

冯晓宇,王金璐,郭晋平. 基于应用适宜性评价的太原园林绿化树种选择[J]. 山西农业科学, 2026, 54(1):53-61.

FENG X Y, WANG J L, GUO J P. Selection of tree species for landscaping in taiyuan city based on application suitability evaluation [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2026, 54(1):53-61.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2026.01.06

基于应用适宜性评价的太原园林绿化树种选择

冯晓宇¹, 王金璐¹, 郭晋平²

(1.山西农业大学 城乡建设学院,山西 晋中 030801;2.山西农业大学 林学院,山西 晋中 030801)

摘 要:为建立园林绿化树种选用的决策路径,为太原市绿化树种选择提供参考依据,以太原市现有的340种园林绿化树种为研究对象,以应用适宜性评价为目标,采用Delphi法和层次分析法(AHP),从生态适应性、景观适宜性和栽培管护适用性3个方面梳理出反映本地生长发育状况、生态要求、抗逆性、抗污染性、局部观赏特性、整株观赏特性、栽植成本以及管护成本等29项基础指标,建立4级指标体系,对树种进行综合评分;采用自然断点法依分值将树种划分为4个等级,其中,I~Ⅲ级树种共有298种,总体适宜性较好;Ⅳ级树种有42种,适宜性较差,选择应用受限程度较高。对I~Ⅲ级树种进行系统聚类分析,结果得到15个特征明确、区分度明显的类型,根据树种类型特征与树种选用要求的匹配度,进一步构建出树种类型与典型应用方向适宜性之间的关系网络。综上,建议太原市园林绿化树种规划优先选用Ⅲ级以上树种,详细规划可参考关系网络进行针对性选用。

关键词:园林绿化树种;应用适宜性;Delphi法;层次分析法;自然断点法;系统聚类分析

中图分类号:S731.2

文献标识码:A

文章编号:1002-2481(2026)01-0053-09

Selection of Tree Species for Landscaping in Taiyuan City Based on Application Suitability Evaluation

FENG Xiaoyu¹, WANG Jinlu¹, GUO Jinping²

(1.College of Urban and Rural Construction, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China;

2.College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China)

Abstract: In order to establish a decision-making process for selecting tree species for landscaping and provide a reference for tree species selection for landscaping in Taiyuan city, in this study, taking the existing 340 landscape tree species in Taiyuan city as the research object, with the goal of evaluating their suitability for application, the Delphi method and the Analytic Hierarchy Process(AHP) were employed to identify 29 foundational indicators reflecting local growth and development conditions, ecological requirements, stress tolerance, pollution resistance, local ornamental characteristics, overall ornamental characteristics, planting costs, and maintenance costs, across three dimensions: ecological adaptability, landscape suitability, and cultivation and maintenance applicability. By establishing a four-level indicator system, the tree species were comprehensively scored. Using the natural breakpoint method, the tree species were divided into four grades based on their scores. Among them, 298 tree species were classified as grades I-III, with overall good suitability, while 42 tree species were classified as grade IV, with poor suitability and higher restrictions on selection and application. Systematic cluster analysis was conducted on the tree species in grades I-III, resulting in 15 distinct types with clear characteristics and high discriminative power. Further analysis was conducted to establish a relationship network between the tree species types and their suitability for typical application directions based on the matching degree between tree species type characteristics and selection requirements. In conclusion, it was recommended that the Taiyuan City Landscape and Greening Tree Species Planning should prioritize the selection of the tree species in grade III or above, with detailed planning referencing the relationship network for targeted selection.

Keywords: tree species for landscaping; application suitability; Delphi method; AHP method; the natural breakpoint method; systematic clustering analysis

收稿日期:2024-09-10

基金项目:山西省重点研发计划专项(2018LYCX32);山西省教育科学“十四五”规划2024年度规划课题(GH-240130)

作者简介:冯晓宇,讲师,硕士,主要从事景观规划设计研究,E-mail:fx931225@126.com

通信作者:郭晋平,教授,博士,主要从事景观生态、森林资源经营管理研究,E-mail:jinpguo@126.com

园林绿化是城市绿色基础设施的重要组成部分,能够为城市提供一系列复杂的生态系统服务^[1]。树木是园林绿化的主要材料^[2],树种选用是城市园林绿化的核心工作^[3]。欧美国家通过制定专门的树种选择手册或树种特性表指导城市绿化树种选用。国内的园林绿化树种选择一般在遵循“适地适树”基本原则的基础上进行^[4],很多地方在园林绿化工作方面存在顶层设计不足、缺乏科学的树种规划^[5]、过度依赖专业性书籍及从业者经验等问题,导致城市出现植物大规模冻死冻伤、行道树频繁更换、景观同质化等问题,造成了严重的经济损失。

科学的园林绿化包含规划设计、施工建设以及养护监管的全周期可持续性工作,涉及树木生长发育规律、景观美学、环境生态需求^[5]等诸多因素,是一项复杂的决策工作。已有研究针对城市园林绿化树种的选用进行探索,在研究对象和目的方面,大部分针对城市特殊树种群体,探索适宜特定应用场景或适应特定影响因子的树种^[6-19],评价指标具有较强的针对性,个别研究涵盖城市的常见树种^[20-23];在研究方法方面,利用层次分析法对构建的指标体系进行定性指标量化处理与分级评价是较为常见的做法^[8-13,16,18-22],少数研究通过单一指标的聚类分析进行分级^[7,15-17],个别采用 Delphi 法^[14,23]或主成分分析法^[6]等进行分级,极少数使用系统聚类进行分类^[12]。总体而言,研究树种数量有限,类型单一,评价分级目标以定性为主,研究成果虽各具特定的理论价值,但综合实践应用性略显不足,无法有效指导园林绿化工作,特别是树种规划。

太原市是山西省省会城市,建成区绿化覆盖面积达到 15 617 hm²,园林绿地面积 13 788 hm²,绿化覆盖率 43.38%,绿地率 38.30%,公园绿地面积 4 601 hm²,人均公园绿地面积 12.78 m²。近年来城市园林绿化建设水平不断提高,各项绿地指标持续增长。

本研究针对太原市全部 340 种现有园林绿化树种,从生态适应性、景观适宜性和栽培管护适用性 3 个方面集成多层复合评价指标体系,综合利用 Delphi 法、层次分析法、自然断点法以及系统聚类分析进行树种特征指标量化、分级和分类,并建立树种类型与规划设计典型应用方向之间的关系,为太原市绿化树种选择提供依据。

1 材料和方法

1.1 研究地概况

太原市(111°30′~113°09′E,32°27′~38°27′N)地处山西中部,太原盆地北端,属暖温带大陆性季风气候,四季分明,雨热同期,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,全年盛行偏北风,年均气温 9.5℃,年均相对湿度 53%~60%,年均降水量约 420 mm,无霜期 156~182 d,全年日照时数 2 560~2 825 h,灾害性天气主要有春旱、霜冻。全域呈北高南低、三面环山的簸箕形,汾河由中部南北向穿城而过,中南部为河谷冲积平原。地带性土壤为褐土,土壤 pH 值为 7.65^[24]。太原市植物种类丰富,根据太原市园林局及相关部门提供的基础资料,目前市域分布的被子植物有 1 700 余种,其中,城市各类园林绿地中有 1 100 余种;现有园林绿化树种 340 种,其中,乔木 182 种、灌木 140 种、藤本 15 种、竹类 3 种^[25]。

1.2 研究方法

1.2.1 指标选取及体系构建 以树种特征可识别性和可操作性为原则,参考相关文献采用的指标^[12,16,20-22,26],从生态适应性、景观适宜性、栽培管护适用性 3 个方面梳理归纳出反映树种本地生长发育状况、生态要求、抗逆性、观赏性以及栽植管护成本的 32 项指标,通过专家咨询确定了其中 29 项指标作为树种应用适宜性基础指标,建立了 4 个层次的指标体系(表 1)。

1.2.2 基础数据和预处理 通过查阅《中国植物志》《中国树木志》《中国主要树种造林技术》及相关研究报告和文献,明确 340 个树种在其自然分布区内树高、胸径、冠幅的标准生长指标,为便于分析,对树种进行编号,编号范围为 1~340。

本地生长发育状况(C₁)指标中,D₁~D₅、D₇采用野外直接调查和测定获得。于 2020 年 7—8 月在城区内选择具有绿地类型代表性、市区地段代表性且栽植时间较早的典型地段,确定代表性植株,每个树种不少于 5 株,野外测定和观测树种的胸径、树高和冠幅,并依据评分细则进行调查记录。D₁~D₃采用调查值占标准生长指标的百分数;D₄、D₅、D₇根据调查结果获得打分值。按树种计算各基础指标的平均值,记为基础评分值。

针对其余指标,设计可量化的选项式专家问卷调查表,编制指标说明及评分导则。依据业务背景和树种熟悉度,从太原地区各相关高校、科研

院所、园林部门、园林企业等选定 30 位专家发放问卷调查表,共收回有效问卷 28 份。按树种计算各基础指标的平均值,记为基础评分值。

表 1 树种应用适宜性指标及其权重
Tab.1 Indicators and weights of tree species application suitability

目标层 Target layer	主准则层 Main criterion layer				次准则层 Sub-criterion layer				基础指标 Basic indicator				综合权重 Comprehensive weight
	类别	Type	权重	Weight	类别	Type	权重	Weight	类别	Type	权重	Weight	
A应用适宜性 A Application Suitability	B ₁ 生态适应性		0.646 1		C ₁ 本地生长发育状况		0.431 2		D ₁ 相对树高(株高)		0.096 8		0.027 0
									D ₂ 相对胸径(地径)		0.091 1		0.025 4
									D ₃ 相对冠幅		0.102 8		0.028 6
									D ₄ 生长势		0.220 3		0.061 4
									D ₅ 发育状况		0.150 7		0.042 0
									D ₆ 正常生长发育程度		0.185 2		0.051 6
									D ₇ 景观特征表现程度		0.153 0		0.042 6
					C ₂ 生态要求		0.286 9		D ₈ 土层厚度要求		0.415 6		0.077 0
									D ₉ 土质要求		0.293 0		0.054 3
									D ₁₀ 土壤pH要求		0.291 4		0.054 0
									D ₁₁ 耐寒性		0.421 6		0.051 5
					C ₃ 抗逆性		0.188 9		D ₁₂ 耐水湿性		0.117 0		0.014 3
									D ₁₃ 耐旱性		0.249 8		0.030 5
									D ₁₄ 耐阴性		0.121 4		0.014 8
									D ₁₅ 喜肥性		0.090 2		0.011 0
									D ₁₆ 抗粉尘性		0.623 8		0.037 5
	B ₂ 景观适宜性		0.175 6		C ₄ 抗污染性		0.093 1		D ₁₇ 抗有害气体性		0.376 2		0.022 6
									D ₁₈ 花		0.440 9		0.033 2
									D ₁₉ 叶		0.262 9		0.019 8
									D ₂₀ 果		0.129 3		0.009 7
									D ₂₁ 枝干		0.166 9		0.012 6
					C ₅ 整株观赏特性		0.570 8		D ₂₂ 姿态		0.306 0		0.030 7
									D ₂₃ 芳香		0.124 3		0.012 5
									D ₂₄ 全株观赏效果		0.569 7		0.057 1
									D ₂₅ 种苗成本		0.668 5		0.064 2
									D ₂₆ 种植成本		0.331 5		0.031 8
	B ₃ 栽培管护适用性		0.178 4		C ₇ 栽植成本		0.538 5		D ₂₇ 整形修剪成本		0.273 7		0.022 5
									D ₂₈ 水肥管理成本		0.512 7		0.042 2
									D ₂₉ 病虫害防治成本		0.213 5		0.017 6
					C ₈ 管护成本		0.461 5						

1.2.3 指标权重确定 利用层次分析法^[27]构建综合层次评价模型,采用 1~9 标度法^[28],利用 Delphi 法确定两两指标的相对重要程度,分级构造判断矩阵,经过层次单排序和层次总排序,得到各级指标相对上一级以及目标层的权重值,分别计算一致性指标 CI 的随机一致性 CR ,使 $CR < 0.1$,结果通过一致性检验,满足合理性要求。各层次指标权重见表 1。

1.2.4 综合评分和分级 以各树种 29 项指标的基础评分值与各指标权重进行加权计算,获得各树

种的综合评分值(S)。

$$S = \sum_{i=1}^n (B_i W_i) \tag{1}$$

式中, B_i 为第 i 个基础指标的基础评分值, W_i 为第 i 个基础指标的综合权重。

依据综合评分值,采用自然断点法,以级内差异最小、级间差异最显著为原则,按照良好、较好、一般和较差 4 级确定综合评分值的分级阈值,对全部树种进行分级。用于分析树种应用适宜性的综合优劣。

1.2.5 类型划分 根据分级结果确定待分类树种范围。以树种为单元,计算各树种 29 项基础指标的加权评分值(F_i)。

$$F_i = B_i W_i \quad (2)$$

式中, B_i 为基础指标的基础评分值, W_i 为基础指标的综合权重。

基于类平均法,以类间区分明确、类内共性易于把握、分类结果实用为原则,采用多方案比选的方法,确定类型划分的距离阈值,对确定的待分类树种在 29 项基础指标的加权评分值作系统聚类分析,从而确定类型数及各类所含树种,同时运用 R 语言进行可视化作图,得到聚类树图。进一步根

据分类结果,总结类内树种的共性特征和各类型特征。

2 结果与分析

2.1 树种应用适宜性分级

从对 340 个树种的综合评分可以看出(表 2),太原市目前应用的 340 个园林绿化树种中,综合评分Ⅲ级以上的树种有 298 种。其中,适宜性较好,通常可广泛使用的Ⅰ级和Ⅱ级树种有 241 种;总体适宜性一般,可选择性应用的Ⅲ级树种有 57 种;Ⅳ级树种适宜性较差,选择应用受限程度较高的树种有 42 种。

表 2 树种应用适宜性分级结果

Tab.2 Results of the assessment for tree species application suitability

等级	Level	评价	Evaluation	分值范围	Score range	乔木	Arbor	灌木	Shrub	藤本	Vine	竹木	Bamboo	合计	Total
I		良好		适宜性>8.244		64		68		7		0		139	
II		较好		7.938<适宜性≤8.244		50		46		6		0		102	
III		一般		7.654<适宜性≤7.938		36		21		0		0		57	
IV		较差		适宜性≤7.654		32		5		2		3		42	
合计	Total					182		140		15		3		340	

2.2 树种应用适宜性分类

以适宜性Ⅰ~Ⅲ级的 298 个树种为主要对象,

进一步进行系统聚类分析,结果见图 1。

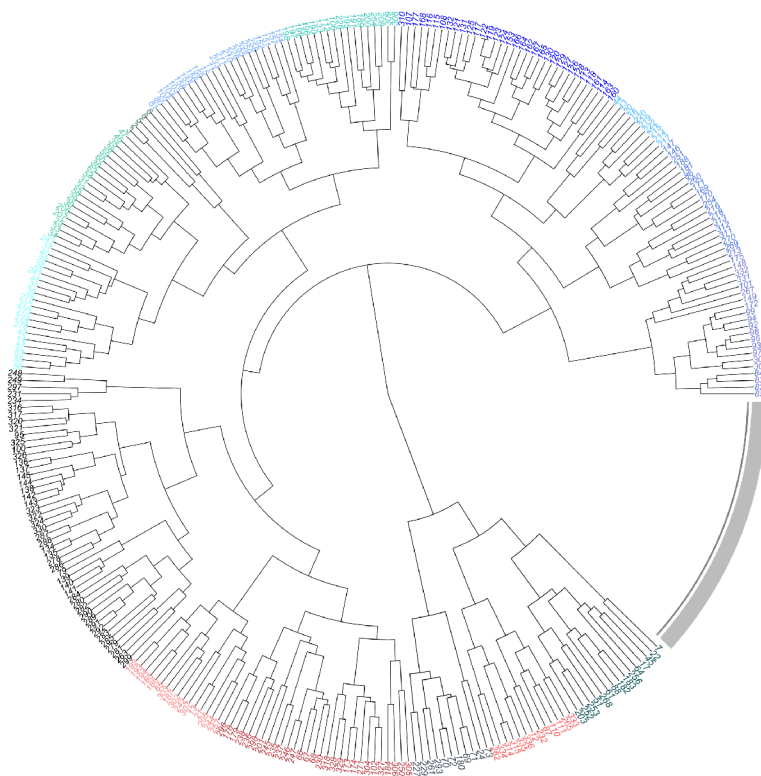


图 1 树种应用适宜性聚类分析树

Fig.1 Dendrogram of cluster analysis for tree species application suitability

经多方案比较,考虑各等级的类型所含树种数,结合聚类树上次级类型之间的区分度,首先按距离阈值7.00将298个树种分为7类,再按距离阈

值6.00将类型Ⅳ分为2类,按距离阈值5.00将类型Ⅰ分为4类,将类型Ⅱ分为5类,共计分为15类,结果见表3。

表3 树种应用适宜性分类结果

Tab.3 Classification results of tree species application suitability						株					
编号 Number	乔木 Arbor	灌木 Shrub	藤本 Vine	竹木 Bamboo	合计 Total	编号 Number	乔木 Arbor	灌木 Shrub	藤本 Vine	竹木 Bamboo	合计 Total
I-1	32	2	0	0	34	Ⅱ-5	5	0	0	0	5
I-2	8	2	0	0	10	Ⅲ	0	42	5	0	47
I-3	14	4	1	0	19	Ⅳ-1	1	14	1	0	16
I-4	0	21	0	0	21	Ⅳ-2	1	24	4	0	29
Ⅱ-1	11	11	0	0	22	V	12	3	0	0	15
Ⅱ-2	20	0	0	0	20	Ⅵ	1	10	2	0	13
Ⅱ-3	17	0	0	0	17	Ⅶ	9	2	0	0	11
Ⅱ-4	19	0	0	0	19	合计 Total	150	135	13	0	298

2.3 树种应用适宜性类型的主要特征

对照各类型内树种属性指标,归纳总结其共性特征,结果见表4。太原市园林绿化树种应用适宜性分类名录见表5。

表4 树种应用适宜性类型的特征

编号 Number	特征 Characteristic
I-1	耐寒性较强,耐旱性一般;土层厚度 ≥ 1.2 m;本地生长发育状况较好;观花特性良好,观枝特性较好,观果特性较好,综合局部观赏特性良好;全株观赏效果较好;种苗成本一般;水肥管理成本一般,整形修剪成本及病虫害防治成本较高,综合管护成本较高
I-2	耐寒性一般,耐旱性较强;土层厚度 ≥ 1.2 m;本地生长发育状况较好;观花特性较差,观叶特性良好,观枝特性较好;全株观赏效果较好,姿态观赏特性较好,芳香特性较差;种植成本一般;水肥管理成本较低,整形修剪成本较低,病虫害防治成本一般,综合管护成本较低
I-3	耐寒性一般,综合抗逆性一般;土层厚度 ≥ 1.2 m,综合生态要求一般;本地生长发育状况一般,不具普遍优势;观叶特性较好,综合局部观赏特性较好;全株观赏效果良好,姿态观赏特性良好;种苗成本、种植成本一般
I-4	耐寒性、耐瘠薄性、耐阴性较强,综合抗逆性较强,抗污染性一般;土层厚度 ≥ 0.3 m,综合生态要求较低;本地生长发育状况一般,不具普遍优势;观花、观叶特性一般,观枝特性较差,综合局部观赏特性一般;全株观赏效果、姿态观赏特性一般;种苗成本大多较低;整形修剪成本、病虫害防治成本一般,综合管护成本一般
Ⅱ-1	耐寒性、耐旱性较强,综合抗逆性强;土层厚度 ≥ 1.2 m,中壤和轻壤;本地生长发育状况良好;观枝特性较好,综合局部观赏特性较好;全株观赏效果较好,姿态观赏特性一般;种苗和种植成本较低
Ⅱ-2	耐寒性、耐旱性强,耐瘠薄性较强,综合抗逆性强;中壤,综合生态要求一般;本地生长发育状况良好;观花特性较差,观叶特性较好,观枝特性良好,综合局部观赏特性一般;全株观赏效果、姿态观赏特性较好,芳香特性较差;种植成本较低;水肥管理成本较低,综合管护成本较低
Ⅱ-3	耐寒性、耐旱性强,耐瘠薄性较强,耐水湿性一般,综合抗逆性强,抗污染性较强;土层厚度 ≥ 1.5 m,综合生态要求较高;本地生长发育状况良好;观花特性、观叶特性、观枝特性较好,综合局部观赏特性较好;全株观赏效果、姿态观赏特性较好;种植成本较低;水肥管理成本较低,综合管护成本较低
Ⅱ-4	耐寒性、耐旱性强,耐阴性较差,综合抗逆性较强;土层厚度 ≥ 1.5 m,pH值为6.5~8.0,耐弱碱性,综合生态要求较高;本地生长发育状况较好;观花特性、观果特性较差,综合局部观赏特性较差;全株观赏效果、姿态观赏特性一般,芳香特性较差;种苗成本、种植成本;水肥管理成本,整形修剪成本,综合管护成本
Ⅱ-5	耐寒性强,耐瘠薄性较强,综合抗逆性较强,抗污染性较差;土层厚度 ≥ 1.2 m,轻壤和沙壤,pH值为6.5~8.0,耐弱碱性,综合生态要求较高;本地生长发育状况较好;观花特性较差,观叶特性良好,观枝特性较好,观果特性一般,综合局部观赏特性一般;全株观赏效果、姿态观赏特性良好,芳香特性较差;种植成本较高;水肥管理成本较低,整形修剪成本,综合管护成本
Ⅲ	耐阴性大多较强;土层厚度 ≥ 0.3 m,综合生态要求低;本地生长发育状况较好;观花特性大多良好,综合局部观赏特性较好;全株观赏效果良好,姿态观赏特性较好;种植成本大多较低
Ⅳ-1	耐寒性、耐旱性、耐瘠薄性强,综合抗逆性强,抗污染性较强;土层厚度 ≥ 0.6 m,pH 6.5~8.0,耐弱碱性,综合生态要求低;本地生长发育状况良好;观叶特性、观枝特性较差,综合局部观赏特性较差;全株观赏效果、姿态观赏特性较差;种苗成本、种植成本;水肥管理成本、整形修剪成本、病虫害防治成本,综合管护成本

续表 4 树种应用适宜性类型特征

Tab.4(Continued) Typological characteristics of tree species application suitability

编号 Number	特征 Characteristic
Ⅳ-2	耐寒性一般,耐荫性较强;土层厚度 ≥ 0.3 m,综合生态要求低;本地生长发育状况较好;观枝特性一般;全株观赏效果一般,姿态观赏特性一般;种苗成本较低,种植成本较低;综合管护成本大多较低
V	耐寒性较强,耐荫性较差,综合抗逆性较强;土层厚度 ≥ 1.2 m;本地生长发育状况一般,不具普遍优势;观花特性大多较差,观叶特性较好,综合局部观赏特性一般;全株观赏效果一般;种植成本较高;整形修剪成本较低,综合管护成本较低
Ⅵ	耐寒性较差,耐旱性一般,综合抗逆性较差;土层厚度 ≥ 0.3 m,综合生态要求较低;本地生长发育状况一般,不具普遍优势;观枝特性一般;芳香特性较差;种植成本一般;水肥管理成本一般
Ⅶ	耐寒性较差,综合抗逆性较差;土层厚度 ≥ 1.2 m,综合生态要求较高;本地生长发育状况较差;观叶特性、观枝特性较好;全株观赏效果较好;种苗成本大多较高,种植成本较高;水肥管理成本大多较高

表 5 太原市园林绿化树种应用适宜性分类名录

Tab.5 Classification of application suitability of tree species for landscaping in Taiyuan

编号 Number	树种 Tree species
I -1	钻石海棠、密枝红叶李、红宝石海棠、太阳李、绚丽海棠、凯尔斯海棠、紫叶矮樱、红花麦李、野山楂、西洋梨、紫叶李、八棱海棠、大花海棠、西府海棠、帚桃、亚当海棠、美人梅、大果海棠、红叶红海棠、白梨、红果海棠、李、秋子梨、河南海棠、火焰海棠、垂丝海棠、梓树、梅、苹果、紫叶稠李、楸子、花红、花楸、樱桃
I -2	五角枫、元宝枫、复叶槭、茶条槭、金叶复叶槭、银槭、偃柏、金丝垂柳、银芽柳、金叶桧
I -3	重瓣棣棠、紫藤、棣棠、楸树、青麸杨、木槿、鸡爪槭、紫薇、君迁子、灰楸、黄金树、柿树、大花圆锥绣球、三角槭、樱花、日本晚樱、青桐、紫荆、东京樱花
I -4	互叶醉鱼草、大叶醉鱼草、欧李、粉花绣线菊、土庄绣线菊、金焰绣线菊、红花绣线菊、长白茶藨子、麻叶绣线菊、三裂绣线菊、香茶藨子、陕西莢蒾、金山绣线菊、美丽茶藨子、绣球莢蒾、东北茶藨子、金露梅、鸡麻、毛樱桃、照白杜鹃、白鹃梅
Ⅱ -1	红花桤柳、华北卫矛、文冠果、怪柳、火炬树、重瓣榆叶梅、毛叶水栒子、沙枣、黄栌、山桃、灰栒子、榆叶梅、山杏、圆柏、侧柏、桃、杏、太平花、水栒子、碧桃、红叶碧桃、山梅花
Ⅱ -2	新疆杨、毛白杨、旱柳、龙爪枣、枣、馒头柳、河北杨、垂柳、金丝柳、漳河柳、白蜡树、洋白蜡、绒毛白蜡、龙爪桑、金枝白蜡、北美圆柏、垂枝榆、金叶白蜡、龙爪榆、金叶榆
Ⅱ -3	国槐、香花槐、毛泡桐、毛刺槐、金叶槐、金枝槐、龙爪槐、山植、杜梨、北京栎、毛桤、蝴蝶槐、泡桐、刺槐、山荆子、朝鲜槐、香椿
Ⅱ -4	千头椿、臭椿、小叶杨、银白杨、桑、加杨、箭杆杨、钻天杨、黑杨、龙爪柳、北京杨、圆冠榆、青杨、白榆、黄皮柳、红叶杨、核桃、大果榆、春榆
Ⅱ -5	油松、白皮松、白杆、青杆、华山松
Ⅲ	爬山虎、连翘、紫丁香、花叶连翘、暴马丁香、金银木、红丁香、北京丁香、五叶地锦、金银花、鞑靼忍冬、东北连翘、重瓣黄刺玫、黄刺玫、天目琼花、粉团蔷薇、玫瑰、野蔷薇、胶东卫矛、南蛇藤、七姊妹、美蔷薇、辽东丁香、台尔曼忍冬、红王子锦带、蓝叶忍冬、花叶丁香、小叶丁香、金花忍冬、什锦丁香、四季玫瑰、巧玲花、猥实、华北珍珠梅、大果蔷薇、羽叶丁香、水蜡、迎春、红瑞木、粉公主锦带、金钟花、金叶连翘、牡丹、珍珠绣线菊
Ⅳ -1	荆条、柠条、蒙古莢、紫穗槐、山荠菜、杠柳、铺地柏、酸枣、沙棘、小叶鼠李、树锦鸡儿、沙地柏、多花胡枝子、小叶锦鸡儿、胡枝子、枸杞
Ⅳ -2	葱皮忍冬、乌头叶蛇葡萄、金叶莢、平枝栒子、花椒、金叶接骨木、雪柳、阿穆尔小檗、紫叶小檗、邱园蓝莢、扶芳藤、山葡萄、金叶女贞、花木蓝、六道木、葡萄、接骨木、郁李、日本小檗、金叶风箱果、麦李、小叶黄杨、紫叶风箱果、木芙蓉、朝鲜黄杨、木香蓇、金叶水蜡、锦熟黄杨、雀舌黄杨
V	秋胡颓子、构树、乌柳、垂枝圆柏、皂荚、日本皂荚、杜松、樟子松、蒙椴、迎红杜鹃、粉柏、黄槲、少脉椴、杜仲、小叶朴
Ⅵ	凌霄、糯米条、美国凌霄、小叶女贞、皱叶莢蒾、皱皮木瓜、日本木瓜、大花溲疏、丝兰、洒金柏、山茱萸、大叶黄杨、凤尾兰
Ⅶ	女贞、榉、流苏、塔柏、二球悬铃木、美国红栌、木瓜、全缘叶栎树、银杏、大果紫薇、一球悬铃木

2.4 树种类型与绿化应用的匹配关系

考虑到城市绿地树种规划对树种选用的要求^[3,29-30],从满足风貌要求、适宜绿地类型、树种功能定位 3 个典型方向,将树种选用的满足风貌要求分为重要风貌区和一般风貌区,适宜绿地类型分为公园绿地/居住绿地(G1/RG)、道路绿地(SG)、防护绿地(G2),树种功能定位分为基调树种、骨干树种、一般树种。根据树种类型的适宜性特征(表 4)

与树种选用要求的匹配程度,15 个类型的典型应用方向适宜情况见图 2。在满足风貌要求方面,有 4 类树种更适用于重要风貌区;在适宜绿地类型方面,公园绿地/居住绿地和防护绿地的适宜树种类型数量相当且相对较多,并存在少数交叉,道路绿地有 2 类适宜;在树种功能定位方面,适宜用作基调树种的类型较多,其中少数类型同时适宜用作骨干树种,适宜用作一般树种的有 5 个类型。

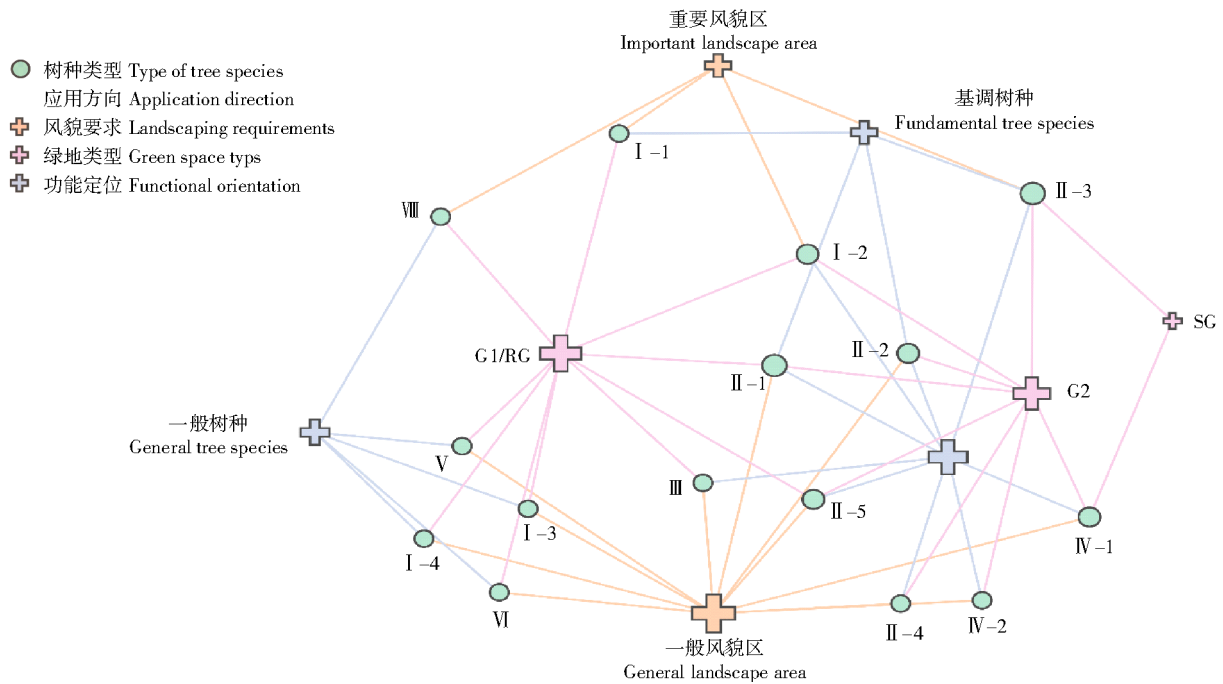


图2 树种典型应用方向适宜性关系网络

Fig.2 Suitable relationship network diagram of typical application directions for tree species

3 结论与讨论

树种选用是城市园林绿化的核心任务,以太原市现有340个园林绿化树种为研究对象,数量庞大。通过构建与城市绿化树种应用适宜性评价匹配的层次评价模型,并将自然断点法和系统聚类分析应用于树种选择,可使分级与分类更加科学。自然断点法的运用使得应用适宜性分级差异最大化^[31],利用系统聚类分析进行分类使得树种类间特征区分明确、类内特征易于把握、特征清晰,一定程度规避了前人研究依经验分级的主观性,极大地提高了树种选择的科学性与可信度,提升了研究结果的实践应用价值。

目前,相关研究多数仅聚焦于部分本地常用植物在固碳释氧^[7]、滞尘^[17]、耐阴性^[15]、抗风性^[16,18]、观赏性^[12]等单一功能性状方面的表现评价,或仅关注湿地^[9]、防护林^[11,14]等单一绿地类型的树种适宜性,因而基于此的评价指标选取也多以耐性、抗性、生态特性和树木整体与局部观赏效果导向的指标为主。本研究以实现城市园林绿化全周期可持续性为目标,综合考虑树木生长发育规律、景观美学、环境生态需求,在前人基础上对评价指标体系进行了梳理和优化,围绕生态适应性、景观适宜性、栽培管护适用性3个方面构建树种应用适宜性

评价指标体系,指标初选重点增加了树种本地生长发育状况以及经济成本相关指标,在此基础上邀请太原市园林、林业、病虫害防治、苗圃经营、景观规划设计等方面的专家参与指标筛选与评分,确保指标体系与评价目标具有良好的对应性和一致性。

城市绿地树种规划对树种选用的要求在不同应用方向上各有侧重,应用方向与树种特征存在较为明确的匹配关系,例如G2重视树种的抗性及耐粗放管理^[30]。经聚类分析形成的分类,其类间区别显著,类内特征明确,类别特征与典型应用方向对树种的需求建立了良好的匹配,弥合研究成果与实践应用之间的断裂,提升了分类结果的实用性。

综上所述,本研究基于指导城市科学绿化顶层设计,以太原市340种园林绿化树种为研究对象,构建了适用于城市规划层面的树种选择与应用决策技术路线,能够科学有效支撑和指导城市树种规划工作。研究在树种应用适宜性评价的基础上,将树种的综合应用适宜性分为4个等级,Ⅲ级以上树种能够适应本地环境,推荐本地绿化工作中从中选用,Ⅳ级树种综合评分较低,出于保护生物多样性等特殊考虑可以适量选用;Ⅰ~Ⅲ级树种进一步划分为类间区别显著、类内特征明确的

15 个类型,各类型与风貌要求、绿地类型以及功能定位 3 个典型应用方向构建了清晰的应用适宜关系,太原市城市园林绿化规划设计相关工作可参照该关系网络进行树种选用。

参考文献:

- [1] 徐捷,苟民欣,陈新平,等.基于大数据的城市绿化树种气候适宜性匹配研究[J].中国园林,2024,40(7):71-76.
XU J, GOU M X, CHEN X P, et al. Climate suitability matching for urban landscaping tree species based on the analysis of big data[J]. Chinese Landscape Architecture, 2024, 40(7): 71-76.
- [2] 张鹤,周君.济南市木本园林植物资源调查与分析[J].中国农学通报,2015,31(22):148-151.
ZHANG H, ZHOU J. Investigation and analysis of woody landscape plant resources in ji'nan city[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(22): 148-151.
- [3] 杜安.中华人民共和国成立以来城市绿地树种规划的思想析要、存在问题与发展前瞻[J].中国园林,2021,37(S2):102-105.
DU A. Ideological analysis, existing problems and development prospect of tree species planning of urban green space since the founding of the people's republic of China[J]. Chinese Landscape Architecture, 2021, 37(S2): 102-105.
- [4] 柴思宇,刘燕.国外城市树种选择指导及其借鉴[J].中国园林,2011,27(9):82-85.
CHAI S Y, LIU Y. Learning from the tree selection guide in foreign countries for urban greening[J]. Chinese Landscape Architecture, 2011, 27(9): 82-85.
- [5] 张哲,潘会堂.园林植物景观评价研究进展[J].浙江农林大学学报,2011,28(6):962-967.
ZHANG Z, PAN H T. Research on the evaluation of garden plant landscapes[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2011, 28(6): 962-967.
- [6] 白保勋,陈东海,徐婷婷,等.基于生态适应性与生态服务价值的绿化树种选择[J].生态环境学报,2018,27(4):601-608.
BAI B X, CHEN D H, XU T T, et al. Greening tree species selection based on ecological suitability and ecology service value[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(4): 601-608.
- [7] 李长爱,郭春风,刘玲,等.8种园林灌木光合特性及固碳释氧能力分析[J].西北农业学报,2023,32(9):1411-1421.
LI C A, GUO C F, LIU L, et al. Photosynthetic characteristics and capacities of carbon sequestration and oxygen release in eight ornamental shrubs[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2023, 32(9): 1411-1421.
- [8] 韦新良,马俊,刘恩斌,等.生态景观林树种选择适宜性评价技术研究[J].西北林学院学报,2008,23(6):207-212.
WEI X L, MA J, LIU E B, et al. Suitability evaluation of tree species for ecological and landscape purpose[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(6): 207-212.
- [9] 陆莹,武文婷,方振军,等.杭州市湿地植物资源应用现状调查与适宜性评价[J].广东农业科学,2022,49(3):57-67.
LU Y, WU W T, FANG Z J, et al. Application investigation and suitability evaluation of plant resources in wet ponds in Hangzhou[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2022, 49(3): 57-67.
- [10] 梁冰,李湛东,陈建芳,等.北京地区彩叶树种应用的综合评价[J].广东农业科学,2014,41(4):64-67.
LIANG B, LI Z D, CHEN J F, et al. Comprehensive evaluation on the colored-leaf trees' application in Beijing area[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(4): 64-67.
- [11] 张建国,徐新文,雷加强,等.塔克拉玛干沙漠腹地引种植物适应性评价指标体系的构建与应用[J].自然资源学报,2009,24(5):849-858.
ZHANG J G, XU X W, LEI J Q, et al. Research on construction and application of adaptability evaluation indicator system of introduced plants in the hinterland of Taklimakan Desert[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(5): 849-858.
- [12] 刘瑞宁,张文辉,刘新成,等.天津市 32 种常见灌木的观赏性及适应性综合评价[J].西北农业学报,2008,17(1):296-301.
LIU R N, ZHANG W H, LIU X C, et al. Comprehensive appraisal on ornamental characters and adaptability of 32 common shrub in Tianjin[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2008, 17(1): 296-301.
- [13] 黎燕琼,李军,郑绍伟,等.四川地区土地资源节约型城镇景观林构建乔木树种选择[J].西南农业学报,2019,32(3):627-635.
LI Y Q, LI J, ZHENG S W, et al. Selection of *Arbor* species for constructing landscape forests in land resources-saving cities in Sichuan Province[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(3): 627-635.
- [14] 陈艳瑞,刘康,陈启民,等.准噶尔盆地南缘防护林树种适宜性评价[J].干旱区资源与环境,2011,25(11):152-156.
CHEN Y R, LIU K, CHEN Q M, et al. Suitability evaluation on trees species of shelter belt on the southern edge of Xinjiang Junggar Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(11): 152-156.
- [15] 林树燕,张庆峰,陈其旭.10 种园林植物的耐阴性[J].东北林业大学学报,2007,35(7):32-34.
LIN S Y, ZHANG Q F, CHEN Q X. Shade-tolerance of ten species of garden plants[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2007, 35(7): 32-34.
- [16] 祖若川,罗立娜,刘晶,等.滨海公园棕榈类植物抗风性调查与评价分析[J].北方园艺,2016(5):89-94.
ZU R C, LUO L N, LIU J, et al. Research and assessment on the wind resistance analysis of palm plants in the coastal park[J]. Northern Horticulture, 2016(5): 89-94.
- [17] 范舒欣,蔡好,董丽.北京市 8 种常绿阔叶树种滞尘能力[J].应用生态学报,2017,28(2):408-414.
FAN S X, CAI Y, DONG L. Dust absorption capacities of eight evergreen broad-leaved plants in Beijing, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(2): 408-414.
- [18] 吴志华,李天会,张华林,等.广东湛江地区绿化树种抗风性评价与分级选择[J].亚热带植物科学,2011,40(1):18-23.
WU Z H, LI T H, ZHANG H L, et al. Study on graduation and comprehensive evaluation of tree species wind-resistance in Zhanjiang, Guangdong Province[J]. Subtropical Plant Sci-

- ence, 2011, 40(1):18-23.
- [19] 陈刚, 吕东, 赵明, 等. 基于层次分析法的干旱半干旱区 15 种引进观赏植物适应性[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(1): 186-191.
- CHEN G, LV D, ZHAO M, et al. Assessment on adaptability of 15 introduced ornamental plants in arid and semi-arid areas based on AHP[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(1): 186-191.
- [20] 鲁敏, 张月华. 沈阳城市绿化植物综合评价分级选择[J]. 中国园林, 2003, 19(7):66-69.
- LU M, ZHANG Y H. Comprehensive evaluation, selection and graduation of the trees for urban landscaping in Shenyang[J]. Journal of Chinese Landscape Architecture, 2003, 19(7): 66-69.
- [21] 童丽丽, 吴祝慧, 王哲宇, 等. 层次分析法与熵技术评价在南京城市绿化生态树种选择中的应用[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(9):58-61.
- TONG L L, WU Z H, WANG Z Y, et al. Application of entropy technology and AHP to comprehensive evaluation and selection of urban afforestation trees in Nanjing City[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(9):58-61.
- [22] 闫晓云, 张秋良, 韩鹏, 等. 呼和浩特市绿化树种综合评价及树种选择[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(3):135-140.
- YAN X Y, ZHANG Q L, HAN P, et al. Comprehensive assessment and selection for urban tree species in Hohhot[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(3):135-140.
- [23] 鲁敏, 姜凤岐, 李英杰. 沈阳城市绿化生态工程树种综合评价分级选择[J]. 应用生态学报, 2004, 15(7):1153-1156.
- LU M, JIANG F Q, LI Y J. Comprehensive evaluation and selection of urban eco-engineering virescent trees in Shenyang City[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(7): 1153-1156.
- [24] 樊兰英, 闫丽娟, 刘随存. 太原市不同类型城市绿地土壤理化性质[J]. 中国城市林业, 2020, 18(3):30-33.
- FAN L Y, YAN L J, LIU S C. Soil physicochemical property in different urban green lands in Taiyuan[J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2020, 18(3):30-33.
- [25] 王金璐, 冯晓宇, 郭晋平. 太原市园林绿化树种生态适宜性分类[J]. 广西林业科学, 2022, 51(1):62-70.
- WANG J L, FENG X Y, GUO J P. Ecological suitability classification of landscape tree species in Taiyuan City[J]. Guangxi Forestry Science, 2022, 51(1):62-70.
- [26] 王祝根, 李晓蕾, 夏管军. 墨尔本城市景观树种规划策略及其启示[J]. 现代城市研究, 2017, 32(3):97-102.
- WANG Z G, LI X L, XIA G J. Melbourne landscape tree species planning strategy and its enlightenments[J]. Modern Urban Research, 2017, 32(3):97-102.
- [27] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7):93-100.
- DENG X, LI J M, ZENG H J, et al. Research on computation methods of AHP weight vector and its applications[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(7):93-100.
- [28] 汪应洛. 系统工程[M]. 3 版. 北京:机械工业出版社, 2003: 130-140.
- WANG Y L. Systems engineering[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2003:130-140.
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市绿地规划标准: GB/T 51346—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Urban Green Space Planning Standards: GB/T 51346—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [30] 深圳市市场监督管理局. 城市绿地树种规划与设计规范 SZDB/Z298-2018[S]. 2018-05-01.
- Market Supervision Administration of Shenzhen Municipality. Code for Tree Species Planning and Design of Urban Green Space SZDB/Z298-2018[S]. 2018-05-01.
- [31] 方朝阳, 蔡振饶, 赵华飞, 等. 南昌市主城区生态系统服务供需匹配的城乡梯度特征研究[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(6):713-722.
- FANG C Y, CAI Z R, ZHAO H F, et al. Urban-rural gradient feature of matching ecosystem services supply and demand in the main area of Nanchang[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(6):713-722.