城市雨水花园自生植物多样性特征及其园林应用潜力评价*

吴伊凡[1,2] 邢小艺[1]

1 华中农业大学园艺林学学院 武汉 430070

2 北京林业大学园林学院 北京 100083

摘要：自生植物在提升雨水花园的植被稳定性、水文功能和生物多样性方面具有重要价值，但由于人们对其物种构成、生态适应性和观赏价值认知不足，其在雨水花园中的应用仍有限。文章以武汉江滩雨水花园为研究地，于春夏秋三季开展调查并分析自生植物群落组成及多样性特征的季节变化，通过 AHP 层次分析法从生境适应性、观赏价值和入侵风险 3 方面对自生植物的园林应用潜力进行定量评价。结果表明：1）雨水花园内共发现自生植物 101 种，隶属 34 科 83 属，其中菊科、禾本科和豆科为优势科，狗牙根在春夏季表现出显著优势，蝴蝶花在春夏秋三季均展现较高的优势度；2）春夏季的物种丰富度显著高于秋季，夏季的 Shannon-Weiner 多样性指数和 Pielou 均匀度指数显著低于春秋季，而 Simpson 优势度指数则显著高于春秋季，说明雨季雨洪冲刷对植物多样性具有环境过滤效应；3）根据园林应用潜力评价，蝴蝶花、狗牙根、紫云英、南苜蓿、野豌豆、美丽月见草和救荒野豌豆等物种表现出强适应性、一定观赏价值且入侵风险较低的特征。综上可知，武汉江滩雨水花园自生植物多样性具有显著季节变化特征；蝴蝶花、狗牙根、紫云英等物种是适合应用于华中地区雨水花园景观营造的自生植物种类。

关键词：雨水花园；自生植物；多样性；季节变化；应用潜力

DOI：10.12169/zgcsly.2024.07.09.0004

Diversity Characteristics of Spontaneous Plants in Urban Rain Gardens and Assessment of Their Landscape Application Potentials

Wu Yifan[1,2] Xing Xiaoyi[1]

(1. College of Horticulture and Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Spontaneous plants hold considerable value in enhancing vegetation stability, hydrological functions, and biodiversity in rain gardens. However, limited understanding of their species composition, ecological adaptability, and ornamental value has restricted their broader application. This study investigates the seasonal variations in community composition and species diversity of spontaneous plants in the rain gardens along the Yangtze River in Wuhan. Using the Analytic Hierarchy Process (AHP), we quantitatively evaluate the potential of each species in landscape application in terms of habitat adaptability, ornamental value, and invasion risk. Key findings include: 1) A total of 101 spontaneous plant species in 83 genera of 34 families are identified, dominant with Asteraceae, Poaceae, and Fabaceae. *Cynodon dactylon* displays significantly higher dominance in spring and summer communities, while *Iris japonica* maintains high dominance throughout all three seasons; 2) Species

收稿日期：2024-07-09

* 基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金资助项目（2662022YLQD002）

第一作者：吴伊凡（2002-），女，硕士生，研究方向为园林植物应用与园林生态。E-mail：2276530317@qq.com

通信作者：邢小艺（1993-），女，博士，讲师，研究方向为园林植物应用与园林生态。E-mail：xingxiaoyi@mail.hzau.edu.cn

richness is notably higher in spring and summer than in autumn. In summer, the Shannon-Weiner diversity index and Pielou evenness index are significantly lower, while the Simpson dominance index is higher, indicating the environmental filtering effect of rainwater runoff; and 3) The evaluation of landscape application potentials reveals that the species like *I. japonica*, *C. dactylon*, *Astragalus sinicus*, *Medicago polymorpha*, *Vicia sepium*, *Oenothera speciosa*, and *V. sativa* have the traits of high adaptability, good ornamental value and low invasion risk. To sum up, there are significant seasonal variations in the diversity of spontaneous plants in the rain gardens along the Yangtze River in Wuhan, and the species such as *I. japonica*, *C. dactylon*, and *A. sinicus* are suitable to be applied to rain garden plantscape across the Central China.

Keywords: rain garden; spontaneous plant; diversity; seasonal variation; application potential

雨水花园（rain garden）是一种以浅凹绿地为典型形式的蓝绿基础设施，通过自然方式削减径流、延迟洪峰并净化水质，在城市雨洪管理及低影响开发中发挥着重要作用[1-2]。在武汉等面临严峻雨洪风险的长江沿岸城市，雨水花园建设已成为海绵城市工程的重要组成部分。近年来，雨水花园在城市雨洪管理中的应用实践、水文效益评估及设计营造已成为国内外研究热点[3-5]。其中，植物景观在提高雨水花园观赏性、雨洪调蓄与净化功能等方面的关键作用受到广泛关注[6-11]。

雨水花园特有的雨洪冲刷环境对植物生长具有不利影响，因此其植物选择应充分考虑物种的生态适应性[12-13]，然而当前国内一些营造案例倾向于选择观赏价值高但生态适应性有限的园林栽培种和外来种，导致植物景观的生态稳定性和可持续性较低、养护成本高。为解决这一问题，发掘并应用具有“高适应、低维护”特性的自生植物资源成为一个重要途径[14]。近年来，自生植物景观作为践行“城市再野化”等城市生态绿地建设理念的重要形式，在提升城市生物多样性、促进景观低维护、增添自然野趣等方面发挥重要作用[15]，在雨水花园中也展现出应用价值。自发生长演替形成的自生植物群落不仅对所处生境具有良好生态适应性，还可吸引本地昆虫和鸟类，对提高雨水花园的植被稳定性、水文性能及生物多样性支撑功能具有重要价值[16-17]。例如，相比人工草坪，由自生草本植物构成的自然草地群落植物多样性更为丰富，且在雨洪滞留等水文功能方面表现更为优异[18]。尽管如此，由于对特定生境中自生植物的物种构成、生态适应性和观赏价值等特性的认知有限，自生植物资源在雨水花园植物景观营建中仍未得到充分应用。因此，深入了解雨水花园自生植物多样性特征及其园林应用潜力，对于提高雨水花园生态稳定性和雨洪调蓄效应具有重要意义。

近年来，国内自生植物的相关研究主要集中于城市绿地[19-21]、河流生态廊道[22-23]、墙体[24-25]、废弃地[26]等生境类型，而针对雨水花园这一特殊生境的自生植物研究较少[27]。虽然此前已有学者针对武汉地区雨水花园需求筛选出了部分适应性良好的栽培植物[2]，但关于当地自生植物资源应用价值的研究仍显不足。本研究聚焦武汉江滩雨水花园的自生植物多样性特征及其季节动态，从生境适应性、观赏价值及入侵风险等角度对自生植物的园林应用潜力进行综合评价。研究结果可为华中地区雨水花园的自生植物应用与近自然景观营造提供科学依据与实践参考。

1 研究区概况

武汉（29°58′—31°22′N，113°41′—115°05′E）位于江汉平原东部、长江中游，属亚热带季风气候，冬冷夏热，降水集中于 6~8 月。洪山江滩位于长江东南岸，于 2022 年 3 月建成，是武汉市重要的滨江绿色基础设施、承担着景观、防洪等多重功能。该带状绿地设有十余处雨水花园，以自生植被演替为主要景观特色。本研究选取其中 6 处雨水花园（面积 252.3~1 331.1 m^2）作为样地。采用样线法沿雨水花园外缘方向、在雨水花园发挥核心滞洪作用的缓冲区区域每 5 m 设置一个 1 m×1 m 的样方，共设 212 处样方，以开展自生植物多样性调查（图 1）。

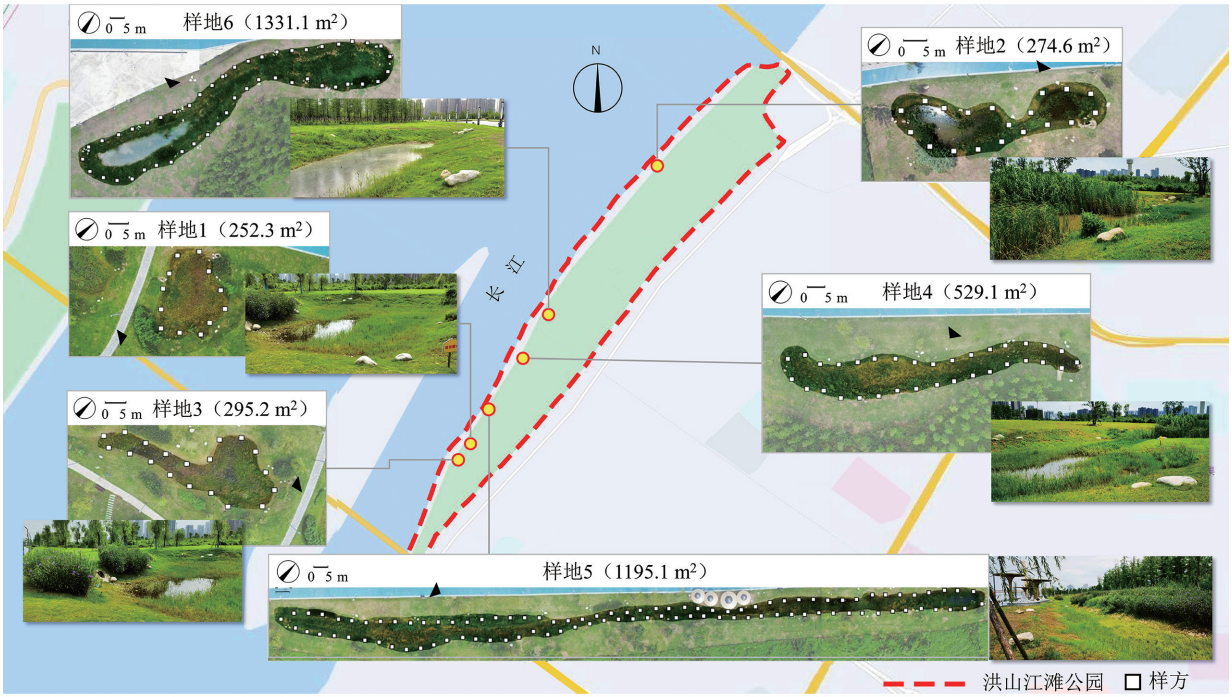


图 1　雨水花园样地平面与样方分布

2　研究方法

2.1　数据采集与处理

于春季（4 月）、夏季（7 月）和秋季（11 月）对雨水花园的自生植物进行调查，观测记录各样方内自生植物的种类、种数、多度等信息，据此分析各样地自生植物的多样性特征，多样性指标包括物种丰富度（R）、Shannon-Weiner 多样性指数（H′）、Pielou 均匀度指数（J）和 Simpson 优势度指数（D）[28]。为衡量各自生物种的群落优势度及生境适应能力，基于相对密度、相对频度和相对盖度的均值计算各物种重要值（Important Value，IV），选取各季节重要值前 10%的植物作为该季优势种。此外，采用 Shannon 指数（Bs）计算物种生态位宽度（niche width）以衡量各物种对雨水花园生境适应范围的广度[29]。

2.2　自生植物园林应用潜力评价

本研究利用 AHP 层次分析法对雨水花园自生植物的园林应用潜力进行定量评价。评价体系包括目标层（A）、准则层（C）和指标层（P）3 个层级。准则层包括生境适应性（C1）、观赏价值（C2）和入侵风险（C3）。其中，生境适应性 C1 通过重要值（P11）和生态位宽度（P12）衡量，两者均基于三季均值、通过对数转换和 1~5 标准化处理得到。观赏价值 C2 的衡量指标包括观花价值（P21）、观叶价值（P22）和植株观赏性（P23），各指标根据多个标准的整体满足程度进行 1~5 评分（图 2）。入侵风险 C3 通过入侵风险影响（P3）衡量，依据中国外来入侵物种信息系统数据划定各物种入侵风险等级：恶行入侵（1 级）、严重入侵（2 级）、局部入侵（3 级）、一般入侵（4 级）、无风险或待观察（5 级）。考虑到生物入侵对生态系统的影响会随入侵等级的增加而剧增[30]，本研究采用指数模型对入侵风险影响进行量化评价：P3 = 5×e^（−0.1r），式中 r 为入侵风险等级的赋值（图 2），计算得到各入侵风险等级的影响评分如下：1 级 0 分、2 级 0.67 分、3 级 3.03 分、4 级 4.52 分、5 级 5 分。

为确定准则层及指标层的指标权重，采用 1~9 及其倒数标度法构建指标重要性评分的判断矩阵[31]，通过问卷法收集 5 位园林植物行业专家意见，利用特征值法（Eigenvalue Method）计算指标权重。通过一致性比例（CR）检验判断矩阵的一致性，CR 值小于 0.1 时认为一致性通过、所得权重可靠。

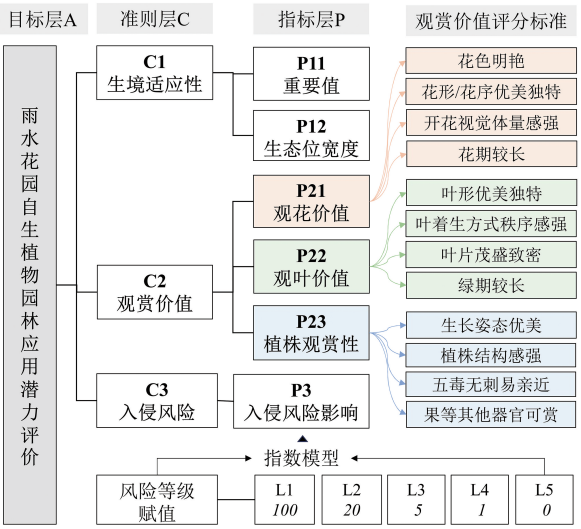


图 2 雨水花园自生植物园林应用潜力评价体系

3 结果与分析

3.1 雨水花园自生植物多样性特征及其季节变化

3.1.1 物种构成及其季节变化

洪山江滩雨水花园缓冲区的自生植物共 101 种，隶属 34 科 83 属，其中，草本植物 97 种，包括一二年生草本植物 55 种、多年生草本植物 42 种；木本植物 4 种，皆为灌木。优势科为菊科（Asteraceae，12 属 22 种），次优势科为禾本科（Gramineae，14 属 15 种），其他优势度较高的是豆科（Fabaceae，6 属 7 种）和十字花科（Brassicaceae，6 属 6 种）。春季自生植物共 62 种（25 科 52 属），夏季共 58 种（27 科 51 属），秋季共 41 种（16 科 36 属）。春、夏季共有物种 25 种（26.32%），夏、秋季共有物种 20 种（25.64%），春、秋季共有物种 30 种（41.10%），三季皆有物种 17 种（15.84%），说明雨水花园自生植物的物种构成呈明显季节变化。

3.1.2 优势种及其季节变化

通过分析优势种的季节差异，结果发现：春季优势种为狗牙根（*Cynodon dactylon*）、南苜蓿（*Medicago polymorpha*）、救荒野豌豆（*Vicia sativa*）、野豌豆（*Vicia sepium*）、野老鹳草（*Geranium carolinianum*）、早熟禾（*Poa annua*）、蝴蝶花（*Iris japonica*），重要值分别为 36.95%、24.56%、21.40%、19.54%、14.66%、9.92%、7.74%；夏季优势种为狗牙根、铁苋菜（*Acalypha australis*）、狗尾草（*Setaria viridis*）、鳢肠（*Eclipta prostrata*）、钻叶紫菀（*Symphyotrichum subulatum*）、马唐（*Digitaria sanguinalis*）、蝴蝶花，重要值分别为 79.64%、7.21%、7.11%、5.66%、5.01%、4.51%、3.56%；秋季优势种为紫云英（*Astragalus sinicus*）、南苜蓿、野豌豆、救荒野豌豆、蝴蝶花，重要值分别为 40.50%、31.64%、14.54%、12.32%、8.98%。由此可见，春季与秋季的优势种构成更为相似，狗牙根在春季和夏季群落中占据显著优势地位，蝴蝶花在春夏秋三个季节的优势度均较为突出，展现了较好的季节持续性。

3.1.3 物种生态位宽度及其季节变化

物种生态位宽度也呈明显季节变化，春季各物种的生态位宽度范围为 0.5~4.75，宽生态位物种包括狗牙根（4.75）、南苜蓿（4.46）、救荒野豌豆（4.27）、野豌豆（4.17）、野老鹳草（4.09）等。夏季各物种的生态位宽度范围为 0.49~5.27，宽生态位物种包括狗牙根（5.27）、钻叶紫菀（3.39）、狗尾草（3.33）、鳢肠（3.17）、铁苋菜（3.16）等。秋季各物种的生态位宽度范围为 0.56~4.51，宽生态位物种包括紫云英（4.51）、南苜蓿（4.44）、野豌豆（3.85）、救荒野豌豆（3.48）、蝴蝶花（3.39）等。狗牙根的生态位宽度在夏季达到最大值，而其余各物种的夏季生态位宽度整体上显著（$P<0.05$）低于春秋季，表明狗牙根对夏季雨水花园生境具有极强适应性和竞争力而对其他物种构成压制。

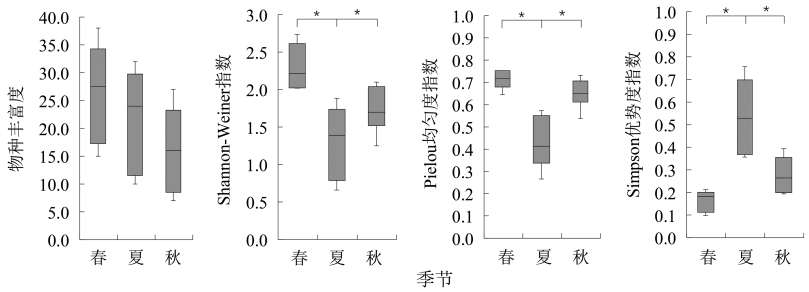
3.1.4 自生植物多样性的整体季节差异

通过分析多样性指数对雨水花园自生植物群落多样性特征的季节变化，结果发现：春、夏季自生植物群落的物种丰富度相近而秋季显著下降；夏季群落的 Shannon-Weiner 多样性指数和 Pielou 均匀度指数显著低于春、秋季；夏季 Simpson 优势度指数最为突出（图 3）。

3.2 雨水花园自生植物的园林应用潜力评价

3.2.1 评价指标权重赋值与评分

基于生境适应性、观赏价值和入侵风险对雨水花园自生植物的园林应用潜力进行量化评价，结果（表 1）表明，各专家判断矩阵权重值的 CR



注：* 表示在 0.05 水平上差异显著。

图 3　雨水花园各样地自生植物多样性的整体季节差异

表 1　植物应用潜力评价体系各指标权重及一致性检验

层级		权重指标	专家编号					指标层	综合
			1	2	3	4	5	相对权重	权重
准则层		C1 生境适应性	0.500	0.443	0.550	0.400	0.540		0.487
		C2 观赏价值	0.250	0.387	0.240	0.400	0.297		0.315
		C3 入侵风险	0.250	0.169	0.210	0.200	0.163		0.198
		一致性比例 CR	0.000	0.016	0.016	0.000	0.008		
指标层	C1 生境适应性	P11 重要值	0.667	0.333	0.667	0.500	0.500	0.533	0.260
		P12 生态位宽度	0.333	0.667	0.333	0.500	0.500	0.467	0.227
		一致性比例 CR	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
	C2 观赏价值	P21 观花价值	0.571	0.517	0.474	0.550	0.528	0.528	0.166
		P22 观叶价值	0.286	0.124	0.376	0.240	0.140	0.233	0.074
		P23 植株观赏性	0.143	0.359	0.149	0.210	0.333	0.239	0.075
		一致性比例 CR	0.000	0.093	0.046	0.016	0.046		
	C3 入侵风险	P3 入侵风险影响						1.000	0.198

值均小于 0.1，说明一致性检验通过。在准则层中，生境适应性（C1）权重最高，其次为观赏价值（C2），入侵风险（C3）所占权重最低。在指标层中，对于生境适应性的衡量指标，重要值（P11）和生态位宽度（P12）的权重相当；对于观赏价值的衡量指标，观花价值（P21）权重最高，观叶价值（P22）和植株观赏性（P23）次之。

对重要值及生态位宽度的量值（1~5）作加权平均得到各自生植物对雨水花园生境的适应性评分，其中生境适应性较强的物种包括狗牙根、南苜蓿、蝴蝶花、野豌豆、救荒野豌豆、钻叶紫菀、苏门白酒草（*Erigeron sumatrensis*）、紫云英、野老鹳草、小蓬草（*Erigeron canadensis*）、早熟禾、续断菊（*Sonchus asper*）等。对观花价值、观叶价值、植株观赏性的量值（1~5）作加权平均得到各自生植物的观赏价值评分，其中观赏价值较高的物种包括毛茛（*Ranunculus japonicus*）、蝴蝶花、千屈菜（*Lythrum salicaria*）、白车轴草（*Trifolium repens*）、酢浆草（*Oxalis corniculata*）、南苘蒿（*Glebionis segetum*）、蛇床（*Cnidium monnieri*）、美丽月见草（*Oenothera speciosa*）、加拿大一枝黄花（*Solidago canadensis*）、春飞蓬（*Erigeron philadelphicus*）、鸭跖草（*Commelina communis*）、田菁（*Sesbania cannabina*）等，其花期集中于春夏两季，花色色系主要包括白色系、黄色系、红粉色系和蓝紫色系等（图 4）。



注：a 白色系-春飞蓬；b 黄色系-田菁；c 红粉色系-美丽月见草；d 蓝紫色系-鸭跖草。

图 4　多色系的自生植物花器官特写

根据中国外来入侵物种信息系统数据，本研究地雨水花园自生植物包括入侵植物 28 种，占物种总数的 27.72%，其中恶意入侵（1 级）物种 9 种、严重入侵（2 级）物种 6 种、局部入侵（3 级）物种 3 种、一般入侵（4 级）物种 10 种。1~2 级具有高入侵风险的物种包括小蓬草、一年蓬（*Erigeron annuus*）、苏门白酒草、香丝草（*Erigeron bonariensis*）、钻叶紫菀、豚草（*Ambrosia artemisiifolia*）、加拿大一枝黄花、野燕麦（*Avena fatua*）、喜旱莲子草（*Alternanthera philoxeroides*）、垂序商陆（*Phytolacca americana*）、白车轴草、北美独行菜（*Lepidium virginicum*）、阿拉伯婆婆纳（*Veronica persica*）、野老鹳草等。

3.2.2 自生植物应用潜力评分与筛选

通过对生境适应性、观赏价值和入侵风险的量值作加权平均，得到各物种园林应用潜力综合评分。应用潜力值较高（前 25%）的自生植物包括蝴蝶花、狗牙根、紫云英、南苜蓿、野豌豆、美丽月见草、救荒野豌豆、千屈菜、蛇莓（*Duchesnea indica*）、田菁、酢浆草、狗尾草、细风轮菜（*Clinopodium gracile*）、续断菊、毛茛、过路黄（*Lysimachia christinae*）、香附子（*Cyperus rotundus*）、白茅（*Imperata cylindrica*）、鳢肠（*Eclipta prostrata*）、翅果菊（*Lactuca indica*）、碎米莎草（*Cyperus iria*）、刺儿菜（*Cirsium arvense* var. *integrifolium*）、蛇床、朝天委陵菜（*Potentilla supina*）、南苘蒿等。这些植物表现出对雨水花园生境的优良适应性，具有一定观赏价值，且入侵风险较低。

4 讨论

4.1 雨水花园自生植物多样性特征的季节差异

本研究探究了武汉洪山江滩自生植物的多样性特征及其季节变化，发现春、夏、秋三季的物种与优势科属构成存在明显差异，导致自生植物景观呈现丰富季相变化。秋季的物种丰富度明显低于春夏季，主要是由于研究地自生植物大部分为落叶草本，且生长季集中在春夏两季，秋季渐入休眠期[32]，Li 等[33]及杨意帆[34]的研究结果也揭示了同一规律。

雨洪径流会对自生植物的生长和多样性构成干扰[35]，且这一干扰效应在强降雨频繁的夏季尤为突出。本研究发现，雨水花园自生植被在夏季的多样性指数和均匀度指数显著低于春季与秋季，而优势度则达到最高。这主要归因于武汉夏季强降雨带来的雨洪冲刷对自生植物种类构成产生的环境过滤效应，导致狗牙根等强适生种表现出极高的优势度，而其他适应性较弱物种的生态位则被压缩。这也表明那些在夏季具有较高重要值和较宽生态位的物种在雨洪滞留与径流减缓方面具有更高的应用潜力。而杨意帆[34]和郑伯伟淑[36]在城市绿地的相关研究中却发现，夏季自生植物的多样性和均匀度指数明显高于春秋季，得出了与本研究相反的结论，这一差异主要是由于其研究地位于地形平坦、排水良好的非汇水区，雨洪冲刷并不构成限制夏季自生植物生长的关键因素；在无雨洪胁迫的情况下，夏季充足的热量和降水有利于自生植物的生长、扩散与繁衍。这一结果差异进一步突显了雨水花园生境与植物多样性特征的独特性，以及开展针对性研究的重要性。

4.2 自生植物园林应用潜力评价

自生植物因其对当地生态环境具有较强适应性、同时兼具观赏和生态价值，逐渐成为营造近自然、低维护城市植物景观的重要资源，其园林应用潜力也引起了更多研究者关注。梁新悦[37]和王冰玉等[38]通过公众偏好调查，基于观赏价值、生境适应性、入侵风险等因素提出了城市绿地自生植物应用的种类选择策略。陈程[31]和柴晋[39]的研究在重点考虑植物园林观赏性和生态适应性的基础上，将资源潜力与社会价值纳入自生植物的园林应用评价体系。总体而言，对于一般城市绿地，观赏性仍是自生植物应用潜力评价中最常被考虑的因素[40-41]。

然而，对于雨水花园这一对植物生长构成水分胁迫的特殊生境类型，尽管观赏性仍是植物景观营造的重要考量因素，但植物能良好适应此环境且正常生长是其发挥雨洪调蓄功能及景观观赏价值的前提。同时，许多适应性强的自生物种也可能伴有一定入侵风险、对当地生态系统稳定性构成威胁，因而在应用自生植物时需格外谨慎。基于此，本研究选取生境适应性、观赏价值及入侵风险作为评价指标，采用 AHP 层次分析法对雨

水花园自生植物的园林应用潜力进行了定量评估。为确保指标权重赋值的客观性与可靠性，本研究通过问卷法收集了多位专家意见并进行了一致性检验。专家意见表明，在雨水花园植物景观的自生植物应用中，生境适应性应作为植物选择最重要的衡量指标，其次为观赏价值和入侵风险。我们据此构建了自生植物应用潜力评价体系，并筛选出了适应雨水花园生境、具备一定观赏价值且入侵风险较低的潜力物种，该评价体系也为其他雨水花园及类似生境的自生植物选择提供了参考标准。

5　结论

夏季自生植物群落的多样性指数与均匀度指数显著低于春秋季，而优势度却十分突出，这反映了夏季雨洪冲刷对自生植物多样性的环境过滤效应。筛选出了蝴蝶花、狗牙根、紫云英、南苜蓿、野豌豆、美丽月见草等生境适应性较强、具有一定观赏价值且入侵风险较低的自生植物种类，为华中地区雨水花园植物景观营造的自生植物选择提供了科学依据，对于提高雨水花园生态稳定性、营造可持续和低维护景观具有积极作用。

参考文献

[1]韩元,刘玲,姚一珍,等.北京市海绵城市试点区雨水花园植物群落生态适应性及其应用效果[J].水土保持通报,2023,43(4):186-194.

[2]殷利华.城市雨水花园营建理论及实践[M].武汉:华中科技大学出版社,2018.

[3]ISHIMATSU K,ITO K,MITANI Y,et al.Use of rain gardens for stormwater management in urban design and planning[J].Landscape and Ecological Engineering,2017,13(1):205-212.

[4]曹巍.基于 SWMM 模型的城市雨水系统模拟及综合效益分析[D].抚州:东华理工大学,2023.

[5]赵寒雪,殷利华.2005—2015 中国十年来雨水花园研究进展[J].中国园林,2016,32(10):60-64.

[6]SHI L,MARUTHAVEERAN S,YUSOF M J M,et al.Exploring herbaceous plant biodiversity design in Chinese rain gardens:a literature review[J].Water,2024,16(11):1586.

[7]孟莹莹,陈建刚,张书函.生物滞留技术研究现状及应用的重要问题探讨[J].中国给水排水,2010,26(24):20-24,38.

[8]王佳,王思思,车伍,等.雨水花园植物的选择与设计[J].北方园艺,2012(19):77-81.

[9]JOHNSTON M R,BALSTER N J,THOMPSON A M.Vegetation alters soil water drainage and retention of replicate rain gardens[J].Water,2020,12(11):3151.

[10]DUDRICK R,HOFFMAN M,ANTOINE J,et al.Do plants matter?:Determining what drives variation in urban rain garden performance[J].Ecological Engineering,2024,201:107208.

[11]李聪.西咸新区海绵城市植物选择与配置研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2018.

[12]YUAN J,DUNNETT N.Plant selection for rain gardens:response to simulated cyclical flooding of 15 perennial species[J].Urban Forestry & Urban Greening,2018,35:57-65.

[13]BORTOLINI L,ZANIN G.Hydrologicalbehaviour of rain gardens and plant suitability:a study in the Veneto Plain (north-eastern Italy) conditions[J].Urban Forestry & Urban Greening,2018,34:121-133.

[14]尹吉光,刘晓明.城市自生植物景观应用及管理[J].中国城市林业,2020,18(5):115-119.

[15]ILIE D,COSMULESCU S.Spontaneous plant diversity in urban contexts:a review of its impact and importance[J].Diversity,2023,15(2):277.

[16]GONZALEZ-MERCHAN C,BARRAUD S,BEDELL J P.Influence of spontaneous vegetation in stormwater infiltration system clogging[J].Environmental Science and Pollution Research International,2014,21(8):5419-5426.

[17]SINGH A,WARNERS R,WALT J,et al.Relative success of native plants in urban curb-cut rain gardens[J].Ecological Restoration,2021,39(4):217-222.

[18]NOCCO M A,ROUSE S E,BALSTER N J.Vegetation type alters water and nitrogen budgets in a controlled,replicated experiment on residential-sized rain gardens planted with prairie,shrub,and turfgrass[J].Urban Ecosystems,2016,19(4):1665-1691.

[19]李晓鹏,董丽,关军洪,等.北京城市公园环境下自生植物物种组成及多样性时空特征[J].生态学报,2018,38(2):581-594.

[20]赵聪聪,徐小钰,胡远东.城市公园自生植物多样性及其在异质生境中的分布特征[J].中国城市林业,2024,22(5):66-74.

[21]范秋云,云英英,梁伟红,等.海口市城市公园自生植物多样性研究[J].热带作物学报,2024,45(4):734-741.

[22]李晓鹏,张思凝,冯黎,等.成都城区河流廊道自生植物的生境及物种多样性[J].风景园林,2022,29(1):64-70.

[23]张梦园,李坤,邢小艺,等.北京温榆河-北运河生态廊道自生植物多样性对城市化的响应[J].生态学报,2022,42(7):2582-2592.

[24]陈春谛.被遗忘的城市“生境”:重庆市墙体自生植物调查分析[J].生态学报,2020,40(2):473-483.

[25]刘倩,丁彦芬,宋杉杉,等.南京明城墙绿带草本层自生植物群落数量分类与排序分析[J].草业学报,2024,33(5):1-15.

[26]李东吟,李文,董荣荣,等.哈尔滨城市工业废弃地自生植物

多样性与分布特征[J].风景园林,2024,31(1):112-120.
[27]潘王韵,姚丽敏,郭蓓琳,等.基于 WOS 和 CiteSpace 的自生植物研究进展[J].西南师范大学学报(自然科学版),2022,47(3):100-110.
[28]李果,李俊生,关潇,等.生物多样性监测技术手册[M].北京:中国环境出版社,2014.
[29]WHITTAKER R H. Communities and ecosystems[M].2d ed. New York,Macmillan:1975.
[30]SOFAER H R,JARNEVICH C S,PEARSE I S.The relationship between invader abundance and impact[J].Ecosphere,2018,9(9):e02415.
[31]陈程.广西大学校园自生植物资源调查与园林应用潜力评价[D].南宁:广西大学,2024.
[32]HU S W,JIN C,HUANG L,et al.Characterizing composition profile and diversity patterns of spontaneous urban plants across China's major cities[J].Journal of Environmental Management,2022,317:115445.
[33]LI X P,FAN S X,HAO P Y,et al.Temporal variations of spontaneous plants colonizing in different type of planted vegetation-a case of Beijing Olympic Forest Park[J].Urban Forestry & Urban Greening,2019,46:126459.
[34]杨意帆.杭州江洋畈生态公园自生植物多样性及其影响因素研究[D].杭州:浙江农林大学,2023.
[35]申沛鑫,任术,梁新悦,等.哈尔滨城市河流廊道草本层自生植物多样性及分布特征[J].风景园林,2024,31(6):28-36.
[36]郑伯伟淑.长春市伊通河滨水绿地自生植物组成季相变化与多样性研究[D].长春:长春大学,2022.
[37]梁新悦.哈尔滨高校校园绿地自生植物多样性及公众偏好研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2023.
[38]王冰玉,韩舒先,郭婷婷,等.基于景观偏好理论的草本自生植物应用潜力研究[J].浙江农业科学,2024,65(3):633-640.
[39]柴晋.沈阳市公园绿地自生草本植物现状及园林应用分析[D].沈阳:沈阳农业大学,2023.
[40]姚兴达.杭州西溪国家湿地公园草本层自生植物及其景观应用研究[D].杭州:浙江农林大学,2021.
[41]邱园,冯志坚,翁殊斐.广州滨水绿地自生植物群落调查与园林应用潜力分析[J].广东园林,2022,44(6):18-22.

(上接第 54 页)

[28]WEISS D J,NELSON A,GIBSON H S,et al.A global map of travel time to cities to assess inequalities in accessibility in 2015[J].Nature,2018,553(7688):333-336.
[29]MAES J,HAUCK J,PARACCHINI M L,et al.A spatial assessment of ecosystem services in Europe: methods, case studies and policy analysis-phase 2 Synthesis report[M].Partnership for European Environmental Research,2012.
[30]SCHÄGNER J P,BRANDER L,MAES J,et al.Mapping recreational visits and values of European National Parks by combining statistical modelling and unit value transfer[J].Journal for Nature Conservation,2016,31:71-84.
[31]GULINCK H,WAGENDORP T.References for fragmentation analysis of the rural matrix in cultural landscapes[J].Landscape and Urban Planning,2002,58(2/3/4):137-146.
[32]DANESHPOUR S A,PAJOUH H D.Cultural landscape assessment of rural districts in order to Cultural Ecosystem Services (Ces) Case Study:Sahand Rural District Landscape;Kandovan Village[J].Journal of Social Issues & Humanities,2013,1(5):210-217.
[33]乔婧.杭州主城区滨河绿道游憩机会谱构建与景观优化研究[D].杭州:浙江大学,2021.
[34]边紫琳.城区铁路廊道绿地响应生态系统文化服务功能耦合机制研究[D].北京:北京交通大学,2023.