼区LID空间配置与雨洪调控效益研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(3): 30–38.