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

北京山区侧柏和油松人工林邻体干扰研究

黄娟灵 耿燕 陈贝贝 姜俊 王傲雪 张咏 李杨

Neighbor interference of *Platycladus orientalis* and *Pinus tabuliformis* plantations in Beijing mountainous areas

Huang Juanling, Geng Yan, Chen Beibei, Jiang Jun, Wang Aoxue, Zhang Yong, Li Yang

引用本文:
黄娟灵, 耿燕, 陈贝贝, 姜俊, 王傲雪, 张咏, 李杨. 北京山区侧柏和油松人工林邻体干扰研究[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(10):73–85. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250366
Huang Juanling, Geng Yan, Chen Beibei, Jiang Jun, Wang Aoxue, Zhang Yong, Li Yang. Neighbor interference of *Platycladus orientalis* and *Pinus tabuliformis* plantations in Beijing mountainous areas[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(10):73–85. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250366

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250366

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

林分密度对北京石质山地侧柏人工林碳氮磷化学计量和养分再吸收的影响

Effects of stand density on carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry and nutrient resorption of *Platycladus orientalis* plantations in rocky mountainous area of Beijing

北京林业大学学报, 2024, 46(10): 33–41. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240011

基于邻体干扰模型的草花混播群落竞争模拟

Competition simulation of flower meadow community based on neighborhood interference model

北京林业大学学报, 2022, 44(3): 85–97. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200352

树种混交对油松人工林化学计量特征及养分再吸收效率的影响

Effects of tree species mixing on stoichiometric characteristics and nutrient resorption efficiency of *Pinus tabuliformis* plantations

北京林业大学学报, 2026, 48(2): 132–140. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250345

基于手持激光雷达的人工侧柏纯林冠层空间互补性

Spatial complementarity of canopy layer in pure *Platycladus orientalis* plantations based on handheld mobile laser scanning

北京林业大学学报, 2025, 47(4): 61–73. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240351

邻域竞争对长白落叶松生物量及其分配的影响

Effects of neighborhood competition on biomass and its allocation of *Larix olgensis*

北京林业大学学报, 2025, 47(4): 92–102. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230322

油松和侧柏林地表可燃物负荷量及影响因素

Land surface fuel load and influencing factors of *Pinus tabuliformis* and *Platycladus orientalis* plantations

北京林业大学学报, 2021, 43(6): 33–40. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200364

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250366

北京山区侧柏和油松人工林邻体干扰研究

黄娟灵[1] 耿 燕[1,2] 陈贝贝[1,2] 姜 俊[1,2] 王傲雪[3] 张 咏[4] 李 杨[4]
（1. 北京林业大学林学院，北京 100083；2. 北京林业大学国家林业和草原局森林经营工程技术研究中心，北京 100083；
3. 北京市西山试验林场管理处，北京 100093；4. 北京市十三陵林场管理处，北京 102200）

摘要:【目的】邻体竞争评价是人工林目标木选择、密度调控和科学抚育的重要基础，而竞争木选择方法和竞争指数构建方式会直接影响竞争强度判定结果。本研究旨在明确适用于北京山区侧柏和油松人工林的邻体竞争评价方法，分析两树种邻体竞争相关特征，以期为人工林竞争识别、邻域空间调控和抚育间伐提供依据。**【方法】**基于北京十三陵地区 15 块侧柏和油松人工纯林样地林木定位调查数据，将胸径 ≥ 4 cm 的侧柏和油松确定为对象木，并采用样地平移法进行边缘校正。分别采用四邻体法和逐步扩大半径法筛选竞争木，其中后者通过分段线性拟合确定树种和不同径级的最适邻体范围，并结合配对 *t* 检验比较两树种差异。以 Hegyi 竞争指数为基础，利用胸径、树高、冠幅及其组合构建 7 类邻体竞争指数；通过比较样地间竞争指数差异、竞争指数与林木因子相关性及拟合等关联表现，筛选适宜的竞争木选择方法。在选定方法下进一步评价竞争指数和林木因子的表征表现，同时对比两树种相关邻体竞争特征。**【结果】**(1)侧柏和油松的整体最适邻体范围接近，且均表现为小径级个体的最适邻体范围较大，随着胸径增大总体下降并趋于稳定的变化规律。(2)四邻体法在同一小班内检出的相同竞争指数显著差异项少于逐步扩大半径法，且四邻体法所得竞争指数与胸径、树高、冠幅的相关性和拟合优度普遍高于逐步扩大半径法，与对象木林木因子的关联更为紧密。表明四邻体法更适合作为后续邻体竞争指数与林木因子评价的主要依据。(3)在基于四邻体法下的 7 类邻体竞争指数中，综合竞争指数(CI-DHW)与多个林木因子的相关性和拟合表现整体较好，表明综合 3 个林木因子的 CI-DHW 对邻体竞争强度的综合表征更好。(4)在四邻体法下，相较于树高与冠幅，胸径与邻体竞争指数的关联程度整体更高，显示出较好的基础指示潜力，侧柏冠幅和油松树高作为辅助判断因子。**【结论】**在本研究林分条件下，侧柏和油松人工林邻体竞争强度评价中的最适宜竞争木选择方法、基础指示因子和邻体竞争指数分别为四邻体法、胸径和 CI-DHW，研究结果可为目标木竞争识别和邻体调控等抚育措施提供依据。

关键词：侧柏；油松；人工林；最适邻体范围；邻体竞争指数；干扰效应；森林经营；科学抚育
中图分类号：S757 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)10−0073−13
引文格式：黄娟灵，耿燕，陈贝贝，等. 北京山区侧柏和油松人工林邻体干扰研究 [J]. 北京林业大学学报，2026，48(10)：73−85. Huang Juanling, Geng Yan, Chen Beibei, et al. Neighbor interference of *Platycladus orientalis* and *Pinus tabuliformis* plantations in Beijing mountainous areas[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(10): 73−85.

Neighbor interference of *Platycladus orientalis* and *Pinus tabuliformis* plantations in Beijing mountainous areas

Huang Juanling[1] Geng Yan[1,2] Chen Beibei[1,2] Jiang Jun[1,2] Wang Aoxue[3] Zhang Yong[4] Li Yang[4]
(1. School of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Research Center of Forest Management Engineering of State Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
3. Beijing Xishan Experimental Forest Farm Management Office, Beijing 100093, China;
4. Beijing Ming Tombs Forest Farm Management Office, Beijing 102200, China)

收稿日期: 2025−09−22 **修回日期:** 2026−02−04
基金项目: 北京山区生态林经营管理支撑项目(2024-LYZ-01-007)，国家自然科学基金项目(32171521)。
第一作者: 黄娟灵。主要研究方向：人工林经营。Email: juanlinghuang123@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: 姜俊，副教授。主要研究方向：人工林经营和作业法设计。Email: jiang@bjfu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

Abstract: [**Objective**] Neighborhood competition evaluation is fundamental to target-tree selection, density regulation, and silvicultural tending in plantations, while competitor selection methods and competition index construction directly influence competition intensity assessment. This study aimed to identify suitable methods for evaluating neighborhood competition in *Platycladus orientalis* and *Pinus tabuliformis* plantations in Beijing mountainous areas, and to analyze the competition characteristics of both species, with the aim of informing competition assessment, neighborhood spatial regulation, and tending thinning in plantations. [**Method**] Based on tree-mapped survey data from 15 sample plots of pure *Platycladus orientalis* and *Pinus tabuliformis* plantations in the Ming Tombs area of Beijing, trees with DBH ⩾ 4 cm were defined as subject trees, and edge correction was conducted using the plot translation method. Competitor trees were identified using the four-neighbor method and the gradually increasing radius method, respectively; for the gradually increasing radius method, segmented linear fitting was used to determine the optimal neighborhood ranges at the species and diameter-class levels, and paired *t*-tests were used to compare the two species. Based on the Hegyi competition index, seven types of neighborhood competition indices were constructed using DBH, tree height, crown width, and their combinations. The suitability of the two competitor-tree selection methods was evaluated by comparing among-plot differences in competition indices, as well as the correlations and fitting performance between competition indices and tree attributes. Under the selected method, the performance of different competition indices and tree attributes in characterizing neighborhood competition was further evaluated, and neighborhood competition characteristics were compared between the two species. [**Result**] (1) The overall optimal neighborhood ranges of *Platycladus orientalis* and *Pinus tabuliformis* were similar. For both species, the optimal neighborhood range was larger for small-diameter trees and generally decreased and tended to stabilize with increasing DBH. (2) Comparisons among plots within the same compartment showed that the four-neighbor method detected fewer significant differences in competition intensity than the gradually increasing radius method. The overall analysis across all sample plots showed that competition indices derived from the four-neighbor method generally had stronger correlations and higher goodness of fit with DBH, tree height, and crown width of subject trees. These results indicated that the four-neighbor method was more suitable as the main basis for the subsequent evaluation of neighborhood competition indices and tree attributes. (3) Among the seven types of neighborhood competition indices based on the four-neighbor method, CI-DHW generally showed good correlations and fitting performance with multiple tree attributes, indicating that CI-DHW, which integrates three tree attributes, provided a better overall characterization of neighborhood competition intensity. (4) Under the four-neighbor method, DBH generally showed stronger associations with neighborhood competition indices than tree height and crown width, indicating its potential as a basic indicator of neighborhood competition, with crown width of *Platycladus orientalis* and tree height of *Pinus tabuliformis* as auxiliary judging factors. [**Conclusion**] Under the studied stand conditions, the most suitable competitor-tree selection method, basic indicator, and neighborhood competition index for evaluating neighborhood competition intensity in *Platycladus orientalis* and *Pinus tabuliformis* plantations were the four-neighbor method, DBH, and CI-DHW, respectively. These results can provide a basis for target-tree competition identification, neighborhood regulation, and related tending practices.

Key words: *Platycladus orientalis*; *Pinus tabuliformis*; plantation; optimal neighborhood range; neighborhood competition index; disturbance effect; forest management; scientific tending

林木邻体干扰是森林生态过程中的重要驱动力之一，主要表现为林木个体间对光照、水分、养分等生境资源的竞争[1−2]。这种竞争深刻影响着林木的生长速率、形态建成(如干形、冠幅)甚至存活率[3−4]，从而影响森林群落的组成、结构、动态与生产力[5]。对于人工林而言，由于树种组成相对单一、初植密度较高、空间配置较规则，种内邻体竞争往往更为突出。量化人工林邻体竞争强度，对于预测林分发展以及制定科学的森林经营方案至关重要。

在量化邻体竞争强度前，需获取竞争木，即在一定空间范围内对目标木生长产生实际影响的邻近木。竞争木选择方法能够影响邻体竞争的评估，竞争木

不同，竞争指数的大小、变异特征及其与林木生长指标之间的关系均会受到影响[6]。现有研究中常用的竞争木确定方法包括冠幅重叠法、Voronoi 图法、固定株数法、逐步扩大半径法等。冠幅重叠法依据林冠是否重叠及其对光照分配的影响来判断竞争关系[7]，但其结果可能受到冠幅形状及测量误差的影响。固定株数法以距离对象木最近的若干株林木作为竞争木，强调近邻个体的直接作用。惠刚盈等[8]研究表明，与选择 8 株邻近木相比，选择 4 株邻近木在简化计算的同时仍能较好表征邻体竞争。逐步扩大半径法则基于竞争效应随树间距离增加而衰减的假设，通过逐渐扩大搜索范围确定有效邻域边界[9]。因此，固定株数法侧重于最近邻木的直接竞争作用，逐步扩大半径法侧重于竞争效应的空间衰减过程。然而，在具体人工林条件下，固定株数法与逐步扩大半径法的适用性比较研究仍较少，二者对局部林分密度和空间结构变化的响应，以及对单木邻体竞争状态的表征能力，仍需进一步明确。

获取竞争木后，需考虑何种竞争因子能构建可靠、合理的竞争指数反映邻体竞争强度。邻体竞争受到树木大小、种类、相对位置和生态特征等影响，因此邻体竞争指数往往纳入参与竞争的个体大小和距离因素[2]。距离依赖型竞争指数通常以树木大小和树间距离共同表征竞争压力[10]。表征参与竞争个体大小的方式很多，如胸径比值[11]、冠幅重叠面积[12]和生长空间重叠[13]等。Hegyi 竞争指数以竞争木与对象木的胸径比值表征个体大小优势，并通过树间距离反映竞争效应的空间衰减，是目前应用较广的距离依赖型竞争指数之一[11]。此外，研究者进一步将冠幅重叠、生长空间和交角等因子纳入竞争指数构建，以反映林木在水平方向、垂直方向和空间结构中的竞争关系。例如，冠幅重叠面积能够反映林冠空间交叠及其对光照分配的影响[12]，生长空间竞争指数从林木生长空间占用角度刻画个体间竞争[13]，基于交角的竞争指数则进一步考虑了相邻木与对象木之间的空间方位关系[8]。这些研究表明，邻体竞争指数已经由单一大小因子逐渐发展为融合胸径、树高、冠幅和空间关系的多维指标体系。然而，不同因子及其组合所构建的竞争指数具有不同的生态含义，其对邻体竞争强度的表征能力仍需结合具体树种和林分条件进行检验。

北京山区的森林是首都重要的生态源地和生态屏障，承担水源涵养、防风固沙和生物多样性保护等生态服务功能[14]。而侧柏（*Platycladus orientalis*）和油松（*Pinus tabuliformis*）作为北京山区及华北地区常见的针叶人工林树种，是区域生态公益林和水土保持林的重要树种组成类型。北京山区油松和侧柏人工林普遍存在初植密度较高、抚育不足等情况，林木邻体作用较为明显，并伴有林分生长衰弱等问题[15−16]。为改善北京山区油松和侧柏人工林林分结构，前人[17−18]已对其林木个体间竞争开展了相关研究，但大多集中于北京油松人工林中竞争指数适用性评价，而油松邻体竞争评价方法和营林措施是否可应用于侧柏还未可知。此外，现有研究[19]多侧重于既有竞争指数的应用或特定竞争特征的比较，对竞争木选择方法适用性和不同竞争指数表征能力比较的研究有待补充；同时，对两树种最适邻体范围以及其林木因子与邻体竞争的关联特征也缺乏系统比较。

基于此，本研究以北京十三陵地区侧柏和油松人工纯林为对象，首先确定两树种最适邻体范围，并比较四邻体法与逐步扩大半径法在邻体竞争指数的样地间表现及其与林木因子关联方面的差异，以评价不同竞争木选择方法的适用性；基于筛选出的最适竞争木选择方法，比较不同竞争指数的分布特点及其对不同林木因子的表征能力；并结合两树种在邻体范围和邻体竞争与林木因子关联上的差异，分析树种邻体竞争特征。本研究通过系统比较侧柏和油松人工林的邻体竞争范围、竞争指数和林木因子竞争响应差异，旨在筛选合适的邻体竞争测度因子，制定树种特异的经营方案，提高北京山区人工林的经营应用价值和生态价值。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

研究区位于北京市十三陵林场（40°21′～40°23′N，115°50′～116°29′E）。区域海拔 100～200 m，为北温带季风气候，冬春季节干燥多风，夏季炎热，降水分布不均。林区山地大部分岩石裸露，土层厚度一般在 20～40 cm，含石砾量 40% 以上，土壤属褐土类，其水分条件差，肥力低，保墒能力弱。研究区主要研究的森林类型为侧柏和油松中幼龄人工林，伴生黄栌（*Cotinus coggygria*）、元宝枫（*Acer truncatum*）等。

1.2　研究方法

1.2.1　样地设置与林木调查

本研究于 2021 年 10 月对十三陵林场进行野外踏查。综合考虑研究区域内林相结构、林分面积分布和样地代表性，共布设 15 块样地：侧柏人工林 12 块（11 号小班 2 块，12 号小班 4 块，13 号、15 号小班各 3 块）；油松人工林 3 块（25 号小班 1 块，35 号小班 2 块）。

样地调查时，对样地内乔木逐株编号，并将样地

划分为 25 个 5.2 m × 5.2 m 的小样方。以小样方西南角为原点，建立东西方向为 x 轴、南北方向为 y 轴的局部坐标系，对样地内林木进行定位。对胸径 1 cm 及以上的林木测定胸径、树高和冠幅，其中冠幅采用东西向和南北向 2 个方向测定值的平均值表示；同时记录树种、坡度、坡向等样地和林木基本信息。样地基本情况见表 1。为说明两树种对象木大小分布特征，并为后续按径阶确定最适邻体范围提供依据，本研究以 2 cm 为径阶距，采用上限排外法统计各样地对象木胸径分布，并绘制径阶结构图。

1.2.2 对象木与潜在竞争木确定

为确保邻体竞争分析的研究对象为稳定生长个体，并完整保留其周围潜在竞争来源，本研究将样地内胸径 4 cm 及以上的侧柏和油松确定为对象木，用于后续竞争指数计算和统计分析；样地内其他杂木以及胸径小于 4 cm 的侧柏和油松不作为对象木，仅作为潜在竞争木参与竞争木筛选。

为减小样地边缘效应对竞争木筛选的影响，本研究采用样地平移法进行边缘校正(图 1)。具体而言，将样地内林木按照相对坐标向周围 8 个方向进行平移扩展，平移后的林木仅作为潜在竞争木，不作为对象木参与统计分析。该处理可为边缘对象木提供相对完整的邻体搜索空间，从而降低边缘效应对竞争木筛选和竞争指数计算的影响。

1.2.3 有效竞争木选择及两树种最适邻体范围比较

本研究分别采用四邻体法和逐步扩大半径法确定有效竞争木。四邻体法以对象木周围距离最近的 4 株邻近木作为有效竞争木，该方法假设最近邻木对对象木产生直接空间作用。已有研究[8]表明，4 株邻近木能够较好表征邻体竞争关系，且计算简便、结构单元清晰。逐步扩大半径法通过逐步扩大竞争木搜索范围，随即借助搜索范围内竞争强度变化拐点对应的半径来确定最适邻体范围。具体来说，以每株对象木为中心，从 1 m 半径开始，以 0.5 m 为步长逐步扩大竞争木搜索范围，绘制搜索范围内单株竞争木对对象木产生的平均竞争强度(以不同范围内的综合竞争指数指示)随搜索半径变化的分段拟合曲线，并将两段拟合直线交点对应的搜索半径判定为最适邻体范围，该范围内的邻近木被视为有效竞争木。

随后，对比分析侧柏和油松在逐步扩大半径法下获取的最适邻体范围。本研究分别从树种整体水平和径阶水平上计算侧柏、油松的最适邻体范围，其中径阶距为 2 cm，采用上限排外法划分。此外，对侧柏和油松相同径阶对应的最适邻体范围采用配对 t 检验，以判断两树种最适邻体范围是否存在显著差异。

1.2.4 邻体竞争指数计算

基于上述四邻体法和逐步扩大半径法确定的不同有效竞争木，以及逐步扩大半径法下确定的最适邻体范围，本研究以 Hegyi 竞争指数[11]为基础，分别利用胸径、树高、冠幅及其组合构建 7 类竞争指数(表 2)，通过比较 2 种方法下的邻体竞争指数样地差异，评价筛选北京山区侧柏和油松人工林的最优

表 1 样地基本信息表

Tab. 1 Site information of sampling plots

样地	主要树种	坡度/(°)	坡向	平均林龄/a	平均密度/(株·hm^{-2})	郁闭度	平均胸径/cm	平均树高/m	平均冠幅/m
11-1	侧柏 *Platycladus orientalis*	40	西	45	1 272	0.5	10.8 ± 0.3	6.1 ± 0.1	2.6 ± 0.1
11-2	侧柏 *Platycladus orientalis*	40	西	45	1 488	0.7	10.5 ± 0.3	6.2 ± 0.1	2.6 ± 0.1
12-1	侧柏 *Platycladus orientalis*	40	西北	24	1 774	0.6	10.9 ± 0.3	8.7 ± 0.2	2.5 ± 0.1
12-2	侧柏 *Platycladus orientalis*	40	西北	24	1 980	0.6	10.7 ± 0.3	8.7 ± 0.3	2.4 ± 0.1
12-3	侧柏 *Platycladus orientalis*	40	西北	24	1 435	0.4	10.9 ± 0.3	6.8 ± 0.1	1.9 ± 0.1
12-4	侧柏 *Platycladus orientalis*	40	西北	24	2 071	0.7	10.2 ± 0.3	6.7 ± 0.2	2.1 ± 0.1
13-1	侧柏 *Platycladus orientalis*	30	西南	28	1 113	0.6	11.8 ± 0.4	7.3 ± 0.1	2.4 ± 0.1
13-2	侧柏 *Platycladus orientalis*	30	西南	28	1 247	0.8	13.2 ± 0.4	9.6 ± 0.3	3.8 ± 0.2
13-3	侧柏 *Platycladus orientalis*	30	西南	28	1 449	0.6	12.1 ± 0.4	7.3 ± 0.1	2.7 ± 0.1
15-1	侧柏 *Platycladus orientalis*	40	西南	26	1 460	0.4	11.6 ± 0.4	6.6 ± 0.2	2.1 ± 0.1
15-2	侧柏 *Platycladus orientalis*	40	西南	26	828	0.3	12.7 ± 0.4	7.0 ± 0.1	2.1 ± 0.1
15-3	侧柏 *Platycladus orientalis*	40	西南	26	2 122	0.7	14.0 ± 0.4	9.1 ± 0.3	3.5 ± 0.2
25-1	油松 *Pinus tabuliformis*	40	西北	45	1 215	0.6	15.4 ± 0.6	10.9 ± 0.4	3.3 ± 0.1
35-1	油松 *Pinus tabuliformis*	40	西北	46	961	0.4	17.3 ± 0.7	11.2 ± 0.4	3.1 ± 0.1
35-2	油松 *Pinus tabuliformis*	40	西北	46	1 213	0.7	15.2 ± 0.5	8.6 ± 0.3	4.1 ± 0.2

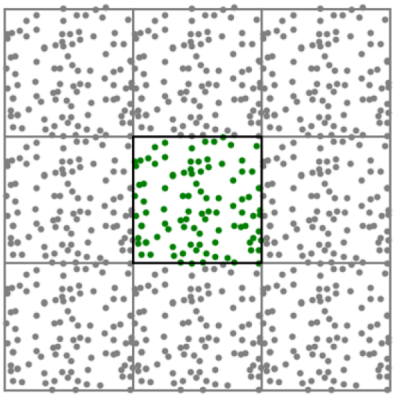


图 1　边缘效应消除示意图

Fig. 1　Edge correction plot diagram

竞争木选择方法。

为减少不同树种、林龄和立地背景对方法比较的干扰，本研究重点关注同一小班内不同样地竞争指数差异的检出特征。在比较前，检验各类竞争指数的正态性和方差齐性；满足参数检验条件时，以单因素方差分析（ANOVA）比较样地间差异，当总体差异显著时进而使用最小显著性差异法（LSD）多重比较。

1.2.5　各树种整体邻体竞争指数与林木因子关系

基于上述同一小班内样地差异的检出特征结果，进一步分别以线性函数、指数函数和幂函数拟合 2 种方法下各竞争指数与对象木胸径、树高和冠幅的数量关系，以决定系数（R^2）判断拟合效果（R^2 越大，拟合效果越好），同时结合 Spearman 相关性分析探究各树种整体邻体竞争指数与林木因子的相关性。

最终综合邻体竞争指数样地差异（详见 1.2.4 ）和邻体竞争指数与林木因子的关系 2 个维度结果，确定后续竞争指数和林木因子评价所采用的最佳竞争木选择方法。

表 2　7 类邻体竞争指数

Tab. 2　Seven types of neighborhood competition indices

邻体竞争指数	公式
胸径竞争指数（CI_i-D）	$CI_i\text{-}D = \sum_{j=1}^{n} \frac{D_j}{D_i \times d_{i,j}}$
树高竞争指数（CI_i-H）	$CI_i\text{-}H = \sum_{j=1}^{n} \frac{H_j}{H_i \times d_{i,j}}$
冠幅竞争指数（CI_i-W）	$CI_i\text{-}W = \sum_{j=1}^{n} \frac{W_j}{W_i \times d_{i,j}}$
胸径−树高竞争指数（CI_i-DH）	$CI_i\text{-}DH = \sum_{j=1}^{n} \frac{D_j \times H_j}{D_i \times H_i \times d_{i,j}}$
胸径−冠幅竞争指数（CI_i-DW）	$CI_i\text{-}DW = \sum_{j=1}^{n} \frac{D_j \times W_j}{D_i \times W_i \times d_{i,j}}$
树高−冠幅竞争指数（CI_i-HW）	$CI_i\text{-}HW = \sum_{j=1}^{n} \frac{H_j \times W_j}{H_i \times W_i \times d_{i,j}}$
综合竞争指数（CI_i-DHW）	$CI_i\text{-}DHW = \sum_{j=1}^{n} \frac{D_j \times H_j \times W_j}{D_i \times H_i \times W_i \times d_{i,j}}$

注：i表示对象木，j表示竞争木，$d_{i,j}$表示对象木与竞争木之间的距离，n表示竞争木数量，D、H、W分别表示胸径、树高和冠幅。

1.2.6　邻体竞争指数和林木因子评价

进一步分析筛选出的最佳竞争木选择方法下的邻体竞争指数与林木因子的关系，探究指示邻体竞争强度的最优竞争指数和最适林木因子。

具体来说，邻体竞争指数评价首先基于树种整体邻体竞争指数与林木因子关系，比较 7 类指数与对象木胸径、树高和冠幅的 Spearman 相关系数绝对值及相对适宜函数的决定系数（R^2）。若某一邻体竞争指数在多个林木因子上均表现出相对较高的相关程度和拟合优度，则认为其具有较好的综合表征表现。同时统计各类指数均值、最小值和最大值，以展示其具体数值分布特征和潜在生态学意义。

林木因子评价是基于树种整体邻体竞争指数与林木因子关系，但考虑到林木因子直接参与邻体竞争指数构建，为防止自相关性影响，此部分重点对比林木因子与不包含自身变量的其他 3 类邻体竞争指数的 Spearman 相关系数绝对值及 R^2 均值，若某林木因子表现的相关性和拟合优度在两树种中均最高，则认为该林木因子有较好的基础指示价值。

2　结果与分析

2.1　样地调查

样地中的侧柏和油松径阶分布情况如图 2 所示。样地中侧柏（图 2a）的胸径主要集中在 8 ~ 16 cm 的区间，油松（图 2b）的胸径主要集中在 12 ~ 22 cm 区间。相较油松，侧柏小径级（DBH < 10 cm）占比较高，20 cm 以上胸径的植株较少；相较侧柏，油松较大径级（DBH > 16 cm）占比较高，平均胸径更大。上述径阶结构差异说明，两树种对象木大小分布存在一定差异，可为后续按径阶分析最适邻体范围及树种间竞争响应差异提供基础。

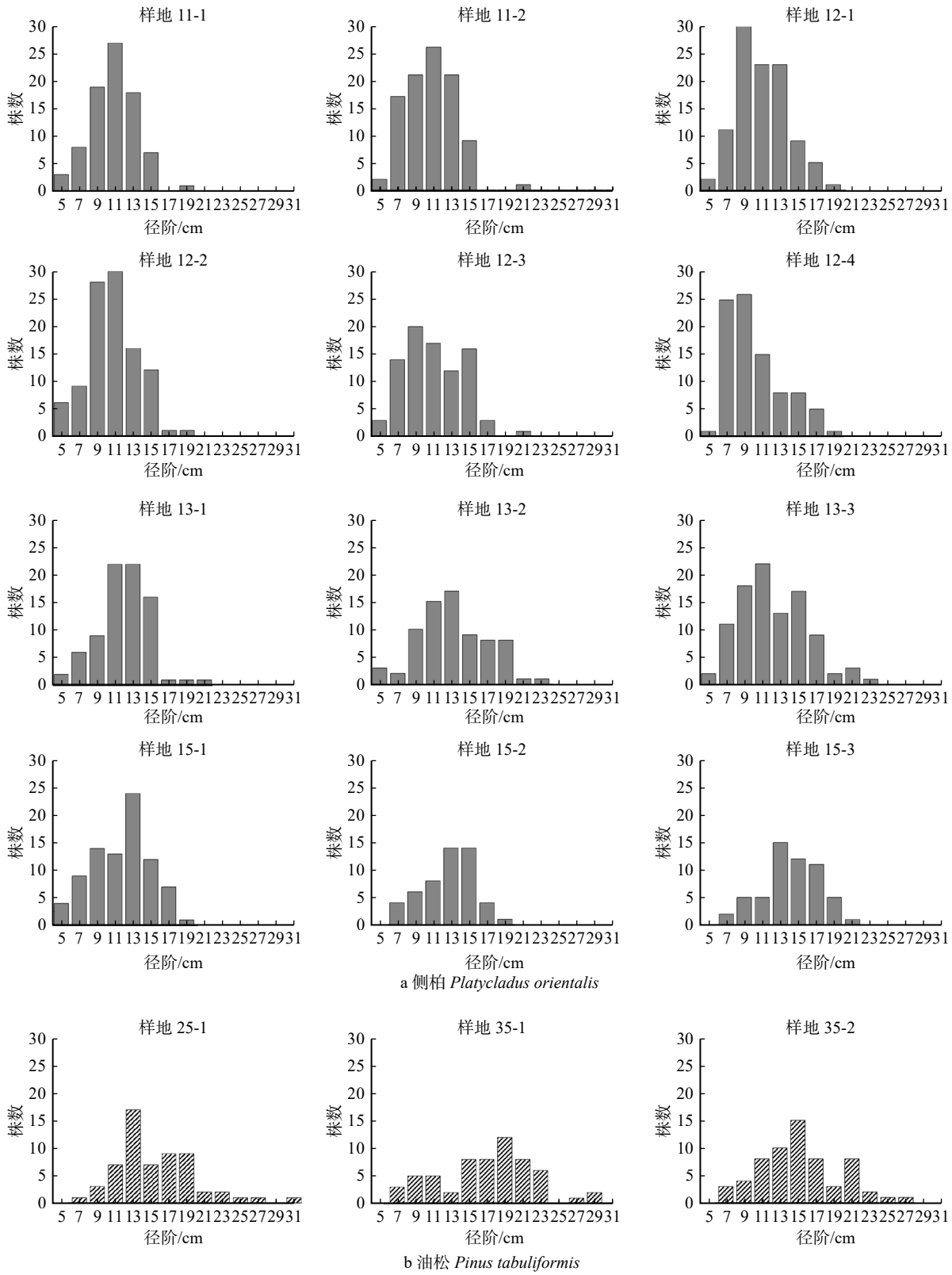
2.2　最适邻体范围对比分析

2.2.1　侧柏和油松的最适邻体范围

将同一树种所有对象木作为整体，油松和侧柏的邻体竞争强度均随搜索半径增加而下降（图 3）。侧柏的最适邻体范围为 2.451 m（图 3a），油松的最适邻体范围为 2.411 m（图 3b），后续两树种分别以上述最适邻体范围值作为半径筛选逐步扩大半径法的竞争木。

2.2.2　最适邻体范围的径阶规律及种间比较

分析不同径级对象木的最适邻体范围结果显示：油松和侧柏 2 树种表现出相似的变化规律，均表现为小径级个体（DBH < 10 cm）的最适邻体范围普遍



a 侧柏 *Platycladus orientalis*

b 油松 *Pinus tabuliformis*

图 2 侧柏和油松径阶结构分布

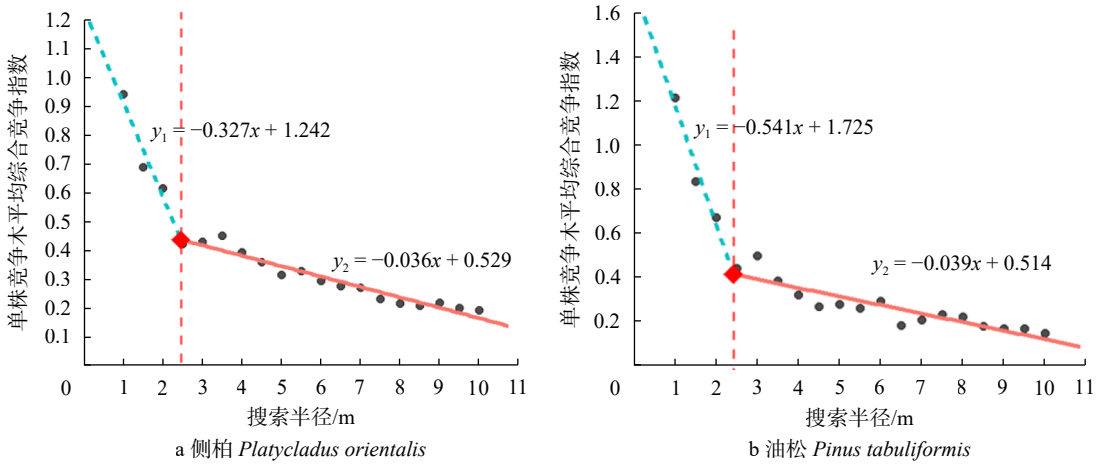
Fig. 2 Diameter distribution of *Platycladus orientalis* and *Pinus tabuliformis* in the sampling plots

大于大径级个体，随着径阶增大，2 树种最适邻体范围总体下降并趋于稳定(表 3，表 4)。对 2 树种相同径阶的最适邻体范围进行配对 t 检验后，差异不显著($P > 0.05$)，表明在本研究条件下侧柏和油松最适邻体范围可能较相似。

2.3 竞争木选择方法对比分析

2.3.1 各类邻体竞争指数差异

总体来看，四邻体法在同一小班内检出的相同竞争指数显著差异项少于逐步扩大半径法。具体表现为四邻体法下，侧柏仅在 12 号小班 12-3 与 12-4



a 侧柏 *Platycladus orientalis*　　b 油松 *Pinus tabuliformis*

图 3　单株竞争木平均综合竞争指数与搜索半径的关系

Fig. 3　Relationship between the average comprehensive competition index per competitor tree and search radius

样地间检出 CI-HW 显著差异(表 5),油松各竞争指数均未检出样地间显著差异(表 6);逐步扩大半径法下,侧柏除在 12 号小班 12-3 与 12-4 样地间检出 CI-W 和 CI-HW 显著差异外,还在 15 号小班检出 15-1 与 15-2 样地间 CI-D、CI-W 和 CI-DW 的显著差异,以及 15-1 与 15-3 样地间 CI-DH 的显著差异(表 7);油松各竞争指数仍未检出样地间显著差异(表 8)。四邻体法所得竞争指数在相似林分条件下的样地间波动较弱,可能表明其对同一小班内样地差异容忍性更高;逐步扩大半径法检出的显著差异项较多,暗示其对局部密度和邻体空间分布变化可能更为敏感。2 种方法在样地差异检出方面呈现不同特征,但其适用性需结合竞争指数与林木因子的关联结果综合判断。

表 3　不同径阶侧柏最适邻体范围

Tab. 3　Optimal neighbor ranges for different DBH classes of *Platycladus orientalis*

径阶/cm	方程1	方程2	最适邻体范围/m
5	$y = -0.785x + 4.481$	$y = -0.098x + 1.883$	3.787
7	$y = -0.428x + 2.203$	$y = -0.062x + 1.040$	3.173
9	$y = -0.244x + 1.186$	$y = -0.039x + 0.606$	2.833
11	$y = -0.299x + 0.916$	$y = -0.021x + 0.335$	2.087
13	$y = -0.097x + 0.419$	$y = -0.019x + 0.262$	2.000
15	$y = -0.125x + 0.441$	$y = -0.013x + 0.196$	2.191
17	$y = -0.095x + 0.275$	$y = -0.005x + 0.108$	1.853
19	$y = -0.046x + 0.184$	$y = -0.004x + 0.085$	2.383
21	$y = -0.289x + 0.601$	$y = -0.005x + 0.091$	1.794

表 4　不同径阶油松最适邻体范围

Tab. 4　Optimal neighbor ranges for different DBH classes of *Pinus tabuliformis*

径阶/cm	方程1	方程2	最适邻体范围/m
7	$y = -3.129x + 12.239$	$y = -0.163x + 2.349$	3.334
9	$y = -3.054x + 10.856$	$y = -0.134x + 2.104$	2.997
11	$y = -0.352x + 1.248$	$y = -0.024x + 0.494$	2.298
13	$y = -0.314x + 1.079$	$y = -0.022x + 0.386$	2.379
15	$y = -0.706x + 1.837$	$y = -0.035x + 0.457$	2.057
17	$y = -0.110x + 0.464$	$y = -0.017x + 0.257$	2.229
19	$y = -0.411x + 1.050$	$y = -0.013x + 0.200$	2.139
21	$y = -0.359x + 1.086$	$y = -0.026x + 0.380$	2.123
23	$y = -0.065x + 0.220$	$y = -0.002x + 0.076$	2.278

表 5 四邻体法得到的侧柏各样地邻体竞争指数平均值

Tab. 5 Average intensity of different neighborhood competition indices of *Platycladus orientalis* at plots by the four-neighbor method

样地	对象木数量	CI-D	CI-H	CI-W	CI-DH	CI-DW	CI-HW	CI-DHW
11-1	83	2.77 ± 0.24 abc	2.74 ± 0.24 abc	2.91 ± 0.27 abc	3.16 ± 0.36 abcd	3.49 ± 0.45 ab	3.38 ± 0.42 ab	4.48 ± 0.83 abc
11-2	98	2.50 ± 0.16 abc	2.43 ± 0.14 abc	2.52 ± 0.15 abc	2.87 ± 0.21 abcd	3.07 ± 0.24 abc	2.97 ± 0.23 abc	3.91 ± 0.42 abcd
12-1	107	2.79 ± 0.21 ab	2.79 ± 0.22 ab	3.24 ± 0.36 ab	3.04 ± 0.25 abc	4.10 ± 0.56 ab	3.59 ± 0.41 ab	4.83 ± 0.68 abc
12-2	103	2.93 ± 0.14 a	2.90 ± 0.15 a	3.18 ± 0.19 ab	3.30 ± 0.22 ac	3.89 ± 0.32 a	3.65 ± 0.29 ab	4.82 ± 0.50 ab
12-3	86	2.76 ± 0.23 ab	2.48 ± 0.18 abc	2.57 ± 0.19 abcd	3.03 ± 0.28 abcd	3.38 ± 0.36 ab	2.71 ± 0.21 bc	3.92 ± 0.51 abcd
12-4	85	3.26 ± 0.25 a	3.28 ± 0.25 a	3.74 ± 0.34 a	4.28 ± 0.39 a	4.98 ± 0.53 a	4.98 ± 0.56 a	7.69 ± 1.06 a
13-1	81	2.16 ± 0.16 bcd	1.94 ± 0.07 cd	1.99 ± 0.10 cd	2.26 ± 0.19 bde	2.42 ± 0.24 bcd	2.03 ± 0.11 cd	2.58 ± 0.28 cd
13-2	74	2.27 ± 0.18 abcd	2.18 ± 0.16 bcd	2.40 ± 0.21 bcd	2.58 ± 0.25 bcd	3.10 ± 0.38 abc	2.68 ± 0.27 bcd	3.77 ± 0.57 abcd
13-3	98	2.72 ± 0.24 abc	2.56 ± 0.22 abc	2.73 ± 0.25 abcd	2.90 ± 0.26 abcd	3.34 ± 0.31 ab	2.93 ± 0.27 abc	3.78 ± 0.39 bc
15-1	74	2.87 ± 0.40 abcd	2.78 ± 0.43 abcd	2.76 ± 0.39 abcd	3.11 ± 0.57 abcde	2.94 ± 0.43 abcd	2.82 ± 0.49 abcd	3.30 ± 0.66 bcd
15-2	51	1.85 ± 0.13 cd	1.89 ± 0.12 cd	1.87 ± 0.11 d	1.97 ± 0.20 de	1.92 ± 0.17 cd	1.91 ± 0.15 cd	2.08 ± 0.27 d
15-3	56	1.60 ± 0.11 d	1.53 ± 0.12 d	1.87 ± 0.19 cd	1.33 ± 0.16 e	1.58 ± 0.25 d	1.57 ± 0.26 d	1.77 ± 0.41 d

注：不同字母表示同一竞争指数均值在不同样地间差异显著（$P < 0.05$）。下同。

表 6 四邻体法得到的油松各样地邻体竞争指数平均值

Tab. 6 Average intensity of different neighborhood competition indices of *Pinus tabuliformis* at plots by the four-neighbor method

样地	对象木数量	CI-D	CI-H	CI-W	CI-DH	CI-DW	CI-HW	CI-DHW
25-1	60	2.27 ± 0.16 a	2.11 ± 0.14 a	2.31 ± 0.15 a	2.50 ± 0.20 a	2.93 ± 0.29 a	2.70 ± 0.28 a	3.77 ± 0.75 a
35-1	55	2.84 ± 0.40 a	2.79 ± 0.38 a	2.90 ± 0.44 a	3.12 ± 0.50 a	3.45 ± 0.62 a	3.24 ± 0.54 a	4.38 ± 0.93 a
35-2	62	2.36 ± 0.18 a	2.31 ± 0.16 a	2.52 ± 0.21 a	2.75 ± 0.36 a	3.02 ± 0.38 a	2.91 ± 0.37 a	3.97 ± 0.80 a

2.3.2 各类邻体竞争指数与林木因子的关联表现比较

各类竞争指数与对象木胸径、树高和冠幅的关系均以幂函数拟合最优（表 9，表 10），因此均使用幂函数展示各类邻体竞争指数与林木因子的数量关系。结果（表 9，表 10）显示：在相同树种、竞争指数和林木因子的对应比较中，四邻体法所得竞争指数与胸径、树高、冠幅的相关系数绝对值及模型决定系数（R^2）普遍高于逐步扩大半径法，表明其与对象木林木因子的关联更为紧密，也能更稳定地被现有模型指示。

综合 2 种方法下同一小班内样地差异检出情况和邻体竞争指数与林木因子的关联表现，四邻体法在本研究林分条件中表现更优，后续邻体竞争指数与林木因子评价主要依据四邻体法。

2.4 四邻体法下邻体竞争指数与林木因子的评价

2.4.1 不同邻体竞争指数的总体表现

在四邻体法下，各类邻体竞争指数与对象木胸径、树高和冠幅总体呈负相关关系，说明邻体竞争强度总体随对象木个体增大而降低（表 9）。但不同竞争指数的数值分布存在差异。从总体特征看，单一林木因子竞争指数 CI-D、CI-H 和 CI-W 均值相近，双因子竞争指数 CI-DH、CI-DW 和 CI-HW 的均值及取值范围整体略高于单因子指数，而综合竞争指数 CI-DHW 在两树种中均表现出较大的均值和取值范围，显示出较宽的数值分布（表 11）。结合 CI-DHW 与林木因子的相关性及拟合优度较其他单林木因子或双林木因子的邻体竞争指数更高（表 9），表明相较 1 个或 2 个林木因子，综合 3 个林木因子的 CI-DHW 对邻体竞争强度的综合表征更好。

2.4.2 胸径、树高和冠幅的指示表现

在排除自相关性后，对比分析各林木因子对其他不含自身变量的邻体竞争指数的指示表现，结果（表 12）发现，2 树种均表现出胸径的相关性和拟合优度最高。同时，胸径测量便利，显示出较好的基础指示潜力。在其余林木因子（树高和冠幅）中，2 树种指示表现存在差异：在侧柏中冠幅的相关系数绝对值和R^2均值仅次于胸径，展示出一定的辅助指示价值；而在油松中，树高则更有辅助指示价值。以上差异性表现可能由侧柏和油松不同种内竞争特性导致。

表 7　逐步扩大半径法得到的侧柏邻体竞争指数平均值

Tab. 7　Average intensity of different neighborhood competition indices of *Platycladus orientalis* at plots by the gradually expanding-radius method

样地	对象木数量	CI-D	CI-H	CI-W	CI-DH	CI-DW	CI-HW	CI-DHW
11-1	77	2.38 ± 0.26 abcd	2.37 ± 0.25 abc	2.49 ± 0.28 abcd	2.61 ± 0.30 abcd	2.84 ± 0.36 abcd	2.77 ± 0.35 abcd	3.40 ± 0.54 bcd
11-2	97	2.02 ± 0.17 bcd	1.95 ± 0.16 bcd	2.03 ± 0.17 cd	2.31 ± 0.21 bcd	2.49 ± 0.25 bcd	2.42 ± 0.24 bcd	3.20 ± 0.42 bcd
12-1	101	2.61 ± 0.24 abc	2.59 ± 0.24 ab	3.08 ± 0.39 abc	2.86 ± 0.28 abc	4.04 ± 0.65 abc	3.45 ± 0.45 abc	4.85 ± 0.82 abc
12-2	101	3.05 ± 0.20 a	2.96 ± 0.18 a	3.26 ± 0.23 ab	3.45 ± 0.32 ab	4.07 ± 0.43 ab	3.72 ± 0.34 ab	5.09 ± 0.73 ab
12-3	83	2.48 ± 0.26 abcd	2.20 ± 0.22 abcd	2.30 ± 0.23 bcd	2.71 ± 0.31 abcd	3.08 ± 0.39 abcd	2.43 ± 0.24 bcd	3.59 ± 0.53 abcd
12-4	83	3.64 ± 0.41 a	3.51 ± 0.35 a	3.96 ± 0.44 a	4.56 ± 0.56 a	5.15 ± 0.64 a	4.87 ± 0.55 a	7.21 ± 0.97 a
13-1	73	1.78 ± 0.21 bcd	1.46 ± 0.10 d	1.52 ± 0.12 d	1.87 ± 0.23 cd	2.08 ± 0.31 cd	1.55 ± 0.13 d	2.22 ± 0.35 cd
13-2	64	1.64 ± 0.20 cd	1.56 ± 0.19 cd	1.76 ± 0.22 cd	1.83 ± 0.25 cd	2.28 ± 0.36 bcd	1.95 ± 0.27 cd	2.76 ± 0.54 bcd
13-3	90	2.37 ± 0.28 abcd	2.22 ± 0.25 abcd	2.36 ± 0.27 abcd	2.53 ± 0.30 abcd	2.84 ± 0.34 abcd	2.50 ± 0.29 bcd	3.19 ± 0.41 bcd
15-1	72	4.60 ± 0.84 ab	4.45 ± 0.86 abc	4.49 ± 0.84 abc	4.71 ± 0.88 abc	4.67 ± 0.86 abc	4.46 ± 0.86 abcd	4.85 ± 0.91 abcd
15-2	47	1.56 ± 0.19 d	1.58 ± 0.18 cd	1.56 ± 0.17 d	1.67 ± 0.26 cd	1.61 ± 0.22 d	1.60 ± 0.21 d	1.77 ± 0.33 d
15-3	49	1.79 ± 0.16 bcd	1.71 ± 0.17 bcd	2.10 ± 0.24 cd	1.52 ± 0.21 d	1.74 ± 0.29 cd	1.78 ± 0.31 cd	2.05 ± 0.50 cd

表 8　逐步扩大半径法得到的油松样地邻体竞争指数平均值

Tab. 8　Average intensity of different neighborhood competition indices of *Pinus tabuliformis* at plots by the gradually expanding-radius method

样地	对象木数量	CI-D	CI-H	CI-W	CI-DH	CI-DW	CI-HW	CI-DHW
25-1	55	1.96 ± 0.18 a	1.83 ± 0.16 a	1.98 ± 0.18 a	2.26 ± 0.21 a	2.66 ± 0.33 a	2.42 ± 0.39 a	3.23 ± 0.49 a
35-1	46	2.39 ± 0.29 a	2.36 ± 0.36 a	2.43 ± 0.41 a	2.98 ± 0.38 a	3.15 ± 0.59 a	3.10 ± 0.54 a	3.93 ± 0.75 a
35-2	55	2.03 ± 0.24 a	2.07 ± 0.21 a	2.12 ± 0.25 a	2.67 ± 0.30 a	2.87 ± 0.46 a	2.85 ± 0.46 a	3.35 ± 0.52 a

表 9　各邻体竞争指数与对象木林木因子关系（四邻体法）

Tab. 9　Fitting results and correlation coefficients between forest factors and neighborhood competition indices by the four-neighbor method

树种	邻体竞争指数	胸径(D)				树高(H)				冠幅(W)			
		公式	R^2	P	相关系数	公式	R^2	P	相关系数	公式	R^2	P	相关系数
侧柏	CI-D	$y=29.203D^{-1.138}$	0.411	< 0.001	−0.662**	$y=5.089H^{-0.502}$	0.078	< 0.001	−0.346**	$y=3.128W^{-0.582}$	0.180	< 0.001	−0.464**
	CI-H	$y=9.479D^{-0.673}$	0.173	< 0.001	−0.439**	$y=6.038H^{-0.591}$	0.129	< 0.001	−0.426**	$y=2.727W^{-0.431}$	0.118	< 0.001	−0.384**
	CI-W	$y=16.285D^{-0.888}$	0.223	< 0.001	−0.498**	$y=4.543H^{-0.435}$	0.052	< 0.001	−0.272**	$y=4.211W^{-0.902}$	0.386	< 0.001	−0.625**
	CI-DH	$y=95.487D^{-1.576}$	0.457	< 0.001	−0.717**	$y=27.192H^{-1.275}$	0.208	< 0.001	−0.498**	$y=4.679W^{-0.895}$	0.233	< 0.001	−0.512**
	CI-DW	$y=177.560D^{-1.817}$	0.451	< 0.001	−0.707**	$y=19.492H^{-1.085}$	0.143	< 0.001	−0.370**	$y=7.466W^{-1.395}$	0.405	< 0.001	−0.651**
	CI-HW	$y=50.845D^{-1.308}$	0.292	< 0.001	−0.600**	$y=24.936H^{-1.225}$	0.202	< 0.001	−0.440**	$y=6.252W^{-1.222}$	0.399	< 0.001	−0.635**
	CI-DHW	$y=625.223D^{-2.379}$	0.540	< 0.001	−0.737**	$y=41.587H^{-1.524}$	0.215	< 0.001	−0.466**	$y=8.020W^{-1.575}$	0.409	< 0.001	−0.664**
油松	CI-D	$y=33.644D^{-1.065}$	0.310	< 0.001	−0.585**	$y=10.074H^{-0.743}$	0.156	< 0.001	−0.442**	$y=2.917W^{-0.397}$	0.072	< 0.001	−0.247**
	CI-H	$y=15.845D^{-0.790}$	0.195	< 0.001	−0.480**	$y=11.281H^{-0.796}$	0.205	< 0.001	−0.511**	$y=2.639W^{-0.313}$	0.051	0.003	−0.204**
	CI-W	$y=18.497D^{-0.828}$	0.183	< 0.001	−0.431**	$y=9.076H^{-0.678}$	0.127	< 0.001	−0.379**	$y=4.009W^{-0.640}$	0.182	< 0.001	−0.419**
	CI-DH	$y=226.210D^{-1.746}$	0.389	< 0.001	−0.625**	$y=65.006H^{-1.545}$	0.334	< 0.001	−0.570**	$y=4.538W^{-1.132}$	0.131	< 0.001	−0.337**
	CI-DW	$y=241.530D^{-1.750}$	0.355	< 0.001	−0.590**	$y=37.405H^{-1.276}$	0.207	< 0.001	−0.439**	$y=7.838W^{-1.183}$	0.289	< 0.001	−0.504**
	CI-HW	$y=125.190D^{-1.516}$	0.293	< 0.001	−0.536**	$y=47.113H^{-1.387}$	0.269	< 0.001	−0.523**	$y=6.923W^{-1.092}$	0.280	< 0.001	−0.493**
	CI-DHW	$y=1961.694D^{-2.527}$	0.539	< 0.001	−0.730**	$y=247.808H^{-2.114}$	0.390	< 0.001	−0.611**	$y=10.475W^{-1.448}$	0.295	< 0.001	−0.511**

注:**表示在0.01 水平上显著相关。下同。

表 10 各邻体竞争指数与对象木林木因子关系（逐步扩大半径法）

Tab. 10 Fitting results and correlation coefficients between forest factors and neighborhood competition indices by the gradually expanding-radius method

树种	邻体竞争指数	胸径（D）				树高（H）				冠幅（W）			
		公式	R^2	P	相关系数	公式	R^2	P	相关系数	公式	R^2	P	相关系数
侧柏	CI-D	$y=29.708D^{-1.197}$	0.190	< 0.001	−0.447**	$y=6.387H^{-0.668}$	0.049	< 0.001	−0.203**	$y=3.268W^{-0.773}$	0.116	< 0.001	−0.353**
	CI-H	$y=7.739D^{-0.641}$	0.060	< 0.001	−0.288**	$y=8.214H^{-0.806}$	0.079	< 0.001	−0.243**	$y=2.746W^{-0.588}$	0.074	< 0.001	−0.289**
	CI-W	$y=14.088D^{-0.876}$	0.099	< 0.001	−0.356**	$y=5.863H^{-0.616}$	0.040	< 0.001	−0.171**	$y=4.422W^{-1.115}$	0.232	< 0.001	−0.474**
	CI-DH	$y=19.279D^{-1.645}$	0.274	< 0.001	−0.547**	$y=23.160H^{-1.322}$	0.147	< 0.001	−0.357**	$y=4.145W^{-1.059}$	0.165	< 0.001	−0.429**
	CI-DW	$y=6.093D^{-1.891}$	0.303	< 0.001	−0.574**	$y=16.482H^{-1.127}$	0.090	< 0.001	−0.280**	$y=6.744W^{-1.590}$	0.313	< 0.001	−0.558**
	CI-HW	$y=11.468D^{-1.330}$	0.177	< 0.001	−0.467**	$y=21.107H^{-1.267}$	0.134	< 0.001	−0.321**	$y=5.560W^{-1.392}$	0.283	< 0.001	−0.524**
	CI-DHW	$y=479.625D^{-2.336}$	0.350	< 0.001	−0.621**	$y=59.823H^{-1.771}$	0.167	< 0.001	−0.374**	$y=8.619W^{-1.859}$	0.323	< 0.001	−0.566**
油松	CI-D	$y=35.675D^{-1.176}$	0.127	< 0.001	−0.330**	$y=6.274H^{-0.646}$	0.041	0.011	−0.206**	$y=2.409W^{-0.449}$	0.037	0.016	−0.159**
	CI-H	$y=16.525D^{-0.895}$	0.078	< 0.001	−0.277**	$y=8.720H^{-0.792}$	0.065	0.001	−0.272**	$y=2.209W^{-0.376}$	0.028	0.038	−0.142**
	CI-W	$y=22.654D^{-0.983}$	0.099	< 0.001	−0.294**	$y=5.353H^{-0.544}$	0.032	0.025	−0.188**	$y=3.785W^{-0.780}$	0.125	< 0.001	−0.322**
	CI-DH	$y=206.757D^{-1.843}$	0.211	< 0.001	−0.450**	$y=35.856H^{-1.438}$	0.137	< 0.001	−0.382**	$y=3.079W^{-0.718}$	0.064	0.001	−0.225**
	CI-DW	$y=272.759D^{-1.918}$	0.237	< 0.001	−0.408**	$y=22.861H^{-1.209}$	0.100	< 0.001	−0.313**	$y=5.251W^{-1.122}$	0.163	< 0.001	−0.382**
	CI-HW	$y=129.371D^{-1.648}$	0.189	< 0.001	−0.368**	$y=31.525H^{-1.354}$	0.136	< 0.001	−0.368**	$y=4.770W^{-1.046}$	0.152	< 0.001	−0.352**
	CI-DHW	$y=1685.955D^{-2.603}$	0.290	< 0.001	−0.518**	$y=138.729H^{-2.022}$	0.186	< 0.001	−0.429**	$y=6.739W^{-1.382}$	0.164	< 0.001	−0.387**

表 11 四邻体法下侧柏和油松各邻体竞争指数总体特征

Tab. 11 General characteristics of neighborhood competition indices of *Platycladus orientalis* and *Pinus tabuliformis* calculated by the four-neighbor method

邻体竞争指数	侧柏			油松		
	均值	最小值	最大值	均值	最小值	最大值
CI-D	2.61 ± 0.07 de	0.51	18.81	2.45 ± 0.15 b	0.36	13.92
CI-H	2.52 ± 0.06 e	0.53	23.12	2.39 ± 0.14 b	0.33	12.08
CI-W	2.72 ± 0.08 cde	0.49	30.40	2.57 ± 0.21 b	0.37	18.62
CI-DH	2.91 ± 0.09 bcd	0.27	35.37	2.78 ± 0.20 ab	0.11	14.99
CI-DW	3.31 ± 0.12 b	0.24	38.59	3.12 ± 0.29 ab	0.16	36.43
CI-HW	3.04 ± 0.10 bc	0.26	31.03	2.94 ± 0.25 ab	0.14	29.36
CI-DHW	4.08 ± 0.18 a	0.13	55.79	4.03 ± 0.47 a	0.05	49.77

表 12 四邻体法下排除自相关后的林木因子与邻体竞争指数关系

Tab. 12 Relationships between tree attributes and neighborhood competition indices after excluding autocorrelation by the four-neighbor method

树种	林木因子	保留邻体竞争指数	相关系数绝对值均值	R^2均值
侧柏	胸径	CI-H、CI-W、CI-HW	0.512	0.229
	树高	CI-D、CI-W、CI-DW	0.329	0.091
	冠幅	CI-D、CI-H、CI-DH	0.453	0.177
油松	胸径	CI-H、CI-W、CI-HW	0.482	0.224
	树高	CI-D、CI-W、CI-DW	0.420	0.163
	冠幅	CI-D、CI-H、CI-DH	0.263	0.085

3 讨 论

人工林中林木个体间的邻体竞争受林分密度、空间配置、个体大小分化和树种生物学特性等因素共同影响。对于北京山区侧柏和油松人工林而言，林分多具有树种组成相对单一、立地条件偏干旱瘠

薄、局部密度差异明显等特点[15]，邻体竞争可能成为影响单木生长和林分结构优化的重要因素。因此，合理评价邻体竞争不仅需要合适的邻体范围和竞争木选择方式，还取决于邻体竞争指数的构建以及不同林木因子的表征能力。

3.1　最适邻体范围及其生态意义

由逐步扩大半径法获取的最适邻体范围可反映邻体作用趋于稳定的空间边界，与对象木大小直接相关。本研究中，侧柏和油松小径级个体最适邻体范围较大，可能是由于其冠层高度、冠幅扩展和根系空间占用能力较弱，即使距离相对较远的邻体，也可能通过遮光、根系竞争或空间挤压产生影响[20]；随着径级增大，林木资源获取能力和空间占据能力增强，有效竞争范围总体减小并趋于稳定。

生境条件是影响邻体竞争范围的重要背景因素。本研究中侧柏和油松同处北京山区相似生境，两树种的最适邻体范围接近，提示在本研究条件下，生境条件对邻体范围的影响可能强于树种差异。同时，已有研究也发现类似结果，长白山地区冷杉（*Abies nephrolepis*）、云杉（*Picea koraiensis*）和红松（*Pinus koraiensis*）竞争范围均为 10 m[21]，而胡杨（*Populus euphratica*）在塔里木河下游与塔里木荒漠中的最适竞争范围分别为 10 m 和 6 m[22]。因此，最适邻体范围不应仅被理解为树种固有属性，而应放在具体立地、密度和林分发育阶段中综合判断。

从经营实践看，逐步扩大半径法确定的 2.4 ~ 2.5 m 最适邻体范围可作为北京山区侧柏和油松人工林目标木邻域调控的参考，但不宜机械理解为固定经营间距。本研究中，侧柏和油松，尤其是小径级林木的最适邻体范围大于造林时采用的初植株行距（1.0 m × 1.5 m 或 1.5 m × 2 m），反映出森林竞争具有明显的动态性和长期性。随着林木发育，树冠不断伸展，竞争范围能够跨越初始株行距，并形成对光照、水分和养分等资源的立体争夺[4, 22]。若后续抚育不及时，高初植密度可能持续增强邻体竞争，进而抑制树木生长和生物量积累[23]。

3.2　竞争木选择方法的适用性

四邻体法和逐步扩大半径法均在不同程度上便于邻体竞争研究，然在本研究林分条件下，相同小班中四邻体法检出的样地间差异较少，且所得竞争指数与林木因子相关程度更高，可能意味着四邻体法的适用性更强。但就小班中检测出的样地差异数量而言，并非“差异少即方法更优”，应具体结合 2 种方法的邻体筛选机制理解。四邻体法固定竞争木数量，可以在一定程度上减弱局部密度差异造成的竞争木数量波动，使竞争指数更集中反映最近邻木对对象木的直接作用。逐步扩大半径法则以固定距离范围筛选竞争木，当样地密度、郁闭度或空间分布发生变化时，进入计算的竞争木数量和组成也会随之改变，因此更容易反映样地局部结构差异[6]。即四邻体法强调固定株数邻体的直接竞争效应，逐步扩大半径法则更适合刻画竞争作用随距离衰减并趋于稳定的空间边界。

从竞争响应看，四邻体法所得竞争指数与对象木胸径、树高和冠幅的相关性及拟合优度整体较高，说明其能较好表征林木大小与竞争强度之间的关系。但四邻体法的适用性不应被绝对化。红柳桉（*Eucalyptus marginata*）林的研究[10]表明，纳入邻体竞争能够提高单木生长模型解释力，且采用 10 ~ 12 株最近竞争木或约 10 m 邻域范围时模型表现较优。这说明适宜竞争木数量或邻域范围会随树种、林分结构和模型目标而变化。因而，虽然本研究中四邻体法更适合作为竞争指数比较的基础方法，但逐步扩大半径法在获取具体邻体竞争范围时也能作为重要参考。

3.3　邻体竞争指数与林木因子的指示价值

邻体竞争指数的构建不仅取决于竞争木的选择，也取决于林木因子的选取，具体取值也会受到林分密度等林分条件的影响。胸径、树高和冠幅分别反映林木径向生长、垂直空间占据和水平冠层扩展状况，其对邻体竞争压力的指示意义并不完全相同。本研究中，各类邻体竞争指数与对象木胸径、树高和冠幅总体呈负相关，表明较小个体通常承受较高的相对邻体竞争压力。这与已有研究结果[20,24]基本一致。在辽东油松（*Pinus tabuliformis*）人工林中[25]同样发现，邻体干扰指数随基株胸径和树高增大而减小；同时，林分密度越大，干扰指数波动范围越大。与单因子竞争指数相比，综合竞争指数 CI-DHW 同时纳入胸径、树高和冠幅 3 个维度，能够从径向生长、垂直空间和水平冠层扩展 3 个方面反映对象木与竞争木之间的相对差异。已有研究[13,26]也表明，将水平和垂直竞争维度同时纳入指数构建，有助于提高竞争评价的综合性和解释能力。

在不同林木因子中，胸径表现出较好的基础指示价值。在排除由林木因子直接参与竞争指数计算而产生的自相关后，胸径与剩余 3 类邻体竞争指数的相关系数绝对值和拟合优度在侧柏和油松中仍均为最高（表 12），说明其与邻体竞争的关联并非主要由参与指数构成造成。北京油松人工林研究发现，竞争指数随对象木胸径增大而降低，并在胸径达到约 20 cm 后变化趋缓[17]；辽东油松人工林中，邻体干扰指数同样随基株胸径增大而降低[25]。此外，单木

生长模型研究表明，胸径生长的重要解释变量即为竞争指数[27]。因此，在大面积林分调查和调节邻体竞争强度的经营实践中，以胸径为核心的竞争评价具有较强的可操作性和推广价值。

不过，不同树种中其余林木因子的指示表现并不完全一致。已有竞争指数比较研究表明，不同竞争指标对林木生长的解释表现会随树种及生长组分而变化[28]。因此，本研究中侧柏冠幅和油松树高的差异不宜简单归结为某一种竞争机制。侧柏中，冠幅的相关性和拟合优度仅次于胸径。北京幼龄侧柏人工林研究表明，立地条件和林分密度均会影响树冠生长，高密度条件下多项冠层性状受到抑制[29]，与本研究中冠幅对侧柏邻体竞争具有一定辅助指示价值的结果相吻合。油松中，树高为反映邻体竞争状态的重要辅助因子，可能与油松个体在垂直空间中的分化及由此形成的竞争地位差异有关。辽东和北京油松人工林研究均发现，对象木个体大小及其垂直空间位置与邻体竞争密切相关：幼小个体通常处于资源和空间竞争劣势，随着个体增大，上方遮盖等邻体竞争作用逐渐减弱[17, 25]。北京 31～53 年生油松近熟林和成熟林研究则认为冠幅比胸径、树高对环境和竞争的响应更敏感[30]，与本研究结果并不完全一致。这提示不同林木因子的相对指示表现可能受到林龄、林分结构及竞争指标构建方式等因素影响。因此，在本研究林分条件下，可在胸径基础上分别将侧柏冠幅和油松树高作为辅助判断因子，但不宜将这一排序直接推广至其他林龄或林分条件。

本研究基于北京山区侧柏和油松中幼龄人工纯林的一次性样地调查，所得结果主要反映特定林龄、立地和林分结构条件下的邻体竞争特征，对成熟林、混交林及其他立地条件的适用性仍需进一步验证。同时，一次性调查主要揭示林木大小与邻体竞争之间的静态关系，尚不能反映竞争状态随林分发育和抚育措施实施后的动态变化。未来可结合长期定位监测和林木生长量数据，检验不同竞争指数与生长响应之间的关系，并比较其在不同林龄、立地和林分结构中的稳定性。实际经营中的间伐强度和保留株距仍需结合林龄、郁闭度、现有密度、经营目标及目标木等级综合确定。

4 结　　论

针对北京山区侧柏和油松人工林邻体竞争识别及抚育经营需求，本研究对比分析不同竞争木选择方法、竞争指数及林木因子的表征表现，并分析了油松和侧柏 2 树种的邻体竞争特征。在本研究林分条件下，侧柏和油松最适邻体范围接近，随径级增大总体下降并趋于稳定；四邻体法所得竞争指数与林木因子的关联整体较强，更适用于邻体竞争强度评价；综合竞争指数（CI-DHW）具有较好的综合表征表现，胸径可作为 2 树种邻体竞争状态识别的基础指示因子，侧柏冠幅和油松树高可作为辅助判断因子。后续可结合更长时间尺度的连续观测，并拓展至不同林龄、立地条件和林分类型，以进一步提高邻体竞争评价结果的适用性及其经营参考价值。

参 考 文 献

[1] 雷瑞德, 党坤良, 张硕新, 等. 人工林邻体干扰模型的探讨及与林木生长的关系 [J]. 西北林学院学报, 1996(S1): 86−91.
Lei R D, Dang K L, Zhang S X, et al. On the neighboring tree disturbing model of plantation forest [J]. Journal of Northwest Forestry College, 1996(S1): 86−91.

[2] Wang Y R, Liu Z H, Li J P, et al. Assessing the relationship between tree growth, crown size, and neighboring tree species diversity in mixed coniferous and broad forests using crown size competition indices [J]. Forests, 2024, 15(4): 633.

[3] 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): 4758−4769.
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): 4758−4769.

[4] Zou G W, Xu K, Cai J H, et al. How do trees fail in intraspecific competition? a test for the roles of non-structural carbohydrates and stoichiometries in *Pinus massoniana* [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2025, 220: 109530.

[5] Fien E K P, Fraver S, Teets A, et al. Drivers of individual tree growth and mortality in an uneven-aged, mixed-species conifer forest [J]. Forest Ecology and Management, 2019, 449: 117446.

[6] Zhou M, Lei X, Lu J, et al. Comparisons of competitor selection approaches for spatially explicit competition indices of natural spruce-fir-broadleaf mixed forests [J]. European Journal of Forest Research, 2022, 141(1): 177−211.

[7] 李树人, 赵勇, 阎志平. 日本落叶松林冠层光生态场研究 [J]. 应用生态学报, 1997, 8(2): 123−126.
Li S R, Zhao Y, Yan Z P. Light-ecological field of *Larix leoptolois* canopy [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1997, 8(2): 123−126.

[8] 惠刚盈, 胡艳波, 赵中华, 等. 基于交角的林木竞争指数 [J]. 林业科学, 2013, 49(6): 68−73.
Hui G Y, Hu Y B, Zhao Z H, et al. A forest competition index based on intersection angle [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(6): 68−73.

[9] 杨清培, 付方林, 张露, 等. 九连山自然保护区毛红椿天然林邻体干扰效应 [J]. 江西农业大学学报, 2013, 35(4): 748−754.
Yang Q P, Fu F L, Zhang L, et al. A study on the neighborhood interference index in *Toona ciliates* var. *pubescens* community [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2013, 35(4): 748−754.

[10] Bhandari S K, Veneklaas E J, Mccaw L, et al. Individual tree

growth in jarrah *(Eucalyptus marginata)* forest is explained by size and distance of neighbouring trees in thinned and non-thinned plots [J]. Forest Ecology and Management, 2021, 494: 119364.

[11] Hegyi F. A simulation model for managing jack-pine stands[M]//Fries J, ed. Growth models for tree and stand simulation. Stockholm: Royal College of Forestry, 1974: 74−90.

[12] Arney J D. Tables for quantifying competitive stress on individual trees[R]. Victoria: Environment Canada, Canadian Forestry Service, Pacific Forest Research Centre, 1973.

[13] 吕勇, 钱升平, 吕飞舟, 等. 青冈栎次生林林木综合竞争压力指数研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(10): 1−6.
Lv Y, Qian S P, Lv F Z, et al. Study on comprehensive competition stress index of *Cyclobalanopsis glauca* secondary forest [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(10): 1−6.

[14] 北京市规划和国土资源管理委员会. 北京城市总体规划 (2016年—2035 年)[EB/OL]. (2017−09−29)[2026−09−10]. https://www.beijing.gov.cn/gongkai/guihua/wngh/csztgh/201907/t20190701_100008.html.
Beijing Municipal Commission for City Planning and Land Resources Management. Beijing Urban Master Plan (2016−2035)[EB/OL]. (2017−09−29)[2026−09−10]. https://www.beijing.gov.cn/gongkai/guihua/wngh/csztgh/201907/t20190701_100008.html.

[15] 马履一, 李春义, 王希群, 等. 不同强度间伐对北京山区油松生长及其林下植物多样性的影响 [J]. 林业科学, 2007, 43(5): 1−9.
Ma L Y, Li C Y, Wang X Q, et al. Effects of thinning on the growth and the diversity of undergrowth of *Pinus tabulaeformis* plantation in Beijing mountainous areas [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(5): 1−9.

[16] 赵凯, 李金航, 刘海轩, 等. 北京山区侧柏人工林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 *Platycladus orientalis* plantations in Beijing mountainous areas [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2019, 36(3): 557−564.

[17] 李超, 裴顺祥, 张连金, 等. 北京油松人工林竞争指数的适用性评价 [J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(6): 1115−1124.
Li C, Pei S X, Zhang L J, et al. Applicability evaluation of competition indexes for *Pinus tabuliformis* plantations in Beijing [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2019, 36(6): 1115−1124.

[18] 王希群, 马履一. 油松、侧柏林种内竞争特点的对比研究 [J]. 生态科学, 2006, 25(6): 481−484.
Wang X Q, Ma L Y. Intraspecific competition characteristics between *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* forests [J]. Ecologic Science, 2006, 25(6): 481−484.

[19] 马履一, 王希群. 生长空间竞争指数及其在油松、侧柏种内竞争中的应用研究 [J]. 生态科学, 2006, 25(5): 385−389.
Ma L Y, Wang X Q. Growth space competition index (GSCI) and application in the individual intraspecies competition of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* forests [J]. Ecologic Science, 2006, 25(5): 385−389.

[20] 刘怡青, 田育红, 宋含章, 等. 胸径和林分密度决定内蒙古东部落叶松林种内竞争 [J]. 生态学杂志, 2018, 37(3): 847−853.
Liu Y Q, Tian Y H, Song H Z, et al. DBH and stand density regulate intraspecific competition of *Larix gmelinii* in eastern Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(3): 847−853.

[21] 张岚棋. 长白山云冷杉天然混交林优势树种单木生长与竞争、多样性关系的研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2023.
Zhang L Q. The study of the relationship between individual tree growth and competition or diversity of dominant tree species in natural spruce-fir mixed forests of Changbai Mountain[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2023.

[22] 何熙祥, 玉米提·哈力克, 董宗炜, 等. 水分梯度下胡杨荒漠河岸林种内竞争及空间格局变化特征 [J]. 生态学报, 2023, 43(18): 7497−7506.
He X X, Umut H, Dong Z W, et al. Spatial distribution pattern and intraspecific competition of *Populus euphratica* riparian forests under different water gradients [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(18): 7497−7506.

[23] Guo H, Lei X, Cournede P H, et al. Characterization of the effects of inter-tree competition on source-sink balance in Chinese pine trees with the GreenLab model [J]. Trees, 2012, 26: 1057−1067.

[24] Xu Q, Yan X, Tao L, et al. Size-asymmetric and spatially structured competition shapes *Populus euphratica* stands in the lower Tarim river riparian zone [J]. Ecological Indicators, 2025, 181: 114465.

[25] 杨霞, 陈丽华. 邻体干扰模型在辽东油松人工林中的应用 [J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(6): 93−102.
Yang X, Chen L H. Application of neighborhood interference model in *Pinus tabuliformis* plantation in eastern Liaoning Province [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(6): 93−102.

[26] 褚欣, 潘萍, 欧阳勋志, 等. 闽楠天然次生林林木综合竞争指数研究 [J]. 西北林学院学报, 2019, 34(4): 199−205.
Chu X, Pan P, Ouyang X Z, et al. Comprehensive competition index of natural secondary *Phoebe bournei* forest [J]. Journal of Northwest Forestry College, 2019, 34(4): 199−205.

[27] Lu J. Individual tree diameter growth modelling for natural secondary forest in Changbai Mountains, Northeast China [J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 18695.

[28] Biging G S, Dobbertin M. Evaluation of competition indices in individual tree growth models [J]. Forest Science, 1995, 41(2): 360−377.

[29] He L, Zhang X, Wang X, et al. Tree crown affects biomass allocation and its response to site conditions and the density of *Platycladus orientalis* Linnaeus plantation [J]. Forests, 2023, 14(12): 2433.

[30] 段劼, 马履一, 贾黎明, 等. 北京地区油松人工林树冠竞争因子的测算与分析 [J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(3): 14−18.
Duan J, Ma L Y, Jia L M, et al. Analysis and calculation of crown competition factor in *Pinus tabulaeformis* plantations in Beijing [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2012, 40(3): 14−18.

（责任编辑　赵田芸
责任编委　臧润国）