

杉木人工林碳储量影响因素研究进展

王姣娇¹,高唤唤¹,康宏樟^{1,2*}

(1. 上海交通大学 农业与生物学院,上海 200240;2. 国家林业局 上海城市森林生态系统国家定位观测研究站,上海 200240)

摘要:杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林是我国南方地区经营历史最长的人工用材林,其在木材生产功能和固碳、涵养水源等生态功能方面扮演着非常重要的角色,在应对全球气候变化进程中也发挥着不可替代的作用。然而,与天然林相比,人工用材林存在诸多问题,其中,如何在保证木材生产的同时提高生态功能,实现可持续发展,是目前杉木人工林经营管理面临的关键问题之一。碳储量是衡量森林生态功能的重要指标之一,森林碳汇有利于减缓温室效应,应对气候变化。本研究通过梳理和分析近年来与杉木人工林碳储量相关的文献,综述了林分年龄、经营管理措施、分布区域以及立地条件对杉木人工林生产力和碳储量的影响,在此基础上,提出了维持杉木人工林经济与生态效益相平衡的生产实践建议,也对杉木人工林碳储量研究的现存问题以及日后方向进行了探讨,以期今后的相关研究提供参考。

关键词:杉木人工林;碳储量;林分年龄;管理措施;立地条件

中图分类号:S718.55 文献标志码:A 文章编号:1001-7461(2018)03-0074-08

A Review on Influencing Factors of Carbon Storage in Chinese Fir Plantations

WANG Jiao-jiao¹,GAO Huan-huan¹,KANG Hong-zhang^{1,2*}

(1. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Urban Forest Research Station of National Positioning and Observation, State Forestry Administration, Shanghai 200240, China)

Abstract: As the longest history of artificial timber forest in Southern China, Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations play a very important role in the functions of timber production, carbon sequestration and water conservation, especially under the global change environment. However, compared with natural forest, there are many problems in artificial timber forest. Among them, how to improve the ecological function and achieve sustainable development while ensuring the production of wood is one of the key issues in the management of Chinese fir plantation. Carbon storage is one of the important indicators to measure the ecological function of forests. Forest carbon sinks are beneficial to mitigate greenhouse effect and cope with climate change. In this paper, the effects of stand age, management measures, distribution area and site conditions on the productivity and carbon storage of Chinese fir plantation were summarized and analyzed, from which the production practice guidance to balance the economic and ecological benefits of Chinese fir plantation was put forward, and the existing problems and future directions of carbon storage research of Chinese fir plantation were discussed to provide references for future research.

Key words: Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation; carbon storage; stand age; management measure; site conditions

随着工业的发展,化石燃料被大量焚烧,大气 CO₂ 浓度逐渐增加,温室效应日趋严重。森林作为

收稿日期:2017-07-22 修回日期:2017-08-10

基金项目:国家重点研发计划(2016YFD0600206)。

作者简介:王姣娇,女,在读硕士,研究方向:森林生态学。E-mail:15129075897@163.com

*通信作者:康宏樟,男,副研究员,研究方向:森林生态学。E-mail:kanghz@sjtu.edu.cn

陆地生态系统的主体,承担 2/3 左右的固碳量,在全球碳平衡和气候变化中扮演着重要角色。人工造林能够增加全球森林面积,从而增加陆地生态系统的碳固定量。据第八次森林资源清查结果显示,我国的人工林面积为 0.69 亿 hm^2 ,占全国森林面积的 36.1%,居世界首位^[1]。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是亚热带地区优质速生针叶树种,分布广阔,是我国南方地区经营历史最长的用材树种,其研究历史同样悠远。截止到第七次森林资源清查,杉木人工林的面积为 1 126.87 万 hm^2 ,占当时人工林面积的 18.17%^[2],是目前我国人工乔木林中面积占比最高的树种^[3]。有研究者利用碳核算模型 CO_2FIX 预测我国南方 4 省(浙江、福建、江西、湖南)目前的杉木人工林在未来 100 多 a 将固碳 0.23 Pg ^[4]。因此,了解和总结影响杉木人工林碳储量的因素有着重要的现实意义。

影响杉木人工林碳储量的因素较多,国内外相关研究也比较广泛,本研究主要通过梳理和分析近年来与杉木人工林生产力和碳储量相关的文献,系统总结在杉木碳储量研究方面取得的进展,从林分年龄、经营管理措施、分布区域以及立地条件等方面来探讨影响杉木人工林生产力和碳储量的主要因素,提出杉木人工林该方面研究的未来发展趋势。

1 林分年龄对杉木人工林碳储量的影响

杉木人工林碳储量与林分年龄密切相关,研究林分年龄对杉木人工林碳储量的影响有助于营林者调整林分结构,对采伐、抚育等经营活动具有指导意义。

近年的多个研究表明,在没有其他因素影响的情况下,总碳储量随着林龄的增加而增加^[5-9]。乔木层和土壤层的碳储量在杉木人工林生态系统各层次中占比最高^[10],达 98% 以上^[11]。乔木层碳储量多被认为是随林龄增长而增加的^[8,11-13],且乔木层最大的生长期为幼龄至中龄期^[14],而土壤碳储量则多被认为随林龄增加呈现先减后增的趋势^[11,14-18]。部分研究人员则持其他观点,如吴颖婷^[13]的研究发现,赣中南杉木人工林乔木层的碳储量占全林分的比例随林龄的增长而增加,而土壤层的占比随林龄增长而下降。

林分的固碳能力会随着林分的成熟而降低^[19]。钟羨芳^[20]等的研究中,87 年生和 40 年生的杉木林碳库很接近,说明老龄阶段的杉木人工林碳储量涨幅很小,其固碳能力很弱。Q. Q. Chen^[21]等也认为,杉木林在幼龄林前净碳累积速率是不断增加的,但从成熟林到老龄林间则呈下降趋势。同时,方晰^[22]

等的研究表明,10 年生以后的杉木林生态系统才真正具有碳汇功能,尉海东^[23]等认为中龄林的净固碳能力最强。综合分析认为,杉木人工林到中龄期才发挥碳汇作用,且此时固碳能力最强,而其碳储量的涨幅在成熟期之后会随着时间的推移逐渐减小。

除林龄的影响,杉木林分的起源对于其生态系统碳储量的影响也十分显著^[24-25]。G. S. Chen^[26]等对不同林龄的杉木人工林和天然阔叶林的碳储量进行了对比研究表明,由天然阔叶林森林转变而成的杉木人工林在新生期至中龄期的初始发育阶段大量损失土壤有机碳,虽中后期有较低水平的重新积累,但难以恢复至天然林水平。S. H. Fan^[27]等指出,从天然次生林转变为杉木人工林的土地利用变化显著降低了生态系统的碳储量。C. S. Wu^[28]等研究表明,天然针叶林树木生物量和碳储量明显 > 人工针叶林。杉木人工林目前的蓄积量大致为 7.3 亿 m^3 ^[2],为人工林的 1/3 左右。但其实人工林的蓄积量仅为森林蓄积量的 16.5%^[29],简而言之人工林的生产力没有天然林高。这些研究为杉木人工林是否应该向天然林转变提供了参考。

2 经营管理措施对杉木人工林碳储量的影响

对人工林进行合理的经营管理,能促进干材的生长,提高生产力,使经营者获得显著的经济效益,同时,经营技术也能促进生物量的增长,这也意味着碳储量的增加。在全球 CO_2 浓度增加的背景下,科学的经营管理是人工林发挥碳汇功能的前提。目前,杉木人工林的经营管理措施主要集中于栽植模式、栽植密度、间伐强度、轮伐期的选择、采伐剩余物处理方式以及养分控制等方面。

2.1 栽植模式

多代连栽会降低土壤肥力^[30-31],不利于杉木林碳素的积累^[12]。尉海东^[32]等研究显示,杉木林的碳储量随着连栽代数的增加而降低,降低幅度则与林分发育阶段有关,中龄林代数间差异最为明显,与第一代中龄林相比,第三代连栽的杉木中龄林碳储量下降幅度达 63.60%,年净固碳量下降了 25.14%。钟羨芳^[33]和 X. Q. Zhang^[34]等的研究同样表明连栽将导致杉木人工林生态系统碳储量减小,不利于人工林发挥碳汇功能。

与多代连栽杉木纯林相比,在多代连栽的杉木皆伐林地上营造针阔混交林则有利于生产力的提高,地力的培肥、生态系统碳吸存能力的增强^[35]。杉阔轮栽和留杉栽阔的经营模式,也可以增加生态系统的碳储量,尤其是土壤碳库^[12]。田晓^[36]等应用

混合型模型 FORECAST 模拟楠木纯林、杉木纯林以及中亚热带楠木杉木混交林在 300 a 内的碳储量变化,发现楠木杉木混交比为 3:1 的时候,获得的干材量和维持森林固碳水平都能达到最优。张剑^[37]等的研究显示杉木火力楠混交林显著提高了土壤微生物有机碳含量及其占总有机碳的比例,杉阔轮栽模式还增加了土壤有机碳含量和稳定态有机碳含量。郭家新^[38]的研究同样显示,杉木火力楠混交林较纯林更有利于土壤碳库的增加。因此,杉木人工造林应多发展混交林。但是,明安刚^[39]等对南亚热带红锥杉木混交林的研究表明,红锥杉木混交林的碳储量<杉木纯林。王幼茹^[40]研究结果也是杉木纯林碳储量较杉木千年桐混交林更高。可见,在营建针阔混交林的时候,应充分考虑不同阔叶树种自身的固碳特性。杉木林发育阶段的不同对纯林及混交林碳储量比较也有一定影响,张骏^[41]等的试验显示,幼龄林混交林的乔木层生物量比纯林低,杉木混交林的中龄林和成熟林生物量比杉木纯林高。

2.2 栽植密度

高密度种植会影响叶片的受光度,也会引起养分的竞争加剧,继而抑制杉木幼苗的生长以及生物量积累^[42]。贾亚运^[43]等研究了不同造林密度(2 400、3 100、3 400、4 200、4 400 株·hm⁻²)对 8 年生杉木林分生长的影响,结果显示当密度为 4 200 株·hm⁻²时杉木林蓄积量达到最大继而减小,表明杉木林分密度过大将会限制林木发育生长。方奇^[44]调查了栽植密度分别为 1 665、3 330、4 995、6 660 株·hm⁻²的 8 年生杉木幼林,发现生产力随密度增加而增加,但综合生态效益,该研究认为 3 330~4 995 株·hm⁻²的初植密度更有利于杉木林的可持续发展。赵磊^[45]等对江西大岗山地区现保存密度为 900、1 700、2 700、3 500、4 500 株·hm⁻²的 30 年生杉木人工林所作的研究表明 3 500 株·hm⁻²的林分密度有更好的水源涵养能力。由于立地条件、林分年龄等因素的不同,各研究的适宜密度不尽相同。目前在栽植密度对碳储量的影响方面尚未有系统的研究总结。

2.3 间伐强度

间伐是森林经营管理的常用手段,伐除部分树木,调整林分密度,使林木获得更充足的阳光及更广阔的营养空间,以促进保留木生长。间伐也能促进林下植被的更新和生长,显著提高林下植被物种多样性及生物量^[46-47],进而提高土壤微生物数量,增强土壤生物活性,加速土壤养分循环,土壤肥力得到改善和提高^[48]。杉木人工林的生态系统中碳储量的动态变化及分配都与间伐措施有密切关系。多个研

究表明,林下植被层碳储量和土壤有机碳储量都是随着间伐强度的增加而增加^[49-50],凋落物碳储量在不同间伐处理间差异不显著^[49-51],但在方晰^[52]等的研究中,间伐 5 a 后的湖南会同杉木人工林土壤层碳储量却减少 10%,凋落物层的碳储量增加了 93%。尽管一般认为间伐后保留木单株生物量明显增长,但由于整体林分蓄积量显著降低,林分整体的生物量可能会减少^[53]。黄雪蔓^[54]等对以不同间伐强度(H:74%、M:50%、L:34%)间伐 8 a 后的广西青山实验林场的 21 年生杉木人工林进行了研究,表明不同间伐强度的乔木层生物量及碳储量随着间伐强度降低而增加,且与对照林地即未采取间伐措施的林地相比,间伐过的林地乔木层生物量及碳储量皆低。另外,在该研究中,只有强度间伐对杉木单株生物量有促进作用,中度间伐及弱度间伐对单株生物量的影响并不明显。丁波^[49]等在贵州开展的不同间伐强度(H:50%、M:33.3%、L:16.7%)对 18 年生杉木人工林碳储量影响的研究也显示,间伐 3 a 后杉木人工林乔木层以及整个生态系统碳储量随着间伐强度的增加而减少。可见,仅从固碳的角度来说,适当的低强度间伐更有利于碳储量的累积。

2.4 轮伐期

轮伐期的选择也影响着杉木人工林的固碳功能,合理的轮伐期应该兼顾且平衡经济效益和生态服务功能。王伟峰^[55]等应用 FORECAST 模型模拟不同轮伐期在 150 a 间的总固碳量,结果显示短轮伐期(15 a)的固碳量较高,但固碳持久性则没有正常轮伐期(25 a)和长轮伐期(50 a)强,每个轮伐期之间的固碳量下降幅度较大,对土壤肥力消耗较大。该研究认为适当延长轮伐期,即选择 25 a 以上的生态轮伐期,可实现杉木人工林的固碳可持续性,具备良好的生态与经济双效益。接程月^[56]同样是基于 FORECAST 模型研究发现,短轮伐期(≤25 a)的碳储量较高,干材收获量大,过长轮伐期(>50 a)的碳储量不高,且在较好的立地条件下,固碳能力也有下降的趋势。综合分析得出,选择较长轮伐期(25~50 a)相对而言有利于杉木人工林的可持续经营。

2.5 采伐剩余物处理方式

皆伐炼山是人工林传统的营林方式,在南方杉木人工林被广泛应用。郭剑芬^[57]和马松莉^[58]等的研究均表明,皆伐炼山会明显损耗土壤有机碳及土壤养分。翁贤权^[59]的研究中,炼山处理 10 a 后的二代杉木林蓄积量仅为不炼山的 87.86%。杨靖宇^[60]进一步研究表明,炼山降低了 15 年生杉木林乔木层和凋落物层的碳储量,但对林下植被层却有积极作用。曹永康^[61]在不同采伐剩余物处理方式对碳储

量影响的研究发现,保留以及加倍采伐剩余物能促进第二代杉木林的生长,提高生态系统的生产力及碳储量,而清除所有地上部分未分解有机物质、只清除树木的所有地上部分以及炼山这3种处理方式都降低了土壤含碳率,限制了二代杉木的生长。王伟峰^[62]等、李新乐^[63]、Z. Q. Huang^[64]也同样认为只收获树干,将采伐剩余物留在林地对杉木林长期固碳效果最好。胡振宏^[65]等的研究结果则显示采伐剩余物管理措施对人工林土壤全碳和全氮的长期影响并不显著。结果的不一致可能与立地条件等环境因素有关。从杉木人工林固碳的可持续性考虑,在生产实践中建议保留采伐剩余物。

2.6 施肥处理

碳储量也受氮沉降水平的影响。在房焕英^[66]的研究中,中低氮处理($120, 60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)对林木和土壤碳储量有双重促进作用,而高氮处理($240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)对林木碳储量的正效应与对土壤碳储量的负效应相抵消,因而对生态系统碳储量的作用不明显。黄玉梓^[67]等的研究表明低氮沉降($60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)对杉木生长有长期的促进作用,中高氮沉降($120, 240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)抑制树高的生长,但其在初期(3 a内)有利于林木胸径的生长。樊后保^[68]等的试验证明,土壤有机碳随氮沉降水平的增加而降低。因此,对杉木人工林每年每公顷施用N大约60 kg对碳储量会有积极作用。李艳鹏^[69]等在中亚热带杉木幼龄林进行的氮、磷添加试验研究表明,施肥后土壤水溶性有机碳、微生物生物量碳和土壤酶活性均有所降低,很可能会抑制土壤碳的释放,从而增加林地土壤碳的固定。

3 分布区域及立地条件对杉木人工林碳储量的影响

杉木人工林在我国的分布区域极为广阔,东至浙江、福建太平洋海岸,南至广西广东,西至云南四川,北至山西河南。我国幅员辽阔,各地环境气候条件各不相同,因而各地杉木林生产力及碳储量也会有所不同。温远光^[70]等研究表明,中国杉木人工林的生产力沿中亚热带地区(桂北、黔东南、湘西、湘南、赣南、粤北和闽北)向南北逐步递减的。Y. P. Liu^[71]等利用MaxEnt模型模拟出2050年杉木林的分布情况,发现其分布区将北移,而北移的速度则取决于气候变化的速度,该研究又结合PnET-II模型评估2050年杉木生产力分布情况,同样认为中国南部的净初级生产力将会有大量减小,大约减少目前NPP的13.46%,而在中国中部将会有微弱的增长,即生产力也将北移。Y. H. Lu等^[72]以3-PG模型模拟的方法来评估杉木

林生产力和分布,也得到相似结果,即20 a后杉木人工林的生产力中心将转移至我国大陆中部(四川南部和贵州北部)以及台湾中部。

在造林前常常需要考虑立地条件,包括地形、土壤、水文等自然环境因子,常被用来解释相似研究的不同结果,也恰恰如此,我们才能了解立地条件究竟是如何影响杉木林碳储量的。有多个研究提及,较好的立地条件有利于碳库的增加^[12,36,55]。周国强^[73]等对湖南大围山不同海拔的平均林龄19 a的杉木人工林直径结构进行了统计拟合,发现海拔400~1 000 m的样地林分平均胸径大小与海拔上升呈负相关。施文涛^[5]等在较高海拔山区杉木林的研究中,地下部分根系生物量所占比例随林龄的增加而提高,而在全国尺度上,根系生物量是随林龄递减的^[74]。薛立^[75]等研究了不同坡位对杉木林土壤碳储量的影响,发现下坡位的各土层及凋落物层碳储量皆高于上坡位。聂道平^[76]的研究也认为坡中下部及山洼比坡上部及山脊要更适合种植杉木。D. Wu^[77]等分析了海拔($\leq 100 \text{ m}, 100 \sim 300, 300 \sim 500, 500 \sim 700, 700 \sim 900 \text{ m}, > 900 \text{ m}$)及坡度($0^\circ \sim 5^\circ, 5^\circ \sim 15^\circ, 15^\circ \sim 25^\circ, 25^\circ \sim 35^\circ, 35^\circ \sim 45^\circ, > 45^\circ$)对江西鄱阳湖流域的杉木、马尾松及湿地松林碳密度的影响,结果表明:碳密度大体上随着海拔的升高而升高,在700~900 m处最高;坡度 $< 5^\circ$ 的区域内森林碳密度表现为最低,在坡度为 $25^\circ \sim 35^\circ$ 时,碳密度最高。除了地形,气候对森林碳储量的影响也十分显著。Y. P. Liu等^[71]的研究结果中提及,降水量是影响杉木分布和生产力的最重要的气候因子,温度次之。G. W. Lie^[78]等研究了温度对杉木各器官生物量分配的影响,结果表明温度能解释所有年龄阶段树枝和树叶的生物量,但树干和根生物量并不是在所有年龄阶段都是随年均温度升高而升高的。

4 小结与展望

关于杉木人工林的科学研究已经持续了半个多世纪,其中与碳储量相关的研究已经相当成熟。综合近年研究文献,杉木人工林碳储量主要是受林分年龄、营林措施、立地条件和分布区域的影响。随着林分年龄的增长,杉木人工林生态系统碳储量也会增长。分布区域不同,杉木林碳储量差异较大。立地条件越好,杉木人工林碳储量越高。另外,营林措施与杉木人工林碳储量同样密切相关,这方面的研究涵盖较广,包括:连栽不利于二代杉木林的生长;高密度栽植以及过度间伐对杉木林碳储量都有消极影响;25~50 a的轮伐期、保留采伐剩余物以及 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的氮处理相对更加有利于杉木林的

可持续经营。

在现实的生产实践中,应根据杉木人工林的地理区位及立地条件的差异,来制定不同的经营管理方案,以获得不同直径用材来满足市场需求,同时又能保证生态系统的碳平衡。例如,在边缘产区以及较差立地条件下,较长轮伐期以及低强度间伐将更有利于林分生态效益,降低土肥损耗,也能获得大直径木材。在中心产区的较好立地下,则更适合相对较短轮伐期以及中等强度间伐,获得更高的木材蓄积量。中低密度栽植以及适当的施肥处理在各立地条件下都有利于林分的经济及生态效益平衡,但具体栽植密度及施肥处理水平仍需因地制宜。如果我们能放弃部分经济效益,将人工纯林朝着针阔混交,甚至是天然林的方向正向演替,既能进一步提高林地固碳能力,又能填补全球的生态效益。

在关于杉木人工林碳储量影响因素的研究中,林分年龄及营林措施两方面研究更为丰富,而与分布区域及立地条件相关的研究相对单薄。这就涉及杉木碳储量研究面临的一些问题。目前的相关研究多局限于小尺度,空间上多为单个观测站内的单个或多个杉木人工林生态系统,实地调查观测在时间上也多为1个轮伐期以内。研究分布区域及立地条件对碳储量的影响势必要扩宽研究尺度,但是不同的地区以及长期的观测要承受不同程度的突发自然灾害以及其他人为干扰,传统的样地实测估算无法回避大时空尺度所带来的误差以及巨大的人力物力消耗。而且碳储量的影响因素太多,除了本研究所提及的经营管理措施等可控因素,诸如立地条件自身涉及的地形地貌、水文土壤等因素都是属于复合影响因素,不容易剥离,这也为传统试验研究提供了难题。另外,近年来依靠新模型模拟结合全球气候变化来评估区域生产力和碳储量已经成为一种新趋势。新模型的发展为我们带来了便利、省时省力省财,更重要的一点是,模型弥补了传统样地实测在时间尺度上的局限性,且模型能同时模拟几种因素对碳储量的复合影响。但目前的多数模型都还存在局限性,由于内在机制、数据来源、参数设置等不同,不同模型模拟相同地区碳储量存在差异,且模型模拟获得的是长期的结果,很难在野外得到验证,所以得到的结果仍然存在不确定性。从长远来看,借助数学模型以及遥感技术的发展能够扩大研究尺度,深化研究意义。利用多种技术结合进行大尺度研究将是了解杉木人工林碳储量时空变化的必然方向。

参考文献:

[1] 国家林业局. 第八次全国森林资源清查结果[J]. 林业资源管

理,2014(1):1-2.

- [2] 国家林业局森林资源管理司. 第七次全国森林资源清查及森林资源状况[J]. 林业资源管理,2010(1):1-8.
- [3] 胡觉,彭长清,甘世书,等. 我国人工林变化动态及增长潜力分析[J]. 林业资源管理,2014(Supp. 1):6-8.
HU J, PENG C Q, GAN S S, *et al.* Analysis on the dynamic changes and growth potential of China's plantations[J]. Forest Resources Management, 2014(Supp. 1):6-8. (in Chinese)
- [4] 邱富宏. 中国南方杉木人工林碳动态模拟研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2016,44(8):127-134.
DI F H. Simulation of carbon dynamics of Chinese fir plantation in southern China[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2016, 44(8):127-134. (in Chinese)
- [5] 施文涛,谢昕云,刘西军,等. 安徽大别山区杉木人工林乔木层生物量模型及碳储量[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(5):758-764.
- [6] 李娟. 湖南会同县杉木人工林管理碳汇的核算研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2015.
- [7] 黄拥华. 湘中丘陵区杉木人工林生长及物种多样性与碳储量测定分析[D]. 长沙:中南林业科技大学,2012.
- [8] 涂宏涛,孙玉军,刘素真,等. 亚热带杉木人工林生物量及其碳储量分布——以福建将乐县杉木人工林为例[J]. 中南林业科技大学学报,2015,35(7):94-99.
TU H T, SUN Y J, LIU S Z, *et al.* Stand biomass and carbon storage distribution of Chinese fir plantation in subtropical China[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015, 35(7):94-99. (in Chinese)
- [9] 邓华平,李树战,何明山,等. 豫南不同年龄杉木林生态系统碳储量及其空间动态特征[J]. 中南林业科技大学学报,2011,31(8):83-90.
DENG H P, LI S Z, HE M S, *et al.* Carbon stock and its allocation in 5 different age stand of *Cunninghamia lanceolata* forest ecosystem in south of Henan[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2011, 31(8):83-90. (in Chinese)
- [10] 陶玉华,冯金朝,马麟英,等. 广西罗城马尾松、杉木、桉树人工林碳储量及其动态变化[J]. 生态环境学报,2011,20(11):1608-1613.
- [11] 兰斯安,杜虎,曾馥平,等. 不同林龄杉木人工林碳储量及其分配格局[J]. 应用生态学报,2016,27(4):1125-1134.
LAN S A, DU H, ZENG F P, *et al.* Carbon storage and allocation in *Cunninghamia lanceolata* plantations with different stand ages[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(4):1125-1134. (in Chinese)
- [12] 王义祥. 福建省主要森林类型碳库与杉木林碳吸存[D]. 福州:福建农林大学,2004.
- [13] 段颖婷. 赣中南杉木人工林生态系统碳储量的研究[D]. 南昌:江西农业大学,2013.
- [14] 梁萌杰,陈龙池,汪思龙. 湖南省杉木人工林生态系统碳储量分配格局及固碳潜力[J]. 生态学杂志,2016,35(4):896-902.
LIANG M J, CHEN L C, WANG S L. The allocation pattern of carbon storage and carbon sequestration potential in Chinese fir plantation ecosystems in Hunan Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(4):896-902. (in Chinese)
- [15] 刘延惠,丁访军,崔迎春,等. 黔中地区不同林龄杉木人工林碳

- 贮量及其分配特征[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 278-283.
- LIU Y H, DING F J, CUI Y C, *et al.* Carbon storage and its allocation characters of Chinese fir plantation in different stand ages in the middle part of Guizhou[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(4): 278-283. (in Chinese)
- [16] 刘磊. 广西大青山地区杉木和马尾松人工林林下植被群落特征及林分碳蓄积量的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2006.
- [17] 方晰. 杉木人工林生态系统碳贮量与碳平衡的研究[D]. 长沙: 中南林学院, 2004.
- [18] 李平, 郑阿宝, 阮宏华, 等. 苏南丘陵不同林龄杉木林土壤活性有机碳变化特征[J]. 生态学杂志, 2011, 30(4): 778-783.
- LI P, ZHENG A B, RUAN H H, *et al.* Variation of soil labile organic carbon in different age Chinese fir plantations in south Jiangsu[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(4): 778-783. (in Chinese)
- [19] 林卓. 不同尺度下福建省杉木碳计量模型、预估及应用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2016.
- [20] 钟羨芳, 杨玉盛, 高人, 等. 老龄杉木人工林生态系统碳库及分配[J]. 亚热带资源与环境学报, 2008, 3(2): 11-18.
- ZHONG X F, YANG Y S, GAO R, *et al.* Carbon storage and allocation in old-growth *Cunninghamia lanceolata* plantation in subtropical China[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2008, 3(2): 11-18. (in Chinese)
- [21] CHEN Q Q, XU W Q, LI S G, *et al.* Aboveground biomass and corresponding carbon sequestration ability of four major forest types in south China [J]. Chinese Sci. Bull., 2013, 58(13): 1551-1557.
- [22] 方晰, 田大伦, 项文化, 等. 第二代杉木中幼林生态系统碳动态与平衡[J]. 中南林业科技大学学报, 2002, 22(1): 1-6.
- FANG X, TIAN D L, XIANG W H, *et al.* Carbon dynamics and balance in the ecosystem of the young and middle-aged second-generation Chinese fir plantation [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2002, 22(1): 1-6. (in Chinese)
- [23] 尉海东, 马祥庆. 中亚热带不同发育阶段杉木人工林生态系统碳贮量研究[J]. 江西农业大学学报, 2006, 28(2): 239-243.
- WEI H D, MA X Q. A study on the carbon storage and distribution in Chinese fir plantation ecosystem of different growing stages in mid-subtropical zone[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2006, 28(2): 239-243. (in Chinese)
- [24] WANG Q, WANG S. Response of labile soil organic matter to changes in forest vegetation in subtropical regions [J]. Appl. Soil Ecol., 2011, 47(3): 210-216.
- [25] WANG Q K, WANG S L. Soil organic matter under different forest types in southern China [J]. Geoderma, 2007, 142(3/4): 349-356.
- [26] CHEN G S, YANG Z J, GAO R, *et al.* Carbon storage in a chronosequence of Chinese fir plantations in southern China [J]. Forest Ecol. Manag., 2013, 300(4): 68-76.
- [27] FAN S H, GUAN F Y, XU X L, *et al.* Ecosystem carbon stock loss after land use change in subtropical forests in China [J]. Forests, 2016, 7(7): 142.
- [28] WU C S, WEI X H, MO Q F, *et al.* Effects of stand origin and near-natural restoration on the stock and structural composition of fallen trees in mid-subtropical forests [J]. Forests, 2015, 6(12): 4439-4450.
- [29] 徐济德. 我国第八次森林资源清查结果及分析[J]. 林业经济, 2014(3): 6-8.
- XU J D. The 8th forest resources inventory results and analysis in China [J]. Forestry Economics, 2014(3): 6-8. (in Chinese)
- [30] 杨玉盛, 何宗明, 陈光水, 等. 杉木多代连栽后土壤肥力变化[J]. 土壤与环境, 2001, 10(1): 33-38.
- YANG Y S, HE Z M, CHEN G S, *et al.* PCA of soil fertility under different gaps of continuously planting Chinese fir[J]. Soil and Environmental Sciences, 2001, 10(1): 33-38. (in Chinese)
- [31] 罗云建, 张小全. 多代连栽人工林碳贮量的变化[J]. 林业科学研究, 2006, 19(6): 791-798.
- LUO Y J, ZHANG X Q. Carbon stock changes of successive rotations of plantations [J]. Forest Research, 2006, 19(6): 791-798. (in Chinese)
- [32] 尉海东, 刘爱琴, 马祥庆, 等. 连栽对杉木人工林碳贮量的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(3): 36-39.
- WEI H D, LIU A Q, MA X Q, *et al.* Effects of successive planting on carbon storage of Chinese fir forest [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(3): 36-39. (in Chinese)
- [33] 钟羨芳. 连栽对杉木人工林碳贮量及土壤易变碳的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2007.
- [34] ZHANG X Q, KIRSCHBAUM M U F, HOU Z H, *et al.* Carbon stock changes in successive rotations of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb) hook) plantations [J]. Forest Ecol. Manag., 2004, 202(1/3): 131-47.
- [35] 钟羨芳, 陈光水, 高人, 等. 杉木多代连栽地营造杉阔混交林碳库与碳吸存[J]. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2006, 22(2): 99-103.
- ZHONG X F, CHEN G S, GAO R, *et al.* Carbon stock and carbon sequestration in mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Michelia macclurei* planted on site of continuous Chinese fir monoculture [J]. Journal of Fujian Normal University: Natural Science Edition, 2006, 22(2): 99-103. (in Chinese)
- [36] 田晓, 刘苑秋, 魏晓华, 等. 模拟楠木杉木人工混交林不同混交比例对净生产力和碳储量的影响[J]. 江西农业大学学报, 2014(1): 122-130.
- TIAN X, LIU Y Q, WEI X H, *et al.* Simulation of the effects of various mixing proportions on NPP and carbon storage in the mixedwood plantations of *Phoebe bournei* with Chinese fir [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2014(1): 122-130. (in Chinese)
- [37] 张剑, 汪思龙, 隋艳晖, 等. 不同经营措施对杉木人工林土壤碳库的影响[J]. 资源开发与市场, 2010, 26(9): 826-830.
- ZHANG J, WANG S L, SUI Y H, *et al.* Effects of different management practices on soil organic carbon pool under Chinese fir plantation [J]. Resource Development & Market, 2010, 26(9): 826-830. (in Chinese)
- [38] 郭家新. 杉木火力楠混交林与杉木纯林土壤碳氮库研究[J]. 福建林业科技, 2008, 35(2): 5-9.
- [39] 明安刚, 刘世荣, 莫慧华, 等. 南亚热带红锥、杉木纯林与混交林碳贮量比较[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 244-251.
- MING A G, LIU S R, MO H H, *et al.* Comparison of carbon

- storage in pure and mixed stands of *Castanopsis hystrix* and *Cunninghamia lanceolata* in subtropical China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(1): 244-251. (in Chinese)
- [40] 王幼茹. 杉木千年桐混交林碳汇评价及其与养分特征关系[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- [41] 张骏, 葛滢, 江波, 等. 浙江省杉木生态公益林碳储量效益分析[J]. *林业科学*, 2010, 46(6): 22-26.
ZHANG J, GE Y, JIANG B, *et al.* Carbon storage efficiency of *Cunninghamia lanceolata* ecological service forest in Zhejiang[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(6): 22-26. (in Chinese)
- [42] DONG T F, ZHANG Y X, ZHANG Y B, *et al.* Continuous planting under a high density enhances the competition for nutrients among young *Cunninghamia lanceolata* saplings[J]. *Ann. Forest Sci.*, 2016, 73(2): 331-9.
- [43] 贾亚运, 何宗明, 周丽丽, 等. 造林密度对杉木幼林生长及空间利用的影响[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(5): 1177-1181.
JIA Y Y, HE Z M, ZHOU L L, *et al.* Effects of planting densities on the growth and space utilization of young *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(5): 1177-1181. (in Chinese)
- [44] 方奇. 不同密度杉木幼林系统生产力和生态效益研究[J]. *林业科学*, 2000, 36(Supp. 1): 28-35.
FANG Q. Study on productivity and ecologic benefits of young growth Chinese fir plantations systems in different densities[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(Supp. 1): 28-35. (in Chinese)
- [45] 赵磊, 王兵, 蔡体久, 等. 江西大岗山不同密度杉木林枯落物持水与土壤贮水能力研究[J]. *水土保持学报*, 2013(1): 203-208.
ZHAO L, WANG B, CAI T J, *et al.* Water-holding capacity of litter and soil under Chinese fir forest with different densities in Dagangshan mountain of Jiangxi Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013(1): 203-208. (in Chinese)
- [46] 王祖华, 李瑞露, 王晓杰, 等. 间伐对杉木人工林林下植被多样性及生物量的影响[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(12): 2778-2782.
- [47] 涂育合. 杉木不同经营密度的林下植被变化[J]. *西北林学院学报*, 2005, 20(4): 52-55.
TU Y H. Dynamic characteristics of undergrowth vegetations in *Cunninghamia lanceolata* with different management density[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2005, 20(4): 52-55 (in Chinese)
- [48] 张鼎华, 叶章发, 范必有, 等. 抚育间伐对人工林土壤肥力的影响[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(5): 672-676.
ZHANG D H, YE Z F, FAN B Y, *et al.* Influence of thinning on soil fertility in artificial forest[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(5): 672-676. (in Chinese)
- [49] 丁波, 丁贵杰, 李先周, 等. 短期间伐对杉木人工林生态系统碳储量的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2016, 36(8): 66-71.
DING B, DING G J, LI X Z, *et al.* Effects of short-term thinning on the carbon storage in *Cunninghamia lanceolata* plantation ecosystem[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2016, 36(8): 66-71. (in Chinese)
- [50] 刘佳. 抚育间伐对杉木人工林碳储量的影响[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2014.
- [51] 徐金良, 毛玉明, 成向荣, 等. 间伐对杉木人工林碳储量的长期影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(7): 1898-1904.
XU J L, MAO Y M, CHENG X R, *et al.* Long-term effects of thinning on carbon storage in *Cunninghamia lanceolata* plantations[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(7): 1898-1904. (in Chinese)
- [52] 方晰, 田大伦, 项文化. 间伐对杉木人工林生态系统碳贮量及其空间分配格局的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2010, 30(11): 47-53.
FANG X, TIAN D L, XIANG W H, *et al.* Effects of thinning on carbon storage and its spatial distributions in Chinese fir plantation ecosystem[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2010, 30(11): 47-53. (in Chinese)
- [53] 俞月凤, 宋同清, 曾馥平, 等. 杉木人工林生物量及其分配的动态变化[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(7): 1660-1666.
YU Y F, SONG T Q, ZENG F P, *et al.* Dynamic changes of biomass and its allocation in *Cunninghamia lanceolata* plantations of different stand ages[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(7): 1660-1666. (in Chinese)
- [54] 黄雪蔓, 尤业明, 蓝嘉川, 等. 不同间伐强度对杉木人工林碳储量及其分配的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(1): 156-163.
HUANG X M, YOU Y M, LAN J C, *et al.* The effect of carbon storage and its allocation in *Cunninghamia lanceolata* plantations with different thinning intensities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(1): 156-163. (in Chinese)
- [55] 王伟峰, 段玉玺, 张立欣, 等. 不同轮伐期对杉木人工林碳固存的影响[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(7): 669-678.
WANG W F, DUAN Y X, ZHANG L X, *et al.* Effects of different rotations on carbon sequestration in Chinese fir plantations[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(7): 669-678. (in Chinese)
- [56] 接程月. 基于 FORECAST 模型不同轮伐期杉木人工林和云杉林碳储量的研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2011.
- [57] 郭剑芬. 皆伐火烧对杉木林和栲树林碳、氮动态的影响[D]. 厦门: 厦门大学, 2006.
- [58] 马松莉, 邹成坤, 兰立达, 等. 皆伐炼山对华西雨屏区杉木人工林碳库的影响[J]. *四川林业科技*, 2013, 34(6): 48-51.
- [59] 翁贤权. 1代杉木采伐剩余物对2代杉木生长的影响[J]. *福建林业科技*, 2013, 40(2): 24-27.
- [60] 杨靖宇. 采伐剩余物处理方式对15年生杉木林碳、氮影响的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- [61] 曹永康. 不同采伐剩余物处理方式对二代杉木人工林生态系统碳储量的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2008.
- [62] 王伟峰, 魏晓华, 段玉玺, 等. 采伐剩余物处理方式对杉木人工林固碳量的长期影响[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(6): 198-203.
WANG W F, WEI X H, DUAN Y X, *et al.* Long-term effects of logging residue treatment on carbon sequestration in Chinese fir plantation[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(6): 198-203. (in Chinese)
- [63] 李新乐. 采伐剩余物处理对杉木生长的影响[J]. *林业勘察设计*, 2011(2): 35-38.
- [64] HUANG Z Q, HE Z M, WAN X H, *et al.* Harvest residue management effects on tree growth and ecosystem carbon in a

- Chinese fir plantation in subtropical China [J]. *Plant Soil*, 2013, 364(1-2): 303-14.
- [65] 胡振宏,何宗明,范少辉,等. 采伐剩余物管理措施对二代杉木人工林土壤全碳、全氮含量的长期效应[J]. *生态学报*, 2013, 33(13): 4205-4213.
- HU Z H, HE Z M, FAN S H, *et al.* Long-term effects of harvest residue management on soil total carbon and nitrogen concentrations of a replanted Chinese fir plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(13): 4205-4213. (in Chinese)
- [66] 房焕英. 氮沉降对杉木人工林生态系统碳库及固碳效益的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2013.
- [67] 黄玉梓, 樊后保, 李燕燕, 等. 氮沉降对杉木人工林生长及林下植被碳库的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(4): 1407-1412.
- [68] 樊后保, 袁颖红, 王强, 等. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳和全氮的影响[J]. *福建林学院学报*, 2007, 27(1): 1-6.
- FAN H B, YUAN Y H, WANG Q, *et al.* Effects of nitrogen deposition on soil organic carbon and total nitrogen beneath Chinese fir plantations[J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2007, 27(1): 1-6. (in Chinese)
- [69] 李艳鹏, 贺同鑫, 王清奎. 施肥对杉木林土壤酶和活性有机碳的影响[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(10): 2722-2731.
- LI Y P, HE T X, WANG Q K. Impact of fertilization on soil organic carbon and enzyme activities in a *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(10): 2722-2731. (in Chinese)
- [70] 温远光, 元昌安, 刘世荣, 等. 中国杉木林现实生产力的分布及模拟[J]. *广西科学*, 1995(2): 56-61.
- [71] LIU Y P, YU D Y, XUN B, *et al.* The potential effects of climate change on the distribution and productivity of *Cunninghamia lanceolata* in China [J]. *Environ Monit Assess*, 2014, 186(1): 135-49.
- [72] LU Y H, COOPS N C, WANG T L, *et al.* A process-based approach to estimate Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) distribution and productivity in southern China under climate change [J]. *Forests*, 2015, 6(2): 360-79.
- [73] 周国强, 陈彩虹, 楚春晖, 等. 大围山杉木人工林不同海拔直径分布研究[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(1): 86-91.
- ZHOU G Q, CHEN C H, CHU C H, *et al.* Diameter distribution of Chinese fir in different altitudes in Dawei mountain [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(1): 86-91. (in Chinese)
- [74] 侯振宏, 张小全, 徐德应, 等. 杉木人工林生物量和生产力研究[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(5): 97-103.
- HONG Z H, ZHANG X Q, XU D Y, *et al.* Study on biomass and productivity of Chinese fir plantation[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(5): 97-103. (in Chinese)
- [75] 薛立, 薛晔, 列淦文, 等. 不同坡位杉木林土壤碳储量研究[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(6): 43-46.
- XUE L, XUE Y, LIE G W, *et al.* Soil organic carbon storage on different slope positions in *Cunninghamia lanceolata* stands[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(6): 43-46. (in Chinese)
- [76] 聂道平. 不同立地条件的杉木人工林生产力和养分循环[J]. *林业科学研究*, 1993(6): 643-649.
- [77] WU D, SHAO Q Q, LI J. Effects of afforestation on carbon storage in boyang lake basin, China [J]. *Chinese Geogr Sci.*, 2013, 23(6): 647-54.
- [78] LIE G W, XUE L. Biomass allocation patterns in forests growing different climatic zones of China [J]. *Trees-Struct Funct*, 2016, 30(3): 639-46.