



Soil Ecological Processes in
Eucalyptus Plantations

桉树人工林 土壤生态过程

—— 郑华 张凯 陈法霖 等/著



科学出版社

桉树人工林土壤生态过程

郑 华 张 凯 陈法霖 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

桉树是世界三大速生丰产树种之一，其种植对生态系统的影响是近些年备受争议的重要议题。为了深入探讨桉树种植的生态影响，本书以桉树人工林土壤养分迁移、转化和交换过程为重点，研究了桉树取代天然次生林及桉树连栽对土壤理化性质、凋落物分解、土壤微生物群落结构与代谢功能的影响；分析了氮肥施用对桉树人工林土壤温室气体排放和养分淋溶过程的影响。

本书可供从事生态学、土壤学、林学、农学、环境科学及相关专业的高校师生和研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

桉树人工林土壤生态过程/郑华等著. —北京：科学出版社，2018.2
ISBN 978-7-03-056427-6

I. ①桉… II. ①郑… III. ①桉树属—人工林—土壤生态体系—研究
IV. ①S154.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第018200号

责任编辑：李 敏 杨逢渤 / 责任校对：彭 涛
责任印制：张 伟 / 封面设计：无极书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年2月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2018年2月第一次印刷 印张：9 1/2

字数：460 000

定价：128.00元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

| 前 言 |

桉树是桃金娘科桉属 (*Eucalyptus*) 植物的统称, 原产于澳大利亚和东南亚一带。20 世纪以来, 随着桉树速生、丰产和用途广泛的特征被人们逐步认识后, 桉树被广泛引种, 并被誉为世界三大速生丰产树种 (杨树、松树、桉树) 之一。联合国粮食及农业组织 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) 2000 年的统计显示, 全世界热带和亚热带地区桉树人工林面积达到 1786 万 hm^2 , 约占世界人工林面积的 1/10, 桉树成为世界上种植最广泛的阔叶树种。2009 年, 世界桉树人工林面积达到 2007 万 hm^2 。

我国是世界上桉树人工林 (*Eucalyptus* plantation, EP) 面积较大的国家。1990 年, 全国有 17 个省 (自治区、直辖市) 的 600 多个县引种桉树, 桉树人工林面积达到 67 万 hm^2 ; 到 2015 年, 全国桉树人工林面积达 450 万 hm^2 。其中, 广西是全国桉树人工林面积最大的自治区, 占全国桉树种植面积的 40% 以上, 广东、海南、福建、四川等地也营造了大面积桉树林。

为了促进桉树人工林的丰产和可持续经营, 国内外学者一方面围绕桉树的育种、繁殖、营林和病虫害防治等技术开展了大量研发, 另一方面针对桉树林经营管理过程中的林地生产力、植物多样性、土壤肥力、营林措施等开展了深入研究。然而, 部分研究表明桉树种植由于改变了原来的生态系统过程, 也会造成一些不利的生态影响, 如破坏区域水分平衡、增加水土流失和荒漠化、地力衰退和生物多样性丧失等。这些不利的生态影响引起人们对桉树种植和推广合理性的质疑。

土壤生态系统与森林地上部生物有着复杂的物质与能量的迁移、转化和交换, 是生物与环境间进行物质和能量交换的活跃场所, 是人工林植物生长所必需的营养物质的重要来源。土壤生态过程的变化直接影响森林营养库的大小、养分可获得性及林地经营的可持续性。为了深入探讨桉树种植的生态影响, 本书以桉树人工林土壤养分迁移、转化和交换过程为重点, 研究了桉树取代马尾松林和天然次生林 (natural secondary forest, NSF) 以及桉树连栽对土壤理化性质、凋落物分解、土壤微生物群落结构与代谢功能的影响; 分析了氮肥施用对桉树人工林土壤温室气体排放和养分淋溶过程的影响。

全书共分 8 章, 第 1 章回顾了桉树人工林的发展、主要经营措施及生态效应; 第 2 章介绍了本书中研究工作所采用的研究方法; 第 3 章阐述了桉树造林及其随后的连栽对植物多样性和土壤性质的影响; 第 4 章分析了桉树造林及其随后的连栽对土壤微生物群落结构和功能的影响; 第 5 章研究了桉树人工林施氮和土壤有机碳水平对土壤微生物群落的影响; 第 6 章探讨了桉树人工林施氮和土壤有机碳水平对土壤温室气体通量的影响; 第 7 章研究了桉树人工林施氮和土壤有机碳水平对土壤养分淋溶的影响; 第 8 章总结了本书的主要结论, 并

提出了桉树人工林生态系统可持续经营的建议。

本书写作分工如下：第1章，张凯、陈法霖、郑华；第2章，张凯、陈法霖、郑华；第3章，陈法霖、张凯、郑华；第4章，陈法霖、郑华；第5章，苏丹、陈法霖、郑华；第6章，张凯、李睿达、郑华；第7章，张凯、郑华；第8章，张凯、陈法霖、郑华；全书由郑华、张凯、陈法霖统稿并校稿。

本书研究工作得到国家自然科学基金(31170425；40871130)的资助，研究工作实施过程中得到了广西国有东门林场的大力支持，谨此表示诚挚的感谢。

由于作者研究领域和学识的限制，书中难免有不足之处，敬请读者不吝批评、赐教。

作者

2017年6月

| 目 录 |

第 1 章 桉树人工林发展、管理及效应	1
1.1 桉树人工林的发展	1
1.2 桉树人工林管理	3
1.3 桉树人工林生态效应	4
第 2 章 研究区域概况与研究方法	10
2.1 研究区域概况	10
2.2 实验设计与研究方法	11
2.3 数据分析	25
第 3 章 桉树造林和连栽对植物多样性和土壤性质的影响	27
3.1 桉树造林和连栽对植物多样性的影响	27
3.2 桉树造林和连栽对土壤理化性质的影响	29
第 4 章 桉树造林和连栽对土壤微生物群落的影响	36
4.1 桉树造林和连栽对土壤微生物群落结构的影响	36
4.2 桉树造林和连栽对土壤微生物群落功能的影响	58
4.3 桉树造林和连栽影响土壤微生物群落的因素	67
4.4 桉树造林影响土壤微生物群落的机制	79
第 5 章 桉树人工林施氮对土壤微生物群落的影响	82
5.1 施氮对土壤碳氮库的影响	82
5.2 施氮对土壤微生物群落结构的影响	85
5.3 施氮对土壤微生物群落功能的影响	89
第 6 章 桉树人工林施氮对土壤温室气体通量的影响	94
6.1 施氮对土壤 CO ₂ 排放的影响	94
6.2 施氮对土壤 CH ₄ 吸收的影响	99
6.3 施氮对土壤 N ₂ O 排放的影响	104

第 7 章 桉树人工林施氮对土壤养分淋溶的影响.....	110
7.1 桉树人工林土壤水分动态模拟	110
7.2 施氮对土壤溶液养分浓度的影响	113
7.3 施氮对土壤养分淋溶的影响	122
7.4 样地水平土壤养分淋溶量的估算	130
第 8 章 结论与建议.....	132
8.1 主要结论	132
8.2 桉树人工林管理建议	134
参考文献.....	136

第 1 章 | 桉树人工林发展、管理及效应

桉树是桃金娘科桉属 (*Eucalyptus*) 植物的统称, 原产于澳大利亚和东南亚一带, 因速生、丰产、耐贫瘠被世界各国广泛引种造林。早在 1961 年, Penfold 和 Willis 就编写了 *The eucalypts: Botany, cultivation, chemistry, and utilization*, 对桉树的生物学特征、栽培方法、引种和利用情况进行了系统介绍。我国学者祁述雄于 1989 年编写《中国桉树》, 2002 年再版, 系统全面地介绍了我国桉树引种、栽培和利用等方面的生产经验和研究成果。1999 年, 余雪标主编《桉树人工林长期生产力管理研究》, 收录了桉树人工林生产力、群落结构、养分循环、土壤肥力、生态问题和可持续经营理论等方面论文 20 篇。2008 年, 温远光主编《桉树生态、社会问题与科学发展》, 对桉树在社会和生态问题方面的争论与桉树科学发展战略进行了深入分析。结合上述研究, 本章主要总结桉树人工林的发展历史、管理状况和生态环境影响。

1.1 桉树人工林的发展

桉树原产于澳大利亚和东南亚一带, 因速生、丰产、耐贫瘠被世界各国广泛引种造林。

1.1.1 世界桉树人工林的发展

世界范围的桉树引种最早可追溯到 18 世纪末 ~ 19 世纪初。1804 年前后, 澳大利亚的桉树种子首次被带到巴黎, 随后被广泛播种; 1823 年, 智利在安第斯山区引种桉树; 1828 年, 南非在好望角引种桉树; 1843 年, 印度引种桉树; 1855 ~ 1870 年, 巴西大面积种植桉树。此外, 葡萄牙、西班牙、意大利、阿根廷、乌拉圭、巴拉圭、波多黎各、秘鲁、阿尔及利亚、突尼斯、厄瓜多尔、埃塞俄比亚、埃及、肯尼亚、尼日利亚、约旦、中国、日本、斯里兰卡等国家或地区也引种并营造了大面积的桉树人工林。

世界桉树人工林的发展经历了曲折的历程。Bennett(2010) 将桉树的全球发展分为四个阶段: 第一阶段, 1850 ~ 1900 年, 这段时间桉树被狂热地种植和扩张; 第二阶段, 1900 ~ 1960 年, 热带地区桉树种植失败; 第三阶段, 1960 ~ 2000 年, 桉树在热带地区的种植持续增加并获得成功; 第四阶段, 20 世纪末开始有对桉树的批判, 特别是在 1980 年的印度和泰国, 这种批判达到高潮。

早在 19 世纪, 许多国家和地区就开始从澳大利亚引种桉树, 包括印度、南非、巴基斯坦、

美国旧金山、马来西亚、巴西等。这个时期引种的桉树主要用于绿化观赏和科学研究。

到了 20 世纪，随着桉树速生丰产和用途广泛的特征被人们逐步认识后，桉树被热带地区广泛引种，并被誉为世界三大速生丰产树种（杨树、松树、桉树）之一（王正荣，2011）。然而，由于受育种和造林技术限制，许多热带地区的引种造林并不成功，这种状况持续到 20 世纪 50 年代。

20 世纪 60 ~ 80 年代，随着林业科学技术的飞速进步，特别是桉树的育种、繁殖、营林和病虫害防治等技术的发展，桉树人工林得到了快速发展。20 世纪 90 年代初，全球桉树人工林面积达到 1200 万 hm^2 ；联合国粮食及农业组织 2000 年的统计显示，全世界热带和亚热带地区桉树人工林面积达到 1786 万 hm^2 ，约占世界人工林面积的 1/10，桉树成为世界上种植最广泛的阔叶树种；2009 年的不完全统计显示，世界桉树人工林面积达到 2007 万 hm^2 ，种植面积较大的国家有巴西、印度、中国和南非等。

然而，桉树人工林的种植也引起了一些批评。早在 1983 年，印度的 Shiva 和 Bandyopadhyay 在 *Ecologist* 上发表论文，认为桉树种植破坏了区域水分平衡、增加水土流失和导致荒漠化，是印度的灾难性树种。1990 年，Lohmann 也在 *Ecologist* 上撰文，指出大规模的桉树经济林侵占了农民的土地，导致农民无地可种，转而开垦天然林，加速了天然林的破坏；商业精英和跨国公司成为桉树经济林发展的利益获取者，农民则抗议经济林占地和天然林破坏；其背后隐藏的经济发展、农村生计和环境保护之间的博弈引起了广泛关注。虽然桉树人工林的发展因经济、社会、生态环境问题出现过激烈的争论，但总体而言，世界桉树人工林发展迅速，桉树人工林面积呈指数增长趋势（图 1-1）。

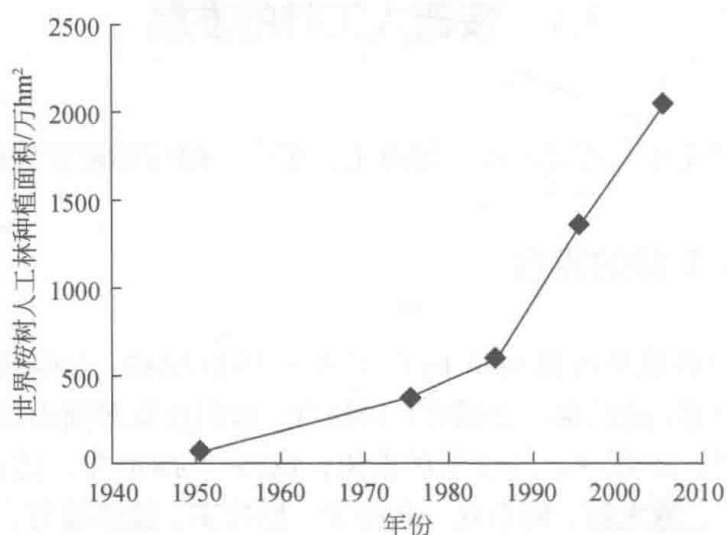


图 1-1 世界桉树人工林种植面积变化

资料来源：温远光，2008。

1.1.2 中国桉树人工林的发展

我国引种桉树时间较早，主要集中在南方交通方便的通商口岸城市。例如，1890 年从意大利引进多个品种的桉树到广州、香港和澳门等地，还从法国引进细叶桉到广西龙州；

1894 年,福州引种野桉;1896 年,昆明引种蓝桉;1910 年,四川引种赤桉;1912 年,厦门引进多个桉树品种等。我国早期引进的桉树主要作为庭园观赏树种和护路树种。

中华人民共和国成立以后,桉树的种植和研究得到了很大发展。20 世纪 50 年代初,广东湛江建立了粤西桉树林场(现国营雷州林业局);20 世纪 60 年代,广西钦州和南宁也办起了 10 余个经营桉树的国有林场;1972 年,成立了南方五省桉树科技协作组,20 世纪 80 年代初改为中国南方桉树研究会;1987 年,组建林业部桉树研究中心;1990 年成立桉树专业委员会,创办《桉树科技》杂志。20 世纪 80 年代后,开展了“中国-澳大利亚政府技术合作计划东门桉树示范林项目”(1981~1988 年)、“澳大利亚阔叶树种引种与栽培”等国际桉树合作项目,极大地促进了我国桉树人工林的发展。

到 1990 年,全国有 17 个省(自治区、直辖市)的 600 多个县引种桉树,桉树人工林面积达到 67 万 hm^2 ;2001 年,全国桉树人工林面积达到 154.5 万 hm^2 ;2010 年,达到 368 万 hm^2 (中国桉树研究中心数据);2015 年,达到 450 万 hm^2 。全国桉树人工林面积最大的省(自治区、直辖市)是广西,2010 年报道显示广西全区桉树人工林面积约为 165 万 hm^2 ,占全国桉树种植面积的 46%;此外,广东、海南、福建、四川等地也营造了大面积的桉树人工林。

1.2 桉树人工林管理

桉树人工林依据其经营目的分为用材林、经济林、防护林、风景林和薪炭林等,经营目的不同,其管理措施也有所不同。本书中,广西国有东门林场、海南儋州林场和白沙县桉树人工林的主要用途均为加工板材,其主要管理措施包括整地、施肥、松土、除草等,且采取多代连栽的经营方式。

1.2.1 连栽

我国桉树人工林主要是作为短轮伐期的工业用材林经营的,其中大部分采取多代连栽的经营方式。以广西国有东门林场为例,该林场桉树人工林主要是尾巨桉,轮伐期为 5 年,一般一代林植苗,二代林萌芽,三代林植苗,四代林萌芽,依次类推。萌芽更新作业法,是由采伐后的桉树保留伐根,从根基部的休眠芽或不定芽萌发生长起来的植株,经过培育长成树林,以达到经营人工用材林的目的的作业方法。萌芽林投资少,抗风能力强,生长量达到或超过一代植苗林,经济效益高。也有研究报道,人工林的多代连栽会造成地力衰退、生产力下降等问题(罗云建和张小全,2006)。

1.2.2 整地

整地是指通过造林地的除杂、深耕、松土,从而使土壤疏松,改善通气状况,提高蓄水能力,促进土壤养分释放和有效性提高,改善土壤理化性状。其目的是改善立地条件,从而有利于桉树幼林成活生长。因整地耗时多、工作量大、投资大,所以要因时因地认真选择。

桉树人工林的整地主要包括林地清理、整地方式和整地季节。

1) 林地清理。桉树种植前,如果林地杂草灌木较少,可以不清理林地;如果杂草灌木和高草植物较多,在整地前,要砍除灌木、挖起树根,将不作木材、炭薪的可燃部分平铺晒干后及时烧炼。烧炼期间需注意防火,烧炼后需及时整地,将草木灰翻入土壤中作肥料。有些地区,为防止水土流失,只清理杂木和残余物,保留部分地面杂草。对于松树或桉树林砍伐后再种植桉树的林地,除杂草灌木外,还需要根据具体情况决定是否要挖出松树或桉树的根。一般当挖则挖,可不挖的不挖,最好用除草剂抑制其萌芽,以免影响新造幼林的生长。另外,不挖树桩有助于裂土后林地的水土保持,且经济效益高。

2) 整地方式。整地的目的在于改良土壤,使其疏松,增强保水保肥透气能力,同时需要防止水土流失等问题。整地方式包括机耕全垦、推带裂土、人工全垦、人工带垦和撩壕整地等,一般应根据立地条件,选择不同的整地方式。机耕全垦适用于坡度小于 15° 的低丘和台地,一般翻土深度不小于30 cm。推带裂土适用于坡度 $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 的低山丘陵。一般先踏查路线,用推土机沿等高线推出2.5 ~ 3 m的水平带,在推好的水平带上裂土。对于不能使用机械作业的林地,可采用人工全垦、人工带垦或撩壕整地。

3) 整地季节。桉树人工林整地时间的选择要根据气候条件和营林计划而定。一般在温度较低、落了透雨、土壤已湿润时造林,林木成活率高,生长快。整地一般安排在造林前2 ~ 3个月,以便于土壤风化。我国大部分地区在造林前一年夏末秋初时进行林地清理,秋末冬初时进行整地,翻耕后的土经过冬晒和风化,有利于土壤养分的矿化,增加土壤养分有效性,促进幼林生长。

1.2.3 施肥

由于桉树速生、丰产、养分需求量大的特征,施肥已成为维持桉树人工林生产力的必要措施。我国的桉树人工林施肥实验在20世纪50年代就已经开始,至今各地的桉树人工林都采取基肥和追肥结合的施肥方式。桉树所施用的肥料包括有机肥、氮、磷、钾、钙和微量元素,大部分研究表明,施肥显著促进了桉树人工林生长,提高了林地生产力。然而,由于各地土壤条件不同、桉树品种不同,如何因地制宜选择肥料、肥料元素的配比、施肥的经济效益等仍是比较复杂和困难的问题,各地仍在调查研究 and 开展对比实验。

1.3 桉树人工林生态效应

目前,对桉树人工林生态系统的研究主要集中在林地生产力、植物多样性、土壤肥力和土壤微生物等方面。

1.3.1 林地生产力

相比于许多本土造林树种,桉树生长迅速,林地生产力高。但是桉树林通常采用连栽

的经营措施，而连栽会导致土壤退化、林地生产力下降等问题。余雪标等(1999)在广东雷州河头林场研究了连栽桉树人工林生长特征和树冠结构特征，发现林木平均树高、胸径、单株材积量、蓄积量、冠幅长度、体积和叶生物量随连栽代次(generation)增加而降低。各代次单株干材生物量占单株生物量比例为 84.5% ~ 86.6%，有随代次增加而稍有增加的趋势，皮、枝、叶生物量比例则有递减趋势；平均单株根量和根量密度均随连栽代次增加而递减。

然而，也有研究认为连栽并未导致桉树林生物量降低。朱宇林等(2005)在广西东门林场研究了连栽对尾巨桉林木生长特性的影响，结果发现，林木胸径、树高和蓄积量并没有出现下降的趋势，但其连年生长量已开始出现明显的衰退现象。梁宏温等(2008)在广西国有东门林场的研究发现，尾巨桉二代乔木层总生物量高于一代，但差异不显著；干材生物量占总生物量的比例随林龄增大而增加，干皮、枝、叶、根所占的比例随林龄增大而减少。

可见，不同地区的研究结果之间存在差异，这可能与桉树品系、土壤肥力和林地管理有关。本书在调查研究中发现，相比于广东和海南的桉树林地，广西地区的桉树林地土壤更为肥沃，病虫害少，且施肥管理更为合理。

施肥可以增加土壤养分含量和可利用性，从而增加桉树人工林林地生物量生产。余雪标(2000)研究了施肥对尾叶桉生长的影响，结果表明施肥处理显著增加了土壤养分含量，促进了树木生长，施肥处理的林木材积为不施肥处理的 9.8 倍。马强等(2010)研究表明，相比于不施肥处理，追施氮肥处理的桉树林林地生物量增加了 24%。另外，施肥也可以通过缓解环境胁迫对植物的影响而促进植物生长。万雪琴等(2012)研究发现，重金属(Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Pb^{2+})会胁迫巨桉生长，造成叶绿素含量、光合作用、PS II^①原初光化学反应量子产率等均显著降低，而增施氮肥可缓解重金属对植物的毒害，提高叶绿素含量和光合速率。

1.3.2 植物多样性

大量研究表明，桉树造林改变了林地植物多样性，但不同研究结果不同。一种观点认为桉树造林降低了林下植物多样性。刘平等(2011)通过野外调查发现，桉树人工林的林地植物多样性指数和均匀度指数均显著低于周围天然次生林。温远光等(2005)在广西国有东门林场的长期定位监测结果发现，第二代桉树林林下植物物种数比第一代降低 50%，香农-维纳多样性指数(Shannon Wiener's diversity index)、辛普森多样性指数(Simpson's diversity index)均下降，连栽降低了灌木层物种的丰富度和多样性，提高了草本层物种的丰富度和多样性，他认为短轮伐期是导致桉树连栽时物种多样性降低的主要因子。叶绍明等(2010)也发现尾巨桉林下植物多样性随连栽代次而显著下降。

另一种观点认为桉树造林增加了林下植物多样性。朱宏光等(2009)研究了广西钦州市马尾松和巨尾桉人工林林地植物多样性，结果表明，相比于马尾松林地，桉树人工林林地植物物种数较多，木本植物的香农-维纳多样性指数、辛普森多样性指数和均匀度指数无显著变化，而草本植物的三个多样性指数均显著升高，表明桉树造林提高了草本层物种多样性。黄勇等(2010)对海南桉树纸浆林的植物多样性进行研究，发现与其他经济林、荒坡地和次

① PS II，即 photosystem II complex，光系统 II。

生林相比,桉树林并没有明显抑制林下物种的生长,反而表现出更高的物种多样性和个体数,而且相比于公司经营,农户经营的桉树林林下草本物种丰富度较高。

桉树造林对植物多样性的影响可以从化感作用、人为干扰、土壤养分等方面进行解释。

首先是化感作用。化感作用指的是植物通过其自身分泌、挥发或残体分解过程,向环境中释放化学物质,从而影响周围植物或土壤微生物生长发育的现象(Rice, 2012)。大量研究发现,桉树叶片和果实等组织中含有几十种挥发性组分,如香树烯、 α -水芹烯、8-桉叶油素、蓝桉醇等,具有较强化感作用(Lisanework and Michelsen, 1993; Pereira et al., 2005; Batish et al., 2006)。这些物质通过凋落物和根系分泌物进入土壤,并在土壤中不断积累,抑制林下植物的种子萌发和幼苗生长。丘嫻等(2007)研究发现,尾叶桉的叶片挥发物和水浸提物对相思和南洋楹的幼苗生长表现出不同强度的抑制作用。郝建等(2011)研究发现,尾巨桉林土壤浸提液对菜心、白菜、水稻和萝卜的叶绿素、脯氨酸等多个生理指标均有显著影响。可见,桉树的化感作用可能是林下植物多样性降低的原因之一。但也有研究认为,在自然环境下,桉树林化感物质的浓度并不足以对林下植物的萌芽和生长造成抑制。

其次是人为干扰。桉树人工林需要翻耕、整地、除草等管理,人为干扰强度极大,是影响桉树林林下植物多样性的重要因素。中度干扰假说认为,中等程度的干扰频率能降低个别物种的优势度,维持群落的物种多样性,而干扰过度或者不足则会降低群落多样性,这可能解释了不同研究中桉树林林下植物多样性变化的差异。钟宇等(2010)研究了巨桉人工林草本层物种的生态位,认为草本层优势种种间关系连接性不强,较为松散,分布相对独立,物种间的生态位重叠相对较低,这可能导致桉树林林下草本层物种多样性升高。

最后是土壤养分。林地植物多样性与土壤养分有着密切关系。一方面,林下植物多样性可能通过改善微生境,促进土壤养分的保持和积累;另一方面,较高的土壤养分和可利用性支持了较高的地上植物多样性。叶绍明等(2010)研究了桉树连栽植物多样性与土壤理化性质的关系,发现随桉树连栽代次增加,林下植物多样性和土壤理化性质均呈下降趋势,植物多样性指数与土壤容重、pH、有机质、氮、磷、钾、钙和镁等存在显著关系。杨再鸿等(2007)在海南的研究也发现桉树林林下植物多样性与土壤速效氮、磷显著相关。

1.3.3 土壤肥力

土壤肥力是维持人工林生态系统生产力的基础。研究表明,桉树造林会改变土壤物理结构、养分总量和可利用性、微生物群落结构和功能,影响土壤肥力(Vitousek et al., 1987a; Vitousek and Walker, 1989; Sicardi et al., 2004; Berthrong et al., 2009),但不同研究的结果并不一致。

大部分研究表明,桉树造林显著降低了土壤持水能力、有机碳、养分元素、微生物生物量和代谢活性。邹碧等(2010)研究发现,相比于阔叶混交林大幅提高土壤持水能力,桉树林土壤长期保持板结状态,土壤持水能力没有改善。Lemenih等(2004)在埃塞俄比亚的研究发现,相比于农业用地,桉树人工林土壤全碳、全氮、盐基饱和度、阳离子交换量、可利用磷、钾和交换性钙显著较低,表明桉树造林引起了土地退化。茶正早和黎仕聪(1999)、Behera和Sahani(2003)、Sicardi等(2004)研究表明,与天然次生林或牧场相比,桉树人工

林土壤有机碳、总氮、速效氮、磷、钾显著较低。

Chen 等 (2013) 发现马尾松林转变为桉树林后, 土壤微生物代谢活性显著下降。李宁云等 (2006) 比较了旱冬瓜、果园、云南松和桉树林土壤酶活性, 发现桉树林土壤蔗糖酶、蛋白酶、脲酶和过氧化氢酶活性均最低。谭宏伟等 (2014) 研究发现桉树林土壤 β - 葡糖苷酶、蛋白酶和酸性磷酸酶活性显著低于马尾松林和天然次生林。

桉树的种植年限和代次也会影响土壤肥力。余雪标 (2000) 对雷州林业局不同代次桉树林土壤肥力进行研究, 发现土壤养分随连栽代次增加而降低。华元刚等 (2005) 对海南桉树林土壤养分调查发现, 桉树种植 6 ~ 10 年后, 土壤有机质和全氮分别降低约 10%, 速效磷降低约 30%。桉树种植 20 年后的采伐迹地土壤有机质降低了 44%, 全氮降低了 79%。在桉树种植 40 年后, 有机质下降 60% ~ 95%, 全氮降低 100% ~ 220%, 全磷下降 44% ~ 72% (廖观荣等, 2002)。明安刚等 (2009) 和叶绍明等 (2010) 也发现类似结果。马晓雪等 (2010) 研究了天然林和坡耕地转变为桉树林后土壤养分含量的变化, 结果表明, 天然林转变为巨桉林会造成土壤养分降低, 但这种情况可能随着栽种年限的增加有所缓解, 同时, 坡耕地转变为巨桉林后, 土壤养分含量随栽种年限的增加而增加。

桉树造林降低土壤肥力可能由树种变化、轮伐期、林下植被、炼山和翻耕等因子及其相互作用造成。桉树为速生丰产树种, 养分需求量大, 易造成土壤养分过度消耗 (项东云, 2000)。采伐是人工林养分输出的主要途径, 据研究报道, 桉树采伐时带走的养分量 (包括树干的全部及枝、叶、皮、根等部位) 的质量分数占林木养分含量的 80% (廖观荣等, 2003)。相比于天然林和其他人工林, 桉树人工林轮伐期仅为 5 年, 较短的轮伐期意味着频繁的林木采伐和大量的养分输出, 从而造成土壤碳、氮等养分含量的降低 (余雪标, 2000)。

林下植被不仅可以改善微生境, 促进土壤微生物生长和酶活性提高, 还能缓解降雨侵蚀和减少养分流失。但在桉树林管理时, 为了减少生长初期林下植物和桉树的养分竞争, 营林者会在桉树种植后的前 3 年施用除草剂, 破坏和抑制林下植被的生长, 从而导致桉树林地微环境较差, 土壤微生物生物量和酶活性均较低, 同时, 也更容易受降雨侵蚀, 造成水土流失和养分淋溶 (于福科等, 2009)。

炼山是林地转化和桉树连栽过程中土壤有机质和养分流失的重要环节。研究表明, 炼山往往会造成土壤有机质含量降低 (杨尚东等, 2013) 或某些挥发性养分损失 (Fisher and Binkley, 2000)。同时, 高温会杀死一部分热敏感的微生物, 或通过改变土壤理化性质, 造成土壤微生物生物量和土壤酶活性的降低 (de Marco et al., 2005)。另外, 炼山也清除了地表植被和凋落物层, 造成了土壤裸露, 易受降雨侵蚀 (余雪标, 2000)。

桉树造林前的翻耕整地旨在疏松土壤, 促进根系生长, 但往往也会破坏土壤结构, 加快土壤有机质的分解 (Turner and Lambert, 2000), 造成土壤碳、氮含量的下降。另外, 翻耕造成的土壤结构破坏, 加之炼山对林下植被和凋落物层的清除, 以及除草剂对林下植被生长的抑制, 在降雨集中的季节, 极易造成严重的水土流失。有机质是土壤微生物的能量来源, 也是酶的底物 (李秀英等, 2005)。马尾松林转变为桉树林后, 土壤碳、氮含量的降低可能直接造成纤维二糖水解酶、过氧化物酶、蛋白酶和脲酶活性的降低, 或通过降低土壤微生物生物量, 影响酶活性 (张凯等, 2015)。

而另一些研究则认为桉树造林对土壤肥力无显著影响或提高了土壤肥力。在夏威夷进行的一系列研究发现,甘蔗地转变为桉树人工林后,土壤中来自于甘蔗的有机碳比例降低,而来自桉树的有机碳比例增加,但土壤有机碳总量并未发生变化(Bashkin and Binkley, 1998; Binkley and Resh, 1999)。Mishra 等(2003)在印度的研究表明,桉树种植3年、6年、9年后,钠质土壤的理化性状都有所改善,有机碳、总氮、可利用磷,以及可交换钙、镁、钾离子均有所增加,且改善的效果随着树龄增加而增加。Ashagrie 等(2005)分析了埃塞俄比亚天然林转变成桉树林21年后土壤质地和有机质含量的变化,发现转变前后土壤20 cm深的总有机碳、氮、硫的浓度和储量并没有显著变化。Maquere 等(2008)研究发现灌木稀树草原转变为桉树林后,不管是短期轮伐还是持续生长,经过60年后,表层土壤碳储量显著增加。Pulrolnik 等(2009)研究发现,热带稀树草原转变为桉树人工林后,土壤有机碳并没有发生改变。邓荫伟等(2010)研究发现10年林龄桉树林土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾含量均接近或超过马尾松和杉木林。

不同研究结果之间的差异,可能与桉树品种、土壤特征、土地利用变化类型和林地的管理(轮伐期、炼山、翻耕、施肥和除草等)有关。总体来说,相比于大径材桉树品种,作为纸浆林的小径材桉树品种通常轮伐期短,养分输出多,对土壤肥力的消耗严重。从原始林或次生林转变为桉树林通常会导致土壤肥力降低,而从盐碱地和农田转变为桉树林会导致土壤肥力升高,这是比较对象本身的差异所致。

1.3.4 土壤微生物

微生物在森林生态系统的凋落物分解和土壤养分循环过程中发挥着不可替代的作用(van der Heijden et al., 2008; Chapin et al., 2002; Hawksworth, 2001)。大部分研究表明,桉树造林显著改变了土壤微生物群落的结构和功能,但不同研究结果并不一致。

有研究认为桉树造林降低了土壤微生物生物量、改变了微生物群落结构、降低了微生物代谢功能。例如,Behera 和 Sahani(2003)、Sicardi 等(2004)发现,与天然次生林和牧场相比,桉树人工林土壤微生物群落的生物量和代谢熵均显著降低。王冠玉等(2010)比较了杉木林、相思林、灰木莲和桉树林土壤微生物群落结构,发现桉树林土壤细菌数量较少,而真菌和放线菌数量较多。谭宏伟等(2014)研究发现,桉树林土壤可培养微生物数量、微生物生物量碳、氮,细菌多样性和碳氮磷转化相关酶活性均低于天然阔叶林。

然而,也有研究认为桉树造林增加了或没有改变微生物数量。冯健(2005)研究发现,相比于青冈次生林,巨桉人工林土壤微生物生物量较高,且以好气性固氮菌、根瘤菌、氨化细菌和有机磷分解菌为优势类群。Pulrolnik 等(2009)发现,由原生的热带稀树草原转变为桉树人工林后,土壤微生物生物量碳、氮并没有发生改变。

另外,随着桉树种植年限和代次的增加,土壤微生物群落结构和功能也会发生变化。张丹桔(2010)研究发现,巨桉人工林土壤微生物总数从轮伐期前至轮伐期(1~5年)降低,此后随林龄增加显著升高;土壤微生物的香农-维纳多样性指数和 Pielou 指数在轮伐期前(1~4年)有波动的增加,而后随林龄逐渐减小,但辛普森多样性指数则呈相反趋势。胡凯和王微(2015)研究发现,桉树人工林根际土壤中细菌和真菌数量、氮转化基因(*nifH*、

amoA、*nosZ*) 和土壤酸性磷酸酶、 β - 葡糖苷酶、多酚氧化酶和过氧化氢酶活性随种植年限的增加而降低。杨远彪等 (2008) 研究发现, 桉树林土壤果聚糖蔗糖酶活性随着连栽代次的增加而降低。

桉树人工林对土壤微生物群落的影响是多途径的, 大致可从以下四个方面分析: ①桉树的速生特性导致土壤养分的消耗严重, 土壤微生物可能因养分资源缺乏而受到影响。②桉树通过凋落物分解和根系分泌物, 影响土壤微生物。与天然林相比, 桉树人工林的凋落物组成多样性较低, 且凋落物分解和根系分泌都会产生化感物质, 可能会改变土壤微生物的群落结构和功能 (胡亚林等, 2005)。③桉树通过改变林下植物多样性和丰富度, 间接影响土壤微生物。④桉树种植过程中, 林地管理措施 (混交林、施肥、炼山等) 直接影响土壤结构和养分特征, 进而改变土壤微生物群落结构和功能。例如, 桉树与其他树种 (豆科牧草、相思、黄檀等) 的混交林土壤微生物总数要高于纯林 (刘月廉等, 2006; 谢龙莲等, 2007; 黄雪蔓等, 2014), 适度地砍伐扰动会增加土壤微生物生物量和酶活性 (杨鲁, 2008)。

第2章 | 研究区域概况与研究方法

为了明确桉树人工林的生态环境效应,本书以我国桉树种植大省(自治区、直辖市)——广西壮族自治区和海南省的典型桉树人工林为研究对象,主要开展以下两方面研究:①天然次生林转化为桉树人工林和桉树连栽实验(天然次生林为对照,2代、3代、4代桉树人工林连栽),旨在明确桉树造林和连栽对土壤肥力及微生物群落的影响;②不同土壤有机碳水平桉树林的施氮实验,旨在明确施氮对桉树人工林土壤微生物群落结构和功能、温室气体排放和养分淋溶的影响,及其与林地土壤有机碳水平的交互作用。

2.1 研究区域概况

研究区域为广西壮族自治区和海南省的典型桉树人工林。主要研究区域有两个,广西壮族自治区崇左市扶绥县东门镇的广西国有东门林场和海南省的白沙黎族自治县细水乡龙村小流域和儋州市儋州林场。

2.1.1 广西国有东门林场

该研究区域位于广西壮族自治区崇左市扶绥县东门镇岭南村、那江村、板包村小流域,地理坐标位置为北纬 $22^{\circ} 14' \sim 22^{\circ} 40'$,东经 $107^{\circ} 50' \sim 107^{\circ} 84'$ 。该地区地势低平,以低丘、台地为主,有少量石灰岩石山出露。海拔 $100 \sim 300 \text{ m}$,坡度 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$,少部分达 $20^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 。

该地区属于北热带季风气候区,太阳辐射强烈,光热充足,雨热同季,夏湿冬干,年平均气温 $21 \sim 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$,最冷月平均气温 $13 \sim 14 \text{ }^{\circ}\text{C}$,最热月平均气温 $27 \sim 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$,极端高温 $38 \sim 41 \text{ }^{\circ}\text{C}$,极端低温 $-4 \sim 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。受十万大山影响,雨量偏少,年降雨量 $1100 \sim 1300 \text{ mm}$,主要集中在 $6 \sim 8$ 月,占全年降雨量的50%以上;年蒸发量 $1192 \sim 1704 \text{ mm}$,大于降雨量;相对湿度 $74\% \sim 83\%$;年日照时数 $1634 \sim 1719 \text{ h}$,日照率38%,太阳辐射总量 $440 \sim 452 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

该区域土壤以砂页岩发育而成的赤红壤为主,有少量红壤和石灰土。土壤发育完整,土层深厚,质地为壤土或轻黏土,土壤pH为 $4.5 \sim 6.0$,土壤肥力较低,有机质含量 $13 \sim 37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,通常低于 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤全氮、全磷和全钾含量分别约为 $1.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.97 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷明显缺乏。