

西部黄土台塬地区生物滞留设施植物群落适配多样性设计研究

Design Study on Plant Community Suitability and Diversity for Bioretention Facilities in the Western Loess Tableland Region

王晶懋^{1,2*} 徐浩博¹ 李兆楠¹ 魏璇¹ 夏颖^{1,3} 毋斯依¹
WANG Jingmao^{1,2*} XU Haobo¹ LI Zhaonan¹ WEI Xuan¹ XIA Ying^{1,3} WU Sinong¹

(1.西安建筑科技大学建筑学院, 西安 710055; 2.西安建筑科技大学—西澳大学城市生物多样性与设计国际联合实验室, 西安 710055; 3.西安欧亚学院, 西安 710065)

(1. Department of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi, China, 710055; 2. XAUAT-UWA International Joint Lab on Urban Biodiversity and Design, Xi'an, Shaanxi, China, 710055; 3. Xi'an Eurasia University, Xi'an, Shaanxi, China, 710065)

文章编号: 1000-0283(2025)11-0035-09
DOI: 10.12193/j.laing.2025.11.0035.005
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2025-07-01
修回日期: 2025-09-19

摘要

针对西部黄土台塬地区城市化进程中生态效能不足的问题, 结合低影响开发理念, 提出生物滞留设施植物群落的适配多样性设计方法, 以提升区域生物多样性与雨洪调控协同效益。以渭南城区为研究区域, 划分生物滞留设施类型并识别不同类型特征差别; 针对渭南市典型生态公园及低影响开发项目展开调研, 根据场地内部生物滞留设施特征与功能导向的差异筛选典型样方, 量化生物滞留设施生物多样性价值, 如Margalef丰富度指数最高达3.694, Simpson多样性指数最高达0.9049, 匹配优化方法进行生物滞留设施植物群落优化设计。提出适用于西部黄土台塬地区的“生境异质性—生物多样性”双维的生物滞留设施植物群落适配性设计流程, 将生物滞留设施划分13种细化类型, 提出对应类型的适配多样性设计模式。通过生物多样性、生境条件、生物滞留设施类型的协同考虑, 提出适用于黄土台塬地区的生物滞留设施适配多样性优化技术体系, 为西北干旱半干旱城市低影响开发的生态效能提升提供科学范式与实践路径。

关键词

生物滞留设施; 生物多样性; 生境条件; 植物群落; 低影响开发

Abstract

Addressing the issue of insufficient ecological performance during urbanization in the Western Loess Tableland Region and guided by the concept of Low Impact Development (LID), this study proposes a suitability and diversity design methodology for plant communities in bioretention facilities. The objective is to improve the synergistic benefits of regional biodiversity and stormwater management. Utilizing Weinan City, Shaanxi Province, as the study area, bioretention facility types were classified and their characteristic differences identified. Field investigations were conducted in representative ecological parks and LID projects within Weinan City. Selected quadrats were based on variations in bioretention facility characteristics and functional orientations. The biodiversity value of the bioretention facilities was quantified, with the Margalef richness index R reaching 3.694 and the Simpson diversity index D reaching 0.9049. Subsequently, matching optimization methods were employed for the optimized design of plant communities within these facilities. A dual-dimensional “habitat - diversity” plant community suitability design process applicable to bioretention facilities in the Western Loess Tableland Region was proposed. Bioretention facilities were categorized into 13 refined types, and corresponding suitability and diversity design patterns were established for each type. By synergistically considering biodiversity, habitat conditions, and bioretention facility types, an optimized suitability and diversity technical framework for bioretention facilities applicable to the Loess Tableland region was developed. This framework offers a scientific model and practical pathway for enhancing the ecological efficacy of LID in arid and semi-arid cities of Northwest China.

Keywords

bioretention facilities; biodiversity; habitat conditions; plant communities; low impact development

基金项目:

国家自然科学基金“低碳导向的健康舒适室内环境控制理论与方法”(编号: 52394223); 陕西省社会科学基金年度项目“关中地区城市绿地微型碳库构建策略研究”(2025J026); 西安建筑科技大学研究生教育综合改革研究与实践项目“风景园林博士学位研究生教育五体联动机制建设”(编号: ZHGG202416)

王晶懋

1988年生/女/内蒙古巴彦淖尔人/博士/副教授/研究方向为城乡绿色空间生态设计

徐浩博

2001年生/女/辽宁沈阳人/在读硕士研究生/研究方向为风景园林规划与设计

李兆楠

2000年生/女/山西忻州人/在读硕士研究生/研究方向为风景园林规划与设计

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: 398004061@qq.com

城市化进程在推动人类社会显著经济效益的同时，也导致了城市生物多样性降低，进而削弱城市生态系统稳定性，对居民生活环境构成潜在威胁^[1]。提升城市生物多样性对于维护城市生态效能至关重要，而城市绿地在改善环境质量与维持生态系统稳定方面发挥着不可替代的作用。2022年，陕西省渭南市入选国家海绵城市建设示范城市，成为西北地区低影响开发建设的先行者。然而，西北干旱半干旱地区特殊的气候条件以及黄土台塬区湿陷性黄土特性导致的水资源分布不均，共同制约了城市生态效能的提升，并加剧生物多样性下降趋势，亟需通过生态设计手段进行优化^[2-3]。国外生物滞留设施研究侧重优化土壤填料以探索雨水污染物去除效果及削减率；国内则更关注植物截留吸收对水质水量的调控。在当前项目实践中，生物滞留设施的应用常呈现模式化倾向，缺乏针对湿陷性黄土条件的适配性生态设计。因此，本研究在区域气候条件与生态需求的双重约束下，通过实地调研与实证研究，聚焦渭南市生物滞留设施提升生物多样性的适配性植物群落设计策略与设计流程，为西北干旱半干旱地区的低影响开发建设提供实践指导。

1 低影响开发下的生物滞留设施植物群落优化势在必行

1.1 生态效能：城市建设的聚焦与局限

随着中国城市化进程加速推进，在存量发展的背景下，城市建设面临一系列制约可持续发展的突出问题，其中生态效能方面的问题尤为突出。生态效能是生态系统或景观要素通过其结构、过程与功能，在实现预定生态目标时所表现出的效益。现有城市生态效能研究多聚焦于生物系统服务量化、空间

格局优化及植物多样性配置，而对不同气候条件下效能提升策略的相关研究较少。渭南作为关中平原的重要城市，其城市建设在近年来也在快速推进。但由于渭南市属于典型的黄土台塬地貌和旱涝共存气候，其特殊自然条件限制了生态空间格局，制约生态效能提升。生态效能作为衡量城市生态系统服务功能及可持续能力的重要指标，关乎居民生活质量、资源配置效率以及环境健康等诸多方面。通过积极采用低影响开发(Low-Impact Development, LID)等有效手段，可以逐步化解渭南市城市矛盾，提升城市生态效能，实现城市建设与生态系统的良性互动与协调发展^[4]。其中生物滞留设施作为LID的重要对象，其对城市生态效能的影响极大。

1.2 生物滞留设施：渭南市生态效能提升的载体

西北脆弱生态环境条件对城市化建设发展带来压力和约束，同时人类的聚居活动和建设也带来局部生境条件改善的可能性。生物滞留设施作为LID建设中最广泛使用的生态措施之一，其建设同样至关重要。本研究将其界定为LID建设中的核心雨洪管理设施，通过人工构建植物—土壤介质—微生物系统，在地势低洼区实现雨水径流的多过程调控，按目标导向划分为功能主导型和景观主导型。渭南城区虽水源充足且水土流失治理成效显著，但因地表覆盖不足且黄土粘性，城市雨水中仍混杂较多泥沙^[5]。因此，生物滞留设施成为在异质性的生境条件中解决生态问题的重要载体，提出适水耐旱的生物滞留设施设计方法在渭南市黄土台塬地区生态效能提升层面具有可行意义。但是在当前的生物滞留设施设计实践中，设计多聚焦于单一的景观效果或是单一的滞蓄功能，并简要分析设

计场地内的生境条件与蓄水条件^[6]，采用较为合理的地形调整、植物栽植、溢流井选配等手法进行设计，偏向于定性设计，聚焦于使用功能^[7]，但对于定量设计，也就是相关价值层面的量化设计研究方法关注度较低，而生物多样性作为城市生态系统重要的功能基础与健康保障，其价值在生物滞留设施设计过程中并未引起重视，因此亟待提出兼顾生境条件、滞蓄功能、生物多样性的生物滞留设施设计方法。

1.3 适配性设计：耦合生物多样性的植物群落适配性设计流程

本研究提出系统性的“生境异质性—生物多样性”双维的生物滞留设施植物群落适配性设计流程。“生境异质性—生物多样性”双维的生物滞留设施植物群落适配性设计流程中的“生境异质性”探讨植物层面的“气候适配”，强调地域气候条件会对不同设施类型内的植物选种产生影响，以及场地尺度下的生境条件差别会对于生物滞留设施内的具体植物设计与选种产生影响。“生物多样性”探讨生物滞留设施设计与生物多样性价值的耦合，传统设计将生物多样性视为附属效益，未将其纳入核心设计指标，缺乏对物种丰富度、生境协同性的量化评估方法，难以支撑生态效能长效提升。适配多样性进行设计可以提升生物多样性，并进一步地影响其所在的生态系统的稳定性。本流程基于系统性思维，将生物滞留设施设计视为包含主体、对象、目标、过程的完整系统；应用空间异质性理论识别设施内部（边缘区、缓冲区、蓄水区分）生境差异进行植物适配；并引入标准生态指数（如Margalef、Simpson）提升设计科学性。“生境异质性—生物多样性”双维的生物滞留设施植物群落适配性设计流程（图1）

简要概括为适配性设计流程。其中“一主体”指代“生物滞留设施种植设计”；“二对象”分别指代“不同类型的生物滞留设施”“适配生境与多样性的植物选种”；“三目标”分别指代“滞蓄功能”“生物多样性价值”“景观效果”；“五过程”则指代设计实施的具体步骤，包括方案之前的“判读项目类型”与“明确生物滞留设施类型及需求”，方案构思阶段的“评估场地条件”与“明确植物配置方案”以及方案之后的“维护管理与效果评估”。

2 生境异质性与生物多样性价值量化

2.1 研究区域概述

渭南市属于典型的黄土台塬地貌，介于低山与中高山之间，属于丘陵沟壑区。旱涝共存是黄土台塬区最突出的气候特点^[8]。秋、冬、春三季缺水但夏季城市内涝是该地区城市发展的限制因素之一。因此，西北黄土台塬的城市化必须走精细化地质适应、深度资源循环、生态增值发展的新路径^[9-11]。本研究选取车雷公园、润城公园印象南侧街头绿地广场、为民街街心公园、车雷大街中段、市民服务中心停车场5处已建成的海绵项目，梳理各项目的各类生物滞留设施设计方法以及植物选种情况，并通过样方法实地调研分析植物群落特征，归纳总结项目设计中存在的问题，以便提出不同的生物滞留设施类型与对应的优化策略。

2.2 气候与生境异质性的影响路径

渭南市地处西北干旱半干旱地区的湿陷性黄土区域，该自然条件下以极端的水资源不均衡为核心特征，湿陷性黄土具有多孔性、粉粒含量高和含盐量大的土壤结构特征，因而该场地内的生物滞留设施在干旱状态下稳定性很强，在降雨发生频繁时期土体含盐量变高，结构会变得松散。湿陷性黄土遇水后的不均匀沉降导致水资源分布异向性强，并存在盐碱化与易侵蚀风险。水分胁迫与不稳定的土壤物理结构导致生态系统物种丰度低、群落结构简单、生产力低下且恢复力弱，这些条件共同限制了自然条件变化下场地内脆弱的生物多样性^[12]。

因此本研究提出的适配性设计流程需要在地域气候条件的基础上叠加场地尺度的生境异质性。在影响场地生境条件的诸多影响因子中，例如日照时长、水因子、风环境、土壤环境等，结合西北地区的地域气候条件可知，该区域水分分布存在明显异质性，且水文环境较为特殊，因此水因子对于西北干旱半干旱地区的影响相对较大^[13]。在“生境异质性”环节中，本研究将按照生物滞留设施每个区域的径流



图1 “生境异质性—生物多样性”双维的生物滞留设施植物群落适配性设计流程

Fig. 1 Design process for "habitat-diversity" dual-dimensional plant community compatibility in bioretention facilities

滞蓄特征将其划分为边缘区、缓冲区以及蓄水区。在雨水天气下，边缘区是承接地表径流的入口，土壤含水率波动较大，蒸发作用价高；缓冲区需要承受地表径流冲刷，土壤含水率低于蓄水区，下渗能力较强；蓄水区接受缓冲区漫流和直接降雨，水流缓慢，土壤含水率最高且最稳定，持水时间最长^[14]。

2.3 生物多样性价值量化方法

本研究参考Margalef丰富度指数 (R)、Simpson多样性指数 (D)、Shannon-Wiener多样性指数 (H)、Pielou均匀度指数 (J) 来测算生物滞留设施中的物种多样性^[15]，见公式(1) - (4)。

$$R = \frac{S-1}{\ln N} \quad (1)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2 \quad (2)$$

$$H = - \sum p_i \ln p_i \quad (3)$$

$$J = \frac{- \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i}{\ln S} \quad (4)$$

式中， S 为物种数， N 为全部种的个体总数， P_i 为第 i 种植物的株数与植物群落总株数的比值。

3 渭南地区已建成生物滞留设施特征与量化计算

3.1 生物滞留设施类型划分与特征

经调研发现渭南市目前已建成的生物滞留设施以下凹式绿地为主，多见于公园、街头绿地，面积为680 ~ 15 416 m²，主要收集硬质铺装雨水径流；植草沟集中于道路旁，作为传输型设施，重点处理道路污染径流。雨水花园多与休闲空间结合，兼具景观与径流引导功能。已建成的生物滞留设施也表现出了一定的共性特征。下凹式绿地植物配置普遍较为简单；雨水花园植物配置较为丰富，但部分项目存

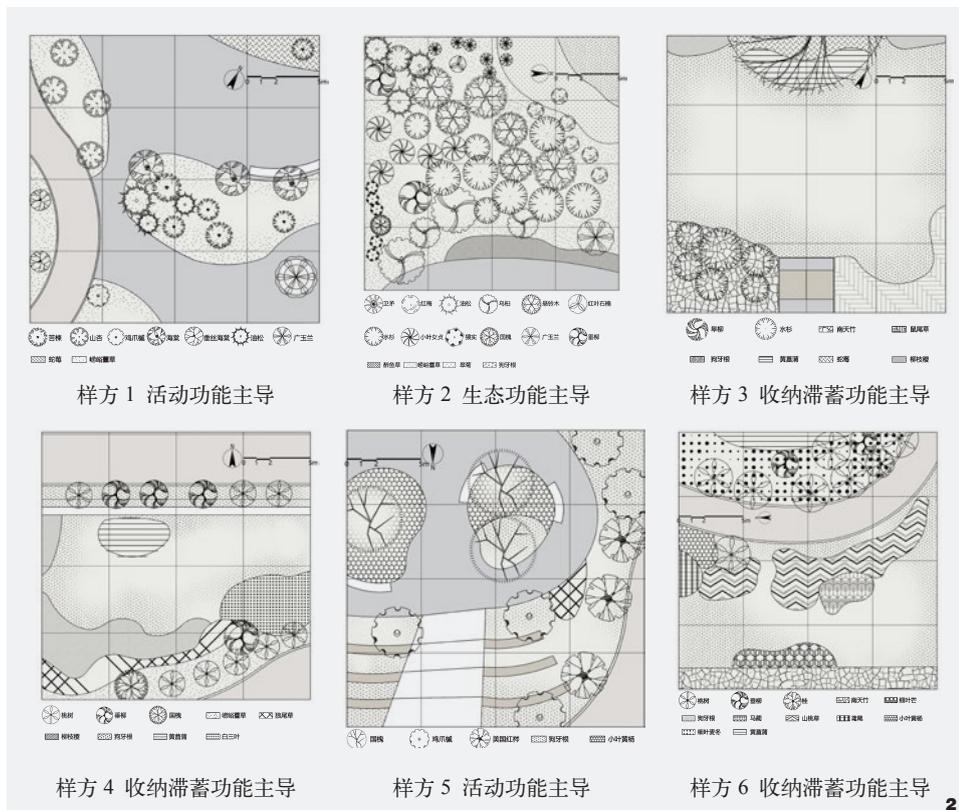


图2 样方植物种植平面图
Fig. 2 Plan of the planting layout for various square-shaped plants

在一定的植物选种问题；植草沟采用线性设计，搭配暗渠衔接其他设施，但植物多样性低，生态功能弱。为进一步验证本研究中的生境分区方法选取6个位于车雷公园内的典型样方进行验证。

样方1四周均为透水铺装步道，包含三条植草沟。样方内植物以乔木与地被为主，结构以乔—草为主。功能以活动为主，铺装面积较大，且包括座椅、树池、沙坑等休憩与活动设施。植物长势一般，其中苦楝长势最差；山杏长势较好。样方2植物群落结构包括乔—草、乔—灌—草、灌—草。以下凹式绿地为主，种植面积较大，场地内植物长势较好，且包含乡土特色树种乌桕。样方3为下凹式绿地，样地处在生物滞留设施之中。

植物以地被为主，伴有少量乔木，结构以草本地被为主。样方4包含生物滞留带。植物以地被为主，伴有少量乔木，结构以草本地被、乔草为主。地被植物面积较大，植物长势整体较好。样方5四周均为透水铺装步道。植物以乔木与地被为主，结构以乔—草为主。该样方功能主要为集散与活动，铺装面积较大，且包括座椅、树池等休憩与活动设施。植物长势较好。样方6为雨水花园。植物以地被为主，伴有少量乔木，结构以草本地被以及乔—草为主。样方内地被植物种类较多，植物长势整体较好(图2)。总体而言，所有典型样方以及已建成项目中的生物滞留设施，其边缘区、缓冲区、蓄水区的划分均十分明显，因此可以为生物滞留设施优化策略提供

良好的生境条件基础。

本研究结合生物滞留设施的基础类型、边坡形式以及功能导向，系统划分了13种生物滞留设施类型(表1)。生境异质性与生物滞留设施类型相关联，类型决定了其内部生境异质性的基本格局，而生境异质性直接影响植物配置和生物多样性潜力，分类聚焦下凹式绿地、雨水花园、植草沟三类核心设施，通过界定自然边坡与人工立式边缘边坡形式，并区分功能主导型，即滞蓄净化与生物多样性优先；与景观主导型功能导向，最终形成自然边坡灌草型下凹式绿地、自然边坡地被型下凹式绿地、自然边坡草坪型下凹式绿地、人工立式边缘灌草型下凹式绿地、人工立式边缘地被型下凹式绿地、人工立式边缘草坪型下凹式绿地、道路复合灌地型下凹式绿地、道路复合灌草型下凹式绿地、自然边坡灌地型雨水花园、自然边坡地被型雨水花园、人工立式边缘灌地型雨水花园、人工立式边缘地被型雨水花园、自然边坡草坪型植草沟等类型。分类旨在解决传统设计同质化问题，为植物群落适配设计提供理论基础，建立“类型—场景—功能”精准映射关系，支撑“生境异质—生物多样性”双维优化目标落地，并关联生态指标，最终实现从定性经验到定量设计的跨越。

3.2 物种多样性指标量化计算

进行物种多样性量化计算结果如下：Simpson多样性指数、Shannon-Wiener多样性指数与Pielou均匀度指数在6个样方之间差距较为明显。物种丰富度(Margalef指数)以样方2最高($R=3.694$)，与同功能区样方6($R=3.508$)无显著差异，显著优于样方1($R=2.485$)和样方3($R=2.525$)、样方4($R=2.517$)，样方5($R=1.412$)丰富度最低。表明生态功能区和优化型收纳

表1 生物滞留设施类型划分
Tab. 1 Typology of bioretention facilities

编号 Number	类型名称 Type	生物滞留设施类型 Type of bioretention	主要特征 Main characteristic	功能需求 Functional requirement	应用场景 Application scenario
1	下凹式自然边坡灌草型	下凹式绿地	草坪基底 + 边缘灌木, 截留促渗	功能主导型	居住区 / 公园绿地
2	下凹式自然边坡地被型		多年生地被打底, 抑制杂草	功能主导型	居住区 / 公园绿地
3	下凹式自然边坡草坪型		单一草坪覆盖, 支持轻度活动	功能主导型	居住区 / 公园绿地
4	下凹式人工立式边缘灌草型		路侧灌木带 + 草坪, 径流污染控制	功能主导型	居住区 / 公园沿路侧
5	下凹式人工立式边缘地被型		地被层 + 蜜源植物, 高景观辨识度	功能主导型 \ 景观主导型	重要景观节点
6	下凹式人工立式边缘草坪型		集约化草坪, 低维护成本	功能主导型	居住区 / 公园绿地
7	下凹式道路复合灌地型		季相地被 + 灌木, 层次丰富	景观主导型	道路旁绿地
8	下凹式道路复合灌草型		蓄水区草坪 + 缓冲区灌木, 视觉整洁	功能主导型	道路旁绿地
9	雨水花园自然边坡灌地型	雨水花园	高低地被 + 灌木, 近自然生境	景观主导型	重要景观节点
10	雨水花园自然边坡地被型		多结构地被, 高视觉活力	景观主导型	重要景观节点
11	雨水花园人工立式边缘灌地型		地被满铺 + 边缘灌木, 滞蓄—景观协同	景观主导型	重要景观节点
12	雨水花园人工立式边缘地被型		特色地被 + 蜜源植物, 季相鲜明	景观主导型	重要景观节点
13	植草沟自然边坡草坪型	植草沟	深根系草坪, 高效径流转移	功能主导型	居住区 / 公园 / 道路绿地

滞蓄区具备更复杂的生态位结构。综合多样性 (Simpson 与 Shannon 指数) 同样以样方 2 最优 ($D=0.9049$, $H=2.546$), 其 Simpson 指数接近理论极值; 样方 1 次之 ($D=0.8512$, $H=2.0262$), 样方 3 最低 ($D=0.7735$, $H=1.7542$)。值得注意的是, 样方 6 ($D=0.846$, $H=2.17$) 逼近生态功能区水平, 而样方 5 ($D=0.783$, $H=1.564$) 为全域最低, 反映后者存在优势种主导现象。物种均匀度 (Pielou 指数) 在样方 5 最高 ($J=0.9717$), 样方 1 次之 ($J=0.922$); 生态功能区样方 2 均匀度略低 ($J=0.9183$); 容纳滞蓄区整体偏低, 其中样方 3 ($J=0.844$) 和样方 4 ($J=0.838$) 显著弱于其他样方, 样方 6 相对较高 ($J=0.873$)。证实容纳滞蓄区普遍存在群落结构不均衡性 (表 2)。

4 生物滞留设施与植物群落适配多样性优化设计方法

4.1 适配不同类型生物滞留设施的双维植物群落设计策略

生物滞留设施的植物配置需统筹“生境

表2 各样方物种多样性指数
Tab. 2 Various species diversity indices

多样性指数 Diversity index	样方 1 No.1	样方 2 No.2	样方 3 No.3	样方 4 No.4	样方 5 No.5	样方 6 No.6
Margalef 丰富度指数 (R)	2.485	3.694	2.525	2.5172	1.412	3.508
Simpson 多样性指数 (D)	0.8512	0.9049	0.7735	0.8037	0.783	0.846
Shannon -Wiener 多样性指数 (H)	2.0262	2.546	1.7542	1.8409	1.564	2.17
Pielou 均匀度指数 (J)	0.922	0.9183	0.84361	0.8378	0.9717	0.873

异质性—生物多样性”双维目标与“蓄水区—缓冲区—边缘区”空间分区特性。基于渭南市黄土台塬地区的气候及土壤条件, 结合设施类型与应用场景, 形成差异化设计策略。

下凹式绿地普遍以滞蓄功能为主导, 兼顾物种丰富度与景观效果, 其中的功能主导型在蓄水区以根系发达、耐淹耐旱的低维护草坪草为主, 搭配净化型地被与蜜源植物, 为两栖类提供产卵基质。缓冲区则延续蓄水区植物, 少量增加抗冲刷植物, 并通过浆果吸引鸟类, 刺丛提供庇护所。边缘区以草坪草+耐旱灌木为主, 形成截流屏障, 并通过乔—灌—草结构提升栖息地复杂度 (图 3);

景观主导型在蓄水区配置季相丰富的耐淹地被。在边缘区点缀常绿灌木与观赏草, 提升层次感 (图 4)。

雨水花园主要以景观功能为主导, 形成复杂生境条件, 在满足景观效果的前提下, 提供滞蓄功能与多样化的栖息条件, 提升物种丰富度。在蓄水区种植相对高大的观赏草, 搭配开花地被, 强化净化效果与视觉焦点, 并为昆虫提供一定的停栖点。缓冲区以中等高度蜜源植物为主, 起到吸引传粉昆虫、提升景观效果的作用, 并以不同季相的植物搭配, 错开花期保证四季有花以及四季有蜜。最后可以进行微地形营造, 例如在蓄

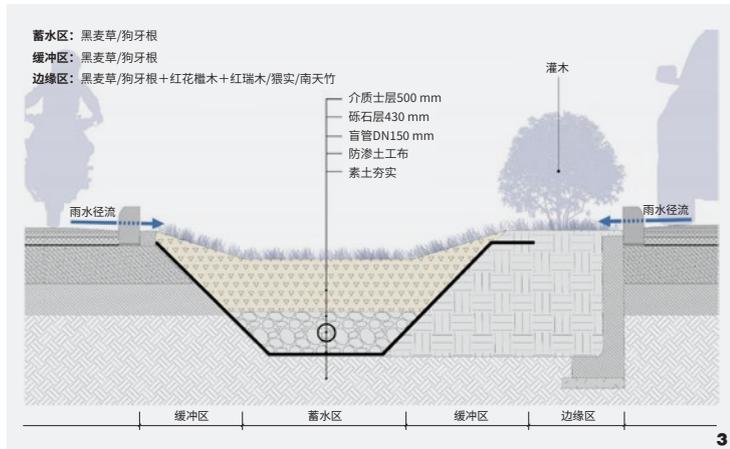


图3 功能主导型下凹式绿地设计策略
Fig. 3 Functional primacy depressed greenbelts design strategy

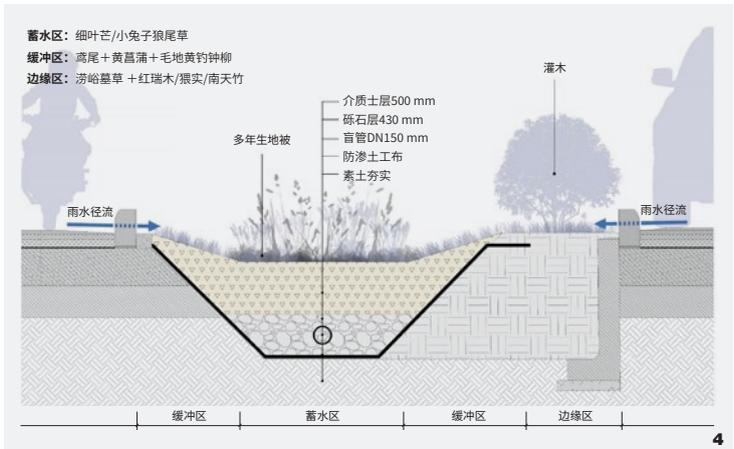


图4 景观主导型下凹式绿地设计策略
Fig. 4 Landscape-dominated depressed greenbelts design strategy

水区边缘设置卵石滩，为爬行类或小型哺乳类动物创造晒太阳场所的同时，提升景观效果(图5)。

植草沟以高效的传输功能为主，全域以单一低维护草坪草满铺，根系网络增强抗冲刷能力(图6)。

4.2 适配多样性生物滞留设施典型植物群落选种

基于对渭南市及周边城市已建成海绵项

目的深入调研和分析结果，本研究结合乡土植物种类以及植物生长习性，筛选出了渭南市适配多样性生物滞留设施的植物种类，初步建立植物选种与配置的样本库。同时针对已落地的项目进行景观后评价，了解渭南居民的景观偏好，结合渭南特色植物选取典型植物。最终筛选出能够分别满足适配性设计流程中“滞蓄功能”“生物多样性价值”“景观效果”三个目标的乔木、灌木以及地被，并确保选择的植物能够在当地气候和生态环

境中良好生长并发挥功能(表3)。在典型植物选种中，包含了可以增加生物多样性，吸引昆虫传粉的蜜源植物，如国槐、海棠、桂花、栾树、南天竹、海桐、醉鱼草、鼠尾草等。基于筛选的乡土植物，进一步提出几种可应用于不同生物滞留设施类型的典型植物群落配置模式(表4)，这些模式模拟了自然乡土群落的垂直结构和物种组合，提升生态功能和稳定性，例如旱柳+红瑞木+崂峪臺草等。

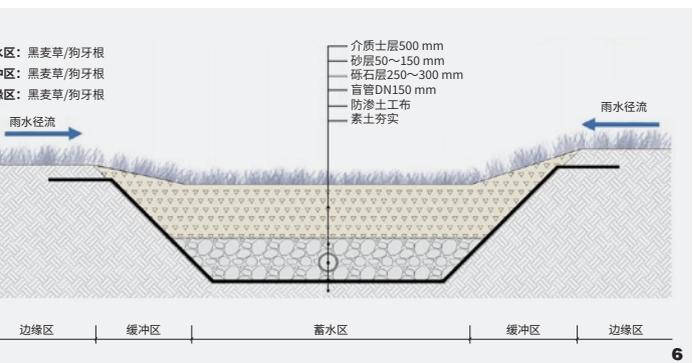
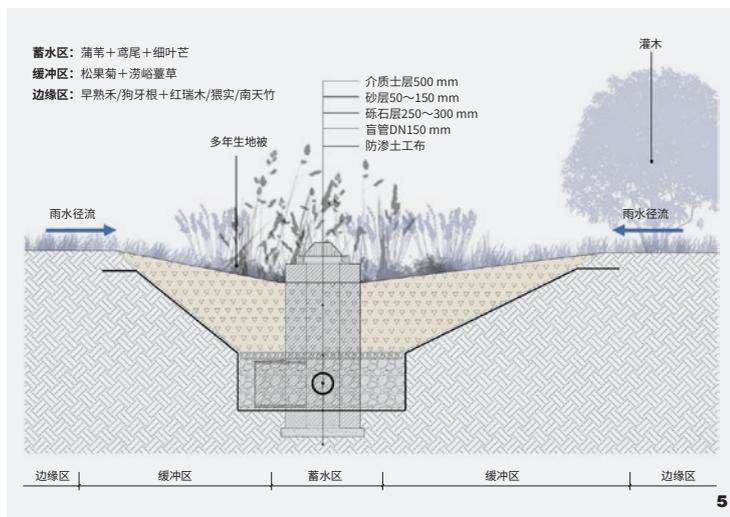


图5 景观主导型雨水花园设计策略
Fig. 5 Landscape-dominated bioretention gardens design strategy

图6 功能主导型植草沟设计策略
Fig. 6 Functional primacy grassed swale design strategy

表3 适配多样性生物滞留设施典型植物选种
Tab. 3 Typical plant selection for biodiversity-adapted bioretention facilities

序号 No.	中文名 Chinese name	拉丁名 Latin name	生长类型 Plant growth type	耐水湿 Water-resistant	耐干旱 Drought tolerant	喜阳 Joyful sun	耐阴 Shade tolerant	种植区域 Planting area
1	国槐	<i>Sophora japonica</i>	落叶乔木	○	●	●	○	边缘区
2	紫叶李	<i>Prunus cerasifera</i>	落叶乔木	○	●	●	●	边缘区
3	五角枫	<i>Acer mono</i>	落叶乔木	○	●	●	●	边缘区
4	雪松	<i>Cedrus deodara</i>	常绿乔木	○	●	●	●	边缘区
5	樱花	<i>Prunus subg</i>	落叶乔木	●	●	●	○	边缘区 / 蓄水区
6	海棠	<i>Malus spectabilis</i>	落叶乔木	○	●	●	○	边缘区
7	油松	<i>Pinus tabuliformis</i>	常绿乔木	●	●	●	○	边缘区
8	广玉兰	<i>Magnolia grandiflora</i>	常绿乔木	○	●	●	●	边缘区
9	桂花	<i>Osmanthus fragrans</i>	常绿乔木	○	●	●	●	边缘区
10	垂柳	<i>Salix babylonica</i>	落叶乔木	●	●	●	●	边缘区 / 蓄水区
11	旱柳	<i>Salix matsudana</i>	落叶乔木	●	●	●	○	边缘区 / 蓄水区
12	栾树	<i>Koelreuteria paniculat</i>	落叶乔木	●	●	●	●	边缘区 / 蓄水区
13	银杏	<i>Ginkgo biloba</i>	落叶乔木	●	●	●	○	边缘区
14	迎春	<i>Jasminum nudiflorum</i>	落叶灌木	○	●	●	●	边缘区 / 缓冲区
15	南天竹	<i>Nandina domestica</i>	常绿灌木	●	●	●	●	边缘区 / 缓冲区
16	铺地柏	<i>Sabina procumbens</i>	常绿灌木	○	●	●	●	边缘区 / 缓冲区
17	红瑞木	<i>Cornus alba</i>	落叶灌木	●	●	●	●	边缘区 / 缓冲区
18	海桐	<i>Pittosporum tobira</i>	常绿灌木	●	●	●	●	边缘区 / 缓冲区
19	醉鱼草	<i>Buddleja lindleyana</i>	落叶灌木	○	●	●	●	边缘区 / 缓冲区
20	小叶黄杨	<i>Buxus sinica</i>	常绿灌木	●	●	●	●	边缘区 / 缓冲区
21	卫矛	<i>Euonymus alatus</i>	常绿灌木	●	●	●	●	边缘区 / 缓冲区
22	红叶石楠	<i>Photinia × fraseri</i>	常绿灌木	○	●	●	●	边缘区
23	猥实	<i>Kolkwitzia amabilis</i>	落叶灌木	○	●	●	●	边缘区
24	小叶女贞	<i>Ligustrum quihoui</i>	常绿灌木	●	○	●	○	边缘区 / 缓冲区
25	蛇莓	<i>Duchesnea indica</i>	地被	○	○	●	●	边缘区 / 缓冲区
26	八角金盘	<i>Fatsia japonica</i>	地被	●	○	○	●	边缘区
27	柳条稷	<i>Panicum virgatum</i>	地被	●	●	●	●	边缘区 / 缓冲区 / 蓄水区
28	红蓼	<i>Persicaria orientalis</i>	地被	●	●	●	○	边缘区 / 缓冲区 / 蓄水区
29	马鞭草	<i>Verbena officinalis</i>	地被	○	○	●	●	边缘区 / 缓冲区
30	鼠尾草	<i>Salvia japonica</i>	地被	●	●	●	●	边缘区 / 缓冲区 / 蓄水区
31	小兔子狼尾草	<i>Lagurus ovatus</i>	地被	●	●	●	●	边缘区 / 缓冲区 / 蓄水区
32	白三叶	<i>Trifolium repen</i>	地被	○	●	●	○	边缘区 / 缓冲区
33	松果菊	<i>Echinacea purpurea</i>	地被	○	●	●	●	边缘区 / 缓冲区
34	细叶芒	<i>Miscanthus sinensis</i>	地被	●	●	●	●	边缘区 / 缓冲区 / 蓄水区
35	黄菖蒲	<i>Iris pseudacorus</i>	地被	●	○	●	●	边缘区 / 缓冲区 / 蓄水区
36	大花萱草	<i>Hemerocallis hybrida</i>	地被	●	●	●	●	边缘区 / 缓冲区 / 蓄水区
37	五叶委陵菜	<i>Potentilla chinensis</i>	地被	●	●	●	●	边缘区 / 缓冲区 / 蓄水区
38	香蒲	<i>Typha orientalis</i>	地被	●	○	●	●	边缘区 / 缓冲区 / 蓄水区
39	荆芥	<i>Nepeta cataria</i>	地被	○	●	●	●	边缘区 / 缓冲区
40	美人蕉	<i>Canna indica</i>	地被	●	●	●	●	边缘区 / 缓冲区 / 蓄水区
41	活血丹	<i>Glechoma longituba</i>	地被	○	●	●	●	边缘区 / 缓冲区
42	马蔺	<i>Iris lactea</i>	地被	●	●	●	●	缓冲区 / 蓄水区
43	鸢尾	<i>Iris tectorum</i>	地被	●	●	●	●	缓冲区 / 蓄水区

注：●代表“是”；○代表“否”。

表4 适配多样性生物滞留设施推荐配置模式
Tab. 4 Recommended configuration patterns for biodiversity-adapted bioretention facilities

	类型 Type	植物名称 Botanical name
上层	落叶乔木	银杏、旱柳、紫叶李、黄栌 (<i>Cotinus coggygria</i>)、国槐
	常绿乔木	雪松、女贞、广玉兰
中层	落叶灌木	红瑞木、黄刺玫 (<i>Rosa xanthina</i>)、红梅 (<i>Prunus mume</i>)
	常绿灌木	红叶石楠、南天竹、小叶女贞
下层	地被	红蓼、鼠尾草、美女樱 (<i>Glandularia × hybrida</i>)、松果菊、黄菖蒲
		蛇莓、山桃草 (<i>Oenothera lindheimeri</i>)、鸢尾、新篇草鼠尾草 (<i>Salvia nemorosa</i>)、大花飞燕草 (<i>Delphinium grandiflorum</i>)
		大炫蓝超级鼠尾草 (<i>Salvia sperba</i>)、木春菊 (<i>Argyranthemum frutescens</i>)
	草坪草	稗草 (<i>Echinochloa crus-galli</i>)、崂峪藁草 (<i>Carex giraldiana</i>)、狗牙根 (<i>Cynodon dactylon</i>)、黑麦草 (<i>Lolium perenne</i>)、混播草坪草

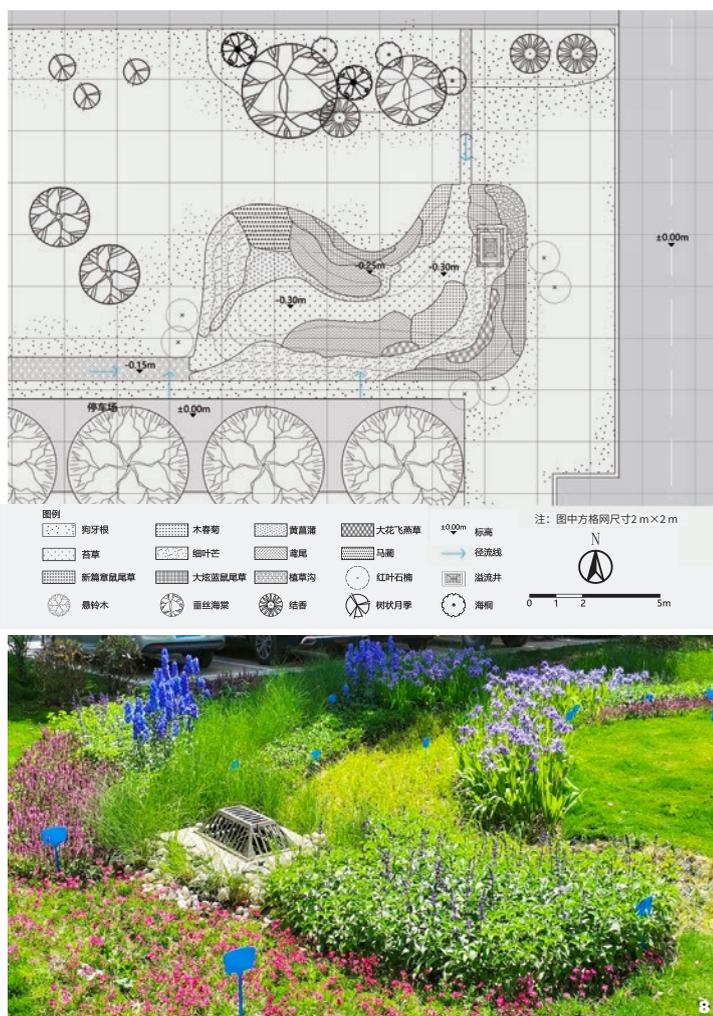


图7 锅炉厂小区改造项目设计方案竣工平面图
Fig. 7 Final approved site plan for residential compound renovation project

图8 锅炉厂小区改造项目竣工实拍图
Fig. 8 Post-Construction photographic documentation of residential compound renovation project

5 锅炉厂小区生物滞留设施设计流程与优化策略

5.1 基于生物多样性与低影响开发的锅炉厂小区项目设计流程

锅炉厂小区改造项目严格遵循适配性设计流程，以生物多样性提升与低影响开发为核心目标分步实施。选取本项目完整应用前文提出的流程、类型划分方法和设计策略，进行方案设计、实施与后评估，从而验证前文理论方法的科学性和可操作性。

(1) 经过现状分析判定为提升类项目，锅炉厂项目原有植物多样性弱、生态效能差，需针对现状雨水花园进行优化；结合类型划分，将其划分为景观主导型雨水花园；即自然边坡灌地型雨水花园，其核心需求包括：缓解土壤板结、增强径流滞蓄能力、优化景观效果、增加蜜源植物等。通过汇水路径分析，确认其承担硬质铺装雨水收集功能，需重点优化蓄水区、缓冲区、边缘区三区协同效能。

(2) 进行场地条件评估，根据调研可知场地地表温度峰值达40℃；土壤板结严重，含水率差异较大，边缘区、缓冲区、蓄水区的含水率在处于17.4%~23.8%；现状植物耐旱性不足，且因蜜源物种缺失导致传粉昆虫稀少；雨水花园大致分为阳生区与阴生区。上述条件将为植物选种提供依据。

(3) 基于“生境异质性—生物多样性”双维适配原则，筛选耐旱耐淹物种，例如细叶芒、黄菖蒲等，应对干旱—强降雨交替；按三类生境分区的差异并结合生物多样性提升目标植入功能化群落，在蓄水区种植鸢尾+黄菖蒲，适旱耐积水并能形成视觉焦点，从生物多样性视角出发可以吸引蜻蜓、蝴蝶等昆虫栖息停留；在缓冲区种植鼠尾草+欧石竹，适应缓冲区的冲刷强度以及地形坡度，并提升蜜源指数；在边缘区种植红叶石楠强化整体景观效果，并明确生物滞留设施边界，确保整体物种丰富度与季相连续性(图7，图8)。

表5 分区植物配置目标
Tab. 5 Zoning plant configuration objectives

分区 Partition	功能目标 Functional goal	植物配置 Plant configuration
蓄水区	水质净化、昆虫栖息	黄菖蒲 + 鸢尾 + 狗牙根
缓冲区	径流促渗、昆虫传粉	大炫蓝鼠尾草 + 欧石竹 + 木春菊
边缘区	抗干扰、景观效果提升	红叶石楠 + 细叶芒 + 新篇章鼠尾草

(4) 在施工完成后, 通过竣工回访验证居民满意度达92%完成效果评估。

5.2 锅炉厂小区改造项目设计策略

在本次项目实践中针对现状问题, 主要应用以下优化策略: 通过挖深蓄水区至30 cm, 将缓冲区坡度由1:1.5放缓至1:3, 改造雨水花园地形, 扩大缓冲区面积, 延长雨水滞留时间; 重构植草沟深度至1.5 cm, 并搭配狼尾草固土; 将现状卵石取出并重新整理, 集中设置于溢流井附近以提升美观和实用性; 针对植物选择不匹配的问题, 重新进行植物选型, 并合理配置植被区域, 保证各区域植物与“生境异质性—生物多样性”相适应。增加前中后景多层次的设计, 并引入四季变化植物与蜜源植物, 确保景观的多样性和季节性(表5); 最后深翻板结层约40 cm, 掺入30%草炭土改良基质。最终通过“地形—植物—土壤”协同优化, 实现物种多样性提升, 达成低影响开发与生态效能协同提升。

6 结论与展望

本研究通过耦合生物多样性与低影响开发目标, 系统构建了黄土台塬地区生物滞留设施适配性设计技术体系, 提出“生境异质性—生物多样性”双维适配机制, 突破传统以滞蓄功能为核心的设计范式, 首次将生物多样性价值纳入量化设计目标, 实现生态效

能与雨洪调控的协同增效。基于“功能—空间—边坡”三维分类体系, 细化13种生物滞留设施类型, 并匹配差异化的植物群落设计模式, 解决设施同质化设计难题。形成全生命周期设计流程, 在锅炉厂小区实证中验证其科学性, 为西北干旱半干旱城市提供可复制的生态优化路径。

尽管黄土台塬区生境条件特殊, 但本研究提出的适配性设计框架具有普适性, 13类设施类型与适配性设计流程可适配西北其他城市, 通过调整植物选种实现地域转化。同时设计者可根据“气候适配—多样性量化—类型匹配”三步骤, 结合场地实际需求, 生成定制化低影响开发方案。未来可构建“水文效能—生物多样性”多层级评价标准, 破解生态效益量化难题; 深化生物多样性协同研究, 推动低影响开发设施从雨洪管理工具向城市生态韧性核心载体跃升。

注: 文中图表均由作者自绘/摄。

参考文献

- [1] 郑进焯, 王革. 基于中国式现代化建设的生物多样性保护策略研究[J]. 西南林业大学学报(社会科学), 2025, 9(03): 54-59.
- [2] 西北大学地理系. 陕西农业地理[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1979.
- [3] 黄晓阳, 金晓斌, 郭贝贝, 等. 黄土台塬区农用地整治分区研究[J]. 资源科学, 2014, 36(03): 438-445.
- [4] 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(06): 11-15.

- [5] 苏毅, 柏云, 王晶, 等. 黄土台塬地貌区海绵城区建设与规划设计探索——以西安市曲江新区为例[J]. 规划师, 2018, 34(10): 66-70.
- [6] 杜晓丽, 韩强, 于振亚, 等. 海绵城市建设中生物滞留设施应用的若干问题分析[J]. 给水排水, 2017, 53(01): 54-58.
- [7] 王玉叶, 李瑞杰, 王洁宁. 山东建筑大学樱花园LID雨水系统设计与景观化实现[J]. 园林, 2022, 39(12): 110-118.
- [8] 林晓丹. 围池而居: 早涝共存下黄土台塬传统聚落营建的景观特征研究[J]. 中国园林, 2022, 38(12): 121-126.
- [9] 韩真. 渭北黄土台塬地区窑院落空间格局现状特征研究[J]. 砖瓦, 2023(09): 59-61.
- [10] 熊维, 唐浩, 柳昱, 等. 西安地区黄土台塬和黄土洼地土层特征分析及桩基工程应用建议[J]. 地基处理, 2023, 5(06): 519-526.
- [11] 徐岚, 雷振东. 关中传统村镇旱涝平衡经验及其当代规划启示[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(01): 111-117.
- [12] 胡志平, 温馨, 张勋, 等. 湿润性黄土地区海绵城市建设研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 2021, 43(02): 376-388.
- [13] 王晶燃, 徐浩博, 张涛, 等. 中国西北地区城市低碳生态公园设计流程与途径研究[J]. 风景园林, 2025, 32(07): 132-140.
- [14] 王晶燃, 王一凡, 张涛, 等. 城市街区单元绿地空间格局与植物群落碳汇效益优化研究[J]. 风景园林, 2024(06): 37-45.
- [15] 潘妮, 闵钰婷, 赵娟娟, 等. 城市建成区自生草本植物群落的物种多样性与功能多样性——以深圳市为例[J]. 生态学报, 2024, 44(09): 3759-3774.