

DOI: 10.5846/stxb201411132245

刘世荣, 马姜明, 缪宁. 中国天然林保护、生态恢复与可持续经营的理论与技术. 生态学报, 2015, 35(1): 0212-0218.

Liu S R, Ma J M, Miao N. Achievements in natural forest protection, ecological restoration, and sustainable management in China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(1): 0212-0218.

中国天然林保护、生态恢复与可持续经营的理论与技术

刘世荣^{1,*}, 马姜明², 缪宁³

1 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

2 广西师范大学生命科学学院, 桂林 541004

3 四川大学生命科学学院, 生物资源与生态环境教育部重点实验室, 成都 610065

摘要: 全面总结了近年来中国在天然林保护与生态恢复的理论与技术实践方面所取得的研究进展。高度凝练出了天然林动态干扰与保育技术、典型退化天然林的生态恢复技术和天然林景观恢复与空间经营技术等三方面的创新成果, 形成了天然林保护与生态恢复的理论与技术创新体系, 对今后天然林保护、生态恢复与可持续经营进行了展望。

关键词: 天然林保护; 生态恢复; 理论与技术; 研究现状; 展望

Achievements in natural forest protection, ecological restoration, and sustainable management in China

LIU Shirong^{1,*}, MA Jiangming², MIAO Ning³

1 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of State Forestry Administration, Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 College of Life Sciences, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China

3 Key Laboratory of Bio-resource and Eco-environment of Ministry of Education, College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610065, China

Abstract: We review recent achievements in natural forest protection, ecological restoration, and sustainable management in China. We consider three domains of these achievements, namely, dynamic disturbances and conservation technology, restoration technology for typically degraded natural forests, and landscape restoration and spatial management technology for natural forests. We discuss an innovation system of theory and technology for natural forest protection and ecological restoration in China. Finally, we highlight future research priorities.

Key Words: natural forest protection; ecological restoration; theory and technology; research situation; outlook

森林是陆地生态系统的主体, 具有复杂的结构和功能, 不仅为人类提供了大量的木质林产品和非木质林产品, 并具有历史、文化、美学、休闲等方面的价值, 在保障农牧业生产条件、维持生物多样性、保护生态环境、减缓自然灾害、调节全球碳平衡和生物地球化学循环等方面起着极其重要的和不可替代的作用^[1-3]。天然林是指起源于天然状态而不是起源于人工栽培, 未经干扰、干扰程度较轻仍然保持有较好自然性的或者干扰后自然恢复的森林, 包括原天然林区的残留原始林或过伐林、天然次生林及不同程度的退化森林、疏林地。天然林是森林生态系统的主体, 是木材和非木质林产品的重要来源。与人工林相比, 天然林具有较高的生物多样性

基金项目: 国家“十二五”和“十一五”科技支撑计划项目(2012BAD22B01, 2006BAD03A04); 国家林业行业公益专项重大项目(201404201)资助

收稿日期: 2014-11-13; **修订日期:** 2014-12-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liusr@caf.ac.cn

性、较复杂的群落结构、较丰富的生境特征和较高的生态系统稳定性。

1998 年之前,由于对我国天然林长期过度的采伐和不合理经营,导致天然林资源锐减、生态功能退化,造成了严重的生态经济后果,亟待采取积极有效的措施,加快退化天然林生态恢复的速度和质量,保障区域生态安全和社会经济的可持续发展。自 1998 年特大洪涝灾害之后,国家实施了“天然林资源保护工程”。特别是国家“九五”计划以来,一批围绕天然林保护的国家级林业科技攻关项目、林业重大科技支撑计划、国家自然科学基金项目和林业行业专项等得到了国家及相关部门的持续资助。主要开展了以下 6 个方面的基础理论与技术创新研究:(1)典型天然林动态干扰体系研究;(2)珍稀濒危树种保育技术;(3)退化天然林分类与评价技术;(4)退化天然林结构调整与定向恢复技术;(5)退化天然林景观恢复与空间经营优化技术;(6)不同类型退化天然林的生态恢复试验与示范技术集成。在天然林动态干扰与保护、典型退化天然林的生态恢复和天然林景观恢复与空间经营等方面取得了丰硕的成果。这些关键技术成果的应用解决了我国天然林保护中所面临的多项难题,对提高我国天然林生态恢复速度和质量、维持天然林生物多样性和生态系统稳定性,加速我国天然林生态恢复的进程,同时为正在进行的“天然林资源保护二期工程”(2010—2020 年)提供科技支撑,最终对改善和提升区域天然林的生态系统服务功能具有重要的理论和现实意义。

1 天然林保护和生态恢复研究

1.1 天然林动态干扰理论与保育技术

1.1.1 基于林隙动态的多物种共存与生物多样性维持理论

臧润国等^[4-7]分别以阔叶红松林、南亚热带常绿阔叶林和热带雨林为对象,首次在国内系统开展了天然林树冠干扰体系、林隙更新动态和生物多样性维持机制的研究。阐明了典型天然林树冠干扰特征和不同树种交替更新的森林循环途径,揭示了林隙时空动态对调控森林群落与环境协同变化的影响机理,以及不同生活史特性的多个物种长期共存机制。臧润国等^[4-7]针对我国不同类型天然林景观中普遍存在自然干扰现象,认为自然干扰形成林隙是天然林动态变化必不可少的驱动因素。天然林中不同生活型树木之间以及不同功能群物种之间,借助于林隙与非林隙的变化实现天然林中不同类型和生活史特性物种的长期共存,维持着天然林的多样性和稳定性。臧润国等在总结多年的研究后提出了天然林多物种共存与生物多样性动态维持理论框架:1)自然干扰是天然林群落物种多样性和天然林景观格局动态变化的关键驱动力;2)天然林中任何一个树种都不可能在一个斑块中永远占有对其有利的生存环境,产生树种竞争优势的环境此消彼长;3)天然林自然干扰体系和树种生活史特性相互作用维持森林中众多的树种能够长期共存。该理论框架创新地建立了自然干扰体系和生物多样性维持机制的耦合关系,拓展了森林生物多样性维持和保育的理论体系,是模拟自然干扰进行天然林经营管理的基础,也是开展生态景观规划和近自然生态系统经营的依据,还可为制定天然林区现有人工林改造和次生林培育技术规程提供参考。

1.1.2 创新复杂天然林功能群的辨识方法和基于功能群的生态恢复新途径

Deng 等^[8], Zang 等^[9]和 Ding 和 Zang^[10]以海南岛热带天然林为例,首次以功能群为主线,提出了复杂热带天然林功能群辨识的数量化方法。张志东等^[11-12]和臧润国等^[13]采用大规模公里网格样方地面调查、遥感影像辨识和模型模拟相结合的方法,首次建立了以功能群为基础的热带天然林景观分类体系,使种类众多的复杂天然林“降维”以功能群为基本单元。按照不同功能群的生态适应性及其随演替的变化规律,确定不同时期恢复功能群占主导的植被类型,构建了以功能群为基础的潜在植被重现和景观斑块优化配置系统,为相应各地段热带天然林植被恢复的目标和方向提供了科学的参照体系,这为复杂天然林的生物多样性保育和生态系统恢复提供了创新性的途径。

1.1.3 天然林区典型珍稀濒危物种保育和扩繁技术

在我国主要天然林区,选择典型天然林类型中的珍稀与濒危野生植物,如华盖木(*Manglietiastrum sinicum*)、峨眉拟单性木兰(*Parakmeria omeiensis*)、东北红豆杉(*Taxus cuspidata*)、云南红豆杉(*Taxus*

yunnanensis)、石斛(*Dendrobium nobile*)等开展了保育和扩繁技术研究,提出了天然林区主要珍稀与濒危物种的保育和扩繁技术体系^[14]。臧润国等^[14]在新疆寒温带的阿尔泰林区提出了天然河谷林更新复壮的开沟断根技术、新疆落叶松(*Larix sibirica*)的人工促进更新技术,成功突破了银灰杨(*Populus canescens*)有性繁殖的技术瓶颈,使大规模人工恢复濒危的银灰杨种群成为可能。杨玲等^[15-16]和王爱芝等^[17]在系统研究了花楸(*Sorbus pohuashanensis*)种子生物学特性基础上,攻克了花楸种子催芽和圃地播种出苗 2 个技术难关,建立了高效花楸种子繁殖技术体系。建立了以幼胚下胚轴为外植体和试管内、外生根相结合生根技术为关键环节的花楸组织培养微繁育苗技术体系^[18-21]。这些研究突破了花楸组培与快繁的技术瓶颈,推动了北方珍贵野生观叶、观花、观果树种花楸种群的保护及其良种快繁产业化发展。

1.2 典型退化天然林的生态恢复技术

1.2.1 创新典型地区退化天然林的分类体系

天然林退化是天然林在一定的时空背景下,由于人为或自然干扰,其生态系统的组成、结构和功能发生与原有的稳定状态或进展演替方向相反的或偏移的量变或质变的过程或结果。天然林退化具有阶段性特征,即不同阶段的退化具有不同的发展过程和特点、退化速率和强度、恢复的过程和时间^[22]。刘世荣等^[22]通过对中国西南地区森林的研究案例,认为退化的天然林主要包括 4 种类型:

1) 老龄林 未被采伐而保留下来的天然老龄林斑块。常分布在山脊、沟尾林线以及地势险要处,作为“种子林”、“保安林”而保留下来。例如,在川西亚高山经常可看到暗针叶老龄林斑块,呈岛屿状或带状分布;

2) 天然次生林 天然林严重干扰后没有采取育林措施,而是通过自然更新演替形成天然次生林。川西亚高山地区,岷江冷杉(*Abies faxoniana*)林被大面积采伐后,迹地天然更新形成了悬钩子(*Rubus* spp.)灌丛及桦木(*Betula* spp.)林;云南金沙江流域云南松(*Pinus yunnanensis*)原始林采伐后经天然更新形成云南松、锥连栎(*Quercus franchetii*)次生林;

3) 人工纯林 在川西亚高山地区,天然林采伐后常采用云杉(*Picea asperata*)、日本落叶松(*Larix leptolepis*)等树种进行人工造林,形成人工针叶纯林。在金沙江上游,天然常绿阔叶林采伐后人工造林,如云南松和华山松(*P. armandi*)人工林;

4) 人工林、次生林的镶嵌类型 天然林采伐后通过人工造林更新,但之后并未进行必要的森林抚育或者抚育措施不力,造成人工林成活率低,有时造林树种的生长状况甚至不如自然恢复的次生林树种。在川西亚高山地区,经常可以看到天然次生桦木林中有人工更新的痕迹。

1.2.2 构建退化天然林自然恢复状态的综合评价体系

马姜明等^[23]运用有序样本最优分割法定量划分了川西亚高山退化天然林的恢复演替阶段。基于川西亚高山为生物多样性的热点和敏感地区以及水源涵养、水土保持这两大关键生态系统服务功能。根据相似性原理提出了以 Bray-Curtis 指数、改进的老龄状态指数和改进的土壤-生态水文功能指数分别评价退化天然林不同恢复阶段群落与老龄林在物种组成、群落结构、以及土壤-生态水文功能三方面的恢复状态,并找出了影响恢复进程的主要因子。采用多因子综合评价法和指数构建法的森林退化度和恢复度综合评价方法,对川西亚高山退化森林的恢复程度和速度进行定量评价,并运用逻辑斯蒂模型分别对植被恢复过程中物种组成、群落结构和土壤-生态水文功能进行拟合,对恢复进程进行预测,并提出了加速恢复的对策^[24]。这一研究成果为天然林生态恢复评价及恢复预测提供了可借鉴的范例。另外,也有通过筛选一些能反映森林类型特征的敏感性指标,定量评价不同森林类型的近自然度^[25-26]。

1.2.3 典型区域退化天然林的生态恢复技术集成

(1) 天然次生林林隙调控更新和生态抚育技术

胡万良等^[27]通过 30 多年对低产、低质、低效次生林改造,人工更新红松的定位试验与调查研究,总结出了一套行之有效的阔叶红松林的恢复技术措施。包括:

①人工诱导异龄复层阔叶红松林技术 在空间上使次生林改造区在近期形成上层为次生林冠,中层为更

新针叶树,地表为经济植物的多层次、多功能的立体经营体系。在时间上巧用了生态位趋近饱和之前这个“时间差”,人为加入了各种名贵经济植物,有效利用了土地和太阳能。这不仅缩短了森林的演替过程,提高了森林质量,而且还充分利用了森林的营养空间,发挥了森林的多种资源价值,促进了森林的恢复和发展。同时为集体林权制度改革后林农发展林下经济提供了有利条件。

②人工诱导同龄阔叶红松林技术 对次生林进行皆伐改造,人工更新红松,最后一次幼林抚育时保留有培育前途的阔叶幼树,采取人工诱导措施培育阔叶红松林。通过对人工阔叶红松林进行抚育间伐,及时地调整了林分密度及针阔比例,既能为保留木创造良好的生长环境,提高林木胸径、材积生长量,增强林分稳定性,又可减少林木自然枯损,增加中间利用,对培育高产、稳定的人工阔叶红松林具有重要意义,提高辽东山区次生林经营技术含量。

(2)天然次生林封育改造与结构调整技术

与传统的“封山育林”一封了之不同,“封育改造”是通过分析天然次生林的具体情况,在“封”的前提下进行有针对性地改造,体现了人为诱导促进自然恢复演替作用^[22]。陈林武等^[28]通过对川西米亚罗天然林区植被分布、群落演替和封山育林情况调查,探讨了封山育林类型划分的原则和依据,划分了乔林型、乔灌型、乔灌草型、灌林型和灌草型 5 个类型组。根据同一类型组及不同类型组的具体情况确定了封禁、封补、封调、封改、封抚和封保等 6 种封育改造方式。天然次生林封育改造与结构调整技术成功应用在川西亚高山高密度天然次生桦木林生态恢复试验示范,调整了目标树种和伴生树种的比例,补植成活率、物种多样性、草被层盖度和个体总数明显增加,加速了亚高山退化天然林的生态恢复。

(3)天然林区严重退化地的植被重建技术

对严重退化生境或天然更新困难的立地,这种立地类型往往水土流失严重、表土流失或土壤瘠薄,需要采取必要的人工措施进行重建,依据严重退化生境的土壤状况和环境胁迫条件,进行树种筛选和群落构建,可以综合采用植树、种灌、种草等方法。对于稀疏灌木林、稀疏灌草丛、退化荒草地等严重退化地,在早期阶段可以引入一些先锋的固氮植物以增加土壤肥力、改善土壤物理性质,必要时可考虑施加复合肥促进植物定居^[3]。如在以严重退化云南松——地盘松(*P. yunnanensis* var. *pygmaea*)为主的林地上,栽植阔叶树种。在以阔叶灌木为主的林地上,栽植阔叶树种或云南松。在荒山荒地上,采取针阔混交或阔叶混交植被重建模式。筛选出适宜的乡土树种有旱冬瓜(*Alnus nepalensis*)、川滇桤木(*A. ferdinandi-coburgii*)、麻栎(*Q. acutissima*)、锥连栎、槲栎(*Q. aliena*)、滇青冈(*Cyclobalanopsis glaucoides*),以及马桑(*Coriaria nepalensis*)、车桑子(*Dodonaea viscosa*)、野古草(*Arundinella anomala*)等。其中,采用旱冬瓜作为生态恢复的驱动种,发挥其固氮改善土壤肥力和生长速度快的驱动效应,加速了严重退化林地的土壤功能恢复,与其它非豆科树种比较可缩短恢复时间 5 至 10a。

(4)天然林区人工针叶林近自然化改造技术

针对天然林区大面积的人工林提出了人工林近自然化改造的技术体系。从森林经营的宏观时空尺度(森林演替)、林分尺度(主林层结构)、物种尺度(优势树种光竞争)和林木个体尺度(个体差异和竞争关系)4 个层面结合近自然经营计划技术中的群落生境调查与制图、森林发展类型设计、目标树林分作业体系设计和生命周期经营计划形成一套完整的作业技术体系^[29]。该技术体系已经在海南、云南、四川、陕西、北京等地开展了近自然森林经营试点研究^[30]。

陆元昌等^[31]针对黄土高原地区油松人工林,通过目标树择伐作业、林下补植、保护天然更新等经营措施来调整群落结构和树种组成。该技术以树高垂直分层为标准,依次划分为森林建群阶段、竞争生长质量形成阶段、质量选择和生长抚育阶段、近自然阶段和恒续林阶段。根据每个阶段林分的主林层结构特征在林分层进行作业措施选择。蔡道雄等^[32-33]在广西南亚热带林区建立了人工针叶林定向改造与优质珍贵混交林培育技术模式。通过采用针叶林冠下栽种珍贵阔叶树种,同时保护林下灌草植被,保护和恢复生物多样性。调整人工针叶纯林的树种结构诱导形成复层空间异龄混交林;在景观层面采用斑块状混交,在空间布局上采取

“松戴帽,阔穿裙”方式调整景观配置结构,即在山坡上部发展以耐旱、耐瘠薄的马尾松林,在山坡下部发展乡土的大径材珍优阔叶树种。

(5)退化天然林恢复中的保留木经营调控技术

Miao 等^[34]研究发现在采伐 50a 后的川西亚高山红桦-岷江冷杉次生林中,大径级保留木的数量和分布对其他树木的空间分布具有显著的影响。大径级保留木在促进演替后期优势树种岷江冷杉的更新和生长的同时,制约了先锋树种红桦的更新和生长。在红桦-岷江冷杉林的次生演替中,保留木起到了关键性的促进作用。长江中上游的水源涵养林的森林生态系统服务功能尤为重要,因此,在对其进行经营的过程中,应改变传统的皆伐作业方式,利用保留木能为先锋树种创建适宜生境并影响了次生群落演替速度和方向的原理,采伐时应保留森林中的部分树木并对其进行抚育和经营。基于保留木综合生态效益的天然林或者人工林利用方式可为次生林的恢复提供更多的枯立木、倒木和保留木,相比皆伐这种方式,它减少了一定的经济效益,但却提供了更多的生态效益(野生动物栖息地、生物多样性、生态系统功能等)^[35]。

1.3 天然林景观恢复与空间经营技术

1.3.1 开发森林生态土地分类系统及森林生态系统管理决策支持系统

代力民等^[36]采用景观生态学的理论和方法,构建了基于空间技术和多源生态数据融合的森林生态系统经营管理系统,并以此为基础构建并注册了能够应用与林业生产实际的森林经营管理决策支持系统 [FORESTAR V1.0] (2004SR05259)。该系统主要包括以下关键技术:

(1)首先利用 SPOT 影像、DEM 和矢量化二类调查林相图,通过森林群落数量分类,找出影响森林分布的主要立地因子,划分生态土地类型,并确定适宜该土地类型的森林植被类型;将生态土地类型与现存的森林类型叠加,划分生态土地类型相,构建森林生态土地分类系统;

(2)将生态分类系统中的生态土地类型相与现行的森林调查体系相结合,以 GIS 为平台,建立同时满足二类和三类调查(采伐作业设计)的具有生态学意义的一致性小班体系。实现计算机辅助的数据准确、实时更新和信息管理;

(3)利用森林演替模型,基于林分水平模拟和预测采伐强度和恢复方案的经营效果;并利用森林景观模型,评价森林经营管理方案对森林景观结构、功能的影响,确定伐区的配置方式、采伐强度和恢复方案,直观地演示不同森林经营方案下的森林动态演化过程,为筛选针对不同目标的森林生态系统经营管理模式提供科学依据。该技术同时考虑了“近自然林业”和景观生态学的相关理论,并将复杂的理论转化为可操作的技术,使从景观方面来考虑生态恢复具有了可操作性,补充完善了以林分为基础的森林采伐更新技术体系。

1.3.2 天然林景观恢复与空间经营规划

罗传文^[37-38]、张丹等^[39]、许雪等^[40]和宋秋媛等^[41]应用空间技术和生态系统经营相结合,创建了天然林景观恢复与空间经营规划系统,研发并注册了具有完全自主知识产权的森林空间规划和虚拟林相及规划方案落实两个软件。这两个软件把线性规划、天然林经营、均匀度理论、虚拟现实等有机结合起来,应用于退化天然林景观的保育与生态恢复。该技术使森林空间规划可以运行上亿个变量的管理和规划,可以实现省级和国家级的中长期林业规划,可以把经营的对象落实到小班,实现从国家到小班的空间跨度的管理。

2 存在的问题和展望

在自然恢复方面,对天然林恢复的状态、恢复机理和恢复生态学过程研究较少,如何加速次生林结构和生态系统服务功能向老龄林方向发展的研究也相对缺乏。如何诱导人工林在结构和功能方面向“近自然林”转化的研究还相对缺乏。目前退化天然林恢复重建中需要解决以下问题:

(1)老龄林丧失及其景观破碎化后,如何开展遗传多样性的保护和恢复工作;

(2)天然更新或人工更新不成功后形成大面积的次生阔叶林。如何经营这些低价值的次生阔叶林,加快恢复其生态功能和生产力;

(3) 原生优势种群被大面积人工纯林替代,如何经营和调整这些人工纯林,是否需要恢复和如何恢复原生优势群落;

(4) 天然林区土地利用及土地覆盖变化过程中如何进行森林景观恢复和多目标景观规划实现景观格局的优化配置;

(5) 严重退化生境和次生灌草丛的恢复重建中,如何尽快恢复土壤结构与功能和维持定植群落的稳定性;

(6) 目前已取得的生态恢复成功案例还只是在小范围内试验示范,如何加速在生态环境条件相似的地区推广应用,并在具体的应用中根据具体情况对相应的技术进行适当修改完善。

另外,今后应加强退化天然林的快速定向恢复研究,通过演替驱动种甄别和功能群替代实现退化天然林的功能恢复,注意培育乡土的大径级、珍优阔叶树种,研究人工重建和自然恢复过程中群落的结构和功能的动态变化规律以及恢复群落的稳定性。以老龄模式林作为参照系,构建恢复重建评价标准与指标体系,对恢复重建效果进行综合评价、预测,探索天然林景观结构优化配置和多目标空间经营规划的方法,最终实现天然林的景观恢复与多目标可持续经营。

参考文献 (References):

- [1] 唐守正, 刘世荣. 我国天然林保护与可持续经营. 中国农业科技导报, 2000, 2(1): 42-46.
- [2] 马姜明, 刘世荣, 史作民, 刘兴良, 缪宁. 退化森林生态系统恢复评价研究综述. 生态学报, 2010, 30(12): 3297-3303.
- [3] 刘世荣, 等. 天然林生态恢复的原理与技术. 北京: 中国林业出版社, 2011.
- [4] 臧润国, 刘静艳, 董大方. 林隙动态与森林生物多样性. 北京: 中国林业出版社, 1999.
- [5] 臧润国, 余世孝, 刘静艳, 杨彦承. 海南霸王岭热带山地雨林林隙更新规律的研究. 生态学报, 1999, 19(2): 151-158.
- [6] 臧润国, 蒋有绪, 余世孝. 海南霸王岭热带山地雨林森林循环与树种多样性动态. 生态学报, 2002, 22(1): 24-32.
- [7] Zang R G, Wang B S. Study on canopy disturbance regime and mechanism of tree species diversity maintenance in the lower subtropical evergreen broad-leaved forest, South China. *Plant Biosystems*, 2002, 136(2): 241-250.
- [8] Deng F Y, Zang R G, Chen B P. Identification of functional groups in an old-growth tropical montane rain forest on Hainan Island, China. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(5/6): 1820-1830.
- [9] Zang R G, Ding Y. Forest recovery on abandoned logging roads in a tropical montane rain forest of Hainan Island, China. *Acta Oecologica*, 2009, 35(3): 462-470.
- [10] Ding Y, Zang R G. Effects of logging on the diversity of lianas in a lowland tropical rain forest in Hainan Island, South China. *Biotropica*, 2009, 41(5): 618-624.
- [11] 张志东, 臧润国. 海南岛霸王岭热带天然林景观中主要木本植物关键种的潜在分布. *植物生态学报*, 2007, 31(6): 1079-1091.
- [12] 张志东, 臧润国, 丁易. 海南岛霸王岭热带天然林景观中木本植物功能群划分及其潜在分布. *林业科学*, 2009, 45(10): 1-8.
- [13] 臧润国, 丁易, 张志东, 邓福英, 毛培利. 海南岛热带天然林主要功能群保护与恢复的生态学基础. 北京: 科学出版社, 2010.
- [14] 臧润国, 成克武, 李俊清, 张炜银, 陈雪峰, 陶建平, 等. 天然林生物多样性保育与恢复. 北京: 中国科学技术出版社, 2005.
- [15] 杨玲, 沈海龙, 梁立东, 刘春苹. 人工干燥和冷层积过程中的花楸树种子中内源激素含量变化. *植物生理学通讯*, 2008, 44(4): 682-688.
- [16] 杨玲, 沈海龙, 梁立东, 崔晓涛, 王爱芝. 不同产区野生花楸果实和种子的表型多样性. *东北林业大学学报*, 2009, 37(2): 8-10.
- [17] 王爱芝, 沈海龙, 张鹏, 李长海, 郭敏. 花楸合子胚发育的形态解剖学观察. *经济林研究*, 2012, 30(1): 133-137.
- [18] 王爱芝, 沈海龙, 黄剑, 李长海, 范少辉. 花楸嫩叶和茎段的愈伤组织诱导. *东北林业大学学报*, 2005, 33(2): 12-14.
- [19] 沈海龙, 高翔翔, 杨玲. 甘露醇、蔗糖和低温预处理对花楸体细胞胚诱导的影响. *植物生理学通讯*, 2008, 44(4): 677-681.
- [20] 王爱芝, 沈海龙, 张鹏, 尹永花, 李长海. 花楸组织培养中玻璃化现象的发生与防治. *东北林业大学学报*, 2009, 37(10): 18-22.
- [21] 杨玲, 沈海龙. 花楸体细胞胚与合子胚的发生发育. *林业科学*, 2011, 47(10): 63-69.
- [22] 刘世荣, 史作民, 马姜明, 赵常明, 张远东, 刘兴良. 长江上游退化天然林恢复重建的生态对策. *林业科学*, 2009, 45(2): 120-124.
- [23] 马姜明, 刘世荣, 史作民, 张远东, 陈宝玉. 川西亚高山暗针叶林恢复过程中不同恢复阶段的定量分析. *应用生态学报*, 2007, 18(8): 1695-1701.
- [24] 马姜明. 川西亚高山退化暗针叶林恢复评价的生态学基础及其对策[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.
- [25] 彭舜磊, 王得祥. 秦岭主要森林类型近自然度评价. *林业科学*, 2011, 47(1): 135-142.
- [26] 张俊艳, 成克武, 臧润国, 郎南军, 江期川, 王茜. 不同云南松群落近自然度评价及其评价指标体系的构建. *河北农业大学学报*, 2011,

- 34(3): 71-76.
- [27] 胡万良, 亢新刚, 谭学仁, 金鑫, 丁磊. 辽东山区阔叶红松林恢复技术. 林业实用技术, 2009, (4): 15-17.
- [28] 陈林武, 刘兴良, 牟克华, 宿以明. 川西米亚罗天然林保护区封山育林类型探讨. 四川林业科技, 2003, 24(1): 1-6.
- [29] 陆元昌, 雷相东, 洪玲霞, 宁金魁, 刘宪钊, 孟京辉. 近自然森林经理计划体系技术应用示范. 西南林学院学报, 2010, 30(2): 1-6.
- [30] 陆元昌, 张守攻, 雷相东, 宁金魁, 王懿祥. 人工林近自然化改造的理论基础和实施技术. 世界林业研究, 2009, 22(1): 20-27.
- [31] 陆元昌, 张文辉, 曹旭平, 雷相东, 宁金魁. 黄土高原油松林近自然抚育经营技术指南. 北京: 中国林业出版社, 2009.
- [32] 蔡道雄, 郭文福, 贾宏炎, 卢立华. 南亚热带优良珍贵阔叶人工林的经营模式. 林业资源管理, 2007, (2): 11-14, 65.
- [33] 蔡道雄, 郭文福, 贾宏炎, 卢立华, 李吉良, 陈金新. 人工林可持续经营技术的探索与实践——热带林业实验中心实施人工林生态经营的实践. 林业资源管理, 2008, (2): 42-46.
- [34] Miao N, Liu S R, Yu H, Shi Z M, Moermond T, Liu Y. Spatial analysis of remnant tree effects in a secondary *Abies-Betula* forest on the eastern edge of the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Forest Ecology and Management*, 2014, 313: 104-111.
- [35] 缪宁, 刘世荣, 史作民, 马姜明, 王晖. 强度干扰后退化森林生态系统中保留木的生态效应研究综述. 生态学报, 2013, 33(13): 3889-3897.
- [36] 代力民, 邵国凡. 森林经营决策——理论与实践. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2006.
- [37] 罗传文. 三维虚拟林相的制作技术研究. 林业科学, 2003, 39(3): 169-171.
- [38] 罗传文. 均匀度理论及其在混沌研究中的应用. 中国矿业大学学报, 2005, 34(4): 476-481.
- [39] 张舟, 罗传文, 柴造坡, 田爽. 森林经营空间规划软件联机帮助系统制作问题的解决方案. 森林工程, 2009, 25(2): 108-110, 114-114.
- [40] 许雪, 罗传文, 王刚. Remsoft 软件在森林经营空间规划中的应用. 森林工程, 2009, 25(2): 13-17.
- [41] 宋秋媛, 罗传文, 秦锐. FLPMS 软件在林业规划中的应用. 森林工程, 2010, 26(1): 88-90.