

DOI:10.12171/j.1000-1522.20200064

城市森林林内景观质量定量通用判别技术研究

崔 义 刘海轩 吕 娇 吴 鞠 许丽娟 韦柳端 余玉磊 徐程扬

(森林培育与保护教育部重点实验室、干旱半干旱地区森林培育和生态系统研究国家林业和草原局重点实验室,北京林业大学城市林业研究中心,北京 100083)

摘要:【目的】针对城市森林林内景观质量评价研究中存在的理论研究多、评价指标体系不通用等问题,构建区域性通用的林内景观质量评价指标体系,并提出林内景观分级标准,为城市森林结构优化、经营管理和生产实践提供技术支撑。【方法】以城市公园风景游憩林、郊野公园风景游憩林、居住区城市森林、城郊山地风景林等为研究对象,在林分尺度上筛选评价指标,以因子分析法构建林分结构质量综合指数,采用 Topsis 法结合聚类分析对城市森林林内景观质量等级进行划分。【结果】(1)4 种类型的城市森林筛选出 15 个评价指标用于城市森林林内景观评价,将林内景观分为优、高、中、低 4 个等级。(2)城市森林林内景观质量评价,核心指标包括乔木树种丰富度、林下物种丰富度、林型、林分整洁度、胸径分化度、郁闭度、观赏器官多样性、色彩季相多样性、单位面积胸高断面面积、冠径比等。(3)不同类型城市森林最优景观的指标特点不完全相同。城市公园风景游憩林:相对枝下高最小,径高比较小,冠径比较大,林分整洁度高;居住区城市森林:单位面积胸高断面面积最大,相对枝下高最小,冠径比较小,季相丰富度高。郊野公园风景游憩林:单位面积胸高断面面积、树高分化度和径高比最大,乔木树种种类最多,观赏器官较多样,多为混交林。城郊山地风景林:郁闭度适中、灌木相对高度最低、林分垂直层次和林下物种较丰富、林分整洁度高。【结论】总体上看,树种组成丰富、适度混交、林内整洁、胸径分化度和郁闭度都适宜的林分和观赏器官较多样,季相富于变化的景观更受人们的喜爱,不同类型城市森林的林分密度和冠径比的最优范围不同。在城市森林经营管理中,建议适当丰富林木树种种类,注重彩色植物和多季相树种的配置,适当调整林分密度,及时修枝、割灌,清除林下杂乱的枯落物和生活垃圾,保持林分整洁,并根据城市森林类型适时采取不同的经营管理措施,以提高其景观质量。

关键词: 城市森林; 林内景观; 美景度; 景观质量分级

中图分类号: S758.8 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2020)12-0009-15

引文格式: 崔义, 刘海轩, 吕娇, 等. 城市森林林内景观质量定量通用判别技术研究 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(12): 9-23. Cui Yi, Liu Haixuan, Lü Jiao, et al. General methods for quantitative assessment of in-forest landscape quality of urban forest [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(12): 9-23.

General methods for quantitative assessment of in-forest landscape quality of urban forest

Cui Yi Liu Haixuan Lü Jiao Wu Jū Xu Lijuan Wei Liuduan Yu Yulei Xu Chengyang

(Key Laboratory for Forest Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Key Laboratory of Silviculture and Forest Ecosystem Research in Arid- and Semi-Arid Region of State Forestry Administration, Research Center for Urban Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] In view of the problems existing in the study of in-forest landscape quality assessment of urban forest, such as many theoretical studies, poor unification in assessment index systems, a

收稿日期: 2020-03-12 修回日期: 2020-05-09

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(20140430102)。

第一作者: 崔义。主要研究方向: 城市林业。Email: 1048457105@qq.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。

责任作者: 徐程扬, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 城市林业、生态林与城市森林培育理论与技术等。Email: cyxu@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

regional universal in-forest landscape quality evaluation index system of urban forest was constructed, and the classification standard of in-forest landscape was proposed, which could provide technical support for the optimization of urban forest structure, management and production practice. [Method] Four types of urban forests, including scenic-recreational forest both in urban park and country park, urban forest of residential areas and scenic forest of suburban mountainous areas, were taken as the research objects. The evaluation indicators were selected on the scale of forest stand, the comprehensive quality index of forest structure quality was constructed by factor analysis, and the in-forest landscape quality grade of urban forest was classified by TOPSIS method and cluster analysis. [Result] (1) Fifteen evaluation indices were selected based on four types of urban forest and were used for evaluation of in-forest landscape of urban forest. The in-forest landscape of urban forest was divided into four grades: excellent, high, medium and low. (2) The in-forest landscape quality evaluation index system of urban forest was established, the core indicators including tree species richness (TSR), species richness under canopy (SRC), the forest type (FT), cleanliness of the forest stand (CFS), dispersion of DBH (DDBH), canopy coverage (CC), ornamental organ diversity (OOD), seasonal abundance (SA), breast height basal area per hectare (BAH), ratio of crown width to diameter (RCWD), etc. (3) The index characteristics of the optimal landscape of different types of urban forests were not exactly the same. Scenic-recreational forest of urban park: relative under branch height (RBH) was the smallest, ratio of diameter-height (RDH) was smaller, RCWD was larger, CFS was high. Urban forest of residential areas: BAH was the largest, RBH was the smallest, RCWD was smaller, SA was high. Scenic-recreational forest of country park: BAH, dispersion of tree height (DTH) and RDH were the largest, tree species were the most, with diverse ornamental organs, mostly mixed forest. Scenic forest of suburban mountainous areas: CC was moderate, relative shrub height (RSH) was the lowest, stand vertical stratum (SS) and species under the canopy were richer, CFS was high. [Conclusion] Seen as a whole, forests or landscapes which are of abundant tree species, mixed moderately, neat in-forest condition, both dispersion of DBH and canopy coverage are suitable, and with abundant ornamental organs and seasonal changes are more popular. The optimal range of stand density and RCWD is different for varied types of urban forest. In the management of urban forests, it is suggested to enrich the tree species appropriately, pay attention to the configuration of colored plants and multi-seasonal tree species, adjust the density of the forest properly, timely pruning, cutting and irrigation, remove litter and domestic garbage under the forest, keep the forest tidy, and give different managerial measures timely according to different urban forest types to improve its landscape quality.

Key words: urban forest; in-forest landscape; scenic beauty; landscape quality classification

城市森林是城市绿色空间的重要组成部分^[1],随着城市化进程的推进和森林游憩产业的迅猛发展,人们对城市森林的需求越来越高,而如何科学地评价城市森林质量是确定合理的城市森林结构、科学构建城市森林的前提^[2]。

目前关于城市森林景观质量的研究分单木景观^[3-4]、林内景观^[5-6]、林外近景^[7]、中景^[8]、远景^[9]等几个尺度,研究对象以城郊山区风景林^[10]、各类城市公园^[11-12]、森林公园^[13-14]、郊野公园^[15-16]等风景游憩功能森林为主,针对大学校园森林^[17]、居民小区景观林^[18]以及道路防护景观林^[19]也开展了部分研究。在林内景观尺度上,主要以林内景观质量评价^[20]为目标,开展林分结构、林内景观色彩斑块及林分美景度三者之间关系的研究^[21-22],并开展林分抚育等经营

措施对景观质量的影响^[23]、景观质量分级^[24]等,进而提出合理的经营策略。

确定科学的指标体系是正确评价林内景观质量的基础。目前,国内外学者主要采用聚类分析^[20-21],并结合 Topsis 法对不同类型的林内景观进行分类、分级^[11,24],在评价指标选取方面,主要选取胸径、树高、冠幅等林木测树指标,林分密度、树种组成、林下植被层盖度等林分结构指标,色彩丰富度、季相变化等色彩结构指标以及斑块形状、斑块聚合度、分离度等景观斑块结构指标构建评价指标体系,也有学者将表示林分空间结构的指标引入到景观美学质量评价中^[25]。这些研究多以单一类型的森林为主,而且这些指标通常仅适用于特定的研究区域或研究对象,通用性较差,目前鲜有针对多种类型城市森林的

通用评价指标体系的研究,选择适用性强且易于生产实践的评价指标、建立适用于所有类型城市森林的通用评价指标体系已成为科学评价城市森林质量、科学经营城市森林的重要瓶颈。

本研究以位于城区的城市公园风景游憩林、居住区城市森林和位于城郊的郊野公园风景游憩林、城郊山地风景林等 4 种类型的城市森林为研究对象,从林分尺度选取评价指标,利用美景度评价法、相关系数法等不同的方法对城市森林林内景观质量进行评价并筛选评价指标,构建区域性通用的城市森林林内景观质量评价指标体系,并对林内景观质量进行分级,以期在城市森林结构调控、经营管理和生产实践提供技术支撑,为后续的理论研究提供参考。

1 研究地概况

北京位于华北平原,地处 $115^{\circ}25' \sim 117^{\circ}30'E$ 、 $39^{\circ}28' \sim 41^{\circ}05'N$,地势西北高、东南低,西部、北部和东北部三面环山。四季分明,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,属典型的暖温带半湿润大陆性季风气候。多年平均气温为 $12^{\circ}C$,年平均降雨量为 600 mm 左右。地带性植被为温带落叶阔叶林,兼有温带针叶林的分布,低山植被以栎林、栓皮栎林、圆柏林和油松林为主^[26]。北京五环内城区全部为人工植物群落,主要由大型公园绿地、附属绿地和防护绿地构成,郊区与山区以种植于 20 世纪 60 年代的油松、侧柏林为主,占人工林总面积的 43% ^[27]。2018 年,北京市新增造林绿化面积 1.8 万 hm^2 、城市绿地 710 hm^2 ,截至 2019 年底,北京市森林覆盖率已达到 44% ,平原地区森林覆盖率达到 29.6% ,城市绿化覆盖率达到 48.46% ,人均公共绿地面积达到 16.4 m^2 ,北京市公园绿地 500 m 服务半径覆盖率提高到 83% ,城市宜居水平得到进一步提升。

2 样地选择与研究方法

2.1 样地选择与调查

采用典型抽样的方法,分别在北京市区的 9 个城市公园、11 个居民小区,城郊的 5 个郊野公园、4 个森林公园及 2 个林场内设置样地,样地大小为 $20\text{ m} \times 30\text{ m}$ 和 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$,试验点的基本信息及 4 种类型城市森林的样地概况如表 1、2 所示。对多样地进行实地调查,记录样地经纬度、海拔、坡度等基本信息,调查郁闭度、林内通视距离、枯落物分布情况等林分结构信息。对样地内乔木进行每木检尺(起测径阶为 4 cm),记录树种名称、胸径、树高、枝下高、冠幅等生长情况。在多样地的四角和中间设

置 5 个 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的灌木样方和 5 个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的草本样方,调查包括灌木和草本的种名、盖度、高度等在内的灌草信息。

2.2 评价指标的筛选

2.2.1 评价指标的初选

指标选取遵循科学性、通用性、实用性和数据易获取的原则,所选指标要能客观反映城市森林质量状况,选取指标时要抛开地域和树种的限制从而使所选指标可以在全国范围内通用,结合林木生产实践选取指标以使其在实际中得到广泛的应用,选择容易测量的指标以便数据获取更加便捷可靠。前人的研究已提供了大量的指标,在阅读相关文献的基础上对已有评价指标进行分析,并采用专家咨询法^[28],向 21 位林业专家发放指标咨询问卷,最后从空间结构、组成结构、季相丰富度结构、视觉结构等 4 方面选出 21 个初选评价指标,包括 6 个共有指标和 15 个特有指标,5 个定性指标和 16 个定量指标,定量指标直接采用其测量值或计算值,定性指标则通过分解进行赋值(表 3)。

2.2.2 评价指标的复选

首先通过美景度与评价指标之间的相关分析、不同美景度等级间评价指标的单因素方差分析^[24]等方法,对不同类型城市森林的美景度与初选指标之间的关系进行研究,保留与美景度有显著相关关系的指标和在各美景度等级间存在显著差异的指标,之后再对这些指标进行简单相关分析,删除相关系数较大的两个指标中的其中一个,将剩余的指标作为复选指标,用于林内景观质量分级(表 3)。

2.3 景观照片拍摄、筛选与评判

参照前人的拍摄规范^[8,11]对林内景观样地进行拍摄,使用 Nikon D 7100 相机横向拍摄,天气为晴天,拍摄时间为每天的 09:00—15:00,使用相同的焦距,不使用闪光灯,顺光拍摄,一张照片代表一处林内景观。剔除有人为干扰影响的照片,共筛选出 228 张林内景观照片。

采用美景度评价法^[29]对林内景观照片进行评判,将景观照片随机排列制作成幻灯片,采用室内放映的方式进行评判,每张幻灯片放映时间为 8 s ,评判者为 50 名北京林业大学林学、城市林业等相关专业的学生和 67 名社会人士,共计 117 名。

2.4 景观等级划分方法

通过因子分析^[4],对经过筛选后的复选指标进行降维,根据因子旋转矩阵,利用降维后的特征因子构建林分结构质量综合指数,分析林分结构指数与美景度的关系,选用美景度和林分结构质量综合指数作为聚类指标,标准化处理后利用离差平方和法,对

表1 样地基本信息

Tab. 1 Basic information of sample plots

样地类型 Sample plot type	试验点名称(建成时间) Experimental site name (completion year)	地理位置 Geographical position	主要乔木树种 Main arbor species
	八大处公园(1949) Badachu Park (1949)	北京市石景山区 Shijingshan District, Beijing	侧柏 <i>Platycladus orientalis</i> 、油松 <i>Pinus tabuliformis</i> 、刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> 、山桃 <i>Amygdalus davidiana</i> 、栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i> 、蒙桑 <i>Morus mongolica</i> 、君迁子 <i>Diospyros lotus</i> 、黑弹树 <i>Celtis bungeana</i> 、黄栌 <i>Cotinus coggygria</i>
	陶然亭公园(1952) Taoranting Park (1952)	北京市西城区 Xicheng District, Beijing	油松 <i>Pinus tabuliformis</i> 、圆柏 <i>Sabina chinensis</i> 、白皮松 <i>Pinus bungeana</i> 、银杏 <i>Ginkgo biloba</i> 、小叶杨 <i>Populus simonii</i> 、元宝槭 <i>Acer truncatum</i>
	青年湖公园(1960) Qingnianhu Park (1960)	北京市东城区 Dongcheng District, Beijing	白皮松 <i>Pinus bungeana</i> 、银杏 <i>Ginkgo biloba</i> 、国槐 <i>Sophora japonica</i> 、圆柏 <i>Sabina chinensis</i> 、山楂 <i>Crataegus pinnatifida</i>
	北京朝阳公园(1984) Beijing Sun Park (1984)	北京市朝阳区 Chaoyang District, Beijing	国槐 <i>Sophora japonica</i> 、毛白杨 <i>Populus tomentosa</i> 、栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i> 、白蜡树 <i>Fraxinus chinensis</i> 、刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> 、元宝槭 <i>Acer truncatum</i> 、旱柳 <i>Salix matsudana</i>
	双秀公园(1984) Shuangxiu Park (1984)	北京市西城区 Xicheng District, Beijing	毛白杨 <i>Populus tomentosa</i> 、油松 <i>Pinus tabuliformis</i>
	北京西山国家森林公园(1984) Beijing Xishan National Forest Park (1984)	北京西郊小西山 Xiaoxishan in the western suburbs of Beijing	山桃 <i>Amygdalus davidiana</i> 、侧柏 <i>Platycladus orientalis</i> 、君迁子 <i>Diospyros lotus</i> 、油松 <i>Pinus tabuliformis</i> 、蒙桑 <i>Morus mongolica</i> 、白榆 <i>Ulmus pumila</i>
	鹰山森林公园(1990) Yingshan Forest Park (1990)	北京市丰台区 Fengtai District, Beijing	油松 <i>Pinus tabuliformis</i> 、侧柏 <i>Platycladus orientalis</i> 、白榆 <i>Ulmus pumila</i> 、蒙桑 <i>Morus mongolica</i> 、君迁子 <i>Diospyros lotus</i>
	菖蒲河公园(2002) Changpuhe Park (2002)	北京市东城区 Dongcheng District, Beijing	龙爪槐 <i>Sophora japonica f. pendula</i> 、刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> 、白蜡树 <i>Fraxinus chinensis</i> 、圆柏 <i>Sabina chinensis</i> 、海棠花 <i>Malus spectabilis</i> 、银杏 <i>Ginkgo biloba</i> 、栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i>
	朝来森林公园(2002) Chaolai Forest Park (2002)	北京市朝阳区 Chaoyang District, Beijing	旱柳 <i>Salix matsudana</i> 、臭椿 <i>Ailanthus altissima</i> 、圆柏 <i>Sabina chinensis</i> 、白蜡树 <i>Fraxinus chinensis</i> 、刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> 、油松 <i>Pinus tabuliformis</i>
公园 Park	海淀公园(2003) Haidian Park (2003)	北京市海淀区 Haidian District, Beijing	毛白杨 <i>Populus tomentosa</i> 、旱柳 <i>Salix matsudana</i> 、国槐 <i>Sophora japonica</i> 、刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> 、西府海棠 <i>Malus × micromalus</i> 、银杏 <i>Ginkgo biloba</i>
	马甸公园(2003) Madian Park (2003)	北京市海淀区 Haidian District, Beijing	油松 <i>Pinus tabuliformis</i> 、栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i> 、圆柏 <i>Sabina chinensis</i> 、臭椿 <i>Ailanthus altissima</i> 、白蜡树 <i>Fraxinus chinensis</i> 、碧桃 <i>Prunus persica</i> 、紫叶李 <i>Prunus cerasifera f. atropurpurea</i>
	奥林匹克森林公园(2005) Olympic Forest Park (2005)	北京市朝阳区 Chaoyang District, Beijing	白蜡树 <i>Fraxinus chinensis</i> 、国槐 <i>Sophora japonica</i> 、旱柳 <i>Salix matsudana</i> 、毛白杨 <i>Populus tomentosa</i> 、栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i> 、馒头柳 <i>Salix matsudana var. matsudana f. umbraculifera</i> 、刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> 、银杏 <i>Ginkgo biloba</i> 、缘柳 <i>Salix matsudana var. matsudana f. pendula</i>
	百旺公园(2006) Baiwang Park (2006)	北京市海淀区 Haidian District, Beijing	国槐 <i>Sophora japonica</i> 、毛白杨 <i>Populus tomentosa</i> 、旱柳 <i>Salix matsudana</i> 、杜仲 <i>Eucommia ulmoides</i> 、栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i>
	玉东郊野公园(2007) Yudong Country Park (2007)	北京市海淀区 Haidian District, Beijing	栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i> 、国槐 <i>Sophora japonica</i> 、油松 <i>Pinus tabuliformis</i> 、青扦 <i>Picea wilsonii</i> 、白皮松 <i>Pinus bungeana</i> 、白花泡桐 <i>Paulownia fortunei</i> 、栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i> 、银杏 <i>Ginkgo biloba</i> 、龙爪槐 <i>Sophora japonica f. pendula</i> 、圆柏 <i>Sabina chinensis</i>
	北京东升八家郊野公园(2007) Should's Ancestral Hall (2007)	北京市海淀区 Haidian District, Beijing	毛白杨 <i>Populus tomentosa</i> 、国槐 <i>Sophora japonica</i> 、银杏 <i>Ginkgo biloba</i> 、山楂 <i>Crataegus pinnatifida</i> 、油松 <i>Pinus tabuliformis</i> 、旱柳 <i>Salix matsudana</i> 、圆柏 <i>Sabina chinensis</i>
	老山城市休闲公园(2008) Laoshan Urban Leisure Park (2008)	北京市石景山区 Shijingshan District, Beijing	油松 <i>Pinus tabuliformis</i> 、馒头柳 <i>Salix matsudana var. matsudana f. umbraculifera</i> 、国槐 <i>Sophora japonica</i> 、毛白杨 <i>Populus tomentosa</i> 、侧柏 <i>Platycladus orientalis</i> 、核桃 <i>Juglans regia</i> 、山杏 <i>Armeniaca sibirica</i>
	树村郊野公园(2011) Shucun Country Park (2011)	北京市海淀区 Haidian District, Beijing	毛白杨 <i>Populus tomentosa</i> 、榆树 <i>Ulmus pumila</i> 、国槐 <i>Sophora japonica</i> 、柿树 <i>Diospyros kaki</i>
	船营公园(2014) Chuanying Park (2014)	北京市海淀区 Haidian District, Beijing	银杏 <i>Ginkgo biloba</i> 、元宝槭 <i>Acer truncatum</i> 、栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i> 、旱柳 <i>Salix matsudana</i> 、国槐 <i>Sophora japonica</i> 、油松 <i>Pinus tabuliformis</i>

表 1(续)
Tab.1 (continued)

样地类型 Sample plot type	试验点名称(建成时间) Experimental site name (completion year)	地理位置 Geographical position	主要乔木树种 Main arbor species
居民小区 Residential area	曙光花园-望山园(2001) Shuguang Huayuan-Wangshan Yuan (2001)	北京市海淀区 Haidian District, Beijing	国槐 <i>Sophora japonica</i> 、毛白杨 <i>Populus tomentosa</i> 、一球悬铃木 <i>Platanus occidentalis</i> 、臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>
	华清嘉园(2002) Huaqing Jiayuan (2002)	北京市海淀区 Haidian District, Beijing	一球悬铃木 <i>Platanus occidentalis</i> 、千头椿 <i>Ailanthus altissima</i> ‘Qiantou’、三球悬铃木 <i>Platanus orientalis</i> 、垂柳 <i>Salix babylonica</i>
	逸成东苑(2003) Yicheng Dongyuan (2003)	北京市海淀区 Haidian District, Beijing	银杏 <i>Ginkgo biloba</i> 、一球悬铃木 <i>Platanus occidentalis</i> 、国槐 <i>Sophora japonica</i>
	拂林园(2003) Fulin Yuan (2003)	北京市朝阳区 Chaoyang District, Beijing	国槐 <i>Sophora japonica</i> 、垂柳 <i>Salix babylonica</i> 、臭椿 <i>Ailanthus altissima</i> 、美国红栎 <i>Fraxinus pennsylvanica</i> 、杜仲 <i>Eucommia ulmoides</i> 、一球悬铃木 <i>Platanus occidentalis</i> 、雪松 <i>Cedrus deodara</i> 、银杏 <i>Ginkgo biloba</i> 、栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i>
	观澜国际花园(2003) Guanlan Guoji Huayuan (2003)	北京市海淀区 Haidian District, Beijing	臭椿 <i>Ailanthus altissima</i> 、一球悬铃木 <i>Platanus occidentalis</i> 、二球悬铃木 <i>Platanus acerifolia</i> 、国槐 <i>Sophora japonica</i> 、垂柳 <i>Salix babylonica</i> 、刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> 、雪松 <i>Cedrus deodara</i> 、加杨 <i>Populus × canadensis</i> 、核桃 <i>Juglans regia</i>
	华冠丽景(2003) Huaguan Lijing (2003)	北京市东城区 Dongcheng District, Beijing	银杏 <i>Ginkgo biloba</i> 、枫杨 <i>Pterocarya stenoptera</i> 、华山松 <i>Pinus armandii</i> 、国槐 <i>Sophora japonica</i> 、垂柳 <i>Salix babylonica</i> 、榆树 <i>Ulmus pumila</i>
	海晟名苑(2003) Haisheng Mingyuan (2003)	北京市东城区 Dongcheng District, Beijing	毛泡桐 <i>Paulownia tomentosa</i> 、国槐 <i>Sophora japonica</i> 、合欢 <i>Albizia julibrissin</i> 、垂柳 <i>Salix babylonica</i>
	裕泽园(2004) Yuze Yuan (2004)	北京市海淀区 Haidian District, Beijing	银杏 <i>Ginkgo biloba</i> 、旱柳 <i>Salix matsudana</i> 、白花泡桐 <i>Paulownia fortunei</i> 、臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>
	云会里金雅园(2004) Yunhuili Jinyayuan (2004)	北京市海淀区 Haidian District, Beijing	臭椿 <i>Ailanthus altissima</i> 、白榆 <i>Ulmus pumila</i> 、刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> 、圆柏 <i>Sabina chinensis</i> 、油松 <i>Pinus tabuliformis</i> 、栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i> 、旱柳 <i>Salix matsudana</i>
	大河庄苑(2005) Dahe Zhuangyuan (2005)	北京市海淀区 Haidian District, Beijing	梧桐 <i>Firmiana platanifolia</i> 、美国红栎 <i>Fraxinus pennsylvanica</i> 、国槐 <i>Sophora japonica</i> 、垂柳 <i>Salix babylonica</i> 、白花泡桐 <i>Paulownia fortunei</i>
颐慧佳园(2005) Yihui Jiayuan (2005)	北京市海淀区 Haidian District, Beijing	二球悬铃木 <i>Platanus acerifolia</i> 、一球悬铃木 <i>Platanus occidentalis</i> 、银杏 <i>Ginkgo biloba</i> 、国槐 <i>Sophora japonica</i> 、垂柳 <i>Salix babylonica</i> 、五角枫 <i>Acer pictum</i> subsp. <i>mono</i> 、臭椿 <i>Ailanthus altissima</i> 、梧桐 <i>Firmiana platanifolia</i> 、雪松 <i>Cedrus deodara</i>	
林场 Forest farm	金海湖风景名胜区林场 Forest Farm of Jinhai Lake Scenic Area	北京市平谷区 Pinggu District, Beijing	侧柏 <i>Platycladus orientalis</i> 、油松 <i>Pinus tabuliformis</i>
	九龙山林场 Jiulongshan Forest Farm	北京市门头沟区 Mentougou District, Beijing	侧柏 <i>Platycladus orientalis</i> 、油松 <i>Pinus tabuliformis</i> 、栓皮栎 <i>Quercus variabilis</i> 、华北落叶松 <i>Larix gmelinii</i> var. <i>principis-rupprechtii</i> 、黄栌 <i>Cotinus coggygria</i> 、白蜡树 <i>Fraxinus chinensis</i>

表 2 4 种类型城市森林样地概况

Tab. 2 Main information of sample plots of four types of urban forests

城市森林类型 Type of urban forest	样地数量 Sample plot number	林分密度/(株·hm ⁻²) Stand density/(tree·ha ⁻¹)	胸径 DBH/cm	树高 Tree height/m	冠幅 Crown width/m
城市公园风景游憩林 Scenic-recreational forest of urban park	56	350 ~ 1 367	4.0 ~ 37.9	1.9 ~ 18.0	1.5 ~ 7.3
居住区城市森林 Urban forest of residential area	62	52 ~ 825	14.1 ~ 47.3	6.7 ~ 23.5	3.6 ~ 11.6
郊野公园风景游憩林 Scenic-recreational forest of country park	55	100 ~ 1 250	6.3 ~ 31.9	3.4 ~ 14.1	1.8 ~ 7.7
城郊山地风景林 Scenic forest of suburban mountainous area	55	550 ~ 2 600	7.5 ~ 20.7	6.4 ~ 9.3	2.9 ~ 6.4

表 3 城市森林内景观质量初选、复选评价指标
Tab. 3 Preliminary and final screening indexes of in-forest landscape quality of urban forest

结构类型 Structure type	城市公园风景游憩林 Scenic-recreational forest of urban park		居住区城市森林 Urban forest of residential area		郊野公园风景游憩林 Scenic-recreational forest of country park		城郊山地风景林 Scenic forest of suburban mountainous area		定性指标分解赋值 Component value of qualitative indices				指标含义 Index meaning
	初选 Primary	复选 Final	初选 Primary	复选 Final	初选 Primary	复选 Final	初选 Primary	复选 Final	1	2	3	4	
水平空间 Horizontal space	BAH	√	√	√	√	√	√	√					表示样地林分密度的大小 ^[30] Indicates the stand density of sample plot ^[30] 草地上部分垂直投影的面积占地面的比率 Ratio of vertical projection area of aboveground part of herb to the ground 样地内灌木的水平分布状况 ^[8] Horizontal distribution of shrubs and grasses in sample plot ^[8] 灌木和草地上部分垂直投影的面积占地面的比率 Ratio of vertical projection area of aboveground part of shrubs and herbs to the ground
	CH	√								较均匀 Relatively uniform	均匀 Uniform		
	EDSH	√							不均匀 Nonuniform				
空间结构 Spatial structure	SHC						√						样地内乔木树冠的总投影面积与样地面积的比 Ratio of total projected area of tree crowns in sample plot to the area of sample plot
	CC						√						RBH = 乔木平均活枝下高/平均树高 RBH = average height of first living branch beneath crown/average tree height RSH = 灌木平均高度/平均树高 RSH = average height of shrub/average tree height 指林分垂直方向上生活型层次的数量 ^[18] Refers to the number of life form levels in vertical direction of stand ^[18]
垂直空间 Vertical space	RBH	√	√	√	√	√	√	√					
	RSH						√	√					
SS	√		√	√	√	√	√	√					

表 3(续)
Tab.3 (continued)

结构类型 Structure type	指标 Index	定性指标分解赋值 Component value of qualitative indices								指标含义 Index meaning	
		城市公园风景游憩林 Scenic-recreational forest of urban park		居住区城市森林 Urban forest of residential area		郊野公园风景游憩林 Scenic-recreational forest of country park		城郊山地风景林 Scenic forest of suburban mountainous area			
		初选 Primary	复选 Final	初选 Primary	复选 Final	初选 Primary	复选 Final	初选 Primary	复选 Final		
季相丰富度结构 Seasonal richness structure	SA	√		√	√	√		季相变化小 Little seasonal change	三季赏景 Three scenic seasons	四季赏景 Four scenic seasons	指林分的季相变化丰富度,用该林分可观赏季节数表示 ^[8] Refers to the richness of seasonal changes of stand, expressed by the number of ornamental seasons of stand ^[8]
	OOD	√		√	√	√		较整洁 Relatively neat	较整洁 Relatively neat	十分整洁 Very neat	用林分主要树种观赏器官的种类数表示 It is expressed by the number of ornamental organs of main tree species of stand
视觉结构 Visual structure	CFS	√	√			√	√	杂乱 Messy			反映林分的整洁状况 ^[11] Reflects the cleanliness of forest stand ^[11]
	PD					√			较统一 Relatively unified	较统一 Relatively unified	林分内目光可以通视的距离,目视估测 ^[24] Distance within the stand that the eyes can see through, visual estimation ^[24]
	UDU	√				√		不统一 Not unified	较统一 Relatively unified	统一 Unified	反映林分下层的统一性和变异性特征 ^[12] Reflects unity and variability characteristics of lower layer of the stand ^[12]

注: BAH为单位面积胸高断面面积, CH为草本盖度, EDSH为灌木分布均匀程度, SHC为灌木盖度, CC为郁闭度, RBH为相对枝下高, RSH为相对高度, SS为林分垂直层次数量, DDBH为胸径分化度, DTH为树高分化度, DCB为冠幅分化度, RDH为径高比, RCWD为冠径比, FT为林型, TSR为乔木树种丰富度, SRC为林下物种丰富度, SA为色彩季相多样性, OOD为观赏器官多样性, CFS为林分整洁度, PD为通视距离, UDU为林下植被层统一度。下同。“√”表示该指标被选取。Notes: BAH is breast height basal area per hectare, CH is coverage of herbage, EDSH is evenness degree of shrub-herb, SHC is shrub-herb coverage, CC is canopy coverage, RBH is relative under branch height, RSH is relative shrub height, SS is stand vertical stratum, DDBH is dispersion of DBH, DTH is dispersion of tree height, DCB is dispersion of crown breadth, RDH is ratio of diameter-height, RCWD is ratio of crown width to diameter, FT is forest type, TSR is tree species richness, SRC is species richness under canopy, SA is seasonal abundance, OOD is ornamental organ diversity, CFS is cleanliness of forest stand, PD is perspective distance, UDU is unified degree of undergrowth. The same below. “√” indicates that the index is selected.

各林内景观进行系统聚类,采用平方欧氏距离衡量其差异。用 Topsis 法计算各样地的综合 Topsis 值,统计聚类后各个级别 Topsis 最大和最小值以确定不同级别 Topsis 取值范围,对有取值区域重复的部分采用取中位数方法进行划分。对全部景观样地整体的 Topsis 值排序,以各等级 Topsis 均值大小来定义不同等级景观类型。

3 数据处理

3.1 美景度值的计算及等级划分

参照 Daniel 等^[29]的方法计算林内景观的美景度评判值(SBE 值)。为了便于分析评价指标与美景度之间的关系,采用章志都的等差法^[8]将 SBE 值划分为 5 个级别,分别代表景观质量好、较好、一般、较差、差。

3.2 指标权重确定方法

通过因子分析法确定评价指标权重。因子分析可通过计算数据间的相关性,对变量进行分组,使同组变量共同反映某一特性^[33],首先将所有评价指标通过因子旋转,得到降维后的若干公因子,将各因子所含评价指标的因子得分系数进行归一化处理,可以得到各指标在其对应因子上的权重,以各个公因子的方差贡献率占累计方差贡献率的比例作为该因子本身的权重,最后将这两个权重相乘即得到每个评价指标的最终权重^[34]。

3.3 Topsis 法

Topsis 法是一种多属性决策的重要方法,通过分别计算出评价对象与最优方案和最劣方案间的距离 D_i^+ 与 D_i^- ,可获得该评价对象与最优方案的相对接近程度,以此作为评价优劣的依据^[35]。计算公式为:

$$C_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-) \quad (1)$$

式中: C_i 为 Topsis 值, $C_i \in [0, 1]$, 愈接近 1, 表示越接近最优水平, 反之, 愈接近 0, 表示越接近最劣水平, D_i 为各评价对象与最优方案和最劣方案间的加权欧氏距离。

3.4 图形制作及差异显著性分析

使用 Excel 2016 进行数据的整理计算。采用 SPSS19.0 进行差异显著性分析,其中参数检验方法采用方差分析(差异显著时采用 LSD 法进行多重比较),非参数检验方法采用 Kruskal-Wallis H 检验。

4 结果与分析

4.1 城市森林林内景观质量模型构建

因子分析结果表明,前 3 个公因子(U_1 、 U_2 、 U_3)的累计贡献率为 85.34%,能够代表林分结构的主要信息(表 4)。对各因子所含指标的因子得分进行归

表 4 林内景观指标的因子分析

Tab. 4 Factor analysis of indicators of in-forest landscape

指标 Indicator	旋转成分矩阵 Rotated component matrix			因子得分 Factor score
	1	2	3	
DTH	0.935	-0.109	0.042	0.174
FT	0.931	-0.105	0.040	0.174
TSR	0.930	-0.107	0.042	0.173
OOD	0.918	-0.104	0.033	0.171
RCWD	-0.846	0.379	-0.038	-0.147
SS	-0.204	0.927	0.191	0.193
CC	-0.196	0.920	0.179	0.192
SRC	-0.194	0.900	0.187	0.187
RSH	-0.190	0.829	0.167	0.172
RBH	-0.602	-0.710	0.061	-0.185
DDBH	-0.315	-0.233	-0.853	-0.236
SA	-0.300	-0.220	-0.839	-0.233
BAH	0.084	-0.233	-0.760	-0.213
CFS	-0.511	0.150	0.745	0.215
EDSH	-0.389	-0.537	0.644	0.208
RDH	0.361	-0.596	0.629	0.199
累积因子贡献率 Contribution rate of cumulative factor/%	33.88	29.48	21.97	—

注:黑体数据代表因子旋转矩阵按因素载荷的大小排序后各变量的划分结果。Note: bold data represent the partition results of each variable after the factor rotation matrix being sorted according to the size of factor load.

一化处理,计算其在对应公因子中的权重,由此构建林内景观质量指数公式如下:

$$U_1 = 0.208DTH + 0.207FT + 0.207TSR + 0.204OOD - 0.175RCWD \quad (2)$$

$$U_2 = 0.208SS + 0.207CC + 0.202SRC + 0.185RSH - 0.199RBH \quad (3)$$

$$U_3 = 0.165CFS + 0.160EDSH + 0.153RDH - 0.181DDBH - 0.179SA - 0.163BAH \quad (4)$$

以各公因子的方差贡献率为权重,构建林分结构质量综合指数 U :

$$U = 0.397U_1 + 0.345U_2 + 0.258U_3 \quad (5)$$

4.2 城市森林林内景观质量分级

4.2.1 不同景观等级间美景度、景观质量指数的差异

随着景观等级的降低,城市森林的景观美景度值总体呈线性下降趋势变化,且各等级间差异达极显著水平($P < 0.01$),但不同景观指数在不同景观等级间的变化趋势不尽相同(表 5)。在城市公园风景游憩林景观中,只有 U_1 和 U_2 在各等级间存在显著差异,其中 U_1 只在 II, IV 级间有显著差异; U_2 在 I,

表5 不同等级间美景度、林内景观质量指数的差异显著性分析

Tab. 5 Significance analysis of difference on SBE and in-forest landscape quality indices with different scenic beauty grades

城市森林类型 Type of urban forest	指数 Index	各等级林内景观指数取值(范围) Value and range of in-forest landscape index of each grade				显著性 Significance
		I	II	III	IV	
城市公园风景游憩林 Scenic-recreational forest of urban park	U_1	-0.079ab (-0.119 ~ -0.048)	-0.089b (-0.120 ~ -0.059)	-0.078ab (-0.106 ~ -0.057)	-0.067a (-0.086 ~ -0.053)	0.005
	U_2	-0.105a (-0.174 ~ -0.068)	-0.107a (-0.176 ~ -0.040)	-0.110a (-0.147 ~ -0.064)	-0.139b (-0.199 ~ -0.070)	0.038
	U_3	0.345 (0.268 ~ 0.472)	0.308 (0.178 ~ 0.402)	0.300 (0.155 ~ 0.405)	0.307 (0.165 ~ 0.421)	0.360
	U	0.021 (-0.010 ~ 0.054)	0.007 (-0.038 ~ 0.040)	0.008 (-0.029 ~ 0.037)	0.005 (-0.048 ~ 0.040)	0.175
	SBE	114.16a (99.51 ~ 130.29)	71.08b (43.96 ~ 96.68)	30.73c (15.23 ~ 46.01)	-10.25d (-35.75 ~ 13.28)	< 0.001
居住区城市森林 Urban forest of residential area	U_1	-0.080a (-0.122 ~ -0.047)	-0.080a (-0.101 ~ -0.057)	-0.092ab (-0.138 ~ -0.050)	-0.100b (-0.130 ~ -0.052)	0.023
	U_2	-0.063a (-0.125 ~ -0.032)	-0.080ab (-0.118 ~ -0.052)	-0.078ab (-0.117 ~ -0.041)	-0.092b (-0.143 ~ -0.040)	0.012
	U_3	-0.357c (-0.466 ~ -0.262)	-0.287bc (-0.364 ~ -0.195)	-0.241b (-0.363 ~ -0.160)	-0.154a (-0.212 ~ -0.123)	< 0.001
	U	-0.145c (-0.186 ~ -0.105)	-0.133bc (-0.150 ~ -0.107)	-0.126b (-0.153 ~ -0.090)	-0.111a (-0.134 ~ -0.080)	< 0.001
	SBE	100.26a (80.07 ~ 116.28)	66.63b (59.00 ~ 77.56)	52.89c (42.24 ~ 60.80)	41.90d (34.72 ~ 49.34)	< 0.001
郊野公园风景游憩林 Scenic-recreational forest of country park	U_1	0.591a (0.513 ~ 0.654)	0.559a (0.397 ~ 0.664)	0.490b (0.427 ~ 0.595)	0.290c (0.206 ~ 0.420)	< 0.001
	U_3	0.060 (0.027 ~ 0.082)	0.045 (-0.001 ~ 0.093)	0.043 (-0.010 ~ 0.096)	0.045 (0.030 ~ 0.062)	0.577
	U	0.250a (0.210 ~ 0.273)	0.234a (0.159 ~ 0.276)	0.206b (0.167 ~ 0.261)	0.127c (0.095 ~ 0.180)	< 0.001
	SBE	64.37a (61.51 ~ 66.88)	52.37b (45.46 ~ 58.46)	41.12c (38.73 ~ 44.94)	35.41d (29.61 ~ 43.88)	< 0.001
城郊山地风景林 Scenic forest of suburban mountainous area	U_1	-0.103 (-0.117 ~ -0.092)	-0.105 (-0.137 ~ -0.087)	-0.119 (-0.152 ~ -0.085)	-0.120 (-0.175 ~ -0.085)	0.099
	U_2	0.456b (0.414 ~ 0.492)	0.551a (0.472 ~ 0.656)	0.443b (0.400 ~ 0.469)	0.531a (0.453 ~ 0.651)	< 0.001
	U_3	0.133a (0.110 ~ 0.165)	0.107a (0.055 ~ 0.165)	0.121a (0.055 ~ 0.165)	0.075b (0.055 ~ 0.165)	< 0.001
	U	0.151bc (0.132 ~ 0.161)	0.176a (0.138 ~ 0.206)	0.137c (0.112 ~ 0.151)	0.155b (0.118 ~ 0.220)	< 0.001
	SBE	82.96a (71.09 ~ 95.49)	47.77b (31.38 ~ 68.57)	25.50c (12.12 ~ 34.23)	-7.76d (-41.73 ~ 8.61)	< 0.001

注: SBE代表美景度值。不同小写字母表示不同美景度等级之间差异显著。下同。Notes: SBE represents scenic beauty value. Different lowercase letters indicate significant differences among SBE classes. The same below.

II, III与IV级间存在显著差异。居住区城市森林景观中, U_1 只在I, II与IV级间存在显著差异, 但I, II级间差异不显著; U_2 只在I, IV级间存在显著差异; 除II与I, II与III级外, U_3 和 U 的其余各等级间差异均显著。而郊野公园风景游憩林除I与II级外, U_1 和 U 在其余各等级间差异均显著; U_3 在各景观等级间无显著差异。在城郊山地风景林景观中, U_1 在各景观等级间无显著差异; U_2 在I, III与II, IV级间差异显著, 但I, III级间、II, IV级间差异不显著; U_3 在I, II, III与IV级间存在显著差异, 但I, II, III级之间差异不显著; 除I与III, I与IV级外, U 的其余各等级间差异均显著。

4.2.2 不同景观等级间评价指标的差异

除灌草分布均匀程度外, 其余评价指标在不同

景观等级之间均存在显著差异(表6)。多重比较结果表明, 胸径分化度和观赏器官多样性只在I、II、III与IV级间存在显著差异, 但I、II、III级之间差异不显著; 色彩季相多样性仅在I与IV级间存在显著差异; 树高分化度和林分垂直层次数量只在II与III、IV级间存在显著差异, 但III、IV级间差异不显著; 乔木树种丰富度在I、II与III、IV级间存在显著差异, 但I与II级、III与IV级间差异不显著; 林型只在II、III与IV级间存在显著差异, 但II与III级间差异不显著; 郁闭度只在I与IV级、II与III级、III与IV级间存在显著差异; 灌木相对高度只在I、II与IV级间存在显著差异, 但I与II级间差异不显著; 林下物种丰富度只在II与I、III、IV级间存在显著差异, 但I、III、IV级之间差异不显著。

表 6 不同等级间林内景观质量评价指标的差异显著性分析

Tab. 6 Significance analysis of difference on in-forest landscape quality evaluation indices with different classes

城市森林类型 Type of urban forest	指标 Indicator	各等级林内景观质量评价指标取值(范围) Value of in-forest landscape indicator of each grade (range)				显著性 Significance
		I	II	III	IV	
城市公园风景游憩林 Scenic-recreational forest of urban park	RBH	0.32b (0.21 ~ 0.53)	0.33b (0.12 ~ 0.53)	0.33b (0.19 ~ 0.45)	0.42a (0.21 ~ 0.60)	0.038
	RDH	0.020bc (0.011 ~ 0.038)	0.018c (0.012 ~ 0.026)	0.024ab (0.012 ~ 0.036)	0.026a (0.014 ~ 0.039)	0.014
	RCWD	26.01ab (15.89 ~ 39.04)	29.28a (19.46 ~ 39.42)	25.54ab (18.67 ~ 34.64)	21.88b (17.48 ~ 28.08)	0.005
	EDSH	2.25 (1.00 ~ 3.00)	2.10 (1.00 ~ 3.00)	1.92 (1.00 ~ 3.00)	1.73 (1.00 ~ 3.00)	0.426
	CFS	2.67a (2.00 ~ 3.00)	2.29ab (1.00 ~ 3.00)	1.92b (1.00 ~ 3.00)	2.09b (1.00 ~ 3.00)	0.047
居住区城市森林 Urban forest of residential area	BAH	36.66a (19.88 ~ 47.90)	17.60b (9.56 ~ 26.95)	10.17c (2.81 ~ 17.40)	7.10c (0.98 ~ 11.57)	< 0.001
	DDBH	0.21a (0.09 ~ 0.34)	0.25a (0.12 ~ 0.35)	0.23a (0.10 ~ 0.38)	0.14b (0.07 ~ 0.28)	< 0.001
	RBH	0.19b (0.10 ~ 0.38)	0.24ab (0.16 ~ 0.36)	0.24ab (0.13 ~ 0.36)	0.28a (0.12 ~ 0.43)	0.012
	RCWD	26.34b (15.26 ~ 39.95)	26.33b (18.61 ~ 32.98)	30.20ab (16.49 ~ 45.12)	32.78a (17.08 ~ 42.53)	0.023
	SA	3.18a (2.00 ~ 4.00)	2.83ab (2.00 ~ 4.00)	2.52ab (1.00 ~ 4.00)	2.06b (2.00 ~ 3.00)	0.005
郊野公园风景游憩林 Scenic-recreational forest of country park	BAH	9.52a (4.66 ~ 14.71)	8.27a (1.58 ~ 16.37)	5.61ab (2.32 ~ 14.52)	4.76b (1.92 ~ 10.46)	0.022
	DTH	0.35ab (0.16 ~ 0.50)	0.33a (0.11 ~ 0.55)	0.24b (0.16 ~ 0.37)	0.25b (0.09 ~ 0.41)	0.034
	RDH	0.024a (0.016 ~ 0.030)	0.019ab (0.010 ~ 0.030)	0.016b (0.010 ~ 0.027)	0.016b (0.012 ~ 0.025)	0.020
	TSR	6.20a (4.00 ~ 9.00)	3.95a (2.00 ~ 6.00)	2.60b (2.00 ~ 3.00)	2.50b (2.00 ~ 4.00)	< 0.001
	OOD	2.80a (2.00 ~ 4.00)	3.23a (1.00 ~ 4.00)	2.70a (2.00 ~ 4.00)	1.17b (1.00 ~ 3.00)	< 0.001
城郊山地风景林 Scenic forest of suburban mountainous area	FT	3.40ab (3.00 ~ 4.00)	3.45a (1.00 ~ 4.00)	3.90a (3.00 ~ 4.00)	1.50b (1.00 ~ 4.00)	< 0.001
	CC	0.46bc (0.36 ~ 0.58)	0.54ab (0.27 ~ 0.73)	0.41c (0.30 ~ 0.58)	0.60a (0.30 ~ 0.83)	0.003
	RSH	0.08b (0.03 ~ 0.18)	0.11b (0.04 ~ 0.28)	0.13ab (0.03 ~ 0.23)	0.16a (0.06 ~ 0.26)	0.034
	RCWD	33.89 (30.30 ~ 38.24)	34.54 (28.50 ~ 45.10)	38.93 (27.89 ~ 50.00)	39.28 (27.91 ~ 57.33)	0.086
	SS	2.71ab (2.00 ~ 3.00)	2.94a (2.00 ~ 3.00)	2.40b (2.00 ~ 3.00)	2.50b (2.00 ~ 3.00)	0.015
	SRC	8.14b (7.00 ~ 10.00)	11.38a (8.00 ~ 16.00)	7.20b (3.00 ~ 10.00)	8.36b (5.00 ~ 15.00)	0.001
	CFS	2.43a (2.00 ~ 3.00)	1.94a (1.00 ~ 3.00)	2.20a (1.00 ~ 3.00)	1.36b (1.00 ~ 3.00)	< 0.001

相对枝下高、冠径比、径高比、林分整洁度、单位面积胸高断面等指标在不同类型的城市森林中表现出不同的差异显著性。在城市公园风景游憩林中, 相对枝下高只在 I、II、III 与 IV 级间存在显著差异, 但 I、II、III 级之间差异不显著; 径高比只在 I 与 IV 级和 II 与 III、IV 级间存在显著差异; 冠径比只在 II 与 IV 级间存在显著差异; 林分整洁度只在 I 与 III、IV 级间存在显著差异, 但 III 与 IV 级间差异不显著。在居住区城市森林中, 相对枝下高仅在 I 与 IV 级间存在显著差异; 冠径比仅在 I、II 与 IV 级间存在显著差异, 但 I 与 II 级间差异不显著; 单位面积胸高断面面积只在 I、II 与 III、IV 级间存在显著差异, 但 III 与 IV 级间差异不显著。在郊野公园风景游憩林中, 径高比仅在 I 与 III、IV 级间存在显著差异, 但 III 与 IV 级间差异不显著; 单位面积胸高断面面积只在 I、II 与 IV 级间存在显著差异, 但 I 与 II 级间差异不显著。在城郊山地风景林中, 林分整洁度在 I、II、III 与 IV 级间存在显著差异, 但 I、II、III 级之间差异不显

著; 冠径比在各景观等级间无显著差异。

4.2.3 城市森林林内景观质量等级划分

根据不同类型城市森林林内景观的 Topsis 均值(表 7)来定义其景观等级, 不同等级景观特点的描述如下。

(1) 城市公园风景游憩林: I 级: 相对枝下高最小, 径高比较小, 冠径比较大, 林分整洁度最高; II 级: 相对枝下高较上一级略大, 径高比最小, 冠径比最大, 林分整洁度较高; III 级: 径高比较 I 级大, 冠径比较 I 级小, 林分整洁度较上一级低; IV 级: 相对枝下高和径高比最大, 冠径比最小, 林分整洁度较低。

(2) 居住区城市森林: I 级: 单位面积胸高断面面积最大, 相对枝下高最小, 冠径比较小, 季相变化最丰富; II 级: 单位面积胸高断面面积较上一级小, 胸径分化度最大, 相对枝下高较上一级大, 冠径比最小, 季相多样性较高; III 级: 单位面积胸高断面面积和胸径分化度较上一级小, 冠径比较上一级大, 季相多样性

表7 城市森林林内景观等级 TOPSIS 得分 (范围)

Tab. 7 TOPSIS values of different grades of in-forest landscape of urban forests (range) with different SBE grades

等级代码 Grade code	定义 Definition	城市公园风景游憩林 Scenic-recreational forest of urban park	居住区城市森林 Urban forest of residential area	郊野公园风景游憩林 Scenic-recreational forest of country park	城郊山地风景林 Scenic forest of suburban mountainous area
I	优质景观 Excellent landscape	0.803 (0.703 ~ 0.920)	0.797 (0.548 ~ 0.960)	0.832 (0.726 ~ 0.891)	0.709 (0.566 ~ 0.894)
II	高质景观 High quality landscape	0.627 (0.493 ~ 0.703)	0.403 (0.322 ~ 0.548)	0.623 (0.495 ~ 0.726)	0.542 (0.522 ~ 0.566)
III	中等景观 Medium landscape	0.435 (0.342 ~ 0.493)	0.244 (0.159 ~ 0.322)	0.420 (0.361 ~ 0.495)	0.462 (0.213 ~ 0.522)
IV	低质景观 Low quality landscape	0.224 (0.057 ~ 0.342)	0.110 (0.043 ~ 0.159)	0.254 (0.165 ~ 0.361)	0.146 (0.094 ~ 0.213)

较上一级低; IV级: 单位面积胸高断面面积和胸径分化度最小, 相对枝下高最大, 冠径比最大, 季相变化较单一。

(3) 郊野公园风景游憩林: I级: 单位面积胸高断面面积、树高分化度和径高比最大, 乔木树种种类最多, 观赏器官较多样, 多为混交林; II级: 单位面积胸高断面面积和树高分化度较上一级小, 径高比较上一级小, 乔木树种较丰富, 观赏器官多样性最高, 多为混交林; III级: 单位面积胸高断面面积较上一级小, 树高分化度和径高比最小, 乔木树种种类较少, 多为混交林; IV级: 单位面积胸高断面面积和径高比最小, 树高分化度较上一级略大, 乔木树种种类最少, 观赏器官和林型较单一。

(4) 城郊山地风景林: I级: 郁闭度适中, 灌木相对高度最低, 林分垂直层次和林下物种较丰富, 林分整洁度最高; II级: 灌木相对高度较上一级高, 林分垂直层次最丰富, 林下物种种类最多; III级: 郁闭度最低, 灌木相对高度较上一级高, 林分垂直层次最少, 林下物种种类最少; IV级: 郁闭度最高, 灌木相对高度最高, 林分垂直层次较少, 林分整洁度最低。

5 结论与讨论

在筛选出的 16 个城市森林质量评价指标中, 除灌草分布均匀程度外, 其余指标在不同质量等级间差异均达显著或极显著水平, 所以将其余的 15 个指标作为最终的评价指标用于城市森林林内景观质量评价, 采取该指标体系具有较好的级别间区分度。乔木树种丰富度、林下物种丰富度、林型、林分整洁度、胸径分化度、郁闭度、观赏器官多样性、色彩季相多样性、单位面积胸高断面面积、冠径比等指标在景观质量等级间差异极显著, 为核心指标。城市森林林内景观的影响因素复杂, 许多学者^[6,14,20,32]将平均胸径、平均树高、林下植被高度等表示林木大小的绝对测度指标用于构建美景度评价模型、景观质量评价体系等, 本研究选取表示林木大小的相对测度指标

并使用多种方法对评价指标进行筛选, 避免了可能因树种不同而对评价结果造成的影响。不同景观要素对林内景观美景度的影响不同, 各指标并非都随质量等级的提高或降低而单调递增或递减, 而是呈现出较复杂的变化趋势, 它们与林内美学质量的关系是非线性的, 且有的指标的变化趋势因城市森林类型而异。

在一定范围内, 树种组成越丰富, 季相越富于变化^[18], 林分的观赏价值越大, 美景度等级越高^[15,36]。适度混交可以提高林分美景度^[37-38], 高质量等级的景观大多以混交林为主。林分整洁度高的林分其质量等级也高, 表明人们更偏爱林下干净整洁的林分。丰富的观赏器官可提高林分的观赏特性。相对枝下高可以反映林下空间的大小, 一般情况下乔木平均枝下高越高, 林内通视性越好, 美景度越高^[6,39-40], 但也有研究表明, 平均枝下高与林分美景度呈先增加后下降的非线性变化趋势^[41]。本研究结果表明, 对城市公园风景游憩林, 相对枝下高为 0.32 的林分质量等级最高, 对居住区城市森林, 相对枝下高为 0.19 的林分质量等级最高。下木与林分美景度的关系较复杂, 过密集和过高的灌木层由于降低了林分的通透性而使美景度降低^[6,20,36], 同时较高的林下植被降低了林分的可及性, 但配置一定的林下物种例如观赏灌木、花草等, 可提高林下的观赏性, 但种类不宜过多。单位面积胸高断面面积是表示林分密度大小的指标, 一般来说, 密度与美景度呈非线性的二次函数关系^[36], 过低或过高的林分密度都会对美景度产生负面效应, 林分密度过低会失去景观林美化环境的效果^[18], 过高会引起林内同类色彩斑块大面积相连, 使人产生一种压抑感^[42]。对居住区城市森林和郊野公园风景游憩林, 人们更偏爱密度较大的景观, 其最佳密度还有待进一步研究。乔木的郁闭度影响林内的光线分布, 它与美景度的关系是非线性的, 郁闭度过高或过低的林分其景观等级都较低, 适宜的光线能使林内景观产生色彩斑斓的效果, 给

人美的享受^[25,39]。树高分化度和林分垂直层次数量反映了林分垂直空间的层次性,树高分化度大,林分垂直层次数量多的林分景观等级都较高,表明多层次的垂直层次结构有益于提升林分美学质量。胸径分化度反映了林分水平空间结构的多样性,适宜的胸径分化度有助于提升居住区城市森林林内景观美景度,不宜过大或过小。

冠径比与径高比在不同类型城市森林中随景观等级的变化趋势不同。冠径比是判断树冠大小的重要指标,可表示树木利用空间的优劣程度^[43],它与美景度的关系鲜有报道。在居住区城市森林和城郊山地风景林中,冠径比越大的林分其景观等级越低,在城市公园风景游憩林中则不同,冠径比过大或过小的林分其景观等级都不是最高。径高比可以表示树体协调比例,有研究表明它与单木美景度的关系呈曲线变化^[4],在山区的侧柏林^[24]及郊区的郊野公园风景游憩林中,径高比随美景度等级的降低而减小,而在城市公园风景游憩林中人们更偏好径高比相对较小的林分。

根据分级结果,总体上看,树种组成丰富、适度混交、林内环境整洁、胸径分化度和郁闭度都适宜的林分和观赏器官较多样、季相富于变化的景观更受人们的喜爱,不同类型的城市森林其林分密度和冠径比的最优范围不同。因此在城市森林的经营过程中,建议适当丰富林木树种种类,注重彩色植物和多季相树种的配置,适当调整林分密度,及时修枝、割灌,清除林下枯落物和生活垃圾,保持林分整洁,并根据不同城市森林类型适时给予不同的经营管理措施以提高其景观质量。

参 考 文 献

- [1] 李锋,王如松, Juergen Paulussen. 北京市绿色空间生态概念规划研究[J]. 城市规划汇刊, 2004(4): 61-64.
Li F, Wang R S, Paulussen J. A study on ecological concept planning of urban green space in Beijing[J]. Urban Planning Forum, 2004(4): 61-64.
- [2] 黄广远. 北京市城区城市森林结构及景观美学评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
Huang G Y. Studies on species composition and landscape aesthetics evaluation of urban forest in Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
- [3] 陈瑜,徐程扬,李乐,等. 阔叶红松风景林单木景观质量评价与模型研究[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(5): 87-93.
Chen Y, Xu C Y, Li L, et al. Assessment and model research on scenic forest individual tree landscape quality in broadleaved and Korean pine mixed forests[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(5): 87-93.
- [4] 毛斌,徐程扬,李乐,等. 人工油松风景林的林木分级技术[J]. 林业科学, 2014, 50(10): 49-58.
Mao B, Xu C Y, Li L, et al. Tree classification for *Pinus tabulaeformis* scenic plantation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(10): 49-58.
- [5] 周阳超,王瑞辉,周璞,等. 湘东常绿阔叶林内景观质量评价与分析[J]. 林业资源管理, 2019(3): 163-168.
Zhou Y C, Wang R H, Zhou P, et al. Landscape quality evaluation and analysis of evergreen broad-leaved forest in eastern Hunan[J]. Forest Resources Management, 2019(3): 163-168.
- [6] 陈勇,孙冰,廖绍波,等. 深圳市城市森林林内景观的美景度评价[J]. 林业科学, 2014, 50(8): 39-44.
Chen Y, Sun B, Liao S B, et al. Scenic beauty estimation of in-forest landscapes in Shenzhen urban forests[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(8): 39-44.
- [7] 武锋,郑松发,陆钊华. 珠海淇澳岛红树林景观质量评价[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(9): 48-51.
Wu F, Zheng S F, Lu Z H. Evaluation of mangrove landscape quality on Qi'ao Island, Zhuhai[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(9): 48-51.
- [8] 章志都. 京郊低山风景游憩林质量评价及调控关键技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
Zhang Z D. Quality assessing and key adjusting technologies for scenic-recreational forests in the lower mountains of suburbs in Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [9] 李波. 北京西山风景林中、远景景观质量评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
Li B. Assessment on scenic forest quality in West Mountain in Beijing on middle- and far-distance landscape[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.
- [10] 樊瑾. 北京西山典型风景游憩林质量调查及景观评价研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
Fan J. Quality investigation and landscape evaluation of typical landscape forest in West Mountain of Beijing[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [11] 刘畅. 游憩型城镇景观林质量评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
Liu C. Study on quality assessment of recreational landscape forest in urban and suburban area[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [12] 段敏杰,王月容,谢军飞,等. 基于美景度评价法的北京城市公园植物景观美学质量评价[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(26): 45-52.
Duan M J, Wang Y R, Xie J F, et al. Scenic beauty estimation of Beijing urban park plant landscape by scenic beauty estimation method[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(26): 45-52.
- [13] 赵越. 森林公园景观美学质量评价研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
Zhao Y. Research on estimation of landscape aesthetics for forest park[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [14] 王娜,钟永德,黎森. 基于 SBE 法的城郊森林公园森林林内景观美学质量评价[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(1): 308-314.
Wang N, Zhong Y D, Li S. SBE based evaluation of in-forest

- landscape aesthetic quality of forest park in suburb[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(1): 308-314.
- [15] Qi T, Zhang G, Wang Y, et al. Research on landscape quality of country parks in Beijing as based on visual and audible senses[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2017, 26: 124-138.
- [16] 章志都, 徐程扬, 龚岚, 等. 基于 SBE 法的北京市郊野公园绿地结构质量评价技术[J]. 林业科学, 2011, 47(8): 53-59.
- Zhang Z D, Xu C Y, Gong L, et al. Assessment on structural quality of landscapes in green space of Beijing suburban parks by SBE method[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(8): 53-59.
- [17] 姚淑华. 广西医学类院校校园景观调查与评价[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- Yao S H. Investigation and research on campus landscape of Guangxi medical colleges[D]. Nanning: Guangxi University, 2019.
- [18] 孙姝亭, 陈美谕, 李莘, 等. 北京市居民小区景观林内景观质量评价研究[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(5): 297-305.
- Sun S T, Chen M Y, Li P, et al. Assessment on in-forest quality of landscape forest in residential area in Beijing[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(5): 297-305.
- [19] 殷明, 肖威, 纪易凡, 等. 高速公路生态景观质量评价指标体系和评价方法: 以江苏南通为例[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 4128-4134.
- Yin M, Xiao W, Ji Y F, et al. Index system and method for the evaluation of highway ecological landscape quality: a case study of Nantong City, Jiangsu Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(12): 4128-4134.
- [20] 梁爽, 张洁, 戚继忠, 等. 次生林为主的自然风景林内景观质量评价[J]. 南京林业大学学报, 2015, 39(6): 119-124.
- Liang S, Zhang J, Qi J Z, et al. The forest landscape quality evaluation of the natural scenic beauty mainly made of secondary forest[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2015, 39(6): 119-124.
- [21] 刘畅, 刘亚, 刘海轩, 等. 游憩型城镇景观林内景观斑块类型特征研究[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(4): 305-311.
- Liu C, Liu Y, Liu H X, et al. Characteristics of in-forest landscape patch types of recreational landscape forest in urban and suburban area[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(4): 305-311.
- [22] 赵凯, 李金航, 徐程扬. 侧柏人工林分结构与色彩斑块间的耦合关系[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(1): 82-91.
- Zhao K, Li J H, Xu C Y. Coupling relationship between stand structure and color patch of *Platyclusus orientalis* plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(1): 82-91.
- [23] 史琛媛, 路亚星, 刘佳, 等. 抚育间伐对冀北山地华北落叶松生态景观林内美景度的影响[J]. 河北农业大学学报, 2016, 39(3): 66-72.
- Shi C Y, Lu Y X, Liu J, et al. Effects of thinning on in-stand scenic beauty of *Larix principis-rupprechtii* Mayr. ecological landscape forest in the mountainous area of northern Hebei Province[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2016, 39(3): 66-72.
- [24] 赵凯, 李金航, 刘海轩, 等. 北京山区侧柏人工林内景观质量分级技术[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(3): 557-564.
- Zhao K, Li J H, Liu H X, et al. Landscape quality grading technology for *Platyclusus orientalis* plantations in Beijing mountainous areas[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2019, 36(3): 557-564.
- [25] 艾婧文, 刘健, 余坤勇, 等. 群落特征和林分空间结构对森林公园景观美学质量贡献率及影响因子[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(6): 1087-1094.
- Ai J W, Liu J, Yu K Y, et al. Research on contribution rate of plant community characteristics and stand spatial structure to landscape aesthetics quality of forest parks and its influencing factors[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2017, 34(6): 1087-1094.
- [26] 闫笑. 北京城区公园森林景观美景度评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- Yan X. Scenic evaluation of forest landscape in parks in Beijing urban area[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [27] 龚岚. 北京城区典型城市森林结构特点分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- Gong L. Analysis of characteristics of typical urban forest structure in urbanized district of Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
- [28] 庄乾达. 浙江省森林城市综合评价指标体系构建及其实证研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2016.
- Zhuang Q D. Research on establishment and empirical analysis of comprehensive evaluation index system of forest city in Zhejiang Province[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2016.
- [29] Daniel T C, Boster R S. Measuring landscape aesthetics: the scenic beauty estimation method (USDA Forest Service Research Paper RM-167)[R]. Fort Collins: Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, 1976.
- [30] 李建, 李晓宇, 曹静, 等. 长白山次生针阔混交林群落结构特征及动态[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1-12.
- Li J, Li X Y, Cao J, et al. Community structure and dynamics of secondary coniferous and broad-leaved mixed forest in Changbai Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1-12.
- [31] 张喜, 霍达, 向凯旋, 等. 样地面积对黔中喀斯特石漠灌丛林植物多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(5): 1305-1313.
- Zhang X, Huo D, Xiang K X, et al. The effect of plot size on shrub plant diversity in a karst desertification area, central Guizhou Province, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(5): 1305-1313.
- [32] 陈鑫峰, 贾黎明. 京西山区森林林内景观评价研究[J]. 林业科学, 2003, 39(4): 59-66.
- Chen X F, Jia L M. Research on evaluation of in-forest landscapes in west Beijing mountain area[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(4): 59-66.
- [33] 莫可, 赵天忠, 蓝海洋, 等. 基于因子分析的小班尺度用材森林质量评价: 以福建将乐国有林场为例[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(1): 48-54.
- Mo K, Zhao T Z, Lan H Y, et al. Quality assessment at

- subcompartment level of forests used for timber production based on factor analysis: a case study in Jiangle National Forest Farm, Fujian Province[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2015, 37(1): 48–54.
- [34] 刘邦奇, 李鑫. 基于智慧课堂的教育大数据分析与应用研究[J]. *远程教育杂志*, 2018, 36(3): 84–93.
- Liu B Q, Li X. Research on analysis and application of educational big data based on smart class[J]. *Journal of Distance Education*, 2018, 36(3): 84–93.
- [35] 杨威, 庞永锋, 史加荣. 不完全权重信息的区间直觉模糊不确定语言 TOPSIS 方法[J]. *模糊系统与数学*, 2015, 29(2): 125–131.
- Yang W, Pang Y F, Shi J R. New interval-valued intuitionistic fuzzy uncertain linguistic TOPSIS with partly known attribute weight information[J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2015, 29(2): 125–131.
- [36] 张荣, 翟明普, 阎海平. 国内外风景游憩林抚育研究进展[J]. *北京林业大学学报*, 2004, 26(2): 109–113.
- Zhang R, Zhai M P, Yan H P. Advances of scenic recreational forest tending at home and abroad[J]. *Beijing Forestry University*, 2004, 26(2): 109–113.
- [37] Kellom S S. Forest stand preferences of recreationists[J]. *Acta Forestalia Fennica*, 1975, 146: 1–36.
- [38] Staffebach E. A new foundation for forest aesthetics[J]. *Allgemeine Forstzeitschrift*, 1984, 39: 1179–1181.
- [39] 杨鑫霞, 亢新刚, 杜志, 等. 基于 SBE 法的长白山森林景观美学评价[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(6): 86–90, 98.
- Yang X X, Kang X G, Du Z, et al. SBE method-based forest landscape aesthetic quality evaluation of Changbai Mountain[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2012, 40(6): 86–90, 98.
- [40] 梅光义, 孙玉军. 基于 SBE 法的杉木风景游憩林的评价及经营技术[J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(8): 28–32.
- Mei G Y, Sun Y J. Evaluation and management techniques of scenic recreational forest of *Cunninghamia lanceolata* based on SBE[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2012, 32(8): 28–32.
- [41] 史琛媛, 张志伟, 魏浩亮, 等. 冀北山地不同疏伐密度下油松风景林美景度的研究[J]. *河北林果研究*, 2015, 30(4): 335–339.
- Shi C Y, Zhang Z W, Wei H L, et al. Study of the scenic beauty values of *Pinus tabulaeformis* under different thinning intensity in the northern mountain region of Hebei Province[J]. *Forestry and Ecological Sciences*, 2015, 30(4): 335–339.
- [42] 李苹, 毛斌, 许丽娟, 等. 密度、灌草盖度和树干形态对油松人工风景林内景观指数的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2018, 40(10): 115–122.
- Li P, Mao B, Xu L J, et al. Effects of density, shrub-herb coverage and trunk shape on the in-forest patch index of planted *Pinus tabuliformis* forests[J]. *Beijing Forestry University*, 2018, 40(10): 115–122.
- [43] 陈青法, 方灵兰. 简明林业辞典 [M]. 兰州: 甘肃人民出版社, 1981.
- Chen Q F, Fang L L. Concise forestry dictionary[M]. Lanzhou: Gansu People's Publishing House, 1981.

(责任编辑 范娟 崔艳红
责任编辑 臧润国)