

结构调控对人工用材林生长及生理生态过程影响研究进展

摘要: 结构调控是人工用材林培育过程中的关键技术, 主要包括通过间伐进行密度调控以及通过修枝进行树体管理。间伐与修枝作为两项重要的结构调控措施, 广泛应用于人工用材林的培育与管理中, 能够有效改善林分结构、促进林木生长并提高出材品质, 对用材林产量与质量的提升具有重大意义。有关林分结构调控对人工用材林林木生长影响开展的多项研究结果表明, 结构调控能够从多方面促进人工用材林林木生长, 但这种促进作用受到间伐修枝强度、处理后经历的年限及立地条件等因素的显著影响。人工用材林多项材质指标与种植密度密切相关, 通过间伐进行密度调控能够促进林木生长、提高林分出材率; 通过修枝对林木进行树体管理则能够改善林木冠层结构、培育优良干形, 并减少木材缺陷、提高木材品质。同时, 科学的结构调控措施通过改善人工用材林环境条件, 在激发林木养分运输、光合作用等生理活动的积极响应上也具有重要意义。文中从冠层结构、生长、干形材质等方面综述目前国内外人工用材林结构调控的研究进展, 阐述分析了结构调控在生理生态过程上的作用机理, 并从间伐与修枝耦合效果、结构调控作用机理分析、结构调控模型构建等方面对未来开展人工用材林结构调控理论与技术创新进行了展望, 以期能够为未来相关领域的研究发展提供参考。

关键词: 人工用材林, 结构调控, 间伐, 修枝

Research Progress in the Effect of Structure Regulation on the Growth and Physiological Ecological Processes of Artificial Timber forests

Abstract: Structural regulation is a key technology in the cultivation process of artificial timber forests, mainly including density regulation through thinning and tree management through pruning. Thinning and pruning, as two important structural control measures, are widely used in the cultivation and management of artificial timber forests. They can effectively improve forest structure, promote tree growth, and improve timber quality, which is of great significance for improving the yield and quality of timber forests. Multiple studies on the impact of forest structure regulation on the growth of artificial timber forests have shown that structure regulation can promote the growth of artificial timber forests from multiple aspects, but this promotion effect is significantly influenced by factors such as thinning pruning intensity, the number of years experienced after treatment, and site conditions. Multiple material indicators of artificial timber forests are closely related to planting density. Density regulation through thinning can promote tree growth and increase stand yield; Managing trees through pruning can improve their canopy structure, cultivate excellent stem shapes, reduce wood defects, and improve wood quality. At the same time, scientific structural regulation measures are of great significance in stimulating positive responses to physiological activities such as nutrient transport and photosynthesis in artificial timber forests by improving environmental conditions. The article reviews the current research progress in the regulation of artificial timber forest structure at home and abroad from the aspects of canopy structure, growth, and stem material. It elaborates and analyzes the mechanism of structural regulation in physiological and ecological processes, and looks forward to future theoretical and technological innovations in the regulation of artificial timber forest structure from the coupling effect of thinning and pruning, the analysis of structural regulation mechanism, and the construction of structural regulation models, In order to provide reference for future research and development in related fields.

Keywords: artificial timber forests, structure regulation, thinning, pruning

林分结构调控包含 2 个方向: 从水平结构来看, 可以通过间伐调控林分密度、改善林分结构、促进林木生长; 从垂直方向来看, 可以通过修枝进行树体管理、提高林木材性。造林密度是森林培育过程中对林木生长有重要作用的因素之一, 通过影响树冠枝下高、冠幅、叶面积指数直接影响林木树冠结构。随着密度改变, 林内光照、温度、湿度等环境因子也发生变化, 进而影响林木生长。间伐通过调控林分密度影响林木生长, 是对提高人工用材林产量和质量具有重要意义的一项经营措施。通过修枝进行树体管理可以有效减少木材缺陷、培养良好干形、提高木材品质及树木出材率, 同时改善林下光照条件, 提高林下间作物的产量, 增加农林复合经营效益。新西兰通过 2 次疏伐和 3 次修枝实现了辐射松人工用材林高质量集约经

营, 每公顷蓄积达到 450~600 m³, 最高达到 800 m³, 平均生产力达 20~27 m³/(hm²·a), 培育出 6 m 无节良材(翟明普等, 2021)。本文将对目前国内外针对林分结构调控开展的相关研究进行总结, 综述间伐及修枝对人工用材林生长及生理生态过程影响的最新研究进展, 以期对未来研究提供参考。

1 结构调控对人工用材林冠层结构的影响

针对林分结构调控对冠层结构影响开展的研究得出的结论基本保持一致。造林密度影响枝条性质, 适当增加造林密度可以促进自然整枝, 较高的造林密度显著增加了冠内最大分枝的高度(Wang et al., 2018)。同时, 造林密度也会对林木树冠整体结构产生影响, 当造林密度较高时, 火炬松(*Pinus taeda*)树冠较短且较窄(Zhao et al., 2020)。可通过间伐调整林分密度, 从而对林木冠层结构产生影响。Forrester 等(2012)研究发现, 间伐减少了亮果桉(*Eucalyptus nitens*)小分枝的数量, 增加了大分枝的数量。Muñoz 等(2008)针对亮果桉开展的间伐试验表明, 在间伐强度较高的林分内林木平均活冠长度更长。冠层结构对林分结构调控的响应与调控季节及强度有关, 在树冠郁闭前对亮果桉进行强度为 20%的修枝, 与未进行修枝的对照相比, 枝条直径有所增加(2002)。修枝后 2 个月内, 黑木相思(*Acacia melanoxylon*)叶面积出现快速增长, 轻度修枝的林木叶面积指数可在 2 个月内恢复到修枝前水平(2003)。

2 结构调控对人工用材林生长的影响

2.1 树高

造林密度对树高生长的影响较小, 针对杂交杨树开展的研究表明不同密度下的林木树高生长无显著差异(Toillon et al., 2013)。但针对火炬松开展的试验则发现造林 10 年后, 随着初始密度的增加, 树高总体呈下降趋势(Zhao et al., 2020)。基于密度调控开展的抚育间伐能够促进林木树高生长。Brais 等(2018)针对杨树与云杉(*Picea asperata*)混交林开展的研究表明, 在混交林中进行间伐对剩余林木的树高生长具有显著的正向作用。

与密度调控相比, 针对修枝开展的研究得出的结论存在较大差异。有研究显示, 修枝对林木高度影响较小或没有影响(2014)。但 Desrochers 等(2015)针对杂交杨树开展的修枝处理结果则显示, 当修去冠长 1/3 时, 第 1 个和第 2 个生长季后树高略微降低。该结果与 Wu 等(2014)针对白花泡桐(*Paulownia fortunei*)开展的修枝试验结果相反, 后者观察到中等强度修枝能够有效促进树干高生长, 这可能与修枝强度及修枝后经历时间的差异有关。修枝对林木生长的影响受林分密度影响, 在较高密度条件下及时修除下部枝条有利于林木生长, 但在较低密度条件下过早地进行修枝则不利于树高生长。马永春等(2021)研究表明, 修枝能够促进株行距为 3 m×6 m 杨树人工林林分胸径、树高和单株材积的生长, 而对株行距为 6 m×6 m 的林分生长的影响差异不显著。除此之外, 修枝对树高的影响还与修枝后年限有关, 孙尚伟(2010)的研究表明, 修枝对欧美杨(*Populus × canadensis*)高生长的促进作用仅在修枝第 1 年有所体现。

2.2 胸径

间伐对林木生长的影响与伐后经历的年份及间伐强度密切相关。间伐当年树木生长效应不显著, 但从第 2 年开始, 树木直径增长显著增加, 相对于轻度间伐, 重度间伐后红松(*P. koraiensis*)林剩余树木的胸径生长增量更为显著(Park et al., 2018)。Bhandari 等(2021)针对红柳桉(*E. marginata*)开展的疏伐试验结果同样表明重度间伐增加了林木胸径生长。

修枝对林木胸径的影响比对树高生长的影响更大(Bogdanovich et al., 2021)。但有关林木生长对修枝的响应开展的研究同样产生了不同的结论。部分研究显示, 修枝对于林木胸径生长起到抑制作用, 修枝后杂交杨树胸径生长相对于未修枝树木变小(Maurin et al., 2013), 修枝后亮果桉林分平均胸径有所降低(Forrester et al., 2012); 在海岸松(*P. pinaster*)及辐射松(*P. radiata*)2 种大西洋地区最重要的用材林中均观察到修枝对林木直径增加有显著负面影响(Hevia et al., 2016)。而其他研究结果则表明, 修枝能够促进林木胸径生长, 李广德等(2018)针对三倍体毛白杨(*P. tomentosa*)开展的研究表明, 强度较小的修枝处理能显著增加三倍体毛白杨的胸径生长, 与 Zhang 等(2021)得出的结论相一致。林木生长对修枝的响

应受修枝强度及修枝后经历时间的影响。重度修枝后 1~2 年内, 火炬松直径生长受到短暂的负面影响, 多数处理在 1 年后恢复到与对照相同的生长水平 (Amateis et al., 2011)。间伐与修枝耦合处理能够促进林木生长, 与对照相比, 同时应用间伐和修枝 2 项林分结构调控技术对地中海地区松树的生长有积极影响, 间伐修枝后林分直径增长量显著大于对照组 (Moreno-Fernández et al., 2014)。

2.3 单株材积及林分蓄积

单株树干材积随着单株营养面积的增加而增加, 针对巨杉 (*Sequoiadendron giganteum*) 开展的 28 年密度试验显示, 低密度种植林木 (353 株/hm²) 平均单株材积比高密度种植林木 (2 702 株/hm²) 大 7.8 倍 (Cox et al., 2021)。抚育间伐通过提高单株林木的胸径生长量, 进而提高了杨树的单株材积生长量 (崔光彩, 2014)。修枝对材积生长具有促进作用, 进行修枝处理后杨树人工林林分材积年均生长量高于未修枝处理 (马永春等, 2021)。对垂叶松 (*P. patula*) 进行间伐和修枝试验表明, 同时进行间伐和修枝后的林分平均单株材积最大, 显著高于对照及仅进行修枝处理的林分 (Missanjo et al., 2015)。

随着造林密度的增加, 火炬松人工林林分蓄积呈增加趋势 (Zhao et al., 2011)。通过抚育间伐进行密度调控能提高单株林木材积, 但因株数减少, 林分蓄积可能会有所降低。Hu 等 (Hu et al., 2020) 针对澳大利亚亚热带森林开展的 3 种强度间伐试验表明, 伐后 28~46 年期间, 中、高强度间伐的年平均蓄积量增加, 而未处理对照的年平均蓄积量减少。一项在日本柳杉 (*Cryptomeria japonica*) 人工林中开展的间伐试验同样表明, 林分蓄积的相对增量随着间伐强度的增加而增加 (Negishi et al., 2020)。间伐及修枝对林分蓄积的影响与处理强度密切相关, 在垂枝桦 (*Betula pendula*) 林分中开展的间伐修枝试验显示, 林分蓄积增长随着处理强度的增加而减少, 与对照相比重度间伐的林分进行修枝后胸径生长速率减少了 62.4% (Skovsgaard et al., 2021)。

2.4 生物量

造林密度对人工用材林生物量积累及分配均有显著影响。从地上地下部分生物量分配来看, 随着林分密度的增加, 资源竞争加剧, 分配到结构性组分即树干和枝条的比例减少, 而分配到吸收性组分即细根和叶的生物量比例增加。对不同密度油松 (*P. tabulaeformis*) 人工林的研究表明, 随着距行距的减小, 地下生物量的分配增加, 地上部分与根系比率有所降低 (贾全全等, 2015)。间伐对林分生物量影响与间伐强度有关, 间伐强度越大, 保留木生长空间越大, 越有利于生物量的积累。贾忠奎等 (2012) 在塞罕坝华北落叶松人工林中开展的间伐试验表明, 在 38.6% 间伐强度下林木总生物量分别比其余 2 种较小强度间伐林分高出 8% 及 4%。抚育措施通过改善林内光照及温度条件, 加速了枯落物分解, 促进了林木细根生长, 不同强度抚育处理后杨树人工林根系碳储量均高于对照 (闫东锋等, 2017)。间伐与修枝同时进行, 具有一定的交互作用, 间伐后亮果桉叶干质量比有所增加, 而修枝过的树木在 3 年后叶干质量比仍然较低, 修枝减少了间伐处理对叶片分配的影响 (Forrester et al., 2012)。

2.5 林分结构异质性

林分内林木大小差异决定了林分资源是否能够得到充分利用, 从而影响林分生产力, 较高的林木尺寸异质性导致林分生产力有所降低。火炬松人工林内林木大小差异随着造林密度的增加而增加, 而间伐通过调控密度降低了林分大小差异 (Zhao et al., 2022)。随着伐后时间推移, 疏伐对杂交桉树林分异质性的降低程度随疏伐强度增大而增大 (Soares et al., 2017)。在伐后花旗松 (*Pseudotsuga menziesii*) 林分内同样观察到林木大小差异有所降低, 间伐林分生长优势系数低于未间伐林分, 且随着间伐强度的增加而降低 (Acquah et al., 2022)。

3 结构调控对人工用材林干形材质的影响

3.1 干形材质

对林分结构进行调控可以影响林木干形, 进而对木材物理及化学性质有一定程度的影响。Sang 等 (2021) 研究显示, 在 4 种不同密度林分中, 密度较大林分的纤维更短, 纤维长宽比显著低于低密度林分。间伐通过调控林分密度影响林木的干材质量, 在不同间伐强度下, 林木干材质量的响应有所不同。日本柳杉人工

林林木平均年轮宽度 (ATRW) 随间伐强度的增加而增加, 即弱间伐条件下林分的木材质量优于较高强度间伐的林分^[28]。在土耳其松 (*P. brutia*) 林分中开展的间伐试验显示 (Russo et al., 2019), 不同间伐强度对木材质量产生的影响不同, 低强度间伐最有利于优质木材的生产。

通过修枝进行树体管理可以减少树干的相对尖削度, 使树干挺直饱满。进行过修枝的紫叶欧洲山毛榉 (*Fagus sylvatica*) 倾斜较小, 树干更直 (Juel et al., 2018)。修枝对林木干形的影响与修枝方式的选择有关, 马永春等 (2021) 研究发现, 在 2 个生长季分别对杨树人工林不同冠层的枝条进行修枝更有利于林分主干饱满度的提升。修枝后的杂交杨次年萌发的新枝数量明显减少^[11]。同时修枝还有效增加了欧美杨的抗弯强度与抗压强度 (孙尚伟, 2010)。

3.2 节子特性

Wang 等 (2015) 研究发现, 较高种植密度显著降低了西南桦林枯枝脱落后伤口的愈合时间, 进而缩小了形成节子的大小。修枝减少了华北落叶松人工林树干节子长度及单位面积节子的数量 (赵辉等, 2019)。科学合理的修枝强度有利于无节材的生产, 能够提高产出木材的质量。较大修枝强度显著提高了杉木人工林无节材的比例, 修枝后 10 年, 林分内无节材比例与未修枝林分相比提高了 5 倍 (张群, 2011)。修枝显著减少了欧洲云杉 (*P. abies*) 木材节结数量, 与对照相比, 修枝后树木最外部的木材节结减少了 67%~75% (Harri et al., 2014)。与自然修枝相比, 对西桦 (*B. alnoides*) 进行人工修枝可以显著减少树枝堵塞时间和死结大小 (Wang et al., 2016)。同时进行间伐和修枝处理对林木节子特性具有耦合效果, 在杉木人工林中进行间伐与修枝试验表明, 间伐结合适度修枝, 能在促进林木生长的同时减少节子数量、加快伤口愈合速度, 有利于大径无节良材的培育 (马天舒, 2021)。Wang 等 (2003) 针对台湾杉开展的间伐修枝试验表明, 重度间伐比中度间伐或未进行林木产生的节子更多, 而修枝后林木产生的节子数量比未修枝的少。

4 结构调控对人工用材林生理过程的影响

4.1 光合作用

在结构调控后短时间内, 林木生长的减缓可能与叶面积降低导致的光合总叶面积减少有关, 间伐及修枝后林木通常采用提高剩余叶片光合速率的策略来弥补这种损失。稳定碳氧双同位素标记显示, 间伐主要通过增加杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 当年生针叶的气孔导度和光合能力及 1 年生针叶的光合能力, 来使两者净光合速率有所提升 (Li et al., 2017)。与未修枝树木相比, 修枝后杉木人工林的针叶中光合 N 利用效率 (PNUE) 更高, 即修枝能够促进其剩余叶片的净光合速率, 增幅达 86.08% (Li et al., 2020)。

4.2 营养物质分配

结构调控从多方面影响着林木内部营养物质的分配及运输。间伐改变了林内小气候, 提高了土壤微生物及酶活性, 加速了枯枝落叶分解, 从而对伐后林分土壤内各营养元素含量产生影响。同时, 间伐调整了林分密度, 增加了保留木的生长空间, 促进了保留木生长, 随着生长速度加快, 林木对于营养元素的需求增加, 尤其是蛋白质合成需要的 N 及 RNA 合成需要的 P, 使得伐后林木叶片中 N、P 含量增加。在华北落叶松人工林进行的间伐试验表明, 伐后林木叶片及林分土壤中 C、N、P 含量均显著提高 (Qiu et al., 2020)。相似地, 间伐及修枝后马尾松 (*P. massoniana*) 人工林随着林冠郁闭度的减小, 叶片中 C 含量及 C:N 值皆呈抛物线趋势变化, 在中等郁闭度下达到最大值, 这是由于在中等郁闭度下林分内空气湿度较大、光照充足, 为马尾松生长提供了最适宜的水热条件, 在加快林木生长速度的同时促进了林下植物的生长, 为林木固碳提供了充足的 CO₂ (魏大平等, 2017)。

修枝导致的环境变化刺激了林木不同器官对营养物质的需求改变, 导致林木各组分非结构性碳水化合物 (nonstructural carbohydrates, NSC) 的分配有所变化。重度修枝后的杨树林木从枝条上转移了更多非结构碳水化合物 (nonstructural carbohydrates, NSC) 用于恢复树冠的生长, 导致重度修枝后枝条 NSC 含量显著低于未修枝及中度修枝林木 (Zhang et al., 2021)。Desrochers 等 (2015) 的研究发现, 修枝处理后杂交杨林木的根系总 NSC 浓度低于未修枝的树木。修枝后杂交杨叶片碳同位素比值较未修枝时降低, 反映出气孔导度较高, 即修枝后的树木抗旱能力有所提升 (Maurin et al., 2013)。同时, 修枝也会对林木器官内其他营养元素含量产生影响, 修

枝后杨树林木中上部枝条全氮含量差异显著，随着修枝强度的增大而减小（刘西军等，2009）。

5 结构调控对人工用材林生态过程的影响

5.1 土壤理化性质

林分结构调控能够从多个方面影响林分土壤性质。造林密度影响林分土壤碳储量，高密度毛白杨林分的土壤有机质、速效氮、速效磷含量均低于其他密度较低林分（崔光彩，2014），这是由于林木株行距减小，林木生长空间随之减小，根系对养分的竞争加剧；同时，随着对土壤资源竞争的加剧，杨树趋向于通过增加根系产量和根系分泌物为根际微生物生存及菌根网络形成创造更有利的条件，促进对土壤资源的获取，使得杨树人工林矿质土壤碳储量显著增加。林分结构调控对土壤理化性质产生的影响与伐后林分密度改变导致的环境因素有关。间伐改善了林内小气候，使土壤温、湿度有所提高，为土壤微生物创造了更有利的生存条件，促进了土壤氮素的转化，高强度间伐显著提高了杨树人工林土壤无机氮含量及土壤溶解性有机氮含量（林达等，2016），伐后油松人工林土壤有机碳、全氮、总磷浓度随间伐强度的增加而增加（Dang et al., 2018）。土壤水分分布也受林分结构调控强度的影响，在美国东南部松树种植园内开展的管理措施试验显示，林地内土壤含水量随着间伐强度的增加而增加（Pisarello K L et al., 2022）。修枝对土壤含水量的影响与间伐类似，与处理强度有关，高强度修枝处理后欧美杨林分深层土壤含水量高于低强度修枝与不修枝处理，修枝强度越大作用越明显，这是由于高强度修枝降低了林木的蒸腾量，进而导致林木根系吸水减少（孙尚伟等，2009）。

5.2 林下植被多样性及管理

燕亚飞等（2014）研究表明，种植密度较低的杨树人工林林下植物的生长更为旺盛，多样性指数大于高密度林分，但高密度林分林下植物生长更为均匀，均匀度指数较高。在油松人工林中开展的间伐试验表明，随间伐强度的增大，伐后油松林下灌木及草本辛普森多样性指数和香农—威纳多样性指数均有所升高（马履一等，2007），相似地，不同强度的间伐同样显著提高了人工林林下植物种类的丰富度及多样性（于立忠等，2006）。低强度修枝（修去下部枝条，保留枝下高达树高的 1/3）杨树人工林林分的丰富度指数和均匀度指数均高于对照组（张康等，2019）。林分结构改变对林下植被产生的影响，在农林复合经营系统中表现得更为明显。孙尚伟等（2009）研究显示，修枝对欧美杨林分林下玉米生长具有促进作用，前期这种促进作用主要表现为增粗，后期为增高，同时有效增加了玉米的净光合速率和蒸腾速率。

6 结语及研究展望

作为 2 项重要的结构调控措施，间伐与修枝对人工用材林冠层结构、生长、干形材质及生理生态过程等多个方面均有显著影响。从生长响应上看，多数研究表明林分结构调控能够促进人工用材林林木生长，但这种促进作用受到间伐修枝强度、处理后经历的年限及立地条件等因素的显著影响。人工用材林多项材质指标与种植密度密切相关，通过间伐进行密度调控能够促进林木生长，提高出材率；通过修枝对林木进行树体管理则能够改善林木冠层结构、培育优良干形，同时减少木材缺陷、提高木材品质，促进大径无节良材的生产。采用科学的结构调控措施，可有效改善人工用材林环境条件，激发林木养分运输、光合作用等生理活动上的积极响应，从而促进林木生长，实现人工用材林产量与质量的精准提升。基于此，未来对于人工用材林结构调控的研究还需从以下 3 个方面深入开展：

1) 间伐与修枝耦合效果。目前国内外有关用材林结构调控的研究多为独立开展的间伐或修枝实验，鲜有针对 2 项结构调控措施耦合效果开展的探讨分析。亟需开展间伐与修枝的耦合试验，探究 2 项结构调控措施耦合对林木生长及生理生态过程的影响以及两者之间的交互作用，为科学高效的结构调控技术体系的建立提供更为全面的理论依据。

2) 结构调控作用机理分析。当前国内外针对间伐与修枝开展相关研究多数集中在生长过程及技术层面，未来应更多着力于生理生态过程方面的研究，与采取结构调控措施后环境因子的改变相结合，从间

伐修枝后林木生理上的应对策略入手,对结构调控作用机理进行探讨分析。结合具体林分立地条件,形成标准化林分结构优化与维持技术体系,实现人工用材林干材质量与林地效益的精准提升。

3) 结构调控模型构建。林业研究周期较长,尤其是针对人工用材林开展的与大径级材培育有关的研究,受到立地及林分条件多方面的限制,部分研究仅局限于特定树种、立地及林龄的林分。利用当前研究得到的各方面数据构建出生长、株型及材质指标模型,能够有效突破立地和林龄的局限,为构建更大尺度下科学高效的结构调控技术体系奠定理论基础。

参 考 文 献

- [1]翟明普, 马履一.森林培育学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2021.
- [2]WANG C S, TANG C, SEBASTIAN H, et al. Branch Development of Five-Year-Old *Betula alnoides* Plantations in Response to Planting Density[J].Forests, 2018, 9(1).DOI:10.3390/f9010042.
- [3]ZHAO D H, BULLOCK B P, MONTES C R, et al. Long-term dynamics of loblolly pine crown structure and aboveground net primary production as affected by site quality, planting density and cultural intensity[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 472:118259. DOI:10.1016/j.foreco.2020.118259.
- [4]FORRESTER D I, COLLOPY J J, BEADLE C L, et al. Interactive effects of simultaneously applied thinning, pruning and fertiliser application treatments on growth, biomass production and crown architecture in a young *Eucalyptus nitens* plantation[J]. Forest Ecology & Management, 2012, 267:104-116.
- [5]MUÑOZ F, RUBILAR R, ESPINOSA M, et al. The effect of pruning and thinning on above ground aerial biomass of *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(3/4):365-373.
- [6]PINKARD E A. Effects of pattern and severity of pruning on growth and branch development of pre-canopy closure *Eucalyptus nitens*[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 157(1/2/3):217-230.
- [7]MEDHURST J L, PINKARD E A, BEADLE C L, et al. Growth and stem form responses of plantation-grown *Acacia melanoxylon* (R. Br.) to form pruning and nurse-crop thinning[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 179(1/2/3):183-193.
- [8]TOILLON J, FICHOT R, ERWIN D, et al. Planting density affects growth and water-use efficiency depending on site in *Populus deltoides* × *P. nigra*[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 304: 345-354.
- [9]BRAIS S, HARVEY B D, BOSE A. Stem- and stand-level growth and mortality following partial cutting in eastern boreal poplar-white spruce stands[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2018.DOI:10.1139/cjfr-2018-0177.
- [10]MORENO-FERNÁNDEZ D, SÁNCHEZ-GONZÁLEZ M, ÁLVAREZ-GONZÁLEZ J G, et al. Response to the interaction of thinning and pruning of pine species in Mediterranean mountains[J]. European Journal of Forest Research, 2014, 133(5):833-843.
- [11]DESROCHERS A, MAURIN V, TARROUX E. Production and role of epicormic shoots in pruned hybrid poplar: effects of clone, pruning season and intensity[J]. Annals of Forest Science,2015,72(4):425-434.DOI:10.1007/s13595-014-0443-8.
- [12]WU L C, WANG B P, QIAO J, et al. Effects of trunk-extension pruning at different intensities on the growth and trunk form of *Paulownia fortunei*[J]. Forest Ecology and Management, 2014,327: 128-135.
- [13]马永春,余诚棋,方升佐.不同修枝方法对杨树人工林生长、光合叶面积和主干饱满度的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(4):137-142.
- [14]孙尚伟. 修枝对欧美杨 107 及林下作物生长和生理的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [15]PARK J, KIM T, MOON M, et al. Effects of thinning intensities on tree water use, growth, and resultant water use efficiency of 50-year-old *Pinus koraiensis* forest over four years[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 408:121-128.
- [16]BHANDARI S K, VENEKLAAS E J, MCCAUL L, et al. Effect of thinning and fertilizer on growth and allometry of *Eucalyptus marginata*[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 479: 118594. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118594.
- [17]BOGDANOVICH E, PEREZ-PRIEGO O, EL-MADANY T S, et al. Using terrestrial laser scanning for characterizing tree structural parameters and their changes under different management in a Mediterranean open woodland[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 486: 118945. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.118945.
- [18]MAURIN V, DESROCHERS A.Physiological and growth responses to pruning season and intensity of hybrid poplar[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 304:399-406.
- [19]HEVIA A, ÁLVAREZ-GONZÁLEZ J G, MAJADA J, et al. Comparison of pruning effects on tree growth, productivity and dominance of two major timber conifer species[J]. Forest Ecology and Management, 2016, 374:82-92.
- [20]李广德,张亚雄,时海香,等.修枝对 8 年生三倍体毛白杨生长及生理的短期影响[J].中南林业科技大学学报,2018,38(2):30-35.
- [21]ZHANG J, LIU L Q. Effects of pruning intensity on nonstructural carbohydrates of *Populus alba* × *P. talassica* in the arid desert region of Northwest China[J]. 林业研究: 英文版, 2021, 32(2):8. DOI:10.1007/s11676-020-01098-7.
- [22]AMATEIS R L, BURKHART H E. Growth of young loblolly pine trees following pruning[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 262(12): 2338-2343.
- [23]COX L E, YORK R A, BATTLES J J. Growth and form of giant sequoia (*Sequoiadendron giganteum*) in a plantation spacing trial after 28years - ScienceDirect[J]. Forest Ecology and Management, 2021,488: 119033. DOI:10.1016/j.foreco.2021.119033.

- [24]崔光彩. 间伐对杨树生长、林下植物多样性和土壤酶活性的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2014.
- [25]MISSANJO E, KAMANGA-THOLE G, et al. Effect of first thinning and pruning on the individual growth of *Pinus patula* tree species[J]. 林业研究(英文版), 2015, 26(4):827-831
- [26]ZHAO D H, KANE M, BORDERS B E. Growth responses to planting density and management intensity in loblolly pine plantations in the southeastern USA Lower Coastal Plain[J]. Annals of Forest Science, 2011, 68(3):625-635.
- [27]HU J, HERBOHN J, CHAZDON R L, et al. Silvicultural treatment effects on commercial timber volume and functional composition of a selectively logged Australian tropical forest over 48 years - ScienceDirect[J]. Forest Ecology and Management, 2020,457: 117690. DOI:10.1016/j.foreco.2019.117690.
- [28]NEGISHI Y, ETO Y, HISHITA M, et al. Role of thinning intensity in creating mixed hardwood and conifer forests within a *Cryptomeria japonica* conifer plantation: a 14-year study[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 468(3):118184. DOI:10.1016/j.foreco.2020.118184.
- [29]SKOVSGAARD J P, JOHANSSON U, TUNE M C, et al. Effects of thinning practice, high pruning and slash management on crop tree and stand growth in young even-aged stands of planted Silver birch (*Betula pendula* Roth)[J]. Forests, 2021, 12(2):225. DOI:10.3390/f12020225.
- [30]贾全全,罗春旺,刘琪璟,等.不同林分密度油松人工林生物量分配模式[J].南京林业大学学报(自然科学版),2015,39(6):87-92.
- [31]贾忠奎,公宁宁,姚凯,等.间伐强度对塞罕坝华北落叶松人工林生长进程和生物量的影响[J].东北林业大学学报,2012,40(3):5-7, 31.
- [32]闫东锋,郭丹丹,吴桂藏,等.间伐对杨树人工林表层根系分布及碳存储格局的影响[J].西北林学院学报,2017,32(2):30-36.
- [33]ZHAO D H, BULLOCK B P, MONTES C R, et al. Production, tree size inequality and growth dominance in loblolly pine plantations under different silvicultural management regimes[J]. Forest Ecology and Management, 2022, 526: 120594. DOI: 10.1016/j.foreco.2022.120594.
- [34]SOARES A, LEITE H G, CRUZ J P, et al. Development of stand structural heterogeneity and growth dominance in thinned *Eucalyptus* stands in Brazil[J]. Forest Ecology and Management, 2017, 384:339-346.
- [35]ACQUAH S B, MARSHALL P L, ESKELSON B N I, et al. Changes in size inequality and growth dominance in thinned and unthinned uneven-aged interior Douglas-fir dominated stands[J]. Forest Ecology and Management, 2022, 524: 120517. DOI: 10.1016/j.foreco.2022.120517.
- [36]SANG Y R, GAO P, KANG X Y, et al. Effect of initial planting density on growth traits and wood properties of triploid Chinese white poplar (*Populus tometosa*) plantation[J]. Forests, 2021,12, 1676. <https://doi.org/10.3390/f12121676>
- [37]RUSSO D, MARZILIANO P A, MACRI G, et al. Does thinning intensity affect wood quality? an analysis of calabrian pine in southern Italy using a non-destructive acoustic method[J]. Forests, 2019(4). DOI:10.3390/F10040303.
- [38]JUEL R, THOMAS N L, PETER S J.Pre-commercial thinning in naturally regenerated stands of European beech (*Fagus sylvatica* L.): effects of thinning pattern, stand density and pruning on tree growth and stem quality[J]. Forestry, 2018(1):1-13.
- [39]WANG C S, ZHAO Z G, HEIN S, et al. Effect of Planting Density on Knot Attributes and Branch Occlusion of *Betula alnoides* under Natural Pruning in Southern China[J]. Forests, 2015, 6(12):1343-1361.
- [40]赵辉,高立国,郭延朋,等.华北落叶松人工林生长及基本材性特征对林木修枝的响应[J].东北林业大学学报,2019,47(4):29-32,48.
- [41]张群. 人工修枝对提高杉木木材质量影响的研究[D].北京:中国林业科学研究院, 2011.
- [42]HARRI M, ERKKI V, AILI T. Effects of pruning in Norway spruce on tree growth and grading of sawn boards in Finland[J]. Forestry, 2014(3):8. DOI:10.1093/forestry/cpt062.
- [43]WANG C S, HEIN S, ZHAO Z G, et al. Branch occlusion and discoloration of *Betula alnoides* under artificial and natural pruning[J]. Forest Ecology and Management, 2016, 375:200-210.
- [44]马天舒. 杉木无节材培育技术体系初步研究[D].长沙:中南林业科技大学,2021.
- [45]WANG S Y, LIN C J, CHIU C H. Effects of thinning and pruning on knots and lumber recovery of *Taiwania (Taiwania cryptomerioides)* planted in the Lu-Kuei area[J]. Journal of Wood Science, 2003, 49(5):444-449.
- [46]LI R S, YANG Q P, ZHANG W D, et al. Thinning effect on photosynthesis depends on needle ages in a Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation[J]. Science of The Total Environment, 2017, 580:900-906.
- [47]LI R S, HAN J M, GUAN X, et al. Crown pruning and understory removal did not change the tree growth rate in a Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 464: 118056. DOI:10.1016/j.foreco.2020.118056.
- [48]QIU X C, WANG H B, PENG D L, et al. Thinning drives C:N:P stoichiometry and nutrient resorption in *Larix principis-rupprechtii* plantations in North China[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 462: 117984. DOI:10.1016/j.foreco.2020.117984.
- [49]魏大平, 张健, 张丹桔,等. 不同林冠郁闭度马尾松(*Pinus massoniana*)叶片养分再吸收率及其化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(3): 560-569.
- [50]刘西军,黄庆丰,徐小牛,等.修枝对滩地杨树生长和养分的短期影响[J].水土保持学报,2009,23(5):195-199.
- [51]林达, Chuong D N, 洪森先,等.间伐对杨树人工林土壤微生物量和氮含量的影响[J].森林与环境学报,2016,36(4):416-422.
- [52]DANG P, GAO Y, LIU J L, et al. Effects of thinning intensity on understory vegetation and soil microbial communities of a mature Chinese pine plantation in the Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2018, 630:171. DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.02.197.

- [53] PISARELLO K L, SUN G E, EVANS J M, et al. Potential long term water yield impacts from pine plantation management strategies in the southeastern United States[J]. *Forest Ecology and Management*, 2022, 522: 120454. DOI: 10.1016/j.foreco.2022.120454.
- [54] 孙尚伟,尹伟伦,夏新莉,等.修枝对复合农林系统内小气候及作物生长的影响[J].*北京林业大学学报*,2009,31(1):25-30.
- [55] 燕亚飞,方升佐,田野,等.林下植物多样性及养分积累量对杨树林分结构的响应[J].*生态学杂志*,2014,33(5):1170-1177.
- [56] 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.
- [57] 于立忠,朱教君,孔祥文,等.人为干扰(间伐)对红松人工林林下植物多样性的影响[J].*生态学报*,2006(11):3757-3764.
- [58] 张康,黄开栋,赵小军,等.修枝对杨树人工林林内小气候及林下植被的短期效应[J].*生态环境学报*,2019,28(8):1548-1556.