

# 森林管理在全球 CO<sub>2</sub> 减排中的作用<sup>\*</sup>

胡会峰 刘国华<sup>\*\*</sup>

(中国科学院生态环境研究中心系统生态重点实验室, 北京 100085)

**【摘要】** 综述了各种森林管理措施在全球 CO<sub>2</sub> 减排中的作用. 这些管理措施主要包括减少森林砍伐速度, 增加森林覆盖面积, 加强对现存森林的肥料、火灾及病虫害管理, 以薪材替代化石燃料等. 同时探讨了中国的森林管理存在的优势和不足. 目前中国森林生态系统主要是植被碳库, 在全球碳循环过程中扮演着“碳汇”的角色, 但其“碳汇”功能较小. 因此, 如何加强对新建人工林的抚育、病虫害和火灾管理, 增强中国森林的“碳汇”功能, 充分发挥其在 CO<sub>2</sub> 减排中的作用, 是我们面临的重要工作.

**关键词** CO<sub>2</sub> 减排 森林管理 碳汇

文章编号 1001-9332(2006)04-0709-06 中图分类号 Q948.1; S718.5 文献标识码 A

**Roles of forest management in global carbon dioxide mitigation.** HU Huifeng, LIU Guohua (Key Laboratory of Systems Ecosystem, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2006, 17(4): 709~714.

This paper summarized the roles of current forest management measures, e. g., reducing deforestation rate, increasing afforestation and reforestation, strengthening the management of nutrient fertilization, fire hazard, and disease and pest injury, and substituting fossils fuels with charcoal, in global carbon dioxide migration, and analyzed the advantage and insufficiency of China's forest management. The authors indicated that the current forest ecosystems in China, mainly their vegetation carbon pool, played a smaller role of carbon sink in global carbon cycle, and thus, it was important to strengthen the tending of newly cultivated plantation and the management of fire hazard and disease and pest injury, and to increase the carbon sequestration of our forests.

**Key words** CO<sub>2</sub> mitigation, Forest management, Carbon sink.

## 1 引言

大气中温室气体, 特别是 CO<sub>2</sub> 浓度升高作为全球气候变化最主要的驱动力, 已经得到广泛的共识<sup>[1, 19, 21, 44, 68, 70]</sup>. 目前大气中 CO<sub>2</sub> 浓度已由工业革命前的 280 ml·m<sup>-3</sup> 上升到 2001 年的 370 ml·m<sup>-3</sup>, 并且以每年 1~1.5 ml·m<sup>-3</sup> 的速度递增<sup>[31, 55]</sup>. 与此相对应, 地球表面的年平均温度在一个多世纪以来也上升了 0.6 °C<sup>[19]</sup>. 为了减少全球气候变化带来的不利影响, 减缓温室气体, 尤其是大气中 CO<sub>2</sub> 浓度的增加趋势, 1997 年《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC) 第 3 次缔约方大会(COP3) 通过了《京都议定书》在条例 3.3 和 3.4 中首次明确提出人类可以通过陆地生态系统的有效管理来提高固碳潜力, 所取得的管理成效可以部分抵消附件一国家承担的碳减排份额<sup>[64]</sup>.

森林作为陆地生态系统的主体, 是地球生物圈的重要组成部分, 虽然全球森林面积仅占陆地面积的 27%<sup>[13]</sup>, 但地上植被碳库储存了全球约 80% 的地上碳储量, 森林土壤碳库储存了全球土壤碳储量的 40% 左右<sup>[19]</sup>, 森林光合和呼吸作用与大气之间的年碳交换量高达陆地生态系统年碳交换量的 90%<sup>[69]</sup>, 因此在调节全球气候、维持全球碳平衡中具有重大作用. 近年来, 通过气候反转模型、碳通量观测技术、植被和土壤清查统计以及过程模型模拟等方法的研究表明, 虽然研究方法、研究区域、研究时段各不相同, 得出的森林生态系

统的固碳能力也差异较大, 但总的来说, 森林作为一个重要的“碳汇”已经得到了广泛的认同和证实(表 1). 但是, 目前全球只有 10% 的森林处在有效的管理<sup>[13]</sup>, 大部分森林, 特别是次生林和人工林, 由于自身抵抗火灾、病虫害以及其它气候灾害的能力较弱, 其固碳潜力还没有完全发挥出来<sup>[8, 20]</sup>. 一些研究结果, 特别是那些承担减排任务的附件一国家的研究表明, 如果采取积极的森林管理措施, 森林的“碳汇”功能还可以进一步提高, 其减排潜力还是相当可观的. 本文通过综述全球目前常采用的森林管理措施以及产生的固碳潜力, 以期对我国的森林管理和森林固碳统计提供借鉴和指导.

## 2 各种森林管理措施的固碳潜力

### 2.1 降低森林砍伐速度

砍伐森林, 将有林地转变为农田、工业用地等其它土地利用类型是全球森林资源面临的最大的威胁, 森林破坏(尤其是热带雨林的破坏)已成为继化石燃料燃烧之后大气中 CO<sub>2</sub> 浓度增加的第 2 大人为排放源<sup>[4, 8, 19, 24, 44]</sup>. 森林采伐一方面短期引起贮藏在植被中的碳以各种形式大量释放到大气中, 另一方面使以前储存在森林土壤中的碳随着土地利用

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展规划项目(2002CB41250-03)和中国科学院知识创新工程重大资助项目(KZCX1-S-1-17).

<sup>\*\*</sup> 通讯联系人. E-mail: ghliu@mail. rcees.ac.cn

2005-08-11 收稿, 2005-10-3 接受.

/ 土地覆盖的变化而释放(表 1, 表 2)。许多模型和实验研究都表明, 当森林转变为其它土地利用类型时引起了植被和土壤碳库的显著减少, 其减少的强度和速度主要与转变的土地利用类型、面积、转变发生的时间及转变区域的气候特征有关<sup>[6, 7, 19]</sup>。Guo 和 Gifford<sup>[19]</sup>总结了全球不同地区土地利用/土地覆盖变化引起的土壤碳动态, 结果发现, 当天然林转变为人工林时, 土壤碳密度平均降低了 15%, 当转为农田时平均降低 40%。前者主要受种植物种和区域降雨量的影响, 后者跟取样的深度密切相关。

由于各国社会经济发展的需要, 化石燃料使用引起的碳排放还不可能大幅减少, 甚至还会增加, 因此减少人为碳排放源的最有效途径就是降低森林采伐速度。不同研究者的减伐情景预测表明, 减少森林砍伐将引起显著的碳固定<sup>[3, 18, 20]</sup>。作为全球森林砍伐最严重的热带地区, 如果降低

甚至停止森林采伐, 那么每年可以额外固定 0.2~1.2 Pg C, 长期减少的碳排放量可达 400~500 Pg<sup>[3, 20]</sup>。Hamilton 和 Vollen<sup>[18]</sup>利用政府清查资料研究发现, 由于澳大利亚减少了森林向牧场的转变, 使该国由于土地利用变化引起的 CO<sub>2</sub> 排放量由 1990 年的 89.8 Tg·yr<sup>-1</sup>, 降低到 1996 年的 62.8 Tg·yr<sup>-1</sup>; 笔者研究也表明<sup>[25]</sup>, 中国实施天然林保护工程后, 1997~2002 年的 5 年间因森林木材砍伐减少, 累计减少 22.75 Tg 的碳释放。

2.2 增加森林面积

减少森林砍伐可以看作是减少 CO<sub>2</sub> 释放的“节流”措施, 那么增加森林面积, 提高森林覆盖率, 借助森林生态系统较高的碳存贮密度来固定大气中的 CO<sub>2</sub> 则是增加 CO<sub>2</sub> 吸收的“开源”举措。森林面积的增加主要有两个途径: 一是将弃耕地、农业用地或其它适宜造林的土地类型恢复成森林, 主

表 1 不同地区森林的固碳能力  
Table 1 Forests' carbon sequestration in different areas

研究区域 Area	时期 Periods	资料和方法 Materials and methods	碳汇 Carbon sink (Pg C·yr <sup>-1</sup> )	文献来源 Reference
北半球中高纬度 Middle-high latitudes in Northern Hemisphere	1980~1989	森林清查及土地利用统计资料 Forest resource inventory and land use change database	0.6~1.0	[9]
	1991~1995	碳通量测定 Carbon flux	≥1.0	[14]
	1995~1999	遥感 Remote sensing	0.68	[48]
美国 America	1980~1989	森林资源调查 Forest resource inventory	0.079~0.14	[63]
	1980~1989	生态系统模型 Ecosystem models	0.078	[61]
	1950~1990	土地利用变化资料 Land use change database	0.014~0.12	[22, 23]
欧洲 Europe	1952~1990	森林资源调查 Forest resource inventory	0.16~0.28	[2]
	1971~1990	森林资源调查 Forest resource inventory	0.07~0.105	[30]
	1950~1990	森林资源调查 Forest resource inventory	0.0745	[51]
欧共体 European Union	1997	碳通量测定 Carbon Flux	0.12~0.28	[45]
德国 Germany	1990~2050	基于森林资源调查的情景预测模型 Scenario prediction based on forest resource inventory	0.014~0.016	[28]
前苏联 The Former Soviet Union	1988~1993	森林资源调查 Forest resource inventory	0.375	[33]
俄罗斯 Russia	1988	森林资源调查 Forest resource inventory	0.4~0.5	[32]
中国 China	1949~1998	森林资源调查 Forest resource inventory	0.021	[11]
	1973~1993	森林资源调查 Forest resource inventory	0.025~0.027	[39, 52]
全球 Total	1980~1999	气候反转模型 Climatic invert model	2.08~3.26	[19]

表 2 全球主要森林管理措施的固碳潜力(2000~2050)  
Table 2 Carbon sequestration potentials of major forest management methods in the world (2000~2050)

固碳措施 Practices of carbon sequestration	估算方法 Methods	固碳潜力 Carbon sink (Pg C·yr <sup>-1</sup> )	重要性及实施范围 Importance and implement regions
减少森林砍伐 Reducing forest falling	立地实测、森林清查、情景分析 Field investigate, forest inventory, scenario analysis	0.3~1.6	措施重要, 实施可能性一般, 适合于热带伐林地区 Important method, generally practice, most useful for tropical regions
植树造林 Afforestation and reforestation	立地实测、森林清查、遥感、模型模拟、情景分析 Field investigate, forest inventory, model, scenario analysis	0.12~1.2	措施重要, 实施可能性很大, 全球范围适用 Important method, much practice, most useful for all over the world
肥料管理 Nutrient fertilization	田间实验、情景分析 Field experiment, scenario analysis	0.12~1.6	措施一般, 实施可能性较小, 成本较大, 适合于北美和欧洲地区 General method, possible practice, most useful for North America and Europe
火灾管理 Fire management	半经验模型估算、模型模拟预测 Semi-experiential model estimate, model	0.11~1.13	措施一般, 实施可能性较小, 成本较大, 适合于北美和俄罗斯地区 General method, possible practice, most useful for North America and Russia
病虫害管理 Pest management	半经验模型估算、模型模拟预测 Semi-experiential model estimate, model	0.04~1.2	措施一般, 实施可能性较小, 成本较大, 全球范围适用 General method, possible practice, most useful for all over the world
以薪柴替代化石燃料 Substitute for fissile fuels	政府清查估算、情景分析、模型预测 National inventory, scenario analysis, model	0.2~1	措施重要, 实施可能性一般, 存在技术难题, 全球范围适用 Important method, generally practice with technical problem, most useful for all over the world
合计 Total		0.9~7.7	

要适合于热带地区以及欧美一些发达国家;二是在适宜造林的荒山荒地上种植森林,主要适用于温带和寒带的发展中国家。不论是重新造林还是恢复成林,其的恢复过程中碳动态研究都表明,森林重建将显著提高植被和土壤的固碳能力,从而提高森林生态系统,乃至整个陆地生态系统的固碳潜力。这种固碳效果在重建初期即幼林期还不是很明显,但随着林木的成熟,这种作用会愈加显著,直至达到新的平衡为止<sup>[11, 15, 20, 27, 35, 53]</sup>。

Jose 等<sup>[27]</sup>在南美委内瑞拉利用生物量和土壤剖面研究发现,经过 16 年的退草还林重建后,该地区植被碳密度由原来的  $0.4 \text{ Kg C} \cdot \text{m}^{-2}$  增加到  $9.2 \text{ Kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ ,土壤碳密度由原来的  $6.7 \text{ Kg C} \cdot \text{m}^{-2}$  增加到  $12.2 \text{ Kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ ,总体上森林比萨瓦纳草原多储存了 2 倍的碳。Lacrau<sup>[35]</sup>对南美巴塔哥尼亚(Patagonia)西北部 14 年的西黄松人工林, Poulton 等<sup>[55]</sup>在英格兰东南部落荒 120 年的弃耕地上研究都发现,与原先的植被、土地利用类型比较,碳密度都有了明显的增加,并且这种趋势还在继续。

对宜林荒山、荒地绿化造林的研究也发现了类似的结论。Grunzweig 等<sup>[15]</sup>对巴勒斯坦南部 35 年前种植的人工林研究发现,  $2800 \text{ hm}^2$  的干旱森林包含  $6.5 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ , 平均每年积累  $0.18 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。方精云等<sup>[11]</sup>对中国自 20 世纪 70 年代中期实行的植树造林研究发现,中国人工林植被已累积了  $0.45 \text{ Pg C}$ , 其植被碳密度从  $15.3 \text{ Mg C} \cdot \text{hm}^{-2}$  增加到了  $31.3 \text{ Mg C} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其它类似对英国、印度、墨西哥、中国人工林的情景预测研究表明,人工林的种植可以显著抵消这些国家的工业碳排放<sup>[4, 9, 53, 56, 66]</sup>。IPCC 估计通过全球的植树造林和还林在 1995~2050 年间可以吸收  $60\sim 87 \text{ Pg C}$ , 占同期全球预计的化石燃料碳排放量的  $12\%\sim 15\%$ <sup>[3]</sup>。

### 2.3 加强对现存森林的抚育管理

森林作为一个动态的碳库,其贮存碳的能力不仅取决于森林的面积,还取决于森林的质量,即单位面积的森林碳密度。由于肥料、火灾、病虫害及不合理的采伐方式的影响,全球森林都存在不同程度的退化,人工林由于物种单一、发育不完善面临的风险更大<sup>[12, 20]</sup>。Houghton 等<sup>[20]</sup>估计,20 世纪 80 年代热带地区由于森林退化造成每年  $0.6 \text{ Pg C}$  的净释放,相当于该地区森林采伐造成的碳损失量的一半。FAO<sup>[12]</sup>也报告了亚洲热带地区由于森林退化造成的碳释放相当于森林采伐造成的碳释放。因此,除了“开源节流”提高森林覆盖率外,还需要加强对现存森林的抚育管理、保护森林、特别是次生林和人工林免受火灾、病虫害、采伐和游耕作业等影响,从而稳固和提高现存森林的固碳能力。目前常用的管理手段主要包括肥料管理、火灾管理和病虫害防治等。

**2.3.1 肥料管理** 土壤中 N、P 等营养元素的缺乏是限制森林生长的主要环境因子,大多数 CO<sub>2</sub> 倍增实验和 N 添加实验都表明,在 CO<sub>2</sub> 浓度达到植物利用的饱和程度后,营养元素供应不足成为限制植物 NPP 的主要影响因子<sup>[40, 41, 49, 54]</sup>。因此,添加肥料可以克服这些缺陷,从而提高植被的地上和地下 NPP,增加碳贮量,尤其是对建造在特别贫瘠土地上的

林地显得更为重要。北美和北欧的田间和模拟实验研究表明,对不同气候、不同区域的不同树种而言,施肥产生的碳增量在  $0.03\sim 0.44 \text{ Mg C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$  之间变动<sup>[40, 41, 49]</sup>。Nabuurs 等<sup>[49]</sup>利用情景分析预测了加拿大、美国和荷兰的施肥潜力,结果表明,三国施肥潜力分别是  $0.03\sim 0.19$ 、 $0.08\sim 0.48$  和  $0.1\sim 0.6 \text{ Mg C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。挪威和北欧的松林施肥实验发现,施肥后平均增加的碳吸收能力高达  $0.4$  和  $0.44 \text{ Mg C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ <sup>[40, 41]</sup>。

**2.3.2 火灾管理** 火是森林生态系统中最常见的一种自然干扰。火灾的发生不仅会在短期内将储存在植被体中的碳释放到大气中,而且由于土温升高而加速了土壤的碳释放,而后者往往产生更大的碳释放<sup>[36, 46]</sup>。北方森林由于火灾造成了每年大约  $1 \text{ Pg C}$  的排放,1996 年加拿大森林大火造成了  $60\sim 180 \text{ Tg C}$  的净释放,俄罗斯每年由于火灾造成的净释放在  $30\sim 90 \text{ Tg C}$  之间<sup>[29]</sup>。中国在 1991~2000 年间平均每年因为火灾造成  $20.24\sim 28.56 \text{ Tg C}$  的净释放,占我国 2000 年碳排放总量的  $2.7\%\sim 3.9\%$ <sup>[62]</sup>。随着全球变暖及地区差异,北方森林的火灾强度和频率随着该地区的气候变暖会有明显的增加趋势,火灾造成的碳释放也会随之增加<sup>[29, 37]</sup>。例如加拿大森林的着火面积从 1980 年的  $1.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$  增长到 1996 年的  $3.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$ <sup>[29]</sup>。Kasischke 等<sup>[29]</sup>用简化的全球碳模型(GCM)预测如果随着全球增温,北方森林火灾面积每增长  $5\%$ ,就会增加  $2.71\sim 5.91 \text{ Pg C} \cdot \text{yr}^{-1}$  的净碳释放。造成森林火灾除了自然原因(自然灾害、森林自燃)外,还有一部分火灾是由于人为管理不当造成的。火灾管理就是加强对林区的火灾防护,通过降低野火发生的频率和强度来减少野火造成的碳损失,常采用的手段包括改变火灾的类型(将致命的冠层火灾变为威胁较小的地面表火)、火灾的强度(增加小火发生的频率,减少大火发生的概率)。由于火灾受气候影响较大,旱季火灾次数和强度大于雨季,预测比较困难,因此对于控制火灾产生的碳增量的研究还不多。Kurz 和 Apps 等<sup>[34]</sup>模拟预测了如果减少一半北方森林(主要是加拿大和俄罗斯的森林)的火灾次数,那么每年可以增加碳贮量  $46 \text{ Tg C}$ ; Dixon 和 Krankina<sup>[9]</sup>估计对俄罗斯森林的火灾管理可以增加  $0.1\sim 0.6 \text{ Pg C} \cdot \text{yr}^{-1}$  的碳贮量。

**2.3.3 病虫害管理** 病虫害、病原体的入侵是影响植物正常生长的又一常见干扰。病原体通过对植物根、茎、叶的蚕食,破坏植物正常的生理代谢过程,影响植物正常的发育生长,从而影响植物的固碳能力。病虫害的监测和危害在发达国家研究比较完善, Nabuurs 等<sup>[50]</sup>估计加拿大森林由病虫害造成的损失相当于火灾损失的  $70\%$ ,俄罗斯 1991~1993 年期间每年则有  $3.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$  森林受到病虫害的侵害。病虫害管理就是加强对林区森林的看护管理,对一些常见的病虫害做到早预防、早治愈,维持害虫的数量在一个安全的阈值下,阻止其对树木的伤害,从而延长树木的寿命,增加其碳贮量。由于在方法学和科学上还存在不确定性,使得如何评估和监测病虫害管理的成效还很困难。Nabuurs 等<sup>[50]</sup>预测如果加拿大和美国的森林病虫害降低  $5\%\sim 10\%$ ,两国每年可以增加碳贮

量 5~60 Tg C.

2.4 以薪柴等生物燃料替代化石燃料

由于薪柴燃烧释放的 CO<sub>2</sub> 是生长过程中从大气中固定的 CO<sub>2</sub>, 从薪柴产生到消耗整个生命周期来看, 薪柴的使用不会造成大气中 CO<sub>2</sub> 的净排放, 因此用可再生的薪柴替代化石燃料是减少全球碳排放量的唯一长远的解决途径<sup>[22]</sup>. 目前生物燃料占全球初级能源的 14%, 在发展中国家薪柴作为能源燃料的比例很高, 但利用效率比较低, 发达国家中已经大量使用农业和森林生产过程的副产品作为部分能源替代品, 现在生物技术的发展已经使生物燃料的使用范围和使用效率大大提高<sup>[67]</sup>. FAO<sup>[13]</sup> 估计 2030~2050 期间, 由于薪柴的使用减少, 碳排放量可能占到这一期间减少的总排放量的 30%. Cannell<sup>[4]</sup> 利用情景分析预测在现实情景下, 全球、欧洲 15 国、英国的生物燃料可以分别抵消化石燃料 200~1000、100~200 和 1~6 Tg C·yr<sup>-1</sup>. 到这个世纪的末期, 能源生物质产量潜力(包括木材和能源作物)能够抵消化石燃料的碳释放 1~4 Pg C·yr<sup>-1</sup>. 如果木材及其它可更新能源能够完全代替化石燃料, 则将有 5 000~10 000 Pg C 的化石燃料保留在地下<sup>[22]</sup>.

2.5 其它管理手段

除了以上这些常见、易于实践的管理手段外, 还可以通过延长森林的轮伐周期、减少破坏性择伐、枯枝落叶还林等方式来减少森林采伐对林地造成的破坏. Liski 等<sup>[38]</sup> 研究发现, 由于采伐强度降低, 使 2000 年西欧中部和北部森林土壤固定 0.06 Kg C·m<sup>-2</sup>. 此外, 提高林产品的循环使用频率、延长木制品的使用周期等方式可以间接地提高森林生态系统的固碳潜力, 主要表现在一方面减少了生产这些产品的化石燃料使用量, 另一方面通过延长林产品的寿命和循环次数, 减少对林木采伐的需求, 从而间接地增加森林的碳吸收. Skog 等<sup>[59]</sup> 预测, 如果到 2040 年美国的纸张循环利用率提高到 60%, 那么每年保存下来的森林可以多固定 8~14 Tg C, 同时相应地减少了纸张工业碳排放量 36 Tg C.

3 森林管理在全球 CO<sub>2</sub> 减排中的不确定性

3.1 时间不确定性

森林碳循环是一个动态系统, 其固碳主要根据植物的光合吸收与植物和土壤的呼吸释放之间的动态平衡来决定, 只有当净生态系统生产力(NEP)>0 时, 该系统才表现为一个“碳汇”. 但随着森林逐渐成熟, NEP 的值会逐渐变小, 直至为零, 达到平衡. 显然, 森林的固碳潜力只是暂时性的, 有一个时间界限. 此外, 由于森林的生长易受气候以及一些自然和人为的干扰, 其储碳能力存在较大的季节和年际变化. 例如 Jarvis 等<sup>[26]</sup> 和 Malhi 等<sup>[42, 43]</sup> 应用凋落相关技术研究发现, 热带森林全年都表现为净碳汇, 而高纬度地区的森林则在生长季节为碳汇, 在非生长季节(冬季)为碳源. Saleska 等<sup>[57]</sup> 在亚马逊森林研究发现两个老龄森林在湿季是碳源, 在干季是碳汇. Chen 等<sup>[9]</sup> 对加拿大北方白杨林的研究也发现, 受温度和太阳辐射的影响, 1994 年白杨林的光合固碳能力比 1996

年多 0.9 Mg·hm<sup>-2</sup>.

3.2 数量不确定性

作为一个动态的碳循环系统, 与时间不确定性相伴生的就是森林生态系统固碳的数量存在很大的波动性. 这主要体现在两个方面: 一是对森林直接固碳而言, 其生长过程受到很多因素的影响, 例如树种、树龄、立地的营养状态、温湿度、降雨量、自然和人为干扰等, 因此很难准确估计某一年森林到底固定了多少碳, 一些模型研究由于选择参数不同, 产生的差异很大, 而一些样地的实验研究主要面临着尺度推移的问题<sup>[61, 63]</sup>. 另外, 对森林地下根生产力和周转周期估计的不准确, 有可能造成目前对森林土壤碳固定能力的高估<sup>[46]</sup>; 二是对于森林管理措施间接产生的固碳量来说, 由于科学上和方法学上还存在很大的不确定性, 因此很难确定一个合理的评价体系和基准线, 特别是对于火灾和病虫害的森林管理, 由于每年气候的波动以及一些偶然事件的发生, 火灾和病虫害发生的频率和强度年年都有不同, 因此很难定量评价某一年由于采取了积极有效的火灾和病虫害管理措施究竟产生了多大的碳汇增量, 而对于肥料管理, 目前的研究成果还主要是基于样地的实验数据, 受土壤异质性、土壤微生物异质性以及环境状况耦合作用的影响, 尺度推移还存在很大的不确定性<sup>[49]</sup>. 再加上不同地区对全球气候变暖的响应不同, 火灾和病虫害发生的频率和强度变化迥异, 一方面对森林管理提出了更高的要求, 另一方面也使区域之间的管理成效的比较具有了更大的变数和不可比性<sup>[20]</sup>.

3.3 全球变暖、CO<sub>2</sub> 施肥以及 N 沉降的不确定性

大量实验表明, 温度上升能加快温带森林的生长, 从而导致对大气 CO<sub>2</sub> 吸收量的增加<sup>[58, 65]</sup>, 但变暖同样会增加植被和土壤呼吸从而释放更多的碳. 一些研究估计, 由于变暖引起的呼吸作用增加而释放的碳量变化范围在 3.4~33.8 Pg C/°C 之间, 其净效应还很难估计<sup>[20]</sup>. 此外, 碳的贮存和释放可能取决于变暖的速度. 自 19 世纪末, 全球平均温度升高 0.5 °C, 似乎促进了寒冷地区森林的生长, 在 80 年代北方温带和寒温带每年所贮存的 0.6 Pg C 中, 其中一部分是由于变暖效应引起的. 另一方面, 由于人为温室气体迅猛增长, 全球增温的速度远远大于历史上任何一个时期的增温速度, 很可能造成变暖速率超过了树种恢复速率, 导致森林的广泛死亡, 其后果之一就是由于树木死亡导致火灾或分解引起碳向大气中大量地释放. 随着全球变暖速度的加快, 森林生态系统碳贮量的主要变化可能来自于气候变暖本身而不是由于旨在减少碳排放量的人类活动<sup>[20]</sup>.

而对于 CO<sub>2</sub> 倍增实验来说, 植被类型、土壤类型、土壤微生物的特性都会影响最终的固碳大小, 其结论还需要进一步的验证<sup>[17]</sup>. 虽然 N 的缺失是森林生长普遍面临的一个问题, 但并不是说 N 越多越好, Kauppi 等<sup>[30]</sup> 对欧洲森林的 N 沉降研究发现, 添加适量的 N 会提高植被的 NPP, 但过多输入则会导致森林“烧死”, 同时由于氮肥施用量的增加还会导致大气中其它温室气体, 如 N<sub>2</sub>O 含量的增加.

4 中国森林管理面临的机遇和挑战

最新的第 5 次森林清查(1994~1998)显示中国现有 158.94 M hm<sup>2</sup> 的森林,森林覆盖率为 16.5%,其中有 46.7 M hm<sup>2</sup> 的人工林,是世界上人工林种植面积最大的国家.国内外学者依据这些资料,估算中国森林植被的碳储量介于 3.26~4.75 Pg C 之间,平均碳密度在 38.7~44.9 Mg C·hm<sup>-2</sup> 之间,年净碳固定 0.021~0.027 Pg C,无论是碳库大小,还是碳密度都远低于世界平均水平<sup>[10, 11, 39, 52, 69]</sup>. 因此,中国森林还具有很大的固碳潜力.

随着中国天然林保护工程、退耕还林还草、速生丰产林基地工程等一系列林业工程的实施,我国森林面积还将进一步扩大,但同时需要加强以下研究: 1) 进一步完善区域乃至国家尺度的森林碳贮量的定量评价方法,合理估算中国的碳库(植被和土壤),特别是 1990 年以后新造的人工林的碳库动态变化; 2) 加强对现存森林的管护和抚育,注意提高森林的质量.作为森林火灾、病虫害多发的国家之一,火灾、病虫害已成为严重威胁我国森林健康和安全的因素,并且我国大部分的原始林都分布在人烟稀少、交通不便的山区<sup>[71]</sup>. 因此,加强对火灾、病虫害的预防和防治管理显得特别重要和迫切; 3) 发展一些速生、抗病能力强的树种,一方面满足木材市场的需求,多发展一些持久使用、耐耗损的木材产品,另一方面在适宜地区多发展薪碳林,提高我国能源消耗中新材的比重; 4) 加强理论和实践研究,探讨合理评估森林管理措施带来的固碳收益的模型和方法.

5 结 语

随着俄罗斯的加入,《京都议定书》从 2005 年 2 月 16 日起正式生效.作为世界第二大 CO<sub>2</sub> 排放国<sup>[6]</sup>,迫于国际外交谈判的压力,中国迟早要承担温室气体的减排任务.虽然目前各种森林管理措施产生的固碳潜力还存在较大的不确定性,但作为减缓全球气候变暖的举措来说还是具有很好的前景,因此,需要进一步加强理论和实验研究,使其更加完善.

参考文献

1 Appsa MJ, Kurz WA, Beukema SJ, et al. 1999. Carbon budget of the Canadian forest product sector. *Environ Sci Policy*, **2**: 25~41  
2 Birdsey RA, Heath LS. 1995. Carbon changes in US forests. In: Joyce LA ed. *Productivity of America's Forest and Climatic Change*. Colorado: Forest Service, US Department of Agriculture. 56~70  
3 Brown S, Sathaye J, Cannell M, et al. 1996. Management of forests for mitigation of greenhouse gas emissions. In: Watson RT, Zinyowera MC, Moss RH, eds. *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change, Scientific Analyses*. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press 773~798  
4 Cannell MGR. 2003. Carbon sequestration and biomass energy offset: theoretical, potential and achievable capacities globally, in Europe and the UK. *Biom Bioenergy*, **24**: 97~116  
5 Chen WJ, Black TA, Yang PC, et al. 1999. Effects of climatic variability on the annual carbon sequestration by a boreal aspen

forest. *Global Change Biol*, **5**: 41~53  
6 Detwiler RP, Hall CAS. 1988a. The global carbon cycle (letter). *Science*, **241**: 1738~1739  
7 Detwiler RP, Hall CAS. 1988b. Tropical forest and the global cycles. *Science*, **239**: 42~47  
8 Dixon RK, Brown S, Houghton RA, et al. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, **263**: 185~190  
9 Dixon RK, Krankina ON. 1993. Forest fires in Russia: carbon dioxide emissions to the atmosphere. *Can J For Res*, **23**: 700~705  
10 Fang JY (方精云), Chen A-P (陈安平). 2001. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance. *Acta Bot Sin (植物学报)*, **43**(9): 967~973 (in Chinese)  
11 Fang JY, Chen AP, Peng CH, et al. 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, **292**: 2320~2322  
12 FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2001. Key issues in the forest sector today. In: *State of the World's Forests 2001*. Rome, Italy: FAO. 60~73  
13 FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2003. *State of the World's Forests 2003*. Rome, Italy: FAO.  
14 Goulden ML, Munger JW, Fan SM, et al. 1996. Measurements of carbon acquisition by long-term eddy covariance: Methods and critical evaluation of accuracy. *Global Change Biol*, **2**: 169~182  
15 Grunzweig JM, Lin T, Rotenberg E, et al. 2003. Carbon sequestration in arid-land forest. *Global Change Biol*, **9**: 791~799  
16 Guo LB, Gifford RM. 2002. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis. *Global Change Biol*, **8**: 345~360  
17 Hagedorn F, Maurer S, Egli P, et al. 2001. Carbon sequestration in forest soil: Effects of soil type, atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment, and N deposition. *Eur J Soil Sci*, **52**: 619~628  
18 Hamilton C, Vollen L. 1999. Land-use change in Australia and the Kyoto Protocol. *Environ Sci Policy*, **2**: 145~152  
19 Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, eds. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.  
20 Houghton RA. 1996. Converting terrestrial ecosystems from sources to sinks of carbon. *Ambio*, **25**: 267~272  
21 Houghton RA. 2001. Counting terrestrial sources and sinks of carbon. *Clim Change*, **48**: 525~534  
22 Houghton RA, Hackler JL. 2000. Changes in terrestrial carbon storage in the United States 1. The roles of agriculture and forestry. *Global Ecol Biogeogr*, **9**: 125~144  
23 Houghton RA, Skole DL, Nobre CA, et al. 2000. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature*, **403**: 574~578  
24 House J, Prentice IC, Quere C. 2002. Maximum impact of future reforestation or deforestation on atmospheric CO<sub>2</sub>. *Global Change Biol*, **8**: 1047~1052  
25 Hu H-F (胡会峰), Liu G-H (刘国华). 2006. Carbon sequestration of China's national natural forest protection project. *Acta Ecol Sin (生态学报)*, **26**(1): 291~296 (in Chinese)  
26 Jarvis PG, Massheder JM, Hale SE, et al. 1997. Seasonal variation of carbon dioxide, water vapor, and energy exchanges of a boreal black spruce forest. *J Geophys Res*, **102**: 28953~28966  
27 José JS, Montes RA, Farinas MR. 1998. Carbon stocks and fluxes in a temporal scaling from a savanna to a semi-deciduous forest. *For Ecol Manage*, **105**: 251~262  
28 Karjalainen T, Pussinen A, Liski J, et al. 2002. An approach towards an estimate of the impact of forest management and climate change on the European forest sector carbon budget: Germany as a case study. *For Ecol Manage*, **162**: 87~103  
29 Kasichke ES, Christensen Jr NL, Stocks BJ. 1995. Fire, global warming, and the carbon balance of boreal forests. *Ecol Appl*, **5**: 437~451  
30 Kauppi PE, Mielikainen K, Kuusek K. 1992. Biomass and carbon budget of European forests, 1971 to 1990. *Science*, **256**: 70~74  
31 Kirschbaum MUF. 2003. To sink or burn? A discussion of the potential contributions of forests to greenhouse gas balances through

- storing carbon or providing biofuels. *Biom Bioenergy*, **24**: 297 ~ 310
- 32 Kolchugina TP, Vinson TS. 1993. Carbon sources and sinks in forest biomes of the former Soviet Union. *Global Biogeochem Cycle*, **7**: 291 ~ 304
  - 33 Kolchugina TP, Vinson TS. 1998. Carbon cycle of terrestrial ecosystems of the former Soviet Union. *Environ Sci Policy*, **1**: 115 ~ 128
  - 34 Kurz WA, Apps M. 1995. An analysis of future carbon budgets of Canadian boreal forests. *Water Air Soil Pollut*, **82**: 321 ~ 331
  - 35 Laclau P. 2003. Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantations and native cypress forests in northwest Patagonia. *For Ecol Manage*, **180**: 317 ~ 333
  - 36 Levine JS. 1991. Global Biomass Burning: Atmospheric, Climate and Biospheric Implications. Cambridge MA: MIT Press. 344
  - 37 Linder P, Elfving E, Zackrisson O. 1997. Stand structure and succession trends in virgin boreal forest reserves in Sweden. *For Ecol Manage*, **98**: 17 ~ 33
  - 38 Liski J, Pernichoud D, Karjalainen T. 2002. Increasing carbon stocks in the forest soils of Western Europe. *For Ecol Manage*, **169**: 159 ~ 175
  - 39 Liu G-H(刘国华), Fu B-J(傅伯杰), Fang J-Y(方精云). 2000. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, **20**(5): 733 ~ 740(in Chinese)
  - 40 Lunnan A, Navrud SR, Rstad PK, *et al.* 1991. Forestry and forest production in Norway as a measure against CO<sub>2</sub>-accumulation in the atmosphere. Aktuelt fra Skogforsk nr 6-1991. Institutt for skogfag, N LH, Norway.
  - 41 Mäkipää R, Karjalainen T, Pussinen A, *et al.* 1998. Effects of nitrogen fertilization on carbon accumulation in boreal forests: Model computations compared with the results of long term fertilization experiments. *Chemosphere*, **36**: 1155 ~ 1160
  - 42 Malhi Y, Baldocchi DD, Jarvis PG. 1999. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant Cell Environ*, **22**: 715 ~ 740
  - 43 Malhi Y, Nobre AD, Grace J, *et al.* 1998. Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest. *J Geophys Res*, **103**: 31593 ~ 31612
  - 44 Marland E, Maland G. 2003. The treatment of long-lived, carbon-containing products in inventories of carbon dioxide emissions to the atmosphere. *Environ Sci Policy*, **6**: 139 ~ 152
  - 45 Martin P. 1998. Global CO<sub>2</sub> monitoring network. *Science*, **281**: 1805
  - 46 Matamala R, Gonzalez-Meler MA, Jastrow JD, *et al.* 2003. Impacts of fine root turnover on forest NPP and soil C sequestration potential. *Science*, **302**: 1385 ~ 1387
  - 47 Melillo JM, Fucci JR, Houghton RA, *et al.* 1988. Land use change in the Soviet Union between 1850 and 1980: Causes of a net CO<sub>2</sub> release to the atmosphere. *Tellus B*, **40**: 116 ~ 128
  - 48 Myrneni RB, Dong J, Tucker CJ, *et al.* 2001. A large carbon sink in the woody biomass of Northern forests. *PNAS*, **98**: 14784 ~ 14789
  - 49 Nabuurs GJ, Dolman AJ, Verkaik E, *et al.* 2000. Article 3. 3 and 3. 4 of the Kyoto Protocol: Consequences for industrialized countries' commitment, the monitoring needs, and possible side effects. *Environ Sci Policy*, **3**: 123 ~ 134
  - 50 Nabuurs GJ, Dolman AJ, Verkaik E, *et al.* 1999. Resolving the Issues on Terrestrial Biospheric Sinks in the Kyoto Protocol. Report no. 410 200 030. Bilthoven, The Netherlands: Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change. 100
  - 51 Nabuurs GJ, Schelhaas MJ, Godefroidus, *et al.* 2003. Temporal evolution of the European forest sector carbon sink from 1950 to 1999. *Global Change Biol*, **9**: 152 ~ 160
  - 52 Pan YD, Luo TX, Birdsey R, *et al.* 2004. New estimates of carbon storage and sequestration in China's forests: Effects of age-class and method on inventory-based carbon estimation. *Clim Change*, **67**: 211 ~ 236
  - 53 Pandey DN. 2002. Carbon sequestration in agroforestry systems. *Clim Policy*, **2**: 367 ~ 377
  - 54 Peterson EB, Peterson NM. 1995. Aspen managers handbook for British Columbia. Canadian Forest Service and B. C. Ministry of Forest, Victoria. FRAD Rep. **230**
  - 55 Poulton PR, Pye E, Hargreaves PR, *et al.* 2003. Accumulation of carbon and nitrogen by old arable land reverting to woodland. *Global Change Biol*, **9**: 942 ~ 955
  - 56 Ravindranath NH, Sudha P, Sandhya R. 1999. CDM Opportunities in Forestry Sector in India: Technical Report. Bangalore, India: Indian Institute of Science.
  - 57 Sakska SR, Miller SD, Matross DM, *et al.* 2003. Carbon in Amazon Forests: Unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses. *Science*, **302**: 1554 ~ 1557
  - 58 Schimel DS. 1995. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biol*, **1**: 77 ~ 91
  - 59 Skog KE, Marcin TC, Heath LS. 1996. Opportunities to reduce carbon emissions and increase storage by wood substitution, recycling, and improved utilization. In: Sampson RN, Hair D, eds. Forests and Global Change Forest Management Opportunities. Vol. 2. Washington, DC: American Forests.
  - 60 Streets DG, Jiang KJ, Hu XL, *et al.* 2001. Recent reductions in China's greenhouse gas emissions. *Science*, **294**: 1835 ~ 1837
  - 61 Tian HQ, Melillo JM, Kicklighter DW, *et al.* 1999. The sensitivity of terrestrial carbon storage to historical climate variability and atmospheric CO<sub>2</sub> in the United States. *Tellus B*, **51**: 414 ~ 452
  - 62 Tian X-R(田晓瑞), Shu L-F(舒立福), Wang M-Y(王明玉). 2003. Direct carbon emissions from Chinese forest fires, 1991 ~ 2000. *Fire Safety Sci(火灾科学)*, **12**(1): 6 ~ 10(in Chinese)
  - 63 Turner DP, Koepper GJ, Harmon ME, *et al.* 1995. A carbon budget for forests of the conterminous United States. *Ecol Appl*, **5**: 421 ~ 436
  - 64 UNFCCC. 1997. The Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. UNEP: WMO.
  - 65 Walker BH, Steffen WL. 1999. The nature of global change. In: Walker BH, Steffen WL, Canade II J, eds. The Terrestrial Biosphere and Global Change. Cambridge: Cambridge University Press. 1 ~ 18
  - 66 Wang X-K(王效科), Feng Z-W(冯宗炜), Ouyang Z-Y(欧阳志云). 2001. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, **12**(1): 13 ~ 16(in Chinese)
  - 67 Watson RT, Noble IR, Bolin B, eds. 2000. Land Use, Land-Use Change And Forestry. A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
  - 68 West TO, Marland G. 2002. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States. *Agric Ecosyst Environ*, **91**: 217 ~ 232
  - 69 Winjum JK, Dixon RK, Schroeder PE. 1993. Forest management and carbon storage: An analysis of 12 key forest nations. *Water Air Soil Pollut*, **70**: 239 ~ 257
  - 70 Wofsy SC, Goulliden ML, Munger JM, *et al.* 1993. Net exchange of CO<sub>2</sub> in a mid-latitude forest. *Science*, **260**: 1314 ~ 1317
  - 71 Xiao F-J(肖风劲), Ouyang H(欧阳华), Cheng S-L(程淑兰), *et al.* 2004. Forest health ecological risk assessment in China. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, **15**(2): 349 ~ 353(in Chinese)

作者简介 胡会峰,男,1980年出生,硕士研究生.主要从事森林生态学、全球碳循环及恢复生态学研究,发表论文4篇. Tel: 010-62849183; E-mail: hfhu80@yahoo.com.cn

责任编辑 李凤琴