中国生态农业学报 2009 年 3 月 第 17 卷 第 2 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, March 2009, 17(2): 393−398

DOI: 10. 3724/SP.J.1011.2009.00393

桉树人工林生态退化与恢复研究进展*

于福科[1] 黄新会[2] 王克勤[2] 段昌群[1**]

(1. 云南大学生命科学学院环境科学与生态修复研究所暨云南生物资源保护与利用国家重点实验室培育基地 昆明 650091; 2. 西南林学院环境科学与工程系 昆明 650024)

摘 要 针对近年关于桉树人工林生态环境效应的争论, 简要分析了国内外在桉树人工林生态退化与恢复领域的最新研究进展, 并形成 3 点认识: 桉树人工林生态退化通常表现为林地土壤退化、生物多样性减弱和生产力下降, 而林地水土流失、人类不合理活动及桉树的化感作用是导致生态退化的重要原因; 桉树人工林的生态恢复必须采取科学的技术对策, 如开展水土保持、保护生物多样性、调控林地生产力; 未来对桉树人工林生态退化及其恢复研究的主要方向可能是从多学科交叉的角度和在分子、细胞水平上研究桉树的生态适应性与生态环境效应, 其重点是探索桉树与其他外来植物的生态学关系。本文为桉树人工林的持续经营及客观、科学地评价其生态环境问题提供了一定依据。

关键词 桉树人工林 生态退化 生态恢复 化感作用 生态适应性

中图分类号: S792.39; S718.55+1.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2009)02-0393-06

An overview of ecological degradation and restoration of *Eucalyptus* plantation

YU Fu-Ke[1], HUANG Xin-Hui[2], WANG Ke-Qin[2], DUAN Chang-Qun[1]

(1. Laboratory for Conservation and Utilization of Bio-Resource & Institute of Environmental Sciences and Ecological Restoration, School of Life Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, China; 2. Department of Environmental Science & Engineering, South-West Forestry College, Kunming 650024, China)

Abstract New research advances in ecological degradation and restoration of *Eucalyptus* plantation were analyzed from the point of view of eco-environmental effect of *Eucalyptus* plantation in recent past. Three cognitive conclusions were arrived at: Ecological degradation of *Eucalyptus* plantation usually leads to soil degradation, decrease in biodiversity and forestland productivity. These are mainly driven by soil and water loss in forestlands, unreasonable human activity and allelopathic effect of *Eucalyptus* species. Scientific strategy and technology such as soil and water conservation, biodiversity protection and forestland productivity regulation must be implemented in ecological restoration of *Eucalyptus* plantation. Multi-disciplinary research on ecological adaptability and eco-environmental effect of *Eucalyptus* species at molecular and cellular levels could be a promising direction of future studies on ecological degradation and *Eucalyptus* plantation restoration. Moreover, exploring ecological relationship between *Eucalyptus* species and other exotic plant species is key to successful future studies.

Key words *Eucalyptus* plantation, Ecological degradation, Ecological restoration, Allelopathy, Ecological adaptability

(Received April 18, 2008; accepted July 3, 2008)

桉树(*Eucalyptus*)是 19 世纪末引入我国的一种外来树种, 现已成为我国南方地区营造工业人工林的重要树种, 目前其种植面积超过 170 万 hm^2, 估计 2010 年将接近 250 万 hm^2。大面积种植桉树, 有力地推动了我国木材经济的快速发展。然而, 桉树人工林的生态退化严重影响区域环境健康与可持续发展已是一个不争的事实。本文对桉树人工林的生态退化与恢复方面的研究进展作以分析, 以期为桉树

* 云南省应用基础研究计划面上项目(2007C022M)、国家交通部规划研究院项目、云南大学首届学术创新团队计划项目和西南林学院面上科研基金项目资助

** 通讯作者: 段昌群(1966~), 男, 汉族, 博士, 教授, 主要从事生态毒理学及生态经济学领域的科研与教学研究。E-mail: chqduan@ynu.edu.cn
于福科(1976~), 男, 汉族, 博士, 讲师, 主要从事化学生态学与入侵生态学研究工作。E-mail: gsyfk2006@ynu.edu.cn

收稿日期: 2008−04−18 接受日期: 2008−07−03

人工林的持续经营及客观、科学评价其生态环境问题提供理论指导。

1 桉树人工林的生态退化

1.1 林地土壤退化

桉树林地土壤退化问题尤为普遍。据报道，我国广东、海南、广西、云南、四川、福建等地均有大面积桉树林地发生土壤退化[1, 2]，国外也发现桉树林地土壤退化现象[3, 4]。

桉树林地土壤退化一般有 4 种形式：①土壤剖面形态退化，如雷州半岛种植几十年桉树后，林地土壤剖面难于区分 A 层和 B 层，原生 A 层变薄甚至消失[5]；②土壤物理性质退化，如水分状况恶化，黏粒下移，表层沙化，团粒结构变差，表层趋向紧实[3,6]；③土壤化学性质退化，如土壤酸化和养分贫瘠化[7,8]；④土壤生物性质退化，如桉树林地土壤微生物数量和酶活性与其他林型比较有所下降[9,10]。

导致桉树林地土壤退化的原因错综复杂。目前，被多数学者认同的观点大致有如下几种:①林地水土流失严重。桉树人工林生态系统由于植物种群单一，结构简单，林冠对降雨的截留、枯落物对降雨的保蓄作用均较弱[11,12]。②人类不合理活动不利于桉树人工林土壤肥力保持。如将林下凋落物取走,干扰了土壤养分的生物积累过程；桉树全树利用方式增加了人工林系统的养分输出；造林前采用机耕全垦，促进了水土流失；火烧采伐后剩余物造成有机物损失[13,14]。③桉树的化感作用。桉树属于人工引进的物种，但其种群繁衍对生境土壤质量的影响也与其化感作用密切关联。有研究显示：桉树可通过多种途径向环境释放化感活性物质[15−18]，这些物质在土壤中不断累积或转化，可直接对土壤的理化性质产生一定的扰动作用[1,19],从而影响人工林本身的发育[20,21]，或间接影响土壤中动物和微生物群落[9,22]以及林间动、植物的生长发育及其群落演替[23,24]，最终导致土壤水分、养分状况恶化[3,8]。

1.2 生物多样性减弱

桉树人工林的生物多样性下降与立地土壤退化密切相关。一方面，土壤退化使林内原有动、植物和微生物的生境遭受破坏，从而导致整个生态系统的物种多样性下降；另一方面，物种多样性下降后，群落结构趋于简单，系统的自我调节和保护功能减退，使林地土壤的水分和营养状况更加恶化。

1.2.1 林间生物多样性减弱

国外对桉树林林间生物多样性减弱问题已有不少研究报道。如 Ramanujam 等[25]对干热常绿森林的植物多样性和木本植物群落结构的分析表明:人为保护条件下，Oorani 灌丛带的植物多样性和木本植物群落结构保持原有的较高水平，但 Lagapuram 灌丛带在桉树人工林建植后严重退化，从而确定桉树是引发 Lagapuram 灌丛带退化的重要因素。Eshetu 等[26]对高地蓝桉(*Eucalyptus globulus*)人工林中乡土木本植物多样性的研究显示: Menagesha 地区蓝桉人工林乡土木本植物的丰富度和数量比 Chancho 地区高 2.4 倍和 5.7 倍，其原因是 Menagesha 地区蓝桉人工林中保存了原有的天然植被，而 Chancho 地区蓝桉林中的天然植被已经毁灭。在巴西的一些地区，由于桉树林下植被稀少，林间鸟类的多样性和丰富度较大西洋森林保护区显著下降[27]。澳大利亚新南威尔士州台地的桉树人工林衰落过程中，林间生物多样性同期发生减退[28]。

20 世纪 80 年代以来，我国学者逐渐开始关注桉树人工林的生物多样性问题。如在广东电白县小良试验站桉树人工林生物多样性的调查中发现：桉树林下只有少数地方长有零星的草本植物和芒萁(*Dicranopteris pedata*)等蕨类植物；昆虫因林下植物种类单一而受到限制，其种类和数量仅比裸地略多；林下脊椎动物的种类和数量也显著下降[29]。近年对桉树人工林生物多样性问题进行了深入分析，并取得一定研究成果。如：在广西国有东门林场同一林区 18 块 4 m^2 样方连续 6 年的监测结果表明，第 2 代桉树林植物多样性比第 1 代减少 50%，物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数分别比第 1 代减少 39.39%、17.76% [30]。在 1 个经营周期(6~7 a)内，桉树人工林维持的物种多样性的高低取决于初始植物繁殖体组成的丰富程度，高强度干扰的连栽方式使某些高竞争力的物种或以种子(果实)传播的物种丧失，造成下一代林地初始植物繁殖体组成多样性的降低，从而使桉树连栽林地的物种多样性逐渐下降[30]。对桉树林分枯落物分解微生物的研究发现，在桉树纯林，无论是细菌、真菌还是放线菌，其种类、数量均较混交林低[31]。

1.2.2 土壤生物多样性减弱

土壤生物多样性减弱是桉树林地生物多样性问题的一个重要方面。西班牙学者 Souto 等[32]分析了几种树种对土壤微生物群落的影响，发现在林地植物盛花的春季，蓝桉对立地土壤中亚硝化单胞菌的细胞数量有不利影响，同时对土壤中的蛋白水解微生物显示出一定的毒性。李志辉等[33]的研究表明，桉树人工林地土壤酶活性显著低于对照林地(杉木林地)，且在立地条件好、栽培时间短的桉树林地，土壤酶活性较高。实际上，我国学者在早期研究中

就发现桉树人工林的土壤动物比其他各类生境少。如在广东电白县小良试验站, 桉树人工林的土壤动物主要有蚯蚓、线虫和等翅目昆虫, 多样性指数为 1.29, 总生物量为 1.57 g · kg^{-1}; 而混交林土壤动物主要有蚯蚓、同翅目和鳞翅目昆虫幼虫, 多样性指数为 1.80, 总生物量为 18.0 g · kg^{-1} [34]。相比之下, 纯桉林土壤动物多样性比混交林要低得多。

1.2.3　生物多样性减弱的成因

由于桉树林的物种多样性变化与林地土壤质量演变之间存在一定的因果关系, 因此, 生物多样性下降在成因上与土壤退化问题具有相似性, 这里不再一一赘述。但需要强调的是: 作为一种外来树种, 桉树的化感作用为其在新生境的生长和定殖提供了“Novel weapon”[35−37], 同时也是导致桉树人工林生态系统物种多样性减弱的重要动因。因此, 从化学角度分析桉属植物对其人工林生态系统物种多样性的影响已引起各国学者的关注。

目前, 桉属植物化学研究主要集中于化学成分分析和生物活性测定。在化学成分研究方面, 以挥发物质和精油组分分析居多。如: Batish 等[16]从柠檬桉(*E. citriodora*)幼嫩叶(或衰老叶)、成熟叶、枯落叶的精油中分别鉴定出 19 种、23 种、20 种挥发性物质。特征单萜类物质 Citronellal(香茅醛)在幼嫩叶和衰老叶中的含量较高(占精油总量 77%~78%), 但在成熟叶和枯落叶中的含量较低(分别为 48%和 54%); 另一种重要单萜类物质 Citronellol(香茅醇)在成熟叶中的含量较高(占精油总量 21.9%), 而在其他叶中的含量却很低(占精油总量 7.8%~12.2%)。Pereira 等[38]从葡萄牙蓝桉果实的精油中鉴定出 33 种组分, 并测知这些组分的含量分别是精油总量、萜类物质总量和半萜类物质总量的 94.5%、50.4%和 49.6%; 鉴明物质的主要组分是 Aromadendrene(香树烯, 25.1%)、Alpha-phellandrene(α-水芹烯, 17.2 %)、1, 8-cineole(1, 8-桉叶油素, 11.7 %)、Ledene(喇叭烯, 5.83 %)和 Globulol(蓝桉醇, 5.23 %)。Ziria 等[39]从摩洛哥 9 种桉树品种(*E. cinerea*、*E. baueriana*、*E. smithii*、*E. bridgesiana*、*E. microtheca*、*E. foecunda*、*E. pulverulenta*、*E. propinqua*、*E. erythrocorys*)叶的精油中鉴定出 83 种组分, 其中, 1, 8-cineole 在 9 种桉树叶精油中的含量均较高(>68%), 甚至在前 5 种桉树叶精油中其含量高达 80%以上。在生物活性研究方面, 近年也报道不少成果。如 Batish 等[15,16]已证实柠檬桉腐烂叶的精油及其主要组分(Citronellal、Citronellol)对杂草 *Cassia occidentalis*、*Echinochloa crus-galli* 的种子萌发和根系伸长具有抑制作用, 其新鲜叶和枯落叶的精油及其主要组分(Citronellal、Citronellol)对两种杂草 *Amaranthus viridis*、*E. crus-galli* 显示植物毒性。丘娴等[40]的研究显示: 尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)叶片的自然挥发物和不同浓度水抽提物对台湾相思(*Acacia confusa*)、大叶相思(*A. auriculaeformis*)、马占相思(*A. mangium*)和南洋楹(*Albizia falcataria*)的幼苗生长显示不同强度的化感抑制作用。其中, 对大叶相思的抑制作用最不显著, 从而建议将其作为尾叶桉的理想伴生种。刘小香等[41]研究发现巨尾桉(*E. grandis*×*E. urophylla*)挥发油乳液对粉蕉枯萎病菌(*Fusarium oxysporum*)、水稻稻瘟菌(*Pyriculerie grisea*)、香蕉胶胞炭疽菌(*Glorosprium musarum*)、胡椒疫霉病菌(*Phytophthora capsici*)等病原真菌和斜纹夜蛾(*Spodoptera litura* Fabricius)、棉铃虫(*Helicoverpa armigera* Hubner)等有害昆虫均显示化感抑制作用。随着巨尾桉挥发油乳液浓度的增大, 其对真菌和昆虫的抑制作用明显增强。对挥发油组分的化学鉴定显示: 萜烯类化合物在巨尾桉挥发油对真菌和昆虫的抑制活性中起主要作用。Singh 和 Sharma[17]的研究指出细叶桉(*E. tereticornis*)叶片的精油成分和根系的乙醇提取物具有显著的抗细菌活性。Amakura 等[42−44]的研究结果则表明, 桉树叶片提取物的主要组分 Gallic(没食子酸)和 Ellagic acids (鞣花酸)具有抗氧化作用, 等等。预示着桉属植物化学尤其是桉树的化感作用不可避免地影响人工林生态系统的物种多样性与群落演替。

实际上, 从桉属植物中发现的生物活性物质已达数百种, 然而目前桉属植物化学研究仅涉及其中的 20 余种, 因此, 有必要对桉树的活性化学物质进行更为深入的研究, 尤其需要针对活性化学物质与桉树生态效应的关系开展综合性的专项研究。这有利于揭示一些深层次的问题, 化解有关桉树的诸多争议, 统一对桉树生态学问题的认识, 实现桉树人工林的持续经营和生态环境的健康发展。

1.3　生产力下降

桉树人工林地生产力下降实际上是林地土壤质量退化和生物多样性减弱的后续效应与必然结果。

综合大量研究发现, 我国很多地区桉树人工林地暴露出持续生产力不足的问题。据余雪标等[45]的研究, 桉树人工林的生物量随连栽代次增加而逐渐下降, 如平均单株生物量, 2、3、4 代林分别比 1 代林下降 12.4%、17.2%和 45.0%, 群体生物量, 2、3、4 代林分别比 1 代林下降 19.6%、26.7%和 44.6%。孙长忠等[46]的研究指出, 我国桉树人工林的生产潜力应达到当地气候生产力的 80.0%以上, 但在广东粤西和海南省, 桉树人工林的现实生产力分别是当地气候生产力的 22.8%和 41.1%。此外, 对桉树人工

林生产力的影响因素也作了分析。如杨忠等[47]发现，地面物质组成和地表侵蚀状况是影响干热河谷林木群落生物量的主要立地因素之一，在土壤入渗能力强的石质山地，桉树人工林生物量较高，而在侵蚀严重的泥质山区，桉树人工林生物量较低。

2 桉树人工林的生态恢复

桉树人工林的生态恢复必须采取科学的技术对策，可以从水土保持、生物多样性保护、生产力调控等方面入手。

2.1 水土保持

严重的水土流失是引起桉树人工林生态退化的最直接因素，因此，开展水土保持对人工林生态恢复具有举足轻重的作用。一是改变不合理的整地方式。造林前整地采用机耕全垦方式，造成土壤表层结构破坏，林下植被难以恢复，从而使人工林内的地表径流得不到有效抑制，容易产生水土流失和养分流失[48]。相比之下，机耕带垦整地方式扰动土壤面积小，有利于人工林下植被的恢复和林地水分、养分的保持，适宜于营造桉树人工林。二是落实适地适树的造林原则。在寸草不生的沙石地、裸露地、土壤养分贫瘠或土层厚度不足 30 cm 的地方不宜种植桉树，而应种植一些有利于改善生态环境的植物(如灌木或草本等)[49]。三是减少林地养分的流失。如果人为移走林地的枯枝落叶，既无法保持地面湿度和减少地表径流，又不能为林地土壤补充必要的养分，致使林地地力衰退，物种多样性下降在所难免，因此要注重枯枝落叶层的保护[13]。同时，采伐桉树过程中要严格禁止全树利用。有研究指出，在采伐后将树桩、树枝、树叶和树皮保留在林地，待其腐烂后可给林地补充一定的养分元素[50]。四是人工修复退化土壤。目前在桉树人工林土壤修复方面的研究还比较缺乏，仅有少数学者在相关研究中获得对土壤修复具有应用价值的成果或提出比较积极的建议。如廖观荣等[51]研究发现桉树人工林间种山毛豆(*Tephrosia candida*)能改善林地土壤结构和水分、养分状况。蓝佩玲等[52]指出粗果相思(*Acacia crassicarpa*)与桉树轮种或混交，有利于增加土壤养分含量和提高林地肥力。苏英吾和李向阳[53]针对华南地区的土壤肥力特征及桉树的生物学特征和营养特征，提出了对桉树施肥的建议等。

2.2 生物多样性保护

为缓解桉树对人工林物种多样性的威胁，有关专家及时提出科学的应对策略，积极指导生产实践。总结各方观点，大致有下述几个方面。一是重视采用科学的植树方法。从桉树人工林经营失败的教训中发现，一些地区缺乏对正确植树方法的学习和宣传。从生态学角度分析，桉树的造林密度不应大于 1 500 株 · hm^{-2}；兼顾经济利益，桉树的造林密度也应控制在 1 500~2 250 株 ·hm^{-2}；但在不少地区，桉树的造林密度在 2 250~4 500 株 · hm^{-2}，有的甚至高达 6 000 株 · hm^{-2}[49]。应改变盲目营造桉树人工林的现状。二是合理配置桉树与乡土物种。通常，纯桉林的物种多样性问题较混交林更为突出，因此，广泛开展乡土植物与桉属树种的生态适应性研究，合理建植桉树混交林，对提高桉树人工林的物种多样性具有积极的指导意义。实践证明，桉树与培肥地力的植物混交或与能利用不同层次土壤养分的植物混交有利于林地生物多样性的恢复和保持[54]。如在华南桉树与大叶相思、马占相思、台湾相思混交取得成功，在云南桉树与黑荆(*Acacia mearnsii*)混交也收到较好的生态效益。三是其他技术对策的应用。如引入原产地桉树群落中适应桉树的其他物种(如苏铁科的 *Macrozamia*、鼠李科的 *Trymalium spothulatum*、豆科的 *Bossiaea amplexicaulis*、山龙眼科、帚灯草科的 *Restionaceae* 及木麻黄科的植物种类等)营造混交林，建立地带性植被的群落模式；同时建植桉树与引入物种的混交林时，应充分考虑桉树对相邻植物个体吸引力涉及半径，确定合理的混交比率，并在栽培上适当稀植[55]。

2.3 生产力调控

如何恢复并提高桉树人工林的生产力水平，我国学者进行了积极的技术探索，并取得一定的生产经验。如桉树林连续间种山毛豆，5 年后桉树的生长量显著增加，以刚果 12 号桉 W_5 无性系(*Eucalyptus* 12ABL-W5)为例，其平均株高增长 16%，平均胸径增长 22%，单位面积的木材蓄积量增加 59%[51]。在玄武岩桉树人工林土壤上施活化剂处理的不同磷肥均能显著提高桉树生长量[56]。其实，我国学者在早期研究中探索的桉树与西瓜(*Citrullus vulgaris*)或美国籽粒苋(*Amaranthns hypochondriacus*)间作、桉树与菠萝(*Ananas comosu*)轮作、桉树与固氮树种(如相思、黑荆等)等混交的复合模式均具有改善林地土壤营养状况的作用，有利于桉树人工林生产力的恢复与提高。在国外，针对桉树人工林生产力及其调控的专题研究不多。

3 前景展望

在长期的生产实践中，不论是各级政府或相关组织，还是学术界或广大群众，在认识和解决桉树人工林生态退化的问题上均有长足的进步。如在多家媒体跟踪报道和各方反对持续不断的重重压力之

下, 印尼文光集团在云南省投资建设大面积桉树林的项目最终被迫撤资。然而, 对桉树人工林生态退化及其恢复的科学研究和生产实践依然比较缺乏。今后应对以下几个方面的工作予以加强: 一是桉树人工林的科学建植与持续经营。总结过去在桉树人工林营造技术和经营管理方面的教训, 开展科学研究和实践探索, 全面提高桉树人工林建植和经营的科技水平, 同时加强科学管理, 为人工林的持续发展提供重要的外部保障。二是桉树人工林的合理开发与积极保护。过去因片面追求经济利益, 对桉树人工林盲目开发, 导致生态环境问题频繁发生和不断加剧。今后应建立起良性循环的发展机制, 即在积极保护的基础上进行合理开发, 在合理开发的同时进行有效保护。三是桉树的生态适应性与生态环境效应研究。近年对桉树问题的争议, 一直围绕着桉树的适应性和环境效应。不少学者从生态学角度对其做过一些宏观层次上的分析, 但不足以揭示桉树的生态适应性及其环境效应的内在机制, 今后应从多学科交叉的角度(如气象学、地学、生物学、遗传学、化学等学科交叉)和在分子、细胞水平开展深层次的研究工作, 最终阐明桉树的生态适应性与生态环境效应。四是桉树与其他外来植物的生态学关系研究。桉属植物对本地植物及其多样性的影响一直是生态学研究的热点问题, 相应的研究工作也在不断深入, 而针对桉树与林地其他外来物种之间的相互关系则很少受到关注。实际上, 其他外来物种侵入桉树人工林生态系统, 使得桉树人工林的生态修复变得愈加复杂。因此, 探索桉树与其他外来植物的生态学关系必将成为未来研究的一个重要方向。

参考文献

[1] 廖观荣. 我国桉树人工林立地土壤问题研究概况[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 119–121

[2] 祁树雄. 中国桉树[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002

[3] Robinson N., Harper R. J., Smettem K. R. J. Soil water depletion by *Eucalyptus* spp. integrated into dryland agricultural systems[J]. Plant and Soil, 2006, 286 (1/2): 141–151

[4] Jurskis V. *Eucalypt* decline in Australia, and a general concept of tree decline and dieback[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 215(1/3): 1–20

[5] 廖观荣, 林书蓉, 李淑仪, 等. 雷州半岛桉树人工林地力退化的现状与特征[J]. 土壤与环境, 2002, 11(1): 25–28

[6] 杨小波, 李跃烈. 海南西南部不同植被类型样地的土壤养分特性及持水性比较研究[J]. 海南大学学报: 自然科学版, 2003, 21(4): 334–338, 343

[7] 钟继洪, 李淑仪, 蓝佩玲, 等. 雷州半岛桉树人工林土壤肥力特征及其成因[J]. 水土保持通报, 2005, 25(3): 44–48

[8] Jon M., Jesus P. Impact of a eucalyptus (*Eucalyptus globulus* Labill.) plantation on the nutrient content and dynamics of coarse particulate organic matter (CPOM) in a small stream[J]. Hydrobiologia, 2004, 528: 143–165

[9] Ferreira V., Elosegi A., Gulis V., *et al*. *Eucalyptus* plantations affect fungal communities associated with leaf-litter decomposition in Iberian streams[J]. Archiv Fuer Hydrobiologie, 2006, 166 (4): 467–490

[10] 薛立, 赖日石, 陈红跃, 等. 深圳宝安区生态风景林典型造林地土壤养分、微生物和酶活性的研究[J]. 林业科学研究, 2002, 15(2): 242–246

[11] Morris J., Zhang N. N., Yang Z. J., *et al*. Water use by fast-growing *Eucalyptus urophylla* plantations in southern China[J]. Tree Physiology, 2004, 24(9): 1035–1044

[12] Calder I. R., Hall R. L., Adlard P. G. Growth and Water Use of Forest Plantation[M]. New York: John Wiley & Sons, 1992

[13] 徐大平, 张宁南. 桉树人工林生态效应研究进展[J]. 广西林业科学, 2006, 35(4): 179–187, 201

[14] Poore M. E., Fries C. The ecological effects of *Eucalyptus*[R]. FAO paper No. 59, FAO, Rome, 1985

[15] Batish D. R., Singh H. P., Setia N., *et al*. Chemical composition and inhibitory activity of essential oil from decaying leaves of *Eucalyptus citriodora*[J]. Zeitschrift Fuer Naturforschung Section C: Journal of Biosciences, 2006, 61(1/2): 52–56

[16] Batish D. R., Singh H. P., Setia N., *et al*. Chemical composition and phytotoxicity of volatile essential oil from intact and fallen leaves of *Eucalyptus citriodora*[J]. Zeitschrift Fuer Naturforschung Section C: Journal of Biosciences, 2006, 61(7/8): 465–471

[17] Singh S., Sharma S. K. Antibacterial activity of essential oil and root extract of *Eucalyptus teriticornis*[J]. Indian Journal of Natural Products, 2005, 21(1): 16–17

[18] Tsiri D., Kretsi O., Chinou I. B., *et al*. Composition of fruit volatiles and annual changes in the volatiles of leaves of *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. growing in Greece[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2003, 18(3): 244–247

[19] 李东海, 杨小波, 邓运武, 等. 桉树人工林林下植被、地面覆盖物与土壤物理性质的关系[J]. 生态学杂志, 2006, 25(6): 607–611

[20] Bristow M., Vanclay J. K., Brooks L., *et al*. Growth and species interactions of *Eucalyptus pellita* in a mixed and monoculture plantation in the humid tropics of north Queensland[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 233(2/3): 285–294

[21] Khan M. A., Marwat K. B., Hassan G. Allelopathic potential of some multipurpose tree species (MPTS) on wheat and some of its associated weeds[J]. International Journal of Biology and Biotechnology, 2004, 1(3): 275–278

[22] Takahashi T., Kokubo R., Sakaino M. Antimicrobial activities of eucalyptus leaf extracts and flavonoids from *Eucalyptus maculate*[J]. Letters in Applied Microbiology, 2004, 39(1): 60–64

[23] O'Reilly-Wapstra J. M., Potts B. M., McArthur C., *et al*. Inheritance of resistance to mammalian herbivores and of plant defensive chemistry in an *Eucalyptus* species[J]. Journal of

Chemical Ecology, 2005, 31(2): 357–375

[24] 温远光, 刘世荣, 陈放, 等. 桉树人工林植物物种多样性及动态研究[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(4): 17–22

[25] Ramanujam M. P., Kadamban D. Plant biodiversity of two tropical dry evergreen forests in the Pondicherry region of South India and the role of belief in their conservation[J]. Biodiversity and Conservation, 2001, 10: 1203–1217

[26] Eshetu Y., Olavi L. Indigenous woody species diversity in *Eucaluptus globules* Labill. spp. *globulus* plantation in the Ethiopian highlands[J]. Biodiversity and Conservation, 2003, 12: 567–582

[27] Stuart J. M., Mark W., Mauro G. Bird diversity and abundance in forest fragment and *Eucalyptus* plantation around an Atlantic forest reserve, Brazil[J]. Biodiversity and Conservation, 2001, 10: 737–751

[28] Zhang Y. H., Sun L. F., Ken C. H. Decline of eucalypt trees in tablelands of New South Wales, Australia[J]. Journal of Forestry Research, 2005, 16(4): 306–310

[29] 陈茂乾, 廖崇惠. 小良热带人工林脊椎动物调查[M]//中国科学院鼎湖山森林生态系统定位研究站. 热带亚热带森林生态系统研究. 第 2 集. 广州: 科学普及出版社广州分社, 1984: 202–210

[30] 温远光, 刘世荣, 陈放. 连栽对桉树人工林下物种多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1667–1671

[31] 刘月廉, 吕庆芳, 潘颂民, 等. 桉树林分枯落物分解微生物的种类和数量[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2006, 30(1): 75–78

[32] Souto X. C., Bolaño J. C., González L., *et al*. Allelopathic effect of tree species on some soil microbial populations and herbaceous plants[J]. Biologia Plantarum, 2001, 44(2): 269–275

[33] 李志辉, 李跃林, 杨明胜, 等. 桉树林地土壤酶分布特点及其活性变化研究[J]. 中南林学院学报, 2000, 20(3): 29–33

[34] 廖崇惠. 热带人工林生态系统的土壤动物[M]//中国科学院鼎湖山森林生态系统定位站. 热带亚热带森林生态系统研究. 第 7 集. 北京: 科学出版社, 1990: 141–147

[35] Bais H. P., Vepachedu R., Gilroy S., *et al*. Allelopathy and exotic plant invasion: From molecules and genes to species interactions[J]. Science, 2003, 301(5638): 1377–1380

[36] Hierro J. L., Callway R. M. Allelopathy and exotic plant invasion[J]. Plant and Soil, 2003, 256(1): 29–39

[37] 吴锦容, 彭少麟. 化感——外来植物入侵的"Novel Weapons" [J]. 生态学报, 2005, 25(11): 3093–3097

[38] Pereira S. I., Freire Carmen S. R., Neto C. P., *et al*. Chemical composition of the essential oil distilled from the fruits of *Eucalyptus globulus* grown in Portugal[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2005, 20(4): 407–409

[39] Ziria S., Bessiere J. M., Menut C., *et al*. Chemical composition of the essential oil of nine *Eucalyptus* species growing in Morocco[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2004, 19(2): 172–175

[40] 丘娴, 余世孝, 方碧真, 等. 尾叶桉对四种豆科植物的化感作用[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2007, 46(3): 88–92

[41] 刘小香, 陈秋波, 王真辉, 等. 巨尾桉挥发油对真菌和昆虫的化感作用[J]. 生态学杂志, 2007, 26(6): 835–839

[42] Amakura Y., Umino Y., Tsuji S., *et al*. Constituents and their antioxidative effects in eucalyptus leaf extract used as a natural food additive[J]. Food Chemistry, 2002, 77(1): 47–56

[43] Bajwa R., Iftikhar S. Antifungal activity of allelopathic plant extracts VI: In vitro control of fungal pathogens by aqueous leaf extracts of *Eucalyptus*[J]. Mycopath, 2005, 3(1/2): 7–12

[44] Russo S., Franzetti D., Collavino M. D., *et al*. Evaluation of biological effects of leaf extracts from *Eucalyptus globulus* (Labill) on *Dendrobaena octaedra* (Sav.) (Annelida: Lumbricidae) [J]. Idesia, 2003, 21(1): 47–52

[45] 余雪标, 徐大平, 龙腾, 等. 连栽桉树人工林生物量及生产力结构的研究[J]. 华南热带农业大学学报, 1999, 5(2): 10–16

[46] 孙长忠, 沈国舫, 李吉跃, 等. 我国主要树种人工林生产力现状及潜力的调查研究Ⅱ.桉树、落叶松及樟子松人工林生产力研究[J]. 林业科学研究, 2001, 14(6): 657–667

[47] 杨忠, 张建平, 王道杰, 等. 元谋干热河谷桉树人工林生物量初步研究[J]. 山地学报, 2001, 19(6): 503–510

[48] 陈少雄. 桉树在不同地区的整地方式研究[J]. 林业科学研究, 1997, 10(3): 309–315

[49] 陈少雄. 桉树生态学问题的来源与对策[J]. 热带林业, 2005, 33(4): 26–30

[50] Florence R. Cultural problems of *Eucalyptus* as exotics[J]. Commonwealth Forestry Review, 1986, 65: 141–163

[51] 廖观荣, 简明, 钟继洪, 等. 桉树人工林生态系统养分循环与平衡研究Ⅴ. 桉树林间种山毛豆对土壤肥力和林木生长的作用[J]. 生态环境, 2003, 12(4): 443–445

[52] 蓝佩玲, 廖新荣, 廖观荣, 等. 桉树与粗果相思混交对土壤养分的影响[J]. 热带亚热带土壤科学, 1998, 7(1): 77–79

[53] 苏英吾, 李向阳. 华南土壤肥力特征与桉树施肥[J]. 中南林业调查规划, 1997 (3): 35–38

[54] Forrester D. I., Bauhus J., Cowie A. L., *et al*. Mixed-species plantations of *Eucalyptus* with nitrogen-fixing trees: A review[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 233(2/3): 211–230

[55] 王震洪, 段昌群, 起联春, 等. 我国桉树人工林发展中的生态学问题探讨[J]. 生态学杂志, 1998, 17(6): 64–68

[56] 李淑仪, 蓝佩玲, 廖新荣, 等. 雷州桉树人工林下土壤磷肥活化效果及机理研究[J]. 林业科学研究, 2002, 15(3): 261–268