

## LID 理念下的韩国绿色基础设施建设实践与启示 ——以德津湖流域为例

徐晓云<sup>1,2</sup>, 王彪<sup>2</sup>, 金锭汶<sup>2,\*</sup>, 魏甜甜<sup>3</sup>, JEONG Pooreum<sup>2</sup>

(1. 山东农业工程学院 林业工程学院, 济南 250100;

2. 全北国立大学 农业生命科学院, 全州 54896; 3. 河南农业大学 风景园林与艺术学院, 郑州 452000)

**摘要:** 韩国德津湖流域因水质恶化被指定为优先治理水域。近些年, 该流域通过水生态修复项目, 重获可持续发展的生态安全城市面貌和水友好型城市宜居环境。以德津湖流域为研究区域, 梳理和介绍了其水生态修复过程中关于“德津湖流域 LID-绿色基础设施建设项目”的实施背景、相关政策、技术方法、实践应用及其产生的协同效益, 进而分析总结出其水生态修复实践的方法和具体策略, 以期从低影响开发、多组织协作和多目标统筹 3 个方面为中国城市水生态修复建设提供借鉴与启示。

**关键词:** 低影响开发; 绿色基础设施; 水生态修复; 雨水管理

中图分类号: TU986.4<sup>+</sup>9

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2024)03-0071-08

## Practice and enlightenment of green infrastructure construction in South Korea based on LID concept: a case of Deokjin Lake basin

XU Xiaoyun<sup>1,2</sup>, WANG Biao<sup>2</sup>, KIM Jeongmoon<sup>2,\*</sup>, WEI Tiantian<sup>3</sup>, JEONG Pooreum<sup>2</sup>

(1. College of Forestry Engineering, Shandong Agriculture and Engineering University, Jinan 250100, China;

2. College of Agriculture and Life Sciences, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, South Korea;

3. College of Landscape Architecture and Art, Henan Agricultural University, Zhengzhou 452000, China)

**Abstract:** Due to the deteriorating water quality, the Deokjin Lake basin in South Korea was once designated as a national water area prioritized for treatment. After years of water ecological restoration, this region has regained its urban identity as a sustainable and ecologically safe area and its livable environment as a water-friendly city. Taking the Deokjin Lake basin as the research object, this paper introduces the implementation background, relevant policies, technical methods, practical application and synergistic benefits of “Deokjin Lake Basin LID-Green Infrastructure Construction Project”, and then analyzes and summarizes the specific methods and strategies employed in the practice of its water ecological restoration, hoping to provide reference and enlightenment for urban water ecological restoration and construction in China from three perspectives: low-impact development, multi-organizational

收稿日期: 2022-06-01

基金项目: 安徽省高校人文社科研究重点项目 (SK2021A0312)

作者简介: 徐晓云 (1993—), 女, 山东青岛人。博士, 讲师, 主要从事乡村景观、风景园林规划设计与理论等方面的研究。E-mail: 1074681910@qq.com。

\* 通信作者: 金锭汶 (1967—), 男, 韩国全罗北道全州人。博士, 教授, 博士生导师, 主要从事传统造景历史与理论、城市景观空间设计等方面的研究。E-mail: jm@jbnu.ac.kr。

collaboration and multi-objective coordination.

**Key words:** low-impact development; green infrastructure; water ecological restoration; stormwater management

当今,全球各个国家普遍面临着由于气候变化和城市化导致的城市旱涝灾害、水源污染等环境挑战。各国也都在积极采取符合当地实际情况的生态管理措施,例如澳大利亚的“水敏感城市”(Water Sensitive Urban Design, WSUD)、丹麦的“蓝绿基础设施”(Blue-Green Infrastructure, BGI)、英国的可持续排水系统(Sustainable Urban Drainage Systems, SUDS)、新西兰的低影响城市设计(Low Impact Urban Design and Development, LIUDD)、中国的“海绵城市”(Sponge City),亦或是美国的“低影响开发”(Low Impact Development, LID)和最佳管理措施(Best Management Practices, BMPs)等<sup>[1]</sup>。虽世界各地有着不同的称谓,且实际实施措施也存有差异,但有着共同的实践理论基础——低影响开发理念。LID 源于 20 世纪 90 年代的美国马里兰州,是一种创新的生态雨水管理方法。该技术通过增加雨水渗透,致力于使城市化进程中的水循环回归到开发前的自然状态<sup>[2]</sup>。LID 因适应性强且能够有效减少雨水径流、控制面源污染,在全球范围内受到了广泛的推崇和应用。

中国基于 LID 理念的雨水管理研究和应用起步较晚,但随着 2014 年海绵城市建设的提出,LID 在中国得到了快速的推广,其理论研究内容不断丰富。通过近 20 年相关文献分析得知,LID 雨水管理体系虽已在各个尺度的城市建设中应用,但还是以小尺度的居住区建设为主。近些年中国低影响开发理念与实践不断深入和完善,其研究对象从单一的 LID 技术措施转向组合措施综合应用<sup>[3-4]</sup>;研究规模从城市单一示范区域转变为城市生态规划建设层面<sup>[5]</sup>;研究方法也从单一的模型评估转变为多技术多学科综合研究应用<sup>[6]</sup>。中国低影响开发实践已从初期的城市雨洪管理向多技术综合的城市水生态修复和保护、城市乃至乡村地区的生态规划、生态系统完整性等方面延伸拓展<sup>[7-9]</sup>,目前尚处于探索阶段,有必要向已有的成功案例寻求经验。笔者选取韩国德津湖流域为例,梳理并介绍了其水生态修复过程中关于“德津湖流域 LID-绿色基础设施建设项目”的实施背景、相关政策、技术方法、实践应用及其产生的协同效益,以期通过对德津湖流域水生态修复实践的具体方法与技术分析研究,为我国海绵城市建设以及类似城市水环境修复与可持续发展实践提供借鉴。

## 1 研究背景

德津湖流域(图 1)位于韩国全罗北道全州市,面积约 3.77 km<sup>2</sup>,主要由平原和丘陵组成,地势整体东高西低,流域内最高点位于德津湖以东约 2.3 km 处的道率峰(118 m)。据《中宗实录》和《东国輿之胜览》等古文献记载,德津公园里的德津湖是为了保存朝鲜王朝发祥地——全州市的气度而建,是区域内重要的自然生态资源,也是全州历史、文化和居民记忆的地方,具有重要的历史和文化价值<sup>[10]</sup>。过去,有 3 条自然河流(明智河、大地河、莲花河)流入德津湖,使其自然水循环功能能够顺利进行,从而保持良好的水质状态。

随着城市化进程的加快及盲目开发,上游流过的 3 条自然河流被截断,仅靠降雨和地下水补给难以满足德津湖的水循环,这是导致德津湖水生态质量急剧恶化的最主要原因<sup>[11]</sup>。对此,相关部门、专家、学者展开调查研究和讨论,就恢复德津湖上游古水渠(原有自然河流)流入德津湖的方案达成共识,即通过加强流域内自然雨水下渗补给地下水,从而维持德津湖的水循环,以此提出推进 LID-绿色基础设施建设项目计划。



图 1 德津湖流域(依据 NAVER 地图绘制)

## 2 实施轨迹

为保护、延续和提升德津公园千年历史文化,2011年全州市提出了德津公园名胜化的愿景,涵盖了“千年之水”“千年村庄”“千年森林”“千年之路”及“千年文化”5个领域。为顺利推进该愿景实施,2014年底全州市政府向环境部和国民议会提交了解决德津湖水生态环境问题的提案,并成功通过。德津湖流域成为韩国优先治理水域,并投资337亿韩元进行大规模的生态修复工程,包括LID-绿色基础设施建设项目。

定量化研究对于实现低影响开发、提升项目可持续发展至关重要。因此,2015年底,全州市政府联合相关部门利用数字技术对流域内的环境系统进行动态模拟,分析了渗透设施的基底存储量、渗透量以及项目可能遇到的问题,并发布了《全州德津湖流域LID-绿色基础设施建设项目基本设计意见》<sup>[12]</sup>(以下简称《意见》)。《意见》详细介绍了项目的基本概况、实施方向、执行计划、存在问题及解决方案,并重点提出对LID渗透设施的安装全程进行严格监测。《意见》中还借鉴了各国优秀案例法则,综合研判项目的经济诱因、组织领导力、技术创新力以及项目承包方的专业能力对项目推进效率的影响。此外,为进一步推进“德津公园流域LID-绿色基础设施建设项目”,政府积极向当地居民及区域共同体进行LID设施的初期宣传、问卷和普及教育工作,尊重、了解使用者的意愿并合理地加以实施<sup>[13]</sup>。这一系列措施进一步加强了项目的可持续性,为德津公园流域的未来发展奠定了坚实基础。

## 3 技术选择与应用

低影响开发不仅仅是一种理念,更是一种实践性的技术。在实地运用中需要因地制宜地将这种自然的模式进行转换、实施<sup>[14]</sup>,尽可能减少对自然环境要素与系统的改变,以满足人类开发建设的需求。德津湖流域水生态修复项目主要根据场地的自然水文条件和土质特点选取设置点,并结合项目预算及经济因素选择构建绿色基础设施,包含植被型设施、渗透设施、雨水利用设施等。为有效改善上游古水渠与德津公园内水系的关系,充分利用雨水资源,恢复自然水文循环,项目将多种LID设施设置在流域内的多个节点,从整体构建德津湖流域健康、生态的雨水循环系统。

### 3.1 植生滞留池(生物蓄水池)

植生滞留池设施(图2)适用于处理污染较严重的初期雨水,也可用于处理污染较轻的道路雨水,规模不宜太大,宽度至少在0.5 m以上。它主要由带植被的土壤层、过滤层(砂层或无纺布)和碎石层组成。其中,土壤层厚度需根据植被而定,一般为300~600 mm。该项目主要将植生滞留池设置在百济大道两侧,动物园南停车场旁,体育公园、全北大学及其附属医院的人行道附近,将现有的绿地空间规划成凹陷形态,低于道路路面100~200 mm,以便减排高流量雨水。为防止土壤层介质流失及周围原土侵入,土壤层底部需设置透水无纺布隔离。碎石层则起到排水作用,厚度为300 mm。为进一步提高植生滞留池的调蓄作用,可在碎石层埋置管径为150 mm的有孔排水管,碎石应洗净且粒径不小于穿孔管的开孔孔径,以免造成堵塞。若设置在道路旁或者市区内,为了确保交通视野和景观连续性,植被高度不应超过1.2 m。

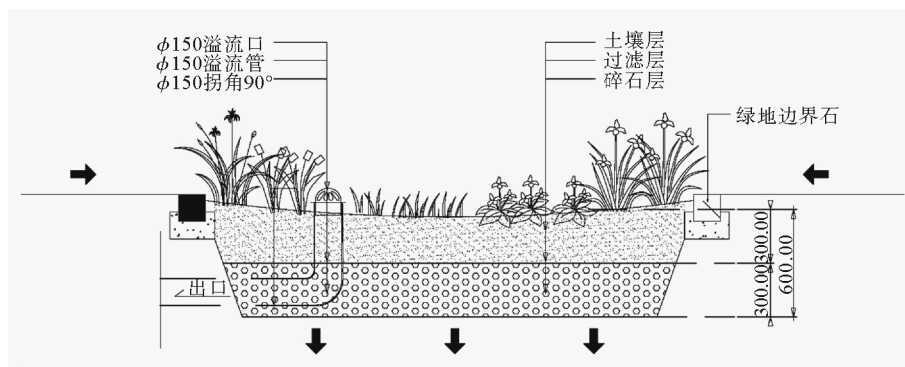


图2 植生滞留池结构(单位:mm)

### 3.2 湿地型滞留池

湿地型滞留池(图3)适用于具有一定汇水面积的开敞空间。该措施将人工湿地巧妙地植入到场地规划中,旨在不破坏场地原生态的基础上,通过模拟自然湿地的滞蓄、过滤、净化、下渗等功能,实现对雨水及外来的非点源污染物的有效控制;并通过种植不同习性的水生植物来增强水生态系统的稳定性和多样性,增强景观效果。该项目主要结合现有地形地势,在临近德津湖区域设置多个湿地型滞留池,不仅为鸟类、昆虫等提供了理想栖息地,而且有效提升了水体的净化效率。

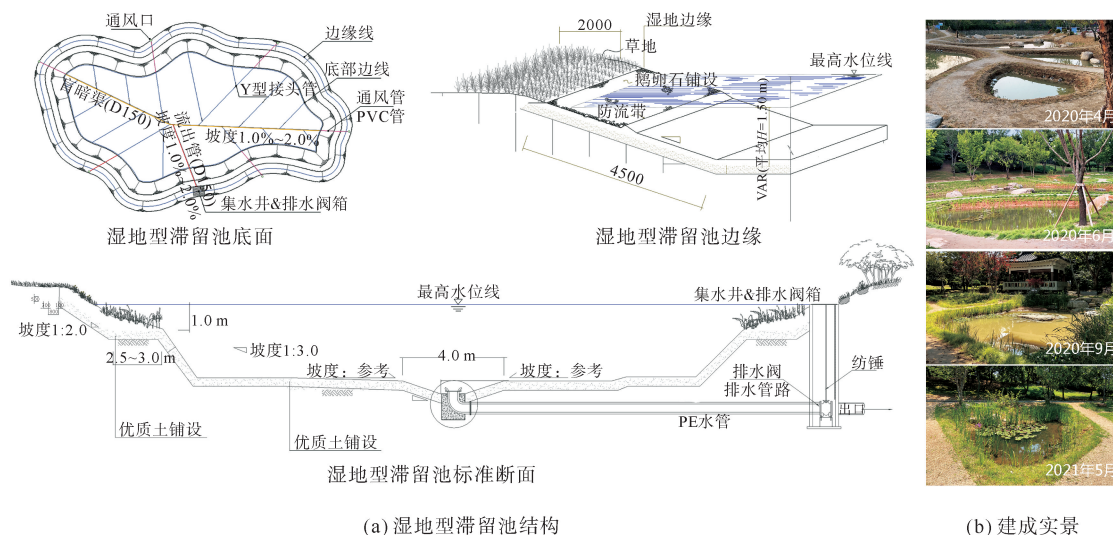


图3 湿地型滞留池

### 3.3 透水性铺装

透水性铺装(图4)主要应用于雨水低速流经处和通行量小的区域,如人行道和小型广场,具有排水、减污、补给地下水、缓解热岛效应等功能<sup>[15]</sup>。该类铺装无需检查井和雨水井,有利于景观的整体性和美观性。该项目主要对德津湖流域内指定的老旧人行道、小型活动广场,每年按项目计划分期进行透水性铺装改造施工,并根据使用场地的功能性和环境现状选材,改建的同时兼顾景观优化。施工时需避开冰冻期,确保下层土壤渗透率不低于13 mm/h,且离地下水位至少1.2 m以上。石子层应使用直径25~60 mm的碎石,其厚度将根据降雨处理容量和空隙来决定,但至少300 mm以上。由于透水性铺装易受季节影响且易堵塞,需要定期维护以保持其功能。

### 3.4 渗透水渠

渗透水渠(图5)是由砾石或碎石砌成的狭长的沟渠形态的地下潜流槽,深度1~2.5 m、宽度1 m为宜,便于管理。渗透水渠不仅可以减少非点源污染,维持自然的水文平衡,而且建设及维护费用较低。德津湖流域内的停车场区域是渗透水渠的主要设置点,施工时应确保碎石铺面至少低于停车场路面50 mm。为了可以均匀地利用渗透面且限制雨水流入设施的速度,渗透水渠的地面坡度应控制在6%以下,其两侧硬质路面坡度也应控制在5%以下。

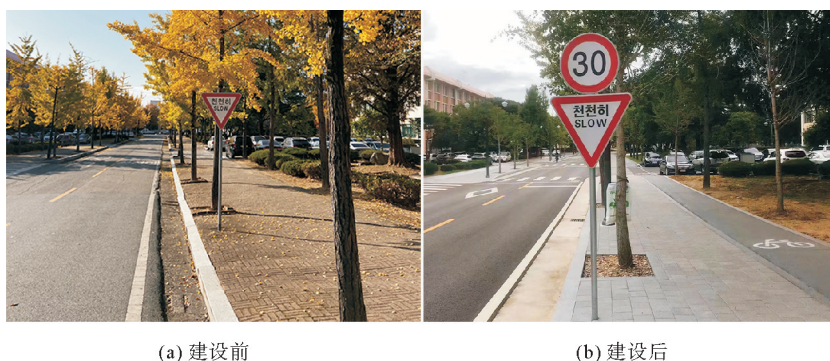
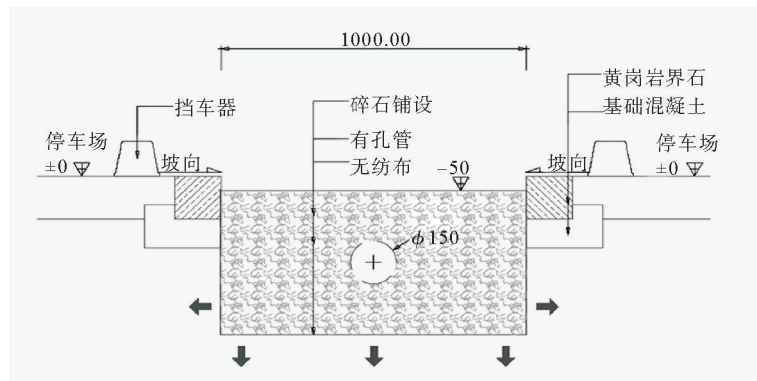


图4 透水铺装建设前后对比

### 3.5 渗透木栈道

渗透木栈道与透水性铺装有一定的相似性,主要适用于人行道及通行量少的道路和小型集散场地。该项目选取在全北大学校园的中心景观区进行安装。施工过程如图6所示,在底层铺设透水无纺布,其上铺设300 mm碎石,加以镀锌钢管和水泥混凝土墩柱固定,铺筑木质甲板。同样,下层土壤渗透率不低于13 mm/h,且离地下水位至少1.2 m以上。渗透木栈道不会发生因冻结、解冻而导致的铺装面隆起或下沉等问题,且可以更好地美化周边环境,增强雨水径流的收集速度。



(a) 渗透水渠结构(单位: mm)



(b) 施工过程

图5 渗透水渠



图6 渗透木栈道施工过程

### 3.6 植生水路

植生水路(图7)是一种模仿自然排水系统的工程措施,利用植被的吸附和过滤作用以及土壤的渗透能力,减少非点源污染,并帮助雨水回补地下水。植生水路分为干式、湿式、草生水路,可根据土壤及排水系统条件设置。实施原理与植生滞留池相似,但其形式多样且布局狭长。因植生水路长度最少30 m以上,所以该项目只能因地制宜设置在体育公园、全北大学和全北大学医学馆附近。水路内水体流速越慢,与植被、土壤接触时间越长,渗透效率越好,且为减少土壤流失、防止植被侵蚀,最大流速设计不能超过0.8 m/s。植生水路水流方向倾斜度为1%~2%适宜,超过2%需安装滴水孔,然而,为减少雨水流出量,最大不宜超过4%。若在水土流失较为严重的地区,如农田和林地,使用植生水路时可考虑与其他水土保持设施配合使用,以提高整体的防治效果。

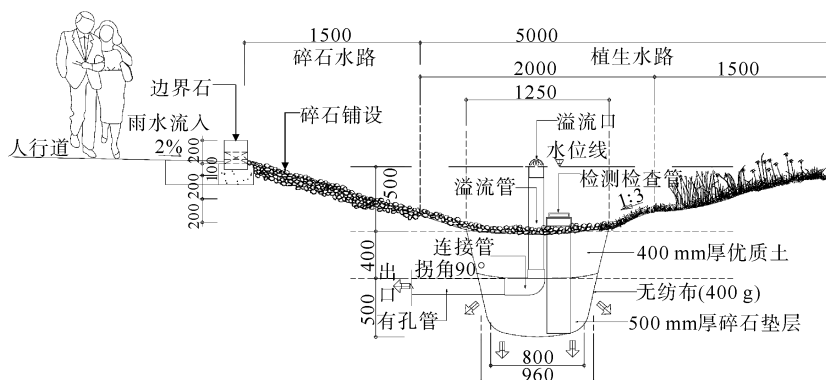


图7 植生水路结构(单位:mm)

## 4 实施效果

按照计划和目标任务,“德津湖流域 LID-绿色基础设施建设项目”于 2021 年 7 月末基本完成,后期监测、维护管理持续进行中。项目总体取得了预期成效,但也有其不足。预算和绿色基础设施建设成本对城市来说是最大的挑战。该项目仅在最适宜的区域进行了相关绿色基础设施建设,虽未覆盖整个流域但仍获得许多效益。目前该项目成功改善了德津湖的水质,由 2014 年的 4—5 级提升至 2021 年的 3 级标准<sup>①</sup>,而且复活了德津湖流域附近的湖泊和溪谷的水生态环境,提升了城市景观品质,增进了居民的生活与工作满意度。全州市政府还取消了包括德津湖流域在内的全州市数十万平方米的大规模住宅开发,拆除与绿地分隔的人行道和水泥空间,新建绿地总面积约 20 hm<sup>2</sup>,增强了市民与绿色空间的互动,扩展了滨水步行空间,并提升了流域内绿色空间的连通性。德津湖流域的改造不仅丰富了城市的休闲文化生活,还改善了城市微气候,缓解了城市热岛效应,减少了微尘污染,区域内细尘浓度平均降低了 25.6%,超细尘浓度降低了 40.9%。这些改变共同塑造了一个生态友好、安全宜居的城市环境。

## 5 启示

德津湖流域水生态修复项目以认识整体流域自身水文过程为基础,强调低影响开发,通过系统综合的多技术治理策略方法达到社会经济、环境生态的多重目标效益,实现人水和谐的美好城市人居环境面貌,可为国内水环境治理及海绵城市建设提供以下 3 点借鉴和启示。

### 5.1 低影响开发,恢复流域自然水生态

项目规划的每个环节都应该考虑对自然生态的影响和保护,特别是对自然水循环的优化处理。这要求从项目计划、实施到后期的维护管理都应完善全过程的监测机制,且 LID 设施必须根据使用目的来确定,从整体层面做好空间的规划组合布局,平衡好场地开发与自然之间的关系。即通过全面评估场地,确定场地的潜在利用模式,根据水文模拟结果及对区域的影响分析,制定适宜的空间构架及多技术协同应用,并根据区域自然禀赋、文化底蕴和社会经济采取差异化策略,减少无必要的经济负担和对原有场地自然的干扰。目前国内低影响开发建设多着眼于中小尺度局部空间的实践研究,但生态学研究普遍认为景观碎片化即景观连通性的减少是导致生态系统服务减少的主要原因之一。通过 LID-绿色基础设施区域整体性连接和扩大实施,可有效为许多物种提供资源和栖息地庇护,增加生物多样性。同时优化场地竖向设计及植被空间层次,因地制宜地保护现状水系,丰富岸线景观。在改善自然水循环的同时不仅可以提升景观或栖息地的连通性,而且可以增加绿地的可及性,给人们带来更多的心理效益和健康效益,使城市更加宜居。

### 5.2 多组织协作,推进项目可持续发展

当地政府机构应与设计施工方密切合作,且有必要因地制宜制定和完善符合地区现状的低影响设计

<sup>①</sup> 韩国湖沼环境标准:以保护沼泽、湖泊、水库等公共水域的水质为目的,根据韩国水质环境保护法规定的环境标准。

规章准则,建立健全监管体系和适应性管理体制。要想在LID的景观优化方面取得成功,需要土木、水利、环境、园林、园艺等相关学科专家的协同合作。当地居民等地区共同体的参与同样重要,LID设施的初期宣传、施工和维护管理,需要地区居民的参与合作。不仅可以延续区域内的文化价值,而且极大地提高了项目建设效率和质量,对于长期的成功至关重要。德津湖流域项目还特别注重培养“市民园丁”,对支持生态友好型绿色基础设施建设的公民进行植物管理、修剪及造景等方面的教育培训,引导市民亲自参与推进项目的实施过程。目前,全州市为推进绿色基础设施建设,已掀起由政府主导,市民、企业等共同参与的城市建设运动热潮。流域的水生态恢复是个复杂且漫长的动态性过程,德津湖流域项目虽已完工,但其后期的水质监测、优化调整及维护管理工作在多团体组织的共同协作下有序进行中。从另一个角度来看,居民参与LID设施的适应性建设也充分体现了景观公平性,同时给当地居民提供了新的工作岗位。

### 5.3 多目标统筹,推进综合治理模式

低影响开发理念下的城市水环境治理的目的不是单纯地通过构建LID设施来改善自然雨水循环,而是需综合全面地考虑场地自然、人文、生态、历史背景,进而实现生态系统恢复与保护。“德津湖流域LID-绿色基础设施建设项目”的重点是通过构建流域自然水循环来解决德津湖水质问题,但目标是提供其他可持续性的协同效益,以此提升生态系统服务功能。经过近10年的规划实施建设,该项目从计划阶段引入LID技术,确立整体愿景目标,并从整体思路出发,提出了合理且精细的管理工作框架和规划方案。在不损害生态系统可持续性的前提下,平衡水、土地及城市空间等相关资源,使区域经济和社会福利最大化,并保持与水环境资源相关利益者之间的协调管理。注重生态修复和旅游经济的融合发展以及LID设施安装与公众休憩活动空间的有机融合,强调功能性、持续性和整体性设计,旨在实现经济社会目标和环境生态目标协同发展。通过这种综合治理模式,德津湖流域不仅焕发出新的生机与活力,也给周边社区和居民带来了福祉。

## 6 结束语

随着中国城市化进程的加快,城市洪涝、河流干涸、水质污染等水环境治理问题迫在眉睫。过去运用单一低影响开发技术的治理模式已不能满足日益严峻的城市内涝、水质污染等问题,且过去为解决水质污染或城市防洪排涝等单一问题的治理策略也显然不能应对复杂的人类社会及经济环境的需求。通过剖析“德津湖流域LID-绿色基础设施建设项目”的实施过程及其水生态修复实践的方法和具体策略,以期为国内营造“人水和谐”的环境友好型城市居住环境提供有价值的借鉴。

### 参考文献(References):

- [1] 冯娴慧,李明翰. 美国雨水管理理念与实践的发展历程研究与思考[J]. 中国园林,2018,34(9):89-93.  
FENG Xianhui, LI Minghan. Study on the development of American stormwater management theory and practice[J]. Chinese Landscape Architecture, 2018, 34(9): 89-93.
- [2] 宋珊珊. 基于低影响开发的场地规划与雨水花园设计研究[D]. 北京:北京林业大学,2015.  
SONG Shanshan. Research on site plan and rain garden design by low impact development[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
- [3] 戎贵文,李珊珊,甘丹妮,等. 不同LID组合对水质水量影响及成本效益分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2022,20(1):21-29.  
RONG Guiwen, LI Shanshan, GAN Danni, et al. Impact of different low impact developmental combinations on water quality and quantity and cost-benefit analysis[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(1): 21-29.
- [4] 周昕,高玉琴,吴迪. 不同LID设施组合对区域雨洪控制效果的影响模拟[J]. 水资源保护,2021,37(3):26-31.  
ZHOU Xin, GAO Yuqin, WU Di. Simulation on influence of regional rain-flood control effect under different combinations of LID measures[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 26-31.
- [5] 成玉宁,侯庆贺,谢明坤. 低影响开发下的城市绿地规划方法:基于数字景观技术的规划机制研究[J]. 中国园林,2019,35(10):5-12.  
CHENG Yuning, HOU Qinghe, XIE Mingkun. Urban green space planning method based on low impact development; Research on planning mechanism under digital landscape technology[J]. Chinese Landscape Architecture, 2019, 35(10): 5-12.
- [6] 葛有成,唐天成,单正清,等. 不同入渗模型对LID措施效能评价的影响研究[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(5):100-106.  
GE Youcheng, TANG Shuangcheng, SHAN Zhengqing, et al. Impact of different infiltration models on the performance evaluation of LID measures[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(5): 100-106.

- [7] 蔡新立,程俊,汪洋. 海绵城市背景下的城市水系生态修复治理研究[J]. 江淮论坛,2019(6):75-80.  
CAI Xinli, CHENG Jun, WANG Ping. Study on ecological restoration and management of urban water system under sponge city background[J]. Jianghuai Tribune, 2019(6): 75-80.
- [8] 齐莉娜. 基于低影响开发理论的城市棕地景观更新策略研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2016.  
QI Lina. Analysis and exploration of the strategy of city brownfield of city brownfield landscape restoration with LID theory[D]. Xi'an; Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.
- [9] 于冰沁,陈丹,车生泉,等. 乡村景观水生态保护与修复的低影响途径:以上海市青浦区淀山湖为例[J]. 城市建筑,2017(36):41-45.  
YU Bingqin, CHEN Dan, CHE Shengquan, et al. Low impact development approach of protection and restoration of rural landscape water ecology: A case study of Dianshan Lake in Qingpu District of Shanghai[J]. Urbanism and Architecture, 2017(36): 41-45.
- [10] 이신우. 덕진연못 정부차원 수질관리 시급[EB/OL]. (2017-12-17)[2022-06-01]. <http://www.jjn.co.kr/news/articleView.html?idxno=732746>.
- [11] CHOI Seunghyun, KIM Seokhwi, KIM Kangjoo. Assessment for the possibility of water-ecosystem restoration applying LID techniques in the Deokjin park area, Jeonju city[J]. Economic and Environmental Geology, 2015, 48(6): 477-490.
- [12] 김정환. 전주 덕진공원 LID Green Rainwater Infra 조성사업 기본설계 의견[EB/OL]. (2015-12-15)[2022-06-01]. <https://blog.naver.com/lakeflo/220568832742>.
- [13] KIM Youngman, KIM Leehyung. Awareness of urban environment and LID for expanding LID application[J]. Journal of Wetlands Research, 2019, 21(1): 27-33.
- [14] 路易斯·马克,宾利·克里斯,谭佩文. 新西兰低影响雨水体系设计[J]. 中国园林,2013,29(1):23-29.  
LEWIS Mark, BENTLEY Chris, TAN Peiwen. Low impact stormwater design in New Zealand[J]. Chinese Landscape Architecture, 2013, 29(1): 23-29.
- [15] 朱芳琳,唐秀霞,丁玥,等. 低影响开发措施对大尺度区域雨洪控制效果的研究[J]. 青岛理工大学学报,2023,44(1):93-100.  
ZHU Fanglin, TANG Xiuxia, DING Yue, et al. Research on the effect of LID practices on the storm control in a large-scale area[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2023, 44(1): 93-100.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)

## (上接第 26 页)

- [33] YIN T Y, YU R, LIU K N, et al. Precise mix-design of ultra-high performance concrete (UHPC) based on physicochemical packing method: From the perspective of cement hydration[J]. Construction and Building Materials, 2022, 352: 128944.
- [34] 刘娟红,宋少民. 颗粒分布对活性粉末混凝土性能及微观结构影响[J]. 武汉理工大学学报,2007,29(1):26-29.  
LIU Juanhong, SONG Shaomin. The influence of particle distribution to properties and microstructure of reactive power concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(1): 26-29.
- [35] ZHANG J J, YU R, SHUI Z H, et al. Hydration kinetics and microstructure development of ultra-high performance concrete (UHPC) subjected to microwave pre-curing[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 129: 104484.
- [36] 余自若,沈捷,贾方方,等. 超高性能混凝土与普通混凝土的黏结抗冻性能[J]. 材料导报,2017,31(23):138-144.  
YU Ziruo, SHEN Jie, JIA Fangfang, et al. Bonding performance of ultra high performance concrete to normal concrete under freeze-thaw cycle[J]. Materials Reports, 2017, 31(23): 138-144.
- [37] 樊健生,王哲,杨松,等. 超高性能混凝土板冲切与弯曲性能研究[J]. 工程力学,2021,38(4):30-43.  
FAN Jiansheng, WANG Zhe, YANG Song, et al. Research on punching shear and bending behavior of ultra-high performance concrete slabs[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(4): 30-43.
- [38] YU R, SPIESZ P, BROUWERS H J H. Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPRFC) [J]. Cement and Concrete Research, 2014, 56: 29-39.
- [39] VAN V T A, RÖBLER C, BUI D D, et al. Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 53: 270-278.
- [40] 杨耀辉,丛波日,郭保林,等. 基于 MAA 模型的水泥基 UHPC 性能研究[J]. 施工技术(中英文),2022,51(21):60-65.  
YANG Yaohui, CONG Bori, GUO Baolin, et al. Study on properties of cement-based UHPC based in MAA mode[J]. Construction Technology, 2022, 51(21): 60-65.
- [41] 蒋睿. 早期养护方式对超高性能混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐学报,2020,48(10):1659-1668.  
JIANG Rui. Influence of early curing methods on properties of ultrahigh-performance concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(10): 1659-1668.

(责任编辑 姜锡方;英文校审 程文华)