

上海三林楔形绿地林水复合区植物多样性评价指标研究

Research on Plant Diversity Evaluation Indicators for Forest-Water Ecotones in Shanghai Sanlin Wedge Green Space

马潇佚¹ 张冬梅^{2*} 罗玉兰² 秦巧平¹
MA Xiaoyi¹ ZHANG Dongmei^{2*} LUO Yulan² QIN Qiaoping¹

(1.上海应用技术大学生态工程与技术学院, 上海 201418; 2.上海市园林科学规划研究院, 上海 200232)
(1. School of Ecological Engineering and Technology, Shanghai Institute of Technology, Shanghai, China, 201418; 2. Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Shanghai, China, 200232)

文章编号: 1000-0283(2026)03-0122-09
DOI: 10.12193/j.laing.20251020001
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2025-10-20
修回日期: 2026-01-08

摘要

林水复合区是城市公园绿地中生态位相对复杂、生境类型比较丰富的区域,其植物多样性水平直接影响着城市绿地景观效果、生态环境及其服务价值。采用文献分析法筛选出适用于城市公园绿地林水复合区植物多样性的评价指标,通过各指标的相关性分析系统构建出多维度指标体系;利用层次分析法确定各个指标的权重,并对上海三林楔形绿地林水复合区植物多样性进行综合评价。结果表明,根据多个关键词组合共检索833篇文献,引用筛选出13篇相关文献,确定了物种多样性、群落结构、景观特征等3个一级指标、12个二级指标。27个样方中,耐水湿树种占比最高,其中样方S18、S12综合评价分值最高。与植物多样性强相关的因子有植物物种个数、植物丰富度、耐水湿植物比例、层次丰富度、生活型统计、色彩与季相性。并在此基础上提出建立自然缓坡驳岸,种植本土适生耐水湿乔木树种,选用乔灌木搭配等措施,提高林水复合区的植物多样性水平。

关键词

公园绿地; 植物多样性; 评价指标; 层次分析法; 上海三林楔形绿地

Abstract

The forest-water ecotones represent areas within urban park green spaces that feature relatively complex ecological niches and abundant habitat types, of which the plant diversity level directly influences urban landscape aesthetics, ecological environmental health, and associated service values. This study employed a literature analysis method to identify evaluation indicators suitable for assessing plant diversity in these areas. Through correlation analysis of multiple indicators, a multidimensional indicator framework was constructed systematically. The Analytic Hierarchy Process was applied to determine indicator weights, followed by a comprehensive evaluation conducted in Shanghai Sanlin Wedge Green Space. A total of 833 publications were initially retrieved using multiple keyword combinations, of which 13 were ultimately included after screening. Three primary indicators (species diversity, community structure, and landscape characteristics) and twelve secondary indicators were established. Among the 27 sampling plots in the Sanlin Wedge Green Space, hydrophilic tree species predominated, with plots S18 and S12 achieving the highest comprehensive evaluation scores. Key factors strongly correlated with plant diversity included: number of plant species, plant richness, proportion of hydrophilic species, stratification richness, life form statistics, and chromatic / seasonal variation. Accordingly, enhancement strategies were proposed, including establishing natural, gentle-slope revetments, planting native hydrophilic trees, and implementing layered tree-shrub-herb configurations to enhance plant diversity in forest-water ecotones.

Keywords

urban park green space; plant diversity; evaluation index; analytic hierarchy process; Shanghai Sanlin Wedge Green Space

马潇佚

2001年生/女/上海人/在读硕士研究生/研究方向为风景园林规划设计

张冬梅

1970年生/女/河南周口人/博士/教授级高级工程师/上海领军人才/研究方向为城市绿化适生树种选育

罗玉兰

1975年生/女/上海人/硕士/教授级高级工程师/研究方向为园林植物遗传育种、栽培及应用

林水复合区由绿色空间与水体组成,作为绿地生态系统和水生生态系统的联系纽带可以丰富城市绿地的植物多样性,直接影响着城市绿地景观效果、生态环境及其服务价值。近年来,国家高度重视生态保护修复的系统性、整体性,林水复合是“山水林田湖

基金项目:

国家重点研发计划项目(编号:2023YFC3804902);上海市“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目“基于生物多样性的城市困难立地高质量园林绿化智能技术及示范”(编号:22dz1202200)

*通信作者(Author for correspondence)
E-mail: 418517920@qq.com

草沙”一体化保护和系统治理理念的具体实践。由于林水复合区的特殊性导致现有林水结合度较低，线状林水结合度为0.2795，面状林水结合度为0.3549，空间林水结合度仅为0.3058^[1]，限制了该区域内植物多样性的提升。除此之外，上海林水复合还面临着空间资源紧张、生态系统脆弱等诸多问题^[2]，2023年3月，上海市河湖长制林长制工作会议上，市委书记陈吉宁提出“向水要林、向林要水，水中有绿、绿中有水，平时为绿、灾时为水”的理念，积极破解行业工程技术壁垒，以营造出水绿融合的生态空间。

有研究表明，绿地面积、绿地率、植被丰度、乔木覆盖度等指标的增加能有效促进城市绿地生物多样性提升^[3]。此外，驳岸处理方式也显著影响植物生长与植物多样性；杨阳等^[4]对国家湿地公园近自然滨水空间进行实地调查，发现坡度越缓植物种类越丰富，并且自然式驳岸更适宜植物生长^[5]。植物种类的选择与群落结构对植物多样性会造成影响，钱兴华、邵长华等^[6-7]研究发现以乡土物种为主，科学引进外来物种，可以丰富植物种类和种群规模，当本地植物占比超过60%时，生物多样性显著高于以外来植物为主导的区域^[8]，多层植被（乔木+灌木+草本）的复杂度每提升一级，物种丰富度增加22%^[9-10]。

目前，对绿地林水复合的研究相对较少，主要集中在林水复合空间格局^[2-11]、功能协调^[12]、景观营造^[13-15]等方面，通过对近些年国外研究的梳理，发现其多着眼于植物多样性的环境驱动因子^[16]、人为干扰^[17]与生态修复^[18]等方面，缺乏对已建成绿地林水复合区的综合评价研究。为了进一步提升林水功能融合度，营造高品质城市公园绿地，本研究基于中国知网数据库文献，采用文献分析方法梳理影响林水复合区植物多样性的关键

因子，构建林水复合区植物多样性的评价体系，同时以上海三林楔形绿地为例，开展林水复合区植物多样性综合评价并提出优化策略，为城市绿地植物多样性提升制定科学的营造策略与合理的布局规划。

1 林水复合区植物多样性评价指标选取

1.1 数据来源

将“植物多样性”“城市绿地”“湿地”“滨水绿地”“公园绿地”“评价指标”等关键词进行组合检索（汇总时限为2007年1月—2024年8月），共纳入833篇文献。采用文献分析法，通过浏览文献标题、摘要、关键词进行筛选，并按以下标准对文献进行筛选：（1）文献类型为研究论文和综述型论文，删除会议论文、书籍章节等；（2）研究内容与绿地、植物多样性、评价指标相关；（3）研究对象的用地性质属于城市绿地，且包含水体。最终筛选出13篇文献。

城市绿地包括：公园绿地、广场用地、防护绿地及附属绿地（如校园、居住区及医院绿地），以及部分区域绿地。研究内容聚焦于群落结构、物种组成及植物配置等方面，通过样地植物多样性分析提出提升策略；在调查方法上，普遍采用实地调查方式，具体包括普查法、随机样方法、样地调查法、样带调查法、典型样地调查法、典型抽样法和样方法等。

1.2 林水复合区植物多样性评价指标

林水复合区植物多样性评价指标除了反映植物及其群落特征，还要体现林水交织地带的特殊性和复合生态功能，包含三个层面：物种多样性、群落结构、景观特征。

在林水复合区中，受环境中的海拔、坡位、坡向、土壤等多个因素影响^[16]，植物多样性不仅反映了立地条件的适宜性，也直接

决定了系统提供栖息地、水质净化等生态功能的潜力。因此，常将其作为基础评价层，并通过物种数等指标进行量化。

多数研究采用Shannon-Wiener指数、Simpson优势度指数、Pielou均匀度指数等作为多样性判断依据，将物种丰富度与Shannon-Wiener指数作为预测生态系统稳定性（如抗干扰能力）的重要依据^[18-19]。也有研究借助层次分析法，从植物种类数量、生活型、区系分布、配置模式与群落结构等方面开展调查，识别现存问题并提出优化策略。通过文献分析显示，植物丰富度、Margalef多样性指数、树种重要值、木本植物指数和群落结构等指标使用频率较高且相关性较强（表1）。

群落结构决定了资源利用效率与生态位分化。林水复合区的群落结构层次丰富度和生活型多样性显著影响养分循环、微气候调节等过程^[19]。高连通度的林水复合区能够显著促进植物多样性，其中上层乔木及木本植物层对植物多样性的形成具有决定性作用。良好的乔灌木搭配，尤其是林草结合模式，有助于提升植物多样性。多层次的群落结构不仅增强视觉丰富性，也提高了系统稳定性，进而促进植物丰富度上升^[20]。

林水复合区作为城市绿地的组成之一，为人们提供美化环境、游憩娱乐、改善生态的功能，其景观效益显著影响公众健康与城市韧性。同时，将景观特征纳入综合评价体系，通过景观格局演化^[21-22]对植物多样性的影响机制，借助绿视率、色彩与季相变化、可达性等指标，评估景观的时序稳定性与景观特征^[23-24]，量化人类活动对植物多样性的潜在影响。

1.3 林水复合区植物多样性评价体系

层次分析法是应用多因素分类法确定权

重的因素而形成的多层次分析方法，通过构建评价模型和计算评价因子权重，能客观定量地反映^[21]。本研究综合现有文献、样地调研结果，以物种多样性、群落结构、景观特征作为准则层，并划分成12个指标层，利用层次分析法确定林水复合区植物多样性评价指标的权重，所有指标均提供了明确的操作化定义与计算公式(表2)，经过验证确认其有效性和可行性(CR < 0.10)。根据现有的文献与研究，并结合现场调研，确定各评价指标评价标准(表3)。

在指标量化体系方面，本研究强调所有指标均具备明确的操作化定义与可复现的计算逻辑。例如，“耐水湿植物比例”等指标直接响应滨水生境的特殊生态过程；“木本植物指数”整合了丰富度、密度与胸高断面面积以反映结构整体性^[22]；“林水融合度”被量化为岸线形态与林冠覆盖的综合指数^[2]。该体系实现了从生态学概念到可测量、可计算变量的转化，为精准评价奠定了方法基础。

2 城市公园绿地林水复合区案例分析

2.1 研究区概况

上海三林楔形绿地位于上海市浦东新区，总面积为412.3 hm²，其中绿地面积约240 hm²，水域面积约28.4 hm²。该绿地原本是城中村，于2014年开始进行改造，属于上海重点打造的环城“绿肺—八大楔形绿地”之一，将与前滩国际商务区、三林滨江南片区域形成“蓝绿交织”的高品质城市空间。上海三林楔形绿地内的河道设计策略注重其自身的净水系统及季节性溪流的设计，通过植草过滤渠收集到的雨水资源有效的利用、储存和渗透引流，建造生物蓄水池及生物滞水区，充分发挥植物群落及生境本身的演替功能。

杉林溪地位于该绿地的北部区域，与

表1 城市绿地植物多样性评价指标应用频度
Tab. 1 Application frequency of plant diversity evaluation indicators in urban green spaces

评价指标 Evaluation indicator	评价尺度 Evaluation scale	应用频次 / 次 Application frequency
植物丰富度指数	城市绿地、公园绿地、广场绿地、滨水绿地	13
Shannon-Wiener 指数、Simpson 优势度指数、Pielou 均匀度指数	城市绿地、公园绿地、城市建成区、滨水绿地	11
植物生长情况	城市绿地	10
植物群落结构	校园绿地、城市绿地、公园绿地、广场绿地、滨水绿地	7
乔灌木比例	城市绿地、公园绿地	3

表2 林水复合区植物多样性评价方法与权重
Tab. 2 Evaluation methods and weights for plant diversity in forest-water ecotones

准则层 Criteria layer	指标层 Indicator layer	评价方法 Evaluation method	指标权重 Indicator weight
物种多样性	植物物种个数	不同科、属、种统计	0.3352
	植物丰富度	在一个群落或环境中物种数目的多少，群落中种类丰富度的指数	0.0908
	Margalef 多样性指数	生境内多样性、差异性，计算公式为： $R = \frac{S_p - 1}{\ln N}$	0.1860
	耐水湿植物比例	耐水湿植物在总体的占比，计算公式为： $S_a = n/S_p$	0.0371
	层次丰富度	群落中乔灌木比例与结构	0.1420
	生活型统计	乔木、灌木、草本植物、水生植物	0.0092
群落结构	植物生长势	群落生长情况反映	0.0724
	木本植物指数	植物群落中木本植物(包括乔木和灌木)在物种构成、个体数量及空间占据方面的整体状况，计算公式为： $W_{PI} = \frac{R_S + R_D + R_{BA}}{3}$	0.0385
	林水融合度	绿地与水体的邻接程度，计算公式为： $F_{WID} = L_c/L_t$	0.0168
	色彩与季相性	色彩丰富度和季节变化	0.0514
景观特征	绿视率	照片的绿色面积占全图的比例，计算公式为： $G = S_{green}/S_{pixel}$	0.0070
	可达性	道路是否通往植物景观内，观赏植物	0.0130

注：S_p为样方内所有植物的物种总数，N为样方内所有植物的个数总数；S_a为耐水湿植物比例，n为样方内耐水湿植物总数；W_{PI}为木本植物指数，R_S为相对物种丰富度，R_D为相对个体密度，R_{BA}为相对胸高断面面积；F_{WID}为林水融合度，L_c为样地内林地与水体共享边界长度，L_t为样地内水体总周长，G为绿视率，S_{green}为照片上的绿色面积，S_{pixel}为图片像素面积大小。

绿地内的其他湖泊、河道共同构成了复杂而完善的水系网络，也是最具特色、生态价值和景观价值的林水复合区核心景点之一。本

次调查的杉林溪地区域面积约为139 200 m²，水体类型为河流，带状水体，水体面积约为54 500 m²。

2.2 样地选取

在上海三林楔形绿地杉林溪地区域,沿湖泊或河流岸线选取样方,间隔距离为150 m,共计27个样方(图1)。设定每个样方的面积为100 m²,且均垂直于水陆交界线。

2.3 各指标因子对林水复合区植物多样性的影响

2.3.1 植物种类丰富度

调查样地内共有植物34种(表4),其中乔木8科10属,灌木7科9属,草本11科12属。乔木树种以杉科为主,包括落羽杉(频度64.28%)、池杉(频度71.42%)、乌桕(频度10.71%)等,其郁闭度较高,平均为0.75;草本植物以麦冬为主。

三林楔形绿地杉林溪地内长期淹水区面积较多。从评价结果来看,三林楔形绿地总体上耐水湿树种比重最高,占70.59%。主要出现的耐水湿树种有池杉、落羽杉、乌桕、水杉、东方杉、柳树,多数为杉科。

2.3.2 竖向结构对植物多样性的影响

从图2可以看出,27个样方中的坡度、坡高、坡向等因子对植物多样性均无显著影响($p > 0.05$),但存在着一定的差异。

27个样方中为缓坡(坡度 $\leq 10^\circ$)的有15个,占55.56%。缓坡的植物多样性平均值、最高值(2.96)均高于急坡(2.32)和陡坡(2.85)(图2-a)。这一结果支持了缓坡既能避免平地的积水内涝,又可减少陡坡的土壤侵蚀,为多样物种提供适宜生境^[26]。

坡高与植物多样性的相关性系数为-0.135,呈负相关。当坡高达到1.26 m以上,其植物多样性低于平均值(图2-b)。

坡向与植物多样性的相关性系数为-0.149,呈负相关。尽管坡向对整体多样性的直接效应有限,但其与木本植物指数之间存在显著相关($r = 0.394, p < 0.01$),反映出坡向可能通过调节日照条件,间接影响乔木层植物的生长与分布(图2-c)。

27个调查样方包含了自然驳岸、生态驳

岸,自然驳岸的林水融合度最高,其次为生态驳岸,然而林水融合度与植物多样性并不显著相关,自然驳岸的植物多样性(2.96)比生态驳岸的植物多样性(2.78)高,但生态驳岸的植物多样性平均值(2.29)比自然驳岸的植物多样性平均值(2.05)高(图2-d)。

2.3.3 群落结构对植物多样性的影响

复层植物结构可以提高植物多样性,为不同的生物提供交流通道^[15]。27个调查样方以乔草结构(乔木+草本)为主导配置(占比 $> 50%$),层次丰富度与植物多样性显著关联($r = 0.775$)(图3)。缓坡+乔草组合常见于自然驳岸,样地内生活型越多,植物多样性越高,可多搭配沉水/挺水植物(如菖蒲)增加水陆生态连续性^[9]。

2.3.4 各评价指标间的相关性分析

从图4可以看出,植物丰富度与群落结构是植物多样性的核心因子,这表明样方内植

表3 林水复合区植物多样性评价标准
Tab. 3 Evaluation criteria for plant diversity in in forest-water ecotones

准则层 Criteria	指标 Indicators	评分标准 Evaluation criteria		
		1分	2分	3分
物种多样性	植物物种数 / 种	1 ~ 2	3 ~ 5	> 5
	植物丰富度	0	(0, 2]	(2, 4]
	Margalef 多样性指数	< 0.4	[0.4, 0.7]	> 0.7
	耐水湿植物比例	0	(0, 0.1]	> 0.1
群落结构	层次丰富度	结构单一, 1个树种	结构层次较多, 每个类别 2 ~ 4 种	结构层次丰富, 树种 5 种及以上
	生活型统计	1	2	3, 4
	植物生长势	生长衰弱, 植物有枯枝枯叶, 叶片不正常; 病虫害严重(叶片发黄, 蛀干中空)	长势较强, 没有危害性病虫害, 部分叶片有枯黄现象	长势强, 没有任何病虫害的出现, 叶片正常
	木本植物指数	< 0.3	[0.3, 0.7]	> 0.7
景观特征	林水融合度	水绿连通差, 存在硬质面或被分割	水体与绿地可以连通	水绿完全连通, 水体与绿地融合高
	色彩与季相性	可在 1 个季节观赏	可在 2 个季节观赏	可在 3 ~ 4 个季节观赏
	绿视率	绿色面积占比小于 30%	绿色面积占比 30% ~ 60%	绿色面积大于 60% 占比
	可达性	杂草较多, 覆盖道路, 无法观赏植物	部分道路不容易通往植物景观内, 观赏植物	很容易到达植物景观内, 道路容易进去观赏植物, 空间较大

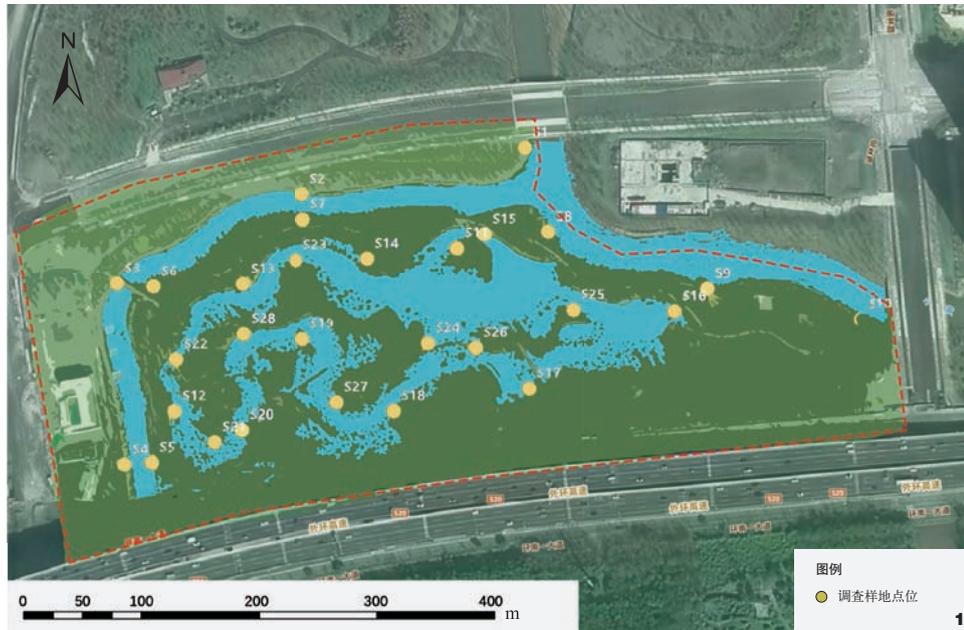


图1 三林楔形绿地样方分布图
Fig. 1 Sampling point distribution map in Sanlin Wedge Green Space

物越丰富，植物多样性越高。主要强相关因子包括植物物种个数、植物丰富度、耐水湿植物比例、层次丰富度、生活型统计、色彩与

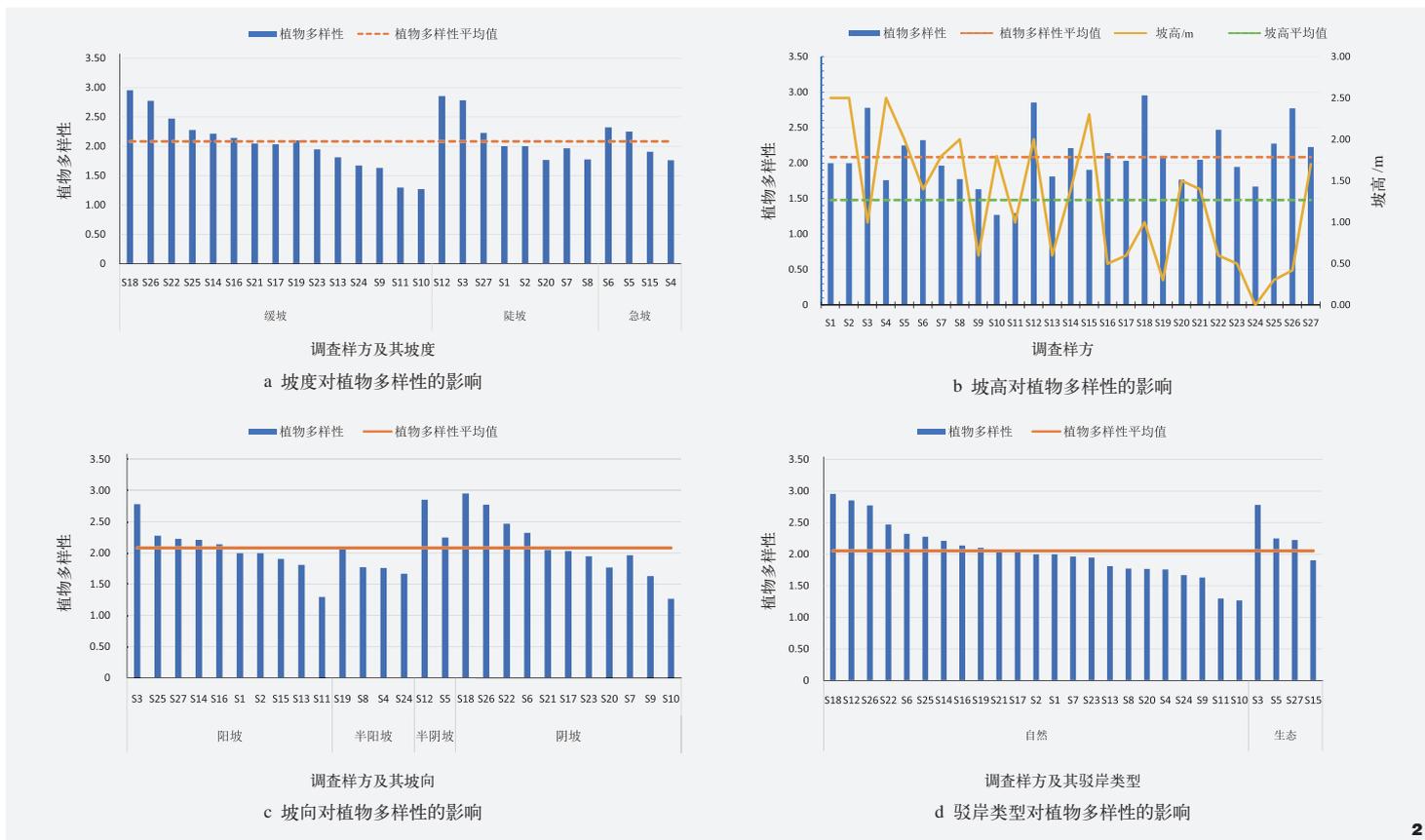
季相性。为控制多重比较导致的假阳性风险，所有相关性检验均经过错误发现率 (FDR) 校正，仅报告校正后 $q < 0.05$ 的显著结果。

进一步分析发现，植物丰富度与耐水湿植物比例相关性不显著，色彩与季相性与耐水湿植物比例相关性不显著，说明耐水湿植物在本研究中未对植物丰富度与季相性产生显著影响。而在环境因子方面，水文、地形等环境因子的直接影响较弱。调查中所涉及的水体、道路面积以及岸线长度都与植物多样性不显著相关，尽管坡度与坡高对植物多样性的影响统计不显著，但数据趋势表明陡坡与超过 1.27 m 的坡高可能通过微环境差异导致植物多样性较低。此外，林水融合度与郁闭度的负相关趋势也值得进一步探讨。

为深入解析影响林水复合区植物多样性的关键因子，本研究构建了一系列线性回归模型。结果表明，层次丰富度是植物多样性最稳定且主导的正向驱动因子 (模型1, $\beta = 0.814$, $p < 0.001$; 模型2, $\beta = 0.852$, $p < 0.001$)，其标准化系数在两个模型中均位居首位，凸显

表4 植物种类数量及其耐湿性
Tab. 4 Plant species count and their hydrotolerance

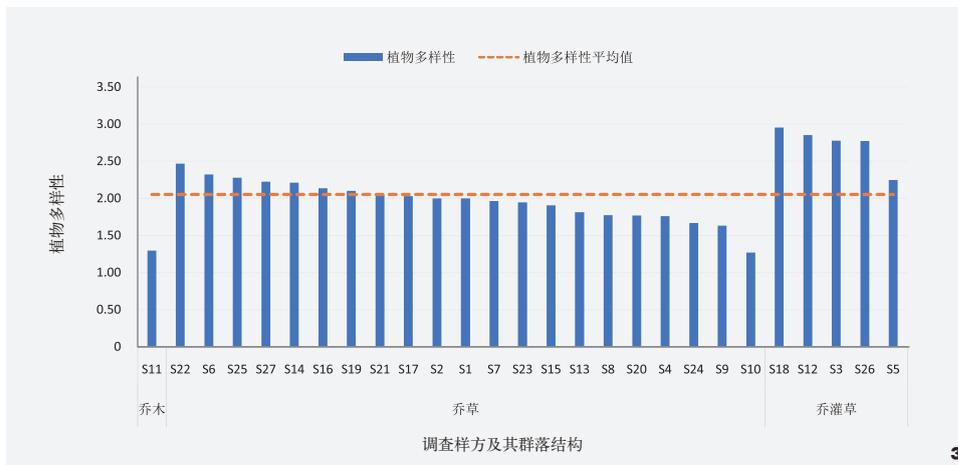
乔木 Tree	数量 / 株 Quantity	耐湿性 Hydrotol- erance	灌木 Shrub	数量 / 株 Quantity	耐湿性 Hydrotol- erance	草本 Herb	耐湿性 Hydrotol- erance
鸡爪槭 (<i>Acer palmatum</i>)	3		小檗 (<i>Berberis julianae</i>)	8		麦冬 (<i>Ophiopogon japonicus</i>)	√
乌桕 (<i>Triadica sebifera</i>)	5	√	八仙花 (<i>Hydrangea macrophylla</i>)	3	√	铜钱草 (<i>Hydrocotyle vulgaris</i>)	√
东方杉 (× <i>Taxodiomera peizhongii</i>)	4	√	绣线菊 (<i>Spiraea salicifolia</i>)	6	√	毛蕨 (<i>Cyclosorus interruptus</i>)	√
池杉 (<i>Taxodium distichum</i> var. <i>imbricatum</i>)	96	√	石楠 (<i>Photinia serratifolia</i>)	10		风车草 (<i>Cyperus involucratus</i>)	√
乐昌含笑 (<i>Michelia chapensis</i>)	2		蚊母树 (<i>Distylium racemosum</i>)	10	√	再力花 (<i>Thalia dealbata</i>)	√
香樟 (<i>Camphora officinarum</i>)	1		小叶黄杨 (<i>Buxus sinica</i> var. <i>parvifolia</i>)	3	√	马蹄金 (<i>Dichondra micrantha</i>)	√
弗吉尼亚栎 (<i>Quercus virginiana</i>)	1		构树 (<i>Broussonetia papyrifera</i>)	1	√	菖蒲 (<i>Acorus calamus</i>)	√
落羽杉 (<i>Taxodium distichum</i>)	94	√	豪猪刺 (<i>Berberis julianae</i>)	2		芦苇 (<i>Phragmites australis</i>)	√
柳 (<i>Salix babylonica</i>)	3	√	洒金桃叶珊瑚 (<i>Aucuba japonica</i> var. <i>variegata</i>)	2		蒲苇 (<i>Cortaderia selloana</i>)	√
大叶冬青 (<i>Ilex latifolia</i>)	1		溲疏 (<i>Deutzia scabra</i>)	3		苦草 (<i>Vallisneria natans</i>)	√
马尾松 (<i>Pinus massoniana</i>)	1	√				芒草 (<i>Miscanthus sinensis</i>)	√
水杉 (<i>Metasequoia glyptostroboides</i>)	2	√				梭鱼草 (<i>Pontederia cordata</i>)	√



2

了优化群落垂直结构对于提升多样性的普适性意义。然而，不同环境因子的作用则表现出显著的差异性。在模型1中，郁闭度的效应不显著 ($p = 0.596$)，暗示冠层遮阴在本研究中并非主要限制因素。而在模型2中，坡高则表现出显著的负向约束作用 ($\beta = -0.280$, $p = 0.017$)，这反映了地形条件通过影响水土保持与微生境稳定性，成为决定植物多样性空间分异的关键环境胁迫因子。

对比分析可知，相较于难以改变的地形条件（如坡高），通过生态设计优化层次丰富度这一结构因子，是更具可操作性与高效性的多样性提升策略。这一发现也验证了本评价体系能够有效甄别出结构性主导因子与环境性约束因子，为生态管理提供了明确依据。



3

图2 样方竖向结构对植物多样性的影响
Fig. 2 Impact of vertical structure on plant diversity across plots

图3 群落结构对各样方植物多样性的影响
Fig. 3 Influence of community structure on plant diversity in various plots

2.4 林水复合区植物多样性综合评价

根据评价计算，各样方的植物多样性与各评价因子差异如图5所示。三林楔形绿地

的样方中样方S18 (2.84) 和S12 (2.74) 综合评价分值最高。两者都是自然缓坡，植物配置为乔灌草，乔木层均选用2~3种乔木，灌

相关性	植物物种个数	植物丰富度	Margalef多样性指数	耐水湿植物比例	层次丰富度	生活型统计	植物生长势	木本植物指数	林水融合度	色彩与季相性	绿视率	可达性
植物物种个数	1	0.899	0.926	-0.495	0.736	0.749	.b	-0.021	.b	0.678	.b	0.17
植物丰富度	0.899	1	0.94	-0.341	0.594	0.606	.b	-0.201	.b	0.598	.b	0.181
Margalef多样性指数	0.926	0.94	1	-0.409	0.775	0.701	.b	0.066	.b	0.703	.b	0.213
耐水湿植物比例	-0.495	-0.341	-0.409	1	-0.522	-0.741	.b	-0.08	.b	-0.234	.b	-0.051
层次丰富度	0.736	0.594	0.775	-0.522	1	0.758	.b	0.431	.b	0.699	.b	0.226
生活型统计	0.749	0.606	0.701	-0.741	0.758	1	.b	0.115	.b	0.400	.b	0.221
植物生长势	.b	.b	.b	.b	.b	.b	1	.b	.b	.b	.b	.b
木本植物指数	-0.021	-0.201	0.066	-0.08	0.431	0.115	.b	1	.b	0.238	.b	-0.177
林水融合度	.b	.b	.b	.b	.b	.b	.b	.b	1	.b	.b	.b
色彩与季相性	0.678	0.598	0.703	-0.234	0.699	0.400	.b	0.238	.b	1	.b	0.193
绿视率	.b	.b	.b	.b	.b	.b	.b	.b	.b	.b	1	.b
可达性	0.17	0.181	0.213	-0.051	0.226	0.221	.b	-0.177	.b	0.193	.b	1

图4 各评价因子的Pearson相关系数
Fig. 4 Pearson correlation coefficients of evaluation factors

木层2种，样方内种植水生植物。其中乔木层有2种耐水湿树种。

S12坡向为西，S18坡向为西北，属于阴坡，样方郁闭度一致，主要乔木是池杉、落羽杉。其中S12有淹水种植的池杉与落羽杉，水中有杉树苗，梭鱼草、芦苇搭配；S18的植物长势好，乔木层有池杉、马尾松、乌桕搭配，灌木层有小叶黄杨与构树，水生植物仅有芦苇，但色相变化比S12丰富，并且比S12更便于接触水体。

S10和S11的评分最低。S10和S11同样是自然缓坡，但植物配置简单，乔木层树种单一，仅有落羽杉，郁闭度较高，没有水生植物，缺少层次。S10中郁闭度高，草本层缺乏光照。S11种植大量落羽杉，但因环境胁迫，

乔木生长高度不超过10m，生长受到阻碍，但由于其位于水域内岛，要更多考虑淹水期。

由此可见，评分较高的样方中乔木层与灌木层配置皆选用多种树种搭配。植物多样性较低的样方则树种单一，结构单一，且样方内没有水生植物。

3 林水复合区植物多样性提升策略

3.1 立地类型——坡位施策

调查发现，同为乔草结构、自然驳岸的样方，急坡S4的植物多样性(1.76)比缓坡S7(1.96)低；同为乔灌草结构、自然缓坡的样方，陡坡S12的植物多样性(2.85)比缓坡S18(2.96)低。由此可见，缓坡驳岸相较于陡坡、急坡更有利于生态功能的发挥，适宜

的坡度范围为0°~10°，但需要注意平地不适合水淹，容易造成内涝和积水导致植物涝死，对植物的耐湿性需求度高。急坡不适宜植物生长，以1:5的坡度为最好，以增强动物迁移廊道功能。

S3和S12同属于陡坡与乔灌草结构，生态驳岸的S3(2.78)比自然驳岸的S12(2.85)的植物多样性低。S3的林水融合度更低，并且存在道路隔断绿地与水体，导致植物多样性降低。将现有驳岸形式分为自然驳岸、生态驳岸、硬质驳岸三种。其中自然驳岸的林水融合度最高，硬质驳岸的林水融合度最低，通过林水融合来达到柔化水绿边界、功能连通性的协同提升，科学构建城市林水复合生态空间。

3.2 树种多样性——适地适树

本研究通过对林水复合区树种适生性评价发现，耐水湿性是强相关因子。耐水湿树种对群落稳定性的贡献度最高^[22]。

(1) 建议分区配置。在水体边缘长期淹水区与短期淹水区，对植物的耐湿性有较大的需求，可按不同品种的耐湿性强弱来确定栽植区域。例如种植乌桕、池杉、落羽杉、墨西哥落羽杉、东方杉、中山杉等耐湿乔木，多以池杉和落羽杉搭配，可以考虑垂柳、乌桕搭配。

(2) 结合实地情况，因地制宜，选用本土树种，增加本土植物多样性。根据《上海市主要乡土和适生树种名录》(沪绿容〔2025〕3号)，适合种植的树种有雪松、日本柳杉、水杉、东方杉、落羽杉、池杉、墨西哥落羽杉、圆柏、罗汉松、榉树、深山含笑、垂柳、乌桕、卫矛、水竹等。三林楔形绿地的样方S10内树种单一，建议增加池杉、落羽杉种植等乔木树种，在丰富上层耐水湿的高大乔

木的同时, 保证淹水区的水体不受影响, 也保障植物的成活率和水体能见度。

3.3 群落配置——营建近自然林

在垂直结构上使用乔灌草的配置, 做到土地利用最大化, 通过空间复合利用, 进一步提升河湖调蓄空间和森林覆盖率。更稳定的群落结构可以促成更符合自然生态的群落环境, 选用耐水湿的植物进行搭配, 根据行人活动区域与场地日照程度调整。

以三林楔形绿地样方S11为例, 由于远离道路, 没有人为干扰, 提供视野开阔的滨水景观视点, 可增加芦苇、紫穗槐、水竹等草本、灌木层植物, 有效防止水土流失, 维护水生环境、水体质量, 提升水体能见度。

在进行植物种植的同时考虑在乔草基底中嵌入耐湿灌木及水生植物, 提升垂直复杂度。同时多层次群落结构可显著增强系统抗干扰能力, 并促进近自然水生环境形成。城市绿地通常为了美观而进行频繁的打理, 建议不进行过度养护打理, 留下一定的凋落物, 促进群落生物多样性与群落稳定性^[24]。

4 结论与讨论

“林水复合”作为一种生态修复模式, 最早体现在森林生态系统中, 发挥其涵养水源、净化水质、调节径流等水文生态功能^[4]。但是, 随着城市空间用地矛盾的加剧, 林水复合建设逐步渗透到城市更新与生态修复过程中^[2], 本研究聚焦城市公园绿地中的林水复合, 旨在提升绿地率的同时增加生物多样性、调节微气候, 提升城市绿地品质。

对林水复合区植物多样性评价指标的确立, 现有方法多关注单一生态要素, 难以全面反映植物-水体重叠区域的复合生态功能^[24]。本研究通过文献分析构建了包含物

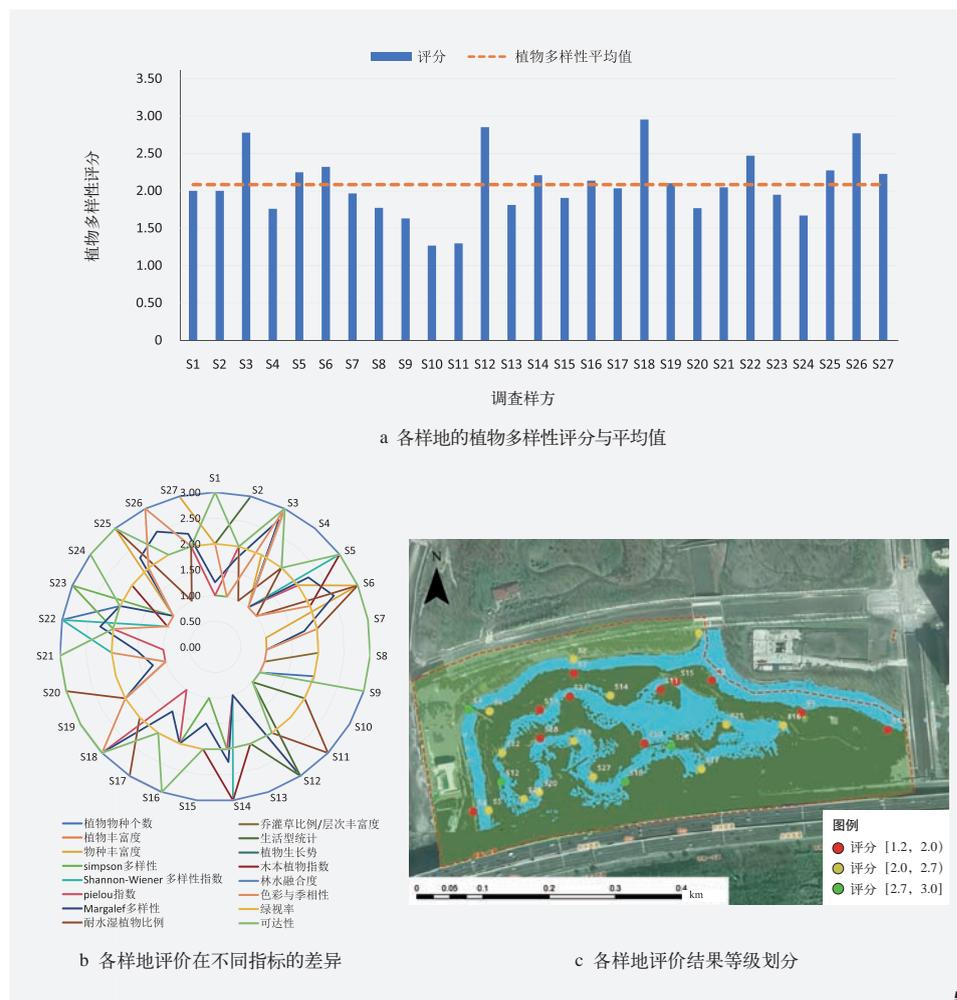


图5 三林楔形绿地方评价结果
Fig. 5 Evaluation results of sampling plots in Sanlin Wedge Green Space

种多样性、群落结构、景观特征等3个一级指标、12个二级指标的针对林水复合区的评价体系, 其中关键影响因子有植物物种个数、植物丰富度、层次丰富度、生活型统计、木本植物指数、林水融合度等6个。本研究遵循“可量化、可检验、可解释”的原则构建分析框架。在方法层面, 通过为林水融合度、木本植物指数等核心指标赋予精确的算法, 确保了指标量化体系的透明性与可操作性, 使抽象的生态概念转化为可比较的连续变量。在统计层面, 通过FDR校正及线性回归模型

检验, 系统提升了从数据中发现可靠模式、解析复杂交互关系的统计稳健性与因果推断力度。相较于传统的城市绿地评价指标, 本体系尤为侧重揭示“林-水-人”系统的交互机制, 其核心设计体现在以下关键指标的作用上: 一是, “层次丰富度”与“木本植物指数”旨在量化群落的垂直结构与资源占据能力, 直接关联于生境复杂性与生态位分异。二是, “林水融合度”体现了林地与水体在空间形态上的交织与渗透程度, 是评估边缘效应的关键; “植物耐水性”通过生活型统计等

反映针对性诊断植物对周期性水文扰动的适应能力, 保障了评价体系在滨水环境中的适用性。通过引入上述具有明确生态学指向与空间属性的指标, 本体系实现了从“植物物种清单”向“功能-结构-空间”一体化评价的转变, 能为城市公园林水复合区的生态修复与精准营建提供直接、量化的决策依据。

上海三林楔形绿地是黄浦江生态廊道及城市外环生态廊道的重要交汇区, 通过场地更新和修复, 构建城市生态廊道、重塑动植物栖息地及韧性景观。该绿地杉林溪地区域属于典型的林水复合带状区水体, 占39.12%, 植物共有34种, 其中耐水湿树种比重较高, 多数为池杉、落羽杉、水杉、东方杉等杉类树种。另外, 27个样方以自然式驳岸、乔草结构为主, 具备了一定的沿水文梯度的微地形条件, 可在树种单一的区域增加耐水湿的阔叶类树种, 例如黄连木、丝棉木等^[25], 以及芦苇、紫穗槐、水竹等灌木层植物, 构建更加适合动植物栖息、交流的带状通道。

为提高林水复合区的植物多样性, 可以实施以下策略: (1) 将驳岸改造为自然缓坡, 坡度最宜为1:5, 增强水陆交流通道; (2) 分层配置耐湿乔木、灌木及水生植物, 优先选择本土适生种; (3) 构建乔灌草复合群落, 增强垂直结构与物种互作, 增加草本、灌木层植物种类以及水生植物。通过丰富植物的种类和数量来实现群落的物种多样性指数, 进而提高群落的稳定性和均匀性。

目前针对林水复合区植物多样性研究正从描述性分析向机制性解析转变, 从单一因子研究向多过程整合发展。尽管研究方法和理论框架取得了显著进展, 但仍存在重要挑战。

考虑到林水复合区的空间特征, 本研究通过整合立地条件、群落特征及景观功能, 初步构建了植物多样性评价框架, 但还缺少

对公园绿地林水复合区内水生植物种类的调查, 水位波动、水质变化对植物生长影响的探讨, 以及公园绿地内面状、点状等不同水体类型的植物群落构建, 等等。未来需进一步结合长期监测与动态模型, 深入探讨林水复合区植物群落演变过程^[11]、生态功能以及对鸟类、昆虫多样性及活动变化的影响^[27], 为生态宜居城市的精细化治理提供依据。这一体系的完善不仅有助于缓解城市化对生物多样性的负面影响, 亦可推动“人与自然交融”的可持续发展目标实现。

注: 文中图表由作者绘制。

参考文献

- [1] 王春英. 城市林业规划中的林水结合研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [2] 孙道千, 孙维然, 刘世梁, 等. 上海市城乡林水复合生态系统类型识别与修复潜力[J]. 风景园林, 2025, 32(8): 30-39.
- [3] 王云才, 王若静, 卢星昊. 城市微绿地生物多样性: 价值、影响因素与提升途径[J]. 园林, 2023, 40(12): 22-29.
- [4] 杨阳, 左佳莹, 韩慧英. 沪瀛国家湿地公园近自然滨水空间植物多样性及群落组分[J]. 广西林业科学, 2023, 52(4): 447-452.
- [5] 谢际童. 贫水地区城市生态驳岸设计方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- [6] 钱兴华, 陈东田, 李存华, 等. 菏泽市城市绿地植物多样性保护规划研究[J]. 北方园艺, 2015(15): 64-67.
- [7] 邵长华. 利用本土植物提高城市生物多样性的策略[J]. 农村科学实验, 2024(24): 36-38.
- [8] BENINDE J, VEITH M, HOCHKIRCH A. Biodiversity in Cities Needs Space: A Meta-analysis of Factors Determining Intra-urban Biodiversity Variation[J]. Ecology Letters, 2015, 18(6): 581-592.
- [9] 王日明, 龙岳兵, 熊兴耀, 等. 植物多样性理论在城市广场景观评价中的应用——以怀化市五溪文化广场为例[J]. 现代农业科技, 2010(14): 196-198.
- [10] 庄树宏, 王克明, 陈礼学. 崑崙山老物坟阳坡与阴坡半天然植被植物群落生态学特性的初步研究[J]. 植物生态学报, 1999, 23(3): 238-249.
- [11] 邵雅琪, 王春丽, 肖玲, 等. 妫水河流域山水林田湖草空间格局与生态过程分析[J]. 生态学报, 2019, 39(21): 7893-7903.
- [12] 王晓文, 李璇. 绿色设施协同提升城市水安全韧性——以上海市青浦区为例[J]. 城市道桥与防洪, 2025(6): 8-12.
- [13] 钱树林. 以上海市森兰楔形绿地-绿带项目为例探讨森林氧吧型公园绿地建设[J]. 南方农业, 2025, 19(12): 27-29.
- [14] 王杰. 城市公园绿地林水空间格局营造技术研究——以上海张家浜楔形绿地为例[J]. 建筑施工, 2022, 44(8): 1944-1946.
- [15] 盛世雯, 陈雪初, 聂晓钟, 等. 大都市郊野农林湿复合生态空间设计——以上海金山区友好村农林水乡为例[J]. 园林, 2022, 39(6): 74-81.
- [16] ORTIZ-COLIN P, HULSHOF C M. Ecotones as Windows into Organismal-to-Biome Scale Responses Across Neotropical Forests[J]. Plants, 2024, 13(17): 2396.
- [17] SARMATI S, ANGIOLINI C, SPERANDII M G, et al. A Complex Interplay Between Natural and Anthropogenic Factors Shapes Plant Diversity Patterns in Mediterranean Coastal Dunes[J]. Landscape Ecology, 2025, 40(1): 20.
- [18] DE ALMEIDA M F B, CAMPOS R B F, DA COSTA F V, et al. Forest-water Ecotones: Flooding Impacts on Ant Species Distribution[J]. Austral Ecology, 2025, 50(1): e70021.
- [19] 杨霞, 谷永丽, 臧德奎. 城市绿地植物物种多样性评价体系的构建[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(4): 166-168.
- [20] SUN B, LU Y L, YANG Y F, et al. Urbanization Affects Spatial Variation and Species Similarity of Bird Diversity Distribution[J]. Science Advances, 2022, 8(49): eade3061.
- [21] 王龙. 层次分析法[M]. 北京: 工业出版社, 2006.
- [22] 吴亚玲, 鲍齐齐, 万开元, 等. 华东地区水湿生木本植物综合评价与筛选[J]. 中国园林, 2023, 39(4): 109-114.
- [23] ARONSON M F, LEPCZYK C A, EVANS K L, et al. Biodiversity in the City: Key Challenges for Urban Green Space Management[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2017, 15(4): 189-196.
- [24] 许媛媛, 胡远东, 商侃侃. 上海郊野公园河岸带景观乔木树种选择与评价[J]. 中国城市林业, 2022, 20(2): 105-110.
- [25] 孙悦. 郑州市居住区植物多样性及景观评价研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2019.
- [26] 李明娟, 赵娟娟, 江南, 等. 深圳近海公园植物群落结构特征及其与景观格局的相关性[J]. 生态学报, 2021, 41(22): 8732-8745.
- [27] 曹煜方, 姜智俊, 王红兵, 等. 上海师范大学奉贤校区内植物与鸟类共生关系探究[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2022, 51(1): 70-79.