北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

林分结构与视觉形态性状的耦合关系

南晓凡 马冰倩 薛永鑫 于森 徐程扬 金莹杉 金桂香

Coupling relationship between stand structure and visually morphological traits: a case study on scenic recreational forest in shallow mountain area of Beijing

Nan Xiaofan, Ma Bingqian, Xue Yongxin, Yu Miao, Xu Chengyang, Jin Yingshan, Jin Guixiang

引用本文:
南晓凡, 马冰倩, 薛永鑫, 于森, 徐程扬, 金莹杉, 金桂香. 林分结构与视觉形态性状的耦合关系[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(7):30–40. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240178
Nan Xiaofan, Ma Bingqian, Xue Yongxin, Yu Miao, Xu Chengyang, Jin Yingshan, Jin Guixiang. Coupling relationship between stand structure and visually morphological traits: a case study on scenic recreational forest in shallow mountain area of Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(7):30–40. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240178

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240178

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

京津冀地区生态基础设施生境质量产业发展耦合协调性分析与预测

Coupling coordination and prediction analysis of ecological infrastructure, habitat quality and industrial development in the Beijing–Tianjin–Hebei region of northern China

北京林业大学学报, 2021, 43(3): 96–105. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200346

城市森林林内景观质量定量通用判别技术研究

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

北京林业大学学报, 2020, 42(12): 9–23. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200064

上海大都市圈城镇化与生态环境耦合协调关系

Coupling and coordination relationship between urbanization and eco–environment in Shanghai metropolitan area: empirical analysis based on panel data from 2011 to 2020

北京林业大学学报, 2024, 46(7): 101–111. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230216

中国森林碳汇与林业经济发展耦合及长期变化特征分析

Coupling and long–term change characteristics analysis of forest carbon sequestration and forestry economic development in China

北京林业大学学报, 2022, 44(10): 129–141. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220257

长白山主要林分物种多度分布与性状分布的关系

Relationship between species abundance distribution and trait distribution in main forest stand of Changbai Mountain, northeastern China

北京林业大学学报, 2024, 46(8): 47–56. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230050

北京百花山落叶阔叶林群落内木本植物的叶片功能性状变异特征

Variation characteristics in leaf functional traits of woody plants in deciduous broadleaved forest community in Baihua Mountain of Beijing

北京林业大学学报, 2024, 46(4): 40–51. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220462

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240178

林分结构与视觉形态性状的耦合关系
——以北京市浅山区风景游憩林为例

南晓凡[1] 马冰倩[1] 薛永鑫[1] 于 淼[1] 徐程扬[1] 金莹杉[2] 金桂香[3]
（1. 北京林业大学城市林业研究中心，森林培育与保护教育部重点实验室，北京 100083；2. 北京市园林绿化科学研究院，北京 100102；
3. 吉林省林业科学研究院，吉林 长春 130031）

摘要:【目的】探索林分结构与视觉形态性状之间的耦合关系，揭示风景游憩林林内景观质量的形成机制，为提升风景游憩林质量的技术创新提供依据。**【方法】**以北京市浅山区风景游憩林为研究对象，通过相关性分析、主成分分析等方法，研究林分结构与视觉形态对林内景观美景度的影响；通过偏最小二乘路径模型分析、耦合度分析等方法，分析林分结构与视觉形态性状之间的耦合关系。**【结果】**(1)各林分结构指标均对林内景观质量有显著影响($p < 0.05$)，并可提取出林木大小(I_{TS})与林分水平覆盖(I_{HC})两个主成分，其中林木大小指数对景观美景度产生正向的综合影响，林分水平覆盖指数对景观美景度值产生负向综合影响。(2)林分结构通过影响林木干冠形态、创造林下游憩空间、丰富林内景观多样性等方式影响视觉形态性状。其中，I_{TS} 与视觉形态性状之间呈现积极的相互促进作用，而 I_{HC} 则与视觉形态性状呈现相互拮抗作用。(3)林分结构性状与视觉形态性状之间高度耦合且相互协调，耦合度范围为 0.81 ~ 0.99，耦合协调度范围为 0.58 ~ 0.89。景观美景度呈现随耦合协调度的上升而上升的趋势，两者协调程度较高的风景游憩林视觉质量较优。**【结论】**林分结构性状和林内视觉形态性状均对风景游憩林林内景观质量产生显著影响，并且林分结构性状变化能够很好地反映视觉形态性状的变化。因此，通过优化林分结构可显著提高景观视觉质量。

关键词：风景游憩林；林内景观；林分结构性状；视觉形态性状；耦合度；耦合协调度
中图分类号：S731.2 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)07−0030−11
引文格式：南晓凡，马冰倩，薛永鑫，等. 林分结构与视觉形态性状的耦合关系——以北京市浅山区风景游憩林为例［J］. 北京林业大学学报，2025，47(7)：30−40. Nan Xiaofan, Ma Bingqian, Xue Yongxin, et al. Coupling relationship between stand structure and visually morphological traits: a case study on scenic recreational forest in shallow mountain area of Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(7): 30−40.

Coupling relationship between stand structure and visually morphological traits: a case study on scenic recreational forest in shallow mountain area of Beijing

Nan Xiaofan[1] Ma Bingqian[1] Xue Yongxin[1] Yu Miao[1] Xu Chengyang[1]
Jin Yingshan[2] Jin Guixiang[3]
(1. Research Center for Urban Forestry of Beijing Forestry University, Key Laboratory for Silviculture and Forest Ecosystem in Arid and Semi-arid area of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100083, China;
2. Beijing Academy of Forestry and Landscape Architecture, Beijing 100102, China;
3. Jilin Provincial Academy of Forestry Science, Beijing 130031, China)

Abstract: ［**Objective**］ This paper investigates the coupling relationship between stand structure and visually morphological traits to reveal the formation mechanism of scenic quality within recreational forests

收稿日期: 2024−06−04 **修回日期:** 2024−06−16
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(BLX202101)，国家自然科学基金项目(32371794)。
第一作者: 南晓凡。主要研究方向：城市森林生态系统服务评价理论与技术。Email：bjfnanxiaofan@163.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: 马冰倩，博士，讲师。主要研究方向：城市林业、景观质量评价。Email：mbqbjfu@bjfu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

and provide a basis for technological innovation, aiming at improving landscape quality. [**Method**] This study selected the scenic and recreational forests in hilly area of Beijing as research subjects, using correlation and principal component analyses to explore how stand structure and visual morphology affect landscape beauty. It also employed partial least squares path modeling and coupling analysis to study their relationship. [**Result**] (1) All stand structural indicators significantly influenced landscape quality within the forest ($p < 0.05$), and two principal components, namely tree size index (I_{TS}) and horizontal coverage index (I_{HC}), can be extracted. Tree size (I_{TS}) had a positive overall impact on landscape beauty, whereas horizontal coverage (I_{HC}) had a negative impact. (2) Stand structure influenced visual morphological traits by modifying tree crown shapes, creating recreational spaces under the canopy, and enhancing landscape diversity. Specifically, I_{HC} positively influenced visual morphological traits, while I_{HC} had an antagonistic effect on them. (3) Stand structural traits were highly coupled and well-coordinated with visual morphological traits, with a coupling degree of 0.81 to 0.99, and a coupling coordination degree of 0.58 to 0.89. The scenic beauty estimate (E_{SB}) increased with better coupling coordination, suggesting that recreational forests with higher coordination levels exhibited superior visual quality. [**Conclusion**] Both stand structure traits and visual morphological traits have a significant impact on in-forest landscape quality of recreational forests. Changes in stand structure traits could effectively reflect changes in visual morphology traits. Therefore, optimizing stand structure could significantly effectively improve landscape visual quality.

Key words: scenic and recreational forest; in-forest landscape; stand structural traits; visually morphological traits; coupling degree; coupling coordination degree

风景游憩林是指具备适合开展森林游憩活动的自然条件和相应的人工设施，旨在满足人们观赏游憩需求的森林。作为森林资源的重要组成部分[1]，风景游憩林具有调节气候、保持水土、增加碳汇等生态功能[2]，同时还能为城市居民提供亲近自然、放松身心的场所，在提升城市居民幸福感中发挥着不可替代的作用[3]。自 1982 年我国建立第一个国家森林公园——张家界国家森林公园以来，风景游憩林的建设逐渐得到经营单位的重视，许多城市开始把风景游憩林作为“有生命的”城市基础设施来建设[4]。然而，我国大部分城郊风景游憩林是在林场的用材林、防护林等基础上改造而成的[5]，普遍存在林分结构不合理、碳汇能力不足、景观视觉质量较低等问题[6]。尽管目前已经在风景游憩林经营技术领域开展了景观质量分级[7−8]、林木分级[9]、修枝[10]等研究，然而风景游憩林质量形成机制仍不十分清晰，且缺乏风景游憩林经营创新技术。因此，风景游憩林质量形成机制研究，成为创新风景游憩林经营技术的理论瓶颈。

景观视觉质量（landscape visual quality）是森林，尤其是风景游憩林质量的核心[3]，而林分结构对风景游憩林视觉质量有显著影响[8]。长期以来，林分结构对森林景观视觉质量的影响一直是学者们关注的焦点之一。现有研究表明，林分年龄[11−12]、树种多样性[13−14]、郁闭度[15−16]、林木平均胸径[14,17]、灌木盖度[18−19]等指标与景观美景度密切相关。相较于林分结构，人们对林内视觉形态性状的研究较少。视觉形态性状（也称观赏性状或观赏指标）是指能够直观反映林分外貌的指标[8]，包括林木干冠形态[14]、植物景观元素分布格局[20]、色彩斑块格局[21]等。近年来，视觉形态性状与森林景观视觉质量的关系开始受到更多关注[11]，但多数研究并未将其作为单独研究对象，而是将其与景观评价因子混在一起[22−23]。

耦合是指多个系统或子系统之间相互联系、相互依赖的关系。在风景游憩林中，面临着森林各项功能之间的耦合[24−25]，以及林分结构之间的复杂相互作用。森林景观的美景度并非由单个因素决定，而是受多种景观要素的综合影响。作为影响风景游憩林林内景观质量的核心要素，林分结构与林内视觉形态之间存在复杂的联系[26]。然而，关于两者之间相互作用关系的研究却鲜有报道，剖析这两者之间的耦合关系有助于深入研究风景游憩林的美学影响机制。

因此，本文以北京市浅山区域风景游憩林为研究对象，探索林分结构性状和视觉形态性状对风景游憩林视觉质量的影响，重点研究林分结构性状与视觉形态性状间是否存在密切关系，并探讨这种关系如何对林分视觉质量产生影响等科学问题，旨在为进一步揭示风景游憩林景观质量的形成机制，推动风景游憩林质量提升技术创新[27]。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

北京市位于华北平原的西北端(115°20′～117°30′E, 39°28′～41°05′N), 西部、北部和东北部三面环山, 山区面积约占 61%。夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥, 春、秋季节短促, 四季分明, 属北温带大陆性季风气候。年均降水量 600 mm 左右, 地带性植被类型为暖温带落叶阔叶林[28]。

本研究选择北京市近郊具有较高森林游憩价值的北京林业大学鹫峰实验林场、九龙山自然风景区两地为研究地点。北京林业大学鹫峰实验林场原为鹫峰国家森林公园, 位于北京市海淀区西北部苏家坨镇, 乔木以栓皮栎(*Quercus variabilis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、元宝槭(*Acer truncatum*)等为主, 物种多样性高。九龙山自然风景区位于北京市门头沟区九龙路, 自然保护区植被恢复良好, 物种多样性高。阳坡多为旱生灌草丛, 阴坡自上而下依次是蒙古栎(*Quercus mongolica*)林、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)林和杂类灌丛。

1.2 样地调查与景观照片获取

在全面踏查的基础上, 选择能够代表研究地林分结构与外貌特征、具有林内观赏价值、邻近道路或观赏点的风景林游憩林作为调查对象, 设置 58 块面积为 20 m × 20 m 的样地。调查并记录样地内乔木、灌木及草本层数据, 以及样地海拔、坡度等环境因子数据[29]。重点记录树干倾斜、树冠辨识度、水平透视距离等指标[30−31]。

于 2022 年 5—8 月与 2023 年 5—7 月, 使用 NIKON D7100 相机在天气晴朗、能见度高的时间进行林内景观照片拍摄。在样地对角线上沿水平方向进行摄影, 每个样地拍摄 5 张林内景观照片, 照片内尽量包括全部的植被特征。拍摄时遵守相关拍摄规范[32], 镜头位置与人眼等高(1.55 m), 顺光横向拍摄, 不使用闪光灯和滤镜, 全程保持拍摄参数一致。同时避免将天空、道路等非林分景观要素拍摄在内[31], 以确保景观之间具有更高的可比较性。

1.3 林内景观质量评价

每个样地中选择出一张最具代表性的景观照片作为评判材料[33](图 1)。采取美景度评价法(scenic beauty estimation method, SBE), 以线上评价的方式对风景游憩林林内景观质量进行评判。评判时采用 7 分制的反应尺度, 即每题得分值 3、2、1、0、−1、−2、−3 分别代表评判者对照片所展示的林内景观非常喜欢、喜欢、较喜欢、一般、不太喜欢、不喜欢、非常不喜欢[31]。已有研究证明, 具有不同背景的评判人群对总体评判结果有显著影响[34−35], 而学生对景观的欣赏较少带有功利性, 评价时更能体现对森林美学的追求[36]。因此, 本研究邀请 172 名林学相关专业学生作为评判者, 最终收回有效问卷 144 份, 问卷信度良好。根据 Daniels 标准化方法[32]计算每个景观的美景度值(SBE 值, E_{SB})。



图 1 风景游憩林林内景观示意图

Fig. 1 Schematic diagram of scenic and recreational forest

1.4 林分结构和视觉观赏性状指标选择及其量化

在前期预试验的基础上, 结合森林景观质量评价研究结果[19,32]以及北京市浅山区域风景游憩林林分结构特点, 本文选用了以下 6 个能够反映树种组成多样性、林木大小、林分空间结构等特征的林分结构指标: 树种丰富度(tree species richness, R_{TS})、株数密度(tree density, D_T)、平均胸径(mean DBH, D_M)、平均冠幅(mean crown width, C_{WM})、树冠覆盖度(canopy coverage, C_C)、灌木盖度(shrub coverage, C_B), 参照《测树学》[37]方法进行计算。结合风景游憩林林内视觉形态性状的特点及前人研究结果[8,11,14,38], 共选择 6 个视觉形态指标(表 1), 用以表示风景游憩林林内景观特性。

1.5 林分结构与视觉质量耦合度、协调度分析

林分结构系统(stand structure system, SST)及视觉形态系统(visual morphology system, SVM)之间存在复杂的相互影响, 可通过计算耦合度 C 及耦合协调度 D, 量化两系统间的相互作用的程度及方向。耦合度 C 是反映系统之间相互依赖、相互制约程度的指标, C 值越大, 系统间关联程度越高, 相互作用

表 1　林内景观的视觉形态指标、计算公式及其含义

Tab. 1　Visually morphological indexes, calculation formula and its connotations for in-forest landscape

指标名称	计算公式	指标含义
树干显示度	$T_{DG}=\frac{N_T}{N_P}$	样地中清晰地能够识别的树干的株数与样地中树木总株数的比值[14]
树干倾斜	$S_L=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\lvert L_i\rvert$	样地中树木的树干总体倾斜程度，表示垂直线条的一致性。通常树干倾斜度越高，林内树干线条越杂乱，林内景观质量越低[28]
树冠辨识度	$E_{RC}=\frac{N_c}{N_P}$	林分能够清晰地识别出树冠的树木与样地中总树木株数的比值，反映林分的树冠轮廓线状况和树冠的颗粒感程度。通常树冠辨识度越高，每株树木的质感越强，林内景观质量越高
偏冠指数	$C_{AI}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\max\left(\frac{W_{ie}}{W_{iw}},\frac{W_{iw}}{W_{ie}},\frac{W_{in}}{W_{is}},\frac{W_{is}}{W_{in}}\right)$	树冠偏移树干与地面垂直线的程度，反映树冠变形程度和树冠与树干之间的协调程度[28]
树冠狭长度	$C_{ND}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\max(W_{ie};W_{iw})-\min(W_{in};W_{is})}{C_W}$	树冠在水平方向上的空间占有程度，反映邻体竞争对树木个体树冠的影响和树冠的饱满程度[39]
水平透视距离	$P_D=L_P$	从一个观察点沿等高线到另一个点的直线距离，反映林下空间开阔、整洁程度以及安全感[11,38]

注：N_T为树干清晰可辨的树木株数，N_c为树冠清晰可辨的树木株数，N_P为样地中总的林木株数，L_i为单株树木主干4 m高度处在水平地面上投影点与树干基部的距离，W_{ie}、W_{iw}、W_{is}、W_{in}分别代表第i株树木东西南北4个方向的冠幅，C_W表示树冠的平均冠幅，L_P表示观赏点与最远通视位置的距离，n为样地中树木总株数。

程度越大。耦合度的计算过程如下[40]。

$$U_i=\sum\lambda_{ij}X_{ij} \tag{1}$$

$$C=2\left(\frac{U_{SST}U_{SVM}}{(U_{SST}+U_{SVM})^2}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

式中：X_{ij}($i=1, 2; j=1, 2, \cdots, 6$)为第 i 子系统的第 j 指标归一化的结果，$X_{ij}\in[0, 1]$。λ_{ij} 为变量 X_{ij} 的权重，反映 X_{ij} 对系统的贡献。C 为耦合度，U_i 为第 i 个子系统的综合值，U_{SST} 为林分结构系统的综合值，U_{SVM} 为视觉形态系统的综合值。

耦合度 C 在测度系统间相互关系的强弱程度时不分利弊，既包含相互促进的作用，也包含相互制约拮抗的作用。因此，需要在耦合度的基础上计算反映良性耦合程度大小的耦合协调度 D。耦合协调度 D 仅表示系统间良性相互作用程度，其值越高，系统间相互促进的协调效果越好。

$$D=\sqrt{C(aU_{SST}+bU_{SVM})} \tag{3}$$

式中：D 为耦合协调度，取值为 $0<D\leqslant 1$；a、b 分别为林分结构系统与视觉形态系统的重要程度参数。本文将林分结构系统与视觉形态系统视为同等重要，即取 $a=b=0.5$。

采用刘巧倩等[41]的方法将耦合度分为低水平耦合、拮抗阶段、磨合阶段、高水平耦合和良性共振 5 个等级。采用等差法[42]将耦合协调度划分为极度失调、低度协调、中低度协调、中高度协调和高度协调 5 个等级(表 2)。

1.6　数据处理

采用 SPSS 26.0 和 R 4.3.3 进行数据分析与检验，使用 Origin 2023 作图。简单相关分析中采用 Pearson 相关系数。采用 R 4.3.3 中的“plspm”包进行偏最小二乘路径回归分析(PLS-PM)。以主成分贡献值作为林分结构指数的因子权重，偏相关系数作为林内观赏指标的因子权重，计算林分结构与视觉形态两者间的耦合度(C)及协调度(D)。为确保指标的可比性，在耦合度计算前通过极差法[43]对各指标数据进行无量纲化处理。

表 2　耦合度和耦合协调度等级划分标准

Tab. 2　Standards for classification of coupling degree and coupling coordination degree

耦合阶段	低水平耦合	拮抗阶段	磨合阶段	高水平耦合	良性共振
C值	(0, 0.3]	(0.3, 0.5]	(0.5, 0.8]	(0.8, 1)	1
协调等级	极度失调	低度协调	中低度协调	中高度协调	高度协调
D值	(0, 0.2]	(0.2, 0.4]	(0.4, 0.6]	(0.6, 0.8]	(0.8, 1]

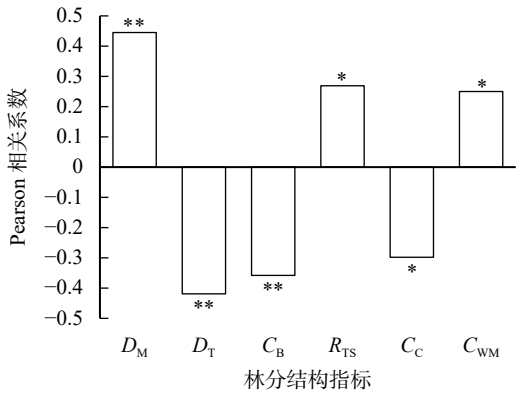
注：C为耦合度，D为耦合协调度。

2　结果与分析

2.1　林分结构对林内景观美景度的影响

林内景观美景度值(E_{SB})与平均胸径、树种丰富度、平均冠幅呈正相关关系，与株数密度、灌木盖度、树冠覆盖度呈负相关关系。6 个指标与美景度值的相关性大小为平均胸径 > 株数密度 > 灌木盖度 > 树种丰富度 > 树冠覆盖度 > 平均冠幅(图 2)。

林分结构各指标之间存在着复杂的联系，除各林分结构指标的单独作用外，林分结构组合常对林内景观质量产生综合影响。所以，采用主成分分析法对林分结构指标进行降维，得到两个主成分轴，其累计贡献率为 71.376%(表 3)。第 1 轴在株数密度、平均胸径、平均冠幅上载荷较大，反映了林分密度与林木的大小，故将其定义为林木大小指数(tree size index，I_{TS})；第 2 轴在树种丰富度、树冠覆盖度、灌木



*表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著；**表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著。D_M 为平均胸径，D_T 为株数密度，C_B 为灌木盖度，R_{TS} 为树种丰富度，C_C 为树冠覆盖度，C_{WM} 为平均冠幅。下同。

图 2 美景度值(E_{SB})与林分结构指标相关性

Fig. 2 Correlations between scenic beauty value (E_{SB}) and stand structural indexes

盖度上载荷较大，反映了树种多样性与林分水平空间上的覆盖程度，将其定义为林分水平覆盖指数(horizontal coverage index，I_{HC})；并得到了两个指数模型(4)和(5)。

$$I_{TS}= -0.325D_T+0.393D_M+0.41C_{WM} \quad (4)$$

$$I_{HC}= -0.438R_{TS}+0.453C_C+0.317C_B \quad (5)$$

林木大小指数(I_{TS})对林内景观质量产生正影响，即林分密度小、林木个体较大、树冠舒展的林内景观具有更高的景观质量(图 3)。林分水平覆盖指数(I_{HC})对林内景观质量产生负影响，说明林内树种组成单一、林内过于郁闭、林下灌木覆盖度过高的林内景观视觉质量较低。

2.2 林内视觉形态性状对林内景观美景度的影响

林内景观美景度值(E_{SB})极显著受树干显示度、偏冠指数、树冠辨识度、水平透视距离和树干倾斜的影响($p < 0.01$)，并显著受树冠狭长度的影响($p < 0.05$)(图 4)。其中，树冠显示度、树冠辨识度、水平透视距离与 E_{SB} 呈正相关关系，即树干和树冠越清晰，林内视野越开阔，风景游憩林的景观观赏价值越高；偏冠指数、树干倾斜、树冠狭长度与 E_{SB} 呈负相关关系，说明林木的倾斜与偏冠对林内景观美景度产生不利影响。选择与美景度极显著相关的 5 个视觉形态指标参与耦合效应的计算与分析。

2.3 林分结构性状与林内视觉形态性状的耦合效应

2.3.1 林分结构与林内视觉形态性状相关性

多数林分结构指标与视觉形态性状之间存在着显著相关关系(表 4)。其中，树干显示度与株数密度、树冠覆盖度、灌木盖度呈负相关关系，与树种丰富度呈正相关关系，说明林分密度、树冠覆盖度及灌木盖度越高，树干可辨识程度越低。树干倾斜与树冠覆盖度、灌木盖度呈正相关关系，与树种丰富度呈负相关关系，说明当树冠覆盖度、灌木盖度增大时，树木的生长方向发生偏移，树干倾斜现象加剧，而当林分中树种组成丰富时，林干倾斜不易发生。树冠

表 3 各主成分的载荷系数、特征根与累计贡献率

Tab. 3 Load coefficients, eigenvalues and cumulative contribution rates of each principal component

主成分	载荷系数						特征根	累计贡献率/%
	R_{TS}	D_T	D_M	C_{WM}	C_C	C_B		
第1轴	0.068	−0.799	0.899	0.270	0.064	−0.152	2.520	38.963
第2轴	−0.842	0.344	−0.005	0.058	0.851	0.624	1.763	71.376

注：VIF值小于3，KMO和Bartlett检验系数为0.653。

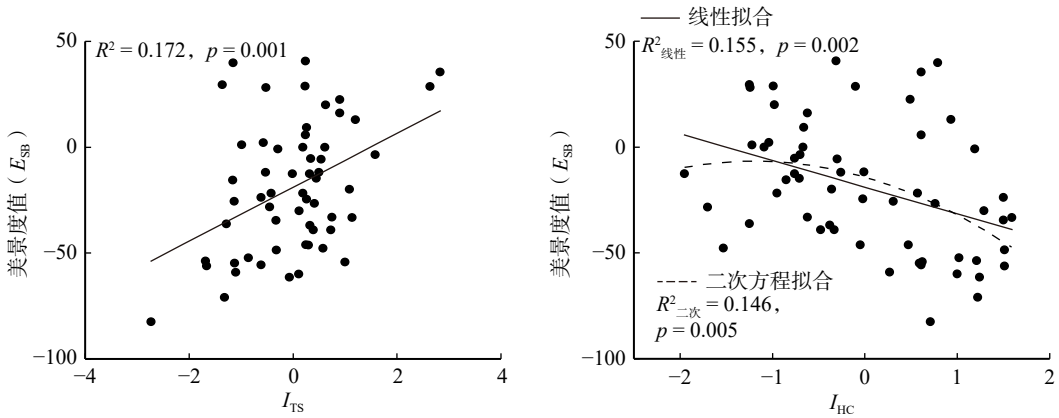
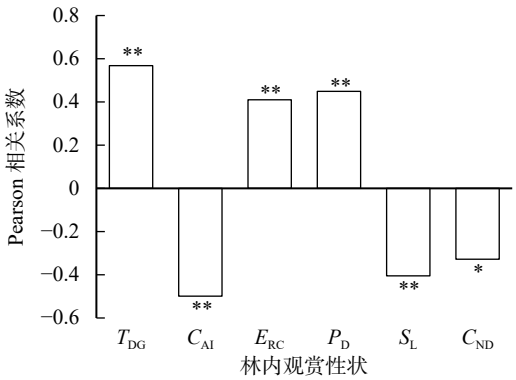


图 3 林木大小指数(I_{TS})、林分水平覆盖指数(I_{HC})与美景度值(E_{SB})的相关性

Fig. 3 Correlations between tree size index (I_{TS}) and horizontal coverage index (I_{HC}) with scenic beauty value (E_{SB})



T_{DG} 为树干显示度; C_{AI} 为偏冠指数; E_{RC} 为树冠辨识度; P_D 为水平透视距离; S_L 为树干倾斜; C_{ND} 为树冠狭长度。

图 4　美景度值(E_{SB})与林内视觉形态性状的相关性

Fig. 4　Correlations between scenic E_{SB} and visually morphological traits

表 4　林分结构性状与视觉形态性状之间的 Pearson 相关性

Tab. 4　Pearson orrelations between stand structural traits and visually morphological traits

林分结构性状	林内视觉形态性状				
	T_{DG}	S_L	E_{RC}	C_{AI}	P_D
D_T	−0.526**	0.208	−0.399**	0.517**	−0.296*
D_M	−0.170	0.019	0.291*	0.242	−0.207
C_{WM}	0.243	0.058	0.198	−0.268*	−0.059
I_{TS}	0.469**	−0.205	0.412**	−0.517**	0.295*
R_{TS}	0.335*	−0.390**	0.421**	−0.383**	0.455**
C_C	−0.461**	0.520**	−0.494**	0.428**	−0.482**
C_B	−0.437**	0.313*	0.150	0.271*	−0.301*
I_{HC}	−0.418**	0.472**	−0.523**	0.440**	−0.511**

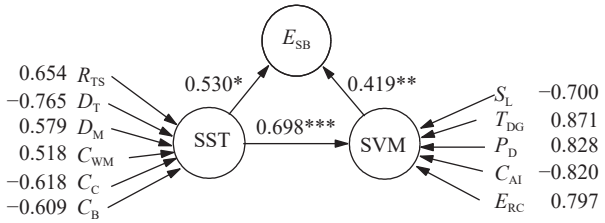
注: *表示在$p < 0.05$水平上显著相关, **表示在$p < 0.01$水平上显著相关, ***表示在$p < 0.001$水平上显著相关。

辨识度与株数密度、树冠覆盖度呈负相关关系，与平均胸径、树种丰富度呈正相关关系；说明当林分密度的增大时，树冠之间常相互掩映，树冠辨识度随之降低。而林木个体较大或林分中树种丰富度较高时，树冠的可辨识程度较高。与树干倾斜类似，偏冠指数与株数密度、树冠覆盖度、灌木盖度呈正相关关系，与平均冠幅、树种丰富度呈负相关关系；说明林分密度和树冠覆盖度的增大都会导致树冠生长中心偏离树干基部，而丰富的树种组成减缓了树冠的偏移。水平透视距离与树种丰富度呈正相关关系，与株数密度、树冠覆盖度、灌木盖度呈负相关关系；说明林分中株数密度、树冠覆盖度、灌木盖度过高将直接遮挡游客视线，导致水平通视距离减小，而树种丰富度较高的林分空间结构往往错落有致，表现为水平通视距离的增加。

从林分结构综合效应角度出发，林木大小指数(I_{TS})与树冠显示度、树冠辨识度、水平透视距离呈正相关关系，与偏冠指数呈极显著负相关关系，即林分中林木个体越大，树冠偏移越不容易发生、树干及树冠的边缘越清晰可辨、林内透视距离越长、树冠越饱满；林分水平覆盖指数(I_{HC})与树干倾斜、偏冠指数呈极显著正相关($p < 0.01$)，与树干显示度、树冠辨识度、水平透视距离呈极显著负相关($p < 0.01$)，即林分水平覆盖程度越高，树干和树冠间的遮掩越明显、树干倾斜与树冠偏冠现象越剧烈、林内水平透视距离越短。

2.3.2　林分结构与林内视觉形态性状 PLS-PM 关系

偏最小二乘路径模型(PLS-PM)分析结果表明，模型拟合优度为 0.468，林分结构系统和林内视觉形态系统的解释力(R^2)分别为 0.395、0.648，均达到极显著水平($p < 0.001$)(图 5)。模型中自变量的因子载荷绝对值均大于 0.5，达到了显著水平。林分结构系统与视觉形态系统的路径系数为 0.698，说明林分结构能很好地解释视觉形态的变化。林分结构系统、视觉形态系统与 E_{SB} 的路径系数分别为 0.530 和 0.419，均达到了显著水平，但路径系数偏小，说明林内景观质量还受到其他因素影响。



SST 为林分结构系统; SVM 为视觉形态系统; 箭头上数字表示路径系数, *表示在 $p < 0.05$ 水平上显著, **表示在 $p < 0.01$ 水平上显著, ***表示在 $p < 0.001$ 水平上显著。

图 5　林分结构性状与观赏性状的偏最小二乘路径模型(PLS-PM)分析

Fig. 5　PLS-PM analysis of stand structural traits and ornamental characteristics

林分结构系统与视觉形态系统间存在显著的相互影响(图 6)。除平均胸径、平均冠幅外，其余林分结构性状在视觉形态系统(SVM)上的交叉载荷均大于 0.4，即林分结构性状对视觉形态质量具有显著的影响(图 6b)。视觉形态性状在林分结构系统(SST)上的交叉载荷值均在 0.5 左右(图 6a)，表明视觉形态性状可很好地反映林分结构质量。

2.3.3　林分结构与林内视觉形态性状耦合协调特征分析

林分结构系统综合值(U_{SST})与视觉形态系统综合值(U_{SVM})之间的耦合度(C)为 0.81 ~ 0.99，属于高水平耦合；二者的耦合协调度为 0.58 ~ 0.89，表明二者之间具有良好的相互协调作用。其中，属于中低

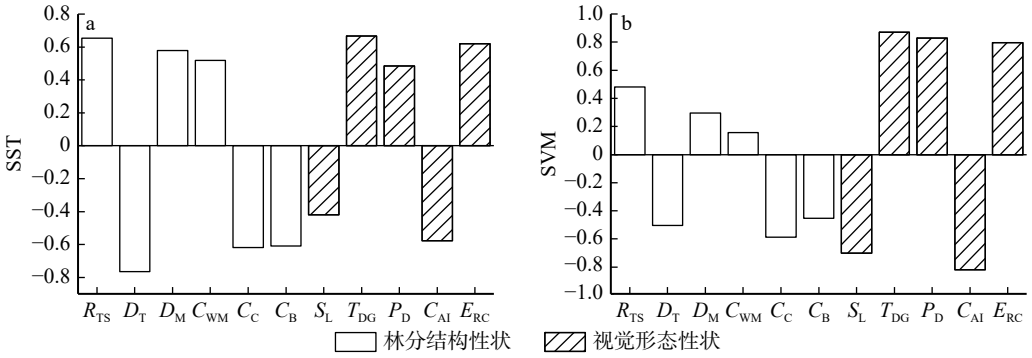


图 6 林分结构性状与视觉形态性状间的交叉载荷

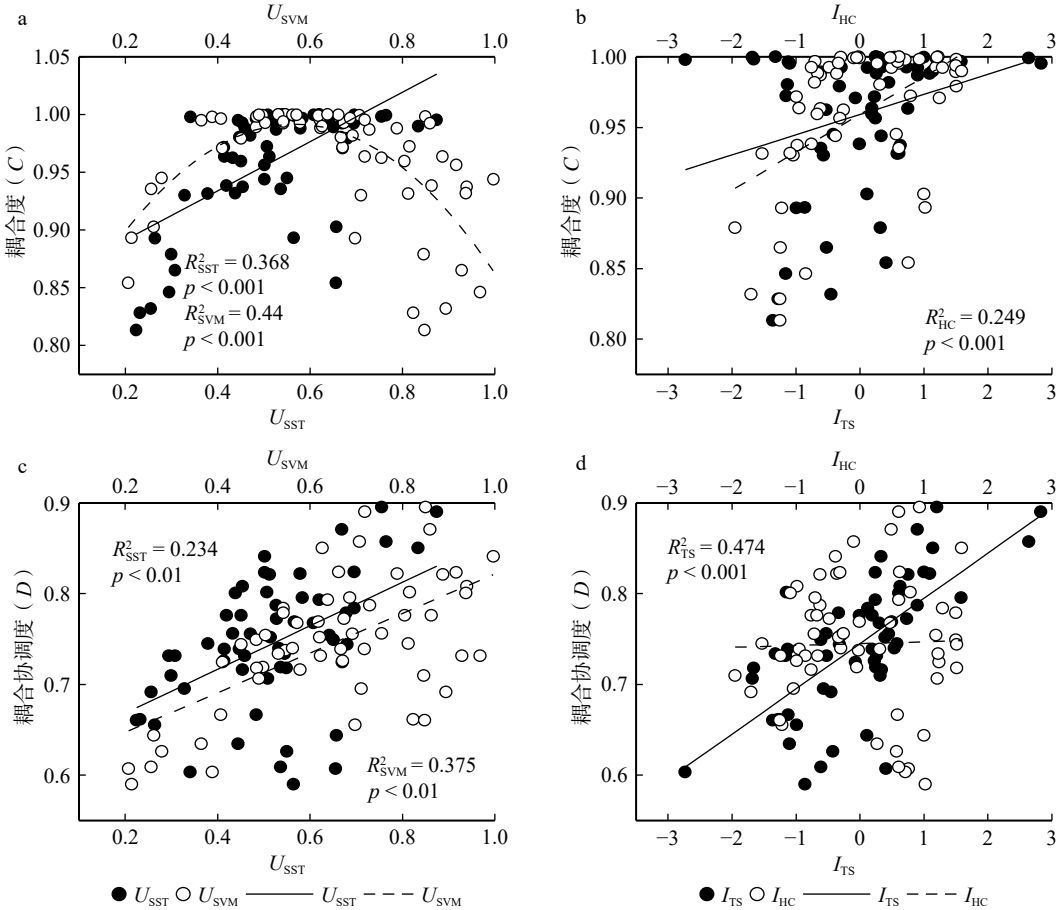
Fig. 6 Cross-loadings of stand structural traits and visually morphological traits

度、中高度、高度耦合协调的样地数量分别为 1、44、13 个。风景游憩林林分结构–视觉形态耦合关系总体表现为耦合度(C)均处于高度耦合水平，耦合协调度(D)多处于中高度或高度协调水平(图 7)。耦合度(C)随着 U_{SST} 的提高线性增大，随 U_{SVM} 的提高则呈二次关系变化，且在 $U_{SVM}=0.57$ 时达到最大值 0.99(图 7a)。耦合协调度(D)与两系统综合值(U_{SST}、U_{SVM})均呈显著的线性关系(图 7c)。在林分结构系统中，耦合度(C)与林分水平覆盖指数(I_{HC})呈显著线性关系(图 7b)，但随林木大小指数(I_{TS})的变化没有显著规律；耦合协调度(D)与 I_{TS} 呈显著线性关系，在 I_{TS} 接近 1 时，协调度增大至 0.8，达到高度协调阶段，但其与 I_{HC} 的关系不显著(图 7d)。

3 讨 论

3.1 林分结构性状和视觉形态性状均影响风景游憩林的林内景观质量

林分结构对林木生长[28,44]、树枝分枝角度[31]以



U_{SST} 为林分结构系统综合值；U_{SVM} 为视觉形态系统综合值；I_{TS} 为林木大小指数；I_{HC} 为林分水平覆盖指数。

图 7 林分结构系统、视觉形态系统综合值、林分结构性状指数与耦合度、协调度的关系

Fig. 7 Relationship between comprehensive values of forest structure system, visually morphology system, forest structural trait index and coupling degree as well as coordination degree

及树木冠形[39,45]等有显著影响，因而对风景游憩林美景度有着重要影响[7]。然而，林分结构各指标不是孤立的，而是存在着复杂的相互联系[46]。森林的视觉美学质量多由树种多样性、树木个体大小分化(年龄结构)、林下植被等所共同诠释的视觉多样性决定[13]，即林分结构是通过各要素的综合作用影响风景游憩林美景度的[30]。本文的研究表明，林分结构性状主要通过林木大小指数(I_{TS})与林分覆盖指数(I_{HC})对林内景观质量产生综合影响。公众更加青睐林木胸径分化明显、具有大树的林分[26]；丰茂的林下灌木对林内景观美景度产生负面影响[18]，风景游憩林中灌木覆盖度不宜超过 40%；而郁闭度过低或过高均会导致森林景观美景度降低[11]，郁闭度在 80% 左右时景观质量较高，该结果与前人的研究基本吻合。

林内视觉形态性状对风景游憩林景观质量至关重要[3,8]。在许多研究中，林内视觉形态性状表现出与风景游憩林视觉质量存在显著相关关系[3,19]。较高的树冠和树干识别度[21]、良好的林内透视度[31]有利于提高林内景观美景度，而树干倾斜[30]、偏冠以及树冠不够饱满[11,47]则对林内景观美景度有显著的副作用。但是，目前多数研究并未将视觉形态性状作为单独类型进行重点考虑，而是将其混合在景观评价因子的大类中[22−23]。本研究将视觉形态作为影响风景游憩林视觉质量的一个系统，研究了林内视觉形态性状对林内景观美景度的影响。所选择的视觉形态指标树干显示度、树冠辨识度、水平透视距离以及偏冠指数、树干倾斜、树冠狭长度对美景度值产生了显著的正、负向影响，其中，树干和树冠的可辨识程度[21]是影响风景游憩林视觉质量的最重要因素，其次是树冠形态[47]。因此，人们更欣赏林木通直挺拔、树冠圆满、树干与树冠清晰可辨、林内透视度较高的风景游憩林[21,27]。

3.2　林分结构性状与视觉形态性状间具有良好的协同关系

作为风景游憩林景观评价的两个系统，林分结构性状与视觉形态性状间存在较密切的相关关系。林分结构通常通过影响林木干冠形态[28,48]、创造林下游憩空间[11]、丰富林内景观多样性[11,30]等方式影响林内视觉形态性状。已有研究表明，林分密度或树冠覆盖度过高将导致林内竞争关系加剧[28,48]，树木为争夺光和生长空间而产生树干倾斜和偏冠现象。较高的树冠覆盖度与灌木盖度[31,49]将压缩林下游憩空间，或遮蔽游客视线，导致林内通透性的降低[11,50]。树种丰富度与所选 5 个观赏指标均存在显著相关关系，说明树种丰富度对林内观赏性状的影响是广泛的。因为，一方面由于生物学特性的不同，树种之间的竞争强度通常小于同一树种内的竞争强度[51]，丰富的树种组成可通过削弱林木间竞争，减小林木干冠形态偏移的方式影响林内观赏性状；另一方面，树种组成的多样有利于形成色彩更为丰富，空间结构更为错落有致，视觉丰富性较高的林内景观，对风景游憩林美景度有显著的促进作用[3]。

风景游憩林中林分结构与林内视觉形态之间高度耦合，具有良好的协同效应，林分结构可表征林内视觉形态，同时，林内视觉形态也能反映林分结构[40]。林分结构–林内视觉形态耦合度与林内景观美景度值没有显著相关关系(图 8)，这说明林分结构与林内观赏形态之间的相互作用关系是广泛的，无论风景游憩林景观质量的优劣，二者之间均有显著的相互影响[28,45]。而林分结构与林分视觉形态之间的协调度 D 则是决定风景游憩林美景度值值的重要因素，表现为两系统间良性协调作用越好，风景游憩林的景观质量越高。

耦合度 C 和协调度 D 均与林分结构系统综合

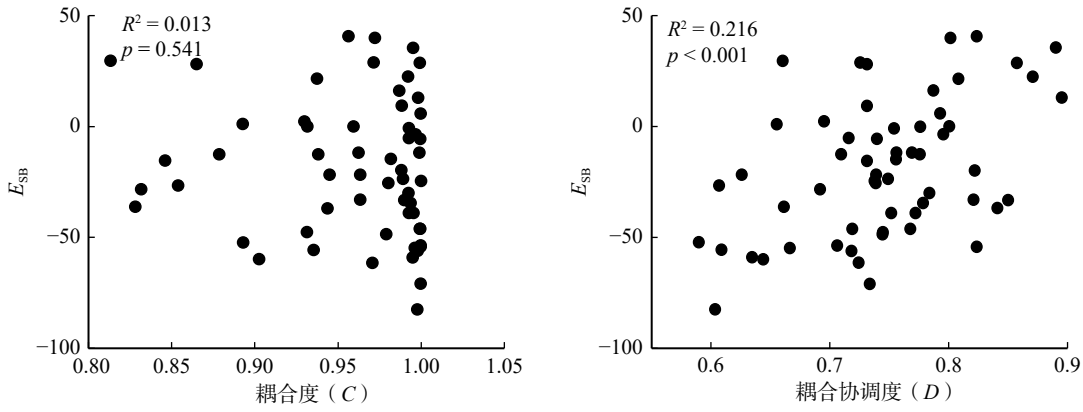


图 8　E_{SB} 随林分结构–视觉形态两个系统间耦合度、耦合协调度的变化

Fig. 8　Changes in coupling degree and coordination degree between two systems of stand structure and visual morphology with respect to E_{SB}

值(U_{SST})呈线性关系，但林分结构性状对林分结构–林内视觉形态耦合关系的贡献不同。耦合度 C 和协调度 D 与林分结构指数(I_{TS}、I_{HC})呈现出不同的相关关系，这是由于耦合度 C 衡量系统间相互作用程度的大小，不区分作用的方向，而协调度 D 仅衡量系统间相互促进的作用[40]。林分覆盖指数(I_{HC})对林分美景度值的影响是负向的，与观赏指标的作用相反。因此，林分覆盖指数(I_{HC})与视觉形态性状之间呈现出消极的拮抗作用，而林木大小指数(I_{TS})与观赏性状则呈现积极的相互促进作用。

4 结论与展望

林分结构性状和林内视觉形态性状均能显著影响森林的景观美景度，并且这两者之间普遍存在显著的相关性。林分结构系统和林内视觉形态系统处于高水平耦合阶段，二者间耦合协调关系较高的风景游憩林视觉质量较优。因此，林分结构性状变化可以很好地反映视觉形态性状的变化，优化林分结构可以较好地提高景观视觉质量。人们偏好那些林木通直挺拔、树冠圆满、树干与树冠清晰可辨，林内透视度较高、树种组成丰富、林分密度较低、适度郁闭、林下整洁的风景游憩林。

本文通过林分结构性状与林内视觉形态性状的相互关系探讨了林分结构及视觉形态对风景游憩林林内景观质量的影响。北京市浅山区风景游憩林景观质量较差的主要原因是林分密度过大，林内过于郁闭，树干倾斜与偏冠现象明显。因此，应对风景游憩林进行密度控制，通过间伐、补植等措施调整林分结构，改善林木之间的竞争关系，促进林木树干及树冠形态的改善[48]。

森林美学视觉质量通常是由视觉组成(visual composition)、视觉感(visual sense)和视觉条件(visual condition)共同决定的[3]，这些特征与起源于 Kaplan 感知矩阵而形成的心理感知体系[52]密切相关。所以，本研究目前所涉及到的视觉形态性状是否与心理感知结果高度耦合协调，是下一步研究应该重点解决的问题。本文中所选取的视觉性状指标侧重于反映林木干冠形态与林下游憩空间大小，还有很多与林内景观视觉质量显著相关的元素，如色彩性状、斑块性状等[53]尚未考虑在内，这些未曾考虑的性状同样与林分结构性状存在密切联系[8]。因此，下一步研究应适当扩大视觉性状选取范围，进一步深入研究林分结构性状与其他林内景观视觉性状之间的关系，为进一步揭示风景游憩林林内景观质量形成机制和创新林分结构优化技术提供支撑。

参 考 文 献

[1] 孟平, 吴诗华. 风景林概述 [J]. 中国园林, 1995, 11(4): 40−42.
Meng P, Wu S H. Overview of scenic forests[J]. Chinese Landscape Architecture, 1995, 11(4): 40−42.

[2] Roxby G. Sustaining biodiversity and scenic beauty: the forest society's ecological reserve program[J]. Forest Notes, 2022, 9(4): 335−348.

[3] Mundher R, Bakar S A, Helli M A, et al. Visual aesthetic quality assessment of urban forests: a conceptual framework[J]. Urban Science, 2022, 6(4): 79.

[4] 易逸瑜, 张庆费, 安齐, 等. 城市森林游憩发展探讨 [J]. 中国城市林业, 2018, 16(1): 7−10.
Yi Y Y, Zhang Q F, An Q, et al. Discussion on development of urban forest recreation[J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2018, 16(1): 7−10.

[5] 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.

[6] 甘敬. 北京山区森林健康评价研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
Gan J. Forest health assessment for mountainous area of Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.

[7] 陈鑫峰, 贾黎明, 王雁, 等. 京西山区风景游憩林季相景观评价及经营技术原则 [J]. 北京林业大学学报, 2008, 4(30): 39−45.
Chen X F, Jia L M, Wang Y, et al. Landscape estimation and management technique principles of different seasonal scenic and recreational forests in West Mountain, Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 4(30): 39−45.

[8] 赵凯, 李金航, 徐程扬. 侧柏人工林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 *Platycladus orientalis* plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(1): 82−91.

[9] 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.

[10] 毛斌, 徐程扬, 李翠翠, 等. 不同修枝强度对侧柏、油松人工林林内景观美景度的影响 [J]. 西北林学院学报, 2013, 28(3): 123−125, 205.
Mao B, Xu C Y, Li C C, et al. Effects of pruning intensity on in-forest landscape of *Platycladus orientalis* and *Pinus tabulaeformis* plantations[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(3): 123−125, 205.

[11] 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 Y, Liu H X, Lü J, 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.

[12] Simkin J, Ojala A, Tyrväinen L. The perceived restorativeness of

differently managed forests and its association with forest qualities and individual variables: a field experiment[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(2): 422.

[13] Füger F, Huth F, Wagner S, et al. Can visual aesthetic components and acceptance be traced back to forest structure?[J]. Forests, 2021, 12(6): 701.

[14] 梅光义, 孙玉军, 林方, 等. 基于 ANP 的杉木风景游憩林评价指标体系 [J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(2): 110−114.
Mei G Y, Sun Y J, Lin F, et al. Study on evaluation index system of *Cunninghamia lanceolata* scenic and recreational forests based on analytic network process[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, 33(2): 110−114.

[15] Petucco C, Skovsgaard J P, Jensen F S N. Recreational preferences depending on thinning practice in young even-aged stands of pedunculate oak (*Quercus robur* L.): comparing the opinions of forest and landscape experts and the general population of denmark[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2013, 28(7): 668−676.

[16] Mundher R, Bakar S A, Aziz A, et al. Determining the weight age of visual aesthetic variables for permanent urban forest reserves based on the converging approach[J]. Forests, 2023, 14(4): 669.

[17] 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]. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research, 2015, 30(4): 335−339.

[18] 张洁, 戚继忠, 徐程扬, 等. 分层修剪林下灌木对东北次生林林内景观美景度的影响 [J]. 北方园艺, 2018(11): 97−102.
Zhang J, Qi J Z, Xu C Y, et al. Effects of layered cleaning shrub on scenic beauty values of secondary forest in Northeast[J]. Northern Horticulture, 2018(11): 97−102.

[19] 牛君丽, 徐程扬. 风景游憩林景观质量评价及营建技术研究进展 [J]. 世界林业研究, 2008, 21(3): 34−37.
Niu J L, Xu C Y. Review on quality assessment and management of scenic and recreational forest[J]. World Forestry Research, 2008, 21(3): 34−37.

[20] 宋亚男, 车生泉. 上海城市公园典型植物群落美景度评价 [J]. 上海交通大学学报 (农业科学版), 2011, 29(2): 16−24.
Song Y N, Che S Q. Scenic beauty estimation of the typical plant communities of urban parks in Shanghai[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science), 2011, 29(2): 16−24.

[21] 杨阳, 唐晓岚. 南京市紫金山国家森林公园风景林景观的视觉质量评价及因子分析 [J]. 中国园林, 2020, 36(6): 135−140.
Yang Y, Tang X L. The evaluation and factor analysis of the visual quality of scenic forest landscape: a case study of purple mountain national forest park in Nanjing[J]. Chinese Landscape Architecture, 2020, 36(6): 135−140.

[22] 梁爽, 张洁, 戚继忠, 等. 次生林为主的自然风景林林内景观质量评价 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 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.

[23] 李羽佳. ASG 综合法景观视觉质量评价研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
Li Y J. Landscape visual quality assessement based on ASG integrated approach[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.

[24] Gobster P H, Nassauer J I, Daniel T C. The shared landscape: what does aesthetics have to do with ecology?[J]. Landscape Ecology, 2007, 22(7): 959−972.

[25] Huang Y, Li T, Jin Y. Correlations among AHP-based scenic beauty estimation and water quality indicators of typical urban constructed WQT wetland park landscaping[J]. Ecosystems and Society, 2023, 72(11): 2017−2034.

[26] 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): 53−60.
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): 53−60.

[27] Jin Y T, Chen L M. Tourists perceived value of forest experience base recreation based on fuzzy entropy weight[C]. Beijing: E3S Web of Conferences, 2021.

[28] 薛永鑫, 南晓凡, 李献文, 等. 邻体竞争对城市森林微景观中针叶树视觉形态性状的影响 [J]. 生态学报, 2024, 44(11): 1−12.
Xue Y X, Nan X F, Li X W, et al. Effects of neighborhood competition on visual morphological traits of coniferous trees in fine-scale landscapes of urban forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(11): 1−12.

[29] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范 [J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 533−548.
Fang J Y, Wang X P, Shen Z H, et al. Methods and protocols for plant community inventory[J]. Biodiversity Science, 2009, 17(6): 533−548.

[30] 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]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(10): 115−122.

[31] 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 suburbans in Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.

[32] Daniel T C, Boster R S. Measuring landscape esthetics: the scenic beauty estimation method[C]. Arizona: USDA Forest Service Research Paper RM, 1976: 1−66.

[33] 董建文, 翟明普, 章志都, 等. 福建省山地坡面风景游憩林单因素美景度评价研究 [J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(6): 154−158.
Dong J W, Zhai M P, Zhang Z D, et al. Single-factor analysis on

scenic beauty of scenic-recreational forest in mountainous region of Fujian Province, eastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(6): 154−158.

[34] Gundersen V S, Frivold L H. Public preferences for forest structures: a review of quantitative surveys from Finland, Norway and Sweden[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2008, 7(4): 241−258.

[35] Mundher R, Bakar S A. Identifying suitable variables for visual aesthetic quality assessment of permanent forest reserves in the Klang Valley Urban Area, Malaysia[J]. Urban Science, 2023, 7(3): 92.

[36] 俞孔坚, 吉庆萍. 专家与公众景观审美差异研究及对策 [J]. 中国园林, 1990, 6(2): 19−23.
Yu K J, Ji Q P. Research on the differences in landscape aesthetics between experts and the public and countermeasures[J]. Chinese Landscape Architecture, 1990, 6(2): 19−23.

[37] 李凤日. 测树学 [M]. 4 版. 北京: 中国林业出版社, 2019.
Li F R. Forest mensuration[M]. 4th ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019.

[38] Meo I D, Cantiani P, Paletto A. Effect of thinning on forest scenic beauty in a black pine forest in central Italy[J]. Forests, 2020, 11(12): 95.

[39] 潘磊, 王轶夫, 孙钊, 等. 长白落叶松树冠半径分布特征及其对竞争的响应 [J]. 林业科学研究, 2022, 35(3): 27−37.
Pan L, Wang Y F, Sun Z, et al. The distribution characteristics of crown radius and its response to competition of *Larix olgensis*[J]. Forest Research, 2022, 35(3): 27−37.

[40] 宋亮, 赵冰琴, 申远洋, 等. 新银合欢林土壤理化性质–微生物生物量耦合协调关系研究 [J]. 土壤, 2023, 55(5): 1070−1079.
Song L, Zhao B Q, Shen Y Y, et al. Evaluation of coupling coordination relationship between soil physicochemical properties and microbial biomass of *Leucaena leucocephala* plantation[J]. Soils, 2023, 55(5): 1070−1079.

[41] 刘巧倩, 王莉红. 城市化与生态环境耦合协调关系研究: 以杭州市为例 [J]. 环境科学学报, 2018, 38(10): 4214−4222.
Liu Q J, Wang L H. Examination of a coupling coordination relationship between urbanization and the eco-environment: case study of Hangzhou[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(10): 4214−4222.

[42] 陈惠宁, 岳依洋. 我国文化和旅游产业耦合协调发展及其影响因素研究 [J]. 时代经贸, 2023, 20(10): 173−181.
Chen H N, Yue Y Y. Research on the coupled and coordinated development of China's culture and tourism industries and its influencing factors[J]. Times of Economy & Trade, 2023, 20(10): 173−181.

[43] Li W, Wang Y, Xie S, et al. Coupling coordination analysis and spatiotemporal heterogeneity between urbanization and ecosystem health in Chongqing Municipality, China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 791: 148311.

[44] 孙广鹏, 章志都, 刘海轩, 等. 基于树冠生长和空间竞争指数的油松风景林经营密度表编制 [J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(2): 17−26, 54.
Sun G P, Zhang Z D, Liu H X, et al. Operation density of *Pinus tabulaeformis* landscape forest based on study of canopy growth model and space competition index[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(2): 17−26, 54.

[45] 章志都, 徐程扬, 蔡宝军, 等. 林分密度对山桃树冠结构的影响研究 [J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(6): 187−192.
Zhang Z D, Xu C Y, Cai B J, et al. Influence of stock density on crown structure of *Prunus davidiana*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(6): 187−192.

[46] 翟明普, 马履一. 森林培育学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2021.
Zhai M P, Ma L Y. Silviculture [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2021.

[47] Zhao J, Xu W, Li R. Visual preference of trees: the effects of tree attributes and seasons[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2017, 25: 19−25.

[48] 吴鞠, 陈瑜, 刘海轩, 等. 林分密度及混交度对长白山天然风景林树木形态的影响 [J]. 林业科学, 2018, 54(12): 12−21.
Wu J, Chen Y, Liu H X, et al. Effects of stand density and mingling intensity on tree morphology in natural scenic forest in Changbai Mountain[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(12): 12−21.

[49] 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.

[50] 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.

[51] 汪生财, 邢韶华, 赵志荣, 等. 不同优势度下脱皮榆的种内种间竞争关系 [J]. 中国野生植物资源, 2024, 43(4): 108−115.
Wang S C, Xing S H, Zhao Z R, et al. Intraspecific and interspecific competition of *Ulmus lamellosa* under the condition of different degree of dominance[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2024, 43(4): 108−115.

[52] Tveit M S, Sang Å O. Key concepts in a framework for analysing visual landscape character[J]. Landscape Research, 2006, 31(3): 229−255.

[53] 郎博帅, 刘叶凡, 韩阳媚, 等. 林内色彩斑块分布格局对秋季生态景观林美景度的影响: 以塞罕坝机械林场为例 [J]. 林业与生态科学, 2023, 38(1): 98−105.
Lang B S, Liu Y F, Han Y M, et al. Effect of color patch distribution pattern on the beauty degree of autumn ecological landscape forest: taking Saihanba Mechanized Forestry Farm as an example[J]. Forestry and Ecological Sciences, 2023, 38(1): 98−105.

（责任编辑 范 娟
责任编委 李 雄）