

杉木人工林土壤肥力质量的演变趋势及维持措施的研究进展

郭佳欢^{1,2}, 孙杰杰^{1,2}, 冯会丽^{1,2}, 曹鹏鹤², 俞元春^{1,2}

(1. 南京林业大学 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学 生物与环境学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 近年来, 人工林土壤肥力质量退化与林业生产之间的矛盾日益加剧, 严重威胁林业的可持续发展, 土壤肥力质量维持变得十分紧迫。针对人工林土壤肥力质量退化与维持这一热点问题, 从土壤物理性质、土壤化学性质、土壤微生物、土壤酶活性、化感作用等角度系统阐述了杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林经营过程中土壤肥力质量的演变趋势。众多研究表明, 中国杉木人工林主要产区普遍存在土壤肥力质量退化, 生产力持续降低等问题, 其主要驱动因素是不可持续的营林措施。同时从轮作经营、混交复合造林、林分密度调节、肥力补偿、可持续森林管理等方面对杉木人工林土壤肥力质量维持研究成果进行了综述, 并对杉木人工林土壤肥力质量维持研究进行了展望。表 1 参 48

关键词: 土壤学; 杉木; 人工林; 土壤肥力质量; 维持; 综述

中图分类号: S714.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2020)04-0801-09

Research progress on evolution trends and maintenance measures of soil fertility quality in *Cunninghamia lanceolata* plantations

GUO Jiahuan^{1,2}, SUN Jiejie^{1,2}, FENG Huili^{1,2}, CAO Penghe², YU Yuanchun^{1,2}

(1. Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: In recent years, the growing contradiction between degradation of soil fertility quality and forestry production has seriously threatened the sustainable development of forestry, the maintenance of soil fertility quality has become very urgent. Aiming at the hot issue of degradation and maintenance of soil fertility quality in plantations, this paper systematically elaborates the evolution trend of soil fertility quality in management of *Cunninghamia lanceolata* plantations from the perspectives of soil physical property, soil chemical property, soil microorganism, soil enzyme activity and allelopathy. Many studies have shown that degradation of soil fertility quality and continuous decrease of productivity are common problems in *C. lanceolata* plantations, and the main contributing factor is unsustainable forestry practice. The results of soil fertility maintenance in *C. lanceolata* plantations are reviewed from such aspects as rotation management, mixed compound afforestation, forest density adjustment, fertility compensation and sustainable forest management. The research on soil fertility quality maintenance in *C. lanceolata* plantations is prospected. [Ch, 1 tab. 48 ref.]

Key words: soil science; *Cunninghamia lanceolata*; plantation; soil fertility quality; maintenance; review

收稿日期: 2019-08-15; 修回日期: 2019-12-02

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0600304); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 郭佳欢, 博士研究生, 从事土壤生态学研究。E-mail: 595789391@qq.com。通信作者: 俞元春, 教授, 博士生导师, 从事森林土壤、土壤污染与修复研究。E-mail: ycyu@njfu.edu.cn

近几十年来,中国人工林迅速发展,逐步替代天然林成为工业木材的主要供应源。《第8次全国森林资源清查报告》^[1]显示:中国现有人工林面积 $6.933 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占有林地面积的64%,林地面积居世界首位。人工林蓄积 $24.830 \times 10^8 \text{ m}^3$,占森林蓄积的17%。人工林面积、蓄积增量分别占有林地面积、蓄积增量的78%、37%,人工林对中国森林资源增长的贡献明显。报告指出:中国人工林年均采伐 $1.550 \times 10^8 \text{ m}^3$,比上次清查增加了 $3.221 \times 10^7 \text{ m}^3$,采伐量占全国森林采伐量的46%,比上次清查提高了7%,采伐比例持续上升。然而,由于长期的纯林化连栽和掠夺式经营,人工林生态系统的脆弱性愈加明显,接连出现了土壤退化、生物多样性减少、生产力降低、生态系统稳定性下降等复杂的生态问题,人工林土壤肥力退化问题受到广泛关注。土壤退化被首次报道是在19世纪初,又被称作“地力衰退”和“第2代效应”^[2]。人工林土壤肥力退化是指营林过程中,人为不利因素干扰引起土壤属性的改变而无法实现其对人类有价值的特定功能,主要表现为土壤理化性质恶化及其环境调节能力的持续降低、土壤微生物数量减少、营养元素缺失、生物和森林生产力下降等。杉木 *Cunninghamia lanceolata* 的地理分布范围为 $19^{\circ}30' \sim 34^{\circ}03' \text{ N}$, $101^{\circ}30' \sim 121^{\circ}53' \text{ E}$,遍及中国亚热带地区18个省(市、自治区),是中国主要的速生工业用材和造林灭荒优势树种,具生长快、材质好、用途广等特点。目前,栽植面积占全国人工林面积的30%以上^[3],在中国林业生产和森林生态系统中发挥着重要作用。为此,本研究对近几年的杉木研究成果进行综述,阐述了杉木人工林土壤肥力质量的演变趋势及维护措施,为实现杉木人工林的可持续高产和维持人工林生态系统稳定提供参考。

1 中国杉木人工林土壤肥力概况

近年来,桉树 *Eucalyptus*、杨树 *Populus*、落叶松 *Larix gmelinii*、杉木等人工林在经营过程中出现土壤质量退化、生产力降低等问题,人工林土壤肥力变化受到广泛关注。本研究对1989–2018年发表的50余篇中国杉木主要产区土壤肥力相关论文数据综合分析后发现:中国杉木人工林主产区不同程度出现了土壤退化,土壤肥力朝着持续降低的方向发展(表1)。

表1 杉木人工林主产区土壤肥力质量基本情况

Table 1 Basic situation of soil fertility in main production area of *C. lanceolata* plantations

省份	林龄/a	平均树高/m	平均胸径/cm	土壤类型	土壤肥力	代表性参考文献
福建	14~17	12.75	16.76	山地红壤	下降	[4]
湖南	14	11.23	12.86	山地黄壤	下降	[5]
江西	7~49	13.68	17.24	丘陵红壤	下降	[6]
浙江	9~20	8.01	9.48	山地黄壤	下降	[7]
广西	4~6	—	—	赤红壤	下降	[8]
广东	15	8.11	11.20	赤红壤	下降	[9]
贵州	18	14.18	16.02	黄壤	下降	[10]
河南	12	—	—	黄棕壤	下降	[11]

说明:表中土壤类型按中国农业农村部土壤分类学分类;“—”代表无数据

2 杉木人工林土壤肥力质量变化趋势

2.1 土壤物理性质

土壤作为人工林根系伸展、固持的一种介质,它的物理性质决定了土壤的基本性状和运动过程,影响着土壤与人工林之间的物质和能量交换,对维持、调节和控制林地生态系统的稳定至关重要。研究表明:杉木生长状况与土壤物理性质变化有很强的联系,尤其以表层土(0~20 cm)的变化最为明显。王丹等^[5]研究发现:不同生长发育阶段(幼龄、中龄、近熟、成熟、过熟)杉木人工林的土壤孔隙度、紧实度、全蓄水量、田间持水量都达到显著差异水平($P < 0.05$)。俞元春等^[12]研究发现:杉木人工林2、3代林土壤容重较1代林分别增加了43.48%和52.17%;在土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均呈下降趋势的指标中,2代林相对于1代下降了23.12%、23.33%和22.30%,3代林相对于1代则下降了27.74%、43.91%和33.02%。王刚^[13]研究不同林龄(8、11、15 a)杉木人工林后发现:随着杉木林龄增

加,林地土壤容重增加 5.0%~8.5%、含水量持续上升 2.1%~3.3%,土壤孔隙度下降 2.4%~3.5%,土壤变得紧实,容蓄能力变小。盛炜彤等^[14]在对不同立地条件(立地指数为 12、14、16)的杉木人工林林地土壤调查后发现,随着栽植代数的增加,不同立地条件下的杉木人工林呈土壤容重上升、毛管持水量及非毛管孔隙度下降,土壤变得坚实,杉木人工林土壤物理性质逐渐变劣。

与此同时,也有学者持不同意见。胡慧蓉等^[6]调查了云南不同林龄(6、13、18 a)杉木人工林土壤理化性质后指出:营造杉木人工林之后,土壤含水量上升,容重降低,紧实度减小,土壤物理性质逐步得到改善,这与高志强等^[15]的研究结论相类似。陈欣凡等^[16]、李晨晨等^[17]则指出:相对于杉木纯林,针阔混交、林农复合经营更能有效降低林地土壤容重、改善土壤通气状况和土壤物理性质。

2.2 土壤化学性质

从生态系统功能的角度来看,土壤肥力很大程度上取决于土壤的养分循环和平衡,这与土壤的化学性质紧密相关。长期连续营造杉木人工林对土壤养分周转能力、土壤养分含量及土壤 pH 产生负面影响。已有研究显示:杉木人工林连栽后的 2 代林土壤养分周转能力下降,养分丢失比率为 1 代林的 200%,养分积累率不足 1 代林的 60%^[18]。随着林龄的增加,杉木人工林的年养分吸收和养分利用效率(氮除外)增加,生态系统养分产量下降,土壤养分输出超过了各龄期林分的投入,土壤净养分损失增加,氮、磷、钙等净养分流失显著^[19]。王清奎等^[20]研究表明:福建来周林场杉木人工林随着连栽次数增加,林地土壤可溶性有机碳(DOC)和可溶性有机氮(DON)、全氮(TN)、全钾(TK)、铵态氮(NH₄⁺)、速效钾(AK)以及可溶性有机质(DOM)等均呈递减的变化趋势,土壤肥力质量逐代降低。盛炜彤等^[14]调查了福建南平杉木人工林后发现:连栽后的 2、3 代林与 1 代林相比,速效磷(AP)、碱解氮(AN)含量平均降幅达 20%~30%;铜、锌等微量元素含量也呈递减趋势;土壤有机质(SOM)在 2 代林中有所降低,2、3 代林土壤中的胡敏酸含量及土壤腐殖化系数均低于 1 代林,连栽后土壤肥力下降趋势明显。王刚^[13]在调查江西景德镇枫树山林场内不同栽植代数杉木人工林时发现:连栽后林地土壤有机质、氮(N)、磷(P)、钾(K)含量以及钙离子(Ca²⁺)和镁离子(Mg²⁺)交换量均呈下降的变化趋势。然而,也有学者持不同的观点。张志才^[9]对福建洋口林场连栽杉木林土壤肥力调查发现:2 代杉木林土壤化学性质与 1 代林相比无显著差异。唐健等^[4]对广西大桂山林场 1、2 代杉木人工林土壤有机质、全氮含量等 15 个指标综合分析后指出:2 代幼龄林土壤肥力高于 1 代幼龄林,连栽并没有引起林地土壤肥力下降。研究结论的不同可能由于不同的杉木种源和区域环境条件以及经营管理方式的差别,也可能是不同地域杉木的林下植物群落组成、微生物种类、根际分泌物等环境因子的差异,从而导致土壤养分储量及有效性不同。关于土壤 pH,众多研究均显示杉木连栽会导致土壤 pH 降低,引起土壤酸化^[4,13-14]。

此外,凋落物的分解、养分归还量的平衡对杉木林地土壤养分循环也具有重要影响。研究发现:随着杉木人工林连栽次数增加,杉木林分养分的年归还量、年吸收量以及归还吸收比均呈逐代下降的变化趋势,养分循环速效减缓,多代连栽不利于杉木林地肥力的恢复^[21]。随着杉木林龄的增长,养分年积累量显著降低,年归还量、年吸收量和归还吸收比逐渐增加。因此,可采取杉木林早期施肥、适当延长轮伐周期等手段来补偿杉木早期生长所消耗养分,以维持土壤养分的动态平衡。

2.3 土壤微生物

土壤微生物作为土壤隐形的管理者,直接参与土壤的形成、有机物降解和土壤养分循环等过程,对维持土壤肥力质量至关重要。杉木人工纯林连栽对土壤质量变化及土壤微生物种群有较大的影响,容易改变土壤微生物区系,导致土壤肥力退化。研究发现:杉木人工林连栽将会加剧杉木根际土壤微生态失衡,明显降低土壤微生物的多样性和代谢活性,造成了土壤营养元素的耗竭^[8]。另外,刘丽等^[22]研究发现:杉木第 3 代人工林土壤真菌群落结构相较于天然林变化剧烈,出现了核盘菌属 *Sclerotinia sclerotiorum*、球壳菌属 *Mycosphaerella* sp. 和小皮伞菌属 *Marasmius* sp. 等致病菌群。这些菌群的存在是引起林地土壤退化和肥力下降的主要诱因之一。李延茂等^[23]在调查连栽杉木根际土壤微生物多样性后指出:随着连栽代数增加,真菌 DGGE 图谱带减少,生物多样性降低,病原真菌和产毒真菌数量明显增加,这可能是导致林地土壤肥力下降的直接原因。杉木连栽后,土壤微生物总数下降,土壤生物活性降低^[24]。除此之外,杜国坚等^[25]研究了杉木混交林后发现:杉阔混交林土壤微生物数量要比杉木纯林高

7.19%~41.31%。石丽娜等^[26]指出：近自然模式经营杉木林(老龄林、萌芽林)更利于土壤微生物生存与发展,可有效改善土壤肥力质量。

2.4 土壤酶活性

土壤酶活性不仅反映了土壤微生物状态,同时又综合了土壤理化条件和营养物质的有效性等相关信息,因此常被用作土壤处理对土壤肥力影响研究的“传感器”,成为衡量土壤退化程度的关键指标之一。杉木人工林的土壤酶活性随着栽植代数增加呈下降的趋势,土壤肥力效果与土壤酶活性密切相关,多种土壤酶相互作用对土壤养分产生影响。俞新妥等^[7]对杉木连栽林和不同混交林土壤酶活性研究发现:在垂直分布上,土壤酶活性从强到弱均表现为0~20、20~40、40 cm以下,且连栽多代杉木林地土壤酶活性下降幅度更大。此外,杉木混交林各层次土壤酶活性显著高于连栽多代杉木纯林。秦国宣等^[27]调查了2代杉木人工林土壤酶活性与土壤肥力的关系后发现:杉木人工林土壤酶活性随着林分年龄增长呈递减趋势,且自然恢复的杉木林地土壤酶活性显著高于林龄为20 a的2代人工林。

与此同时,杉木连栽对不同类型的土壤酶活性影响也不同。罗飞等^[28]在研究酸雨区不同林龄杉木人工林土壤酶活性季节动态基础上,分析了土壤养分与酶活性的相关关系后发现:多酚氧化酶(PPO)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)活性从强到弱表现为成熟林、中龄林、幼龄林,蔗糖酶活性随林龄增加表现出先升后降的变化趋势。随着林龄的增加,土壤pH逐渐降低导致土壤酶活性大幅下降,凋落物分解速度变缓,全氮、全磷、碱解氮、速效磷、速效钾、土壤有机质含量显著降低,土壤肥力下降。

杉木连栽引起的土壤有机质减少也往往伴随着土壤酶活性的下降;间伐将提高杉木林土壤酶活性并持续改善土壤肥力。胡亚林等^[29]研究发现:杉木人工林替代天然次生阔叶林后表层土壤有机碳下降44.87%,土壤酸度增加,全氮、全磷等养分减少,土壤酶活性和土壤呼吸强度显著降低,表层土壤质量恶化。林地土壤有机质减少是土壤养分降低、酶活性下降的驱动因素之一。丁波等^[30]通过研究不同间伐强度对18年生杉木人工林土壤酶活性的影响认为:间伐可显著提高土壤过氧化氢酶、碱性磷酸酶(ALP)、脲酶和蔗糖酶的活性,且在3 a后的综合表现表明:这类土壤酶活性的提升可有效改善土壤肥力质量。

2.5 化感作用

化感作用是一种存在于大自然和生态系统管理中的重要生态机制。有害化感物质是造成杉木人工林土壤肥力质量下降的重要因子之一。陈龙池等^[10-11]研究发现:杉木凋落物所释放的香草醛等酚类物质积累到一定浓度时对幼龄杉木根系具有化学毒害效果,严重影响根部细胞对土壤中 NO_3^- 、 HPO_4^{2-} 、 NH_4^+ 及 SO_4^{2-} 离子的交换吸收,同时促使大量氮素被分配至根部,茎、叶中氮素分配严重不足,导致杉木长期处于养分亏缺状态,降低了杉木生产力。XIA等^[31]在调查化感物质对土壤微生物的影响时发现:长期单一栽植杉木林地土壤中含有大量的化感物质环二肽,且2代林的含量明显高于1代林。该物质不仅对杉木根系有直接的毒害作用,严重抑制了根系的生长,同时还会间接改变土壤微生物群落组成,最终引起林地土壤生态失衡,导致土壤质量逐渐恶化。HUANG等^[32]对杉木根桩分解过程中酚类物质化感效应的研究表明:微生物在分解根桩的过程中会向周围土壤释放多种类型的次生代谢产物,包括酚类物质,当酚类物质在土壤中积累到一定浓度时会抑制杉木根和叶的生长,降低水分利用效率,破坏土壤微生物生态循环系统,导致土壤养分流失、肥力下降。

3 杉木人工林土壤肥力维持研究进展

3.1 科学轮作经营

轮作能有效避免长期经营单一纯林所引起的土壤养分耗竭,有助于恢复林地土壤功能,有效提升土壤肥力质量,防止土壤肥力退化。张鼎华等^[33]调查杉木、马尾松 *Pinus massoniana* 人工林轮作对土壤肥力和林木生长的影响发现:轮作过程中后茬林地土壤微生物生物量大幅增加,酶活性明显增强,有毒化感物质含量降低,土壤pH上升,林地土壤肥力改善效果良好,林分生产力明显提高。张剑等^[34]指出:杉木与火力楠 *Michelia macclurei* 轮作显著增加了土壤微生物量碳、土壤微生物熵、易氧化有机碳和碳库管理指数,提高了土壤微生物对底物的利用效率。在今后的杉木轮作研究中,应合理利用部分树种间协

同促进的生物学特性，选择合适的树种，避免有害化感作用，确定正确的轮作顺序以及合理的轮作年限，构建合理的轮作系统，最大限度发挥轮作系统的生态效果。

3.2 混交复合造林

通常情况下，混交林凋落物比针叶纯林要高很多，土壤中微生物群落组成也更复杂，酶活性也更高，因此，凋落物分解和速效养分的释放也将更快。混交造林更有利于降低土壤养分损失，有助于人工林土壤肥力的长期维持。曹小玉等^[35]对不同林龄（幼龄林、中龄林、近熟林）的杉木人工林补栽栎树 *Koelreuteria bipinnata*、鹅掌楸 *Liriodendron tulipifera* 等阔叶树种调查发现：混交改造后的 3 个林龄杉木人工林土壤养分含量均有提高，土壤肥力质量得到改善。田晓等^[36]运用 FORECAST 模型模拟研究了桢楠 *Phoebe zhenan* 与杉木混交林未来 300 a 内林分的时空演变后发现：往杉木人工林内引入一定数量的桢楠可有效遏止土壤退化。当楠-杉混交比例为 3 : 1 时，森林可获得蓄积量最高，土壤肥力维持效果最好。WANG 等^[37]研究杉木纯林中补植阔叶树后发现：土壤全氮、硝态氮 (NO_3^-)、全磷和速效磷等养分增加，土壤微生物活性增强，土壤肥力恢复效果明显。此外，黄云鹏^[38]在研究杉木-红锥 *Castanopsis hystrix* 混交林时发现：不同混交比例的人工林林分生产力、土壤肥力均有显著差异。土壤全氮、铵态氮 (NH_4^+)、速效磷、土壤有机质随着杉木比例降低而显著增加，杉木-红锥混交比为 7 : 3 时林地土壤肥力提升效果最好。因此，混交复合造林，尤其与阔叶树混交是杉木人工林土壤肥力质量维持的有效手段。

3.3 调节林分密度

合理调节林分密度可促进林下植被的发展，增加林地生物多样性，改善群落结构，提高生态功能稳定性，而且对维护林地土壤质量，促进养分循环，维持生产力方面具有重要作用。已有研究发现：中度间伐后林下植物种类、林下死地被植物量增加，土壤温度上升，死地被物分解速度加快；重度间伐后表层土壤 (0~10、10~20 cm) 容重下降，含水量和孔隙度增加，土壤全氮、碱解氮、锌含量上升，并且不同程度间伐对土壤肥力质量均有积极影响^[39]。另外，随着时间推移，间伐抚育在 1~2 a 内林下植被的组成、多样性和生物量相对于杉木人工纯林有显著的提高，间伐林土壤性状明显改善，林分蓄积量并未降低^[40]。还有研究发现：适度间伐后的林分环境和光环境得到改善，林下植被得以发展，土壤微生物群落组成更加稳定。其中，间伐率为 33.3% (1 200 株· hm^{-2}) 时土壤肥力提升效果最为显著，有利于杉木人工林土壤肥力质量的维持^[30]。此外，间伐后林下植被的生长导致土壤含水量上升，促进了可溶性有机碳的溶解，可溶性有机碳含量上升使得 β -1,4-葡萄糖苷酶 (β -G)、 β -1,4-N-乙酰葡萄糖氨糖苷酶 (NAG) 活性增强，加速了土壤有机质的分解和养分的释放，土壤肥力因此提升^[41]。与此同时，减少林分密度有助于改善磷的内部循环，提高土壤速效磷含量，满足树体营养需求^[42]。综上所述，林分密度是影响杉木人工林养分循环的关键因子之一，合理调节林分密度可增加杉木人工林林地生态系统的稳定性，有助于林地土壤肥力质量的维持。其中，中度间伐 (25%~30%) 后土壤肥力质量的维持效果最好，有利于杉木人工林的经营。

3.4 合理补偿肥力

肥力补偿能有效补充土壤养分，改善土壤质量，提高林分生产力。杉木人工林林地肥力补偿应在营养诊断基础上，结合林地土壤养分状况，以自然补偿为主，人为补偿为辅，做到缺素补偿、适量补偿。研究显示：施肥可有效补充土壤养分，增强土壤酶活性，提升土壤肥力水平，缓解杉木缺素病症^[43]。与此同时，不同林龄、不同种源的杉木对肥料的需求也不同。牛宁^[44]利用 DRIS 营养诊断法对 3 代种子园后代杉木植株养分元素诊断后发现：杉木植株中氮、磷、钾养分最佳比值区间为 $r_{\text{P/N}}=0.145\ 8\pm 0.026\ 1$ ， $r_{\text{K/N}}=0.932\ 4\pm 0.044\ 4$ ， $r_{\text{K/P}}=6.643\ 2\pm 0.883\ 3$ ，杉木对氮、磷、钾三大营养元素的需求从大到小表现为钾、磷、氮。WANG 等^[45]研究发现：在杉木幼龄期施氮、磷肥后，土壤微生物生物量减少，SOM 分解速度上升，土壤养分有效性增加。陈胜进等^[46]研究指出：连栽后土壤 pH 逐渐降低，施肥可有效改善这种状况。同时，在杉木林幼龄阶段增施磷肥可促进植株的营养生长，中龄阶段补偿氮、磷、钾、锌可显著提高蓄积量，近熟期补偿铜和锌可有效提高林木养分利用效率，缓解前期养分耗竭现象。除此之外，杉木早期耗尽土壤养分保持增长，并随着林龄增加提高土壤养分的利用效率，减少对土壤的依赖。杉木的养分归还量、养分利用效率、养分周转时间和归还比率也随着林龄的增加而增加^[47]。

3.5 可持续森林管理

可持续森林管理 (sustainable forest management, SFM) 是指在管理和利用森林和林地过程中, 保持其现有和未来的生物多样性、生产力、再生能力、活力及其潜力, 以实现在地区、国家和全球范围内的相关生态、经济和社会功能, 并且不对其他生态系统造成损害^[48]。人工林替代天然林后, 人为因素的增加, 加剧了对森林生态系统的干扰, 打乱了原有森林生态位, 破坏了林地生物地化循环, 给土壤生态系统带来一定的负面影响。因此, 开展可持续管理, 采用近自然模式营造和管理人工林, 造林时避免破坏性炼山、整地等不合理的生产行为, 营造林分结构复杂、生物多样性丰富稳定的森林生态系统, 合理延长轮伐周期, 注重择伐, 限制皆伐, 注重养分的自然补偿, 避免土壤养分过度流失。通过上述措施, 协调好林地系统与其他生态系统的关系, 既能保证杉木人工林持续的木材产量, 又可以维持人工林地的土壤生态功能。

4 展望

目前, 人工林土壤肥力维持是全世界所面临的重点难点问题, 涉及土壤、微生物、生物化学、植物生理等众多领域, 无论采取何种解决方式和手段, 现阶段杉木人工林土壤肥力维持都面临诸多困难。针对现存问题, 未来关于杉木人工林土壤肥力质量维持的研究重点如下: ①土壤退化是气候变化的主导因素之一, 而气候变化对人工林土壤退化的影响也是亟待解决的问题。未来可运用科学的监测手段, 以对气候变化敏感的土壤微生物为“传感器”, 探索全球气候变化对杉木人工林土壤微生物群落的组成、多样性以及功能的时空演变及其对土壤肥力变化的影响。②目前, 关于杉木人工林的研究较多, 但多数研究还是建立在以“空间换时间”的基础上, 缺乏长期系统的跟踪监测, 而土壤变化是长期且复杂的过程。今后可在杉木人工林中心产区建立长期的定位研究站, 对土壤养分的释放、活化和植物对养分的吸收、运输、储存、归还等方面展开系统调查, 为杉木人工林的土壤肥力质量的维持提供理论依据。③大气氮沉降的增加是全球气候变化的主要驱动因素, 氮素作为森林和土壤中最主要的营养元素之一, 其沉降不可避免地对森林生态系统产生影响。目前, 氮沉降对土壤微生物组成、生物量及呼吸作用的影响仍不清楚。因此, 有必要研究大气氮的沉降尺度及其与林地生态系统的交互作用对土壤微生物和土壤酶活性的影响, 调查氮沉降对土壤肥力变化的影响, 为杉木人工林土壤肥力质量维持提供参考。④当前, 虽然已有较多研究显示杉木人工林施肥可改善土壤质量, 然而却很少有研究区分化肥和有机肥对杉木人工林土壤作用效果的不同, 也并未探讨过度施肥是否会导致杉木人工林土壤板结和酸化等问题。这有待进一步的研究去论证。

5 参考文献

- [1] 国家林业局. 第8次全国森林资源清查结果[J]. 林业资源管理, 2014, 13(1): 1-2.
- [2] EVANS J. Long-term productivity of forest plantation-status in 1990[C]//The International Union of Forest Research Organizations. *The 19th World Congress Proceedings*. Montreal: [n. s.], 1990, 1: 165-180.
- [3] YU Yuanchun, YANG Jingyu, ZENG Shucui, et al. Soil pH, organic matter, and nutrient content change with the continuous cropping of *Cunninghamia lanceolata* plantations in South China [J]. *J Soils Sediment*, 2017, 17(9): 2230-2238.
- [4] 唐健, 覃祚玉, 王会利, 等. 广西杉木主产区连栽杉木林地土壤肥力综合评价[J]. 森林与环境学报, 2016, 36(1): 30-35. TANG Jian, QIN Zuoyu, WANG Huili, et al. Assessment of soil fertility of continuous plantation of *Cunninghamia lanceolata* in main producing regions in Guangxi [J]. *J For Environ*, 2016, 36(1): 30-35.
- [5] 王丹, 戴伟, 王兵, 等. 杉木人工林不同发育阶段土壤性质变化的研究[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(3): 59-63. WANG Dan, DAI Wei, WANG Bing, et al. Changes of soil properties at different developmental stages of Chinese fir plantations [J]. *J Beijing For Univ*, 2010, 32(3): 59-63.
- [6] 胡慧蓉, 郭安, 邓光葵. 杉木种植对土壤理化性质的影响[J]. 云南林业科技, 2001(3): 21-23. HU Huirong, GUO An, DENG Guangkui. Effect of *Cunninghamia lanceolata* plantation on physical and chemical properties of soil [J]. *Yunnan For Sci Technol*, 2001(3): 21-23.
- [7] 俞新妥, 张其水. 杉木连栽林地混交林土壤酶的分布特征的研究[J]. 福建林学院学报, 1989, 9(3): 256-262. YU Xintuo, ZHANG Qishui. Distributive regularities of soil enzyme activities in the woodland of various mixtures after

- Chinese fir replanting [J]. *J Fujian For Coll*, 1989, **9**(3): 256 – 262.
- [8] WU Zeyan, LI Jianjuan, ZHENG Jie, *et al.* Soil microbial community structure and catabolic activity are significantly degenerated in successive rotations of Chinese fir plantations [J]. *Sci Rep*, 2017, **7**(1): 6691. doi: 10.1038/s41598-017-06768-x.
- [9] 张志才. 第 1 代与第 2 代 9 年生杉木林分生产力及土壤肥力比较 [J]. 福建林业科技, 2012, **39**(3): 83 – 87.
ZHANG Zhicai. Comparison of productivity and soil properties between the first and second generations of 9-year-old *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. *J Fujian For Sci Tech*, 2012, **39**(3): 83 – 87.
- [10] 陈龙池, 廖利平, 汪思龙. 香草醛对杉木幼苗养分吸收的影响 [J]. 植物生态学报, 2003, **27**(1): 41 – 46.
CHEN Longchi, LIAO Liping, WANG Silong. Effect of vanillin on nutrient absorbency of Chinese fir seedlings [J]. *Acta Phytocol Sin*, 2003, **27**(1): 41 – 46.
- [11] 陈龙池, 廖利平, 汪思龙, 等. 酚类物质对杉木幼苗¹⁵N 养分吸收、分配的影响 [J]. 植物生态学报, 2002, **26**(5): 525 – 532.
CHEN Longchi, LIAO Liping, WANG Silong, *et al.* Effect of phenolics on ¹⁵N nutrient absorption and distribution of *Cunninghamia lanceolata* [J]. *Acta Phytocol Sin*, 2002, **26**(5): 525 – 532.
- [12] 俞元春, 邓西海, 盛炜彤, 等. 杉木连栽对土壤物理性质的影响 [J]. 南京林业大学学报, 2000, **24**(6): 36 – 40.
YU Yuanchun, DENG Xihai, SHENG Weitong, *et al.* Effects of continuous plantation of Chinese fir on soil physical properties [J]. *J Nanjing For Univ*, 2000, **24**(6): 36 – 40.
- [13] 王刚. 杉木人工林土壤肥力指标及其评价 [D]. 南京: 南京林业大学, 2008.
WANG Gang. *Index of Soil Fertility and Evaluation of Chinese Fir Plantation* [D]. Nanjing: Forestry University, 2008.
- [14] 盛炜彤, 杨承栋, 范少辉. 杉木人工林的土壤性质变化 [J]. 林业科学研究, 2003, **16**(4): 377 – 385.
SHENG Weitong, YANG Chengdong, FAN Shaohui. Variation of soil properties of Chinese fir plantation [J]. *For Res*, 2003, **16**(4): 377 – 385.
- [15] 高志强, 朱启红. 杉木林地土壤理化性质研究 [J]. 农机化研究, 2007(6): 143 – 145.
GAO Zhiqiang, ZHU Qihong. The soil physico-chemistry properties for Chinese fir plantations [J]. *J Agric Mech Res*, 2007(6): 143 – 145.
- [16] 陈欣凡, 林国伟, 洪滔, 等. 不同林龄杉木千年桐混交林与纯林土壤理化性质特征比较 [J]. 热带作物学报, 2017, **38**(9): 1660 – 1665.
CHEN Xinfan, LIN Guowei, HONG Tao, *et al.* Soil physical and chemical properties of *Cunninghamia lanceolata*-*Aleurites montana* mixed forest and *Cunninghamia lanceolata* pure forest with different age [J]. *Chin J Trop Crops*, 2017, **38**(9): 1660 – 1665.
- [17] 李晨晨, 周再知, 梁坤南, 等. 不同林药复合经营模式对杉木生态公益林土壤理化性质的改良效果 [J]. 浙江农林大学学报, 2018, **35**(1): 51 – 59.
LI Chenchen, ZHOU Zaizhi, LIANG Kunnan, *et al.* Physical and chemical properties of ecological forest soils using different agroforestry patterns of Chinese fir with medicinal plants [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2018, **35**(1): 51 – 59.
- [18] 田大伦, 沈燕, 康文星, 等. 连栽第 1 代和第 2 代杉木人工林养分循环的比较 [J]. 生态学报, 2011, **31**(17): 5027 – 5032.
TIAN Dalun, SHEN Yan, KANG Wenxing, *et al.* Characteristics of nutrient cycling in first and second rotations of Chinese fir plantations [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(17): 5027 – 5032.
- [19] MA Xiangqing, HEAL K V, LIU Aiqin, *et al.* Nutrient cycling and distribution in different-aged plantations of Chinese fir in southern China [J]. *For Ecol Manage*, 2007, **243**(1): 61 – 74.
- [20] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜. 杉木人工林土壤可溶性有机质及其与土壤养分的关系 [J]. 生态学报, 2005, **25**(6): 1329 – 1305.
WANG Qingkui, WANG Silong, FENG Zongwei. A study on dissolved organic carbon and nitrogen nutrients under Chinese fir plantation relationships with soil nutrients [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25**(6): 1329 – 1305.
- [21] 刘爱琴, 范少辉, 林开敏, 等. 不同栽植代数杉木林养分循环的比较研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2005, **11**(2): 273 – 278.
LIU Aiqing, FAN Shaohui, LIN Kaimin, *et al.* Comparison on nutrient cycling in different generation plantations of Chinese fir [J]. *J Plant Nutr Fert*, 2005, **11**(2): 273 – 278.
- [22] 刘丽, 徐明恺, 汪思龙, 等. 杉木人工林土壤质量演变过程中土壤微生物群落结构变化 [J]. 生态学报, 2013, **33**(15):

4692 – 4706.

LIU Li, XU Mingkai, WANG Silong, *et al.* Effect of different *Cunninghamia lanceolata* plantation soil qualities on soil microbial community structure [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(15): 4692 – 4706.

- [23] 李延茂, 胡江春, 张晶, 等. 杉木连栽土壤微生物多样性的比较研究[J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(7): 1275 – 1278.
LI Yanmao, HU Jiangchun, ZHANG Jing, *et al.* Microbial diversity in continuously planted Chinese fir soil [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, **16**(7): 1275 – 1278.
- [24] YANG Yusheng, LIU Chunjiang, KUTSCH W L, *et al.* Impact of continuous Chinese fir monoculture on soil [J]. *Pedosphere*, 2004, **14**(1): 117 – 124.
- [25] 杜国坚, 黄天平, 张庆荣, 等. 杉木混交林土壤微生物及生化特征和肥力[J]. *浙江林学院学报*, 1995, **12**(4): 347 – 352.
DU Guojian, HUANG Tianping, ZHANG Qingrong, *et al.* Studies on soil microorganisms and biochemical properties in mixed forests of Chinese fir [J]. *J Zhejiang For Coll*, 1995, **12**(4): 347 – 352.
- [26] 石丽娜, 林开敏, 陈梦瑶, 等. 近自然杉木林经营对土壤微生物量碳氮特征的影响[J]. *土壤通报*, 2018, **49**(1): 112 – 118.
SHI Lina, LIN Kaimin, CHEN Mengyao, *et al.* Effect of near-natural management of Chinese fir plantation on characteristics of soil microbial biomass carbon and nitrogen [J]. *Chin J Soil Sci*, 2018, **49**(1): 112 – 118.
- [27] 秦国宣, 方晰, 田大伦, 等. 湖南会同第2代杉木人工林地土壤酶活性[J]. *中南林业科技大学学报*, 2008, **28**(2): 1 – 7.
QIN Guoxuan, FANG Xi, TIAN Dalun, *et al.* Soil enzyme activity of the second-generation Chinese fir plantation in Huitong County, Hunan Province [J]. *J Central South Univ For Technol*, 2008, **28**(2): 1 – 7.
- [28] 罗飞, 谢书妮, 张海燕, 等. 酸雨区不同林龄杉木林土壤酶活性季节动态[J]. *福建林学院学报*, 2014, **34**(2): 131 – 137.
LUO Fei, XIE Shuni, ZHANG Haiyan, *et al.* Seasonal dynamics of the soil enzyme activities under *Cunninghamia lanceolata* plantations with different tree ages in acid rain area [J]. *J Fujian For Coll*, 2014, **34**(2): 131 – 137.
- [29] 胡亚林, 汪思龙, 颜绍馥, 等. 杉木人工林取代天然次生阔叶林对土壤生物活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(8): 1411 – 1416.
HU Yalin, WANG Silong, YAN Shaokui, *et al.* Effects of replacing natural secondary broad-leaved forest with *Cunninghamia lanceolata* plantation on soil biological activities [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, **16**(8): 1411 – 1416.
- [30] 丁波, 丁贵杰, 赵熙州, 等. 间伐对杉木人工林土壤酶活性及微生物的影响[J]. *林业科学研究*, 2017, **30**(6): 1059 – 1065.
DING Bo, DING Guijie, ZHAO Xizhou, *et al.* Impacts of thinning on soil enzymes activity and microorganisms in *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. *For Res*, 2017, **30**(6): 1059 – 1065.
- [31] XIA Zhichao, KONG Chuihua, CHEN Longchi, *et al.* Allelochemical-mediated soil microbial community in long-term monospecific Chinese fir forest plantations [J]. *Appl Soil Ecol*, 2015, **96**: 52 – 59.
- [32] HUANG Zhiqun, LIAO Liping, WANG Silong, *et al.* Allelopathy of phenolics from decomposing stump-roots in replant Chinese fir woodland [J]. *J Chem Ecol*, 2000, **26**(9): 2221 – 2219.
- [33] 张鼎华, 叶章发, 李宝福. 杉木、马尾松轮作对林地土壤肥力和林木生长的影响[J]. *林业科学*, 2001, **37**(5): 10 – 15.
ZHANG Dinghua, YE Zhangfa, LI Baofu. The effects of rotating plantation on the soil fertility of forest land and the growth of stand [J]. *Sci Silv Sin*, 2001, **37**(5): 10 – 15.
- [34] 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 Jian, WANG Silong, SUI Yanhui, *et al.* Effects of different management practices on soil organic carbon pool under Chinese fir plantation [J]. *Resour Dev Mark*, 2010, **26**(9): 826 – 830.
- [35] 曹小玉, 李际平, 闫文德. 杉木林改造前后的土壤肥力对比分析及综合评价[J]. *土壤通报*, 2016, **47**(5): 1231 – 1237.
CAO Xiaoyu, LI Jiping, YAN Wende. Comprehensive evaluation and variation of soil fertility before and after reconstruction with broadleaved trees in *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. *Chin J Soil Sci*, 2016, **47**(5): 1231 – 1237.
- [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, **36**(1): 122 – 130.
TIAN Xiao, LIU Yuanqiu, WEI Xiaohua, *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 Agric Univ Jiangxi*, 2014, **36**(1): 122 – 130.
- [37] WANG Qingkui, WANG Silong. Soil microbial properties and nutrients in pure and mixed Chinese fir plantations [J]. *J For Res*, 2008, **19**(2): 131 – 135.
- [38] 黄云鹏. 杉木与红锥混交林生长量及混交比例的研究[J]. 福建林学院学报, 2008, **28**(3): 271 – 275.
HUANG Yunpeng. Study on growth increment and mixed ratio of a mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Castanopsis hystrix* [J]. *J Fujian For Coll*, 2008, **28**(3): 271 – 275.
- [39] CHENG Xiangrong, YU Mukui, WANG G G. Effects of thinning on soil organic carbon fractions and soil properties in *Cunninghamia lanceolata* stands in eastern China [J]. *Forests*, 2017, **8**(6): 198.
- [40] ZHOU Lili, CAI Liping, HE Zongming, *et al.* Thinning increases understory diversity and biomass, and improves soil properties without decreasing growth of Chinese fir in southern China [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2016, **23**(23): 24135 – 24150.
- [41] 杨洋, 王继富, 张心昱, 等. 凋落物和林下植被对杉木林土壤碳氮水解酶活性的影响机制[J]. 生态学报, 2016, **36**(24): 8102 – 8110.
YANG Yang, WANG Jifu, ZHANG Xingyu, *et al.* Mechanism of litter and understory vegetation effects on soil carbon and nitrogen hydrolase activities in Chinese fir forests [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36**(24): 8102 – 8110.
- [42] FANG Xiangmin, ZHANG Xiulan, ZONG Yingying, *et al.* Soil phosphorus functional fractions and tree tissue nutrient concentrations influenced by stand density in subtropical Chinese fir plantation forests [J]. *PLoS One*, 2017, **12**(10): e0186905. doi: 10.1371/journal.pone.0186905.
- [43] 马亚娟. 施肥对杉木养分吸收特性及其碳、氮、磷生态化学计量规律的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
MA Yajuan. *Effects of Fertilization on Nutrient Absorption Characteristics and the Law of C, N, P Ecological Stoichiometry of Cunninghamia lanceolata* [D]. Yanglin: Northwest A&F University, 2015.
- [44] 牛宁. 优良杉木半同胞家系配方施肥与营养诊断研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
NIU Ning. *Research on Excellent Half Sibs Family of Chinese Fir About Formulated Fertilization and Nutrient Diagnosis* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013.
- [45] WANG Qingkui, ZHANG Weidong, SUN Tao, *et al.* N and P fertilization reduced soil autotrophic and heterotrophic respiration in a young *Cunninghamia lanceolata* forest [J]. *Agric For Meteorol*, 2017, **232**: 66 – 73.
- [46] 陈胜进, 叶代全, 吕红翠, 等. 铜锌肥对不同林龄杉木生长及土壤养分的影响[J]. 森林与环境学报, 2017, **37**(2): 155 – 162.
CHEN Shenjin, YE Daiquan, LÜ Hongcui, *et al.* Effects of Cu and Zn fertilizers on the growth of *Cunninghamia lanceolata* at different forest age and soil nutrients [J]. *J For Environ*, 2017, **37**(2): 155 – 162.
- [47] ZHOU Lili, SHALOM A D, WU Pengfei, *et al.* Biomass production, nutrient cycling and distribution in age-sequence Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations in subtropical China [J]. *J For Res*, 2016, **27**(2): 357 – 368.
- [48] von GADOW K, PUKKALA T, TOMÉ M. *Sustainable Forest Management* [M]. [s.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2000: 11 – 12.