基于数字孪生技术的城市绿地生境评估与植物群落适应性设计*

王晶懋[1,2] 黄琬玥[2] 刘 晖[1,2] 陈达盟[2] 刘雨萌[3]

(1. 西安建筑科技大学建筑学院，西安 710055；2. 西安建筑科技大学交叉创新研究院，西安 710055；3. 瓦赫宁根大学景观建筑与规划组，瓦格宁根市 6700HB)

摘要：【目的】解决传统城市绿地植物景观全生命周期建设中复杂的抗解性问题，为植物匹配适宜的生境并构建持续稳定的群落提供精准的参数化设计方法。【方法】通过数字景观平台进行生境分区与生境因子实时监测调查，结合植物科属种分析、群丛类型划分、生物多样性等指标揭示植物群落组成结构与生境因子耦合关系。【结果】基于数字平台与流程构建了生境适应性植物群落组构模式及生境评估数据库；在进行生境类型划分的基础上，明晰了其中 7 种生境下的植物群落组成与结构，从而形成不同生境分区中的 12 种适应性植物群落组构模式；对设计参数进行智慧校正并提出具体策略，从而构建生境评估数据库。【结论】形成以反馈机制和数字流程串联“生境评估-植物规划设计-建植施工-管理运维”4 个环节的闭环设计流程；构建生境评估数据库与适应性植物群落组构模式，可形成场地生境因子与植物多目标实体设计-后台智慧校正耦合的数字孪生方法。未来研究需在数字孪生应用场景中进一步提高试验样本量，以避免试验的偶然性与局限性。

关键词：数字孪生技术；智慧平台；生境评估；植物群落构建；适应性设计

DOI：10.12169/zgcsly.2025.12.31.0001

Urban Green Habitat Assessment and Plant Community Adaptability Design Based on Digital Twin Technology

Wang Jingmao[1,2] Huang Wanyue[2] Liu Hui[1,2] Chen Dameng[2] Liu Yumeng[3]

(1. College of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Institute for Interdisciplinary and Innovative Research, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Landscape Architecture Group, Wageningen University & Research, Wageningen, 6700HB, Netherlands)

Abstract: 【Objective】 The study is to address the complex adaptive issues occurring throughout the entire life cycle of traditional plant landscapes in urban green space, with the aim to provide precise parametric design methods for matching plants with suitable habitats and constructing stable communities. 【Method】 A digital landscape platform is used for habitat zoning and real-time monitoring and investigation of habitat factors. In consideration of the analysis of plant family, genus and species, division of cluster types, and biodiversity analysis, the coupling relationship between plant community composition and habitat factors is revealed. 【Result】 Based on the digital platform and process, a habitat-adaptive plant community structure model and habitat assessment database are constructed. The habitat types are classified, and the composition and structure of plant communities in 7 types of habitats are clarified,

收稿日期：2025-12-31

* 基金项目：国家自然科学基金面上项目（52578097）；陕西省社会科学基金项目（2025J026）；陕西省自然科学基金一般项目（2023-JC-QN-0525）；本科生科研训练全覆盖计划项目（X202510703266）

第一作者：王晶懋，女，1988 年生，博士，副教授，硕士生导师，研究方向为风景园林植物景观设计、低碳景观设计。E-mail：airainmail@126.com

thereby forming 12 adaptive plant community structure models in different habitat zones; the design parameters are intelligently corrected and specific strategies are proposed, thus forming the habitat assessment database.【Conclusion】 A closed-loop design process of four links, i. e., "habitat assessment -plant design and planning -construction and planting -management and maintenance" is formed through the integration of feedback mechanisms and digital processes. The constructed habitat assessment database and adaptive plant community structure model can form a digital twin method for the coupling of multi-objective entity design of site habitat factors and plants with back-end intelligent correction. The future research will focus on how to increase the experimental sample quantity in the digital twin application scenarios so as to circumvent the randomness and limitations of experiments.

Keywords: digital twin technology; smart platform; habitat assessment; plant community construction; adaptability design

"生境+群落"是自然生态系统的基本组成单位，此模式同样适宜于城市生态系统[1]。城市绿地中，人为营造的植物群落需经得起生境条件的考验，如西北地区经受季节性降雨不均匀、日照强度与时长分配不均等生境条件考验，并与生境形成相互适应的动态平衡，从而形成稳定生态系统[2]。

已有研究展开了城市绿地中群落与生境的关联性研究，提出在植物群落设计时考虑生境要素。植物群落设计时可进行生境分区，依据影响个体、种群或群落的分布、栖息和演替所需要的生境条件划分空间类型[3-5]，或进行生境营造，以人工营建的方式改善生境条件，以多样化城市生境提高生物多样性和稳定性[6-8]。而在城市绿地植物群落建植后，研究多关注城市绿地通过改善生境提升城市生态效益的作用[9]。此外，群落与生境的相互作用研究多在自然绿地中进行，主要目标为探究不同生态系统中影响植物群落的关键生境因子及其作用机理[10]。如何在城市绿地明晰生境与群落的相互影响，并应用于全周期的植物群落设计与管护过程中，这有待进一步探究。

随着相关研究的发展，研究要素的多元化、数据集分析与处理的复杂化、应用范围和服务对象的泛化等问题[11]，需通过数字化技术寻找研究的新方法新途径。此外，风景园林的参数化设计应兼顾"形态"与"生态"，强调对过程而不是结果的控制[12]。数字孪生技术可建立物理实体多维、多时空尺度、多学科技术、面向全生命周期的动态虚拟模型[13]，提供强大技术支持。因此，为探究城市绿地全周期建设中生境与群落的相互关系并将其应用于植物群落建设全周期，研究基于数字孪生技术构建了生境评估数据库与适应性植物群落组构模式，拟形成场地生境因子与植物多目标实体设计-后台智慧校正耦合的数字孪生方法。

1　研究区概况

选取位于西安市主城区的西安建筑科技大学雁塔校区南门花园和位于沣西新城北部的白马河公园作为研究样地。南门花园占地面积为 841 m^2，南侧有建筑物围挡，北侧由成排的悬铃木和道路围绕，内部有雪松遮挡，西侧阳光充足，东侧受建筑和植物遮挡[6]。白马河公园占地面积 34 266 m^2，为海绵型公园，南侧为城市主干道统一路，北侧及西侧为居住地和商住用地，东侧为主干道白马河路。两处样地均属暖温带半湿润大陆性季风气候，夏季炎热多雨，冬季寒冷干燥，全年盛行东北风为主。南门花园及白马河公园内部均设置有多处生境监测点（图 1）。



图 1　样地植物群落及生境监测站布置

2　研究方法

2.1　基于数字孪生技术的智慧景观平台构建

课题组的生境营造数字景观智慧平台主要采用云计算技术与 SD-WAN 网络技术搭建，通过数

字化映射场地生境及其动态变化，探索场地、生境、植物、动物之间的相互作用关系，进一步提升生境营造的科学性和准确性[14]。基于生境营造数字景观平台部署环境监测基站，实时采集、转发和储存多项生态数据，并通过数字孪生技术面向全生命周期形成具智慧平台实验样方模型的交互界面（图 2）。该模型包含监测数据回传与实施显示（智能监测）、监测数据自动统计与图表生成（智能统计）、多因子相关性分析与回归方程建立（智能分析）模型，可进行后台智慧校正。



图 2 基于数字孪生技术的生境营造数字景观平台交互界面

选取 2024 年 6 月—2025 年 3 月的 10 种生境因子变量，依据智慧平台试验样方模型获取、分析生境因子数据，结合植物群落调研数据进行智慧校正。此外，在植物群落构建过程中考虑生态、视觉、固碳等多个设计目标，可形成不同目标下的智慧途径，如在固碳目标下形成“全要素-全流程”的绿地碳库系统与低碳绿地设计途径[15-16]，实现场地生境因子与植物多目标实体设计-后台智慧校正耦合（图 3）。

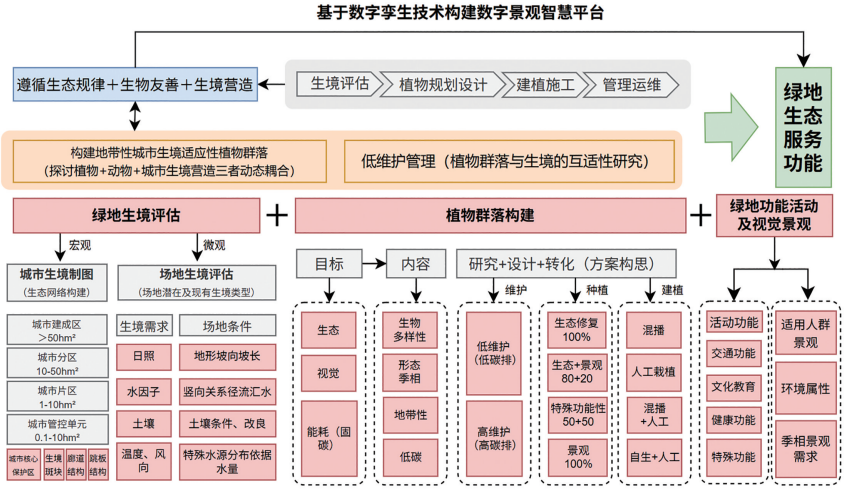


图 3 场地生境因子与植物多目标实体设计框架

2.2 基于数字孪生技术的生境类型划分

以场地日照时长及土壤含水率为划分依据进行生境类型划分。根据试验场地特点和日照因子生境类型影响参数，课题组已编制研发了“场地生境分区软件”（基于 SUN7.1 日照分析软件开发），可依据该软件对不同场地进行基于日照因子的生境分区[4]。此外，水因子使用 SWMM 软件进行划分，土壤因子的计算机模拟还需进一步研究，目前采用场地实测的方式展开土壤调查与生境分区。由于 AutoCAD 软件为设计行业中适宜广

泛、操作相对便捷，具有较强兼容性的软件，课题组试图研发基于 CAD 操作基础上，能够同时分析场地光因子、水因子、土壤因子等其他生境因子的综合性软件。在生境分区软件中导入场地 CAD 图、设置各项城市参数、依据参数形成各因子的生境分区图，生境分区图叠加整合即可实现多生境因子的生境类型划分。

2.3　植物群落样地选取及调研

采用多种建植方式，选择建植时具有“结构层+季节主题层+地被层”3 层垂直结构的地被植物群落展开研究，以控制研究变量。在不同生境分区共选取 16 个 1 m×1 m 地被植物样方（可包含一个完整的地被植物群落生态系统[8]），于 2024 年 6 月—2025 年 3 月展开植物群落调研。由于样地建植时间为春季，当季植物群落组成与结构受到较强的人为干扰，故选取当年的夏季、秋季、冬季和次年的春季的数据。

2.4　数据分析

由于不同物种的生境适应性可以通过长势得到直观的体现，选取重要值（I）反应某一物质在样方中的优势度及长势，实现不同物种生境适应性的量化比较。选取 Simpson 多样性指数（D）、Shannon-Wiener 指数（H'）、Pielou 均匀度指数（J'）3 类 α 物种多样性指数综合反应群落内部的丰富度与均匀度[17]。

3　结果与分析

3.1　空间维度下的生境类型划分

需要全日照的植物最适宜每天 6~8 h 的直射日照，需要部分日照的植物最适宜每天 4~6 h 的直射日照，关键日照时数节点为 4 h 和 6 h。根据关键日照时数节点将场地划分为阳生生境（6~8 h）、半阳生生境（4~6 h）、阴生生境（0~4 h）；基于建筑和植物的不同遮蔽作用再次划分日照生境类型；由于四季演替及上、下午日照对植物生长的影响，又将生境类型划分东照和西照区域。此外，通过对试验场地土壤含水量的测定，以 25%的土壤含水量为分界线，将场地划分为湿区和旱区两大类。将不同生境因子的生境分区图进行叠加整合，形成基于多生境因子的生境分区。基于以上步骤，南门花园划分为 10 种生境类型，白马河公园的生境岛划分为 3 种生境类型，其中 2 种生境类型在两个样地中均有出现，故共划分为 11 中生境类型（图 4~5）。

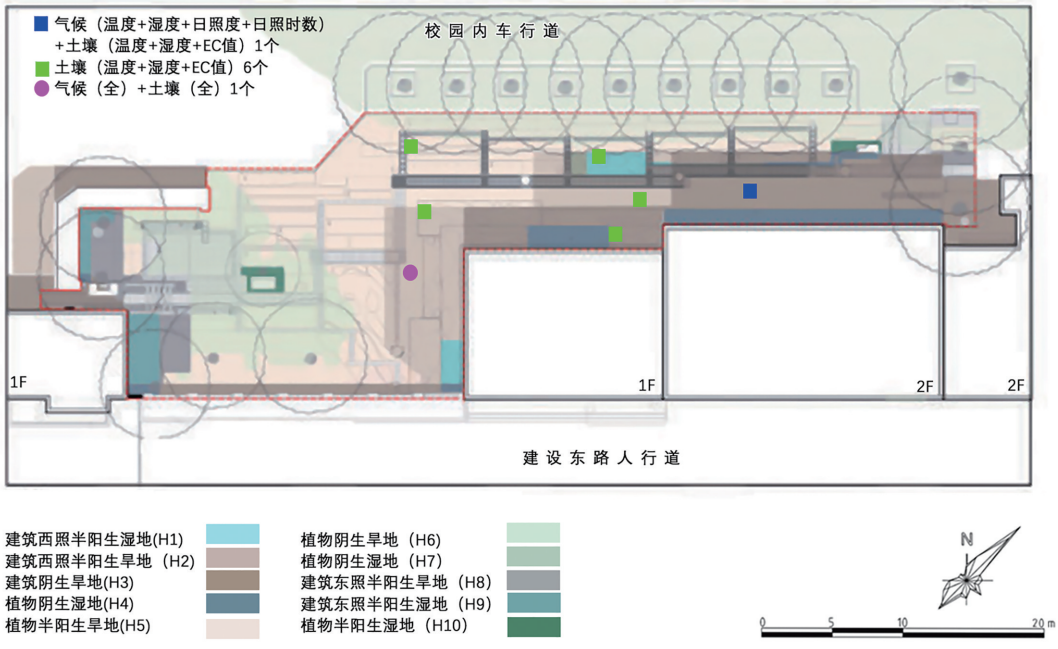


图 4　南门花园生境分区与生境监测点

研究所选植物样方主要位于建筑西照半阳生湿地（H1）、建筑西照半阳生旱地（H2）、建筑阴生旱地（H3）、建筑阴生湿地（H4）、植物半阳生旱地（H5）植物 5 种生境中。白马河公园中有植物半阳生旱地（H5）、植物阴生旱地（H6）、阳生旱地（H11）3 种生境用于探究本研究方法

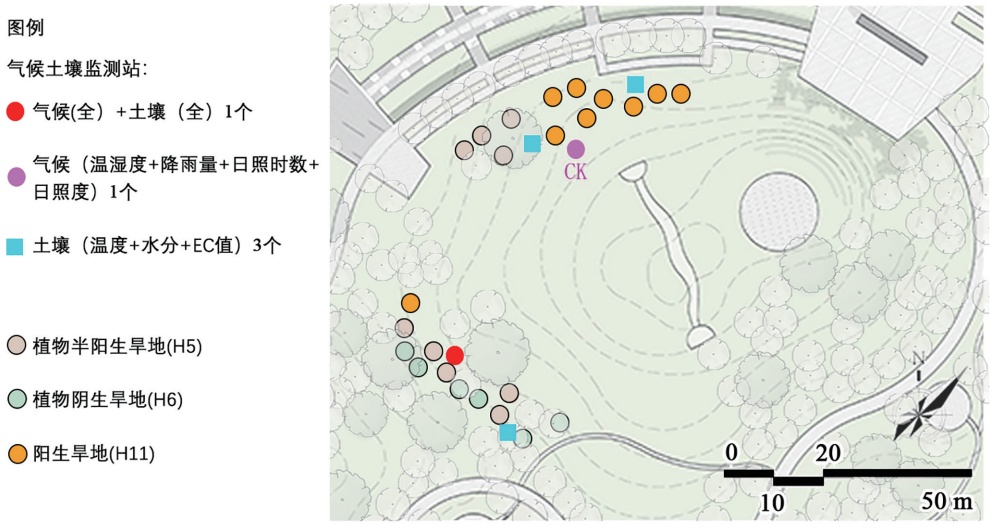


图 5 白马河公园生境分区与生境监测点

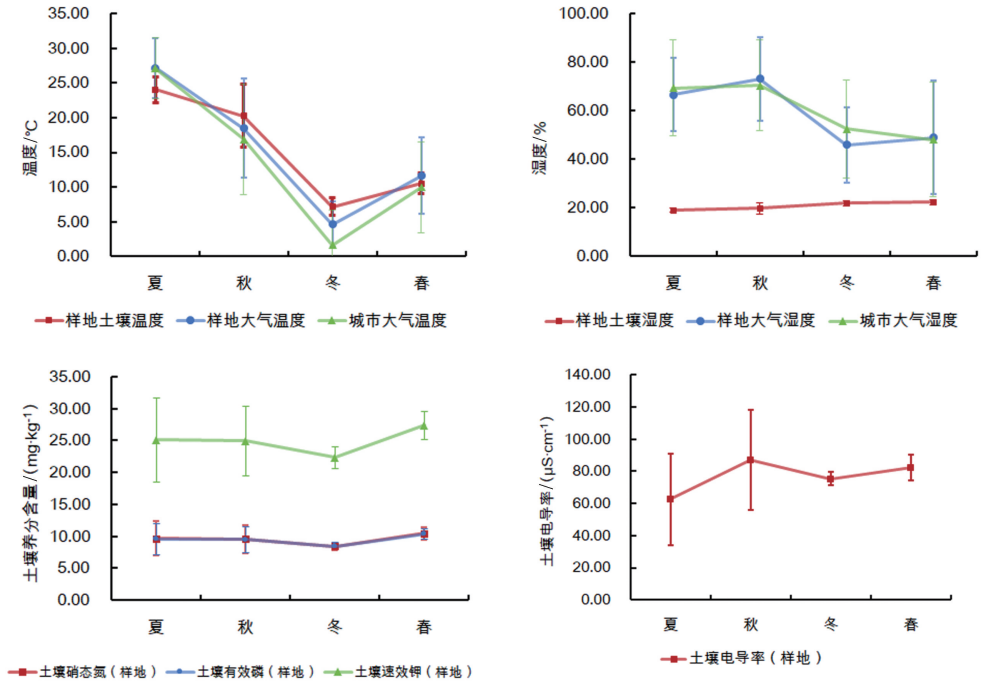


图 6 样地生境季节变化

在不同样地的推广。依据场地生境分区情况、地带性气候与植被特征可初步构建不同生境分区的植物群落组构模式，但需依据场地特征进一步进行参数化设计。

3.2 时间维度下的生境因子

将场地大气、土壤温湿度与城市大气温湿度进行对照，将样地土壤养分数据与第二次全国土壤普查养分分级标准（六级标准）进行比对（图 6）发现：样地气温在 4 个季节均超过城市气温；样地土壤湿度四季均处于较低水平，是影响该样地植物群落构建的限制因子；样地中土壤养分仅土壤有效磷含量达到Ⅳ级指标（5～10 mg·kg^{-1}，适宜），而土壤硝态氮含量为Ⅵ级指标（<30 mg·kg^{-1}，极贫乏），土壤速效钾含量也为Ⅵ级指标（<30 mg·kg^{-1}，极贫乏），土壤氮含量及土壤钾含量是影响该样地植物群落构建的限制因子；样地土壤电导率四季均较低，均远低于农业上公认的盐分胁迫临界值（常为 800～1 600 μS·cm^{-1}）。依据智慧平台实验样方模型进行智慧监测、统计、分析，并形成基于生境因子诊断的生境评估数据库，初步提出科学的设计

与管护策略。

3.3　植物群落时空动态特征及其生境适应性

研究依据植物群落时空动态特征智慧诊断对原有 3 层垂直地被植物群落组构模式（“结构层+季节主题层+地被层”）进行科学调整，并进一步形成生境评估数据库。

3.3.1　植物群落科属种组成及其生境适应性

对取样地地被植物进行科属种统计，共记录有 28 科 57 属 63 种地被植物，仅有菊科（Asteraceae）为多种科（种数 ≥ 15），唇形科（Lamiaceae）、禾本科（Poaceae）为中等科（种数 = 5 ~ 14），车前科（Plantaginaceae）、莎草科（Cyperaceae）、景天科（Crassulaceae）、葡萄科（Vitaceae）、苋科（Amaranthaceae）、紫草科（Boraginaceae）均为寡种科（种数 = 2 ~ 4），其余 19 种均为单种科（种数 = 1）。可见该样地植物群落科属种组成中多种科及中等科较少，单种科种类丰富，科的四季种类变化主要有单种科引起。

样地植物群落秋季科属种组成最为丰富，冬季科属种组成相对单一，总体科属种组成较为稳定。菊科在四季的科占比均为最大，在夏、秋、冬、春季分别占 36.11%、31.58%、30.77%、31.25%，菊科的单科优势可能导致植物群落单一化，且菊科中强扩散性的植物是促使菊科单科优势的主要因素。中等科仅有唇形科及禾本科两种，较少的中等科可能导致植物群落组成趋向单一化。据此，依据智慧平台实验样方模型进行智慧统计、分析，在不同科中依据重要值（*I*）筛选适应于该场地的植物种类并调整科属种组成比例，形成基于科属种组成诊断的生境评估数据库，初步提出科学的设计与管护策略。

3.3.2　植物群丛类型划分及其生境适应性

该样地在建植后的演替中产生了群丛类型的四季变化，与设计时植物群落组构模式具有一定的差异。通过研究群丛类型变化，进一步确定更稳定的植物群落组构模式。依据轮廓系数法确定了不同季节植物群落的最佳聚类数量，夏季、秋季、春季的 16 个样方各分为 4 个组最为理想，冬季的 16 个样方则被分为 5 个组最为理想，共分为 17 个组，命名为 17 个群丛（图 7）。

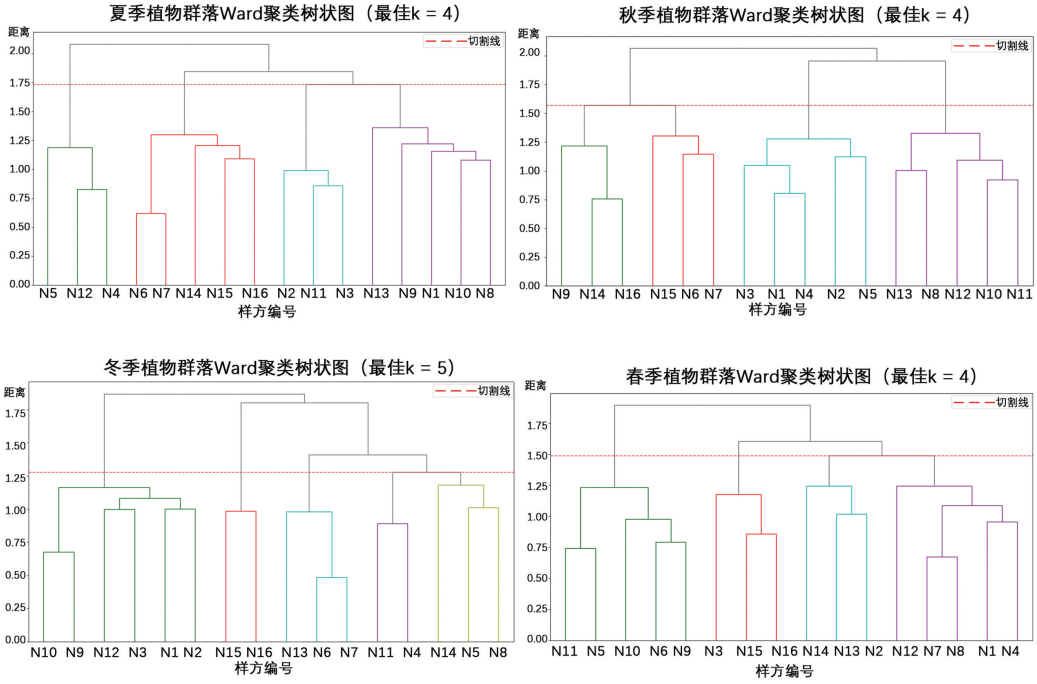


图 7　样地不同季节植物群落 ward 聚类

四季主要群丛类型中，扩散性强的自生植物逐渐占据优势，且植物种类具有较大的季节变化。夏季主要群丛仍主要由稳定栽培植物组成，呈现以栽培植物为主的多样植物群落景观；秋季主要群丛中，多数群丛中植物组成主要为自生植物，鬼针草（*Bidens pilosa*）、马兰（*Aster indicus*）、乌蔹莓（*Cayratia japonica*）在多个群丛中占据优势；冬季主要群丛中，自生植物种类的变化使群丛类

型产生较大变化，一年蓬（*Erigeron annuus*）、阿拉伯婆婆纳（*Veronica persica*）、小蓬草（*Conyza canadensis*）在多个群丛中占据优势；春季主要群丛中，斑种草（*Bothriospermum tenellum*）、马兰、阿拉伯婆婆纳在多个群丛中占据优势。

据此，需采取设计与管护措施提升稳定性较强的植物优势度，在秋、冬两季补种限制性植物从而重点管控强扩散性植物，形成基于群丛类型适应性诊断的生境评估数据库。此外，主要群丛类型适应于不同生境分区，基于群丛类型的分布状况可进一步优化原有适应性植物群落组构模式，提升其稳定性（表 1）。

表 1 适应性植物群落：基于群丛类型分析初步优化植物群落组构模式

生境分区	植物群落组构模式初构	基于群丛类型调整植物群落组构模式	参考群丛
H1	千屈菜（*Lythrum salicarias*）-菖蒲（*Acorus calamus*）-细叶麦冬（*Ophiopogon japonicus*）	迷迭香（*Rosmarinus officinalis*）-菖蒲-野菊（*Chrysanthemum indicum*）-千屈菜-过路黄（*Lysimachia nummularia* 'Aurea'）	X3-2，X1-2，X2-2
H2	细叶芒（*Miscanthus sinensis* 'Gracillimus'）-火炬花（*Kniphofia uvaria*）-垂盆草（*Sedum sarmentosum*）	细叶芒-木茼蒿（*Argyranthemum frutescens*）-墨西哥鼠尾草（*Salvia leucantha*）-垂盆草	X3-3，X1-2，X2-2
H3	长药八宝（*Hylotelephium spectabile*）-木茼蒿-佛甲草（*Sedum lineare*）	长药八宝-木茼蒿-大花滨菊（*Leucanthemum maximum*）-糙叶赛菊芋（*Heliopsis helianthoides* var. *scabra*）-佛甲草	X1-1
H4	肾蕨（*Nephrolepis cordifolia*）-玉簪（*Hosta plantaginea*）-日本矮麦冬（*Ophiopogon japonicus*）	雄黄兰（*Crocosmia* × *crocosmiiflora*）/肾蕨-蓍草（*Achillea millefolium*）/玉簪-日本矮麦冬	X1-3，X1-4
H5	狼尾草（*Pennisetum alopecuroides*）-松果菊（*Echinacea purpurea*）-过路黄	狼尾草-墨西哥鼠尾草-松果菊-马鞭草（*Verbena officinalis*）-过路黄	X2-1

注：X1-1、X1-2、X1-3、X1-4 为依据夏季植物群落调研划分的 4 个群丛；X2-1 、X2-2、X2-3、X2-4 为依据秋季植物群落调研划分的 4 个群丛；X3 -1、X3-2、X3-3、X3-4、X3-5 为依据冬季植物群落调研划分的 5 个群丛；X4-1、X4-2、X4-3、X4-4 为依据春季植物群落调研划分的 4 个群丛。

3.3.3 植物群落物种多样性的生境适应性

依据场地植物群落物种多样性分析进一步优化植物群落结构。结果显示，不同生境分区的物种多样性在不同季节具差异性变化（图 8）：夏季主要受水因子和光照因子的综合影响，总体上干区物种丰富度高于湿区，干区中半阳生生境物种丰富度高于阴生生境；秋季主要受水因子的影响，湿区物种丰富度高于干区；冬季及春季均受光照及水因子的综合影响，总体上半阳生生境物种丰富度高于阴生生境，湿区生境高于干区。综上，光照因子是影响物种多样性的主要因素，水因子则是次要因素。

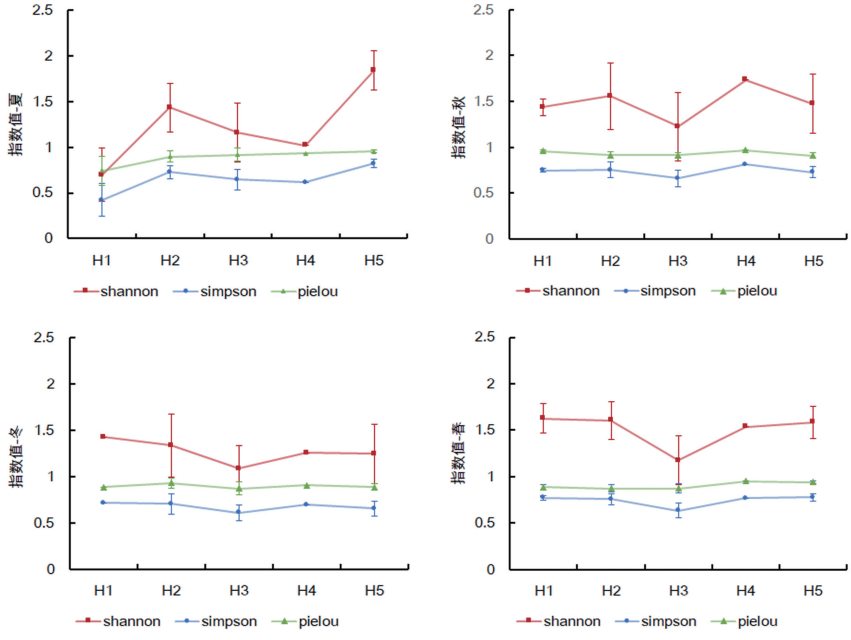


图 8 不同生境下的物种多样性指数变化

综合西北地区建成环境典型地被植物群落结构及生物多样性实测数据，形成基于生物多样性适应性诊断的生境评估数据库及植物群落结构优化方案（表 2）。

表 2　适应性植物群落：基于生物多样性分析优化植物群落结构

生境分区	西北地区不同生境典型群落结构	基于多样性的群落结构优化
H1	平均组构层数为 3，物种数 2~6	多样性最高，适当提升物种数，组构层数为 3，物种数 5~7
H2	平均组构层数 2~3，物种数 3~7	多样性较高，选择较高组构层数及物种数；组构层数为 3，物种数 4~6
H3	平均组构层数为 2，物种数 2~5	多样性中等，维持原结构组构层数及物种数；组构层数为 2，物种数 2~5
H4	平均组构层数 2~3，物种数 3~8	多样性中等，选择较低组构层数及物种数；组构层数为 2，物种数 2~5
H5	平均组构层数 2~3，物种数 3~7	多样性较高，选择较高组构层数及物种数；组构层数为 3，物种数 4~6

4　基于数字孪生技术的生境评估与植物群落适应性设计

4.1　全周期生境评估及植物群落适应性设计思路

基于智慧平台的生境因子监测提供实时动态数据，通过反馈机制和数字流程串联“生境评估-植物规划设计-建植施工-管理运营”，形成后台智慧校正闭环设计思路（图 9）。其中，数字流程以数据获取、数据分析与智慧诊断步骤形成了生境适应性数据库，通过周期反馈和作用于管理运维的实时反馈优化设计与管护，实现智慧校正。

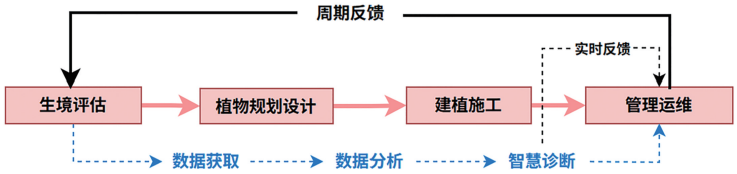


图 9　后台智慧校正闭环设计思路

4.2　生境评估数据库构建

在空间维度上对场地进行生境分区，在时间维度上对场地进行生境监测，探究时空维度下的科属种变化、主要群丛类型变化及物种多样性变化，以“智慧诊断+动态反馈”的方式将设计参数转化为设计与管护优化策略（图 10）。形成的设计与管护措施将以生境评估数据库的形式存档，以实时反馈、周期反馈的途径为植物群落设计与管护提供数字化依据。

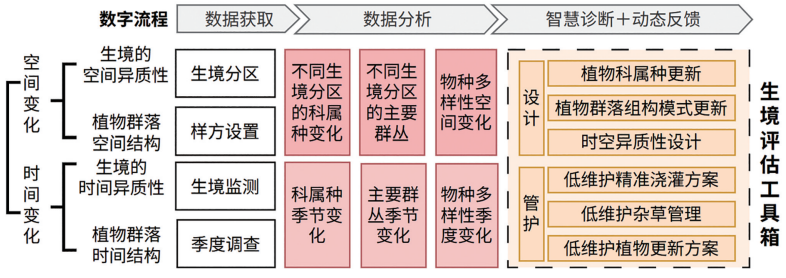


图 10　生境适应性数据库构建

4.3　适应性植物组构模式构建

研究基于样地的植物、生境数据与分析提出了适应性植物群落优化方法：依据实测数据重构科属种组成，为不同生境选择稳定性强的植物种类；依据群丛类型划分明晰稳定的植物群落组成，优化植物群落组构模式；依据生物多样性分析优化植物群落结构。综合以上分析及生境评估，最终形成 12 种适应性植物群落组构模式，其中 10 种为南门花园适应性植物群落组构模式，2 种为白马河公园推广的适应性植物群落组构模式（图 11）。

5　结论

本研究以生境与植物的相互关系为切入点，在关注景观效果的同时兼顾其生态性与适应性，强调对植物群落全周期设计、建植与养护过程的观测、验证及优化方案的提出，探究生境评估与

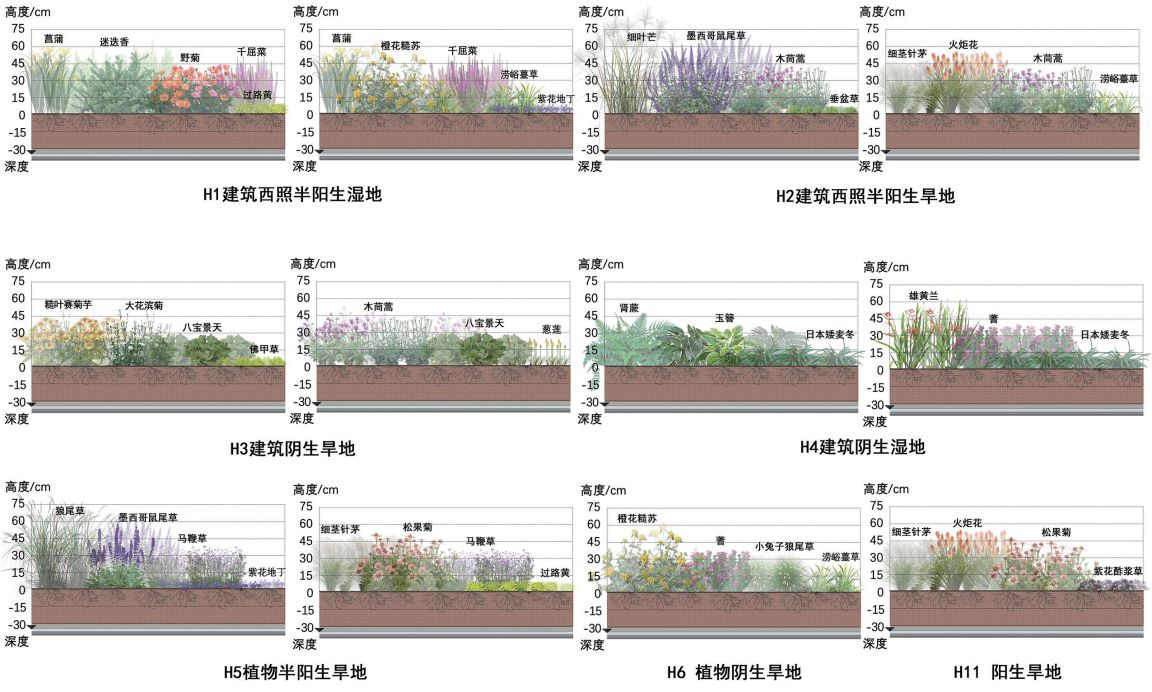


图 11 不同生境的适应性植物群落组构模式

适应性植物群落组构模式的构建及数字化方法。构建的生境营造智慧景观平台通过面向全生命周期的数字孪生技术在多时空尺度中整合多个设计目标，形成场地生境因子与植物多目标实体设计-后台智慧校正耦合的数字孪生方法，串联“生境评估-植物规划设计-建植施工-管理运维”4 个环节的闭环设计流程。研究结果为西北地区气候特征下的城市绿地生境与植物群落适配性研究提供了设计、建植、管理的指导方法。未来研究需在数字孪生应用场景中进一步提高试验样本量，以避免试验的偶然性与局限性。

参考文献

[1]宋永昌.植被生态学:2 版[M].北京:高等教育出版社,2017.

[2]KÖPPLER M R, HITCHMOUGH J D. Ecology good, aut-ecology better; improving the sustainability of designed plantings[J]. Journal of Landscape Architecture, 2015, 10(2): 82-91.

[3]刘晖,吴小辉,李仓拴.生境营造的实验性研究(二):场地生境类型划分与分区[J].中国园林,2017,33(7):46-53.

[4]刘晖,吴小辉,薛治纲,等.场地生境营造的实验与计算机模拟设计研究[J].中国园林,2017,33(10):19-23.

[5]王晶懋,刘晖,吴小辉,等.基于场地小气候特征的草本植物群落设计研究[J].风景园林,2018,25(4):98-102.

[6]刘晖,王晶懋,吴小辉.生境营造的实验性研究[J].中国园林,2017,33(3):19-23.

[7]王晶懋,刘晖,范李一璇,等.城市场地生境营造与植物群落设计评述[J].中国城市林业,2022,20(6):41-47.

[8]刘晖,许博文,陈宇.城市生境及其植物群落设计:西北半干旱区生境营造研究[J].风景园林,2020,27(4):36-41.

[9]苏泳娴,黄光庆,陈修治,等.城市绿地的生态环境效应研究进展[J].生态学报,2011,31(23):302-315.

[10]姜小蕾.决定崂山风景区植物群落组成结构异质性的环境因子分析[D].北京:中国林业科学研究院,2021.

[11]孙晨娜,杨大新,宋清海,等.2011—2020 年云南元江干热河谷生态站气象监测数据集[J].中国科学数据,2022,7(1):205-216.

[12]袁旸洋,成玉宁.过程、逻辑与模型:参数化风景园林规划设计解析[J].中国园林,2018,34(10):77-82.

[13]成玉宁,樊柏青.数字景观进程[J].中国园林,2023,39(6):6-12.

[14]张晓彤,刘晖,左翔,等.数据为媒:数字孪生技术在生态实践中的应用[J].中国城市林业,2025,23(6):171-177.

[15]王晶懋,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(7):132-140.

[16]王晶懋,齐鑫,刘晖,等.基于全生命周期的城市绿地碳库构建与碳汇量化[J].中国城市林业,2025,23(3):73-81.

[17]张金屯.数量生态学[M].北京:科学出版社,2004.