

造林模式对幼林期树种抵御极端寒潮能力的调控作用

赵志刚^{1*}, 李兆佳², 邱智雄³, 杨中文⁴, 王春胜², 曾杰², 张新明³, 朱应志⁴

(¹广州市林业和园林科学研究院/广州市生态园林科技协同创新中心, 广东广州 510405; ²中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东广州 510520; ³韶关国家森林公园管理处, 广东韶关 512023; ⁴韶关市国有曲江林场, 广东韶关 512100)

摘要:【目的】积极应对极端气候变化, 探索提高华南地区人工幼林对极端低温天气防御能力的造林模式。【方法】研究以广东省北部不同低质低效林人工林间伐后种植珍贵树种的幼林为研究对象, 通过比较各类改造模式中 4 个树种在不同类型寒流中的受害情况, 从寒流特征、林分结构和立地条件等方面探讨树种抗冻性差异及其影响因素。【结果】从寒流特征来看, 伴随降温发生的霜冻、大风等气象因子对树种的影响大于单纯的降温。树种间抗冻性存在差异, 处于天然分布区的树种红锥 *Castanopsis hystrix* 和闽楠 *Phoebe bournei* 的抗冻性强, 而从分布区向北引种的树种格木 *Eryophloeum fordii* 和西南桦 *Betula alnoides* 受极端低温天气影响较大, 受害程度则因树种生物学特性而异。抗寒性较低的树种在皆伐造林模式中的受害风险高于套种模式。各类套种模式中, 套种树种受害程度随上层林分保留密度下降而升高、随林窗面积增大而增加, 且林窗形状对受害程度具有较大影响。地形对树种受害程度具有明显影响, 北坡等迎风坡的受害程度远大于南坡等背风坡。【结论】珍贵树种发展需在掌握树种适应性的基础上, 科学合理选择造林模式, 珍贵树种向分布区以北引种需考虑潜在极端低温天气影响, 维持一定的林分环境可以有效提高其对极端低温天气的防御能力。研究结果对于寒流频发地区的人工林培育和森林质量提升具有借鉴意义。

关键词: 抗冻性; 树种; 气候变化; 地形; 林分结构

中图分类号 Q958.15; S154.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-7488 () -0000-00

the regulating effect of afforestation mode on the ability of young tree species to resist extreme cold waves

ZHAO Zhigang¹, LI Zhaojia², QIU Zhixiong³, YANG Zhongwen⁴, ZHANG Xinming³, ZHU Yingzhi⁴

(¹Guangzhou Institute of Forestry and Landscape Architecture/Guangzhou collaborative innovation center on science-tech of ecology and landscape, Guangdong, Guangzhou 510405, China; ²Research Institute of Tropical Forestry, CAF, Guangdong, Guangzhou 510520, China; ³Shaoguan National Forest Park Management Office, Guangdong, Shaoguan 512023, China; ⁴Qujiang State Forest Farm, Guangdong, Shaoguan 512100, China)

Abstract: 【Objective】To actively respond to extreme climate change and explore afforestation modes that enhance the defense capabilities of young artificial forests against extreme low-temperature weather in southern China. 【Method】This study focused on young forests of precious tree species planted after thinning in different low-quality and low-productivity artificial forests in northern Guangdong Province. By comparing the damage to four tree species in various transformation modes during different types of cold snaps, we investigated differences in frost resistance among tree species and their influencing factors in terms of cold snap characteristics, stand structure, and site conditions. 【Result】In terms of cold snap characteristics, meteorological factors such as frost and strong winds occurring alongside temperature drops had a greater impact on tree species than temperature drops alone. There were differences in frost resistance among tree species. The species *Castanopsis hystrix* and *Phoebe bournei*, which are within their natural

distribution areas, exhibited strong frost resistance. However, the species *Eryophleum fordii* and *Betula alnoides*, which were introduced northward from their distribution areas, were more affected by extreme low-temperature weather, with the degree of damage varying depending on the biological characteristics of the species. Tree species with lower cold resistance faced a higher risk of damage in clear-cutting afforestation modes compared to interplanting modes. Among various interplanting modes, the degree of damage to interplanted tree species increased as the retention density of the overlying stand decreased and as the forest gap area increased. Additionally, the shape of the forest gap had a significant impact on the degree of damage. Topography also had a noticeable effect on the degree of damage to tree species, with windward slopes such as north-facing slopes experiencing much greater damage than leeward slopes such as south-facing slopes. 【Conclusion】 The development of precious tree species requires a scientific and reasonable selection of afforestation modes based on an understanding of tree species adaptability. When introducing precious tree species northward from their distribution areas, the potential impact of extreme low-temperature weather should be considered. Maintaining a certain stand environment can effectively enhance the defense capabilities of these species against extreme low-temperature weather. The results of this study provide valuable insights for the cultivation of artificial forests and the improvement of forest quality in regions with frequent cold snaps.

Key Words: frost resistance; tree species; climate change; topography; stand structure

气候变化背景下极端天气频发对森林生态系统组成、结构、健康和稳定性具有更为严重的影响^[1-3]。以往森林冻害研究多关注北方地区, 2008 年我国南方发生的重大雨雪冰冻灾害后, 逐渐引起南方各地对极端低温天气影响的重视^[3-7]。近年来南方地区冬季温度偏高较为常见, 当极端寒流发生时, 温度低且温差大, 导致灾害影响加重^[8-10], 用材林、生态公益林、经济林和城市绿化树种等均不同程度的受损甚至死亡^[11-18]。

寒流过程中除了低温的影响外, 还经常伴随大风、霜冻、雨雪冰冻等气象因子的剧烈变化^[15-20], 其影响与树种、发育阶段、种植模式等有关, 受海拔、坡向、坡位等地形因子影响^[16-21]。林业生态建设在极端天气频发情况下, 不但要分析其发生特点和影响, 更要科学选择树种和林地, 以降低造林风险^[15-17], 如通过科学选地、适地适树、营建混交林、优化林分结构和密度措施等可有效提高林分对极端天气的适应性和抗性^[19-26]。

粤北地区是广东省重要的生态屏障区^[27], 由人工林组成和结构简单引起的森林健康和质量低下问题较为突出^[9,28,29], 近年来开始进行大规模的森林质量精准提升工程, 积极探索通过引入珍贵树种实现两山转化路径。粤北地区寒流频发, 是当地珍贵树种发展的主要限制因素之一。本研究重点分析 2020 年底至 2021 年初的 4 次寒流中 4 个珍贵树种幼林在不同种植模式中的受害情况差异, 分析寒流特征与树种受害程度关系、造林模式对树种抗寒能力提升作用等, 以期从抵御极端低温天气角度, 探索该区域珍贵树种与种植模式匹配的理论和技术, 为林分改造和森林可持续经营提供支撑, 保障极端天气背景下的造林质量, 巩固广东省北部生态屏障生态建设质量。

1 研究区概况

广东省韶关市地处南岭山脉南麓, 既是广东省生态系统服务的高值区, 也是生态敏感区^[27]。研究区域属中亚热带季风气候区, 年均气温约 20.4 °C, 年均降水量约 1648 mm, 雨热同季^[17,28]。该区域处于寒流南下路径, 温度和气象因子变化剧烈, 寒流及伴随的霜冻、冰冻等对人工林, 尤其是幼林影响较大^[9, 17]。马尾松 (*Pinus massoniana*) 和杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 是当地主要造林树种, 近年来由于松材线虫影响, 马尾松等松树人工林面临的风险较高, 正在逐步改造; 杉木由于多代经营生产力下降明显, 根据

林业生态建设需求正在进行森林质量提升。

试验林分别位于韶关林场黄冈工区 (24°52' N, 113°38' E) 和东风工区 (24°48' N, 113°38' E)、曲江林场南华工区 (24°38' N, 113°40' E), 试验地海拔 120-260 m。其中, 韶关林场东风工区林分为马尾松人工林, 1997 年造林, 2018 年进行改造前调查, 林分密度为 900 (± 68) 株/公顷, 平均树高和胸径分别为 15.71 (± 1.95) m、20.94 (± 4.70) cm。韶关林场黄冈工区林分为火炬松 (*Pinus taeda*) 人工林, 1994 年造林, 2019 年保存密度为 750 (± 33) 株/公顷, 平均树高和胸径分别为 18.24 (± 3.62) m、29.22 (± 3.25) cm。曲江林场南华工区林分为杉木人工林, 1996 年造林, 2019 年保存密度为 1350 (± 86) 株/公顷, 平均树高和胸径分别为 13.72 (± 2.66) m、15.32 (± 4.43) cm。

2 研究方法

2.1 改造模式

改造模式包括间伐模式和套种树种配置。间伐模式包括均匀间伐和块状间伐构建林窗两种模式, 旨在从间伐方式与树种匹配关系, 以及可操作性等探讨改造方式的可行性。套种树种按照耐荫性和培育周期选择 4 个珍贵树种, 其中西南桦 (*Betula alnoides*) 耐荫性较弱, 培育周期 25-30 年以上; 红锥 (*Castanopsis hystrix*) 耐荫性中等, 培育周期 30-50 年以上; 格木 (*Erythrophloeum fordii*) 和闽楠 (*Phoebe bournei*) 耐荫性强, 培育周期 50-100 年以上。

2.2 试验设计

2.2.1 均匀间伐 2018 年底在东风工区马尾松林进行间伐改造, 2019 年 3 月份造林。改造模式包括 3 个强度均匀间伐模式, 间伐后林分保留密度分别为 375 株/公顷、300 株/公顷、225 株/公顷, 每个处理 5 亩左右, 3 次重复。林下种植树种为西南桦和格木, 2 行带状混交, 套种树种采取 3 年 5 次抚育。以未间伐套种为光照严重不足的对照, 以皆伐迹地营建纯林为全光照的对照。

2.2.2 块状间伐 2018 年底在东风工区马尾松通过块状间伐构建正方形林窗模式, 设计包括 3 个类型, 林窗面积分别约为 250 m²、500m²、750m², 均设置为近似正方形, 林窗间隔不低于树高, 实际均大于 20m, 3 次重复, 以保留带套种为对照。种植方式为林窗中间光照条件好的区域种植喜光的西南桦 2 列, 其两侧种植耐荫性较强的格木。

2.2.3 带状间伐 根据前期改造效果和生产实践需求, 2019 年底在韶关林场黄冈工区和曲江林场南华工区进行顺坡带状间伐构建长方形林窗改造模式, 分别采取宽度分别为 10m、20m、30m 带状间伐处理, 根据坡长设置林窗长度 60m, 坡顶和坡底部保留 20m 左右隔离带, 林窗处理间保留带宽度 20m 以上, 两个地点均分别选择阴坡 (北坡、西北坡) 和阳坡 (南坡) 布设。于 2020 年春季在林窗和保留带内种植格木、西南桦、红锥、楠木等四个珍贵树种, 4 行带状混交, 以保留带套种为对照。

2.3 寒流概况与冻害调查分析

2.3.1 寒流发生概况 近年来粤北地区寒流频繁, 造林后 5 年内 (2019 年-2023 年) 年均发生 2-3 次较严重寒流, 其中以 2020 年 12 月至 2021 年 1 月的寒流次数多且对造林树种的影响最大。根据韶关国家基本气象站数据, 重点分析该期间 4 次寒流期间温度、湿度、光照强度等的变化特点, 用以分析树种受

害程度与寒流特征的关系。

2.3.2 调查和分析方法 均匀间伐套种林分设置 20m×30m 样地进行抽查，林窗套种模式进行全面调查。调查树种的受害症状和程度，受害株数等，主要从寒流特征、造林模式等方面分析树种受害程度差异。

2.3.3 受害等级划分 于每次寒流过后 1~3 天内对试验林受冻害情况进行踏查，根据分析树种受害情况，参照以往南方树种冻害/寒害等级划分方法确定本研究树种受害等级[13,17,23,30]，在 6~8 天后进行复查。由于参试树种造林 1-2 年，其中 1 年生楠木、红锥、格木的树高在 0.5~0.8m，西南桦在 1.1~1.8m；2 年生格木在 0.8~1.4m，西南桦在 1.9~4.1m，属于幼林期。将树种受害程度划分为 3 级，轻度受害 (I)为树冠上部叶片干枯且小于冠长的 1/4，冻害发生范围内嫩梢受害长度小于 10cm；中度受害 (II)为树冠上部叶片干枯长度小于冠长的 1/2，嫩梢受害长度小于 30cm；重度受害 (III)为树冠上部叶片干枯长度大于冠长的 1/2 至全株叶片干枯，且嫩梢受害长度小于 50cm。

3 结果与分析

3.1 树种受害程度与寒流特征的关系

3.1.1 寒流特征分析 根据韶关国家基本气象站 (韶关市曲江区, 24°40'22"N, 113°37'13"E, 海拔 120 m)的资料显示, 2020 年 12 月至 2021 年 1 月华南地区发生 4 次较大的寒流 (图 1)。第 1 次为 2020 年 12 月 13-23 日, 极端低温出现在 21 日, 为 2.2℃, 温差 12.9℃, 日照时数 9.2 小时, 极大风速 7.6 米/秒, 相对湿度 63.8%。第 2 次为 2020 年 12 月 30 日至 2021 年 1 月 3 日, 极端低温出现在 1 月 1 日, 为-1.7℃, 温差 14.1℃, 日照时数 9.8 小时, 极大风速 5.8 米/秒, 相对湿度 58.3%。第 3 次为 2021 年 1 月 7-14 日, 极端低温在 12 日, 为-2.8℃, 温差 17.6℃, 日照时数 1.8 小时, 极大风速 8.7 米/秒, 相对湿度 59.3%。第 4 次为 2021 年 18-20 日, 极端低温在 19 日, 为 0.3℃, 温差 18.6℃, 日照时数 9.3 小时, 极大风速 4.2 米/秒, 相对湿度 86.8%。

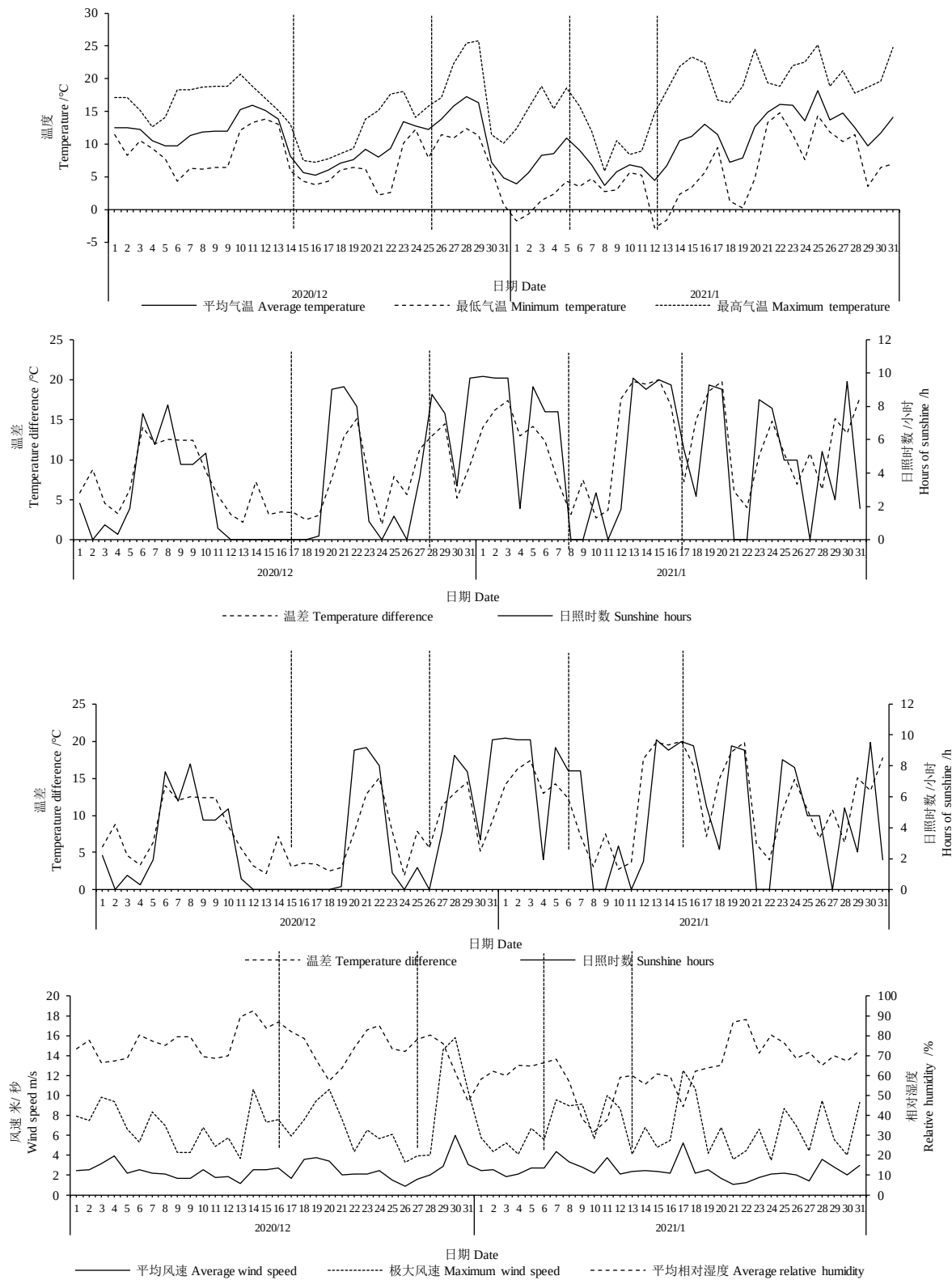


图1 2020年12月至2021年1月韶关市气象因子(韶关国家基本气象站,曲江)

Fig. 1 Meteorological factors in Shaoguan City from December 2020 to January 2021 of National Basic Meteorological Station in Qujiang

3.1.2 寒流特征对树种冻害的影响分析 根据4次寒流对树种的影响调查可知,西南桦受影响最明显,在第3次寒流中出现轻微冻害症状,少部分植株叶片局部变褐色;在第4次时受害率和程度剧增,纯林死

亡严重,改造模式受害程度存在差异。格木纯林仅在第4次寒流中,出现叶片死亡,顶芽未受害。闽楠和红锥在4次寒流中均未受冻害。据此可知,闽楠和红锥的耐寒能力较强,格木次之,西南桦最低。

根据现场调查可知,第4次寒流影响最为明显,因此重点分析此次寒流特征与前3次的差异、树种受害程度与造林模式的关系等。以受害最明显的西南桦为例分析寒流特征对树种受害程度的关系。前2次寒流尚未达到西南桦受害的最低温度;第3次极端温度最低,达到 -2.8°C ,但仅出现轻微叶片冻伤症状,顶芽未受害,即接近其耐受低温极限。值得注意的是第4次寒流,最低温度仅为 0.3°C ,高于第2次和第3次,但温差大、湿度高、日照时数长、风速低(图1),且出现明显霜冻现象,西南桦受害程度严重上升,表明最低温度不一定是造成西南桦受害的唯一因素,温差、湿度、风速、日照时数等亦有较大影响。

3.2 树种受害程度与造林模式的关系

3.2.1 树种受害程度与林分保留密度关系 东风工区保留密度试验林调查结果显示,西南桦受害情况较格木严重,保留密度间差异明显,随着保留密度增加树种受害程度下降(图2)。西南桦在最低林分保留密度处理(225株/公顷)中受害率达到100%,与皆伐迹地纯林(CK)相同,但受害程度低于纯林,无重度受害个体,以轻度受害为主,而对照林分和保留密度较高的2个处理(300株/公顷、375株/公顷)中均未受害。格木纯林(CK)的受害率约70%,其中轻度受害率约43%,中度约为27%,无重度受害个体,格木在各保留密度林内受害程度极低,仅最低林分保留密度处理中有2%的轻度受害,其余处理中未受害。

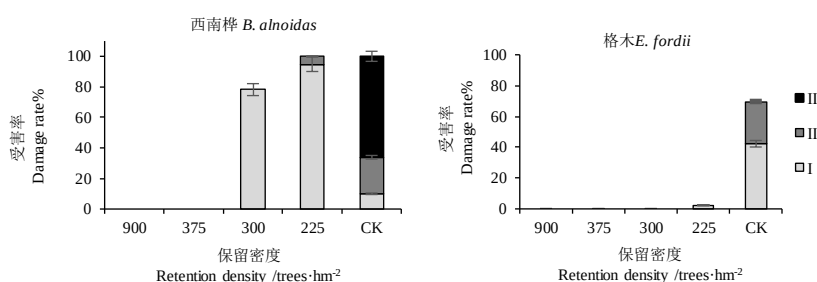


图2 林分保留密度对林下种植2年生西南桦和格木受害程度的影响(东风工区)

Fig.2 The effect of stand retention density on the cold damage on two year old *B. alnoides* and *E. fordii* under canopy planting in Dongfeng work area of Shaoguan Forest Farm

3.2.2 树种受害程度与林窗面积、形状的关系 韶关林场东风工区林窗种植模式调查结果显示,西南桦受害程度高于格木,且受害程度均随林窗面积增大而增加(图3)。在未间伐区域(CK)和较小的林窗(250m²)内二者均未受害,在中等面积林窗(500m²)内西南桦受轻度和中度冻害的比例分别约为20%和10%,在较大的林窗(750m²)内西南桦受轻度冻害比例与中等面积林窗近似,但中度冻害的比例增加到30%,出现重度冻害的比例约为20%,总体受害率约增加一倍。格木在中等和较大的林窗内均仅受到轻度冻害,比例分别约为5%和9%。

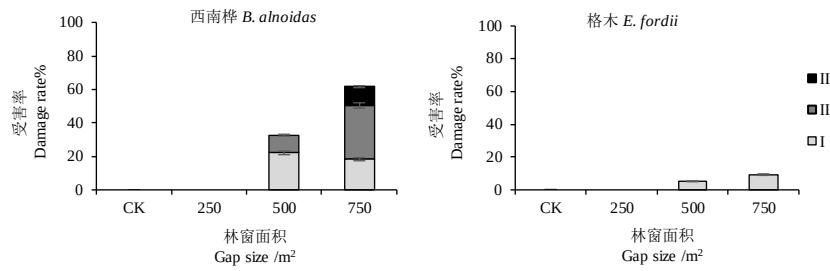


图3 正方形林窗面积对2年生西南桦和格木受冻害程度的影响(东风工区)

Fig. 3 The effect of gap size on the frost damage on two year old *B. alnoides* and *E. fordii* in Dongfeng work area of Shaoguan Forest Farm

韶关林场黄冈工区和曲江林场南华工区长方形林窗中西南桦和格木的受害程度亦均随林窗面积增大而增加(图4、图5)。格木受害程度较轻,相对而言北部试验林受害率高于南部,但均以新叶受害为主,顶芽未受害,南部的南坡未受害(图4、图5)。西南桦的受害程度较高,均达到100%,保留带内种植的个体(CK)受害程度极低,平均低于10%,随林窗面积增加,轻度受害比例下降,而中度和重度受害比例增加,受害程度较重的北部试验区北坡,1200m²和1800m²带宽林窗间的受害情况几乎一致。

以同在南坡、面积近似的不同林窗形状处理为例,长方形林窗中面积最小的处理(600m²)中西南桦的受害率均到达100%(图4、图5),高于面积最大(750m²)的正方形林窗(图3),后者约为60%,说明两种林窗形状对西南桦冻害有明显影响。另外,北部最小长方形林窗中的重度受害比例与正方形最大林窗中接近,均约10%,而南部最小长方形林窗中无重度受害,说明不但林窗形状对受害程度有影响,地理位置同样有较大影响,要因地制宜地选择应用。

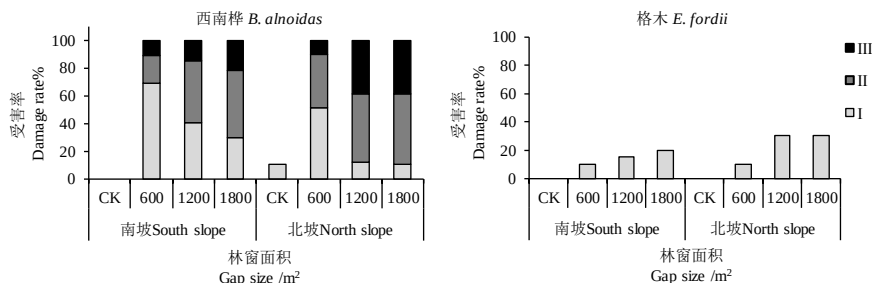


图4 长方形林窗面积对1年生西南桦和格木受冻害程度的影响(黄冈工区)

Fig. 4 The effect of gap size with rectangle shape on the frost damage on one year old *B. alnoides* and *E. fordii* in Huanggang work area of Shaoguan Forest Farm

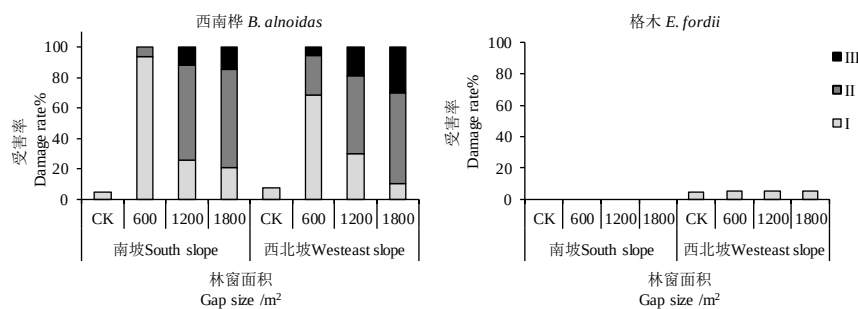


图5 长方形林窗面积对1年生西南桦和格木受冻害程度的影响(南华工区)

Fig. 4 The effect of gap size with rectangle shape on the frost damage on one year old *B. alnoides* and *E. fordii* in Nanhua work area of Qujiang Forest Farm

3.2.3 树种受害程度与立地的关系 根据林窗套种模式中的西南桦为例,分析坡向对人工林冻害的影

响。在北部试验林 (黄冈工区), 轻度、中度和重度受害西南桦在南坡的平均比例分别为 47%、38%、15%, 在北坡分别为 23%、47%、30% (图 4); 在南部 (南华工区) 试验林内南坡的受害率平均分别为 47%、44%、9%, 西北坡分别为 37%、45%、18% (图 5)。总体来看从空间位置分析, 北部林分的受害情况高于南部, 尤其是重度受害率; 从坡向分析, 迎风坡 (北坡、西北坡) 的受害程度高于背风坡 (南坡)。

4 结论与讨论

全球气候变化下极端低温天气对森林的影响越来越严重[1-10], 采取适应气候变化的造林模式对森林质量和稳定性显得尤为重要。华南地区的低质低效林改造大多采取引种一定比例的珍贵树种, 本研究从树种、林分结构调整方式和立地等方面探讨了应对寒流的造林模式。

粤北地区是寒流影响严重的区域。本研究选择的 4 个树种中, 闽楠和红锥处于天然分布区内, 耐冻性强, 在 4 次寒流中均未见受害; 格木受害程度相对较轻, 西南桦受害较为严重, 尤其是皆伐造林地块。格木和西南桦属于从天然分布区向北引种的树种, 格木的引种目的是增加固氮类珍贵树种, 西南桦则是南方少有的中轮伐期 (25-30 年) 珍贵树种, 在本地区引种分别约 10 年和 20 年, 以往寒流期间也仅见顶梢轻度受害, 且主要是新叶受害较多, 未见严重冻害, 初步认为其可以适应本地气候环境。如 2008 年我国南方发生的重大雨雪冰冻灾害期间, 西南桦仅轻度受害, 而且受害后恢复生长较快, 影响较小[17,31,32]。

西南桦受害严重与其生物学特性和寒流特征有关。西南桦属于半落叶树种, 在冬季处于新芽萌发期, 枝叶较幼嫩, 加之为纸质叶, 导致其耐寒性比较低, 西南桦能够耐受的极端低温为 -5.7°C [31,32]。本研究中, 第 3 次寒流最低温度 -2.8°C , 仅出现叶片轻微受害。以往受害情况分析可知, 西南桦不耐霜冻[17,31,32]。第 4 次寒流最低温度 0.3°C , 反而出现严重影响, 主要与风速低、湿度高, 出现霜冻现象等寒流特征有关 (图 1)。因此, 在未突破树种所适应的极限低温前, 单一的降温反而不如低温伴随的霜冻、大风等影响明显。

此次试验地周边的 10 年以上西南桦已郁闭林分仅迎风面部分个体的树冠顶部有少量叶片受害。因此, 从林分发育过程来看, 幼树的木质化程度低, 郁闭前林分环境不稳定, 抗干扰能力差, 导致幼林期受冻害风险较高, 一般郁闭后的林分受害程度相对较轻[17, 32], 不但因为木质化程度提高, 而且相对整齐的林分形成较为平缓的下垫面, 可以降低风速、减少乱流、避免温度剧烈变化等, 降低寒流影响[2,19,20,26]。

从造林模式来看, 皆伐造林相对于间伐套种模式可能面临较高风险。开阔地带光照充足, 林分生长快、物候早, 而且暖冬可导致积温增加而改变树种物候, 在冬季萌发新叶和枝条将增加其受冻害的风险[22,24]。开阔林地无上层林分保护, 寒流来时风速大, 降温快、温差大、易结霜[23-25]。因此, 树种选择要考虑树种特性、引种地平均温度和极端温度等气象因子[12-16], 尤其是向北树种引种要考虑暖冬背景下极端低温的影响。

相对于皆伐造林的高受害率 (图 2), 各种间伐套种模式中树种的受害风险较低 (图 3、图 4、图 5)。在间伐套种模式中, 西南桦和格木的受害程度总体随林分保留密度降低而上升 (图 2)、随林窗面积增大而增加 (图 3、图 4、图 5)。相对于正方形林窗种植模式, 均匀间伐种植模式虽然受害率高, 但中度和重度受害比较低 (图 2、图 3)。间伐套种模式保持部分林分结构和环境, 有利于降低风速、减缓林分内的结霜程度

等,可有效降低极端寒流天气对树种,间接提高林下种植树种幼林抗低温冻害的能力,原有林分环境保持度越高对于极端天气的防御能力越强。另外,在林窗模式中面积过大的林窗容易形成“霜穴”,可能降低防护作用,本研究中大林窗(750m²)中部发现明显结霜现象,在林窗中部的个体受害程度较高,而靠近林窗边缘受害程度极低,因此要合理选择林窗面积。

林窗形状也可能对树种受害程度产生影响,近似林窗面积比较而言,正方形林窗防护效果较好,长方形林窗内的受害情况更为严重(图3、图4、图5)。长方形林窗可能形成寒流加速通道,产生“狭管增速效应”[34,35],从而导致林窗内部树种受害程度加重。在确定采伐量基础上,根据地形适当选择林窗面积和形状,利用内部环境和边缘效应,发挥林结构和环境对植物发育、抗逆性的促进作用具有重要的研究和应用价值[36]。空间位置、地形对树种受寒害程度具有显著影响(图2、图3、图4)。从研究区域地理位置来看,靠北部的林分受害程度高,寒流南下首当其冲的是迎风坡及其两侧,易受害严重。林业生产中的气象灾害预防难度极大,可以通过合理的树种选择和空间配置降低受害风险[19,20,23,31,32]。

极端天气频发已成为影响森林健康和稳定性的重要因子[9],尤其是新造林,要充分发挥林分结构对幼林的防护作用。首先,保留部分原有树木,有利于维持林分结构与环境,提高套种树种对极端天气的抗性[9,26]。其次,改造模式比较而言,虽然均匀间伐套种模式的受害较低,但在未造成致死伤害的情况下,林窗模式相对均匀间伐内部环境因子定向调控性高,可以针对不同生态学特性树种和立地选择匹配的林窗形状和面积,且更容易操作,利于中后期上层林分间伐管理,降低后期间伐引起的机械损伤,具有较高的应用价值。

综合来看,通过合理的树种选择与立地匹配,结合科学的林分结构调控措施提高树种抗逆性,科学合理地开展森林质量提升和生态系统修复[3,9],但需要进一步加强相关理论和技术研究方能广泛应用于生产实践。

参考文献(Reference):

- [1] 钟秀丽,林而达. 气候变化对我国自然生态系统影响的研究综述. 生态学杂志, 2000, 19(5): 62-66.
Zhong X L, Lin E D. A Summary of Impacts of Climate Changes on the Ecosystems of China. Chinese Journal of Ecology, 2000, 19(5): 62-66.
- [2] 李秀芬,朱教君,王庆礼,等. 森林低温霜冻灾害干扰研究综述. 生态学报, 2013, 33(12): 3563-3574.
Li X F, Zhu J J, Wang Q L, et al. A review of research on the interference of forest low-temperature frost disasters. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3563-3574.
- [3] 薛建辉,胡海波. 冰雪灾害对森林生态系统的影响与减灾对策. 林业科学, 2008, 44(4): 1-2.
Xue J H, Hu H B. The impact of ice and snow disasters on forest ecosystems and disaster reduction strategies. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(4): 1-2.
- [4] 韦方强,赵琳娜,江玉红,等. 2008年初南方雨雪冰冻灾害及其对山地灾害的影响. 山地学报, 2008, 26(2): 253-254.
Wei F Q, Zhao L N, Jiang Y H, et al. The freezing rain and snow disaster in South China in early 2008 and its influence on mountain disasters. Chinese Journal of Mountain Science, 2008, 26(2): 253-254.
- [5] 吴可可,彭少麟,陈蕾伊,等. 南方森林雨雪冰冻灾害的特征. 生态学杂志, 2011, 30(3): 611-620.
Wu K K, Peng S L, Chen L Y, et al. Characteristics of rain, snow, and freezing disasters in southern forests. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(3): 611-620.
- [6] 马泽清,王辉民,王绍强,等. 雨雪冰冻灾害对中亚热带人工林的影响——以江西省千烟洲为例. 植物生态学报,

2010, 34(2): 204-212.

Ma Z Q, Wang H M, Wang S Q, et al. The impact of rain, snow, and freezing disasters on artificial forests in subtropical regions: A case study of Qianyanzhou, Jiangxi Province. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(2): 204-212.

[7] 曹坤芳, 常杰. 突发气象灾害的生态效应: 2008 年中国南方特大冰雪灾害对森林生态系统的破坏. *植物生态学报*, 2010, 34(2): 123-124.

Cao K F, Chang J. Ecological effects of sudden meteorological disasters: The destruction of forest ecosystems by the 2008 severe ice and snow disaster in southern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(2): 123-124.

[8] 陆虹, 周秀华, 黄卓, 等. 华南地区低温雨雪事件的时空变化特征. *生态学杂志*, 2019, 38(1): 237-246.

Lu H, Zhou X H, Huang Z, et al. The spatiotemporal variation characteristics of low-temperature rain and snow events in southern China. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(1): 237-246.

[9] 王华, 唐力生, 张柳红, 等. 广东省寒害极值变化及其对冬种生产的影响. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4186-4194.

Wang H, Tang L S, Zhang L H, et al. Extreme changes in cold damage in Guangdong Province and their impact on winter seed production. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(12): 4186-4194.

[10] 王华, 陈慧华, 唐力生, 等. 气候变暖背景下广东冬种生产季气候资源和气象灾害的时空变化. *应用生态学报*, 2018, 29(1): 93-102.

Wang H, Chen H H, Tang L S, et al. The spatiotemporal changes of climate resources and meteorological disasters during the winter planting season in Guangdong under the background of climate warming. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 93-102.

[11] 王培娟, 唐俊贤, 金志凤, 等. 中国茶树春霜冻害研究进展. *应用气象学报*, 2021, 32(2): 129-145.

Wang P J, Tang J X, Jin Z F, et al. Research progress on spring frost damage to Chinese tea trees. *Journal of Applied Meteorology Science*, 2021, 32(2): 129-145.

[12] 林瑞芬, 杨东梅, 刘东明, 等. 2008 年初广州常见园林植物冷害情况调查及分析. *林业科学*, 2008, 44(11): 152-160.

Lin R F, Yang D M, Liu D M, et al. Investigation and Analysis of Cold Damage to Common Garden Plants in Guangzhou in Early 2008. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(11): 152-160.

[13] 李玫, 廖宝文, 管伟, 等. 广东省红树林寒害的调查. *防护林科技*, 2009(2): 29-31.

Li M, Liao B W, Guan W, et al. Investigation on Cold Damage to Mangrove Forests in Guangdong Province Protective. *Protection Forest Science and Technology*, 2009(2): 29-31.

[14] 连辉明, 张谦, 殷祚云, 等. 广东降香黄檀人工林生长及寒害调查分析. *中南林业大学学报*, 2014, 34(10): 26-31.

Lian H M, Zhang Q, Yin Z Y, et al. Survey and analysis on growth and chilling injury of *Dalbergia odorifera* plantation in Guangdong province. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2014, 34(10): 26-31.

[15] 杨曾奖, 徐大平, 曾杰, 等. 南方大果紫檀等珍贵树种寒害调查. *林业科学*, 2008, 44(11): 123-127.

Yang Z J, Xu D P, Zeng J, et al. A Survey of Freezing Harm of Precious Trees in South China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(11): 123-127.

[16] 徐大平, 杨曾奖, 梁坤南, 等. 华南 5 个珍贵树种的低温寒害调查. *林业科学*, 2008, 44 (5): 1-2.

Xu D P, Yang Z J, Liang K N, et al. Investigation on Low Temperature and Cold Damage of Five Precious Tree Species in South China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(5): 1-2.

[17] 谢晓金, 郝日明, 张纪林. 常绿阔叶树种的耐低温特性及其生态学评价. *生态学报*, 2004, 24(11): 2671-2378.

Xie X J, Hao R M, Zhang J L. Low temperature tolerance characteristics and ecological evaluation of evergreen broad-leaved tree species. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2671-2378.

[18] 张朝斌. 粤北地区西南桦的低温适应性. *南方农业*, 2017, 11(17): 55-56.

Zhang C B. Low temperature adaptability of *Betula alnoides* in northern. Guangdong province. *South China Agriculture*, 2017, 11(17): 55-56.

[19] 陈祥伟, 张羽, 马洪波. 紫椴、水曲柳人工幼林霜冻发生与控制研究. *应用生态学报*, 2000, 11(6): 809-813.

Chen X W, Zhang Y, Ma H B. Research on Frost Occurrence and Control in Artificial Young Forests of *Tilia pseudocacalia* and *Fraxinus mandshurica*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(6): 809-813.

- [20] Ferrez J, Davison A C, Rebetez M. Extreme temperature analysis under forest cover compared to an open field. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(7): 992-1001.
- [21] 王浩, 马星, 杜勇. 基于生态系统服务重要性和生态敏感性的广东省生态安全格局构建. *生态学报*, 2021, 41(5): 1705-1715.
- Wang H, Ma X, Du Y. Constructing an ecological security pattern in Guangdong Province based on the importance of ecosystem services and ecological sensitivity. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(5): 1705-1715.
- [22] 何永佳, 庞晓峰, 王伟达, 等. 粤北马尾松人工林坡向效应分析. *林业与环境科学*, 2019, 35(4): 30-34.
- He Y J, Pang X F, Wang W D, et al. Analysis of slope effect of *Pinus massoniana* plantation in northern Guangdong. *Forestry and Environmental Science*, 2019, 35(4): 30-34.
- [23] 余海滨, 陈沐荣. 广东松材线虫病发生规律研究. *云南农业大学学报*, 1999, 14(S1): 103-110.
- Yu H B, Chen M R. Study on the occurrence pattern of pine wilt disease in Guangdong. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 1999, 14(S1): 103-110.
- [24] 刀保辉, 杨光习, 段生彪, 等. 海拔对西南桦幼苗冻害程度的影响. *广西林业科学*, 2016, 45(1): 110-114.
- Dao B H, Yang G X, Duan S B, et al. The effect of altitude on the degree of frost damage to Southwest birch seedlings. *Guangxi Forestry Science*, 2016, 45(1): 110-114.
- [25] 徐干君, 刘宝军. 雨雪冰冻灾害对重庆市不同林分类型的灾害影响分析. *中南林业大学学报*, 2011, 31(8): 74-78.
- Xu G J, Liu B J. Disaster effects of snow and freezing on different forest types in Chongqing city. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2011, 31(8): 74-78.
- [26] Zhang YX, Wang GF. Assessment of the hazard of extreme low-temperature events over China in 2021. *Advances in Climate Change Research*, 2022, 13(6): 811-818.
- [27] 曾杰, 郑海水, 翁启杰, 等. 我国西南桦的地理分布与适生条件. *林业科学研究*, 1999, 12(5): 479-484.
- Zeng J, Zheng H S, Weng Q J, et al. The geographical distribution and suitable living conditions of *Betula platyphylla* in southwestern China. *Forest Research*, 1999, 12(5): 479-484.
- [28] Stromme CB, Schmidt E, Olsen JE, et al. Climatic effects on bud break and frost tolerance in the northernmost populations of Beech (*Fagus sylvatica*) in Europe. *Trees*, 2019, 33(1): 79-89.
- [29] Zhu JJ, Li XF, Gonda Y, et al. Wind profiles in and over trees. *Journal of forestry research*, 2004, 15(4): 305-312.
- [30] 梁海荣, 王晶莹, 董慧龙, 等. 低覆盖度下两种行带式固沙林内风速流场和防风效果. *生态学报*, 2010, 30(3): 568-578.
- Liang H R, Wang J Y, Dong H L, et al. Wind speed field and windproof effect in two types of row belt sand fixation on forests under low coverage. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(3): 568-578.
- [31] 管云云, 费菲, 关庆伟, 等. 林窗生态学研究进展. *林业科学*, 2016, 52(4): 91-99.
- Guan Y Y, Fei F, Guan Q W, et al. Progress in Ecological Research of Forest Windows. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(4): 91-99.
- [32] Chmura DJ, Anderson PD, Howe GT, et al. Forest responses to climate change in the northwestern United States: Ecophysiological foundations for adaptive management. *Forest Ecology and management*, 2011, 261(7): 1121-1142.