

## 海岸带木麻黄林生态系统过程与可持续管理\*

叶功富<sup>1 2</sup> 黄雍容<sup>1</sup> 卢昌义<sup>2</sup> 张立华<sup>3</sup> 林武星<sup>1</sup> 林益明<sup>2</sup>

(1 福建省林业科学研究院 福州 350012; 2 厦门大学 福建厦门 361005; 3 中国科学院烟台海岸带研究所 山东烟台 264003)

**摘要:** 木麻黄为我国东南沿海防护林体系的主栽树种,如何维持和提高其环境调控功能成为当前沿海防护林经营的重要科学问题。文中概述了海岸带木麻黄林生态系统的物质循环、能量流动和防护功能以及育林措施对森林生态系统的影响等国内外研究成果,指出木麻黄人工林具有生产力高、光能利用率高和适应性强的特点;在探讨干扰与木麻黄林生态系统退化之间关系的基础上,提出加强木麻黄海岸防护林的恢复重建与生态系统管理等建议。

**关键词:** 木麻黄 沿海防护林 生态系统过程 可持续经营

中图分类号: S718.55

文献标识码: A

文章编号: 1001-4241(2012)03-0032-06

### Ecosystem Processes and Sustainable Management of Coastal Protection Forest of *Casuarina equisetifolia*

Ye Gongfu<sup>1 2</sup> Huang Yongrong<sup>1</sup> Lu Changyi<sup>2</sup>  
Zhang Lihua<sup>3</sup> Lin Wuxing<sup>1</sup> Lin Yiming<sup>2</sup>(1 Fujian Academy of Forestry, Fuzhou 350012, China; 2 Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China;  
3 Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China)

**Abstract:** *Casuarina equisetifolia* is a major species planted in protection forest along the coast of southeast China. At present, how to sustain and enhance its environmental regulation functions has become important science question for local protection forest management. This paper reviewed the research at home and abroad on nutrient cycling, energy flow and protective functions of *C. equisetifolia* ecosystem in coastal zone as well as on the effects of forest management measures on forest ecosystem, indicating that *C. equisetifolia* plantations have the characteristics of high production, high photosynthesis rate and better adaptive abilities. The relationship between disturbance and the degraded *C. equisetifolia* ecosystem was discussed. Then the suggestions were made for the restoration and reconstruction of the damaged *C. equisetifolia* protection forest and the management of its ecosystem.

**Key words:** *Casuarina equisetifolia*, protection forest, ecosystem process, sustainable management

木麻黄原产于澳大利亚、东南亚和太平洋群岛,具有固氮改土、防风固沙和改良盐碱地等多种功能,并广泛应用于农林复合系统。木麻黄在我国东南沿海地区具有良好的适应性和抗逆性,已成为当地沿海防护林的主栽树种,在防风固沙和改善生态环境等方面发挥着巨大的作用,现有林面积约 30 万  $\text{hm}^2$ <sup>[1]</sup>。

但由于自然因素和人为干扰的影响,在木麻黄防护林经营过程中出现了林分衰退、更新困难、低效林增加、防护效能下降等诸多问题,引起了国内外学者的普遍关注,开展了生态系统生产力和物质循环、能量流动等观测以及生态系统退化机制与恢复重建研究<sup>[2]</sup>。本文将概述海岸带木麻黄林生态过程与管理的国内

\* 收稿日期: 2011-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41176092); 国家“十一五”科技支撑计划(2009BADB2B0302); 国家林业局南方山地用材林培育重点实验室、福建省森林培育与林产品加工利用重点实验室资助项目

作者简介: 叶功富(1966-),男,福建省林科院教授级高工,厦门大学兼职教授,研究方向: 沿海防护林生态管理, E-mail: yegongfu@126.com

外研究动态,以期为木麻黄林生态系统经营和提升防护林质量等提供科学依据。

## 1 海岸带木麻黄林生态系统的物质循环

### 1.1 生态系统中凋落物与细根的分解过程

凋落物是植被生态系统向环境归还物质的主体和归还的主要方式,也是木麻黄林主要的养分来源,是土壤微生物生态系统物质和能量的基础。叶功富等<sup>[3]</sup>对木麻黄林凋落物的动态、分解过程及养分反馈等研究结果表明,木麻黄林的凋落量随林龄增长而增加,至杆材阶段达到最大;凋落物中以落叶所占比例最大,碎屑比例最小;木麻黄凋落物分解率较低,分解过程中各种养分浓度发生变化,多数元素浓度有所提高。谭芳林<sup>[4]</sup>对7和20年生木麻黄林的凋落物量、分解速率及养分归还量进行了连续3年的观测,估算出木麻黄凋落物分解的半衰期为1.02年,95%的凋落物分解需要4.4年,7和20年生木麻黄林凋落物分解释放到林地土壤的养分总量分别为125.12和136.82 kg/(hm<sup>2</sup>·a)。凋落物分解过程中热值的动态变化可反映其有机物分解速度和能量释放速度。张清海等<sup>[5]</sup>对木麻黄凋落物分解过程中热值的动态变化进行了研究,表明热值和灰分含量与气温和不同层次土壤温度显著相关,温度特别是气温是影响凋落物分解的重要因素。这与前人的研究结果相吻合。王敏英等<sup>[6]</sup>比较了海南岛海岸生境相似的天然青皮林和木麻黄人工林养分动态及凋落物分解能力,认为青皮林下环境比木麻黄林下环境更有利于凋落物的分解。John A. Parrotta<sup>[7]</sup>对波多黎各木麻黄纯林和混交林的生产力、养分循环和演替进行了比较,认为营造木麻黄混交林有利于改善凋落物的组成、加快凋落物的分解和提高养分归还速率。尽管有研究表明在温带和热带地区人工混交林比纯林生产力高<sup>[8-10]</sup>,但目前这方面的研究还有很大的不确定性<sup>[11]</sup>,因为物种搭配的准确性及互补物种的选择对混交林的生产力有很大影响<sup>[7]</sup>。

细根是森林生态系统生物量和养分库中重要的动态组成部分,在森林生态系统物质循环中起着关键性的作用,细根的死亡和分解是林木归还土壤养分的重要途径。森林凋落物的组成不仅包括枯枝落叶部分,还应包括细根的死亡部分,即根系凋落物。张立华等<sup>[12]</sup>对福建省滨海沙地上木麻黄人工林细根分解过程中养分的释放规律、养分及能量的归还进行了系

统研究,结果表明木麻黄细根分解过程中养分浓度的变化与地上部分相似,分解1年后,细根分解都表现为养分释放,K的损失率最高,其次是Mg和Ca,再次是C和N,P的损失百分率最低。木麻黄细根的分解始终比较平缓,其分解率较低(38.19%),除了与木麻黄细根本身的特性有关之外,还可能与其所处的滨海沙地持水能力差、土壤含水量低有关<sup>[13]</sup>。

### 1.2 木麻黄林生态系统的养分与碳循环

养分循环是植物生态系统物质循环的主要过程及基本功能,是系统生产力及持久性的决定因素。叶功富和黄宝龙<sup>[14]</sup>以福建惠安15年生木麻黄林为试材进行定位观测显示,木麻黄人工林年降水输入的营养物质为49.285 kg/hm<sup>2</sup>,径流输出养分为15.507 kg/hm<sup>2</sup>,养分净积累量33.778 kg/hm<sup>2</sup>,表明生态系统处于进展的变化过程中;养分地球化学循环的净变化值比生物循环减小75.6%,说明生物循环比地球化学循环强度大且速度快。各种营养元素在木麻黄各器官中的积累量或木麻黄林分中养分的吸收量和存留量变化趋势,均表现为从幼林阶段起不断增加,成熟阶段达到最大,至过熟阶段又趋下降;随树龄的增加养分的归还量占吸收量的比率不断提高,养分存留量的比率不断下降,特别是土壤中磷和钼2种元素的缺乏更加不利于林分的更新<sup>[14-15]</sup>。叶功富等<sup>[15]</sup>对木麻黄连栽林地的肥力和林木生长研究结果表明,木麻黄连栽地土壤pH值下降,土壤有机质和养分含量普遍减少,土壤微生物数量和生化活性降低,从而引起林分生产力减退,认为人工林地土壤肥力下降与营养元素循环不畅、平衡失调有很大关系。Kanpen-johann M.<sup>[16]</sup>在西非贝宁的观测同样表明,木麻黄更新林地P和K含量降低,引起林木生长不良。有研究表明,在苗期接种生物肥料的木麻黄较对照积累更多的生物量,结瘤量更多,能够促进其吸收养分,更有利于植株的生长。进一步研究表明,接种多种生物肥料比接种单一生物肥料更有利于植株的生长及生物量的积累、提高凋落物的产量和养分的回收效率<sup>[17]</sup>。

环境中的CO<sub>2</sub>通过光合作用被固定在有机物质中,然后通过食物链的传递在生态系统中进行循环。土壤是陆地生态系统中最主要的碳库,碳储量约占生物圈陆地总碳储量的2/3,土壤呼吸是土壤碳库输出及全球碳循环的主要途径<sup>[18]</sup>。森林生态系统碳循环是全球碳循环的一个重要组成部分,而土壤呼吸是森

林生态系统碳循环过程的一个重要环节。郭瑞红等<sup>[19]</sup>比较了木麻黄纯林和不同的木麻黄混交林土壤碳贮量,结果表明混交林土壤碳贮量高于木麻黄纯林,含碳率均随土层深度的增加而降低。肖胜生<sup>[20]</sup>对木麻黄混交林和人工林生态系统的土壤呼吸和碳平衡进行了研究,表明不同林龄木麻黄林的土壤呼吸速率差异显著( $P < 0.05$ ),其平均土壤呼吸速率呈现中龄林 > 成熟林 > 幼龄林;随着林龄的增大,土壤呼吸对土壤温度和土壤水分的敏感性增强<sup>[21]</sup>。木麻黄人工幼龄林、中龄林和成熟林均表现出了碳汇功能,其中幼龄林 [ $11.165 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ]与中龄林 [ $15.628 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ]的年净固碳量较大,而成熟林 [ $0.479 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ]的碳汇功能较弱。

## 2 海岸带木麻黄林生态系统的能量流动

能量的流动和转化是任何生命活动的基础,也是生态系统存在和发展的基础。国外有关木麻黄能量生态学的报道不多,Alok K. Srivastava 在印度温迪亚平原开展了热带干旱退化立地不同年龄木麻黄林生物量和能量的研究<sup>[22]</sup>,结果表明林木各组分能量的持有量和存储量均高于热带干旱地区其他的燃料树种,生产力预计达到  $19 \sim 29 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,平均热值  $20 \text{ kJ/g}$ ,其生物量的累积率和生产效率与林分的龄级分别表现为显著的正相关和负相关关系,木麻黄是很好的热带干旱地区的造林树种。

龙斯曼<sup>[23]</sup>对海南南三林场木麻黄防护林观测表明,木麻黄的太阳能转换效率高,在不同立地下的光能利用率为  $0.17\% \sim 0.59\%$ ,是滨海沙地上一个成功的人工林生态系统。张清海等<sup>[24]</sup>测定结果表明,在海岸带木麻黄防护林生态系统中,复合群落具有更高的生物量和能量现存量,并且混交林较纯林有更高的生产力和更强的生态功能,具有更稳定的生态结构和更好的防护效果。叶功富等<sup>[25]</sup>对海岸沙地木麻黄人工林群落能量的现存量、归还量、净固定量、太阳能转化率及能量释放进行了研究,结果表明能量现存量为  $2.986.92 \times 10^6 \text{ kJ}/\text{hm}^2$ ,凋落物的归还量为  $14.17 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,能量净固定量为  $196.80 \times 10^6 \text{ kJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,太阳能的转化率为  $0.90\%$ ,显示木麻黄在东南沿海地区有较高的太阳能利用率和生长适应性,作为沿海防护林的当家树种具有不可替代的地位。叶功富等<sup>[26]</sup>研究了福建东山滨海沙地木麻黄生态系统的能量特征,结果表明木麻黄

群落的植物热值平均值为  $20.26 \sim 20.61 \text{ kJ/g}$ ,高于东北落叶松人工林、武夷山甜槠和黄山松群落植物体热值,表明木麻黄是一种光能利用率和生产力较高的树种,是适应海岸沙地造林的先锋植物。

## 3 木麻黄海岸防护林的生态功能

以木麻黄为主要造林树种的东南海岸防护林在防风固沙、调节小气候、改善土壤理化性质等方面发挥着重要的作用,许多学者对其经济和生态效益进行了观测及评价<sup>[27-28]</sup>。黄义雄等<sup>[29]</sup>对福建平潭岛木麻黄防护林的生态经济效益进行3年调查的结果表明,其有效防护范围为林带迎风面距林带  $10H$  和林带背风面距林带  $15H$  范围内,林带风速平均降低  $24.3\%$ ,土壤细沙含量平均提高  $1.1\%$ ,蒸发量平均降低  $15.7\%$ ,土壤表层含水量提高  $1.1\%$ ,降水量增加  $46.1 \text{ mm}$ 。林带防护范围内农作物产量均得到提高,表明木麻黄具有较好的生态和经济效益,对改善滨海地区生态环境、促进经济可持续发展有着重要意义。池方河等<sup>[30]</sup>通过对玉环县建设沿海防护林前后抵抗自然灾害能力的比较效益分析证明了沿海“窄林带、小网格”防护林的生态效能高,能减轻台风、低温的危害程度,改善生态环境,促使玉环柚等经济作物的稳产高产,增加农民的收入。这与陈士银<sup>[31]</sup>的研究结果一致。

木麻黄林的防风效能与林分结构、年龄、品种有关<sup>[32]</sup>。陈绶柱等<sup>[33]</sup>对木麻黄试验示范林的台风灾害调查认为,侧根多、胸径大的木麻黄抗风能力强,树冠小的木麻黄因迎风面积小而遭台风破坏轻。谭芳林等<sup>[34]</sup>运用数量化理论 I 建立了沿海木麻黄基干林带防风效能的预测方程,推算出基干林带进入防护成熟初期和防护成熟末期的阈值。配置复层结构的异龄防护林,即在木麻黄林间空地套种1年生木麻黄壮苗,可以提高防护效果<sup>[35-37]</sup>。吴志华等<sup>[38]</sup>通过对木麻黄和相思树抗风相关的立木形态性状和材性等进行比较认为,对抗风性影响最大的是应力波速和基本密度,影响最小的是分枝角度、树高和干形通直度,其中树高、应力波速、冠幅和生长应变值对风害等级呈正向效应,而木麻黄无性系的抗风性强于相思树。

木麻黄防护林除了防风固沙效能外,还在调节小气候、改善土壤理化性质等方面发挥着作用。曾焕生<sup>[39]</sup>对木麻黄防护林带庇护下的农田小气候进行了定位研究,结果表明农田防护林带不仅可以降低风

速,还对气温和地温具有调节作用,减少了蒸发量。郑锟等<sup>[40]</sup>对福建东山岛农田防护林的小气候效应进行了定位研究,表明林带可以明显提高一定范围内的空气湿度,林带后距地面1.5 m及1H~10H范围内的温度均低于对照点,平均气温比对照地降低0.7~2.5℃。木麻黄混交林还能有效改善土壤肥力状况<sup>[41]</sup>。吴柳清<sup>[42]</sup>对木麻黄和柠檬桉混交林观测表明,混交林能改良土壤物理性质。李茂瑾<sup>[43]</sup>对木麻黄与相思、桉树的混交林调查表明,以木麻黄与台湾相思混交对土壤肥力的改良作用更明显。

#### 4 经营措施对木麻黄林生态系统的影响

育林措施是否合理,影响着木麻黄林的生长发育过程,关系到沿海木麻黄林生态系统的稳定性与健康经营,因此对木麻黄海岸防护林的可持续管理研究显得尤为重要。木麻黄早期的造林密度一般都较大,单株生长空间受到限制,生物量不高,而且造林密度过大则林木高径比增加,侧根数量少和直径小,易遭致台风危害<sup>[44]</sup>。林武星等<sup>[45]</sup>运用多目标决策方法对滨海后沿木麻黄防护林造林密度进行评价研究,结果表明综合评价指标以造林密度1667株/hm<sup>2</sup>的林分为最高,2500株/hm<sup>2</sup>的林分为次。针对闽南沿海木麻黄防护林2代生产力下降的问题,有研究表明2代更新造林采用客土伴磷肥的造林措施可以增加造林保存率,林分生长量得到提高,防护功能得到增强<sup>[46-47]</sup>。由于滨海沙土结构疏松、保水保肥能力差、养分归还量少、土壤贫瘠、降水量有限且分布不均以及水肥不协调等而造成大面积木麻黄低效林<sup>[48-49]</sup>。吴锡麟等<sup>[50]</sup>通过建立水肥耦合效应模型探讨认为,最佳生长量的水肥配比和提高水分利用率是木麻黄防护林生态系统经营管理的关键所在。林志鹏等<sup>[51]</sup>对有机肥在木麻黄水肥协同管理上的应用效果进行了探讨,结果表明以有机肥为水载体配施磷肥能明显促进木麻黄的生长,有机肥作为水载体来协同管理木麻黄水肥条件是可行的,其在调控沙地水肥平衡上的应用潜力巨大。林武星等<sup>[52]</sup>探讨了分形维数与木麻黄林土壤肥力的关系,结果表明沙质土壤中的小径级沙粒含量越大,土壤结构分形维数越大,土壤肥力越高,保水能力越强;同时提出在沙质土壤肥力研究上应用分形模型,为木麻黄防护林更新模式选择提供了新思路。

由木麻黄单一树种构成的防护林带结构简单,对

环境的适应能力较差,林分稳定性下降,病虫害时有发生,部分林地土壤出现地力衰退<sup>[53-54]</sup>。张清海<sup>[55]</sup>对海岸沙地木麻黄不同混交模式和不同造林树种的观测提出,应根据当地特点加强对现有林地特别是林地凋落物的管理,使其能够回归自然,实现土壤养分良性循环,为防护林生态系统可持续经营提供养分保障;在防护林造林模式上要向多树种多林种发展,合理配置防护林结构。凋落物能够改变林分土壤的物理、化学和生物环境,进而影响土壤中种子的萌发和幼苗的生长<sup>[56-57]</sup>。有学者对澳大利亚南部干旱区木麻黄林下凋落物和表层土对林下植被产生和生长的影响进行了研究,结果表明木麻黄林下植被种类和数量远少于相邻开阔地的林下植被,说明加强木麻黄林凋落物的管理有助于丰富林下植被群落结构,改善林分微环境,提高其生产力<sup>[58]</sup>。为了克服木麻黄纯林的弊端,增强林带稳定性和防护功能,达到林地持续利用的目标,学者纷纷进行木麻黄混交林不同配置造林模式研究,并对不同混交模式的防护效果进行分析和评价<sup>[59-60]</sup>。郭锦红<sup>[61]</sup>对不同树种混交效果及种间关系进行研究,结果表明木麻黄与刚果12号桉、厚荚相思单行混交造林种间关系较协调,而湿地松与刚果12号桉、厚荚相思行状混交受压。叶功富<sup>[62]</sup>在湿地松、木麻黄混交林营造的基础上采用行状疏伐法对其种间关系和树种结构比例进行调控试验,提出了新的混交配置模式,对种间关系和林木生长比较有利。林武星<sup>[63]</sup>对滨海沙地木麻黄基干林带5种更新方式进行综合评价,结果表明间隔带状采伐更新方式优于林下套种更新方式,在间隔带状采伐更新中,以窄采伐带为优。

#### 5 木麻黄林生态系统可持续管理的途径

由于长期适应海岸带干旱、土壤瘠薄的立地环境,木麻黄具有生产力和光能利用率高及适应性强的特点,成为东南沿海防护林不可替代的重要树种。但在海岸前沿风口地段、基干林带和连栽林地,木麻黄人工林呈现局部衰退的现象。在海岸带开发过程中的强度人为干扰,如道路建设、围垦养殖、沙矿开采、林下凋落物扒除等,加速了生态系统的退化过程。随着全球气候的异常变化,近几年来沿海地区遭受多种极端气候的影响,如超强台风、暴雨、强降水、长期干旱等,将对木麻黄林造成逆境胁迫<sup>[2]</sup>。木麻黄林生态系统管理的目标在于维持生态系统各个发展阶段

的群落多样性、合理结构、森林健康和稳定性,保持生态系统服务功能的持续性。针对木麻黄林生态系统过程与自身特点,除了采取一整套包括从风口沙荒基干林带到林网及片林的栽植方法、密度控制和更新改造等配套技术外,生态系统可持续管理的途径主要有以下2个方面。

### 5.1 优化森林生态系统的结构配置

良好的生态系统结构是建设高效沿海防护林体系的核心环节,为使木麻黄林生态系统空间结构、时间结构始终保持最佳的状态,要依据海岸地形地貌和灾害情况,通过合理规划对防护林带结构进行优化配置。在空间结构布局上,做好沿海基干林带、林网和片林的宏观配置,建立合理水平、垂直结构的防护林网络,增强木麻黄林生态系统的抵抗力与稳定性<sup>[2]</sup>。在人工林营建过程中应充分利用资源,增加不同物种组成和多样性,发挥不同物种在生态特性和生态功能上的补偿作用,注重乔灌草物种搭配,通过营造混交林、复层林形成多层次的群体结构,有效发挥乔灌草物种的防风固沙、水土保持功能,增强人工群落的物种多样性及稳定性。在时间结构上,通过育林措施维持人工林不同发展阶段的营养结构,减少系统变异性 and 波动性,并充分考虑不同树种的轮栽,常绿植物与落叶植物相搭配,营造合理的异龄混交林,保持群落具有稳定的年龄结构组成,从而保证木麻黄人工林生态系统健康,维护森林防护效能的持续性。

### 5.2 加强森林土壤生态系统管理

森林土壤不仅是林木生长的基础,而且是整个生态系统物种间进行物质交换和能量传递的良好界面,因此营造良好的森林土壤环境,是木麻黄林生态系统可持续发展的一个必不可少的环节。森林土壤环境包括森林凋落物、土壤的养分循环、土壤微生物环境和植物的根系等。现有木麻黄人工林多代连栽导致的地力衰退、更新困难等问题凸显已久,有效提高木麻黄林地养分循环能力显得尤为重要<sup>[54]</sup>。通过接种菌根等可促进木麻黄根系产生固存各种养分的根瘤,使得土壤中的养分能够得到有效的吸收利用。要从根系分泌物的角度选择与木麻黄进行混交的树种,筛选的树种能作用于木麻黄凋落物的分泌物,以促进木麻黄生态系统枯枝落叶层的分解,改良森林土壤的物理化学环境<sup>[51]</sup>。应从乡土树种和引进的阔叶树种中选择适合的树种与木麻黄人工林进行混交。此外,应通过合理施肥和保证凋落物回归来改善林地土壤养

分状况和林下植被生长环境,促进土壤生态系统的养分循环,改良土壤肥力,进而确保木麻黄人工林生态系统的稳定发展。

### 参 考 文 献

- [1] Chonglu Zhong, Yong Zhang, Yu Chen, et al. Casuarina research and applications in China [J]. *Symbiosis* 2010, 50(1/2): 107-114.
- [2] 叶功富, 罗美娟, 卢昌义. 海岸带退化生态系统的恢复与海岸带综合管理 [J]. *世界林业研究* 2006, 19(4): 5-10.
- [3] 叶功富, 张清海, 卢昌义, 等. 滨海沙地木麻黄林生态系统的凋落物及其热值研究 [J]. *应用与环境生物学报* 2007, 13(1): 23-28.
- [4] 谭芳林. 木麻黄防护林生态系统凋落物及养分释放研究 [J]. *林业科学* 2003, 39(增1): 21-26.
- [5] 张清海, 叶功富, 林益明. 滨海沙地木麻黄凋落物分解过程中热值的动态变化 [J]. *林业科学研究* 2005, 18(4): 455-459.
- [6] 王敏英, 刘强, 丁亚凤, 等. 海岸青皮林与木麻黄林养分动态及凋落物分解的比较 [J]. *浙江林学院学报* 2008, 25(5): 597-603.
- [7] John A Parrota. Productivity, nutrient cycling, and succession in single- and mixed- species plantations of *Casuarina equisetifolia*, *Eucalyptus robusta*, and *Leucaena leucocephala* in Puerto Rico [J]. *Forest Ecology and Management*, 1999, 124(1): 45-77.
- [8] National Research Council. Tropical legumes: resources for the future [M]. Washington DC: National Academy Press, 1979.
- [9] Werner D, Muller P. Fast growing trees and nitrogen fixing trees [R]. USA: Gustav Fischer Verlag, 1990.
- [10] MacDicken K G. Selection and management of nitrogen-fixing trees [R]. Bangkok: Winrock International Institute for Agricultural Development Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1994.
- [11] FAO. Mixed and pure forest plantations in the tropics and subtropics: FAO forestry paper 103 [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992.
- [12] 张立华, 叶功富, 林益明, 等. 木麻黄人工林细根分解过程中的养分释放及能量归还 [J]. *厦门大学学报* 2007, 46(2): 268-273.
- [13] 张立华, 叶功富, 林益明, 等. 滨海沙地木麻黄人工林细根的生产、分解及周转研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(1): 20-24.
- [14] 叶功富, 黄宝龙. 木麻黄林生态系统营养元素的地球化学循环 [J]. *南京林业大学学报*, 1998, 22(1): 5-8.
- [15] 叶功富, 张水松, 徐俊森, 等. 不同生育阶段木麻黄养分循环的研究 [J]. *防护林科技*, 1996, (增1): 40-44.
- [16] Kanpenjohann M. Mineral nutrition on root development in stands of *Casuarina equisetifolia* of differing vigor on coast stands of the People's Republic of Benin [J]. *West Africa Potash Review*, 1990(5): 5-10.
- [17] Rajendran K, Devaraj P. Biomass and nutrient distribution and their return of *Casuarina equisetifolia* inoculated with biofertilizers in farm land [J]. *Biomass and Bioenergy* 2004, 26(3): 235-249.
- [18] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle [J]. *Biogeochemistry* 2000, 48(1): 7-20.

- [19]叶功富,郭瑞红,卢昌义,等.木麻黄与厚荚相思混交林的土壤碳储量动态[J].海峡科学,2008(10):21-23.
- [20]肖胜生.滨海沙地木麻黄人工林生态系统的土壤呼吸和碳平衡研究[D].福州:福建农林大学,2007.
- [21]肖胜生,叶功富,董云社,等.木麻黄沿海防护林土壤呼吸及其关键影响因子[J].中国环境科学,2009,29(5):531-537.
- [22]Alok K Srivastava. Biomass and energy production in *Casuarina equisetifolia* plantation stands in the degraded dry tropics of the Vindhyan plateau, India[J]. Biomass and Bioenergy, 1995, 9(6):465-471.
- [23]龙斯曼.一个成功的人工林生态系统:南三林场木麻黄海防林生态经济效益调查[J].生态学杂志,1986,5(3):10-13.
- [24]张清海,叶功富,林益明.海岸退化沙地木麻黄人工林能量的研究[J].林业科学,2006,42(8):1-7.
- [25]叶功富,吴锡麟,张清海,等.沿海防护林生态系统不同群落生物量和能量的研究[J].林业科学,2003,39(增1):8-14.
- [26]叶功富,张清海,卢昌义,等.福建东山滨海沙地木麻黄林生态系统的能量特征[J].应用生态学报,2005,16(10):1812-1816.
- [27]李秀明.沙岸不同结构木麻黄老林带后农作物风害影响研究[J].安徽农学通报,2010,16(1):164-165.
- [28]吴惠忠.林间空地套种木麻黄优良无性系生长效果与防风效能分析[J].安徽农学通报,2009,15(11):174-175.
- [29]黄义雄,郑达贤,方祖光,等.福建滨海木麻黄防护林带的生态经济效益研究[J].林业科学,2003,39(1):31-35.
- [30]池方河,陈青英.玉环木麻黄沿海防护林体系设计及防护效益分析[J].华东森林经理,2005,19(4):29-31.
- [31]陈士银.木麻黄不同株行距配置抗台风效果[J].广东林业科技,1997,13(3):44-46.
- [32]林武星.闽南海岸带不同结构木麻黄林分的防风效果研究[J].林业科技通讯,2000(4):27-28.
- [33]陈绥柱,岑奋,吴泽鹏.沿海沙岸防风固沙木麻黄试验示范林抗御台风分析[J].广东林业科技,1999,15(1):26-30.
- [34]谭芳林,朱炜,林捷,等.沿海木麻黄防护林基于干林带防风效能定量评价研究[J].林业科学,2003,39(增1):27-31.
- [35]吴惠忠.闽南海岸沙荒木麻黄无性系惠安1号造林及防风效果分析[J].海峡科学,2007(2):73-74.
- [36]周远谋.木麻黄防护林基于干林带更新改造与防风效能分析[J].海峡科学,2007(2):76-77.
- [37]林平华.海岸防护林林间空地套种木麻黄生长效果与防风效能分析[J].海峡科学,2009(5):19-20.
- [38]吴志华,李天会,张华林,等.沿海防护林树种木麻黄和相思生长和抗风性状比较研究[J].草业学报,2010,19(4):166-175.
- [39]曾焕生.木麻黄防护林带对改善农田小气候效应的研究[J].防护林科技,2005(3):21-23.
- [40]郑锟,叶功富,徐俊森,等.福建东山木麻黄农田防护林的小气候效应[J].海峡科学,2008(10):96-97.
- [41]游月娥.木麻黄混交林防护效能和改土效果研究[J].西北林学院学报,2005,20(4):36-38.
- [42]吴柳清.沙岸木麻黄柠檬桉混交林生态效应研究[J].安徽农学通报,2008,14(23):154-155.
- [43]李茂瑾.滨海沙地后沿几种木麻黄混交林防护功能与土壤性质研究[J].安徽农学通报,2010,16(13):188-189.
- [44]隆学武,叶功富,黄芙蓉,等.木麻黄林密度管理对林分生长和防护效能的影响[J].防护林科技,2000(增1):123-127.
- [45]林武星,叶功富,洪伟,等.滨海沙地木麻黄防护林造林密度选择研究[J].西南林学院学报,2004,24(3):14-16,20.
- [46]柯玉铸.农田木麻黄防护林网更新技术研究[J].防护林科技,2005(3):9-12.
- [47]李茂瑾.木麻黄造林措施和混交造林技术研究[J].安徽农学通报,2008,14(17):183-185.
- [48]叶功富,张水松,徐俊森,等.沿海木麻黄防护林更新改造技术试验研究[J].防护林科技,1996(增1):1-12.
- [49]谭芳林,林捷,王志洁,等.台湾相思更新木麻黄防护林对土壤理化性质及酶活性的影响[J].江西农业大学学报,2003,25(1):54-59.
- [50]吴锡麟,叶功富,李宝福,等.木麻黄苗期生物量的水肥耦合效应[J].中南林学院学报,2005,25(1):21-24,65.
- [51]林志鹏,李宝福,林延生,等.有机肥在沿海木麻黄防护林水肥耦合协同管理上的应用[J].武夷科学,2009,25(1):50-57.
- [52]林武星,叶功富,谭芳林,等.海岸木麻黄防护林不同更新模式土壤结构分形特征及其效应[J].中国生态农业学报,2008,16(6):1352-1357.
- [53]郭坚城.风积沙土木麻黄采伐迹地肥力问题的研究[J].热带林业科技,1986(3):41-46.
- [54]叶功富,张水松,黄传英,等.木麻黄人工林地持续利用问题的探讨[J].林业科技开发,1994(4):18-19.
- [55]张清海.海岸沙地木麻黄人工林能量生态学研究[D].福州:福建农林大学,2004.
- [56]Facelli J M, Pickett S T A. Plant litter: its dynamics and effects on plant community structure[J]. The Botanical Review, 1991, 57(1):1-32.
- [57]Sydes C, Grime J P. Effects of tree leaf litter on herbaceous vegetation in deciduous woodland: II. an experimental investigation[J]. Journal of Ecology, 1981, 69(1):249-262.
- [58]Andrew R, Jose M Facelli. Effects of *Casuarina pauper* litter and grove soil on emergence and growth of understory species in arid lands of South Australia[J]. Journal of Arid Environments, 2001, 49(3):569-579.
- [59]徐俊森.海岸带湿地松木麻黄混交林营造效果研究[J].福建林业科技,1998,25(2):28-32.
- [60]林武星,叶功富,张水松,等.稀疏基干林带套种木麻黄、湿地松试验[J].防护林科技,1999(4):29-31.
- [61]郭锦红.沙质海岸木麻黄林带更新不同树种混交效果及种间关系研究[J].防护林科技,2001(4):12-14.
- [62]叶功富.滨海沙地湿地松与木麻黄混交林构建和调控技术研究[J].林业科学研究,2002,15(4):463-468.
- [63]林武星,叶功富,洪伟,等.滨海沙地木麻黄基干林带不同更新方式综合效益评价[J].林业科学,2004,39(增1):112-116.