

DOI: 10.20103/j.stxb.202307131514

薛永鑫, 南晓凡, 李献文, 于森, 马冰倩, 徐程扬. 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. 生态学报, 2024, 44(11): 4758-4769.
Xue Y X, Nan X F, Li X W, Yu M, Ma B Q, Xu C Y. Effects of neighborhood competition on visual morphological traits of coniferous trees in fine-scale landscapes of urban forests. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(11): 4758-4769.

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

薛永鑫^{1,2}, 南晓凡^{1,2}, 李献文^{1,2}, 于森^{1,2}, 马冰倩^{1,2}, 徐程扬^{1,2,*}

1 北京林业大学城市林业研究中心, 北京 100083

2 森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083

摘要: 树木视觉形态性状是城市绿地微景观美学质量的重要影响因素之一, 树木视觉形态性状的变化与其周围邻体木的竞争作用息息相关, 但邻体竞争对树木视觉性状的作用机制尚不明确。研究于 2022 年 8—10 月对北京市城市公园中常见的针叶树种白皮松、侧柏、油松、圆柏展开调查, 从树冠形态、干冠协调、树干形态 3 个方面构建了 9 个树木视觉形态性状指标, 采用 3 个不同的竞争指标分析邻体竞争对针叶树种视觉形态性状的影响。结果表明, 针叶树的树冠形态对邻体竞争的响应比较敏感, 竞争中的白皮松、侧柏、油松、圆柏偏冠指数与孤立木相比分别提高了 16.95%、28.95%、22.76%、17.67%; 树冠缺失率分别提高了 3.92%、6.09%、4.87%、4.95%。与孤立木相比, 部分针叶树种高径比、分枝角变异度在多侧竞争环境中显著提高, 而树冠舒展度则显著降低。邻体竞争强度越大, 针叶树树冠的偏移与缺失程度越大。当针叶树受到强烈的侧方竞争时, 对象木树冠和树干的径向生长显著受阻, 表现为树冠舒展度大幅度下降、高径比显著提高, 使树冠向细高方向发展。当针叶树上方的生长空间被占据时, 其轴向生长同样受到严重阻碍, 树木的冠径比和高径比维持较稳定状态。总体而言, 四种针叶树种在视觉形态上对竞争胁迫的响应具有一定差异性, 其中油松最为敏感, 圆柏次之。综上, 在城市森林微景观中, 邻体竞争会导致针叶树种的树冠及树形发生明显变化, 这种变化主要受综合资源竞争的影响, 与其周围潜在生长空间的大小及对称性有关。在城市森林景观营造时, 建议将针叶树栽植在对称的竞争环境中, 但是其邻体木不宜过高, 通过四周邻体木的适度竞争, 能够促进针叶树的轴向生长, 同时降低树冠偏移或变形的风险, 提高其视觉美学效果。

关键词: 城市森林微景观; 视觉形态性状; 邻体竞争; 针叶树; 美学质量

Effects of neighborhood competition on visual morphological traits of coniferous trees in fine-scale landscapes of urban forests

XUE Yongxin^{1,2}, NAN Xiaofan^{1,2}, LI Xianwen^{1,2}, YU Miao^{1,2}, MA Bingqian^{1,2}, XU Chengyang^{1,2,*}

1 Research Center for Urban Forestry of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Key Laboratory for Forest Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing 100083, China

Abstract: The visual morphological trait of trees is one of the important factors affecting aesthetic quality of urban fine-scale landscape. However, the changes of visual morphological traits of trees are closely related to the competition of neighborhood trees, and the mechanisms of neighborhood competition affecting visual morphological traits of trees remain unclear. From August to October 2022, this study investigated frequently utilized conifers which include *Pinus bungeana*, *Platycladus orientalis*, *Pinus tabulaeformis* and *Juniperus chinensis* in urban parks in Beijing. Nine visual morphological traits were adopted from three aspects: crown morphology, trunk-crown balance and trunk morphology. And 3 different competition

基金项目: 朝阳区平原生态林定向抚育关键技术集成与示范 (CYSF-1904)

收稿日期: 2023-07-13; 网络出版日期: 2024-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cyxu@bjfu.edu.cn

indices were used to analyze the effects of neighborhood competition on visual morphological traits of conifers. The results showed that the crown morphology of coniferous trees was sensitive to neighbor competition. Compared with isolated trees, the crown asymmetry degree of *Pinus bungeana*, *Platycladus orientalis*, *Pinus tabulaeformis*, and *Juniperus chinensis* increased by 16.95%, 28.95%, 22.76% and 17.67%, respectively. The crown loss rate increased by 3.92%, 6.09%, 4.87% and 4.95%, respectively. The ratio of height-diameter and the variation of branch angle of some conifers significantly increased under the influence of multi-lateral competition, while the crown stretching degree significantly decreased. The greater the intensity of neighbor competition was, the greater the degree of canopy deviation and loss was. When conifers were subjected to intensively lateral competition, the radial growth of the crown and trunk of the target tree was significantly restricted, which showed that the crown stretching degree decreased significantly and the ratio of height-diameter increased significantly, the crown became thin and tall. When the growing space above coniferous trees was occupied, the axial growth was limited, the ratio of crown-diameter and the ratio of height-diameter were stable. In general, there were some differences in the visual morphological response of the four conifers to competition stress, among which *Pinus tabulaeformis* was the most sensitive, followed by *Juniperus chinensis*. In a word, the morphological variations in the canopy and tree shape of coniferous trees changed obviously by neighborhood competition in fine-scale landscape of urban forest, which were mainly affected by comprehensive resource competition and related to the size and symmetry of potential growth space. The study suggests that coniferous should be planted in a symmetrical competitive environment, but the neighborhood trees should not be too high. Through moderate competition of neighborhood trees, the axial growth of conifers will be promoted, while the risk of tree crown deviation or deformation will be reduced, and the visual aesthetic effect will be improved.

Key Words: fine-scale landscape of urban forest; visual morphological traits; neighborhood competition; coniferous trees; aesthetic quality

城市森林微景观是指在局地小尺度空间上,根据综合或主导生态系统服务功能需求,运用乔、灌、草等景观要素在空间上合理安排各要素的位置而形成的植被群体,它在规模上比群落和种群尺度更小;在片林和带状城市森林中,微景观在树种组成和空间配置上与周边植被有明显差异;所以,微景观是城市绿地规划设计、栽植和后续经营管护的最小单元。与景观尺度、城区尺度相对应,许多学者将局地尺度生境^[1]或城市森林^[2]称为微尺度。可以说,除大面积纯林和线状行道树外,各类公园、游园、防护绿地中的任何一片城市绿地都是由一个或多个微景观构成的。因此,研究微景观质量是揭示城市绿地质量形成机制的基础。目前,在微景观尺度上开展的城市绿地研究主要包括树木密度^[2]、景观设计^[3]、生物多样性特性^[1,4]、视觉质量^[5]等方面。

相对于城市森林中的灌木和草本,城市树木体型高大、造景稳定,是空间的主景和视觉焦点^[6-7]。针叶树种因其在外形、质感、颜色等方面与阔叶树有较大区别,能够丰富微景观群落的空间变化,提高观赏新颖性^[8],近年来被广泛应用于城市森林景观构建中,并成为国内外学者景观美学质量研究的重点之一。现有研究表明,针叶树种的树冠舒展度^[9-10]、树冠枯死率^[11]、树干倾斜度^[12-13]、高径比^[14]、冠层密度^[15]等视觉性状指标均与景观美景度密切相关,人们更倾向于观赏树型高大、树干通直、树冠协调的针叶树景观。然而,树木的视觉性状取决于其所处生存环境的空间结构,与其周围邻体木的竞争作用息息相关^[16-17]。目前,关于邻体竞争对城市树木视觉形态性状的影响机制鲜有报道。

纵观邻体竞争方面的研究,近几十年来国内外学者构建了大量的竞争指标,用来探索邻体竞争对林木生长的限制作用^[18-19]。从资源利用的角度概括,这些竞争指标大致可以分为以下三类:基于光资源的竞争指标,考虑树木上方及侧上方光照的可利用程度,包括开敞度^[20]、庇荫度等;基于空间资源的竞争指标,考虑树木周围潜在生长空间的大小^[21],包括利用树冠重叠因子^[22-24]构建的指标和利用 Voronoi 图构建的指标^[25];基于综合资源的竞争指标,考虑树木周围竞争木的大小,认为个体越大其占有的空间和光资源越多,包括以胸径^[26-28]、胸高断面面积^[29]、冠幅^[30]等为基础构建的竞争指标。迄今为止,这些竞争指标被广泛应用于单木生

长模型中,并与油松 (*Pinus tabulaeformis*)^[31]、落叶松 (*Larix gmelinii*)^[32]、樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *Mongolica*)^[33]等多种针叶树种的胸高断面面积生长量、树冠半径生长量建立了数学关系^[34-35]。但是,上述与邻体竞争有关的研究主要集中在山区或城郊规模较大的片林中,且研究目标多聚焦在林木生长量上,对于城市树木视觉形态性状的研究鲜见报道。

因此,本文以白皮松 (*Pinus bungeana*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*)、油松和圆柏 (*Juniperus chinensis*) 4 种北京市城市森林微景观中常见的观赏针叶树种为研究对象,重点解决以下科学问题:(1)光照和空间限制是否是邻体竞争引起针叶树木视觉形态性状变化的主要原因?(2)如果是,这些视觉形态性状的变化呈现什么规律?

1 研究地概况

北京市地处华北平原北部,地理坐标范围 115°25′—117°30′E、39°28′—41°05′N,地势西北高、东南低。夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,四季分明,春秋短促,属典型的暖温带大陆性季风气候。年平均气温 10—12℃,年平均降水量 600—620 mm。北京市五环内城区全部为人工植物群落,主要由大型公园绿地、附属绿地和防护绿地构成^[36]。2022 年,北京市新增城市绿地 240 hm²。截止 2022 年年底,北京市城市绿化覆盖率达到 49.3%,人均公园绿地面积 16.63 m²,公园绿地 500 m 服务半径覆盖率达到 88%。

本研究于 2022 年 8—10 月,在北京市六环内选择公众活动相对较多的 8 个城市公园、2 个郊野公园和 1 个森林公园作为研究地点(图 1),在 11 个公园内共设置 54 块含有白皮松、侧柏、油松、圆柏等针叶树种的典型临时微景观样地作为研究对象(表 1)。

表 1 微景观样地基本信息

Table 1 Basic information of sampled fine-scale landscape plots

公园类型 Park type	公园名称 Park name	建成年份 Year of completion	地理位置 Geographical position	样地数量 Number of plots
城市公园 City Park	青年湖公园	1960	北京市东城区	8
	柳荫公园	1984	北京市东城区	9
	北滨河公园	2000	北京市西城区	4
	人定湖公园	1958	北京市西城区	4
	海淀公园	2003	北京市海淀区	3
	紫竹院公园	1953	北京市海淀区	4
	望和公园	2015	北京市朝阳区	3
	望承公园	2010	北京市朝阳区	3
郊野公园 Country Park	东升八家郊野公园	2009	北京市海淀区	3
	中关村公园	2017	北京市海淀区	4
森林公园 Forest Park	奥林匹克森林公园	2008	北京市朝阳区	9

2 研究方法

2.1 样地调查方法

采用典型样地调查法,在上述 11 个城市公园中选取含有针叶树种的、相对独立的团状微景观作为研究对象,设置样地大小为 10 m×10 m、10 m×20 m 和 20 m×20 m 三种类型,每个样地内的林木株数约 6—12 株。对各样地进行实地调查,获取并记录以下内容:

(1)环境调查:调查并记录景观位置、景观类型、主景观赏方向、四周地物、垂直结构、灌草种类等信息,并沿着主景观赏方向拍摄照片;(2)树木调查:对微景观样地内的乔木树种以 4 cm 为起测径阶进行每木检尺,同时记录树种、四个方向冠幅、树冠缺失情况、一级枝条张开角度、树干弯曲长度、树干倾斜角度等树木基本信息;(3)邻体关系调查:对微景观内所有胸径大于 4 cm 的乔木进行编号,以微景观的西南角为原点,使用皮尺



图 1 研究公园分布图

Fig.1 Study parks distibution map

和激光测距仪测量每棵树木的相对坐标。选取景观内没有截干痕迹、没有病虫害、受人工干扰较少的树木作为对象木,选取对象木周围与其有树冠接触,或在树冠上方、侧上方有近距离遮蔽效应的所有个体作为竞争木,分别记录竞争木的编号、每株竞争木与对象木树冠是否重叠、树冠重叠区域的大小等信息。

此外,针对白皮松等北京市常见针叶绿化树种,调查并记录每个树种孤立木的树木信息,主要包括胸径、树高、冠幅、枝下高、树冠缺失情况、一级枝条分枝角等指标。

2.2 邻体竞争指标选取

本文参考了相关学者关于邻体竞争指标比较与应用的研究结果^[37-40],结合城市公园微景观空间结构复杂多变的特点,选取了 3 个典型的邻体竞争指标,从光资源与空间资源等不同维度衡量对象木受到的邻体竞争强度。竞争指标数值越大,表示对象木受到邻体木竞争的胁迫程度越高。各个竞争指标的计算方法、构建基础、具体含义及来源见表 2。

表 2 邻体竞争指标

Table 2 Neighbor competition indexes

竞争指标 Competition indexes	计算方法 Calculation method	构建基础 Foundation of construction	具体解释 Specific explanation	参考文献 References
CI_1	$\sum_{j=1}^n \frac{D_j^2}{D_i} \times \frac{1}{L_{ij}^2}$	胸径、距离	i 为对象木, j 为竞争木, n 为对象木 i 周围竞争木 j 的数量, D 为树木的胸径 (cm), L 为树木之间的直线距离 (m)。 CI_1 反映对象木受到周围大树对资源的综合掠夺程度	张跃西 ^[27]
CI_2	$\sum_{j=1}^n \frac{ZO_{ij}}{ZA_i} \times \left(\frac{D_j}{D_i} \right)$	胸径、树冠重叠面积	ZO 为树冠重叠的垂直投影面积 (m ²), ZA 为树冠垂直投影面积 (m ²)。 CI_2 反映对象木在空间资源利用上受到的压迫程度	Bella ^[22]
CI_3	$\sum_{j=1}^n \frac{H_j - H_i}{L_{ij}} (H_j > H_i)$	树高、距离	H 为树木的树高 (m)。 CI_3 反映对象木在 (侧) 上方光照资源利用上受到的压迫程度	(改自) 罗耀华 ^[20]

2.3 视觉形态性状指标选取

结合城市针叶树种视觉形态性状的特点及前人研究结果^[41-44],本研究从树冠性状、干冠协调性状、树干性状三个方面选取了偏冠指数、树冠圆满度、树冠缺失率等9个指标,用来表示树木的视觉形态观赏特性。各个视觉形态性状指标的类型、名称、计算方法及具体含义见表3。

表3 视觉形态性状指标

Table 3 Visual morphological traits indexes

类型 Type	名称 Name	计算方法 Calculation method	具体解释 Specific explanation
树冠性状 Crown traits	偏冠指数(CAD)	$CAD = \max(\frac{W_e}{W_w}; \frac{W_w}{W_e}; \frac{W_s}{W_n}; \frac{W_n}{W_s})$	W_e 、 W_w 、 W_s 、 W_n 分别为树木在东、西、南、北4个方向的冠幅(m)。CAD反映树冠偏离树木中心的最大程度
	树冠圆满度(CRD)	$CRD = CW/CL$	CW 为冠幅(m), CL 为冠长(m)。CRD反映树冠发育的圆满程度
	树冠缺失率(CLR)	$CLR = CV_m/CV \times 100\%$	CV_m 为树冠缺失体积(m^3), CV 为树冠完整体积(m^3)。CLR反映树冠的缺失程度
干冠协调性状 Trunk-crown balance traits	树冠舒展度(CSD)	$CSD = CW/H$	H 为树高(m)。CSD反映树冠的径向舒展程度及干冠协调程度
	冠径比(RCD)	$RCD = CW/DBH$	DBH 为树木胸径(cm)。RCD反映树冠与树干的径向协调程度
	高径比(RHD)	$RHD = H/DBH$	RHD反映树木径向与轴向的整体协调程度
树干性状 Trunk traits	分枝角变异度(VBA)	$VBA = \sigma_{BD}/\overline{BD} \times 100\%$	σ_{BD} 为一级枝分枝角的离差, \overline{BD} 为一级枝分枝角的均值。VBA反映树木一级枝条的分枝角度差异
	树干弯曲度(TCD)	$TCD = (TL_c - TL_s)/TL_s \times 100\%$	TL_c 为主干曲线长度(m), TL_s 为主干直线长度(m)。TCD反映树木主干的弯曲程度
	树干倾斜度(TID)	$TID = 90^\circ - \theta$	θ 为树干与水平地面夹角。TID反映树木主干的倾斜程度

结合每棵树木的实际冠形,将树冠体积 CV 分为尖塔形^[45]和圆柱形^[46]三种类型分别计算。冠幅 CW 和树冠体积 CV 的计算方法如下:

$$CW = (W_e + W_w + W_s + W_n)/2$$

$$CV_{\text{尖塔形}} = \pi(W_e + W_w)(W_s + W_n)CL/12$$

$$CV_{\text{卵圆形}} = \pi(W_e + W_w)(W_s + W_n)CL/8$$

$$CV_{\text{圆柱形}} = \pi(W_e + W_w)(W_s + W_n)CL/4$$

式中, W_e 、 W_w 、 W_s 、 W_n 分别为树木在东、西、南、北4个方向的冠幅, CL 为树木冠长。

2.4 数据处理

本文从54个含有针叶树种的城市公园微景观中,共提取出207棵受到竞争影响的针叶树对象木,其中白皮松48棵,侧柏29棵,油松67棵,圆柏63棵,不同竞争环境下针叶树的视觉形态示例见图2。将各个树种的对象木按照仅一侧有竞争木、两侧(非对称方向)有竞争木、三侧有竞争木、四侧有竞争木分为4组(表4)。为了避免树种生物学、生态学特性带来的不可比性,另调查了45株孤立木,用于视觉形态性状的差异化对比以及部分绝对值指标的相对化计算。

表4 各个竞争类型针叶树个体的样本数量

Table 4 The sample number of coniferous trees in each competition type

树种名称 Name of tree species	孤立木 Isolated tree	一侧有竞争树木 Tree with one-side competition	两侧有竞争树木 Tree with two-side competition	三侧有竞争树木 Tree with three-side competition	四侧有竞争树木 Tree with four-side competition
白皮松 <i>Pinus bungeana</i>	10	5	17	17	9
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	10	0	10	11	8
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	12	7	22	21	17
圆柏 <i>Juniperus chinensis</i>	13	7	14	25	17



图 2 不同竞争环境下针叶树木视觉形态示例图

Fig.2 Sample graph of visual morphological of coniferous trees in different competitive environments

调查所得针叶树种竞争指标 CI_1 、 CI_2 、 CI_3 的取值范围分别为 $[0, 20]$ 、 $[0, 1]$ 、 $[0, 5]$ 。为减小个体差异带来的负面影响,使用等差法^[12]将每个竞争指标分为 10 组,并将每组中每个树种的视觉性状指标取平均值。由于百分数不能满足方差齐次性条件,在进行差异显著性分析时,对百分数进行反正弦转换。为了统一量纲,在计算冠径比和高径比时,将胸径的单位换算成 m。为降低样本异方差程度,对冠径比、高径比、树干倾斜度进行对数转换。为体现视觉性状的变化幅度,在研究竞争强度对个体视觉性状的影响时,将冠径比、高径比的数据分别与孤立木数据作比值后进行分析。

采用 SPSS 25.0 和 R 3.6.1 对数据进行分析与检验,其中检验方法采用 Kruskal-Wallis 法,多重比较采用 All pairwise 法。使用 Sigmaplot 14.0 作图。

3 结果与分析

3.1 竞争及竞争类型对个体视觉形态性状的影响

总体上,邻体竞争对 4 个针叶树种的个体视觉形态性状均产生一定的影响。其中,竞争类型对部分针叶树种的偏冠指数 CAD、树冠缺失率 CLR、树冠舒展度 CSD、冠径比 RCD、高径比 RHD、分枝角变异度 VBA、树干弯曲度 TCD 的影响达到显著差异水平 ($P < 0.05$),而对树冠圆满度 CRD 和树干倾斜度 TID 的影响则未达到显著差异水平 ($P > 0.05$) (图 3)。

邻体竞争对针叶树种树冠视觉形态性状的影响较大,其中,偏冠指数 CAD 和树冠缺失率 CLR 受邻体竞争的影响最大(图 3),并以侧柏的反映最为敏感,油松次之。与孤立木相比,受竞争影响的白皮松、侧柏、油

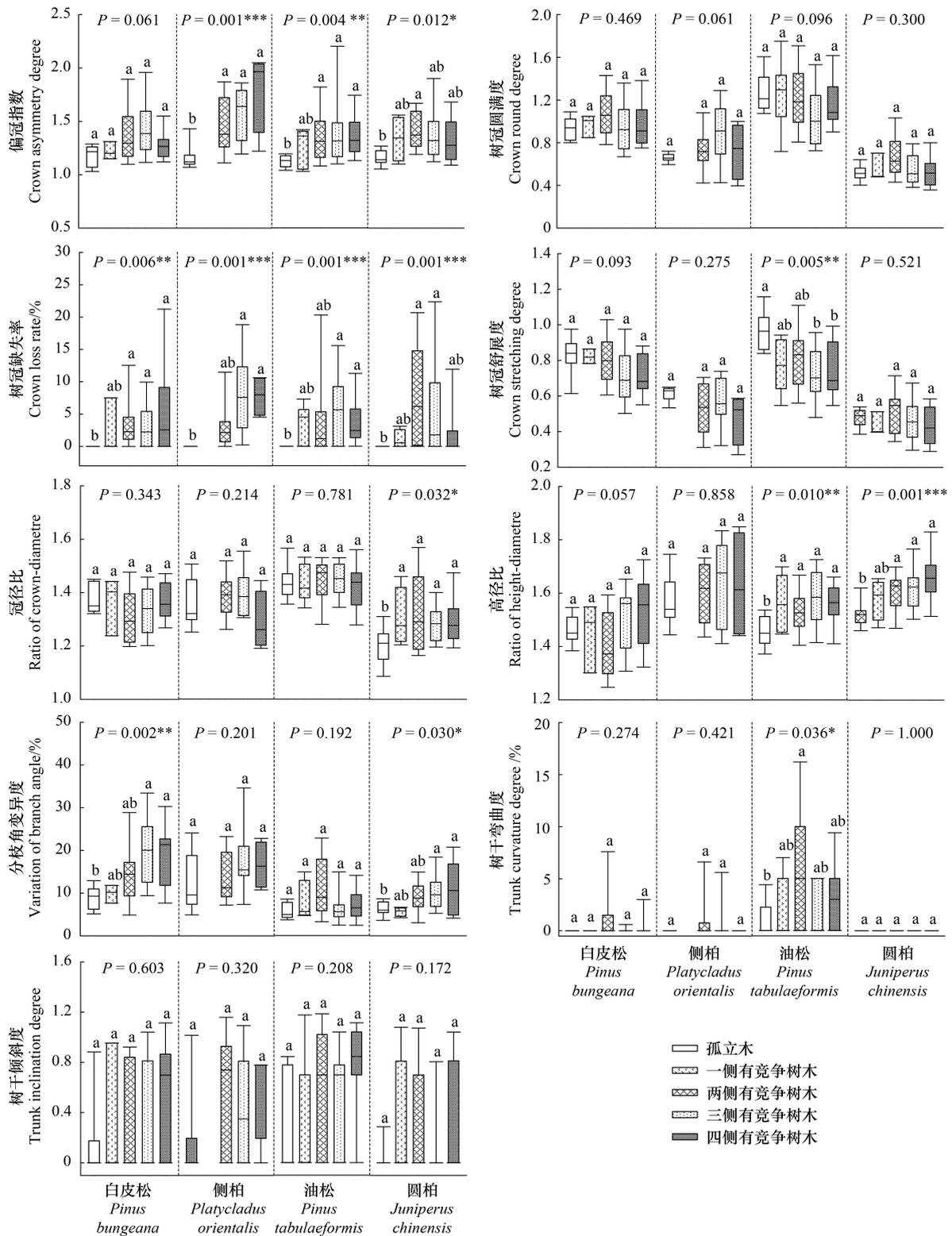


图3 针叶树种视觉形态性状的竞争类型间差异

Fig.3 Differences of visual morphological traits of coniferous trees under different competition types

松、圆柏的偏冠指数 CAD 分别提高了 16.95%、28.95%、22.76%、17.67%；树冠缺失率 CLR 分别提高了 3.92%、6.09%、4.87%、4.95%。其中单侧竞争对树冠形态的影响较小，与孤立木相比各树种的各个性状均未表现出显

著的组间差异($P>0.05$),而多侧竞争影响下针叶树的偏冠指数 CAD 与孤立木之间呈现显著差异($P<0.05$),说明针叶树的偏冠程度取决于其潜在生长空间的大小。4 个针叶树种中,侧柏的树冠缺失率 CLR 受邻体竞争影响最大,并随竞争侧数的提高呈加剧趋势变化;与孤立木相比,圆柏的树冠缺失率 CLR 在受到两侧或三侧竞争时呈现极显著差异($P<0.01$),说明非对称竞争对其树冠形态有较大影响。

针叶树种的干冠协调程度同样受邻体竞争的影响较大,其中高径比 RHD 的变化尤为显著,其次是树冠舒展度 CSD(图 3)。圆柏的高径比 RHD 受到邻体竞争极显著的影响($P<0.01$),且竞争侧数越多,高径比 RHD 越大,处于单侧竞争、两侧竞争、三侧竞争、四侧竞争下的圆柏树木高径比 RHD 分别比孤立木提高了 14.21%、21.81%、29.32%、40.34%。受竞争影响的油松树木高径比 RHD 也显著高于油松孤立木($P<0.05$),说明随着周围潜在生长空间的缩小,针叶树的轴向生长得以促进。针叶树的树冠舒展度 CSD 随竞争侧数的增加呈现下降趋势,其中以油松的变化最为显著($P<0.01$),处于单侧竞争、两侧竞争、三侧竞争、四侧竞争下的油松树冠舒展度 CSD 分别比孤立木下降了 21.03%、15.87%、24.45%、22.32%,说明竞争木的存在会抑制油松树冠的径向生长。而油松的冠径比 RCD 在各组间的差异并不显著($P>0.05$),提示在竞争作用下,油松的冠幅和胸径仍能够保持相对稳定的比例,说明当油松树冠的径向生长受到限制时,其树干的径向生长也受到抑制。与油松不同,受到竞争作用的圆柏树木冠径比 RCD 显著高于圆柏孤立木($P<0.05$),而其树冠舒展度 CSD 没有明显变化,体现了圆柏在树冠的径向生长上有较强的抵抗竞争能力,其树冠径向可塑性较低。白皮松和侧柏的 3 个干冠协调指标在邻体竞争作用下均未表现出明显变化,体现其树形比较稳定,在城市森林微景观中呈现的景观特征比较固定。

针叶树的树干性状对邻体竞争的响应程度较小(图 3)。白皮松与圆柏的一级枝分枝角变异度 VBA 随竞争方向的增加而逐渐提高,在三侧竞争与四侧竞争影响下,白皮松的分枝角变异度 VBA 分别从孤立木的 8.87% 提高到 20.08% 和 18.98%;而圆柏则分别从 6.33% 提高到 10.49% 和 11.61%,说明针叶树枝条的舒展受周围潜在生长空间的影响,潜在生长空间越小,其枝条舒展的角度越杂乱。油松树木的树干弯曲度 TCD 对邻体竞争的反映较为敏感,其弯曲的最大程度出现在非对称竞争环境中。其他 3 个树种的树干弯曲程度较低,体现出较强的干形稳定性。4 个针叶树种的树干倾斜度 TID 在各竞争类型间均无明显差异($P>0.05$)。

3.2 竞争强度对个体视觉形态性状的影响

针叶树树冠视觉性状显著或极显著受邻体竞争强度的影响。针叶树的偏冠和树冠缺失程度随着竞争强度的提高而显著加大(图 4),其中,偏冠指数 CAD 主要受来自于径向竞争的影响, CI_1 每升高 5,针叶树的平均偏冠程度增加 9.17%, CI_2 每升高 0.2,针叶树的平均偏冠程度增加 5.44%;而树冠缺失率 CLR 则同时受径向空间竞争和上方遮蔽效应的影响,但仍以侧方空间挤压的影响更大,因为 CLR 与 CI_1 、 CI_2 线性关系的斜率分别是 CLR 与 CI_3 线性关系的斜率的 2.34 倍和 2.44 倍。 CI_1 每升高 5,针叶树的平均树冠缺失率升高 2.67%, CI_2 每升高 0.2,针叶树的平均树冠缺失率升高 2.23%。树冠圆满度 CRD 则受邻体竞争的影响较小,当侧方生长空间被占据时,针叶树的树冠圆满度 CRD 呈下降趋势,但是变化并不显著($P>0.05$)。

针叶树的干冠协调程度受邻体竞争强度的极大影响。树木冠径比 RCD 与高径比 RHD 均随竞争强度的提高而显著升高(图 5)。当针叶树受周围大树干扰而空间可利用程度减小时,其生长重心更偏向于轴向生长而非径向生长,表现为树冠舒展度 CSD 的显著下降及冠径比 RCD、高径比 RHD 的显著升高($P<0.05$),与孤立木相比,针叶树受到的邻体竞争 CI_2 强度达到 1.0 时,其树冠舒展度 CSD 下降了 18.14%,高径比 RHD 升高了 9.67%,树木变得瘦削,树冠向细长化方向发育。而随着 CI_3 的增大,针叶树的干冠协调指标均保持相对稳定($P>0.05$),说明随着上方庇荫程度的增大,针叶树的高生长与树干径向生长均受到较大程度的抑制作用。

针叶树的树干视觉性状受邻体竞争强度的影响较小。侧方竞争的加强及上方遮蔽程度的加大均不会对针叶树的分枝角变异度 VBA 和树干弯曲度 TCD 造成显著影响(图 6),体现针叶树种在树干姿态上具有较强的抗压迫能力与较高的稳定性。随着 CI_1 的增大,针叶树种的树干倾斜度 TID 显著升高($P<0.05$),说明侧方大树的干扰是造成城市森林微景观中针叶树倾斜的一个重要因素。而树干倾斜度 TID 与 CI_3 线性关系的斜率

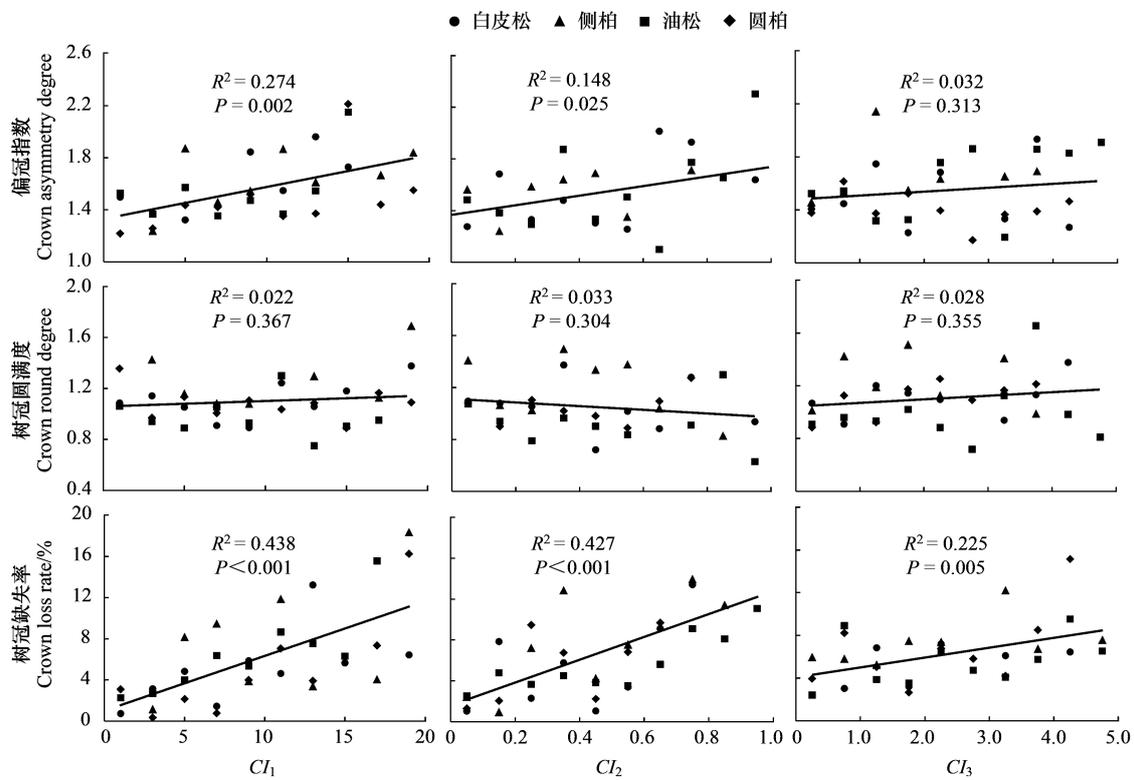


图 4 不同竞争指标的竞争强度对针叶树种树冠性状的影响

Fig.4 Effects of competition intensity of different competition indexes on crown traits of coniferous trees

CI: 邻体竞争指标

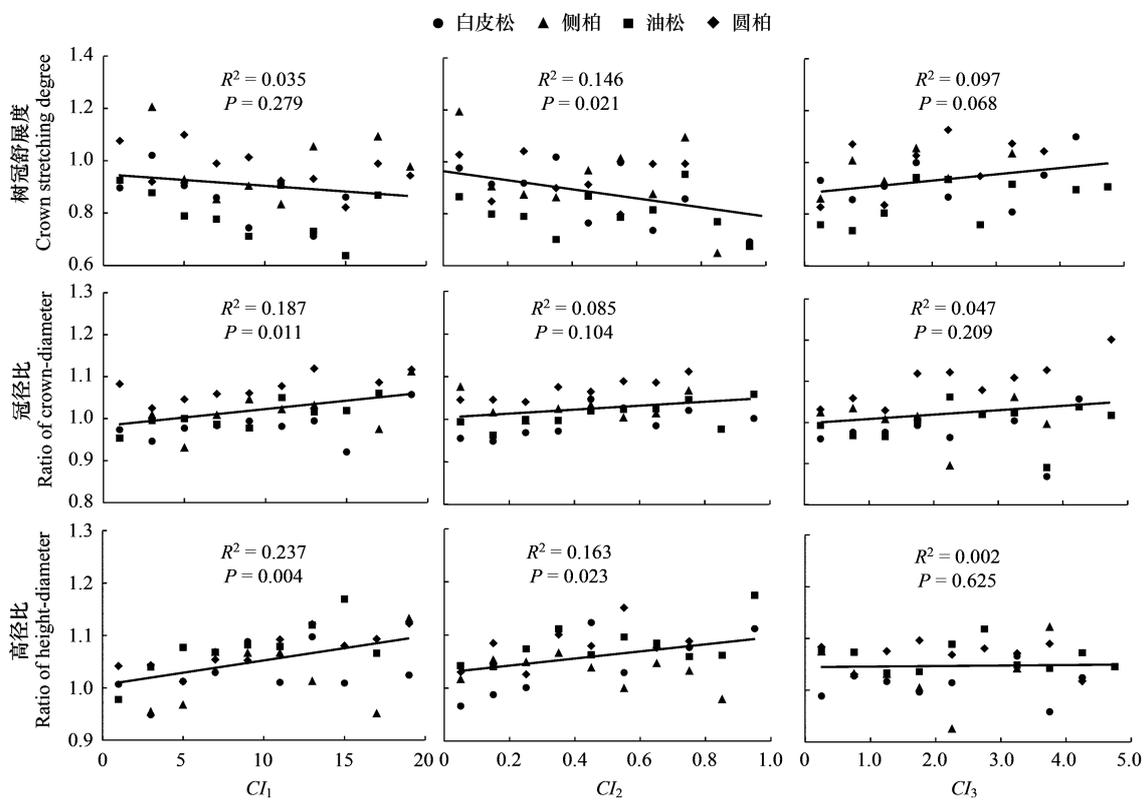


图 5 不同竞争指标的竞争强度对针叶树种干冠协调性状的影响

Fig.5 Effects of competition intensity of different competition indexes on trunk-crown balance traits of coniferous trees

是其与 CI_2 线性关系的斜率的 2.46 倍,提示针叶树的树干倾斜主要与周围大树形成的上方压迫有关,而与树冠重叠程度关系较小。

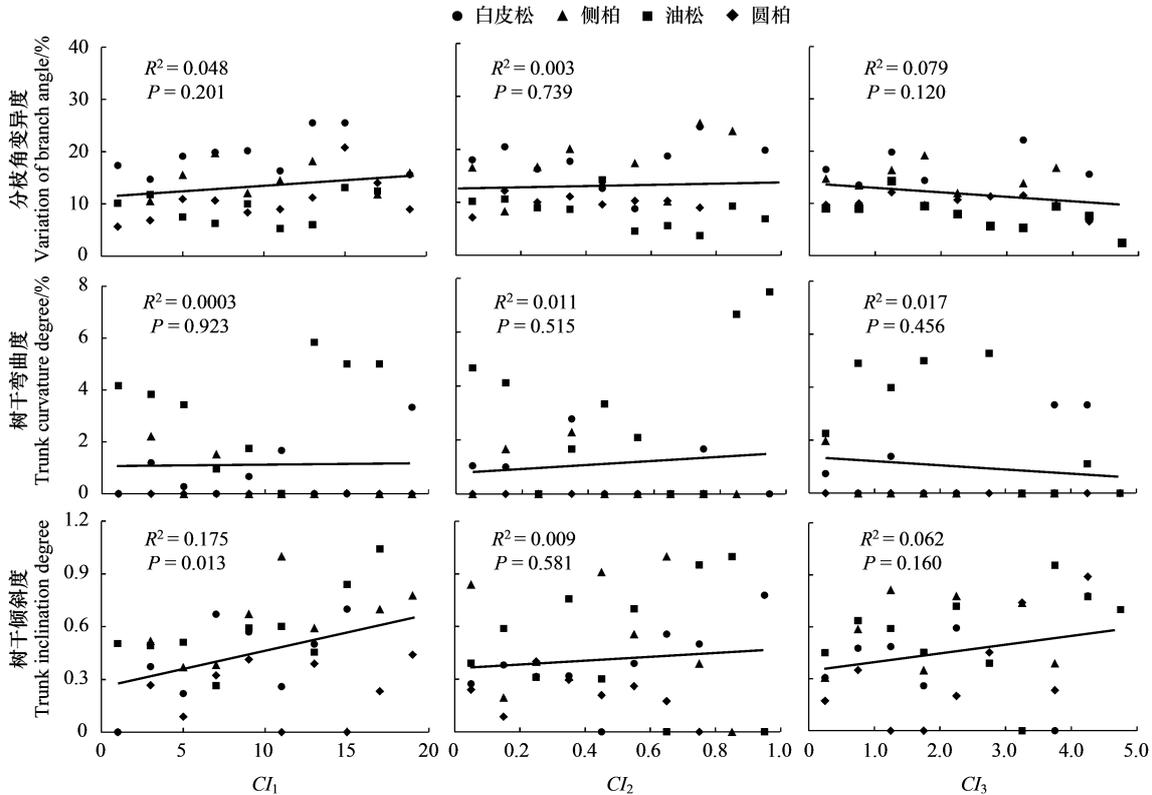


图 6 不同竞争指标的竞争强度对针叶树种树干性状的影响

Fig.6 Effects of competition intensity of different competition indexes on trunk traits of coniferous trees

4 讨论与结论

城市绿色微景观空间结构复杂多样,树木受到的邻体竞争强度难以通过某一指标精确衡量^[47]。本研究从学者们构建的众多竞争指标中,选取了3个具有不同含义的指标,避免了可能因某一指标缺陷而对研究结果造成负面影响,同时增加了对邻体竞争作用进行多维解读的可能性。事实表明,针叶树的视觉形态性状随不同竞争指标的增大而呈现不同的变化趋势。随着 CI_1 、 CI_2 提高,树木高径比 RHD 呈显著上升趋势、树冠舒展度 CSD 呈下降趋势,而当 CI_3 提高时,树冠舒展度 CSD 向相反方向变化,树木高径比 RHD 趋于稳定。虽然 CI_1 与 CI_2 都可以衡量侧方空间的竞争强度,但针叶树各视觉形态性状随 CI_1 、 CI_2 的变化规律并不完全一致,其中偏冠指数 CAD、高径比 RHD、树干倾斜度 TID 随 CI_1 的线性变化斜率明显高于其随 CI_2 的线性变化斜率,说明针叶树的干冠形态变化对综合资源竞争的敏感性更高,基于胸径等构建的综合资源竞争指标在以针阔混交配置为主的城市森林微景观中实用性较好。

本研究选用的四种针叶树种对竞争胁迫的应对策略及其可塑性具有一定差异:在邻体竞争作用下,油松、圆柏的树冠和树干性状以及干冠协调性状均发生显著变化,且油松的偏冠指数 CAD、树冠舒展度 CSD、树干弯曲度 TCD 等性状变化幅度较大;而白皮松、侧柏仅在偏冠指数 CAD、树冠缺失率 CLR 等部分树冠性状与树干性状指标中随竞争强度变化而产生显著差异。图 2 中,三株油松所受竞争强度依次增大,其偏冠指数 CAD 依次为 1.09、1.14、1.45,高径比 RHD 依次为 1.49、1.56、1.58,树干弯曲度 TCD 依次为 1.00、1.02、1.13,从视觉上树木呈现明显的瘦削与变形趋势;三株圆柏所受竞争强度依次增大,其树冠圆满度 CRD 依次为 0.60、0.48、

0.34, 树冠舒展度 CSD 依次为 0.54、0.40、0.27, 其轴向生长的趋势愈发显著, 但是仍能保持十分通直的树干形态。因此, 本文认为, 在城市森林微环境中, 对邻体竞争作用响应最敏感的针叶树种是油松, 其次是圆柏, 再次是白皮松和侧柏, 这可能与白皮松和侧柏具有较强的耐阴性有关。

根据研究结果, 邻体竞争会导致针叶树种的树冠及树形发生明显变化, 其中树冠变化主要表现为冠层的偏移与缺失, 而树形变化主要表现为树木细窄而瘦高、干冠不协调。且这些变化在非对称竞争、侧方竞争强度大的微景观中表现得尤为明显。当竞争木存在的方向增加、侧方竞争强度提高时, 针叶树的树冠舒展度 CSD 下降、高径比 RHD 升高, 树木呈瘦高的尖塔状, 这与其他学者的研究结果相符^[48]; 而当针叶树上方的生长空间被高大树木遮挡时, 其轴向生长同样受到严重的抑制作用。在单侧竞争环境中, 针叶树的各视觉形态性状与孤立木相比均相差不大, 说明当潜在生长空间充足时, 针叶树能够维持较好的树干树冠形态。而在多侧竞争环境中, 与孤立木相比针叶树的偏冠指数 CAD、树冠缺失率 CLR、树干弯曲度 TCD 的最大差异主要出现在两侧竞争与三侧竞争中, 说明当潜在生长空间不足时, 针叶树的这些性状主要与其周围竞争压力的对称性有关, 若针叶树在四个方向受到的竞争压力极不均匀, 则容易出现树干弯曲、树冠偏移及缺失的现象。

前人研究表明, 树木的冠径指标对其组成景观的美学质量有显著影响^[13], 针对城市公园景观质量的相关研究发现, 人们更倾向于观赏高径比 RHD 较大、树体高大、树冠发育完整的针叶树景观^[49-50]。因此, 结合本文研究结果, 建议在城市树木微景观营建时, 将针叶树种植在竞争环境对称、靠近景观中心的位置, 能够适当促进其高生长, 且减小其树冠偏移或缺失的风险; 同时应避免将油松栽植在距离高大树木太近的地方, 以防树木干冠出现明显的变形; 在圆柏的上方应留出足够开阔的生长空间, 便于其形成高大而尖削的典型视觉特征, 提高景观的美学质量。

基于不同微环境结构下针叶树视觉形态性状的差异, 本文分别讨论了邻体竞争类型及邻体竞争强度对针叶树个体视觉形态性状的影响。而在竞争过程中, 邻体竞争木的树种差异也是影响对象木生长发育的重要因素^[51-52], 因此, 下一步的研究应考虑邻体竞争类型与邻体竞争强度的交互作用, 并将树种配置的混交差异考虑在内, 为优化城市森林微景观空间配置奠定基础。

参考文献 (References):

- [1] Belaire J A, Higgins C, Zoll D, Lieberknecht K, Bixler R P, Neff J L, Keitt T H, Jha S. Fine-scale monitoring and mapping of biodiversity and ecosystem services reveals multiple synergies and few tradeoffs in urban green space management. *Science of the Total Environment*, 2022, 849: 157801.
- [2] Shakeel T, Conway T M. Individual households and their trees: fine-scale characteristics shaping urban forests. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2014, 13(1): 136-144.
- [3] 赵建云. 城市园林微景观的设计与应用. *现代园艺*, 2022, 45(11): 135-137.
- [4] Hand K L, Freeman C, Seddon P J, Stein A, van Heezik Y. A novel method for fine-scale biodiversity assessment and prediction across diverse urban landscapes reveals social deprivation-related inequalities in private, not public spaces. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 151: 33-44.
- [5] 马冰倩, 徐程扬, 刘江, 常成, 赵凯, 孔祥瑞, 龙嘉翼. 城镇森林视觉景观异质性对美学质量的影响. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(2): 366-374.
- [6] 李汝佳. 基于公众认知的徐州市园林树木个体美学特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [7] Wang R H, Jiang W X, Lu T S. Landscape characteristics of university campus in relation to aesthetic quality and recreational preference. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 66: 127389.
- [8] 张雪婷, 段广德, 韩轶, 康利平, 郝柄达. 植物群落林分结构和特征因子与美景观度的关系研究. *广西林业科学*, 2021, 50(2): 200-206.
- [9] 陈瑜, 徐程扬, 李乐, 蔡丽丽. 阔叶红松风景林单木景观质量评价与模型研究. *北京林业大学学报*, 2014, 36(5): 87-93.
- [10] 吴鞠, 陈瑜, 刘海轩, 许丽娟, 金桂香, 徐程扬. 林分密度及混交度对长白山天然风景林树木形态的影响. *林业科学*, 2018, 54(12): 12-21.
- [11] 胡佳彬, 潘存德, 胡文聪, 宋梦真. 天山北坡中部天格尔森林公园天山云杉林内景观美学质量评价. *新疆农业大学学报*, 2020, 43(5): 313-322.
- [12] 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.
- [13] 毛斌, 徐程扬, 李乐, 陈瑜. 人工油松风景林的林木分级技术. *林业科学*, 2014, 50(10): 49-58.
- [14] Van de Peer T, Verheyen K, Kint V, Van Cleemput E, Muys B. Plasticity of tree architecture through interspecific and intraspecific competition in a young experimental plantation. *Forest Ecology and Management*, 2017, 385: 1-9.
- [15] Zhao J W, Xu W Y, Li R J. Visual preference of trees: the effects of tree attributes and seasons. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 25: 19-

- 25.
- [16] Aakala T, Shimatani K, Abe T, Kubota Y, Kuuluvainen T. Crown asymmetry in high latitude forests; disentangling the directional effects of tree competition and solar radiation. *Oikos*, 2016, 125(7): 1035-1043.
- [17] Ward D, Pillay T, Mbongwa S, Kirkman K. Spatial analysis reveals facilitation in young clonal trees and competition in older trees during re-invasion of encroaching trees in an African savanna. *Plant Ecology*, 2022, 223(10): 1167-1180.
- [18] Ledermann T, Stage A R. Effects of competitor spacing in individual-tree indices of competition. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, 31(12): 2143-2150.
- [19] Weigelt A, Jolliffe P. Indices of plant competition. *Journal of Ecology*, 2003, 91(5): 707-720.
- [20] 罗耀华, 陈庆诚, 张鹏云. 兴隆山阴暗针叶林空间格局及其利用光能的对策. *生态学报*, 1984, 4(1): 10-20.
- [21] Moore J A, Budelsky C A, Schlesinger R C. A new index representing individual tree competitive status. *Canadian Journal of Forest Research*, 1973, 3(4): 495-500.
- [22] Bella I E. A new competition model for individual trees. *Forest Science*, 1971, 17(3): 364-372.
- [23] 张晔理, 张怀清, 陈永富, 李永亮, 马莉燕. 基于树冠因子的林木竞争指数研究. *林业科学研究*, 2016, 29(1): 80-84.
- [24] Georgi L, Kunz M, Fichtner A, Reich K F, Bienert A, Maas H G, von Oheimb G. Effects of local neighbourhood diversity on crown structure and productivity of individual trees in mature mixed-species forests. *Forest Ecosystems*, 2021, 8: 26.
- [25] 刘帅, 吴舒辞, 王红, 张江, 李建军, 王传立. 基于 Voronoi 图的分空间模型及分布格局研究. *生态学报*, 2014, 34(6): 1436-1443.
- [26] Hegyi F. A simulation model for managing jack-pine stands. In: Freis J. *Growth for tree and stand simulation*. Sweden: Royal college of Forestry, Stockholm, 1974, 74-90.
- [27] 张跃西. 邻体干扰模型的改进及其在营林中的应用. *植物生态学与地植物学学报*, 1993, 17(4): 352-357.
- [28] 段仁燕, 黄敏毅, 吴甘霖, 涂云博, 汪超. 黄山松种群邻体范围与邻体竞争强度的研究. *广西植物*, 2009, 29(1): 111-115, 102.
- [29] 洪伟, 吴承祯. 邻体干扰指数模型的改进及其应用研究. *林业科学*, 2001, 37(S1): 1-5.
- [30] 刘强, 李凤日, 董利虎. 基于树冠竞争因子的落叶松人工林单木生长模型. *植物研究*, 2014, 34(4): 547-553.
- [31] 孙广鹏, 章志都, 刘海轩, 朱济友, 徐程扬. 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. *中南林业科技大学学报*, 2022, 42(2): 17-26, 54.
- [32] 俞昀, 白小军, 王志一. 大兴安岭次生林区不同龄级落叶松 (*Larix gmelinii*) 生态位特征和竞争关系. *生态学报*, 2022, 42(12): 4912-4921.
- [33] SeMyung Kwon, 潘磊磊, 时忠杰, 杨晓晖, 张晓, 刘艳书, 张克斌. 不同竞争强度下的沙地樟子松天然林树木径向生长及其气候响应. *生态学杂志*, 2019, 38(7): 1962-1972.
- [34] Canham C D, LePage P T, Coates K D. A neighborhood analysis of canopy tree competition; effects of shading versus crowding. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, 34(4): 778-787.
- [35] 张毅锋, 汤孟平. 天目山常绿阔叶林空间结构动态变化特征. *生态学报*, 2021, 41(5): 1959-1969.
- [36] 龚岚. 北京城区典型城市森林结构特点分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [37] 沈海龙, 丛健, 张鹏, 张群, 范少辉, 杨文化, 刘世荣. 开敞度调控对次生林林冠下红松径高生长量和地上生物量的影响. *应用生态学报*, 2011, 22(11): 2781-2791.
- [38] 黄新峰, 亢新刚, 杨华, 赵浩彦, 江帆, 王静洲, 万猛. 5个林木竞争指数模型的比较. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(7): 127-134, 140.
- [39] Kahrman A, Şahin A, Sönmez T, Yavuz M. A novel approach to selecting a competition index: the effect of competition on individual-tree diameter growth of Calabrian pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 2018, 48(10): 1217-1226.
- [40] 潘磊. 长白落叶松人工林树冠形态及其与径向生长关系研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
- [41] 黄广远, 徐程扬, 毛斌, 朱解放. 基于灰色关联的北京城区景观乔木树种评价. *东北林业大学学报*, 2011, 39(11): 102-104.
- [42] 欧建德, 吴志庄. 南方红豆杉幼龄期家系生长与观赏性状遗传变异. *东北林业大学学报*, 2015, 43(12): 7-11.
- [43] Mao B, Gong L, Xu C Y. Evaluating the scenic beauty of individual trees: a case study using a nonlinear model for a *Pinus tabulaeformis* scenic forest in Beijing, China. *Forests*, 2015, 6(12): 1933-1948.
- [44] 刘思宇. 基于外部形态特征的长春市黄骠行道树单木美景色评价技术研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2023.
- [45] 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. *生态科学*, 2006, 25(5): 385-389.
- [46] 张晔理. 基于树冠竞争指数的杉木人工林生长可视化模拟研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.
- [47] 赵中华, 惠刚盈. 林分结构多样性研究进展. *林业科学*, 2020, 56(9): 143-152.
- [48] Qiu H Q, Liu S, Zhang Y T, Li J J. Variation in height-diameter allometry of ponderosa pine along competition, climate, and species diversity gradients in the western United States. *Forest Ecology and Management*, 2021, 497: 119477.
- [49] Hofmann M, Gerstenberg T, Gillner S. Predicting tree preferences from visible tree characteristics. *European Journal of Forest Research*, 2017, 136(3): 421-432.
- [50] 崔义, 刘海轩, 吕娇, 吴鞠, 许丽娟, 韦柳端, 余玉磊, 徐程扬. 城市森林林内景观质量定量通用判别技术研究. *北京林业大学学报*, 2020, 42(12): 9-23.
- [51] Fien E K P, Fraver S, Teets A, Weiskittel A R, Hollinger D Y. Drivers of individual tree growth and mortality in an uneven-aged, mixed-species conifer forest. *Forest Ecology and Management*, 2019, 449: 117446.
- [52] Pretzsch H, Schütze G. Tree species mixing can increase stand productivity, density and growth efficiency and attenuate the trade-off between density and growth throughout the whole rotation. *Annals of Botany*, 2021, 128(6): 767-786.