

刘家琳, 李武胖, 彭子岳, 刘兆莉. 基于水文-成本综合绩效的山地公园雨洪管理景观系统策略研究 [J]. 风景园林, 2021, 28 (7) : 90-96.

基于水文-成本综合绩效的山地公园雨洪管理景观系统策略研究

Research on Stormwater Management Landscape System Strategies in Mountainous Urban Parks Based on the Hydrological Cost Comprehensive Effectiveness

刘家琳 李武胖 彭子岳 刘兆莉

LIU Jialin, LI Wuxi, PENG Ziyue, LIU Zhaoli

开放科学 (资源服务)
标识码 (OSID)



中图分类号: TU986

文献标识码: A

文章编号: 1673-1530(2021)07-0090-07

DOI: 10.14085/j.fjyl.2021.07.0090.07

收稿日期: 2020-12-29

修回日期: 2021-05-16

刘家琳 / 女 / 博士 / 西南大学园艺园林学院副教授、硕士生导师 / 研究方向为山地开放空间规划设计理论、雨洪管理景观绩效评估与优化、绿色屋顶监测与技术优化研究

LIU Jialin, Ph.D., is an associate professor and master supervisor in the College of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University. Her research focuses on mountainous open space planning and design theory, landscape performance evaluation and optimization of stormwater management, green roof monitoring and technical optimization research.

李武胖 / 男 / 西南大学园艺园林学院在读硕士研究生 / 研究方向为雨洪管理景观绩效评估与优化
LI Wuxi is a master student in the College of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University. His research focuses on landscape performance evaluation and optimization of stormwater management.

彭子岳 / 女 / 西南大学园艺园林学院在读硕士研究生 / 研究方向为雨洪管理景观绩效评估与优化
PENG Ziyue is a master student in the College of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University. Her research focuses on landscape performance evaluation and optimization of stormwater management.

刘兆莉 / 女 / 西南大学园艺园林学院在读硕士研究生 / 研究方向为雨洪管理景观绩效评估与优化
LIU Zhaoli is a master student in the College of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University. Her research focuses on landscape performance evaluation and optimization of stormwater management.

摘要: 在重庆海绵城市试点建设背景下, 针对山地公园雨洪管理景观系统构建, 缺乏以水文-成本综合绩效为导向的设计策略研究。以主城区典型的山坡、山顶地貌的 6 例公园绿地为对象, 提供低、中、高 3 种设计强度的雨洪管理景观系统策略, 对案例的水文效能、全生命周期成本、水文-成本综合绩效进行评估。结果表明: 以水文-成本综合绩效最优为依据, 案例一般可采用低强度策略; 当设计需满足公园年径流总量控制率 80%~85%, 案例宜采用中强度策略; 对于个别缓坡地形案例, 成本充足时, 可考虑极端降雨事件 (如 10 a 或 30 a 重现期) 的管控, 采用高强度策略。为重庆及亚热带季风性湿润气候条件下, 探索山坡、山顶地貌城市公园的雨洪管理景观系统的设计方法, 提供了韧性策略思路。

关键词: 风景园林; 城市山地公园; 雨洪管理; 水文-成本综合绩效; 全生命周期成本

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (编号 51708452)

Abstract: Under the background of pilot construction of sponge city in Chongqing, few research have been done to study the strategies of constructing the stormwater management landscape system in mountainous urban parks based on the performance of hydrological cost-effectiveness. This research focuses on six typical cases of hilltop and hillside landform conditions, providing the low-, medium- and high-levels of stormwater management landscape system strategies. It assesses the performances of hydrological control, life cycle cost and hydrological cost effectiveness of various strategies. The result shows that the low-level strategy could be used based on the optimal hydrological cost effectiveness performance. The medium level strategy could be adopted when it needs to meet 80%-85% of the total annual runoff control rate of the parks. The high-level strategy could be applied for the gentle slope case under sufficient cost investment to control the extreme rainfall events (as 10-or-30-year return period). This research provides resilient strategies for the design of the stormwater management landscape system in hilltop and hillside urban parks in Chongqing and subtropical monsoon humid climate areas.

Keywords: landscape architecture; mountainous urban park; stormwater management; hydrological cost comprehensive effectiveness; life cycle cost

Fund Item: Young Scientists Fund of the National Natural Science Fund of China (No. 51708452)

1 研究背景

重庆是典型的山地海绵城市试点地区。山地公园构成了主城区绿地开放空间主体, 相较于平原, 公园中坡面下垫面占比大^[1]。坡度是地表产流的关键因子之一^[2], 加上本地夏季连续数月的雨季与短时暴雨特征, 增加了山地公园雨洪流量、峰值的控制难度。实践与研究表

明山地公园具备良好的可持续雨洪管理的设计条件^[1,3], 如果把公园中若干子汇水区由雨洪输出的“排水节点”转化为雨洪利用的“受纳节点”, 有利于丰富景观多样性, 减少坡地冲刷侵蚀, 减缓周边用地下游区域雨洪负荷。

目前关于山地公园绿地雨洪管理的研究, 在水文特征定性勘查、定量分析, 雨洪管理景

观分级调控策略，水文效能研究层面有一定进展^[1, 3-6]。近年来雨洪管理景观的前沿研究，关注到场地中该系统的水文-成本综合绩效，将技术方案在整个建设及运营生命周期年限中的成本消耗，以及单位成本的水文管控效能纳入绩效指标，旨在从水文管控的有效性、建造维护的经济性、成本效益等多重视角对景观系统进行评估，研究场地多涉及城市街区^[7-9]；而在山地公园中还未见针对雨洪管理景观系统的水文-成本综合绩效的研究。本研究采用上述方法，以典型山地公园为对象进行水文-成本综合绩效评估，有利于在不同的管理目标或成本预算条件下，为方案决策提供韧性思路。

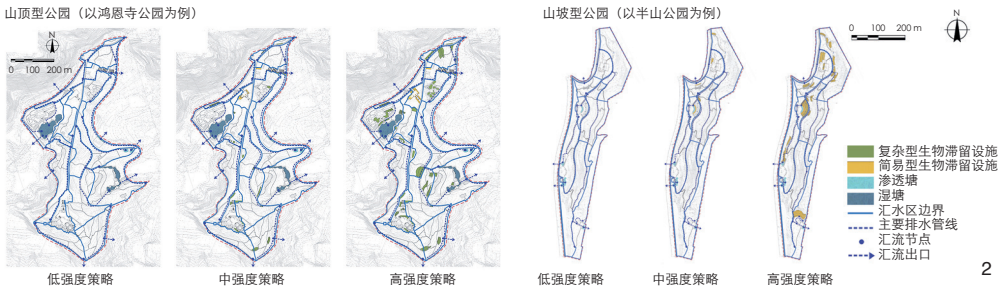
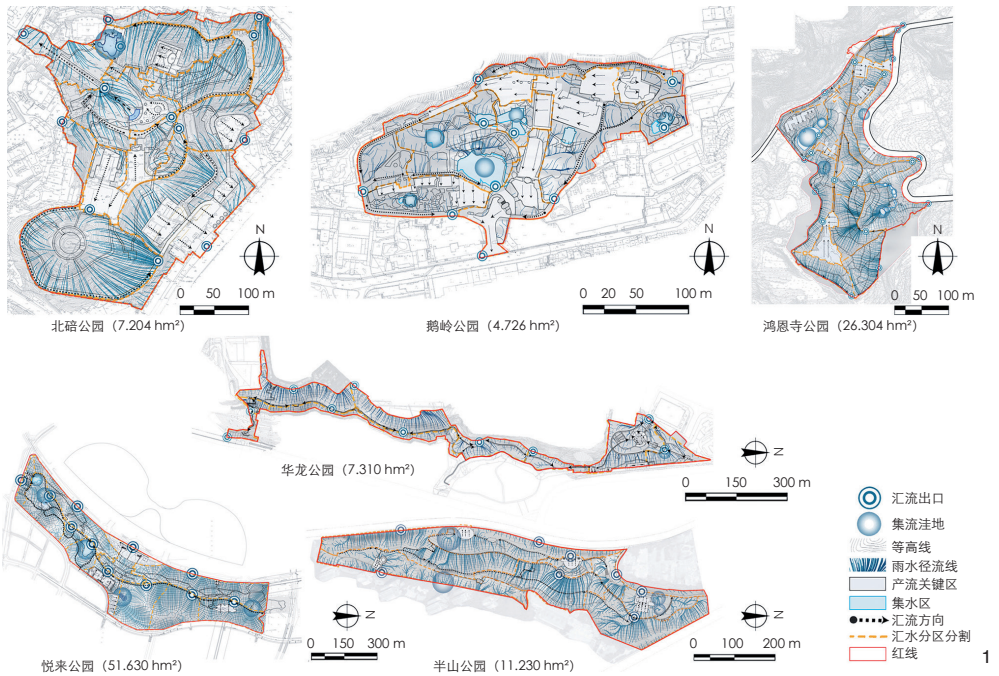
2 研究方法

2.1 研究案例

重庆年平均降雨量为 1 000~1 350 mm，70% 的降水集中在 5—9 月，全年以中小雨型为主，雨季易突发短时暴雨^[10]。研究案例为重庆主城区的 6 例山地公园，其中 3 例公园依托山顶区域营建（北碚公园、鹅岭公园、鸿恩寺公园），3 例依托山体单侧坡面营建（悦来公园、华龙公园、半山公园）。所选案例代表了山顶型、山坡型 2 种主要的山地公园类型，笔者暂未探讨山麓型、山谷型、复合型等类型情况。各案例在坡度类型分布上具备代表性层级。各公园不同植被类型覆盖条件下的土壤样品测定表明，公园土壤质地以砂质壤土、粉壤土为主，存在少量混合回填土。基于现状径流汇流分析，6 例案例共包含 69 个子汇水区，不透水面多位于公园入口及山顶平坡区域，集水洼地布局分散（图 1）。

2.2 山地公园雨洪管理景观系统策略

6 例公园中，除悦来公园进行了局部汇水区的雨洪管理景观改造外，其余案例均采用传统管网排水系统。为便于探讨公园整体的雨洪管理景观系统策略，悦来公园以改造前的地形图作为研究分析的现状条件。由于山顶型公园位于山地高位，山坡型公园的平缓坡集水面占比小，其雨洪调控效能有限，故本研究以公园自身雨洪调控为主，未探讨客水调控情况。



1 研究案例现状径流汇流分析
Present runoff confluence analysis of the study cases

2 研究案例雨洪管理景观布局策略
Landscape layout strategies of stormwater management in the study cases

本研究为山地公园雨洪管理景观改造提供了低、中、高 3 种工程强度的策略（图 2），景观设施取自《海绵城市建设技术指南》（简称《指南》）^[11]，所选设施类型便于公园局部改造过程的实施。策略如下：1）低强度改造策略，仅布设汇流终端管控措施，尽量利用子汇水区末端集水区的现状绿地、水池，将其改造成渗透塘或湿塘；2）中强度改造策略，布设汇流终端管控措施，其规模与低强度方案一致，并增加布设源头管控措施，即在中、上游子汇水区的铺装场地、绿地低势区域增设生物滞留设施，按《两江新区海绵城市建设模型应用技术导则（试行）》^[12]，原土渗透性 $\geq 35\text{ mm/h}$ ，采用简易型生物滞留设施，原土渗透性 $<35\text{ mm/h}$ ，采用复杂型生物滞留

设施，设施规模设定所采用的设计降雨量为 25 mm；3）高强度改造策略，即在中强度策略方案的基础上，利用子汇区内坡度 $<25\%$ 的平缓坡增设生物滞留设施，依据《指南》建议，其布设面积上限为子汇水区面积的 10%。

2.3 雨洪管理水文模型构建与校对

针对公园现状以及低、中、高 3 种强度的设计策略构建雨洪管理模型（Storm Water Management Modle, SWMM）。模型涉及下垫面水文参数、排水管网参数、设施结构参数 3 类数据。排水管网参数以排水施工图为依据，现状管网与新增雨洪管理景观设施连通。子汇水区面积、不透水率、汇流宽度、坡度等水文参数按计算公式^[13]，依据现状地形图数据并结合方案布局进行统计；其他水文特征

表 1 研究案例水文参数取值与依据^[2, 13-15]
Tab. 1 Values and basis of hydrological parameters of the study cases^[2, 13-15]

子汇水区水文参数	取值	取值依据
透水区地表曼宁系数	0.277~0.800	草坪、灌木丛的曼宁系数理论值按植被类型覆盖比例进行加权平均
透水区洼地蓄水值 /mm	4.13~7.62	草坪、乔灌林地的洼地蓄水值按植被类型覆盖比例进行加权平均
不透水区地表曼宁系数	0.012	不透水区面层简化为混凝土地表材质，取其理论值
不透水区洼地蓄水值 /mm	1.27	不透水区施工质量良好，基本平整，故取其理论值的下限
无洼地储蓄的不透水面积率 /%	25	研究区不存在特殊环境，故取模型系统缺省值 ^[13]
土壤饱和入渗率 /（mm/h）	4.51~48.98	各公园采集不同植被类型覆盖条件下地表 30 cm 内的土层环刀样品，在实验室用环刀法测定 ^[14] ，并按汇水区植被类型覆盖面积比进行加权平均
土壤初始入渗率 /（mm/h）	101.6~150.0	重庆主城绿地土壤初始入渗速率（降雨间隔 2~7 天）测定结果 ^[2] 及 SWMM 5.1 手册对不同土壤类型植被覆盖下处于部分湿润状态的推荐值
入渗衰减系数 /h ⁻¹	2~4	刘家宏等研究报告中的相应参数取值 ^[15]

表 2 雨洪管理景观设施结构层参数取值与依据^[11-13, 16]
Tab. 2 Values and basis of structural layer parameters of stormwater management landscape facilities^[11-13, 16]

设施	参数	滞留设施 （简易型）	滞留设施 （复杂型）	渗透塘	湿塘	取值依据
表面层	蓄水深度 /mm	300	300	600	1 000	本地已建成的海绵设施工程经验值
	植被容积分数	0.1	0.1	0.1	0	表面层其余参数依据《两江新区海绵城市建设模型应用技术导则》中相应参数推荐值 ^[12]
	表面粗糙系数	0.24	0.24	0.24	0.24	
	表面坡度 /%	0.01	0.01	0.01	0.01	
土壤层	厚度 /mm	600	600	300	300	《指南》中相应设施土壤层厚度结合本地工程经验值
	孔隙率 /（m ³ ·m ⁻³ ）	0.437	0.437	0.437~0.501	0.437~0.501	简易型生物滞留设施、湿塘、渗透塘的土壤层均采用原土，其入渗率参数为设施拟定布局点的子汇水区的饱和入渗率；复杂型生物滞留设施入渗率按本地导则 ^[12] ；孔隙率、田间持水量、枯萎点取值按相应土壤类型的理论值
	田间持水量 /（m ³ ·m ⁻³ ）	0.062~0.105	0.105	0.105~0.284	0.105~0.284	
	枯萎点 /（m ³ ·m ⁻³ ）	0.024~0.047	0.047	0.047~0.135	0.047~0.135	
	入渗率 /（mm/h）	36.20~48.98	35.00	3.00~48.98	5.40~47.70	
	导水率坡度 /%	30	30	30	30	保守考虑渗透性能，取模型推荐典型数值范围的下限
	吸水头 /mm	53.49~73.04	73.80	61.82~136.33	66.72~165.32	吸水头 Ψ 与饱和入渗率 K 的公式计算 ^[13] ，即 $\Psi = 3.23 K^{-0.328}$ （R ² 拟合度为 0.9）
蓄水层	厚度 /mm	0	300	0	0	复杂生物滞留设施的砾石蓄水层厚度依据《指南》 ^[11]
	孔隙比	—	0.75	—	—	《两江新区海绵城市建设模型应用技术导则》相应参数推荐值 ^[12]
	渗漏速率 /（mm/h）	—	750.0	—	3.6×10^{-4}	复杂生物滞留设施按王墨等论文中相应参数 ^[16] ；湿塘取防水内衬值
	堵塞因子	0	0	0	0	忽略阻塞
暗渠层	排水系数	—	1.429	—	—	排水系数 $C = q/h^n$ （复杂生物滞留设施中暗渠需释放饱和入渗流量，式中 q 为 35 mm/h， h 为暗渠上介质层高度 600 mm， n 取典型数值 0.5；其余设施无暗渠层）
	排水指数	—	0.5	—	—	取典型数值
	暗渠偏移高度 /mm	—	150	—	—	暗渠离蓄水层底部的常规偏移距离

参数取值与统计依据见表 1。设施参数方面，生物滞留设施、湿塘、渗透塘的结构层参数取值与依据见表 2。模型计算时间步长依据模型开发实验室及 Eckart 等的研究^[17-18]，模拟时间设定为 24 h。

研究采用重庆主城区不同坡度绿地、道路的各类地表径流系数以往的监测研究结果^[2]，对案例改造前现状水文模型的综合径流系数模拟值进行校对。文献中径流系数在本地单次降雨量 100 mm 暴雨实验条件下获得，监测地土

壤类型为砂质壤土，其坡度范围与土壤条件与本研究案例近似（鸿恩寺公园除外，其表土为粉壤土）。故采用该监测数据为案例（鸿恩寺公园除外）的坡面绿地与道路场地的各类径流系数赋值，加权得到各公园的综合径流系数本地参考值（表 3）。

在相同的本地暴雨量（单次降雨量 100 mm）设定条件下，模拟得到子汇水区综合径流系数并加权计算，得到各公园的综合径流系数模拟值。对照综合径流系数本地参考值，对

模型敏感参数在理论值的合理范围内微调^[18]，使得相同降雨条件下，各公园综合径流系数模拟值在本地参考值范围内（表 3），使得模拟结果可靠。此外，鸿恩寺公园粉壤土的渗透性低于文献监测地砂质壤土的渗透性，该案例的综合径流系数模拟值也相对本地文献参考值偏大，表明模拟结果具备一定可靠性。

2.4 降雨情景

研究选定多种降雨情景进行水文模拟，考虑重庆地区年径流总量控制率 80%~85% 所

对应的设计降雨量（25.5~31.9 mm），以及不同雨型条件，降雨重现期选定 0.4 a、2 a、10 a、30 a。依据重庆主城区 2017 年最新修订的暴雨强度公式适用地理范围要求以及各公园所属地理区位，选择相应的暴雨强度公式，其中 0.4 a 和 2 a 重现期事件的降雨历时为 120 min，10 a 和 30 a 重现期事件的降雨历时为 180 min，并应用芝加哥降雨过程历线模型确定不同设计降雨历线数据，雨峰位置系数取本地值 0.17^[19]。

2.5 绩效指标

2.5.1 水文效能

依据水文效能评估方法^[9]，本研究将公园终端排水口的径流出流总量、径流峰值流量的削减率作为低、中、高 3 种强度方案水文效能的评估指标。降雨事件*i* 中径流出流总量削减率 $R_{OV(i)}$ 按公式（1）计算，径流峰值流量削减率 $R_{PF(i)}$ 按公式（2）计算。

$$R_{OV(i)} = \frac{(V_{bi} - V_{ai})}{V_{bi}} \times 100, \tag{1}$$

$$R_{PF(i)} = \frac{(P_{bi} - P_{ai})}{P_{bi}} \times 100. \tag{2}$$

式中 V_{bi} 和 V_{ai} 分别指降雨事件*i* 中公园改造前和雨洪管理策略实施后，公园排水出口的径流出流总量； P_{bi} 和 P_{ai} 分别指降雨事件*i* 中公园改造前和雨洪管理策略实施后，排水出口的径流峰值流量。

2.5.2 全生命周期成本

按雨洪管理景观设施使用年限相关研究，本研究拟定设施的全生命周期（life cycle cost, LCC）为 30 a^[20]，方案设定在第 0 年完成营造，在第 1~30 年中进行运行维护，不考虑设施最终拆除成本。设施全生命周期成本按公式（3~5）计算^[7]：

$$LCC = C_{capital} + \sum_{t=1}^n PV_{O\&M_t}, \tag{3}$$

$$PV_{O\&M_t} = \frac{FV_{O\&M_t}}{(1+d)^t}, \tag{4}$$

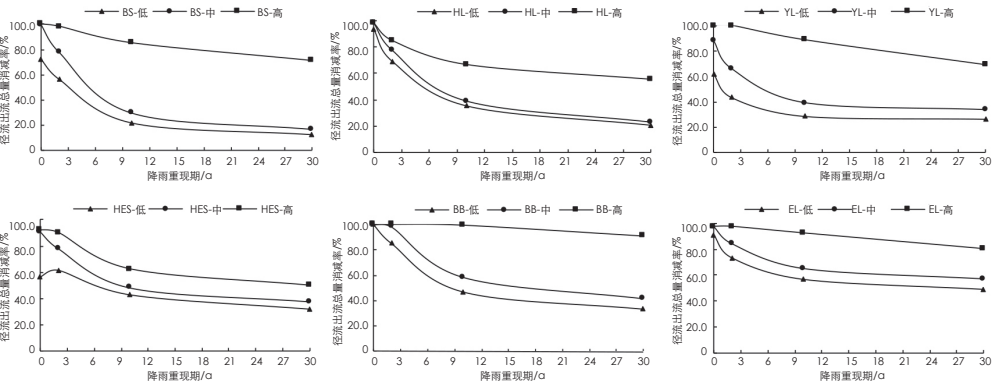
$$FV_{O\&M_t} = C_{capital} \times p \times (1+r)^t. \tag{5}$$

式中 $C_{capital}$ 指技术方案建造成本，单价以《海绵城市建设工程投资估算指标》为依据^[21]，简易型生物滞留设施为 339 元 /m²，复杂型生物滞留设施为 415 元 /m²，生物滞留设施结构层不含防渗土工膜，渗透塘为 335 元 /m²，小

表 3 研究案例综合径流系数本地参考值与模型模拟值（100 mm 降雨条件）
Tab. 3 Local reference value and model simulation value of integrated runoff coefficient of the study cases (100 mm precipitation)

研究案例	综合径流系数本地参考值	综合径流系数模型模拟值
半山公园	0.20~0.29	0.20
华龙公园	0.25~0.34	0.27
悦来公园	0.32~0.40	0.36
北碚公园	0.39~0.47	0.42
鹅岭公园	0.61~0.67	0.67

注：综合径流系数本地参考值范围由坡面绿地与道路场地径流系数按面积加权计算得到，依据重庆主城径流系数监测研究结果（100 mm 降雨量下），5°~20° 坡面绿地径流系数为 0.09~0.18，20°~45° 坡面绿地径流系数为 0.12~0.22，0°~15° 不透水地面径流系数为 0.91~0.96。



注：图中 BS 为半山公园，HL 为华龙公园，YL 为悦来公园，HES 为鸿恩寺公园，BB 为北碚公园，EL 为鹅岭公园。低为低强度策略，中为中度策略，高为高强度策略。

3

3 研究案例不同策略下排水出口的径流出流总量削减率

Reduction rate of total outflow at drainage outlets under different strategies in the study cases

型湿塘（1 000 m² 以内）为 389 元 /m²，中型湿塘（1 000~5 000 m²）为 348 元 /m²，湿塘造价不含供水成本。 $PV_{O\&M_t}$ 指技术设施在第 t 年的维护成本现值； $FV_{O\&M_t}$ 指设施在第 t 年的维护成本未来值； d 为折现率，按现阶段社会折现率取 8%^[22]； n 为设施运行年限（ $n = 1, 2, \dots, n$ ）； r 为平均通货膨胀率，取 3%^[24]； p 为年运行维护费占初始成本的比例，简易型和复杂型生物滞留设施的 p 值取 8%，湿塘取 3%，渗透塘取 5%^[23-24]。

2.5.3 水文-成本综合绩效值

研究采用在降雨事件*i* 中的水文综合效能 P_{SWM} 与 LCC 的比值，来评估不同方案在降雨事件*i* 中的水文-成本综合绩效值 B_{SWM} ，依据为公式（6~7）^[19]。本研究中 $R_{OV(i)}$ 与 $R_{PF(i)}$ 在水文综合效能评价中视为同等重要，故 P_{SWM} 为两项指标的平均值。

$$B_{SWM(i)} = \frac{P_{SWM(i)}}{LCC}, \tag{6}$$

$$P_{SWM(i)} = \frac{[R_{OV(i)} + R_{PF(i)}]}{2}. \tag{7}$$

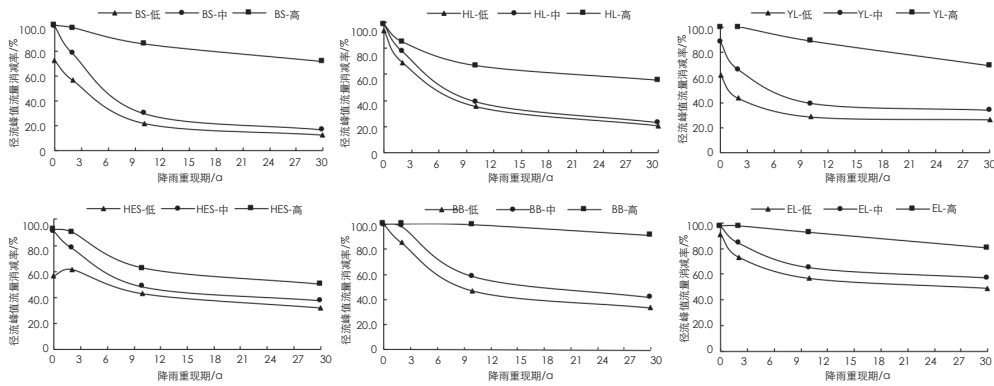
3 绩效分析结果与讨论

3.1 水文效能分析

3.1.1 径流出流总量削减率

图 3 显示了案例在不同改造强度策略下，应对不同降雨事件的排水口的 R_{OV} ，结果表明在相同降雨事件下，排水口径流出流总量一般随景观策略强度的增加而减少， R_{OV} 一般随景观策略强度的增加而增加，该结论与以往研究结论一致^[16, 24]。少量案例如华龙公园、北碚公园、鹅岭公园，在重现期 0.4 a 降雨事件下，中、高强度策略的出流总量无变化，原因在于山地公园中存在少量汇水区由于地形坡度较陡，无法布设管控设施，使得在较小重现期的降雨事件中，即使在高强度策略中也无法达到 100% 的 R_{OV} 值。

在相同策略条件下， R_{OV} 一般随降雨重现



注：图中BS为半山公园，HL为悦来公园，YL为悦来公园，HES为鸿恩寺公园，BB为北碚公园，EL为鹅岭公园。低为低强度策略，中为中度策略，高为高强度策略。

4

4 研究案例不同策略下排水出口径流峰值流量削减率

Reduction rate of peak outflow at drainage outlet under different strategies in the study cases

期的增加而表现下降，该结论与以往研究结论一致^[24]。但个别案例（如鸿恩寺公园）未遵循此规律，低强度策略中，在重现期0.4 a降雨事件下的 R_{OV} 反而低于重现期2 a降雨事件的 R_{OV} 值，其原因在于该公园山顶区域的地形条件使湿塘承接的汇水面有限，其流量管控效能在重现期0.4 a降雨事件中并未充分利用，随着重现期增加到2 a，其管控效能增加。

值得注意的是，高强度策略应对常规降雨事件（如0.4 a、2 a重现期），其 R_{OV} 一般在90%以上，其削减效能较稳定。而中、低强度策略中，相同案例应对0.4 a与2 a重现期的降雨事件时，其 R_{OV} 变化较大，说明技术设施在出流量管控方面的效能有较大的不确定性，以往研究也提出了类似的观点^[16, 24-25]。就山地公园而言，这种不确定可能会因较大的地形条件差异而更为凸显。因此，重庆对山地公园的径流总量管控的目标设定需要依据具体条件而定。

此外，随着降雨重现期的增加，在10 a和30 a重现期下，中、低强度策略的 R_{OV} 明显降低，管控效能不佳，此时高强度策略的 R_{OV} 显著优于中、低强度，说明系统本身应对极端暴雨事件的能力有限，特别是以山顶和山坡地形为营建条件的山地公园，其平坡和洼地汇水面有限，即使在高强度策略下也难以实现出流量的充分控制。

3.1.2 径流峰值流量削减率

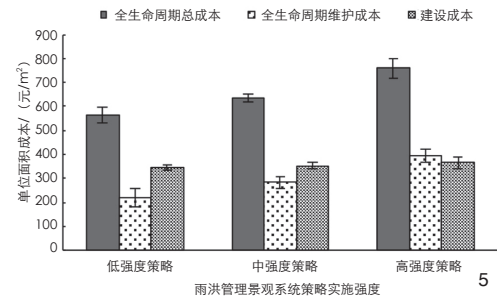
图4分别显示了案例在不同改造强度策

略下，应对不同降雨事件的排水口的 R_{PF} 。结果表明在相同降雨事件下，排水口径流峰值流量一般随策略强度的增加而减少， R_{PF} 一般随策略强度的增加而增加。半山公园、悦来公园、鸿恩寺公园的 R_{PF} 随降雨重现期的增加而迅速降低（图4），上述案例采用中、低强度策略时，在30 a重现期下则完全丧失峰值管控效能，这些公园构建湿塘的平坡和洼地面积占比小，布局分散，且不位于公园的终端汇流出口，使得湿塘的管控效能受限。而在大暴雨事件中，生物滞留设施的滞留容量可能被迅速耗尽，使得整体系统对径流流速和集流时间的控制能力大幅降低。而北碚公园和鹅岭公园，在整体汇流区的中部及末端有适宜的汇水面布设渗透塘或湿塘，在30 a重现期下，高强度策略的 R_{PF} 分别达到92.1%和82.9%。说明了雨洪管理景观系统受公园地形条件差异的影响，在极端降雨事件峰值流量管控上同样具备不确定性。

而针对常规降雨事件（0.4 a和2 a重现期），高强度策略的 R_{PF} 均在85%以上。即使是低强度策略，应对0.4 a重现期降雨，所有案例 R_{PF} 均在50%以上。说明山地公园中雨洪管理措施一般能有效应对常规降雨事件的峰值流量管控。

3.2 全生命周期成本分析

研究案例中不同雨洪管理景观策略LCC采用第2.5.2节所述方法计算。结果表明，案例在低、中强度策略下， $C_{capital}$ 值均高于全



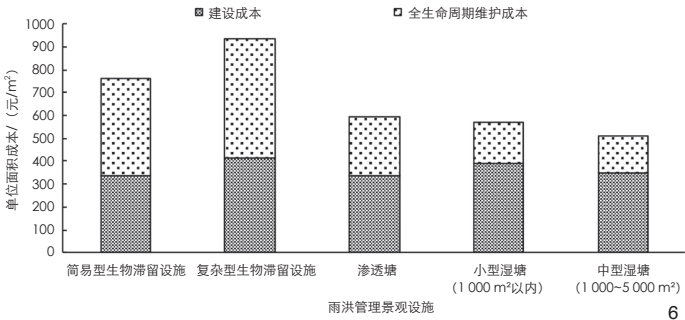
5 研究案例雨洪管理景观系统策略的单位面积建设成本、全生命周期维护成本与总成本
Per unit area construction cost, life cycle maintenance cost and total cost of stormwater management landscape system strategies in the study cases

生命周期的 $PV_{O&M}$ 值，维护成本占LCC达33.06%~48.78%。高强度策略下，设施全生命周期的 $PV_{O&M}$ 值已经超过建设成本或两者接近。另外不同策略的单位面积 $C_{capital}$ 值接近；但3种策略下的单位面积的全生命周期的 $PV_{O&M}$ 值随策略强度增加而明显递增，使其单位面积LCC值递增（图5）。说明雨洪管理景观的长期维护成本高，须纳入总体投入成本考虑。

相比中、低强度策略，高强度策略的全生命周期的 $PV_{O&M}$ 值及LCC明显增加，且高强度策略下生物滞留设施的LCC占据整体技术方案LCC的最大组成。结果表明：生物滞留设施的全生命周期的 $PV_{O&M}$ 值高于 $C_{capital}$ 值，这一结论与Chui等的研究一致^[7]，渗透塘、湿塘的 $C_{capital}$ 值高于全生命周期的 $PV_{O&M}$ 值（图6）。因此山地公园雨洪管理景观改造中，应尽可能利用汇水低势平洼地营造渗透塘、湿塘，并控制生物滞留设施的应用规模，有利于降低LCC。

3.3 水文-成本综合绩效分析

图7显示了研究案例的 B_{SWM} ，即LCC消耗每万元所达到的水文效能。结果显示：在相同重现期降雨下， B_{SWM} 值一般随着策略强度的增加而减小，且以常规降雨事件为管控目标时，中、低强度的综合绩效值一般要明显大于高强度策略，总体而言，低强度策略的综合绩效最佳，但这种差异随着降雨重现期的增加而减小，在30 a重现期时，多数案例3



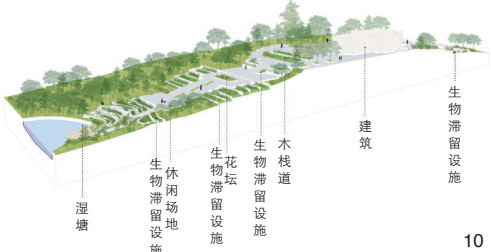
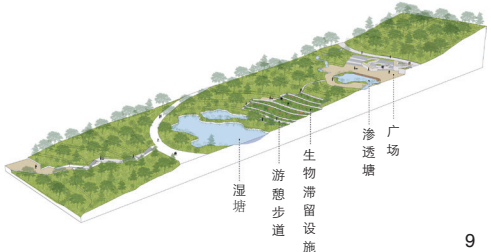
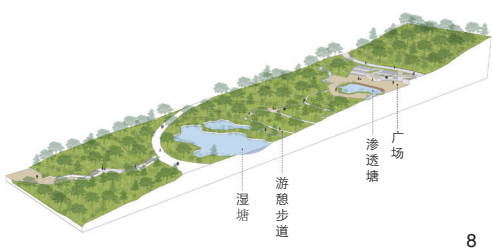
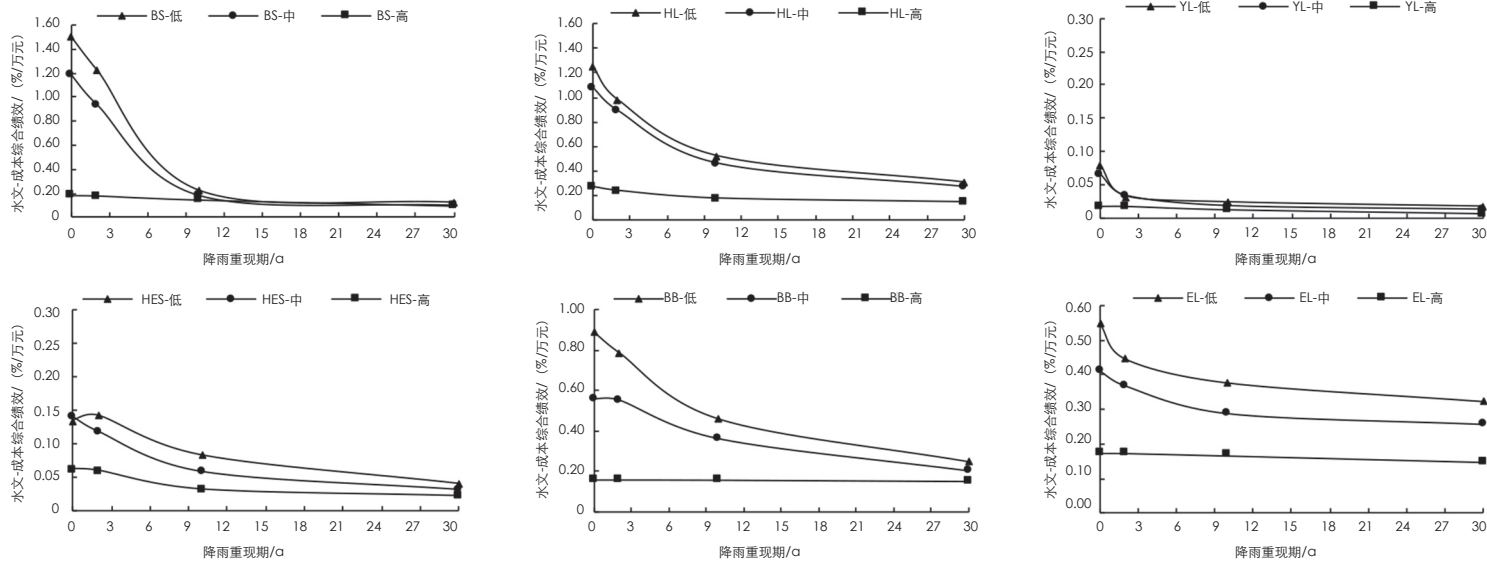
6 雨洪管理景观设施的单位面积建设成本与全生命周期维护成本
Per unit area construction cost, life cycle maintenance cost of stormwater management landscape facilities

7 研究案例不同策略下水文—成本综合绩效
Hydrological cost effectiveness under different strategies in the study cases

8 山坡型公园雨洪管理景观系统低强度策略
Low-intensity strategy of stormwater management landscape system in hillside landform parks

9 山坡型公园雨洪管理景观中强度策略
Medium-intensity strategy of stormwater management landscape system in hillside landform parks

10 山顶型公园雨洪管理景观高强度策略
High-intensity strategy of stormwater management landscape system in hilltop landform parks



种策略的 B_{SWM} 值接近。

综合结果分析表明：1）当雨洪管理景观系统评估以 B_{SWM} 最佳为依据，案例一般可采用低强度策略（图 8），但该策略在不同地形条件的案例中其水文管控效能差异较大；2）当以常规降雨事件为管控目标，满足重庆本地年径流总量控制率 80%~85%，研究案例更宜采用中强度策略（图 9）；3）对于以缓坡地形为主的案例，可以极端降雨事件（如 10 a 或 30 a 重现期）为管控目标，在成本预算充沛的情况下，采用高强度策略（图 10），但由于

雨洪管理系统的水文管控效能存在较大不确定性，该策略需谨慎使用。

4 结论

山地公园雨洪管理景观系统的水文管控效能具有较大不确定性，对山地公园水文管控目标的设定需依具体条件而定。

不同雨洪管理景观系统策略的单位面积建设成本接近，但景观系统的单位面积维护成本随策略强度的增加而明显增加，长期维护成本高。高强度策略下，生物滞留设施的

全生命周期成本（LCC）占雨洪管理景观系统方案的 LCC 的比重大，应控制其设计规模，降低方案的 LCC 值。

在相同重现期降雨下， B_{SWM} 一般随着策略强度的增加而减小，在应对常规降雨事件时，低强度策略效益优势明显，但在应对极端降雨事件（如 30 a 重现期）时，多数案例在不同策略下的 B_{SWM} 值接近。

当以水文—成本综合绩效（ B_{SWM} ）值最佳为依据，研究案例一般可采用低强度策略，即利用汇流末端的绿地、水池改造或营建成

湿塘、渗透塘；当需满足年径流总量控制率80%~85%，案例更宜实施中强度策略，即在低强度策略布局基础上，在中上游汇水区低势处增设小规模生物滞留设施，设施面积在本研究案例中占所承接子汇水区面积的3.5%~5.7%；对于个别缓坡地形案例，成本投入充足时，可考虑对极端降雨（10 a或30 a重现期）事件的管控，采用高强度策略，即在中强度策略布局基础上增加生物滞留设施，其布设面积一般不超过所承接子汇水区面积的10%。

上述研究结论基于山坡、山顶地貌的公园案例，未探讨山坡型公园承接外部雨洪的情况；研究未涉及山麓、山谷以及复合型地形案例；改造策略中运用的技术设施类型有限；降雨情景仅考虑了典型重现期降雨事件，未考虑长期连续降雨情景下的水文效能。研究结论具有一定局限性，后续研究可在上述层面拓展。

总体而言，本研究将水文—成本综合绩效评估方法应用到重庆海绵城市建设的主体对象——山地公园，从不同视角进行了绩效评估，提出不同管理目标或应用场景下的景观系统韧性策略，该结论具有一定创新性，为重庆及亚热带湿润气候条件下，探索山坡、山顶地貌的城市公园其雨洪管理景观系统的构建与方案决策提供了重要参考。

致谢 (Acknowledgments):

感谢西南大学园艺园林学院张建林教授、重庆道合园林景观设计有限公司、重庆市风景园林规划研究院、重庆市风景园林学会为本研究提供了研究案例的基础资料数据；西南大学资源环境学院何丙辉教授团队在其实验室对土壤环刀样品饱和渗透率进行了测定；西南大学园艺园林学院研究生唐诗娴、李运星、陈钰洁、郑瑞对图1、3、9~11进行了辅助绘制，对数据进行了整理和校对。

参考文献 (References):

[1] 刘家琳, 李媛媛, 张建林. 重庆山地公园子汇水区产流特征与雨洪利用改造策略[J]. 西部人居环境学刊, 2019, 34 (6): 42-49.
[2] 孔花. 山地城市绿地和水泥道路径流系数的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
[3] 苏醒, 王琳, 李多. 山地公园海绵城市建设实践: 以悦来新城会展公园为例[J]. 园林, 2017 (4): 46-49.

[4] 刘家琳, 张建林. 基于SWMM模型的山坡型公园子汇水区地表产流特征: 以重庆地区为例[J]. 中国园林, 2018, 34 (6): 81-87.
[5] 侯庆贺, 袁晓洋, 刘润, 等. 城市山地公园水环境优化设计方法研究[J]. 风景园林, 2020, 27 (12): 98-103.
[6] 李俊奇, 闫霄雯, 王耀堂, 等. 基于雨水蓄排结合的城市公园绿地规划设计方法及案例分析[J]. 给水排水, 2020, 56 (4): 92-98.
[7] CHUI T F M, LIU X, ZHAN W T. Assessing Cost-Effectiveness of Specific LID Practice Designs in Response to Large Storm Events[J]. Journal of Hydrology, 2016, 533: 353-364.
[8] HUA P, YANG W, QI X, et al. Evaluating the Effect of Urban Flooding Reduction Strategies in Response to Design Rainfall and Low Impact Development[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 242: 118515.
[9] YANG W, BRÜGGEMANN K, SEGUYA K D, et al. Measuring Performance of Low Impact Development Practices for the Surface Runoff Management[J]. Environmental Science and Ecotechnology, 2020, 1: 100010.
[10] 重庆市气象局. 重庆市气候概况[EB/OL]. (2010-09-02) [2020-12-29]. <http://cq.weather.com.cn/gwym/09/974787.shtml>.
[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南: 低影响开发雨水系统构建(试行)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
[12] 重庆两江新区管理委员会. 两江新区海绵城市建设模型应用技术导则(试行)[EB/OL]. (2018-03-13) [2020-12-29]. <http://ljt.liangjiang.gov.cn/public/detail/645/0>.
[13] United States Environmental Protection Agency. Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1[EB/OL]. (2015-09) [2020-12-29]. <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm-version-51-users-manual>.
[14] 中国林业科学研究院. 森林土壤渗透率的测定: LY/T 1218-1999[S]. 北京: 国家林业局, 1999.
[15] 刘家宏, 陈根发, 王海潮, 等. 暴雨径流管理模型理论及其应用: 以SWMM为例[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
[16] 成玉宁, 杨锐. 数字景观: 中国第四届数字景观国际论坛[M]. 南京: 东南大学出版社, 2019: 73-85.
[17] United States Environmental Protection Agency. Storm Water Management Model Reference Manual Volume I-Hydrology[EB/OL]. (2016-01-29)[2020-12-29]. <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>.
[18] ECKART K, MCPHEE Z, BOLISSETTI T. Multiobjective Optimization of Low Impact Development Stormwater Controls[J]. Journal of Hydrology, 2018, 562: 564-576.
[19] 重庆市城乡建设委员会. 关于发布重庆市暴雨强度修订公式与设计暴雨雨型的通知[EB/OL]. (2017-08-23) [2020-12-29]. <http://www.jianbiaoku.com/webarbs/book/114652/3511888.shtml?rm=f>.
[20] Washington State Department of Ecology. Cost Analysis Report: Cost Analysis for Western Washington LID Requirements and Best Management Practices[R/OL]. (2013-06-28)[2020-12-29]. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-10/documents/lid-gi-programs_report_8-6-13_combined.pdf.
[21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设工程投资估算指标: ZYA1-02 (01) -2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
[22] 曹申, 董聪. 绿色建筑全生命周期成本效益评价[J]. 清

华大学学报(自然科学版), 2012, 52 (6): 843-847.
[23] 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.
[24] ECKART K, MCPHEE Z, BOLISSETTI T. Performance and Implementation of Low Impact Development: A Review[J]. Science of the Total Environment, 2017, 607-608: 413-432.
[25] WANG M, ZHANG D Q, 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: 423-432.

图表来源 (Sources of Figures and Tables):

本文所有图表均由作者绘制, 图1~2中半山公园、华龙公园地形底图由重庆道合园林景观设计有限公司提供, 悦来公园地形底图由重庆市风景园林规划研究院提供, 北碚公园、鹅岭公园、鸿恩寺公园地形底图由重庆市风景园林学会提供。

(编辑 / 肖书文 王—兰)