

山东建筑大学樱花园 LID 雨水系统设计与景观化实现

Design and Landscape Realization of LID Rainwater System in the Cherry Garden of Shandong Jianzhu University

王玉叶¹ 李端杰¹ 王洁宁^{2*}
WANG Yuye¹ LI Duanjie¹ WANG Jiening^{2*}

(1.山东建筑大学设计集团有限公司, 济南 250013; 2.山东建筑大学, 济南 250101)
(1. Shandong Jianzhu University Design Group Co., Ltd., Jinan, Shandong, China, 250013; 2. Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong, China, 250101)

文章编号: 1000-0283(2022)12-0110-09
DOI: 10. 12193 / j. laing. 2022. 12. 0110. 015
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2022-01-20
修回日期: 2022-10-29

摘 要
全球极端天气的频繁出现, 快速扩张的不透水下垫面导致城市雨水径流量不断增加, 随着海绵城市理念的提出, 低影响开发 (LID) 雨水系统对城市雨洪的调节作用受到重视。以山东建筑大学樱花园建设为契机, 尝试将海绵措施的选择、体系构建、景观化处理和实施融入设计和施工建设全过程, 运用SWMM模型对方案进行定量验算, 比选出最优 LID 设施组合和规模, 结果表明: 在 1 a、2 a、5 a 和 10 a 重现期下, LID 设施对系统峰值削减率分别为 23.35%、23.42%、23.18% 和 23.10%, 峰现时间分别推迟 2 min、3 min、5 min 和 7 min, 模拟数据表明 LID 设施能够有效降低地表径流和峰值流量, 延缓了峰现时间, 达到和开发建设前基本吻合的效果。积极寻求雨洪管理与园林景观的交汇点, 将海绵设施景观化, 以多样组合式透水铺装、自然旱溪式排水明沟、精细配植式雨水花园和功能复合式蓄水池等策略, 进行了一次兼具功能性又具景观性的海绵绿地建设实践。

关键词
雨洪管理; 低影响开发; 海绵绿地; 暴雨洪水管理; 景观化

Abstract
The frequent occurrence of extreme weather worldwide and the rapid expansion of underlying impervious surfaces lead to the continuous increase of urban rainwater runoff. With the proposal of the concept of Sponge City, the regulation effect of low impact development (LID) rainwater system on urban rainwater and flood has been paid attention to. Taking the cherry blossom garden construction of Shandong Jianzhu University as an opportunity, this paper attempts to integrate the selection, system construction, landscape treatment, and implementation of sponge measures into the whole process of design and construction, quantitatively checking the scheme by using SWMM model and compare and select the optimal lid facility combination and scale. The results show that under the return periods of 1 a, 2 a, 5 a and 10 a, the peak reduction rates of lid facilities to the system are 23.35%, 23.42%, 23.18%, and 23.10%, respectively, and the peak time is delayed by 2 min, 3 min, 5 min, and 7 min respectively. The simulation data show that lid facilities can effectively reduce the surface runoff and peak flow, delay the peak time, and achieve an effect basically consistent with that before development and construction. Actively seek the intersection of rainwater and flood management and garden landscape, landscape sponge facilities, and carry out a functional and landscape sponge green space construction practice with the strategies of diversified combined permeable pavement, natural dry stream open drainage ditch, fine planting rainwater garden, and functional composite reservoir.

Keywords
stormwater management; low impact development; sponge green space; storm water management model; landscaping

王玉叶
1990 年生 / 女 / 山东莱阳人 / 硕士 / 工程师 /
研究方向为风景园林规划设计与理论

李端杰
1965 年生 / 男 / 山东济阳人 / 硕士 / 正高级
工程师 / 研究方向为风景园林规划设计

王洁宁
1979 年生 / 女 / 山东济宁人 / 硕士 / 副教授 /
研究方向为风景园林规划设计

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

随着城市快速扩张, 城市下垫面不透水率增大, 改变了原有的水生态和气候状况, 导致灾害频发。中国气象局观测资料显示, 近 70 年来全球气候变暖, 强降雨次数显著增加, 未来出现极端强降雨的可能性越来越高^[1]。从 2000 年初对低影响开发 (Low Impact Development, LID) 雨水综合利用的探索, 到“海绵城市”概念在《2012 低碳城市与区域发

展科技论坛》的首次提出^[2]，现代城市雨洪管理研究旨在降低洪涝灾害、提高雨水资源化利用。国内外普遍采用手册指南来指导LID实施建设，如2014年住房和城乡建设部颁发了《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建（试行）》^[3]（简称《技术指南》），提供了17类低影响开发设施；美国《城市地区低影响开发（LID）设计手册》提出了工程实施的21种不同设施^[4]。

近年来，诸多学者从规划、环境、景观、地理、生态和经济等学科掀起了海绵城市的研究热潮，包括海绵城市的基本内涵、实现途径、模型构建，国内外海绵城市景观设计案例和海绵景观设计的发展趋势等。目前研究多集中于满足功能要求层面，追求快速、高效、节省的方式解决雨洪问题，而对海绵城市建设的美观、生态化和人性化的关注较少^[5]，且主要集中在理论层面，或从具体措施分析角度探讨海绵城市景观化研究^[6]，或从微观、中观和宏观层面尝试构建海绵城市景观理论化体系^[7]。如何将海绵设施和景观有机融合，改变其补丁化、工程化的外观，将成为未来海绵城市发展的重要研究方向^[8]。

文章将海绵绿地理念融入景观设计和施工的全过程，通过SWMM模型进行雨洪计算、分析与模拟，推敲适宜的控制措施和设施规模^[9]，结合景观方案对不同重现期降雨条件下的径流情况进行推演，降低了建设的盲目性^[10]，并在具体施工中推敲优化，通过LID措施景观化处理，将海绵系统和景观系统融糅，促进自然水系统均衡发展，获取良好的景观效果。

1 研究区域及内容

高校校园作为城市中相对独立的组成单元，在校园内推广海绵建设具有良好的示范

作用和影响力^[11-12]。因此，本文选取山东建筑大学樱花园为研究对象，在塑造优美环境的同时实现LID功能最优化，促进水资源的协调均衡，打造海绵城市建设的新兴示范载体，为相关高校建设海绵校园提供借鉴。山东建筑大学围绕雪山东北侧呈弧形布局，研究区域位于校园核心生态廊道南端的樱花园。由于樱花园内增建三馆（艺术馆、校史馆和档案馆）和综合实训楼两组建筑，需进行景观更新。场地整体西高东低、南高北低，最大高差为14 m，总占地面积36 720.60 m²。该区域不仅要解决场地内部的雨水径流，还要解决来自西南方向雪山山体的汇水，外部汇水面积合计约56 490 m²。

1.1 场地特征

（1）校园绿色廊道的衔接。场地位于校园绿色廊道南端，西南侧紧邻雪山山脚，原场地片植樱花，尽可能保留樱花以延续场所记忆。场地西南侧有山体汇水且高差大，下雨时地表径流快，后续设计需要采取措施延缓地表径流并增加滞留下渗措施，并与周围现有景观进行对接。

（2）新增建筑的影响。新增建筑体量较大，面临新增建筑和谐融入周围自然山体景观的挑战，建筑尽量紧贴场地西侧，留出较宽的绿化区域，为更好地解决屋面汇水问题预留了空间。建筑屋顶在满足荷载要求的情况下增设屋顶绿化，同时考虑可上人部分的视觉对景与安全防护问题。

（3）场地的活力需求。建筑三馆决定了樱花园需要有不同尺度的空间，满足多样的功能要求，为师生提供丰富的生活学习和交流空间。场地活动面积与海绵绿地面积的比例是设计的重点。如何将海绵设施景观化，成为能触发多元互动的优美场所，增加场地

活力，赋予海绵景观一定的参与互动功能是景观设计要解决的关键问题。

1.2 设计目标与内容

项目拟打造LID理念下的新型海绵校园景观示范区，海绵设计景观化处理手法使之成为校园亮点，结合LID设施创造丰富的校园活动空间，营造良好的植物生境。通过景观更新，为师生提供交流思考、阅读学习、休憩娱乐及社团沙龙等校园特色文化活动空间，增强校园的科研教育氛围。

樱花园的方案设计经过多轮方案推演，每轮方案都有与之对应的LID体系设计，两者穿插进行。首先根据地块现状特征和建筑物特点进行水系组织和LID概念框架的构建，然后依据框架进行景观方案的设计和推敲，并在该阶段将LID设施进行比选并糅合到方案中，通过SWMM模型^[13]进行模拟、推演和优化LID的参数和规模，推演是否满足海绵要求，有不满足之处再对方案进行修改，多轮循环后得到最优方案，在最优方案基础上细化设计，通过多样措施进行景观化处理，使LID设施和和谐融入景观方案，又能满足海绵功能要求。

2 LID雨水系统构建

2.1 LID雨水系统控制目标

根据《技术指南》《济南市海绵城市建设导则》《济南市海绵城市专项规划修编》的要求，综合确定年径流总量控制率等相关指标。济南统计年鉴^[14]1983-2020年降雨资料和中国气象数据网^[15]的资料显示，济南年总降水量波动较大，年均降水764.48 mm，日降水量≥50 mm的暴雨日集中在7、8两月，占全年暴雨日数的65%左右；济南市月平均蒸发量最小为61.10 mm（1月），最大为340.30 mm（6月），年总蒸发量为2 263.00 mm。依照年径流总量

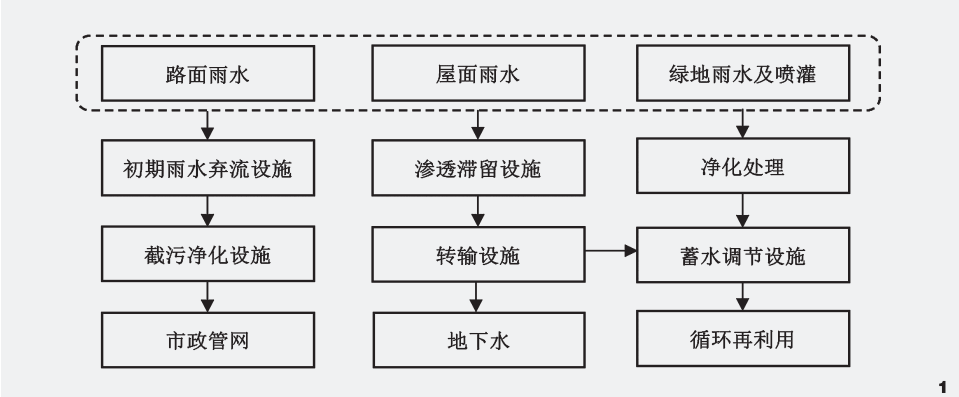


图1 LID雨水系统流程图
Fig. 1 LID rainwater system flow chart

控制率与设计降雨量的关系，年径流总量控制率最佳为80%～85%，年径流总量控制率设置为85%，对应的设计降雨量为41.3 mm。

LID设施受降雨类型、频率、建设与维护等多重因素的影响，结合济南多年降雨规律，综合确定海绵设施对峰现时间的延缓目标为5 min，径流峰值流量控制目标为不超过建设前原地表径流峰值流量。径流污染控制采用悬浮物(SS)总量去除率作为径流污染的控制指标，主要采用生物滞留池、雨水花园、植草沟、植被缓冲带等生态处理措施，以及过滤手段、调蓄池等非生态处理设施，依据

经验，年SS总量削减率不低于60%^[16]。根据《海绵城市建设绩效评价与考核指标(试行)》中的相关定义，以雨水利用量替代自来水的比例作为雨水资源化利用率计算方法^[17]。根据《济南市海绵城市专项规划》要求，雨水资源化利用率不小于6%。

2.2 LID框架构建

2.2.1 LID雨水与水环境设计方案

LID体系总体布局以竖向为控制点进行汇水区划分，确保每个区域都可以做到就近收集雨水，分别对路面雨水、屋面雨水和

浇洒水的收集方式进行整体设计，使控制指标内的雨水不外排，从而减少地表径流量、延缓径流峰值和降低径流污染(悬浮物SS)(图1)。

2.2.2 LID设施比选

通过对设计总调蓄容积、下凹式绿地和透水铺装有效控制容积的计算，确定以绿色屋顶、透水铺装和下凹式绿地为主要渗透设施，蓄水池为存储和调节设施，植被缓冲、干式植草沟和渗渠等为传输设施，共同组成经济高效的LID体系(表1)。

2.2.3 调蓄容积计算

LID设施调蓄容积，根据《雨量控制与利用工程设计规范》(DB11/685-2013)^[18]中径流总量计算公式计算，公式(1)：

$$W=10\phi hF \quad (1)$$

其中， W 为径流总量(m^3)； ϕ 为雨量综合径流系数； h 为设计降雨量(mm)； F 为汇水面积(hm^2)。

景观下垫面和对应径流系数依照规范进行取值(表2)。

用加权平均法计算地块的综合雨量径流

表1 LID设施比选表
Tab. 1 Comparison and selection of LID facilities

技术类型 Technology type	单项设施 Single facility	选用适宜性 Selection suitability	径流峰值控制 Runoff peak control	径流总量控制 Total runoff control	建造费用 Construction cost	维护费用 Maintenance cost	景观效果 Landscape effect
渗透滞留技术	下凹式绿地	宜选用	较强	强	低	低	一般
	透水砖铺装	宜选用	较强	强	低	低	—
	透水沥青混凝土	可选用	较强	较强	高	中	—
	生物滞留设施	宜选用	较强	强	中	低	好
	绿色屋顶	宜选用	较强	强	高	中	好
	雨水花园	宜选用	较强	强	中	中	一般
储存技术	蓄水池	可选用	较强	强	高	中	—
转输技术	干式植草沟	宜选用	弱或很小	强	低	低	好
	渗管/渠	宜选用	弱或很小	较强	中	中	—
截污净化技术	植被缓冲带	宜选用	弱或很小	弱或很小	低	低	一般

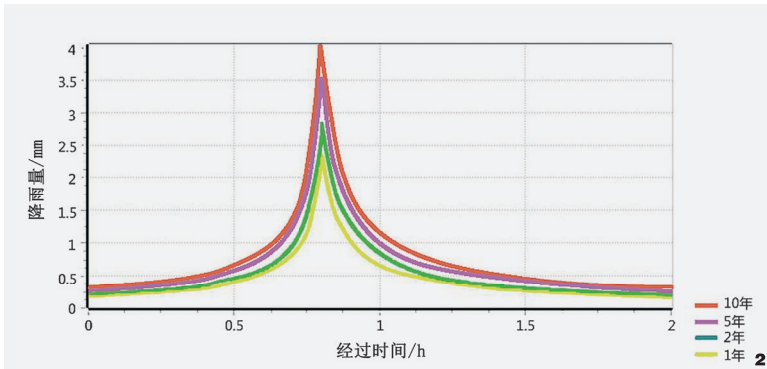


图2 不同重现期2 h降雨强度变化图
Fig. 2 Variation diagram of 2 h rainfall intensity in different return periods

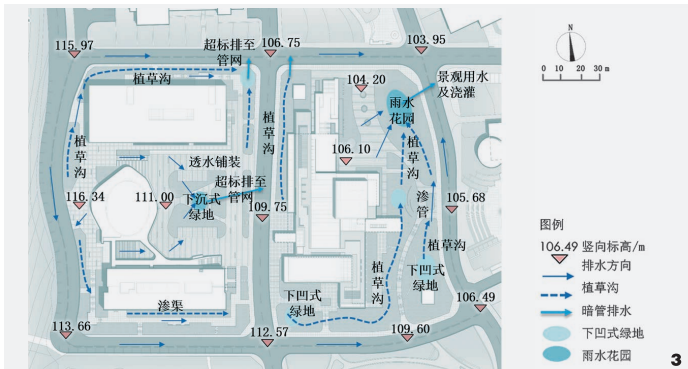


图3 LID设施空间布局示意图
Fig. 3 LID facility space layout diagram

系数 ϕ 为0.47, 故要满足海绵设计指标, 场地现状的调蓄容积应为 $2\,307\text{ m}^3$ 。

2.3 SWMM降雨模拟模型构建

2.3.1 降雨模型参数设置

济南市气象局于2014年11月修订的济南暴雨强度公式, 公式(2):

$$q = \frac{1421.48 \times (1 + 0.932 \lg p)}{(t + 7.347)^{0.617}} \quad (2)$$

其中, q 为平均降雨强度($\text{L/s} \cdot \text{h m}^2$); p 为设计暴雨重现期(a); t 为降雨历时(min)。

根据济南市暴雨强度公式, 模型中设计降雨历时为2 h, 时段间隔为1 min, 重现期选取1 a、2 a、5 a和10 a, 对降雨数据进行模拟(图2)。在一个重现期内, 降雨强度的变化

是一个动态的过程, 在2 h内随着时间的增加降雨强度逐渐变大, 达到峰值(48 min左右)后再慢慢降低, 直到降雨停止。

依据SWMM5.1模型和SWMM5操作手册对汇水区宽度、坡度、不透水性和LID参数设置等进行取值, 同时根据场地具体情况校准指标(表3)。

2.3.2 LID设施空间布局与方案推敲

依据场地实际情况选择合适的LID设施, 如雨水花园、下凹式绿地、透水铺装、植草沟和绿色屋顶等, 并将其在设计空间中组合布局, 确定位置和竖向(图3), 并依此进行景观初步方案设计, 再经过多次推演, 形成较满意的景观方案(图4), 再对该方案进行

SWMM模拟(图5, 图6), 判断模拟结果是否符合要求。

2.4 SWMM模拟结果分析

2.4.1 不同重现期模拟结果分析

依据LID设施布局方案, 通过SWMM模拟研究区的产流和汇流情况, 按照开发建设前、开发建设后和LID设施设置后三种情形, 分别研究其在1 a、2 a、5 a和10 a这4种重现期下的地表径流相关模拟结果(表4)。模拟结果显示, 重现期从1 a到10 a, 未使用LID设施时, 总降雨量从41.36 mm上升到72.85 mm, 总径流量从24.67 mm上升到62.12 mm, 增加了37.45 mm; 使用LID设施, 总径流量从18.91 mm上升到47.77 mm, 增加了28.86 mm。在1 a、2 a、5 a和10 a的重现期下, LID设施对系统径流总量的削减量分别为5.76 mm、8.05 mm、11.45 mm和14.35 mm, 峰值削减率分别达到了23.35%、23.42%、23.18%和23.10%, 因此, 随着重现期的增大, LID设施对于径流总量的削减量逐渐增大, 削减率逐渐降低。

以汇水分区为界, 充分利用透水铺装、下凹式绿地、植草沟等LID设施, 分区对径流污染进行控制, 消减污染负荷。按照《技术指

表2 下垫面径流系数表
Tab. 2 Runoff coefficient of underlying surface

项目 Project	面积/ m^2 Area	径流系数 Runoff coefficient
绿化屋面	1 278	0.4
未绿化屋面	9 804	0.90
不透水铺装或沥青道路	2 687	0.90
设计透水铺装	6 269	0.15
绿地	10 400	0.15
水面	1 228	1.00

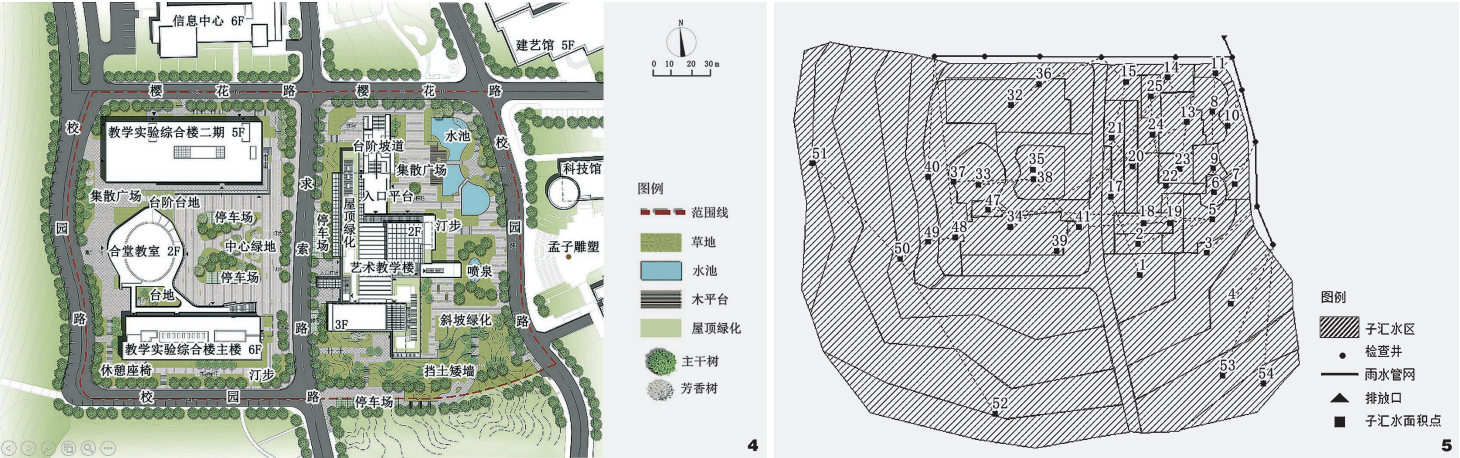


图4 设计过程方案
Fig. 4 Design process scheme

图5 SWMM模型概化图
Fig. 5 Diagram of SWMM model generalization

南》，年SS总量去除率通过年径流总量（年均降雨量×雨量径流系数×汇水面积）加权平均计算得出，下凹式绿地及雨水收集池污染物削减率取值80%，计算得出年SS总量削减率为62.70%；雨水资源利用率为年雨水利用量替代自来水利用量的比例，年雨水利用量通过径流总量按比值换算，自来水利用量由学校提供，结果为6.90%，回用率超过6%，达标。

2.4.2 径流模拟结果分析

分析在不同重现期（1 a、2 a、5 a和10 a）内，场地开发建设前、开发建设后及LID设施设置后的地表径流变化（图7），得到如下结论：（1）使用LID措施后，地表总径流量和峰值流量明显小于LID设施设置前，随着降雨量的增大，LID设施的削减量也逐步增大；径流变化曲线与开发建设前有较高相似度，峰值和流量比开发建设前略低。（2）使用LID措施能够有效延缓峰现时间，且5 a和10 a时延缓峰现时间大于5 min，达到设计预期，10 a延缓峰现时间长达7 min；径流削减量随着重现期增加而增加，而径流削减率整体稳定，重

表3 LID参数设置表
Tab. 3 LID parameter setting

参数分类 Parameter classification	处理层 Treatment layer	参数名称 Parameter name	取值 Value
子汇水区不透水性	无	宽度/m	子汇水面积除以平均最大地表漫流长度，通过SWMM计算
		坡度/%	校园资料估算
		不渗透N值	0.01
		渗透性N值	0.2
		不渗透性洼地蓄水	0.05
		渗透性洼地蓄水	0.1
		无洼地蓄水不渗透百分比/%	25
下凹式绿地模拟	表面	护堤深度/mm	150
		植被容积分数	0.85
		表面粗糙度	0.15
		表面坡度/%	9.6
	土壤	厚度/mm	250
		孔隙率	0.46
		产水能力	0.13
		萎蔫点	0.12
		导水率/(mm/h)	0.23
		导水率坡度	9.6
		吸上水头/mm	3.5
		厚度/mm	100
	蓄水	孔隙比	0.75
		渗水速率/(mm/h)	0.5
	渠下	堵塞因子	0
		流量系数	0
		流量指数	0.5
		偏移高度/mm	6

续表

参数分类 Parameter classification	处理层 Treatment layer	参数名称 Parameter name	取值 Value
干式植草沟模拟	表面	护堤高度/mm	250
		植被容积分数	0.95
		表面粗糙度	0.03
		表面坡度/%	0.1
		草洼边坡	3
雨水花园模拟	表面	护堤高度/mm	300
		植被容积分数	0.5
		表面粗糙度	0.35
		表面坡度/%	33.3
		厚度/mm	400
	土壤	孔隙率	0.45
		产水能力	0.2
		萎蔫点	0.1
		导水率/(mm/h)	50
		导水率坡度	40
		吸上水头/mm	3.5
		护堤高度/mm	30
		植被容积分数	0
透水铺装模拟	表面	表面粗糙度	0.1
		表面坡度/%	0.3
		厚度/mm	100
		孔隙比	0.15
		不渗透表面分数	0
	路面	渗透性/(mm/h)	200
		堵塞因子	250
		厚度/mm	500
	蓄水	孔隙比	0.15
		渗水速率/(mm/h)	250
		堵塞因子	250
	渠下	流量系数	0
		流量指数	0.5
		偏移高度/mm	6
绿色屋顶模拟	表面	护堤高度/mm	30
		植被容积分数	0.7
		表面粗糙度	0.1
		表面坡度/%	1
		厚度/mm	150
	土壤	孔隙率	0.3
		产水能力	0.2
		萎蔫点	0.1
		导水率/(mm/h)	0.5
		导水率坡度	10
		吸上水头/mm	3.5
		厚度/mm	150
		空隙分数	0.15
	排水材料	粗糙度	0.1

现期为2 a时总径流削减率最大，为23.42%；峰值削减率波动，10 a最优为27.01%。

因此在雨洪管理过程中，设置LID设施是削减地表总径流量和降低峰值流量，延缓峰现时间的有效手段，模型模拟结果满足需求，并以此模型为基础进行后续的LID设施景观化设计。

3 LID景观化实践

通过景观手法将LID雨水系统融入环境中，搭建海绵绿地功能性设施与个性化景观设计的转译平台，实现低投入和更灵活的雨洪缓解措施。对方案的细节进一步景观化处理，依据地形和场地功能，选取适宜LID设施的景观化途径，如蓄水模块以SWMM数据为基础，结合景观池进行设计，干式植草沟设计成旱溪和卵石浅溪，绿色屋顶设计成屋顶花园等，结合透水铺装和下凹式绿地进行精心布局。山体的汇水通过设置曲折小径，结合多层沿山体等高线布置的具有截水汇水功能的旱溪，汇聚到山谷间，注入蓄水池，多余部分溢流到市政管网，同时将水景元素贯穿各主要的景观节点，与现有校园水系网络有机结合。通过丰富的水态造景，增添灵动的感受；以水为媒，形成水系循环系统和喷泉系统，既保证水质又增加了亲水活动的功能。屋顶雨水通过设置花箱吸收部分雨水，其余的通过落水管就近流入LID设施，既发挥海绵绿地雨水径流渗透和吸收功能，又形成良好的校园环境（图8）。

3.1 多样组合式透水铺装

面砖主要采用透水砖，用级配砂石作垫层，垫层内铺设全透型排水软管，将雨水引入绿地或蓄水池（图9）。根据铺装场地位置和功能的不同，设计不同材质的铺装样



图6 雨水径流示意图
Fig. 6 Rainwater runoff diagram

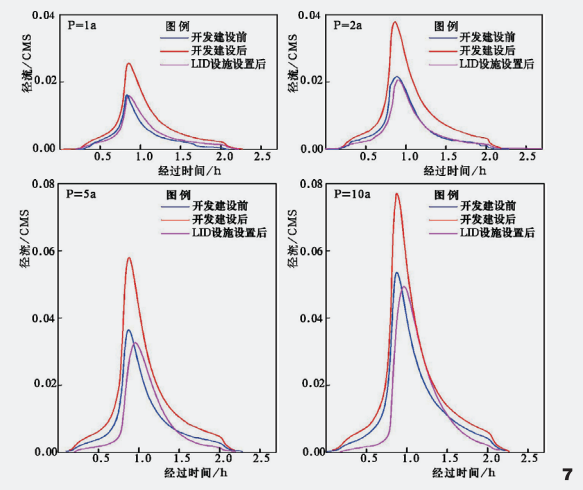


图7 不同重现期降雨径流曲线
Fig. 7 Rainfall runoff curve in different return periods

式，烘托场所氛围，如建筑主出入口的广场，因消防和人流集散需求，以花岗岩铺装为主，搭配树池和休憩座椅，并预留铺装空隙种植天堂草 (*Cynodon dactylon* × *C. transvaalensis* ‘Tifdwarf’)，以降低地表径流，软化硬质界面兼顾景观效果 (图10)。

3.2 自然旱溪式植草沟

干式植草沟依山间坡谷地势而建，以旱溪形式进行景观化处理，底层铺设150 mm厚砂石垫层，上铺一层透水土工布，散置一层河石，在河石中混撒波斯菊 (*Cosmos bipinnata*)、黑心菊 (*Rudbeckia hirta*) 等草花种

子，形成旱溪景观，既有山林野趣，又满足植草沟的功能。台阶和座椅挡墙相结合设计的旱溪，既能缓解高差、防止山体汇水冲刷，又兼具休憩功能，台阶另一侧则为山石开敞、台阶进退参差的景观，利于台阶径流 (图11)。

表4 径流模拟结果汇总表
Tab. 4 Summary of runoff simulation results

重现期 P/a	类型 Type	总降雨量/mm Total rainfall	总径流量/mm Total runoff	径流削减/% Runoff reduction	峰值流量/(m/s) Peak flow	峰值削减/% Peak reduction	综合径流系数 Comprehensive runoff coefficient
1	开发建设前	41.36	20.58	—	5.53	—	0.209891
	开发建设后		24.67	-19.87	4.33	21.7	0.491056
	LID措施设置后		18.91	23.35	3.22	25.64	0.398611
2	开发建设前	50.76	26.89	—	7.28	—	0.226239
	开发建设后		34.37	-27.82	6.04	17.03	0.523583
	LID措施设置后		26.32	23.42	4.46	26.16	0.427056
5	开发建设前	63.45	43.6	—	10.35	—	0.320609
	开发建设后		49.39	-13.28	8.53	17.58	0.578083
	LID措施设置后		37.94	23.18	6.34	25.67	0.473778
10	开发建设前	72.85	61.09	—	13.49	—	0.366087
	开发建设后		62.12	-1.69	11.44	15.2	0.620611
	LID措施设置后		47.77	23.1	8.35	27.01	0.511417

3.3 卵石浅溪式排水明沟

建筑东侧的排水明沟改建成卵石浅溪，与南北水系渠道相连，屋面汇水通过落水口排入下凹式绿地，经渗透过滤后汇入浅溪，另一侧承接路面汇水，水深15 cm，创造了安全的亲水戏水空间，浅溪里遍布河石过滤并沉降雨水中的泥沙，并在末端经铁丝网过滤落叶后汇入映泉池（图12）。

3.4 精细配植下凹式绿地

下凹式绿地比周边绿地低100 mm，主要分布在建筑和较大面积广场周围，承接部分雨水，利用现状高差通过植草沟将其联入整个体系。同时为大乔木设置多种形式的局部下凹式树池，用小木桩或者钢板围一圈鹅卵石或大块河石，增加树池透气性和透水性，不易积尘且性价比高；广场上则采用栅格树池篦子，内种结缕草 (*Zoysia japonica*)，通行方便、视觉效果好（图13）。下凹式绿地以灌木和地被类植物为主，种植抗旱性和耐涝性均良好的马蔺 (*Iris lactea*)、鸢尾 (*Iris tectorum*) 和金叶莼 (*Caryopteris clandonensis* ‘Worcester Gold’) 等，适应下凹式绿地的立地环境。

3.5 功能复合式蓄水池

主要的蓄水池为贝壳喷泉（图14）和映泉池，贝壳喷泉通过溢水和喷泉增加水体含氧量，同时内置花池种植黄菖蒲 (*Iris pseudacorus*)，既净水又美观；映泉池是面积最大的景观池，面积670 m²，水面比周围铺装低1 m，是校园的最低点和主要汇水承接调节区域，雨季映泉池可通过人工调节降低预留空间承接雨水，暴雨时最多承接700 m³的水，完全满足汇水需求。映泉池上设置多层喷泉跌水和水生植物种植池，睡莲 (*Nymphaea tetragona*)、芦苇 (*Phragmites australis*)、梭鱼草



图8 方案平面图
Fig. 8 Schematic plan

图9 铺装透水汇入景观池
Fig. 9 Paved pervious water into the pool

图10 嵌草铺装透水
Fig. 10 Grass embedded pavement pervious

图11 旱溪
Fig. 11 Dry stream

图12 溪流和铺装汇水
Fig. 12 Stream and paved catchment



图13 多形式的下凹式树池
Fig. 13 Multi form sunken tree pool



图14 跌水和雨水收集
Fig. 14 Falling water and rainwater collection

(*Pontederia cordata*) 和泽泻 (*Alisma plantago-aquatica*) 等水生植物净化水质, 同时为鱼类提供食物, 形成水生态系统。

4 结论与讨论

通过SWMM定量模拟, 校园海绵绿地LID雨水系统景观化的设计实践, 总结经验如下: (1) 传统以市政管沟排水为主的雨水处理方式, 造价昂贵且易内涝, 而LID措施依靠自然渗透、自然积存, 使场地开发前后的水文特征基本不变, 扩展了SWMM支撑下的LID措施在更多景观场景中的应用。(2) 根据场地特点构建LID框架, 通过SWMM模拟不同重现期雨洪管理效果, 表明LID措施可削减汇水区的径流量、减少洪峰流量、延后峰现时间和改善水质, 使设计更有可行性和科学性。基于模拟结果, 将LID设施融入设计方案, 进行景观化处理, 从而构建景观方案和LID体系的最优结合方式。(3) 采用“产、学、研、用”协同模式, 邀请相关专家与学校师生参与讨论, 共同规划。高校科研机构负责SWMM模型构建、相关企业结合LID设施进行景观设计和施工, 学校社团辅助管理并进行

各类活动策划等。同时, 将课程教学与设计施工实践相结合, 开展场地问卷调查、分析调研、测绘实践等活动, 局部开辟兼具艺术审美与实践锻炼的实训园圃, 以学年为单位进行景观维护和更新。

LID雨水系统景观化设计是自然资源与工程、技术和艺术紧密结合的过程, 校园作为LID景观化建设的微观层面, 是可以真正将研究与实施相结合的最佳实验场所, 具有典型性和可实验性, 大力推广LID措施景观化的建设理念, 将带动社会其他类型景观设计, 起到示范作用。诚然, 由于设备和技术条件所限, 未能对建成后实际径流数据和模拟数据定量校核, 以验证其准确性。而实际使用情况表明, 5年来历经多次短时强降雨, 未出现场地内涝无法使用、道路积水无法通行情况, 实现了“小雨不湿脚, 大雨不内涝, 水体不黑臭, 热岛有缓解”的设计目标, 希望未来依托学校科研力量进行数据检测, 进一步校验模型和优化设计。

注: 文中樱花园实景图照片由邵勇拍摄, 其余均为作者自绘。

参考文献

- [1] 张强, 韩永翔, 宋连春. 全球气候变化及其影响因素研究进展综述[J]. 地球科学进展, 2005(09): 990-998.
- [2] 吕伟娅, 管益龙, 张金戈. 绿色生态城区海绵城市建设规划设计思路探讨[J]. 中国园林, 2015, 31(06): 16-20.
- [3] 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)[C]//2015城市排水防涝规划设计与海绵城市建设技术专题交流会论文集. 2015: 1-88.
- [4] UACDC. Low Impact Development: A Design Manual for Urban Areas[M]. Fayetteville, AR: University of Arkansas Press, 2010.
- [5] 张乔松. 海绵城市的园林解读[J]. 园林, 2015(07): 12-15.
- [6] 孙健. 基于低影响开发的海绵城市景观化研究[J]. 低碳世界, 2019, 9(1): 151-152.
- [7] 刘颂, 陈长虹. 基于低影响开发的海绵城市景观化途径[J]. 中国城市林业, 2016, 14(02): 10-16.
- [8] 仇保兴. 海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J]. 城乡建设, 2015(02): 8-15.
- [9] 蔡庆拟, 陈志和, 陈星, 等. 低影响开发措施的城市雨洪控制效果模拟[J]. 水资源保护, 2017, 33(02): 31-36.
- [10] 沃夫冈F. 盖格. 海绵城市和低影响开发技术——愿景与传统[J]. 景观设计学, 2015, 3(02): 10-21.
- [11] 杨子君. 大学校园规划与城市规划的协调发展[D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
- [12] 凌琳, 戴慎志. 低影响开发理念下的海绵校园建设初探——以南京工业大学江浦校区为例[C]//城市基础设施高质量发展——2019年工程规划学术研讨会论文集(下册), 2019: 132-151.
- [13] ROSSMAN L. A. Storm Water Management Model User's Manual, Version 5.0[M]. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2010.
- [14] 济南市统计局. 济南市统计局统计[EB/OL]. <http://jntj.jinan.gov.cn/col/col27523/index.html>.
- [15] 国家气象信息中心. 中国气象数据网[EB/OL]. <http://data.cma.cn/>.
- [16] 刘珊珊. 基于LID的校园降雨径流污染控制研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2018.
- [17] 路琪儿, 罗平平, 虞望琦, 等. 城市雨水资源化利用研究进展[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 80-87.
- [18] 徐宏庆, 郑克白, 李艺, 等. 雨水控制与利用工程设计规范(DB11/685-2013)[Z]. 北京市建筑设计研究院有限公司, 2015.