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

基于手持激光雷达的人工侧柏纯林冠层空间互补性

胡蕾 刘茜紫 耿燕 余世有 姜俊 陈玲

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

Hu Lei, Liu Xizi, Geng Yan, Yu Shiyou, Jiang Jun, Chen Ling

引用本文:
胡蕾, 刘茜紫, 耿燕, 余世有, 姜俊, 陈玲. 基于手持激光雷达的人工侧柏纯林冠层空间互补性[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(4):61–73. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240351
Hu Lei, Liu Xizi, Geng Yan, Yu Shiyou, Jiang Jun, Chen Ling. Spatial complementarity of canopy layer in pure *Platycladus orientalis* plantations based on handheld mobile laser scanning[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(4):61–73. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240351

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240351

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

云冷杉天然林林分空间结构对胸径生长量的影响

Effects of spatial structure on DBH increment of natural spruce–fir forest

北京林业大学学报, 2017, 39(9): 41–47. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170184

基于无人机激光雷达的人工林碳储量线性与非线性估测模型比较

Comparison in linear and nonlinear estimation models of carbon storage of plantations based on UAV LiDAR

北京林业大学学报, 2021, 43(12): 9–16. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200417

板栗冠层光合特性的空间异质性研究

Spatial heterogeneity of photosynthetic characteristics in Chinese chestnut canopy

北京林业大学学报, 2020, 42(10): 71–83. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200059

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

基于相邻木关系的林层间结构解析

Analysis of inter–layer structure based on the relationship of neighboring trees

北京林业大学学报, 2019, 41(5): 66–75. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190051

妙峰山林场主要针叶林冠层特征及潜在火行为

Canopy characteristics and potential crown fire behavior of main coniferous forest in Miaofeng Mountain Forest Farm in Beijing

北京林业大学学报, 2018, 40(5): 82–89. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170408

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240351

基于手持激光雷达的人工侧柏纯林冠层空间互补性

胡 蕾[1] 刘茜紫[1] 耿 燕[1] 余世有[2] 姜 俊[1] 陈 玲[2]
（1. 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；2. 北京林业大学森林资源和环境管理国家林业和草原局重点实验室，北京 100083）

摘要:【目的】探讨手持激光雷达在冠层空间互补性研究中的适用性，分析冠层空间互补性的影响因素及其对单木生长量的影响，为优化侧柏纯林的林分结构并提高生产力提供参考。**【方法】**基于地面实测数据验证手持激光雷达点云数据的精度，评估其在冠层空间互补性研究中的可行性；以邻域树木性状变异、邻体密度、土壤因子和地形因子为解释变量，运用线性相关分析和全子集回归模型探讨解释变量与冠层空间互补性之间的相关关系；采用结构方程模型解析冠层空间互补性在解释变量影响目标树生长量过程中的中介作用。**【结果】**(1)手持激光雷达提取的胸径、树高和冠幅与野外实测值呈显著正相关($P < 0.001$)，表明其参数精度适用于冠层空间互补性研究。(2)树冠形状变异($P < 0.001$)、树冠大小变异($P < 0.01$)和树木高度变异($P < 0.001$)对冠层空间互补性具有显著的促进作用；株数密度($P < 0.001$)同样也具有显著正效应；坡向($P < 0.05$)与坡度($P < 0.05$)能显著影响冠层空间互补性；土壤全磷($P < 0.05$)、全钾($P < 0.01$)、有效磷($P < 0.05$)、有效钾($P < 0.05$)含量和土壤容重($P < 0.05$)均显著负向影响冠层空间互补性。全子集模型结果表明，邻域树木性状变异和土壤因子为冠层空间互补性变异的主要驱动因素，解释量分别占总解释量的 40.75% 和 31.64%。(3)冠层空间互补性显著促进目标树胸径生长($P < 0.01$)。结构方程模型结果表明，邻域树木性状变异、邻体密度、土壤和地形因子均可通过冠层空间互补性间接影响目标树生长。**【结论】**冠层空间互补性在人工侧柏纯林中普遍存在，并受到生物和非生物因子的共同影响，这些因子通过冠层空间互补性间接促进了树木的生长。基于本研究结果，建议在种植侧柏时，应优先选择阴坡且土壤养分丰富的区域；对于已建成的人工侧柏纯林，可通过定期修剪侧柏、增加树木间垂直方向差异的方式促进胸径的生长。

关键词：冠层空间互补性；胸径生长量；手持激光雷达；纯林；侧柏
中图分类号：S718.5　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2025)04−0061−13
引文格式：胡蕾，刘茜紫，耿燕，等. 基于手持激光雷达的人工侧柏纯林冠层空间互补性［J］. 北京林业大学学报，2025，47(4)：61−73. Hu Lei, Liu Xizi, Geng Yan, et al. Spatial complementarity of canopy layer in pure *Platycladus orientalis* plantations based on handheld mobile laser scanning[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(4): 61−73.

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

Hu Lei[1] Liu Xizi[1] Geng Yan[1] Yu Shiyou[2] Jiang Jun[1] Chen Ling[2]
(1. Research Center of Forest Management Engineering of National Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Key Laboratory of Forest Resources & Environmental Management, National Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

收稿日期: 2024−10−26　**修回日期:** 2024−12−04
基金项目: 国家自然科学基金项目(32171521)，北京山区生态林经营管理支撑项目(2024-LYZ-01-007)。
第一作者: 胡蕾。主要研究方向：森林可持续经营。Email：hhl1420@bjfu.edu.cn　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: 耿燕，副教授。主要研究方向：利用空间分布模式与样地设计提升森林资源抽样调查精度。Email：gengyan@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

Abstract: [**Objective**] To optimize the structural composition and enhance the growth of *Platycladus orientalis* plantations, this study systematically analyzed the factors influencing canopy spatial complementarity in *Platycladus orientalis* plantations using handheld mobile laser scanning (HMLS) and evaluated their impacts on individual tree growth. [**Method**] First, the applicability of HMLS in studying canopy spatial complementarity was evaluated by comparing HMLS-derived measurements with field observations. Neighborhood tree trait variation, neighborhood density, soil properties, and topographic factors were then considered as explanatory variables, and the correlation between these variables and canopy spatial complementarity were explored using linear regression model and full-subset model. Finally, structural equation modeling (SEM) was employed to analyze the role of canopy spatial complementarity in the process of variables influencing the growth of target trees. [**Result**] (1) The diameter at breast height (DBH), tree height (TH) and crown width (CW) extracted by HMLS were significantly correlated with field-measured values ($P < 0.001$), demonstrating the accuracy of HMLS-derived parameters was suitable for canopy spatial complementarity studies. (2) Variations in crown shape ($P < 0.001$), crown size ($P < 0.01$), and tree height ($P < 0.001$) significantly contributed to canopy spatial complementarity. Stand density ($P < 0.001$), slope aspect ($P < 0.05$) and slope gradient ($P < 0.05$) were also observed as positive contributors. However, soil total phosphorus ($P < 0.05$), total potassium ($P = 0.01$), available phosphorus ($P < 0.05$), available potassium ($P < 0.05$), and soil bulk density ($P < 0.05$) negatively affected canopy spatial complementarity. The full-subset model indicated that neighborhood tree trait variation and soil factors were the primary drivers of canopy spatial complementary variation, explaining 40.8% and 31.6% of variance, respectively. (3) Canopy spatial complementarity was found to significantly promote the DBH growth of target trees ($P < 0.01$). SEM results revealed that neighborhood tree trait variation, neighborhood density, soil properties and topographic factors indirectly influenced target tree growth through their effects on canopy spatial complementarity. [**Conclusion**] This study highlights the critical role of canopy spatial complementarity in promoting the growth of *Platycladus orientalis*. It is recommended to prioritize planting *Platycladus orientalis* on shaded slopes with nutrient-rich soils. For existing *Platycladus orientalis* plantations, regular pruning to optimize crown structures and increasing vertical difference among neighboring trees can effectively enhance DBH growth.

Key words: canopy spatial complementarity; DBH growth; handheld mobile laser scanning (HMLS); pure forest; *Platycladus orientalis*

森林是陆地生态系统的重要组成部分，其主体树木之间的相互作用对于维持生态系统稳定非常重要。研究表明，邻近树木之间的相互作用促使整个林地的生长量提高，这种相互作用能够解释林分总生产力的 50% 以上[1]。树冠处于树木的上部并占据绝大部分体积，其中树冠的大小能影响树木吸收光的能力并表征树木的生长状况[2−3]，而树冠的结构则反映了个体的光拦截能力。树木之间树冠的重叠被看作是冠层的相互补充，这种补充代表着冠层空间的生态位分割[4−5]。冠层的互补能够通过降水和光照截获的再分配影响林分内局部环境条件，最终作用于树木自身生长[3−5]。

冠层的相互补充被认为是解释混交林中超产现象的重要机制。研究发现，冠层空间互补性解释了混交林中生物量超产 61% 的变异[4]，同时物种丰富度会通过冠层互补降低竞争压力，进而提高树木生产力[3,5]。已有研究证明，邻域范围内促进林分高度分化和结构多样性进而提高冠层空间互补性，可以促进树木生产力的提高[3]，这为优化林分结构提供了理论依据。而冠层空间互补性理应会促进单木的生长，前人研究[6−7]表明，当邻域范围内冠层互补性较高时，更多的光资源将被捕获和利用，这促进了树干和冠幅的生长，同时也扩展了根系，提高了树木对地下资源的获取能力。但是目前对冠层空间互补性和单木生长量之间相关关系的研究较少，二者之间的作用机制也尚不清晰。

在混交林中，冠层的相互补充主要归因于树冠形态的差异，同时也受到土壤和气候条件的影响。研究发现，邻域范围内树冠形状、大小[4−5]和树木高度变异[8]均能提高冠层空间互补性，同时具有较高胸高断面积密度的样地往往冠层空间互补性也更高[9]；分枝密度（单位体积树冠的总分枝数）和分枝强度

（单位长度一级分枝的二级分枝总数）也能够显著正向影响冠层空间互补性[10]。土壤有机碳含量、含水量以及气候湿度指数（climatic moisture index，CMI）均对冠层空间互补性有影响[5,8,11]。此外，随着物种丰富度的增加，目标树的冠层空间互补性也呈现显著的增加趋势[3−5]。而冠层空间互补性不仅存在于混交林，也存在于单一栽培的纯林中[4−5]，同时纯林是人工林的主要类型，全国约 81% 的人工林为纯林[12]，因此研究纯林中冠层空间互补性的影响因素成为急需解决的问题。

目前对冠层空间互补性的量化多采用 Willams 等[4]提出的冠层空间互补性指数（crown complementarity index，CCI），该指数将样地内所有的单木当作潜在的竞争木，进而求取出样地平均冠层空间互补性；而 Kunz 等[3]进一步对该指标进行了调整，将邻域范围内所有与目标树直接邻近的单木看作竞争木，进而得出局部邻域范围内的冠层空间互补性指数。对于冠层空间互补性指数，有的学者采用将树冠几何化的方法来进行研究[5,11]，但是这种树冠的简化可能无法反映出树冠的空间异质性[13−14]。而地基激光雷达（terrestrial laser scanning，TLS）凭借其高空间分辨率和对树冠形状、大小的精细分析能力，为冠层空间互补性的研究提供了新的可能[3,10]。然而在野外实地扫描中，获取 TLS 数据一般需要多站扫描并进行后期拼接，数据处理复杂度较高[15]，此外当研究样地位于山地时，坡度较陡，多个点位的布设无疑会增加外业工作的难度。在这种情况下，能快速移动，扫描方式灵活[15]的手持激光雷达（hand-held mobile laser scanning，HMLS）成为了最为合适的工具。

北京山地的十三陵人工侧柏（*Platycladus orientalis*）纯林，是国家级重点公益林，自林场建设以来在水土保持和维护北京北部生态安全方面发挥了重要的作用。侧柏林多为 20 世纪 60 年代营造，造林时密度普遍很大，后期缺乏间伐、更新等科学抚育措施，导致侧柏林生长缓慢，林分长势衰弱，成为了典型的低产低效林。本研究以手持激光雷达为工具，以北京十三陵人工侧柏纯林为对象，分析纯林内冠层空间互补性的影响因素及其对单木生长量的影响，旨在为优化北京山地侧柏人工林结构，提高侧柏的生长量提供理论依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

研究区（图 1）位于北京市昌平区的十三陵林场（115°50′17″~116°29′49″E，40°02′18″~40°23′13″N），占地面积 8 622 hm^2，距离市区 40 km[15]。林区属温带大陆性半湿润半干旱季风气候，全年平均气温为 11.8 ℃，平均降水量为 631 mm，主要集中于 6—8 月[16]。十三陵林场属于燕山系低山丘陵，平均海拔大约为 400 m，山地坡向主要是阳坡、半阳坡，土壤以山地褐土为主，肥力较差，呈碱性或中性。林场内现主要树种为人工侧柏纯林和油松（*Pinus tabuliformis*）林，占林场中森林覆盖面积的 80%。

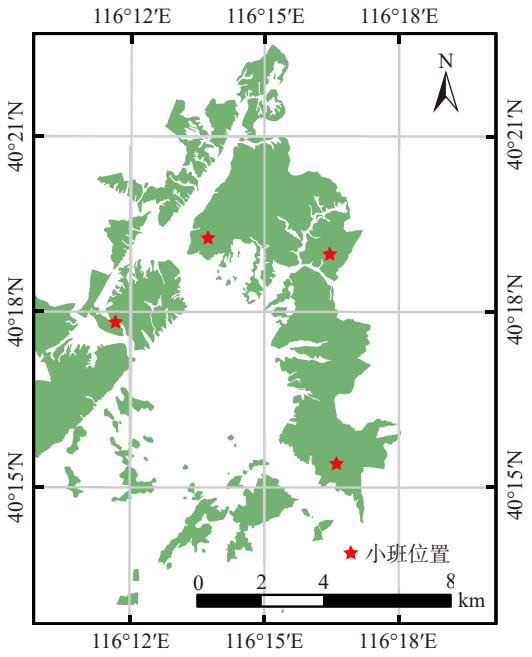


图 1　研究区位置图

Fig. 1　Location map of study area

研究对象为人工侧柏纯林，林龄约为 50 年，林内伴有黄栌（*Cotinus coggygria*）、臭椿（*Ailanthus altissima*）、油松等树种，但数量较少[17]。

1.2　样地调查

1.2.1　样地及样木选择

踏查林场内的人工侧柏纯林，选取具有代表性的 4 个小班，分别在每个小班中布设样地，最终获得 11 块面积为 666.7 m^2 的正方形样地（表 1）。为研究邻域范围内的冠层空间互补性，在每块样地内，选取 6 株标准木作为目标树，并使其尽量分散于试验区[6,18]，选取的标准木要求直立生长且干形良好[18]。马士友[19]通过逐步扩大范围的方法确定了十三陵人工侧柏林竞争影响圈半径为 5 m，因此，本研究以目标树为圆心，5 m 为半径划分邻域，邻域内除目标树以外的树木都作为潜在的邻近树。为避免边缘效应，设置 5 m 的缓冲区，缓冲区中的树木只可作为潜在的邻近树而不作为目标树。

1.2.2　手持激光雷达数据获取

使用的仪器为飞马 SLAM100 手持激光雷达扫描仪。该仪器测量距离为 100 ~ 120 m，可形成

表 1 侧柏人工林样地基本信息

Tab. 1 Basic information of sample plots of *Platycladus orientalis* plantations

样地编号	平均胸径/cm	平均树高/m	平均冠幅/m	平均冠长/m	林分密度/(株·hm^{-2})	坡向	坡度
P1	13.65 ± 2.05	7.97 ± 1.06	3.04 ± 0.39	5.40 ± 0.85	2 150	半阳坡	陡坡
P2	14.55 ± 2.39	8.33 ± 1.19	3.04 ± 0.36	5.48 ± 1.00	2 500	半阳坡	斜坡
P3	13.26 ± 3.74	8.44 ± 1.15	2.58 ± 0.58	5.50 ± 1.11	2 375	半阳坡	斜坡
P4	13.94 ± 3.27	7.08 ± 0.72	2.80 ± 0.53	5.31 ± 0.90	3 575	阴坡	急坡
P5	12.86 ± 2.52	7.56 ± 1.31	2.37 ± 0.53	4.85 ± 1.06	2 950	阴坡	陡坡
P6	13.94 ± 2.80	8.14 ± 1.21	2.70 ± 0.56	5.53 ± 1.04	3 175	阴坡	陡坡
P7	15.84 ± 2.56	9.26 ± 0.98	3.96 ± 0.52	6.55 ± 0.96	2 325	阳坡	陡坡
P8	15.86 ± 1.86	8.32 ± 0.96	3.76 ± 0.45	5.92 ± 0.80	1 400	阳坡	斜坡
P9	16.81 ± 2.06	8.66 ± 1.23	3.25 ± 0.65	5.96 ± 1.29	2 925	阳坡	急坡
P10	15.05 ± 2.91	7.53 ± 1.00	3.07 ± 0.50	5.31 ± 1.05	2 050	阳坡	急坡
P11	13.94 ± 2.02	8.22 ± 0.71	3.14 ± 0.45	6.00 ± 0.78	2 450	阳坡	急坡

270° × 360°点云覆盖，结合即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping，SLAM)算法，可在无光照、无 GPS 条件下获取周围环境高精度的三维点云数据。

在晴朗无风的天气下使用手持激光雷达对研究样地进行调查，包括实地勘察样地地形、植被状况，确定样地四角边界；设计闭合路径的扫描路线，扫描平台高度保持在 1.3 m；确保能够完整扫描到目标树以及周边的邻近树。在进行激光扫描时，沿“S”型路径前进，并围绕目标树周围行走一圈，以便在样地点云中通过行走路径精准确定目标树。

1.2.3 实地数据获取

2021 年 10 月对样地内胸径大于 5 cm 的树木进行了每木检尺，记录树种、树高、胸径、东西冠幅、南北冠幅和枝下高等数据。2023 年 11 月，再次对样地进行每木检尺。

1.2.4 土壤及地形因子获取

每块样地沿斜对角线分坡上、坡中、坡下各选取 3 个土壤采样点，去除上层枯落物[20]，用 100 cm^3 的环刀对 0 ~ 10 cm 的土层进行取样，装入铝盒后密封保存并编号[21]，用于土壤含水量和土壤容重的测定。另外在每个采样点取 400 g 0 ~ 10 cm 的表层土装入密封袋中保存并编号，将表层土分为两份。其中一份进行风干处理后挑除根系并分别过 2 mm 和 100 目筛，用于土壤有机碳含量和土壤全氮含量的测定；另一份鲜土挑除根系后过 2 mm 筛并保存于 −20 ℃ 的冰箱中，用于土壤全钾、全磷、有效氮、有效钾和有效磷含量的测定。

通过烘干法测定土壤含水量[22]和土壤容重[23]；用酸洗法测定土壤有机碳含量[21]；样品高温燃烧后，采用元素分析仪(vario MACRO cube，德国 Elementar 公司)测定土壤全氮含量[24]；土壤有效氮含量采用连续流动分析仪(AA3，德国)进行测定[24]；土壤有效磷含量采用碳酸氢钠法(Olsen 法)进行测定[25]；土壤有效钾含量采用原子吸收光度计(AA-6701F，日本岛津公司)进行测定[26]；土壤全磷含量使用钼锑抗比色法进行测定[27]；土壤全钾含量使用原子吸收分光光度计法(ZEEnit700P，德国 Analytik Jena AG 公司)进行测定[28]。取每个样地上、中、下 3 个位置数据的平均值，作为该样地的各项土壤因子数据。

用罗盘获取每个样地的坡度及坡向数据。

1.3 计算方法

1.3.1 基于 HMLS 获取林木参数

对于已获取的激光雷达数据进行配准、裁剪、去噪、地面点滤波和归一化处理。其中利用飞马 SLAM100 设备配套的 UAVManager 4 软件对雷达数据进行配准，使用 LiDAR360 软件(https://www.lidar360.com/)对数据进行裁剪、去噪、地面点滤波和归一化处理。获取样地点云后，使用 LiDAR360 软件进行单木预分割，对于部分分割精度较低的单木通过 CloudCompare 软件进行手动分割。

拟获取的林木参数包括树高、胸径、枝下高、东西冠幅、南北冠幅、平均冠幅、冠长、冠体积和冠表面积等。其中树高计算为树木点云中最高点到地面的垂直距离[21]，枝下高计算为第一活枝到地面的垂直距离[18]，东西、南北的冠幅计算为单木东西向和南北向的宽度[29]。胸径是将 1.3 m 处树干进行切片后，投影至水平面，获取该切片拟合圆的直径。计算出树冠投影面积，并将其看成圆形，求取其直径作为平均冠幅[3]。冠长计算为树高与枝下高的差值。冠体

积采用 alphashape 算法进行计算，冠表面积采用凸包算法（convex hull）计算。以上林木参数均通过 R4.2.3 以及 matlab R2023a 获取。

1.3.2　冠层空间互补性的量化

为了量化冠层空间互补性，引用了 Kunz[3−4]调整后的冠层空间互补性指数（crown complementarity index，CCI）。该指数实际上是将树冠在垂直高度上进行分层，将 k 层内两棵树（i 和 j）的树冠体积之差（V）与树冠总体积的比值作为两株单木之间的冠层互补性指数（crown complementarity，C）（图 2），再求得邻域内所有邻近树与目标树的 C 平均值，作为邻域范围内目标树的冠层空间互补性指数 CCI。

$$C_{ij} = \frac{\sum |V_{ik} - V_{jk}|}{V_i + V_j} \tag{1}$$

$$\mathrm{CCI}_i = \frac{\sum C_{ij}}{n} \tag{2}$$

式中：i 为第 i 棵目标树，j 是第 i 棵目标树的第 j 棵邻域树，V_i 是第 i 棵目标树的树冠体积，V_j 是第 j 棵邻域树的树冠体积，V_{ik} 是第 i 棵目标树第 k 层的冠层体积，V_{jk} 是第 j 棵邻域树第 k 层的冠层体积，n 是第 i 棵目标树的邻域范围内的邻近树株数。

1.3.3　邻体密度和邻域内树木性状的变异量化

为探究邻近树对目标树冠层空间互补性的影响，选用邻体密度[9]以及邻域内树木性状（树冠大小、形状和树高）变异[3,5,8]作为解释变量。邻体密度包括目标树邻域范围内的株数密度和胸高断面积密度[9]。局部邻域内所有单木的 Rao’s Q 指数作为树冠大小的变异[3]，该指数包含 5 个与树冠大小相关的特征指标（树冠体积、树冠长度、冠幅、树冠表面积、树冠与树干体积之比）[5]；利用 4 个与树冠形状相关的特征指标（冠幅与冠长之比、冠长与树高之比、冠幅与树高之比、东西向与南北向冠幅之比）计算邻域内所有单木的功能离散度指数（Fdis）[5]，作为树冠形状的变异；计算邻域内所有树木高度的 Rao’s Q 指数作为树木高度的变异[8]。使用 R 中的 fundiversity 包计算功能多样性指数。

1.3.4　地形因子的量化

地形因子主要包括坡度和坡向。其中坡向被划分为阴坡、半阴坡、半阳坡和阳坡[30]；坡度按照孟宪宇[31]划分的标准，以每 10°作为 1 个等级，划分为平坡（ < 5°）、缓坡（5° ~ 14°）、斜坡（15° ~ 24°）、陡坡（25° ~ 34°）、急坡（35° ~ 44°）、险坡（ > 45°）这 6 个坡度等级。

1.3.5　胸径生长量的量化

基于 2021 年和 2023 年的监测数据，计算年均胸径生长量，计算公式[32]为

$$\Delta d = \frac{d_{t+n} - d_t}{n} \tag{3}$$

式中：Δd 为年均胸径生长量，d_t 为第 t 年单木的胸径观测值，n 为观测间隔期，在本研究中 $n = 2$。

1.4　统计分析

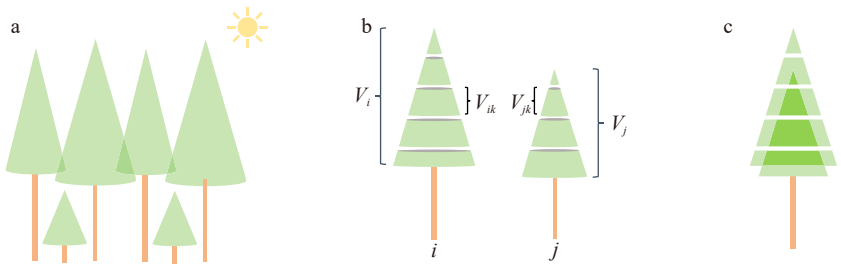
1.4.1　精度评价

为确定 HMLS 提取人工侧柏纯林林木参数的可行性，以实地调查的胸径（diameter at breast height，DBH）、树高（tree height，TH）和冠幅（crown width，CW）数据作为验证数据，采用决定系数（R^2）、平均绝对误差（MAE）以及均方根误差（RMSE）作为评价依据进行精度分析。

1.4.2　各解释变量与冠层空间互补性的相关关系

在进行模型分析之前，首先将数据归一化以消除不同变量之间的量纲差异。利用单因素方差分析、线性相关分析评估邻域树木性状变异、邻体密度、土壤因子和地形因子对冠层空间互补性指数的影响。

利用多元回归量化各解释变量对 CCI 的影响及其相对重要性，为避免共线性，排除了所有方差膨胀因子大于 10 的解释变量。选用全子集回归进行多元回归分析，全子集回归将所有预测解释变量的可能组合模型都进行了拟合，通过决定系数 R^2、校正赤



a 为样地内多棵树木的概况图，b 和 c 为冠层空间互补性指数计算示意图。将每棵树的树冠进行分层（图 b），c 图中的浅绿色为每一层内两棵树的树冠体积之间的差异，由此计算两棵树木之间的冠层互补性指数。

图 2　冠层互补性指数计算示意图

Fig. 2　Conceptual diagram for calculating crown complementarity

池信息准则(Akaike information criterion，AICc)和贝叶斯信息准则(Bayesian information criterion，BIC)筛选出最优的变量组合[33]，利用 AICc 来比较模型差异，挑选出所有与最优模型 AICc 差异小于 2 的候选模型组合，应用加权平均方法计算出候选模型组合中每个变量的影响大小。

所有的统计分析都在 R 软件中进行，其中使用 MUMIN 包构建全子集模型。

1.4.3 各解释变量与冠层空间互补性对目标树胸径生长量的影响

为探究 CCI 与目标树胸径生长量之间的关系，对二者进行了线性相关性分析。为了检验冠层空间互补性对目标树胸径生长量的中介效应，构建结构方程模型(structural equation modeling，SEM)。SEM 模型是一个验证性的因子模型，能够反映变量间的因果关系[34]。在构建模型时，为避免由于小样本带来的不稳定性，根据线性相关分析的结果选取观测变量[35−36]，最终选择了树木高度变异作为邻域树木性状变异的观测变量，株数密度作为邻体密度的观测变量，坡向作为地形因子的观测变量，全钾含量作为土壤因子的观测变量。

为检验模型适配度，选用以下 6 个指标进行模型检验，包括卡方自由度比(chi-square to degrees of freedom ratio，χ^2/df)、卡方检验 P 值、拟合优度指数(goodness of fit index，GIF)、比较适配指数(comparative fit index，CFI)、标准化残差均方根(standardized root mean square residual，SRMR)和近似误差均方根(root mean square error of approximation，RMSEA)。一般而言，χ^2/df < 3，P > 0.05，GFI > 0.95，CIF > 0.95，SRMR < 0.08，RMSEA < 0.05，则表明 SEM 模型适配度良好。

使用 R 软件中的 lavaan 包构建 SEM 模型。

2 结果与分析

2.1 手持激光雷达点云数据精度分析

基于手持激光雷达(HMLS)的提取结果，共整理了 578 棵单木数据用于精度分析(表 2)。HMLS 提取的胸径均值为 14.32 cm，实地测量的胸径均值为 13.34 cm，两种方法所得到的胸径 MAE 为 1.22 cm、RMSE 为 1.61 cm。HMLS 提取的树高均值为 8.16 m，实测树高均值为 8.41 m，树高 MAE 为 0.62 m、RMSE 为 0.82 m。HMLS 提取的冠幅均值为 3.07 m，实测冠幅为 3.07 m，冠幅 MAE 为 0.36 m、RMSE 为 0.54 m。

分别对胸径、树高和冠幅的 HMLS 提取值和实测值进行线性相关分析(图 3)。其中胸径的提取精度最高(R^2 = 0.81，P < 0.001)，这可能是由于扫描时手持激光雷达的平台高度位于 1.3 m，能够较为准确和完整获取树干扫描点云；其次是树高数据(R^2 = 0.65，P < 0.001)和冠幅数据(R^2 = 0.66，P < 0.001)。总体而言，3 类林木参数的提取精度均较高，证明可以利用 HMLS 获取的数据进行冠层空间互补性的相

表 2 HMLS 提取值与实测值的精度验证统计量

Tab. 2 Precision verification statistics for extracted and measured values

指标	胸径/cm		树高/m		冠幅/m	
	提取值	实测值	提取值	实测值	提取值	实测值
平均值	14.32 ± 2.68	13.34 ± 2.90	8.16 ± 1.26	8.41 ± 1.26	3.07 ± 0.78	3.07 ± 0.75
MAE	1.22		0.62		0.36	
RMSE	1.61		0.82		0.54	

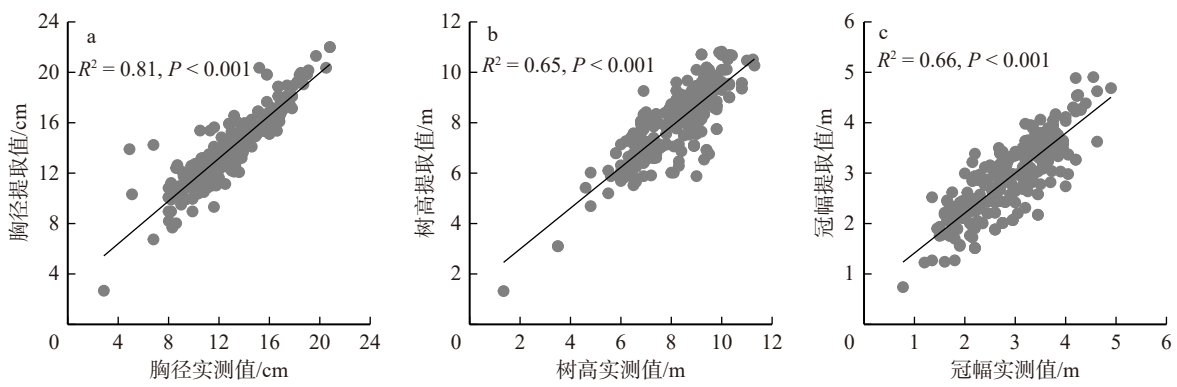


图 3 手持激光雷达提取值与实测值精度对比

Fig. 3 Comparison of accuracy between hand-held mobile laser scanning (HMLS) extracted values and measured values

关研究。

2.2　生物因子与冠层空间互补性的相关关系

2.2.1　邻域树木性状变异

将 CCI 分别与邻域树木性状变异进行线性相关分析(图 4)。结果表明树冠形状变异($P < 0.001$)、树冠大小变异($P < 0.01$)和树木高度变异($P < 0.001$)与 CCI 之间均呈现显著的正相关关系。

2.2.2　邻体密度

分别将株数密度和胸高断面积密度与 CCI 进行线性相关分析(图 5)。其中,株数密度与 CCI 之间存在显著的正相关关系($P < 0.001$),而 CCI 与胸高断面积密度之间的相关关系则并不显著。

2.3　非生物因子与冠层空间互补性的关系

2.3.1　地形因子

CCI 在不同坡向之间具有显著的差异性($P < 0.05$),随着光照条件逐渐增加,样地 CCI 逐渐减小。坡度也能够显著影响 CCI($P < 0.05$),坡度越陡,CCI 越大(图 6)。

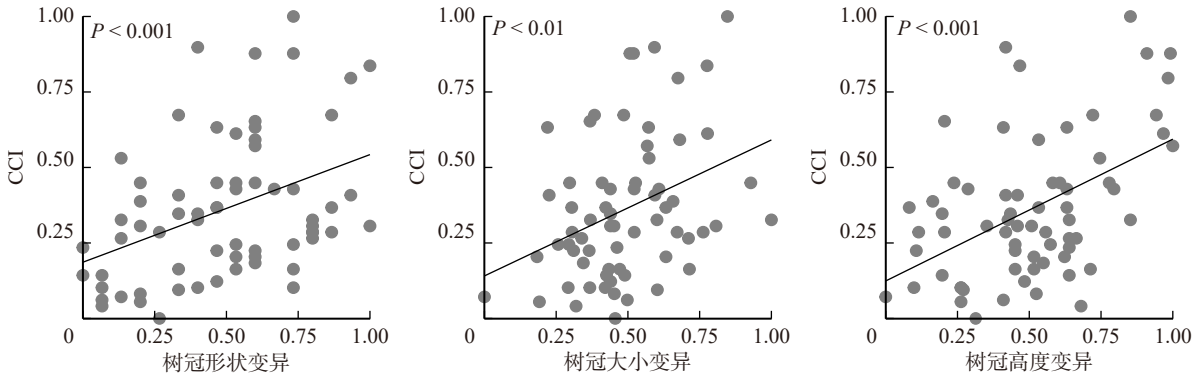


图 4　邻域树木性状变异与冠层空间互补性指数(CCI)的相关关系

Fig. 4　Correlations between trait variation of neighborhood trees and crown complementarity index (CCI)

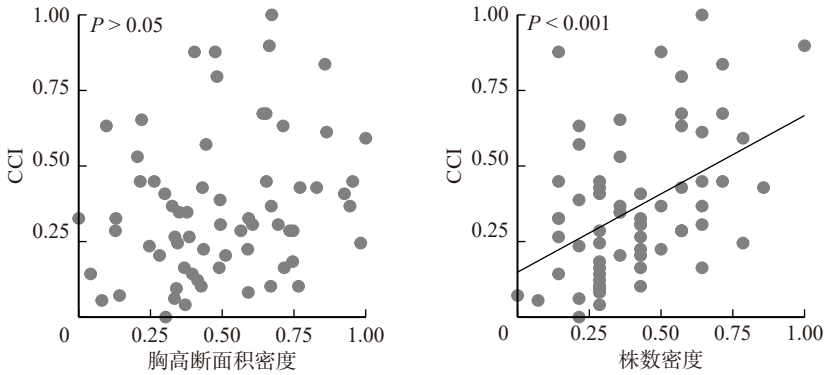
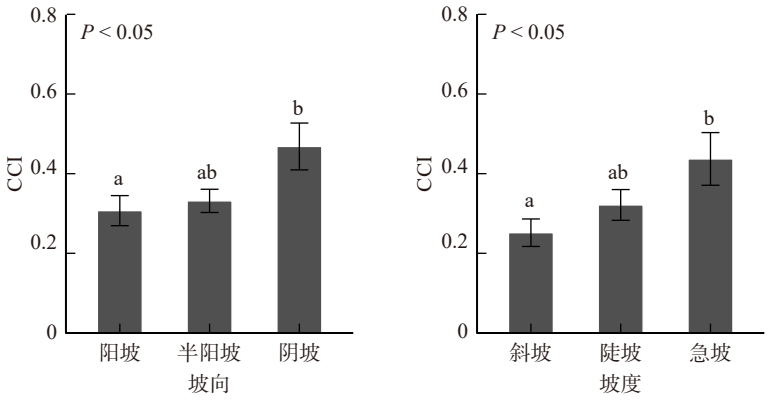


图 5　邻体密度与 CCI 的相关关系

Fig. 5　Correlations between neighborhood density and CCI



不同小写字母表示不同坡向、坡度间差异显著($P < 0.05$)。

图 6　不同地形因子 CCI 变化

Fig. 6　Variations in CCI across different topographic factors

2.3.2 土壤因子

土壤因子与 CCI 的线性相关分析结果表明(表 3),土壤全磷、全钾、有效磷、有效钾含量以及容重对 CCI 有显著的负影响。其中,全钾含量与 CCI 的拟合结果最为显著($P < 0.01$),其次是全磷含量($P < 0.05$)、有效磷含量($P < 0.05$)、有效钾含量($P < 0.05$)以及容重($P < 0.05$)。其余土壤因子与 CCI 的拟合效果并不显著。

表 3 土壤因子与 CCI 的线性回归及参数检验

Tab. 3 Linear regression and parameter testing of soil factors and CCI

指标	非标准化回归系数	标准误	t	P
含水量	0.16	0.10	1.55	> 0.05
容重	−0.19	0.09	−2.09	< 0.05
有机碳含量	0.13	0.10	1.26	> 0.05
全氮含量	0.00	0.10	0.04	> 0.05
全磷含量	−0.25	0.10	−2.49	< 0.05
全钾含量	−0.26	0.09	−3.05	< 0.01
有效氮含量	0.16	0.12	1.29	> 0.05
有效磷含量	−0.24	0.10	−2.36	< 0.05
有效钾含量	−0.20	0.09	−2.22	< 0.05

2.4 全子集模型构建

为进一步探究各个因子对 CCI 的相对影响,本研究基于全子集模型确定了各个因子的相对贡献(表 4)。邻域树木性状变异、邻体密度、地形因子和土壤因子均对 CCI 有影响(图 7)。该模型能够解释 CCI 变化的 50.6%,其中邻域树木性状变异对 CCI 的贡献占总解释量的 40.75%,其次是土壤因子,占总解释量的 31.64%,邻体密度和地形因子分别占 24.64% 和 2.97%。其中树木高度变异和株数密度对 CCI 有显著的正效应,胸高断面积密度、有效钾含量、全磷含量、含水量、容重以及坡度对 CCI 有显著的负效应。

2.5 冠层空间互补性与目标树胸径生长量的相关关系

CCI 与目标树的胸径生长量之间存在显著的正相关关系($P < 0.01$)(图 8),表明冠层空间互补性能够显著促进目标树胸径生长。

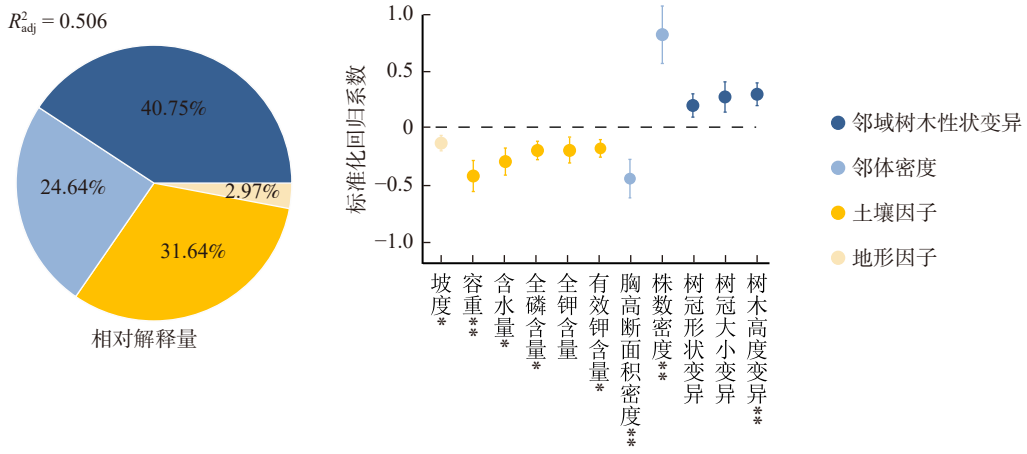
2.6 SEM 模型构建

SEM 模型(图 9)拟合状况良好,其中 $P = 0.10$,$\chi^2/df = 2.69$,GFI = 0.99,CFI = 0.99,SRMR = 0.03,RMSEA = 0.045。模型结果表明土壤因子、地形因

表 4 各解释变量对 CCI 的相对解释量

Tab. 4 Relative explanatory quantities of each explanatory variable to CCI

编号	截距	邻域树木性状变异			邻体密度		地形因子	土壤因子					AICc
		树冠形状变异	树冠大小变异	树木高度变异	胸高断面积密度	株数密度	坡度	含水量	全钾含量	全磷含量	容重	有效钾含量	
1	0.55		0.19	0.26	−0.49	0.92	−0.06	−0.38			−0.45		−33.63
2	0.45	0.21		0.25	−0.46	0.96	−0.03	−0.35			−0.46		−32.63
3	0.47	0.17	0.16	0.22	−0.50	0.90	−0.05	−0.34			−0.44		−32.65
4	0.64	0.25		0.25	−0.41	0.72	−0.05	−0.33	−0.17		−0.47		−32.98
5	0.38			0.33	−0.46	0.99		−0.32			−0.38		−33.69
6	0.32	0.23		0.26	−0.47	0.95		−0.29			−0.40		−34.61
7	0.32		0.15	0.31	−0.51	0.92		−0.28			−0.34		−33.64
8	0.28	0.21	0.13	0.25	−0.51	0.90		−0.26			−0.36		−33.79
9	0.41	0.28		0.27	−0.44	0.76		−0.25	−0.13		−0.38		−33.98
10	0.38	0.26		0.26	−0.42	0.79		−0.19			−0.40	−0.12	−33.28
11	0.32	0.25		0.26	−0.40	0.80		−0.19		−0.12	−0.36		−33.59
12	0.25	0.27		0.25	−0.29	0.59				−0.20	−0.26		−34.36
13	0.35	0.29		0.24	−0.32	0.56					−0.33	−0.21	−34.08
14	0.36	0.28		0.24	−0.31	0.54				−0.14	−0.32	−0.14	−33.89
15	0.22	0.25	0.13	0.24	−0.35	0.58				−0.18	−0.24		−33.44
16	0.30	0.26	0.13	0.24	−0.38	0.55					−0.30	−0.19	−33.37
17	0.42	0.32		0.25	−0.31	0.44			−0.12		−0.32	−0.18	−33.06



*表示 P<0.05，**表示 P<0.01。

图 7　全子集模型中各解释变量对 CCI 的影响及其相对解释量

Fig. 7　Influence and relative explanatory of each explanatory variable on CCI in the full subset model

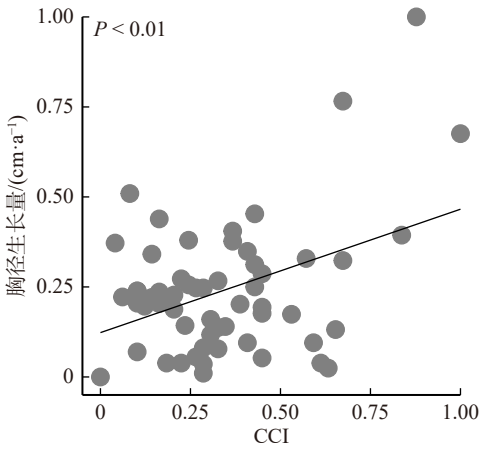
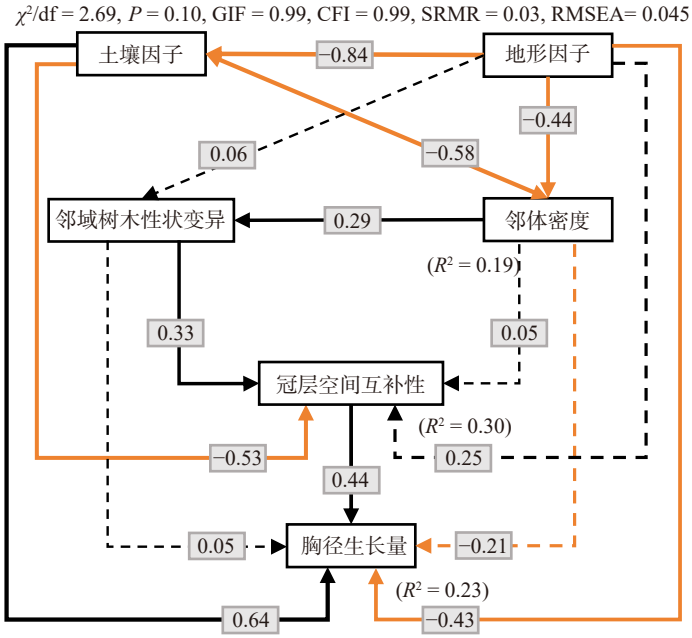


图 8　CCI 与目标树胸径生长量的相关关系

Fig. 8　Correlations between CCI and DBH growth of target trees

子、邻域树木性状变异、邻体密度以及冠层空间互补性约能解释胸径生长量变化的 23%。其中土壤因子的直接作用对目标树胸径生长量的影响最大（效应值 r = 0.64），然而其对冠层空间互补性的负影响也抑制了目标树胸径的生长（r = −0.23），但总体而言对目标树胸径生长量的总效应仍表现为显著的正效应（r = 0.41）；地形因子直接抑制了目标树的胸径生长（r = −0.43），然而其可通过增加冠层空间互补性间接促进目标树的生长（r = 0.11），但总的来说地形因子对目标树的生长仍呈现负作用（r = −0.32）；邻域树木性状变异对目标树胸径生长量的直接作用并不显著，但却可以通过冠层空间互补性间接作用于目标树的胸径生长（r = 0.15）；邻体密度对胸径生长



实线代表显著路径（P < 0.05），虚线代表不显著路径（P > 0.05）；黑线和橙线分别表示正向和负向的相关关系。

图 9　各观测变量对目标树胸径生长量的作用路径图

Fig. 9　Path diagram of effects of various explanatory variables on DBH growth of the target trees

量有抑制作用($r = -0.21$)，但其也可通过冠层空间互补性促进目标树的胸径生长($r = 0.02$)，总体而言邻体密度抑制了目标树的胸径生长($r = -0.19$)。

3 讨　论

3.1 生物因子对冠层空间互补性的影响

研究结果表明，邻域范围内树冠形状、大小变异以及树木高度变异和株数密度均能够提高冠层空间互补性，这与以往的结论[3−5,8−9]相符。其中，树木高度变异对冠层空间互补性的影响最大，可能是因为人工侧柏纯林内树种单一，树木将更多的光合产物分配给树高生长，造成林分内树冠的垂直分层，提高光能的利用效率[3]。但是与以往研究结果[9]不同的是，本文单因素线性拟合表明胸高断面积密度与冠层空间互补性的相关性并不显著。这可能是因为以往的研究多在混交林中进行，不同树种的生长速率差异较大[5]，而纯林中树木以相似的方式竞争生长空间和资源[3]。因此，与混交林相比，纯林内单木的胸径差异并不明显。这可能是胸高断面积密度与冠层空间互补性之间的关系并不显著的原因之一。

3.2 非生物因子对冠层空间互补性的影响

部分非生物因子对冠层空间互补性也有着显著的影响。其中阴坡的冠层空间互补性明显高于阳坡，这可能是因为阳坡所接受到的太阳辐射量更大，与阴坡相比林内气温更高[37]，同时空气中湿度小、土壤水分含量也更低[38]，生长在阳坡的树木比生长在阴坡的树木更容易受到水分胁迫的影响。已有研究证实，阴坡的侧柏生长更好，单木的冠幅、冠体积以及冠长普遍比阳坡的更大[38]，这也导致阴坡内单木树冠重叠度更高，进而具有更高的冠层空间互补性。坡度同样能够影响冠层空间互补性。与生长在坡度较缓的林分相比，较陡坡上的树冠可能更容易进行光拦截[39]。同时，陡峭的坡度使得树木个体向下坡方向倾斜[40]，增加了树冠的不对称性，进而增加了水平的冠层空间利用效率[41]。但是土壤因子的研究结果与前人的研究有较大的出入，Zheng 等[11]在浙江舟山和宁波地区的亚热带次生林中进行了相关研究，结果表明土壤含水量与冠层空间互补性之间有十分显著的正相关关系($R^2 = 0.36$, $P < 0.001$)。但在此次研究中，两者之间的关系并不显著，可能的原因是侧柏作为常绿树种，其茎段的生理结构导致侧柏具有保守型的资源获取和利用策略[42−43]，因此侧柏对于土壤水分的变化并不敏感。Zheng 等[11]研究表明土壤的有机碳含量($R^2 = 0.16$, $P < 0.01$)能够普遍提高冠层空间互补性，然而在本研究中土壤有机碳含量与冠层空间互补性并没有显著的相关关系($P > 0.05$)，而本文的结果与 Xu 等[5]的结果相类似。土壤的部分营养元素(全磷含量、全钾含量、有效磷含量、有效钾含量)与冠层空间互补性呈显著的负相关关系，这可能是因为冠层空间互补性更高，往往代表在该邻域内树冠具有更高的重叠度。这也导致林下植被无法获取足够的阳光，不利于生长，凋落物较少，土壤的有机质和氮、磷、钾等营养元素的含量也会相应下降[44]。

3.3 冠层空间互补性对目标树生长量的中介效应

邻域树木性状变异、邻体密度、土壤因子、地形因子不仅直接对目标树胸径生长量产生影响，还可以通过冠层空间互补性间接作用于目标树生长(图 9)。邻体密度的增加提高了冠层空间互补性，提升了空间利用效率，间接促进了目标树的胸径生长。然而，高密度也加剧了树木之间的养分竞争[44]，直接抑制了目标树的生长。总体而言，株数密度的增加抑制了目标树的胸径生长。邻域树木性状变异对目标树胸径生长量的直接影响不显著，但通过冠层空间互补性间接影响显著。这可能是因为树冠形变虽不影响树干生长，但冠层互补提高了资源利用效率，从而间接促进光合作用和胸径生长。相反，土壤因子对目标树胸径生长量的直接影响最为强烈，而通过冠层空间互补性的间接作用相对来说较小，这可能是因为土壤肥力对树干生物量的直接影响较大，但对于树冠结构[45]的影响较小，与前人的研究结果[5]是一致的。地形因子对目标树胸径生长量的直接影响显著，同时其也能够通过冠层空间互补性间接促进目标树胸径的生长。

4 结　论

本研究以手持激光雷达(HMLS)为工具，以北京市十三陵的人工侧柏纯林为研究对象，探究侧柏冠层空间互补性的影响因素及其对目标树胸径生长量的作用。

(1)通过实测数据验证，HMLS 获取的胸径数据精度最高，其次是树冠和树高。所有数据的 R^2 均大于 0.65，表明 HMLS 在人工侧柏林的冠层结构研究中具有较高的测量精度和应用价值。

(2)生物因子中，树冠形状变异、大小变异和树木高度变异以及株数密度均能够显著增加冠层空间互补性。非生物因子中，土壤全磷、全钾、有效钾、有效磷含量以及土壤容重对冠层空间互补性有显著的负效应；坡度、坡向与冠层空间互补性的相关关系较为显著，其中阴坡的冠层空间互补性显著高于阳坡，急坡的冠层空间互补性显著高于斜坡。全子集模型的结果表明，邻域树木性状变异和土壤因子对

冠层空间互补性的相对解释量最大。

(3)冠层空间互补性能够显著提高目标树的胸径生长量。邻体密度、邻域树木性状变异、土壤和地形因子均可通过冠层空间互补性间接作用于目标树生长。其中非生物因子对目标树生长量的直接影响最为显著,而生物因子则通过冠层空间互补性起到了较为显著的间接促进作用。因此在种植侧柏时,应尽量选择阴坡且土壤养分含量丰富的地区,而对已建成的人工侧柏纯林,则应定期修剪以提高垂直方向的树高差异,进而促进单木生长。

参　考　文　献

[1] Fichtner A, Härdtle W, Bruelheide H, et al. Neighbourhood interactions drive overyielding in mixed-species tree communities[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 1144.

[2] Pretzsch H. Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures[J]. Forest Ecology and Management, 2014, 327: 251−264.

[3] Kunz M, Fichtner A, Härdtle W, et al. Neighbour species richness and local structural variability modulate aboveground allocation patterns and crown morphology of individual trees[J]. Ecology Letters, 2019, 22(12): 2130−2140.

[4] Williams L J, Paquette A, Cavender-Bares J, et al. Spatial complementarity in tree crowns explains overyielding in species mixtures[J]. Nature Ecology & Evolution, 2017, 1(4): 0063.

[5] Xu Y, Chen H Y H, Xiao Z, et al. Species richness promotes productivity through tree crown spatial complementarity in a species-rich natural forest[J]. Forests, 2022, 13(10): 1604.

[6] 王平, 王天慧, 周道玮, 等. 植物地上竞争与地下竞争研究进展 [J]. 生态学报, 2007, 27(8): 3489−3499.
Wang P, Wang T H, Zhou D W, et al. A literature review on the above-and below-ground competition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(8): 3489−3499.

[7] Donald C. The interaction of competition for light and for nutrients[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1958, 9(4): 421.

[8] Ali A, Lin S L, He J K, et al. Tree crown complementarity links positive functional diversity and aboveground biomass along large-scale ecological gradients in tropical forests[J]. Science of The Total Environment, 2019, 656: 45−54.

[9] Jucker T, Bouriaud O, Coomes D A. Crown plasticity enables trees to optimize canopy packing in mixed-species forests[J]. Functional Ecology, 2015, 29(8): 1078−1086.

[10] Hildebrand M, Perles-Garcia M D, Kunz M, et al. Tree-tree interactions and crown complementarity: the role of functional diversity and branch traits for canopy packing[J]. Basic and Applied Ecology, 2021, 55: 53−63.

[11] Zheng L T, Chen H Y H, Yan E R. Tree species diversity promotes litterfall productivity through crown complementarity in subtropical forests[J]. Journal of Ecology, 2019, 107(4): 1852−1861.

[12] 国家林业与草原局. 中国森林资源报告 (2014—2018) [M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.
National Forestry and Grassland Administration. China forest resources report (2014−2018) [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019.

[13] 范伟伟, 刘浩然, 徐永胜, 等. 基于地基激光雷达和手持式移动激光雷达的单木结构参数提取精度对比 [J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(8): 63−74.
Fan W W, Liu H R, Xu Y S, et al. Comparison of extraction precision of individual tree structure parameters based on terrestrial laser scanning and hand-held mobile laser scanning[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(8): 63−74.

[14] 罗梅, 郑小贤. 北京十三陵林场人工侧柏林天然更新研究 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2012, 40(12): 73−78.
Luo M, Zheng X X. Natural regeneration of artificial *Platycladus orientalis* stands in Shisanling Forest Farm, Beijing[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2012, 40(12): 73−78.

[15] 王子斐. 基于手持式移动激光雷达的近自然经营林分结构特征及变化研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
Wang Z F. Study on the structure parameters and changes of close-to-nature management forest stands based on hand-held mobile laser scanning[D]. Shanghai: East China Normal University, 2022.

[16] 王坚. 北京十三陵林场可燃物载量调查及其燃烧性分析 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
Wang J. The combustibility on major forest types of Beijing Ming Tombs Forest Farm[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[17] 李伟明. 北京十三陵林场主要林分类型地表可燃物负荷量及影响因子研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
Li W M. Surface fuel load and influencing factors of main forest types in Beijing Ming Tombs Forest Farm[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[18] Seidel D, Leuschner C, Müller A, et al. Crown plasticity in mixed forests: quantifying asymmetry as a measure of competition using terrestrial laser scanning[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 261(11): 2123−2132.

[19] 马士友. 北京地区侧柏人工林径向生长对采伐、气候因子的响应研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
Ma S Y. Research on the response of radial growth to thinning and climate factors for *Platycladus orientalis* plantations in Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.

[20] 张明辉, 尹昀洲, 王珂, 等. 水曲柳人工林空间结构特征对土壤养分含量的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(9): 73−82.

Zhang M H, Yin Y Z, Wang K, et al. Effects of spatial structure characteristics of *Fraxinus mandshurica* plantation on soil nutrient content[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(9): 73−82.

[21] 王攀磊, 秦凤琴, 蔡培, 等. 华北半湿润地区土壤酸化和有机碳测定方法的比较 [J]. 土壤通报, 2014, 45(4): 863−870.
Wang P L, Qin F Q, Cai P, et al. Comparison of acidification and soil organic carbon determination for semihumid soils in north china[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(4): 863−870.

[22] 中国林业科学研究院林业研究所森林土壤研究室. 森林土壤含水量的测定: LY/T 1213—1999[S]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
Forest Soil Research Laboratory, Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry. Determination of forest soil water content: LY/T 1213-1999[S]. LY/T 1213−1999. Beijing: China Agriculture Press, 1999.

[23] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 (第 4 部分: 土壤容量的测定): NY/T 1121.4—2006[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Soil testing (part 4: method for determination of soil bulk density): NY/T 1121.4−2006[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.

[24] 焦如珍, 董玉红, 孙启武. 森林土壤氮的测定: LY/T 1228—2015[S]. 北京: 国家林业局, 2015.
Jiao R Z, Dong Y H, Sun Q W. Nitrogen determination methods of forest soils: LY/T 1228−2015[S]. Beijing: National Forestry and Grassland Administration, 2015.

[25] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 (第 7 部分: 酸性土壤有效磷的测定): NY/T 1121.7—2006[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Soil testing (part 7: method for determination of available phosphorus in acid soil): NY/T 1121.7−2006[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.

[26] 焦如珍, 董玉红, 孙启武. 森林土壤钾的测定: LY/T 1234—2015[S]. 北京: 国家林业局, 2015.
Jiao R Z, Dong Y H, Sun Q W. Potassium determination methods of forest soils: LY/T 1234−2015[S]. Beijing: National Forestry and Grassland Administration, 2015.

[27] 李朝英, 郑路. 流动分析仪同时快速测定植物全氮、全磷含量的方法改进 [J]. 中国土壤与肥料, 2021(2): 336−342.
Li C Y, Zheng L. Improvement of simultaneous and rapid determination of total nitrogen and total phosphorus in plants by flow analyzer[J]. China Soil and Fertilizer, 2021(2): 336−342.

[28] 钟坚海, 叶华欣, 李泳涛, 等. 压片制样−波长色散 X 射线荧光光谱法测定土壤和沉积物中主、次及微量元素 [J]. 中国无机分析化学, 2022, 12(6): 34−39.
Zhong J H, Ye H X, Li Y T, et al. Determination of major, minor and micro elements in soils and sediments by wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry with pressed powder pellet[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2022, 12(6): 34−39.

[29] 姜泽, 陈杰, 唐丽玉, 等. 基于机载 LiDAR 数据的福建柏人工林林木参数提取 [J]. 应用生态学报, 2024, 35(2): 321−329.
Jiang Z, Chen J, Tang L Y, et al. Tree parameter extraction in *Fokienia hodginsii* plantation based on airborne LiDAR data[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(2): 321−329.

[30] 邓欧平, 周稀, 黄萍萍, 等. 川中紫色丘区土壤养分空间分异与地形因子相关性研究 [J]. 资源科学, 2013, 35(12): 2434−2443.
Deng O P, Zhou X, Huang P P, et al. Correlations between spatial variability of soil nutrients and topographic factors in the purple hilly region of Sichuan[J]. Resource Science, 2013, 35(12): 2434−2443.

[31] 孟宪宇. 测树学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2006.
Meng X Y. Forest mensuration[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2006.

[32] 谢伊, 杨华. 长白山天然云冷杉针阔混交林主要树种胸径生长与林分空间结构的关系 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(9): 1−11.
Xie Y, Yang H. Relationship between stand spatial structure and DBH increment of principal species in natural spruce-fir mixed forest in Changbai Mountains of northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(9): 1−11.

[33] 台翔. 植被覆盖条件下的无人机多光谱遥感土壤含盐量监测模型 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
Tai X. Soil salinity monitoring model on UAV multi spectral remote sensing under vegetation cover[D]. Yangling: Northwest University of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2023.

[34] 魏安然, 张雨秋, 谭凌照, 等. 抚育采伐对针阔混交林林分结构及物种多样性的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(5): 148−158.
Wei A R, Zhang Y Q, Tan L Z, et al. Effects of tending felling on stand structure and species diversity of mixed coniferous and broadleaved forest[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(5): 148−158.

[35] 李新建, 杨子铎, 何海梅, 等. 湖南栎类天然林林分结构对林分生长的影响研究 [J]. 林业资源管理, 2022(4): 164−171.
Li X J, Yang Z D, He H M, et al. Study on the influence of stand structure on stand growth of oak natural forest in Hunan Province based on structural equation model[J]. Forest and Grassland Resources Research, 2022(4): 164−171.

[36] 董灵波, 田栋元, 陈莹, 等. 基于结构方程模型的兴安落叶松天然林更新影响因素 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2763−2772.
Dong L B, Tian D Y, Chen Y, et al. Clarifying the factors affecting *Larix gmelinii* forest regeneration based on structural equation model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(8): 2763−2772.

[37] 程积民, 程杰, 高阳. 渭北黄土区不同立地条件下刺槐人工林群

落生物量结构特征 [J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(2): 15−21.
Cheng J M, Cheng J, Gao Y. Structural characteristics of community biomass in *Robinia pseudoacacia* plantations under different site conditions at Webei loess region, northwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(2): 15−21.

[38] 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.

[39] Daly C, Smith J W, Smith J I, et al. High-resolution spatial modeling of daily weather elements for a catchment in the Oregon Cascade Mountains, United States[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2007, 46(10): 1565−1586.

[40] Lang A C, Härdtle W, Bruelheide H, et al. Horizontal, but not vertical canopy structure is related to stand functional diversity in a subtropical slope forest[J]. Ecological Research, 2012, 27(1): 181−189.

[41] Schröter M, Härdtle W, von Oheimb G. Crown plasticity and neighborhood interactions of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in an old-growth forest[J]. European Journal of Forest Research, 2012, 131(3): 787−798.

[42] 王林, 冯锦霞, 王双霞, 等. 干旱和坡向互作对栓皮栎和侧柏生长的影响 [J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2425−2433.
Wang L, Feng J X, Wang S X, et al. The interaction of drought and slope aspect on growth of *Quercus variabilis* and *Platycladus orientalis*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(8): 2425−2433.

[43] 牛存洋, 寿文凯, 杨喜田, 等. 太行山区栓皮栎、刺槐和侧柏对干旱的适应策略研究 [J]. 林业科学研究, 2022, 35(6): 73−82.
Niu C Y, Shou W K, Yang X T, et al. Study on the adaptation strategies of *Quercus variabilis*, *Robinia pseudoacacia* and *Platycladus orientalis* to drought in Taihang Mountains[J]. Forest Research, 2022, 35(6): 73−82.

[44] 胡译水. 北京山区侧柏和油松林下土壤化学性质与典型植物种间关系 [D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
Hu Y S. Relationship between soil chemical properties and typical plant species under forests of *Platycladus orientalis* and *Pinus tabuliformis* in Beijing mountainous area[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.

[45] Ammer C. Diversity and forest productivity in a changing climate[J]. New Phytologist, 2019, 221(1): 50−66.

（责任编辑　孟　瑶　李　契
责任编委　张会儒）