

# 马尾松人工林研究现状及展望

邓伦秀<sup>1,2</sup>, 李茂 (1. 中国林业科学研究院, 北京 100091; 2. 贵州省林业科学研究院, 贵州贵阳 550011)

**摘要** 在概述全球人工林资源分布状况和我国人工林资源在世界所处地位的基础上, 系统地综述了马尾松人工林在遗传改良、立地选择、整地、施肥、密度等营林管理措施方面的研究成效; 针对马尾松人工林生产力和生态方面存在的问题, 提出下一阶段马尾松人工林经营的目标和方向。

**关键词** 马尾松; 人工林; 研究现状; 展望

中图分类号 S725.7 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2009)07-02968-04

## The Research Present Situation and Prospects on the *Pinus massoniana* Plantation

DENG Lunxiu et al (Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091)

**Abstract** The resource distribution of artificial forests in the world was summarized, and the role of china's artificial forests in the world was discussed firstly. Then, A comprehensive discussion on the research achievement of the artificial forests of *Pinus massoniana* Lamb. was conducted, including the genetic improvement, site selection, soil preparation, fertilization, planting density, and so on. According to the existing problems in the aspects of productivity and ecology, the objectives and directions for the future development of the artificial forests of *Pinus massoniana* Lamb. were proposed.

**Key words** *Pinus massoniana* Lamb.; Plantation; Present situation; Prospect

全球经济一体化进程的加快, 为满足人类社会物质文化生活水平不断增长的需求, 长期过度开发森林生产木材和林产品, 导致森林面积在短时间内锐减, 各种生态状况日趋恶化, 土地沙化、湿地减少、森林火灾、森林病虫害, 生物多样性遭受严重破坏。全球森林资源的保护与发展越来越受到国际组织、各国政府及社会公众的广泛关注。全球森林资源下降是人工林快速发展的直接动力, 人工林能提供大量的木材, 缩短经营周期, 解决森林资源不断减少的压力, 同时能缓解当前国际上天然林保护难度大的问题。

马尾松(*Pinus massoniana*) 是我国松属树种中分布最广的一种。其自然分布区横跨我国东部(湿润)亚热带的北、中、南3个亚带, 地理位置 $102^{\circ}10' \sim 122^{\circ}21'$ 、 $21^{\circ}41' \sim 33^{\circ}40' N$ , 东西跨 $18^{\circ}$ 、南北跨 $12^{\circ} N$ , 遍及陕西、河南、安徽、江苏、浙江、福建、江西、湖北、湖南、四川、贵州、广西、广东和云南16个省区。马尾松经济价值高, 是我国南方林区主要的用材树种之一, 立木是重要的产脂树种, 木材广泛应用了建筑、矿柱、坑木和制浆造纸等, 在我国的森林资源总量中占有举足轻重的位置。为此, 笔者综述了马尾松人工林研究现状, 并对其经营前景进行了展望。

## 1 国内外人工林资源现状及开发应用研究

**1.1 世界人工林资源分布现状及开发应用研究** 根据FAO发布的全球森林资源统计资料, 全球人工林面积逐年增加。1990年1.55亿 $hm^2$ , 占森林面积39.63亿 $hm^2$ 的3.91%; 1995年1.8亿 $hm^2$ , 占森林面积34.54亿 $hm^2$ 的5.21%; 2000年1.87亿 $hm^2$ , 占森林面积39.69亿 $hm^2$ 的4.83%。2000年, 亚洲人工林面积居第1, 为1.16亿 $hm^2$ , 占世界人工林总面积的62.0%; 其次是欧洲, 人工林面积为0.32亿 $hm^2$ , 占17.2%; 第3是北美和中美洲, 人工林面积为0.18亿 $hm^2$ , 占9.4%; 第4是南美洲, 人工林面积为0.11亿 $hm^2$ , 占5.6%; 第5是非洲, 人工林面积为0.08亿 $hm^2$ , 占4.3%; 第6是大洋洲, 人工林面积为0.03亿 $hm^2$ , 占1.5%<sup>[1-2]</sup>。新西兰用16.1%面积的

人工林生产出了93%的木材, 智利用17.1%面积生产出95%的木材, 委内瑞拉用0.2%的林地生产出50%的木材, 赞比亚用13.0%的林地生产出50%的本材, 巴西用1.2%的林地生产出60%木材, 澳大利亚用2.0%的林地生产出50%的木材, 阿根廷用2.2%的林地生产出60%的木材<sup>[3]</sup>。目前, 由人工林提供的木材量约占全球木材总量的1/4, 20年后估计占全球木材总产量的1/2, 人工林的地位显得日益重要<sup>[4]</sup>。根据预测, 目前木质资源供给源的22%来自原始林, 34%来自人工林, 但50年后工业用材来自人工林的供给将增加到75%, 而且50%成为速生林, 来自原始林的供给将减少到5%。

人工林发展过程中土壤质量与生产力等问题受到全球的普遍关注。在澳大利亚和新西兰发现第2代人工林生产力显著下降<sup>[5]</sup>, 德国和瑞士观测到第2代挪威云杉林生产力下降, 但是在斯威士兰同一立地辐射松连栽多代后, 绝大部分面积的森林生产力没有下降, 甚至在一些立地上第3代人工林比第2代更加优越, 仅有一小部分面积的人工林生长力下降<sup>[6]</sup>。

**1.2 我国人工林资源现状及开发应用研究** 我国自20世纪60年代开始大力发展人工林以来, 人工林发展速度较快, 造林面积也逐渐增大, 仅2006年人工林造林面积340万 $hm^2$ 。据第6次全国森林资源清查结果, 全国林业用地面积2.85亿 $hm^2$ , 森林面积1.75亿 $hm^2$ , 森林面积居俄罗斯、巴西、加拿大、美国之后, 列第5位; 人均森林面积0.132 $hm^2$ , 不到世界人均水平的1/4, 居世界第134位。森林覆盖率18.21%, 仅相当于世界平均水平的61.52%, 居世界130位。森林蓄积量124.56亿 $hm^3$ , 居俄罗斯、巴西、美国、加拿大、刚果(民)之后, 列第6位; 人均森林蓄积9.41 $m^3$ , 不到世界平均水平的1/6, 居世界第122位; 平均1 $hm^2$ 蓄积84.73 $m^3$ , 相当于世界平均水平的84.86%, 居世界第84位。人工林面积0.53亿 $hm^2$ , 居世界首位; 人工林蓄积15.05亿 $m^3$ 。在人工林的林龄结构组成中, 幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林、过熟林面积分别占33.08%、34.77%、14.00%、12.01%、6.14%。人工林面积较大的优势树种有杉木、马尾松、杨树3个优势树种, 面积合计占全国人工林面积的59.41%, 面积较大的人工林还有桉树、国外松、落叶松、华山松、云南松等<sup>[7-8]</sup>。

基金项目 贵州省科技基础条件平台项目“贵州省林木种质资源基础平台建设[黔科合条P字(2006)4005号]”资助。

作者简介 邓伦秀(1969-), 女, 贵州桐梓人, 在读博士, 高级工程师, 从事林木种质资源方面的研究。

收稿日期 2008-12-15

## 2 马尾松人工林营林管理措施研究现状

**2.1 遗传改良研究成效** 我国从20世纪50年代始开展马尾松遗传改良研究,在地理变异、种源选择、种子园建设、造纸材定向选育、建筑材定向选育、产脂材定向培育、种内变异和遗传等基础研究领域取得了巨大成就和进展。对8年生参试的44个马尾松种源试验确定了40号种源为最佳种源和33个可供采用的优良种源,树高、胸径和材积遗传力较高,分别为40.61%、39.53%和32.79%<sup>[9]</sup>。以单株木材干物质产量为主要评判指标,从9年生的马尾松优树子代试验林70个家系中选出8个建筑材优良家系,选出的优良家系的单株木材干物质产量和材积明显大于群体均值,木材基本密度、通直度和圆满度的平均值也都大于群体均值<sup>[10]</sup>。以单株纤维素产量为主要指标,从9年生的马尾松自由授粉子代试验林105个家系中各选出10个纸浆材优良家系<sup>[11]</sup>。不同种源间产脂量差异较大,培育马尾松采脂林,必须选用良种,采脂胸径应在18径阶以上为宜<sup>[12]</sup>。以产脂力和生长量为选择标准,从20年生高产脂马尾松半同胞家系子代林中选出16个优良家系及22株优良单株,提出采用双刀法采脂可明显提高产脂力<sup>[13]</sup>。

**2.2 立地选择与评价研究** 立地条件好坏对人工林的生长发育及产量和质量起着决定性的作用,立地类型的划分有利于针对不同的营林措施选择不同的立地类型,充分挖掘立地条件与人工林的生产潜力,达到高产、优质的效果。岩性、土层深浅、质地、养分、有机质含量等直接影响到马尾松的生长。不同的母岩发育形成的土壤,其肥力、结构、质地、含石量、含水率等均存在一定的差异,导致林木生长量的不同。研究表明,不同岩性发育的土体上栽植的马尾松幼林,前3年树高、胸径生长差异不显著,从第4年起一直到第11年差异显著;马尾松幼树在长石石英砂岩和玄武岩上生长良好,其次是石英砂岩、变余砂岩、第四纪红色黏土和煤系硅质砂页岩<sup>[14]</sup>。立地条件越好,马尾松造林成活率和保存率越高,5年生马尾松幼林树高、胸径、冠幅、单株材种等的生长量越高,土壤和植株中的N、P、K营养元素含量越高<sup>[15]</sup>。

**2.3 整地效应研究** 整地措施能改变人工林土壤物理、化学、生物学性状,对人工林生长产生重要影响。整地措施得当可以改善土壤微环境,达到改善造林地环境状况的目的,同时为造林施工和幼林抚育等施工作业创造便利条件。通过整地能提高火炬松人工林土壤净N矿化速率和土壤硝化速率<sup>[16]</sup>,将林地有机物质混入矿质土壤,加速林地有机物质分解和养分的释放,使植物根系和土壤微生物呼吸作用加强<sup>[17]</sup>,使土壤和凋落物层中节肢类土壤动物丰富度增加<sup>[18]</sup>。然而,整地措施不当又能够加速土壤水蚀和风蚀过程,加速土壤养分的流失,长期的机械整地作用和整地强度的增加使土壤质量可能出现恶化现象<sup>[19]</sup>。机械化整地强度增加使土壤压实程度和土壤容重增加,土壤水分渗透、土壤氮固化能力以及树木根系生长能力下降,从而导致土壤质量的恶化和人工林生产力下降<sup>[20]</sup>。

马尾松人工林整地方式主要有全垦、带状和块状(穴垦)3种。造林初期,全垦、带垦林地土壤持水量、孔隙度、通气度及容重得到显著改善,与穴垦相比全垦和带垦林地0~20 cm

土层容重分别下降了18.3%和8.7%,总孔隙度分别增加14.6%和8.7%,最大持水量分别增加20.2%和7.5%,毛管持水量分别增加16.3%和9.8%,田间持水量分别增加17.0%和9.7%<sup>[21]</sup>。在土壤质地适中、立地质量中等的南方山地营造马尾松人工林,造林时宜采用块状整地,整地规格以中穴(40 cm×40 cm×25 cm)为宜。对于母岩为花岗岩、且造林技术水平高的地区,可采用规格为30 cm×30 cm×20 cm的块状或规格为20 cm×20 cm×15 cm的三角穴整地进行造林,该方法可以累积减少水土流失9.8~40.4 t/hm<sup>2</sup>,降低整地费用30%~60%<sup>[22]</sup>。在中上坡块状整地的林分比不整地的林分树高大26%,胸径大15%,蓄积量大15%;在中下坡树高、胸径、蓄积量分别大14%、24%和45%<sup>[23]</sup>。整地对提高马尾松林分生长量具有重要的意义,尤其对立地条件较差的造林地,整地更具有明显的效果。

**2.4 施肥效应研究** 全球人工林经营技术水平的不断提高,人工林施肥管理措施已成为人工林经营管理的一项基本措施,通过合理施肥能增加土壤的肥力,改善土壤养分的有效性,进而显著提高人工林生产力。施加氮肥能够增加土壤中的净氮矿化速率、土壤中微生物氮库和土壤有机氮库<sup>[24]</sup>,对土壤养分贫瘠的8年生火炬松人工林施肥后生产力增加33.4 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup><sup>[25]</sup>。然而过量的施肥能够增加氮、磷等淋失,导致土壤中其他养分元素的淋失和土壤酸化,从而使土壤质量恶化<sup>[26-27]</sup>。

马尾松人工林施肥效应的研究从不同种源到不同龄林,表现出不同施肥时间与不同肥料种类的差异。磷肥是一种长效肥种,更能促进马尾松中幼林的生长。因为磷素在土壤中分解缓慢,即使有部分为土壤固定,但与氮素等分解较快的元素相比,其发挥肥效的持续时间较长。在缺磷立地上,马尾松5个优良种源中的广东高州和广西岑溪2个种源幼年树高生长对磷肥反应显著,属于对磷肥敏感型种源,而广东信宜和福建武平2个种源对磷肥反应不敏感,在低磷条件下能有效利用土壤磷素,可不施用磷肥<sup>[28-31]</sup>。10年生时高磷处理下树高和胸径的肥效依种源不同分别在7.4%~12.9%和14.5%~26.3%,中磷处理下树高和胸径肥效则分别在3.2%~8.2%和91%~28.1%,施用磷肥的生长增益可抵得上选用优良种源获得的增益<sup>[32]</sup>。施肥对马尾松幼林生长的影响是长期的,选择合适的肥种、肥量及适宜的施肥时间,能对马尾松幼林的生长产生良好而持续的影响。不同的肥种其肥效的时效性与增益持续性不同,氮肥无明显的时效性,钾肥施肥后初期效应显著,但效应丧失快,磷肥产生效应迟,持续时间长<sup>[33-34]</sup>。3年生马尾松人工幼林施磷100 kg/hm<sup>2</sup>,11年生时树高、胸径和蓄积量较对照分别提高3.75%、14.17%和33.60%;单施磷肥马尾松幼林树高增益20.5%~22.2%,地径生长增益19.8%~20.8%;立地低下的地方可适当配施些氮肥,马尾松幼林不必施钾肥<sup>[35]</sup>。

**2.5 密度效应研究** 造林密度是营林技术措施中的重要内容,对林分生长各时期的保存密度有着决定性的影响,从而影响林分不同时期的自我调控过程与林分生产力,表现在直接影响整个林分的生长、发育和稳定性,对林分的产量、质量、生态效益等产生较大的作用。适宜的造林密度与保持合

理的立木密度,既能促进林木生长,又有利于木材产量与品质的提高,充分发挥林分的稳定性。

马尾松造林密度的确定按照经营目标不同而不同,一般造林密度为520株/hm<sup>2</sup>的林分比密度为900株/hm<sup>2</sup>的林分营养空间更加充分,树冠能得到有效的生长,有利于维持马尾松树高、胸径以及材积的速生期<sup>[36]</sup>。以培育大径材为目标,选用中等以上立地条件造林,初植密度以1 800~2 505株/hm<sup>2</sup>为宜,间伐2次,最后一次间伐应在第20年前结束,最终保留525~645株/hm<sup>2</sup>,35年左右进行主伐<sup>[37]</sup>。培育速生丰产林的造林密度以中密度为宜,即3 555~2 490株/hm<sup>2</sup><sup>[38]</sup>。以16年采伐和尾径5 cm以上马尾松可用于人造板用材的条件,培育短周期工业原料林的造林密度为7 500株/hm<sup>2</sup>较适宜<sup>[39]</sup>。在黔中地区中等立地采用本地一般种源造林,培育建筑材可采用2 000~2 500株/hm<sup>2</sup>的初植密度,培育纸浆材可采用3 500~4 444株/hm<sup>2</sup>的初植密度,培育纤维、刨花板原料材可采用6 000株/hm<sup>2</sup>左右的初植密度<sup>[40]</sup>。随着造林密度增大,马尾松人工林胸径、单株材积、冠幅生长量与冠高比减小,蓄积、高径比与自然稀疏强度增大,但造林密度对树高生长无显著影响,间伐初始期随密度增大而提前<sup>[41]</sup>。马尾松林分凋落物量随林分密度的增加而增加<sup>[42]</sup>,造林密度大,则生长轮变窄,营胞列数减少,晚材率增加<sup>[43]</sup>。培育大径材的主要技术措施是进行强度大的抚育间伐,并且通过抚育间伐,缩短林木培育周期,尽早达到工艺成熟<sup>[44]</sup>。马尾松8年生人工林随间伐强度增大,平均树高、胸径、蓄积量、冠幅、生长量增加,林分群体生产力提高。林地土壤自然含水量、贮水量增大,而通气度、总孔隙度下降,土壤有机质、全氮、全磷、水解氮、速效磷、速效钾含量增加<sup>[45]</sup>;马尾松16年生人工林在44.4%的间伐强度下对林木的胸径和单株材积生长效应最佳<sup>[46]</sup>。

### 3 马尾松人工林存在的问题

**3.1 生产力问题** 人工纯林在早期或第1、2代生长阶段一般表现良好,林地土壤会出现一定的自肥现象,但是,在生长后期或多代连栽后,大多数林地会出现自贫、自毒或自衰等土壤退化和林木生长衰退的现象<sup>[47]</sup>。澳大利亚和新西南发现第2代人工林生产力显著下降<sup>[32]</sup>;德国萨克森地区大面积第2、3代云杉人工林生长较差,我国南方杉木人工林多代连栽后生产力逐渐下降。

马尾松生长能改良土壤物理性质,特别是对0~20 cm土层改良效果较为明显。连栽马尾松生长至中龄林阶段,土壤有机养分略有提高,土壤速效养分氮、磷以及代换性Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>含量则明显下降;多酚氧化酶、脲酶和蛋白酶活性下降,而0~40 cm土壤过氧化氢酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶活性升高;土壤中细菌、放线菌、真菌和固氮菌在2代马尾松土壤中的数量明显少于1代马尾松<sup>[48]</sup>。在立地指数16 m左右、立地质量中等的造林地,以3种不同密度连续栽培的2代马尾松人工林,第2代林分的平均树高和优势水平均高,均接近或超过第1代林分;所分析的几个土壤养分指标大多数均是第2代林分高于第1代林分,基本上未出现生产力水平下降和地力衰退现象<sup>[49]</sup>。马尾松在其迹地上造林,成活率比在荒山造林的低20.9%,其1、2年生幼林的高比松1代分别低

13.4%和15.2%;松2代土与松成林土的养分含量、pH值、代换性的Ca<sup>2+</sup>/Al<sup>3+</sup>低,土壤微生物总数以及细菌、好气固氮菌、氮化细菌的数量减少,而真菌、放线菌和分支杆菌的数量增加,土壤的蛋白酶、蔗糖酶与过氧化氢酶的活性降低,但多酚氧化酶的活性却增高<sup>[50]</sup>。2代马尾松林土壤微生物数量、微生物生物量碳强度、呼吸作用强度、硝化作用强度、蔗糖酶以及过氧化氢酶活性均高于1代<sup>[51]</sup>。马尾松第1代在贫瘠的土壤上能正常生长,但其更新代却呈现严重的退化,这表明在当地不宜连栽马尾松<sup>[52]</sup>。

**3.2 生态问题** 人工林同一树种的大面积连片栽植所带来的最大潜在危险,就是病虫害的蔓延,特别是针叶林树种的同质性,大大增加了火灾预防的难度。在我国,马尾松松材线虫病于1982年在江苏南京首次被发现以来,主要依靠媒介昆虫(松墨天牛)的携带在自然界中扩散传播<sup>[53]</sup>,目前已扩大到江苏、浙江、安徽、福建、广东、山东、湖北、湖南、重庆、贵州、云南、江西12个省份的113个县,被称为“松树的癌症”<sup>[54]</sup>。由于松材线虫病的入侵,以及随后的人为砍伐清理马尾松受害木,马尾松林正朝着阔叶林和针阔混交林2个方向演替<sup>[55]</sup>。马尾松毛虫是我国森林害虫中发生范围最广、危害面积最大、经常猖獗成灾的大害虫,虽然已建立了一套比较完整的马尾松毛虫预测预报体系和防治措施,但局部地区的暴发成灾仍时有发生。森林火灾带来的破坏性比森林病虫害更大,它不仅仅是烧毁林木及林下植被,危害野生动物及野生动物赖以生存的环境,而且会引起水土流失,引起空气污染,导致生态环境及生存环境的破坏,给人类造成巨大威胁。马尾松30年生林分森林火灾后,更新林分需要30年才能恢复相当于灾前林分的生态效益,其间生态效益的损失量为传统静态定量估算的25.92倍<sup>[56]</sup>。

### 4 马尾松人工林经营前景展望

**4.1 人工林定向培育与改良** 进入21世纪,人工林的定向培育和高效利用成为我国木材供应战略的必然选择。充分利用已建马尾松种源试验林和子代测定林,加快马尾松人工林定向遗传改良的研究,按材用、脂用、浆用等不同的遗传改良方向评选出一批优良种源和优良家系;按抗病、抗虫、抗凝冻、抗风倒等抗性改良目标评选出优良单株。针对不同的经营目的,建立完善的经营管理技术体系。

**4.2 在经营中引入近自然林业经营理念** “近自然林业”是在确保森林结构关系自我保存能力的前提下遵循自然条件的林业活动,其经营的目的是培育最符合自然规律的多树种、异龄、复层混交林<sup>[57]</sup>,是由德国学者提出的一种回归自然、遵从自然法则、充分利用自然综合生产力来经营森林的理论。“近自然林业”经营法于20世纪90年代初传入我国。用“近自然林业”经营法经营杉木人工幼林,其平均胸高、平均树高、单位面积蓄积量比常规方法经营杉木有大幅度的增长,立地条件越差增长的幅度越大,土壤肥力也得到了维护和提高,表现在土壤生物活性加强,土壤养分增加,交换性能改善,加速了养分的循环和累积<sup>[58]</sup>。我国马尾松人工纯林经营比重较大,应加快近自然林业经营的理念的实施步伐,实现马尾松人工林生态系统向近自然生态系统的改造,充分发挥马尾松人工林多目标复合经营效益。

## 参考文献

- [1] FAO. Forest resources assessment 2000[R]. 2001.
- [2] FAO. Forest resources assessment 2005[R]. Rome:FAO,2006.
- [3] 张建国. 北方速生丰产林栽培技术及人工林发展趋势[J]. 中国林业产业,2004(5):5-7.
- [4] SRY J P, CUBBAGE F W, AHMED MR. Sustainable forest management: Global trends and opportunities[J]. Forest Policy and Economics, 2005, 7:551-561.
- [5] EVENS J. The sustainability of wood production in plantation forestry[M]. Antalya, Turkey: Elsevier World Forestry Congress, 1997.
- [6] EVENS J. The sustainability of wood production from plantations: Evidence over three successive rotations in the Usutu Forest, Swaziland[J]. Commonwealth Forest Review, 1996, 75:234-239.
- [7] 国家林业局森林资源管理司. 第六次全国森林资源清查及森林资源状况报告[EB/OL]. <http://www.forestry.gov.cn/subpage/cortert.asp?lmTrane=lygk&ndm=5000&lmane=&d=2045>.
- [8] 国家林业局. 世界各国森林资源现状、演变趋势及启示[EB/OL]. [www.jyslj.gov.cn/Article/ShowArticle.asp](http://www.jyslj.gov.cn/Article/ShowArticle.asp).
- [9] 卢兆银, 李志辉, 黄丽群. 马尾松种源试验研究[J]. 中南林学院学报, 2006, 26(3):5-10.
- [10] 郑仁华, 杨宗武, 梁庆松, 等. 马尾松建筑材优良家系的选择[J]. 福建林学院学报, 2002, 22(1):1-3.
- [11] 郑仁华, 施季森, 杨宗武, 等. 马尾松纸浆材优良家系的选择[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2002, 26(5):1-6.
- [12] 蔡树威, 龙伟, 杨章旗. 马尾松不同种源采脂量与树体因子关系的研究[J]. 广西林业科学, 2006, 35(S1):18-19.
- [13] 覃冀, 连辉明, 曾令海, 等. 高产脂马尾松半同胞子代20年生测定林产脂力分析[J]. 广东林业科技, 2005, 21(2):30-34.
- [14] 刘映良, 高尔刚, 谢双喜, 等. 岩性对马尾松生长的影响[J]. 山地农业生物学报, 2005, 24(2):108-113.
- [15] 黄春. 不同立地条件马尾松幼林生长比较分析[J]. 林业勘察设计, 2002(2):22-25.
- [16] VITOUSEK P M, ANDRIESE S W, MAISON P A, et al. Effects of harvest intensity, site preparation, and herbicide use on soil nitrogen transformations in a young loblolly pine plantation[J]. Forest Ecology and Management, 1992, 49:277-292.
- [17] TYREE MC, SHIER J R, ALST WM, et al. Long-term effects of site preparation and fertilization on total soil CO<sub>2</sub> efflux and heterotrophic respiration in a 33-year-old Pinus taeda L. plantation on the wet flats of the Virginia Lower Coastal Plain[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 234:363-369.
- [18] BIRD S B, COULSON R N, HESHER R F. Changes in soil and litter arthropod abundance following tree harvesting and site preparation in a loblolly pine (Pinus taeda L.) plantation[J]. Forest Ecology and Management, 2004, 202:195-208.
- [19] SUINEN R, PANTTIA M, TERILA A, et al. Effect of mechanical site preparation on soil quality in former Norway spruce sites[J]. Geoderma, 2006, 136:411-422.
- [20] CHEN C R, XU Z H, BLUMHEDT J, et al. Soil microbial biomass during the early establishment of hoop pine plantation: Seasonal variation and impacts of site preparation[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 186:213-225.
- [21] 吴起明. 整地方式对马尾松幼林生长及土壤肥力的影响研究[J]. 江西农业大学学报, 2003, 25(2):230-232.
- [22] 丁贵杰. 马尾松培育技术体系及优化栽培模式[EB/OL]. <http://www.gforest.cn/second/pzd/pzd07.htm>
- [23] 施友文. 不同整地和施肥方式对马尾松幼林生长的影响[J]. 福建林业科技, 2005, 32(3):43-47.
- [24] HSK MC, SCHMIDT S K. Microbial responses to nitrogen additions in alpine tundra soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28:751-755.
- [25] ALBAUGHT J, ALLEN HL, DOUGHERTY P M, et al. Leaf area and above and belowground growth responses of loblolly pine to nutrient and water additions[J]. Forest Science, 1998, 44:317-328.
- [26] KHANNA P K, RAISON R J, FALKNER R A, et al. Effects of NPK fertilisation on the chemistry of a yellow podzolic soil under Pinus radiata[J]. Forest Ecology and Management, 1992, 52:65-85.
- [27] WILLIAMS T M. Nitrate leaching from intensive fiber production on abandoned agricultural land[J]. Forest Ecology and Management, 1999, 122:41-49.
- [28] 周志春, 吴吉富, 兰永兆, 等. 马尾松优良种源树高生长对不同磷投入水平的反应[J]. 林业科学研究, 2000, 13(6):667-672.
- [29] 周志春, 谢钰容, 金国庆, 等. 马尾松不同种源对磷肥的遗传反应及其根际土壤营养差异[J]. 林业科学, 2003, 39(6):62-67.
- [30] 周志春, 谢钰容, 金国庆, 等. 马尾松种源磷效率研究[J]. 林业科学, 2005, 41(4):25-30.
- [31] 赵颖, 周志春, 吴吉富, 等. 马尾松优良种源对磷肥的生长反应和肥效持续性[J]. 林业科学, 2007, 43(10):64-70.
- [32] 陈跃, 周志春, 吴吉富, 等. 马尾松不同种植材料现实遗传增益印证[J]. 林业科学研究, 2003, 16(2):203-208.
- [33] 谌红辉, 温恒辉. 马尾松人工幼林施肥肥效与增益持续性研究[J]. 林业科学研究, 2000, 13(6):652-658.
- [34] 谌红辉, 温恒辉. 马尾松人工中龄林施肥肥效与增益持续性研究[J]. 林业科学研究, 2001, 14(5):533-539.
- [35] 卢立华, 蔡道雄, 何日明. 马尾松幼林施肥效应综合分析[J]. 林业科学, 2004, 40(4):99-105.
- [36] 陈美高. 不同密度下马尾松生长过程的研究[J]. 中国西部科技, 2006(29):41-43.
- [37] 黄种明. 马尾松大径材培育密度的测定[J]. 武夷科学, 2006(22):127-131.
- [38] 秦国峰, 周志春, 金国庆, 等. 马尾松速生丰产林不同培育目标的适宜造林密度[J]. 林业科学研究, 1999, 12(6):620-627.
- [39] 林建华. 马尾松造林密度与林分生长效应试验[J]. 福建林业科技, 2005, 32(3):137-139.
- [40] 温佐吾, 谢双喜, 周运超, 等. 造林密度对马尾松林分生长、木材造纸特性及经济效益的影响[J]. 林业科学, 2000, 36(S1):36-43.
- [41] 谌红辉, 丁贵杰. 马尾松造林密度效应研究[J]. 林业科学, 2004, 40(1):92-98.
- [42] 姚瑞玲, 丁贵杰, 王胤. 不同密度马尾松人工林凋落物及养分归还量的年变化特征[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2006, 30(5):83-86.
- [43] 夏玉芳, 谌红辉. 造林密度对马尾松木材主要性质影响的研究[J]. 林业科学, 2002, 38(2):113-118.
- [44] 姚克平. 马尾松人工林不同抚育间伐强度的生长效应研究[J]. 湖北林业科技, 2006(3):10-12.
- [45] 林有乐. 间伐强度对马尾松人工林生长和土壤肥力的影响[J]. 防护林科技, 2003(3):16-18.
- [46] 杨福贵. 马尾松抚育间伐强度效应[J]. 华东森林经理, 2004, 18(3):50-52.
- [47] 刘增文, 段而军, 付刚, 等. 一个新概念:人工纯林土壤性质的极化[J]. 土壤学报, 2007, 44(6):1119-1126.
- [48] 杨承栋, 孙启武, 焦如珍, 等. 大青山一二代马尾松土壤性质变化与地力衰退关系的研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(2):267-273.
- [49] 温佐吾. 不同密度2代连栽马尾松人工林生产力水平比较[J]. 浙江林学院学报, 2004, 21(1):22-27.
- [50] 黄付平, 蔡灿星, 黎向东. 马尾松连栽对其幼林生长的影响[J]. 广西农业大学学报, 1994, 13(4):373-380.
- [51] 蔡琼, 丁贵杰. 黔中地区连栽马尾松林对土壤微生物的影响[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2006, 30(3):131-133.
- [52] 彭少麟. 鼎湖山人工马尾松第1代与自然更新代生长动态比较[J]. 应用生态学报, 1995, 6(1):11-13.
- [53] 胡霞, 蒋学建. 松材线虫病生物防治研究进展[J]. 广西林业科学, 2007, 36(4):199-201.
- [54] 张星耀, 骆有庆. 中国森林重大生物灾害[M]. 北京:中国林业出版社, 2003.
- [55] 石娟, 骆有庆, 曾凡勇, 等. 松材线虫入侵对马尾松林主要种群生态位的影响[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(6):76-82.
- [56] 肖化顺, 张贵, 刘大鹏. 马尾松林火灾后生态效益损失动态评估[J]. 林业科学, 2007, 43(3):79-83.
- [57] 吴瑶, 廖彩霞. 近自然林业的研究[J]. 林业科技情报, 2007, 39(2):1-2.
- [58] 张华, 叶章发, 王伯雄. “近自然林业”经营法在杉木人工幼林经营中的应用[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(3):219-223.