

文章编号:1000 - 2286(2002)06 - 0796 - 06

林业活动在吸收大气 CO₂ 与 减缓全球变暖中的作用

方运霆¹, 肖金香², 莫江明¹

(1. 中国科学院 华南植物研究所鼎湖山森林生态系统定位研究站, 广东 肇庆 526070; 2. 江西农业大学 林学院, 江西 南昌 330045)

摘要: 森林生态系统是陆地生态系统的重要组分, 对全球气候变化有重要的贡献。介绍了吸收大气 CO₂ 和减缓全球变暖的林业活动的主要形式, 即保存现有碳、固定大气碳和替代碳排放, 论述了全球和我国森林碳保存及其固定潜力, 同时为这些林业活动的有效实施提出了建议。

关键词: 林业活动; 减缓全球变暖; 森林

中图分类号: 718.56 **文献标识码:** A

The Role of Forestry Activities in Carbon Sequestration and Mitigation of Global Warming

FANG Yun - ting¹, XIAO Jin - xiang², MO Jiang - ming¹

(1. Dinghushan Forest Ecosystem Research Station, South China Institute of Botany, CAS, Zhaoqing, Guangdong 526070, China; 2. College of Forestry, JAU, Nanchang 330045, China)

Abstract: Forest ecosystem is a key component of terrestrial ecosystem, and has the potential to contribute to global climate change through their influence on the global carbon cycle. In this paper, three categories of promising forestry activities that promote sound management of forests and at the same time conserve and sequester carbon, namely (1) Carbon conservation, (2) Carbon sequestration, and (3) Carbon substitution, are introduced. Meanwhile, the potentials of carbon conservation and sequestration in global forest and in Chinese forest are discussed. Finally, some suggestions are put forward in order to carry out these forestry activities effectively.

Key words: forestry activities; mitigation of global warming; forests

我们生活在“碳世界”里。来源于光合作用的生物化学能最初以碳化合物贮存, 因而生命不可避免地决定于对碳的同化和异化作用, 而植物碳的基本来源又是大气中的 CO₂^[1]。大气中 CO₂ 浓度尽管较低, 但随地球大气的演变经历了非常大的变化。来自格陵兰岛和南极地带的冰心气泡分析显示, 最后一个冰期高峰时大气 CO₂ 浓度仅为 200 μL/L, 至工业革命前的 1000 年间, CO₂ 浓度在 275 ~ 285 μL/L 间变动。然而, 近 150 年来, 大气 CO₂ 浓度由以上所列的数值升至 1998 年的 366 μL/L^[1~5], 而且上世纪

收稿日期: 2002 - 07 - 20

基金项目: 国家自然科学基金自由申请项目(30270283)、国家自然科学基金重大项目(39899370)、中科院知识创新项目 KZCX2 - 407 资助

作者简介: 方运霆(1976 -), 男, 硕士, 主攻森林生态系统碳循环

每十年的变化速度表现持续稳定,高于过去 1 000 年来的任何时期。目前全球大气 CO₂ 浓度仍然平均每年增加约 1.2~1.8 μL/L,预计到本世纪中期大气 CO₂ 浓度将达到 550 μL/L,21 世纪末达到 650~700 μL/L^[3]。日益增多的大量观测结果表明,大气 CO₂ 浓度的上升引起了以全球气温升高为主要特征的气候变化,并发了气候物理系统的其它变化等全球性变化。预计 21 世纪人类活动将继续改变大气 CO₂ 等组分的浓度,将引发陆地生物圈的一系列反馈效应,影响地球系统的辐射平衡和水循环,从而必将对人类的健康、食物和水资源的安全、社会稳定与经济发展等产生一系列的负面影响^[2,3,6,7]。

森林是陆地生态系统的主体,森林植被碳贮量占陆地生态系统植被碳贮量的绝大部分^[6,8],其平均碳贮存密度也比农田和草地等生态系统植物的碳密度高得多^[9]。森林生长吸收大量的 CO₂,并具有长期的保存能力,但森林受到破坏和燃烧的过程中又大量排放 CO₂,因此森林在调节气候和大气 CO₂ 浓度中发挥着重要的作用,特别是当前大气 CO₂ 急剧上升可能带来增强的温室效应和全球变暖,森林的增长或消减成为最受全球关注的问题之一^[8,10~13]。

《京都议定书》的签署和后来缔约方大会(COP)肯定了森林在吸收 CO₂ 和减缓气候变化中的作用,许多科学家也致力于研究林业活动,包括造林、重新造林和森林采伐(Afforestation, Reforestation and Deforestation, ARD)、森林抚育、火灾和病虫害控制等,对森林吸收大气 CO₂ 和减缓全球变暖趋势的作用和影响。然而,我国对此及相关问题的探讨不是太多。为此,本文首先具体地介绍了减缓全球变暖过程中林业活动的类型划分,然后分析了全球和我国林业活动碳吸收的潜力等问题。

1 林业活动及其根据吸收大气 CO₂ 的类型的划分

大多数林业部门的一些促使碳保存和吸收的林业活动通常着眼于社会、经济和生态效益,有些甚至根本未考虑到对大气 CO₂ 浓度变化的贡献。这些林业活动的目标主要包括森林可持续发展、工业木材和燃料需求、传统的森林利用、自然资源保护、退化地植被恢复等,在此过程中的碳保存和固定恰恰是在达到目标后的附加效益^[12,13]。例如,在非林地上造林保证了经济发展、提供了木材资源、取代木材进口而增加出口和使退化土地得到了恢复等,同时这些活动也是吸收大气碳的一种重要的方式。

根据减缓大气 CO₂ 浓度升高的方式不同,可以把在满足以上目标的林业活动划分为 3 类:(1) 保存现有碳(Carbon conservation),减少森林采伐、改变现有的采伐体制和保护森林,以保存现有的森林碳库不再向大气净排放;(2) 固定大气碳(Carbon sequestration),增加天然林、人工林和农林复合林的面积或森林碳密度以增加森林的碳贮量;(3) 替代碳排放(Carbon substitution),利用森林生物质替代石化产品,把生物碳转化为生物燃料和长寿命的木材产品^[11~13]。

保存现有碳的林业活动主要目标是通过控制森林毁坏或采伐、以保护区形式保护森林、改变森林采运机制(减少采伐不良影响),和控制其它人为干扰诸如森林火灾和虫害爆发等形式达到保存现有的碳库存量^[11]。这种形式的碳保存在热带地区非常重要,因为,这些地区目前和过去因耕作地和牧草地的快速扩张、对木材产品的生存和商业需求增长而导致了大片的热带森林被毁坏。减少热带森林毁坏和森林退化速度就必须减少对土地和森林产品的需求压力,增加现有森林的保护面积和强度。全球范围内利用保护碳库来减缓碳排放林业活动有利于增加控制森林毁坏的兴趣和成功机会,有利于农业生产力和可持续发展。如为了保护生物多样性,增加原始林或次生林的“保护面积”是保存碳的一种方式。在未来,为持续地获取木材产品的森林面积也将不断扩大。为确保大部分的碳仍然保留在林地里,要求这种森林利用方式必须最大限度的延长轮作期、减少对保留木的损坏、减少采伐剩余物、实施土壤保持措施和更有效利用木材产品等^[14,15]。

固定大气碳的林业活动指增加贮存在植被(地上和地下活生物量)、死有机物和土壤(凋落物、枯死木和矿质土壤)、耐用木材产品的碳贮存数量。增加森林碳储量,也是当地环境和经济需要,它可以通过造林、保护次生林和退化林自然恢复或人工更新得以实现,因为这些林分的植被生物量和土壤碳密度远低于被破坏前的最大值。增加对木材产品的需求量、延长木材产品的使用寿命则可以增加耐用木材

产品的碳库。固定大气碳行为是短期的选择,它只是增加现有森林生态系统各组分的碳积累水平。森林碳吸收固定能力在几十年到一百年就会达到极限,主要取决于目前森林年龄、森林类型、树种组成以及所处的气候和环境区域。尽管人工林对环境和社会造成不利影响,特别是非乡土树种人工林越来越受到唾弃。但是,在许多情况下,尤其在退化土地恢复上,营造非乡土树种人工林是唯一选择。在这类人工林林下层栽种乡土树种可以增加当地的生物多样性,在国家林业部门未来的林业发展目标很重要^[16,17]。此外,如果要保护乡土树种自然森林或减少采伐水平,营造人工林在满足木材需求方面就显得十分必要了。

替代碳排放的管理目的是增加森林生物向诸如建筑材料和生物燃料产品的转换,而较少的使用石化能源和石化、水泥产品。从长期尺度上来看,替代碳排放是所有减缓碳排放的林业活动中最具潜力的^[11-13,18]。原因在于它把森林视为可更新持续的资源,集中在把生物碳向能替代或减少石化燃料使用的产品的转化上,而不是单纯地增加森林生态系统本身的碳密度。这种方法涉及到扩大木材和燃料的使用,木材和燃料获取可以通过新建森林或营造人工林、采取有效措施提高现有森林的生产力实现。

2 全球林业活动保存现有和固定大气碳的潜力

评估林业活动的碳保存或固定潜力关键要解决以下参数:(1)在给定的气候和林业活动条件下,单位面积的森林植被和土壤保存或吸收的碳数量;(2)碳保存或固定的时间长度;(3)现实可利用的土地面积^[12,13]。这些参数受森林类型、气候和社会经济因子的影响,随各国和地区而异,因而给评价全球范围内碳保存和固定潜力增加了困难,早期对林业活动和森林管理的碳保存和固定研究也就多集中在植树造林或在退化林地和草地重新造林的碳吸收^[19]。直到 IPCC 第二次评估报告(SAR)才综合报道了全球水平上 1995 年至 2050 年通过林业部门的积极管理行为带来的碳保存和吸收潜力^[12]。报告中该部分综合了两个研究^[20,21],这两个研究一定深度上考虑到土地的可利用性、社会经济阻碍、森林碳吸收的时间尺度,充分考虑到营造人工林、复合农林和减慢森林毁坏及森林自然和人工更新真实可行的速度。

该研究认为全球可用来实施碳保存和吸收计划的土地面积有 $7.0 \times 10^8 \text{hm}^2$,其中用作营造人工林和复合农林有 $3.45 \times 10^8 \text{hm}^2$,减慢热带森林毁坏有 $1.38 \times 10^8 \text{hm}^2$,自然或人工辅助恢复的面积有 $2.17 \times 10^8 \text{hm}^2$ ^[2,12]。至 2050 年,全球碳保存或固定的潜力可达 $60 \sim 87 \text{PgC}$,是同期经济正常发展情况下化石燃料碳排放的 $11\% \sim 15\%$,其中营造人工林和复合农林的贡献为 38PgC ,约占总量的 50% 。热带地区森林管理碳保存和固定潜力最大,约占 80% ,温带地区次之,占 17% ,寒带仅占 3% 。在热带地区,自然更新和减少森林砍伐的贡献超过了该地区森林碳汇的一半,而人工林和复合农林的贡献则不到一半,但是如果如果没有它们的存在,自然更新和减少森林砍伐也将不可能达到发挥如此大的作用。总之,热带地区由于大面积造林、森林砍伐得到控制和森林更新等,在碳保存或吸收方面表现出最大的潜力。温带和中纬度地区对森林碳汇作用也重大,寒带和高纬度地区的作用相对显得有限。此后一些研究表明,IPCC 第二次评估报告中通过积极的林业活动带来的碳保存和固定潜力估算是非常保守的^[22]。例如,Sampson 等^[23]估算通过对全球 $6\% \sim 30\%$ 的森林实行改变森林管理体制的碳吸收就达到 $1.270 \text{PgC} \cdot \text{a}^{-1}$ 。再例如,通过增加对处在温带和寒带地区的 6 个国家和地区(森林面积为 $4.35 \times 10^8 \text{hm}^2$)的森林活动强度,碳积累潜力也将达到 $0.586 \text{PgC} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[24]。IPCC 第三次评估报告(TAR)不但支持以上这些研究的结论,而且提供了一个更为广阔意义上的陆地碳汇评估^[22,25]。TAR 根据《京都议定书》条款 3.3 和 3.4 的要求,评价了全球 41 个发达国家的土地利用、土地利用变化及森林(LULUCF)活动碳固定潜力。按 IPCC 的定义,全球 2010 年通过减少森林砍伐可以保存 $1.788 \text{PgC} \cdot \text{a}^{-1}$,造林和重新造林可以固定 $0.197 \sim 0.584 \text{PgC} \cdot \text{a}^{-1}$,营造复合农林(Agroforestry)可以固定 $0.390 \text{PgC} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[26]。

其实,陆地生态系统自 20 世纪 50 年代就开始由碳源向碳汇转变了,至今碳汇能力达 $(2.3 \pm 1.3) \text{PgC} \cdot \text{a}^{-1}$ 。根据模型预测这种碳固定能力于 2050 年达到高峰(约 $5 \text{PgC} \cdot \text{a}^{-1}$),其后逐渐下降,也可能是剧烈的下降,至 2100 年达到平衡^[27]。对于森林,在今后一段时间内,热带森林继续会遭到破坏,尽管破

坏的速度在不断减少,但热带地区仍然是碳源,约到2010年后,全球范围内森林可能将由碳源转变为碳汇^[12]。

3 我国森林植被固定大气碳潜力

我国现有森林面积为 $1.34 \times 10^8 \text{ hm}^2$,森林覆盖率由解放初的 8.7% 提高到目前的 13.92%,其中天然林占 65.3%,我国森林无论是对我国还是全球的生态环境保护和维持生态系统平衡都有重要意义^[28,29]。Fang 等^[28]利用国家 50 年来森林资源清查资料研究了我国半个世纪来森林碳库变化和碳汇功能。其结果表明,我国 1949~1980 年源自森林变化的碳释放为 0.68 PgC,年释放为 0.022 PgC。自 20 世纪 70 年代后期,我国森林面积不断扩大和森林再生长,森林碳贮量在明显的递增,其中因造林和重新造林吸收了 0.45 PgC,人工林碳密度从 $15.3 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增高到 $31.1 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$,而天然林碳贮存量减少了 0.14 PgC。从上世纪 70 年代中期起,森林碳贮量已由当时的 4.38 PgC 上升到 1998 年的 4.75 PgC,碳源逆转为碳汇,积累能力达到 $0.021 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

为了保护森林资源及生态系统平衡,国家还决定了对重点国有林区实施以减少木材采伐量为主要内容的天然林保护工程,调减的木材采伐量约占计划内木材产量的 $1/4$ ^[30],该措施意味着我国天然林碳贮存量下降的趋势得到遏制。此外,我国近几十年来,尤其是改革开放以来,在全国范围内大力开展了几大防护林体系和用材林基地的建设,人工林发展相当迅速且面积大,人工林保存面积累计已达 $0.34 \times 10^8 \text{ hm}^2$,是世界上人工林面积最大的国家,在固定大气碳方面发挥积极作用^[29]。由于有些森林的成、过熟林大面积已遭到人为破坏以及不合理的造林、营林措施和育林制度等原因,森林的中、幼龄林所占的比重过大,而成熟林面积在不断下降,致使我国森林植被现有碳密度还普遍较低,森林植被实际碳贮总量仅为潜在的 44.3%^[31,32]。因此,如果我们只要保护好现有森林不再被破坏,让其自然生长,中国森林生态系统的保存和吸收碳潜力都非常强大。遗憾的是目前还没有研究能用数字来说明我国森林未来的碳汇功能的大小和分布情况。

4 今后的工作措施

以上所论述的林业活动的碳保存和固定潜力没有考虑未来自然因素的影响。大量实验研究表明,一些自然因素如大气中 CO₂ 浓度上升引起的“CO₂ 施肥效应”和“温室效应”的温度升高、NO_x (NO 和 NO₂) 和 NO₃ 浓度上升导致增加氮沉降等,一方面一定程度上有利于植物的生长^[33],另一方面,NO_x 和 SO₂ 排放也会导致土壤和水酸化,氮和硫化物沉降等,将对植物生长不利而减少碳吸收;臭氧浓度升高也会抑制植物生长,引起挥发性化合物的 NO_x 释放^[34]。所有这些因子都会影响森林生态系统对大气中碳的去除作用,也会直接影响土地使用和土地使用变化格局。这些自然因素究竟在多大的程度上对森林碳汇功能的产生改变还亟待研究。

《京都议定书》第 3 条第 3、4 项提出了土地利用、土地利用变化和森林等吸收源问题,但规定只有 1990 年以后所进行的造林、再造林及森林采伐等由人类活动直接引起的二氧化碳吸收或排放净值部分才可并入排放减量的计算中^[6,35,36]。可是,实际的森林碳吸收和排放量因树种种类、年龄等千差万别,有很多问题还没达成科学的共识^[6,27]。如没有明确森林和造林、再造林与森林采伐等的定义,如何实施、验证和计量这些活动等^[6,24],尽管缔约方会议(COP6)对定义、计量和核实等问题在不懈的努力^[36]。而且,目前对全球森林碳保存或固定潜力、分布的估算存在很大的不确定性。对如何做到高效率的、准确地检测短时期内森林管理活动的碳积累数量、如何区分来源于人为活动和自然因素碳积累的比例等也存在难以跨越的挑战^[27,37,38]。正是这些原因,2001 年 5 月美国政府以科学上的不确定性和发展中国家没有承诺减排义务为理由,宣布不会在议定书上签字,为在 2002 年前生效设置了障碍。但波恩气候会议达成的妥协使《京都议定书》得以起死回生,使国际社会得以向着全球气候保护目标迈出重要一步^[27]。

因此,如果要有效的执行通过林业活动以达到抵消碳排放,作者认为,必须进行以下几方面的工作:(1)提高对森林碳贮存和释放的理解,提高其监测和预测的准确度和精度;(2)发展碳计量的综合模型;(3)预测各种环境下不同林业活动的碳贮存和动态;(4)建立可增加生产力和碳吸收能力的示范管理系统等。

参考文献:

- [1] Kerner C. Biosphere responses to CO₂ - enrichment[A]. Ecological Applications, 2000. 10, 1 590~1 619
- [2] IPCC. Climate change 1995: The science of climate change[M]. U K: Cambridge Univ. Press, 1996. 572
- [3] IPCC. Climate change 2001: The scientific basis. Summary for Policymakers A Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, U K: Cambridge Univ. Press, 2001
- [4] Keeling C D, Whorf T P. Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network[A]. In: Carbon Dioxide Information Analysis Center. Trends: A Compendium of Data on Global Change. Oak Ridge National Laboratory[C], Oak Ridge, TN, USA, 1999
- [5] Prentice I C, Heimann M, Sitch S. The carbon balance of the terrestrial biosphere: Ecosystem models and atmospheric observations[J]. Ecological Applications, 2000, 10: 1 553~1 573
- [6] IPCC. Land use, land - use change, and forestry, a special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, U K: Cambridge Univ. Press, 2000
- [7] 于贵瑞,牛栋,王秋凤.《联合国气候变化框架公约》谈判中的焦点问题[J]. 资源科学,2001,23(6):10~16
- [8] FAO. Global forest resources assessment 2000 (FRA 2000), Results as of April 10, 2001. Available from www.fao.org/forestry/fo/fra/index.jsp, 2001
- [9] Atjay G L, Ketner P, Duvigneaud P. Terrestrial primary production and phytomass[A]. In: Bolin B, Degens E T, Kempe S, et al. (eds.). The Global Carbon Cycle, 1979. 129~181
- [10] 徐德应. 大气 CO₂ 增长和气候变化对森林的影响研究进展[J]. 世界林业研究,1994 (2):26~32
- [11] Dixon R K. Carbon pools and flux of global forest ecosystem[J]. Science, 1994, 263: 185~190
- [12] Brown S. Management of forests for mitigation of greenhouse gas emissions[A]. In: IPCC Climate Change 1995 - Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific - Technical Analyses, Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[C]. Cambridge University Press, Cambridge, 1996: 773~797
- [13] Brown S. Present and potential roles of forests in the global climate change debate[J]. Unasylva, 1996,185 (47): 3~10
- [14] Moura - Costa P. Tropical forestry practices for carbon sequestration[A]. In: Schulte A and Schone S. Dipterocarp forest ecosystems: Towards sustainable management[C], Singapore: World Scientific, 1996: 308~334
- [15] Turner D P, Koepfer GJ, Harmon M, et al. Carbon sequestration by forests of the United States: Current status and projections to the Year 2040[J]. Tellus, 1995, 41B: 232~239
- [16] Lugo A E, Parrotta J A, Brown S. Loss in species caused by tropical deforestation and their recovery through management [J]. Ambio, 1993. 22: 106~109
- [17] Allen R B. Biodiversity in New Zealand plantations[J]. New Zealand Forestry, 1995, 39(4): 26~29
- [18] Marland G and Marland S. Should we store C in trees[A]. Water, Air and Soil Pollution, 1992, 64: 181~195
- [19] Houghton R A. The future role of tropical forests in affecting the carbon dioxide concentration of the atmosphere[J]. Ambio, 1990, 19: 204~209
- [20] Nilsson S, Schopfhauser W. The carbon - sequestration potential of a global afforestation program[J]. Climatic Change, 1995, 30: 267~293
- [21] Trexler M C, Haugen C. Keeping it green: Evaluating tropical forestry strategies to mitigate global warming[A]. World Resources Institute, Washington, DC, 1994
- [22] Kauppi P. Technical and economic potential options to enhance, maintain and manage biological carbon reservoirs and geo - engineering[A]. In: Davidson, O., B. Metz, R. Swart (eds.). Climate Change 2001: Mitigation. Cambridge, U K: Cambridge University Press, 2001

- [23]Sampson R N and Scholes R J. Additional Human - Induced Activities - Article 3.4. In: Watson R T et al. Land use, land - use change, and forestry. Chapter 4[C]. A Special Report of the IPCC. 2000
- [24]Nabuurs G J. Article 3.3 and 3.4 of the Kyoto Protocol - consequences for industrialized countries' commitment, the monitoring needs and possible side effect[A]. Environmental Science and Policy, 2000, 3 (2/3) :123 ~ 134
- [25]Hans H K. Carbon sequestration in sinks: An overview of potential and costs[A]. CICERO Working Paper 2001: 11, 2001
- [26]Kaiser J. Panel estimates possible carbon 'sink' [J]. Science, 2000, 288: 942 ~ 943
- [27]Scholes R J, Noble I R. Storing carbon on land[J]. Science, 2001, 294: 1 012~ 1 013
- [28]Fang J Y, et al. Changes in Forest Biomass Carbon Storage in China Between 1949 and 1998[J]. Science, 2001, 292: 2 320 ~ 2 322
- [29]李维长. 世界森林资源保护及中国林业发展对策分析[J]. 资源科学, 2000, 22(6) :71 ~ 76
- [30]刘爱民. 中国森林资源及木材供需平衡研究[J]. 资源科学, 2000, 22(6) :9 ~ 12
- [31]王效科, 冯宗炜. 中国森林生态系统中植物固定大气碳的潜力[J]. 生态学杂志, 2000, 19(4) :72 ~ 74
- [32]刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, 2000, 20(5) :733 ~ 740
- [33]Schimel D. Radiative forcing of climate change[A]. In: Climate Change 1995. The science of climate change[C]. Cambridge, NY: Cambridge University Press, 1996: 65 ~ 131
- [34]Houghton R A, Hackler J L, Lawrence K T. The U S carbon budget: contributions from land - use change[J]. Science, 1999, 285: 574 ~ 578
- [35]UNFCCC. Kyoto protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. 1997
- [36]UNFCCC. Decisions concerning land - use, land - use change and forestry. Review of the implementation of commitments and of other provisions of the convention[C]. Preparations for the first session of the conference of the parties serving as the meeting of the parties to the Kyoto Protocol (Decision 8/ cp. 4). FCC/ CP/ 2001/ 2/ Add. 3/ Rev. 1, 2001
- [37]Kaiser J. Soaking up carbon in forests and fields[J]. Science, 2000, 290: 922
- [38]Noble I, Scholes R J. Sinks and the Kyoto Protocol[J]. Climate Policy, 2001, 1: 5 ~ 25