

## 各国林业

## 中国森林生态系统碳平衡研究

肖复明<sup>1,2</sup> 张 群<sup>3</sup> 范少辉<sup>1</sup>

(1 国际竹藤网络中心,北京 100102;2 江西省林业科学院,南昌 330032;

3 中国林业科学研究院林研所,国家林业局林木培育重点实验室,北京 100091)

**摘要:** 森林生态系统是陆地生态系统的主体,它不仅具有改善和维护区域生态环境的功能,而且在全球碳平衡中起着巨大的作用,充分发挥森林的固碳能力关系到能否降低大气 CO<sub>2</sub> 浓度和抑制全球变暖趋势。文中就我国森林生态系统固碳功能和碳储量的研究进行了概括,并对未来森林生态系统碳循环研究提出一些看法。

**关键词:** 碳储量,碳平衡,森林生态系统

**中图分类号:** S 718.55

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4241(2006)01-0053-05

### Progress of Research on Carbon Fixation and Storage of Forest Ecosystems in China

Xiao Fuming<sup>1,2</sup> Zhang Qun<sup>3</sup> Fan Shaohui<sup>1</sup>

(1 International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China; 2 Jiangxi Academy of Forestry,

Nanchang 330032, China; 3 Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry;

Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

**Abstract:** Forest is the important form of terrestrial ecosystems. It is very important to global ecological environment and economy development of terrestrial ecosystems, but also to carbon balance of the globe. It plays great roles in atmospheric carbon fixation and protects biosphere from global warming. After reviewing past studies on carbon fixation and carbon storage of forest ecosystems in China, some primary opinions on future study are produced.

**Key words:** carbon storage, carbon balance, forest ecosystem

大气 CO<sub>2</sub> 浓度上升引起的温室效应及其所带来的一系列生态环境变化已成为生态学、环境科学等研究的热点问题。自 20 世纪 90 年代以来,全球变化研究领域日益加强了对全球碳循环的研究,国际地圈生物圈计划(IGBP)和世界气候研究计划(WCRP)积极地推动着这方面的工作,而且碳循环被确定为全球尺度模型化最初的工作重点<sup>[1]</sup>。森林生态系统是地球上除海洋之外最大的碳库,其碳贮量约为 1 146 PgC(1 Pg = 10<sup>9</sup> t),占全球陆地总碳贮量的 46%<sup>[2]</sup>。在这种变化的背景下,森林作为陆地生态系统的主体,研究其对现在及未来的气候变化和碳平衡都具有重

要意义。

#### 1 森林生态系统碳储量和碳平衡研究

最近几年,中国对于森林生态系统碳平衡的研究积累了许多资料。归结起来,森林生态系统碳平衡研究主要有 2 种方法,即反映 CO<sub>2</sub> 通量的微气象测定方法(涡相关法)和反映碳积累的现存生物量清查方法<sup>[3]</sup>。

涡度相关法是一种微气象技术,主要是在林冠上方直接测定 CO<sub>2</sub> 的涡流传递速率,从而计算出森林生态系统吸收固定 CO<sub>2</sub> 量的方法。这一方法国外用得比较多,在 20 世纪 80 年代开始使

用此方法,现已建立了150多个观测站;中国科学院于2002年正式启动了中国陆地生态系统碳通量观测项目,在长白山、千烟洲、鼎湖山和西双版纳设立了4个典型森林生态系统CO<sub>2</sub>通量定位观测站<sup>[3-5]</sup>。另一类是与生物量紧密相关的反映碳累积量的现存生物量清查方法。基于生物量的森林生态系统碳储量的估算,是利用生物量和干物质中碳含量的乘积得来的。我国森林生态系统碳储量的研究基本上是采用这种方法。

### 1.1 森林生态系统固碳能力及碳储量的研究

植物吸收CO<sub>2</sub>后进行光合作用以光合产物的形式对碳进行贮存,因此,森林固碳能力可以通过测定树木净光合作用速率和叶面积指数,根据植物种群结构参数,推算出林地光合作用固定的碳量<sup>[6]</sup>。此外,还可以利用森林资源清查资料所获得的林地生物量的变化计算碳的积累<sup>[7]</sup>。

目前,我国对森林碳储量的估计,无论在森林群落或森林生态系统尺度上还是在区域、国家尺度上,普遍采用的方法是,通过直接或间接测定森林植被的生产量与生物现存量再乘以生物量中碳元素的含量推算而得。因此,森林群落的生物量及其组成树种的含碳率是研究森林碳储量的关键因子。样地清查法是最基本、最可靠的方法,但只能应用于小尺度的研究。要解决大尺度上森林固碳的问题,必须借助模型模拟法和遥感估测法<sup>[8]</sup>。

### 1.2 森林生态系统碳释放的研究

#### 1.2.1 群落的呼吸作用

森林植被的CO<sub>2</sub>气体交换过程,是森林生产力形成的重要环节,群落呼吸量是系统净生产力的主要影响因素。近年来,国外开展了较多的研究,并总结出一些较好的测定方法,其中,累加法是目前便于操作、应用最广的一种方法<sup>[9]</sup>。利用便携式红外CO<sub>2</sub>分析仪,一般可按以下4个步骤估算森林群落呼吸量:首先是建立非同化器官的直径级与其总长度的关系;其次是建立呼吸速率与直径之间的数量关系式;第三是推导具有生物学意义的林木呼吸速率计算模型;最后是建立群落呼吸速率的计算公式,推算单株总体的呼吸速率以及整个群落的呼吸消耗量<sup>[10]</sup>。

#### 1.2.2 凋落物和土壤碳的释放

对土壤CO<sub>2</sub>释放的测量,既可以在实验室条件下进行,也可以在田间进行。目前基本上是在不破坏土壤结构的情况下,测量土壤表观CO<sub>2</sub>的释放量。Singh<sup>[11]</sup>大体上把测量方法分为2种:非直接测量方法和直接测量方法。非直接测量方法是指通过其他参数估算土壤释放量,例如通过测定土壤腐殖层重量的变化和土壤ATP含量等来推算土壤CO<sub>2</sub>释放量<sup>[12]</sup>;直接测量方法是指直接测定土壤释放CO<sub>2</sub>的量,传统的测定方法为碱吸收法。最近发展为红外线CO<sub>2</sub>分析法。也就是Witkamp<sup>[13]</sup>所提出的静态测量和动态测量2种方法。静态测量一般是用密闭箱扣在被测土壤表面,箱内放有CO<sub>2</sub>吸收物质,如氢氧化钠、氢氧化钡等,静止一段时间,然后用酸滴定剩余的碱,从而推算出土壤释放CO<sub>2</sub>的量。动态测量主要是指用测试仪器进行测量,如采用IRGA(红外气体分析仪),CID-301PS(光合测定仪)等直接测定进出口气体的浓度差,从而得出土壤的呼吸速率。

近年来,利用红外CO<sub>2</sub>气体分析仪进行测定也是比较普遍采用的方法之一。对于大尺度的研究,可以通过建立数学模型推算土壤的呼吸值。杨昕等利用实测资料建立了一套直接计算土壤呼吸的公式,在实验条件如试验仪器不足的情况下,采用某些可测定的指标,建立其与土壤呼吸间的定量关系,也不失为一种好的研究方法<sup>[14]</sup>。

## 2 我国森林生态系统碳储量和碳平衡的研究状况

中国的森林主要分布于寒温带与热带之间,并且森林类型多样。因此,我国森林生态系统在全球碳循环中的作用也是不容忽视的。目前,我国有关森林生态系统碳循环的研究还处于初级阶段,但许多学者在这方面做了非常有意义的工作。方精云等<sup>[15]</sup>利用大量的野外实测资料及新中国50年来的森林资源清查资料,采用改良的生物量换算因子法,研究了中国50年来(1949~1998)森林碳库和平均碳密度的变化,并分析了中国森林植被的CO<sub>2</sub>源汇功能。结果表明:20世纪70年代中期以前,主要由于森林砍伐等人为

作用,中国森林碳库和碳密度都是减少的,碳贮量减少了 0.62 PgC,年均减少约 0.024 PgC。在最近的 20 多年中,森林碳库由 70 年代末期的 4.38 PgC 增加到 1998 年的 4.75 PgC,共增加 0.37 PgC,年平均增加 0.022 PgC。并指出,产生这种现象的主要原因除人工林增加外,气温上升和高浓度 CO<sub>2</sub> 的施肥效应也可能是促进森林生长的重要因素。刘国华等<sup>[16]</sup>、周玉荣等<sup>[17]</sup>、王效科等<sup>[18]</sup>也分别利用森林资源清查资料从不同角度对我国森林生态系统的碳贮量和碳密度进行了分析。结果表明:我国森林正起着碳汇的作用,并且指出,我国主要森林生态系统碳贮量为 28.11 PgC,其中森林生态系统植物碳贮量为 3.26 ~ 3.73 PgC,占全球的 0.6% ~ 0.7%。进一步对碳密度进行分析发现:我国森林生态系统的平均碳密度是 258.83 t/hm<sup>2</sup>,基本上是随纬度增加而增加,森林生态系统植物碳密度在各森林类型间差异比较大,为 6.47 ~ 118.14 t/hm<sup>2</sup>,其变化趋势随纬度增加而减小。

另外,我国许多学者还对不同森林类型的碳储量及碳平衡进行了详细研究。如:李意德、吴仲民等对海南岛尖峰岭热带山地雨林生态系统的碳储量、CO<sub>2</sub> 的排放以及生态系统碳平衡等做了一定的研究工作<sup>[19-22]</sup>;方运霆等<sup>[23]</sup>指出,鼎湖山马尾松 (*Pinus massoniana*) 林生态系统的总碳贮量为 154.503 t/hm<sup>2</sup>;其中,植被层占 52.3%,并由此计算出广东省马尾松林植被的现有碳贮量为 0.032 3 PgC,潜在碳贮量为 0.241 8 PgC;唐旭利等<sup>[24]</sup>估算鼎湖山亚热带季风常绿阔叶林的碳贮量为 89.75 t/hm<sup>2</sup>,并指出碳贮量的径级分布类似于生物量,与森林的发育程度相关。陈楚莹等<sup>[25]</sup>估算出全国杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 人工林的碳总贮量为 0.78 PgC;肖复明、汪思龙等对中科院会同森林生态试验站中亚热带杉木人工林生态系统的碳储量、碳排放以及碳平衡特征进行了初步探讨<sup>[26]</sup>;方晰、田大伦等利用国家林业局会同森林定位站对二代杉木人工林速生阶段的碳密度、碳储量及其空间分布特征和碳平衡等进行了相关的研究<sup>[27,28]</sup>;陈存根、刘建军等对秦岭定位站油松、锐齿栎等主要森林类型的生物量、土壤呼吸及土壤碳循环做了相关的研究<sup>[29-31]</sup>;王金叶等对青海云杉林的碳汇功能及其

碳平衡进行了研究<sup>[32]</sup>;张娜等运用已建立的 EP-PML 生物地球化学循环模型,对 1995 年长白山自然保护区生态系统的碳平衡状况进行了模拟。模拟结果表明,该模型能够比较准确地反映生态系统的碳库动态,并且指出长白山自然保护区植被具有明显的碳汇功能,但不同森林类型的碳汇功能差异大<sup>[33]</sup>。

此外,在我国许多省区也在陆续开展这方面的工作,如福建省、湖南省、山东省、海南省等<sup>[34-37]</sup>。

### 3 森林生态系统碳循环研究存在的问题和不足

虽然对森林生态系统的研究取得了如上所述的一些预期结果,但在基于生物量的森林碳储量的估算上,不同的研究结果间仍存在一定的差异,无法确切反映出森林生态系统的现实状况,主要体现在以下几方面。

#### 3.1 碳汇研究的不确定性

虽然现在很多学者从事碳汇研究工作,但是由于森林碳汇的计算方法不同或者数据来源和模型的假定条件不同,计算得出的值存在很大的差异。Fang 等估算的中国森林植被碳储量为 4.63 PgC,略高于赵敏等的估算值 3.778 PgC,王效科等的估算结果为 3.255 ~ 3.724 PgC,低于上述两者,这主要由于所采用的方法和选择的参数值有别<sup>[38]</sup>。对我国森林年固碳量的估算,不同的学者也有不同的估算值,如康惠宁等认为,目前中国森林年固碳量为  $8.627 \times 10^{-5}$  PgC,而方精云等则认为达 0.021 PgC。也就是说,到目前为止,人们并没有找到一种有效的方法和途径来比较准确地估算森林碳汇<sup>[26]</sup>。如果这一问题不解决,全球碳收支也无法计算。

#### 3.2 碳汇形成机制的不确定性

现在有很多研究都证明,北半球中高纬度的陆地生态系统是一个巨大的碳汇,固定了大部分全球碳循环中被科技界称为“碳失汇”的 CO<sub>2</sub>。也就是说,北半球植被的物质合成能力在增加。方精云等<sup>[39]</sup>、王效科等<sup>[40]</sup>认为,这是由于气候变化、CO<sub>2</sub> 施肥、氮沉降、森林恢复和人工林增加 4 个方面造成的。但是,它们的相对重要性存在很大的不确定性。虽然现在大约有 1/3 的碳失汇或

0.6±0.5 PgC已在北部森林中观察到,但是对北部森林固碳的机制尚不清楚。无论是森林普查资料还是样地调查资料,所监测出的森林生态系统的碳积累不仅包括了森林生长所积累的碳,而且包括了氮沉降和气候变化所积累的碳,暂时还无法把它们区分开。

### 3.3 对生态系统呼吸作用因素考虑不足

在森林生态系统呼吸排放 CO<sub>2</sub> 的估算公式中,大部分只考虑了环境因子如温度、湿度等的影响,对于植物本身的生物学特性考虑较少,甚至没有考虑,从而影响到碳估算的准确性。对不同植被类型的土壤呼吸以及离体的木质器官的呼吸测定,很少外拓到一个生态系统的研究,并且以生物量清查法来推算森林固碳量时,往往忽略了森林土壤的碳源作用和生态系统内非目的树种的碳释放能力。目前,在林地土壤呼吸中,考虑得比较多的是它与温度、湿度的关系,并没有把土壤呼吸量与土壤根系、土壤中动物和微生物等诸个呼吸区分开。

### 3.4 模拟模型的不完善

目前森林生态系统碳循环模型主要有大气环流模式、气候模式和生态系统过程模式。这些模型的应用都有自己的限制条件,不同的模型估算值也不一样,这也许是影响碳估算不准确的因素之一。另外,在计算机模拟研究中,只是对某单一的碳汇机制进行研究,并没有利用2种以上的机制来估算碳汇值<sup>[41]</sup>。

## 4 森林生态系统碳循环研究展望

(1)建立具有统一的观测方法与规范的森林生态系统碳通量观测网络,以保证资料的可比性和连续性。应用微气象技术可以提供一个紧密的、长期的区域 CO<sub>2</sub> 平衡状况的监测网络,这是森林清查方法所不能实现的,因此,微气象技术在今后森林生态系统碳平衡研究中仍然是一个重要方法。增建新网站,扩大和完善 CO<sub>2</sub> 监测网络系统,加强区域和全球通量网建设,建立长期观测数据库,实现资源共享,将是今后森林生态系统碳平衡研究中的一个重点。

(2)加强森林生态系统碳平衡主导因子的研究,强调植物的生物学特性与环境因子对于生态系统呼吸的综合影响。加强对气候变化及人类

活动驱动下的多尺度森林生态系统碳循环机理与过程的认识,特别强调对森林生态系统不同发育阶段、不同利用方式对气候变化响应的机理研究。

(3)改善现有的动态模型,并针对中国森林生态系统的特特点,发展具有自主知识产权的森林生态系统碳循环模型,以准确估算中国森林生态系统碳源/汇的时间和空间分布格局。当前所用的模型多属于静态或经验统计模型,本身包括了许多假说和不确定因素,而动态模型或过程模型较少,且多数仍局限于局部地区甚至个别点。较为理想的模型是,综合考虑多种对象和因素的综合模型。

(4)遥感技术的应用,以实现森林生态系统碳源/汇的时间和空间分布格局的快速诊断与评估。遥感可以从多时相、多波段、多分辨率和全天候获得全球观测数据,并且能及时更新数据,从更准确的角度获取全球或大尺度的环境动态数据,因此在全球环境变化研究中得到广泛的应用<sup>[42]</sup>。通过遥感图像分析,可以了解过去几十年间尺度内森林生态系统的变化,分析其变化机制和影响因素,同时借助于地理信息系统手段建立森林生态系统的空间变化模型,使其具有数据实时更新、空间动态模拟等特点,可以及时地诊断和评估森林生态系统的碳平衡状况,提出森林生态系统管理的技术措施。

(5)碳平衡研究方法的改进。森林生态系统是一个庞大而复杂的动态变化的系统,现在主要是采用微气象法和生物量清查法,而这2种方法各有偏重和具有一定的局限性。在今后的研究中应提倡各种方法的综合运用,而且要倡导多学科研究人才的介入与联合,使研究向更高层次发展。如采用叶绿素指数作为林木群落年碳积累的指标,美国还建立了野外大型植物实验的天然 CO<sub>2</sub> 场,在人工模拟 CO<sub>2</sub> 的大气环境中,对植物的生理、生长的变化从机理上进行研究。

### 参考文献

- 1 Moore Berrein, Braswell Jr B H. 刘文新译. 地球的新陈代谢: 了解碳循环. *AMBIO*(人类环境杂志), 1994, 23(1): 1-12
- 2 Watson R T, Noble I R, Bolin B, et al. IPCC Special Report on Land Use, Land Use Change and Forestry, 2000
- 3 毛子军. 森林生态系统碳平衡估测方法及其研究进展. *植物*

- 生态学报, 2002, 26(6): 731 ~ 738
- 4 吴家兵, 张玉书, 关德新. 森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量研究方法与发展. 东北林业大学学报, 2003, 31(6): 49 ~ 51
  - 5 王文杰, 石福臣, 祖元刚, 等. 陆地生态系统二氧化碳通量网的建设和发展. 东北林业大学学报, 2002, 30(4): 57 ~ 61
  - 6 程根伟, 罗辑. 贡嘎山亚高山林地碳的积累与耗散特征. 地理学报, 2003, 58(2): 179 ~ 185
  - 7 何英. 森林固碳估算方法综述. 世界林业研究, 2005, 18(1): 22 ~ 27
  - 8 于贵瑞主编. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积. 北京: 气象出版社, 2003
  - 9 方精云. 森林群落呼吸量的研究方法及其应用的探讨. 植物学报, 1999, 41(1): 88 ~ 94
  - 10 方精云, 王效科, 刘国华, 等. 北京地区辽东栎呼吸量的测定. 生态学报, 1995, 15(3): 235 ~ 244
  - 11 Singh J S, S R Gupta. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystem. Bot Rev, 1977, 43: 449 ~ 528
  - 12 Robert E Schlentner, Keith Van Cleve. Relationships between CO<sub>2</sub> evolution from soil, substrate temperature, and substrate moisture in four mature forest types in interior Alaska. Can J For Res, 1985, 15
  - 13 Witkamp M, M L Frank. Evolution of CO<sub>2</sub> from litter, humus and subsoil of a pine stand. Pedobiologia, 1969, 9: 358 ~ 365
  - 14 杨晰, 王明星. 一个计算平均土壤呼吸速率和土壤碳密度的简单模型. 中国科学院研究生院学报, 2001, 18(1): 16 ~ 23
  - 15 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库动态变化及其意义. 植物学报, 2001, 43(9): 967 ~ 973
  - 16 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. 生态学报, 2000, 20(5): 733 ~ 740
  - 17 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518 ~ 522
  - 18 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳贮量和碳密度研究. 应用生态学报, 2001, 12(1): 13 ~ 16
  - 19 李意德, 吴仲民, 曾庆波, 等. 尖峰岭热带山地雨林群落生产和二氧化碳同化净增量的初步研究. 植物生态学报, 1998, 22(2): 127 ~ 134
  - 20 吴仲民, 曾庆波, 李意德, 等. 尖峰岭热带山地雨林土壤 C 储量和 CO<sub>2</sub> 排放量的初步研究. 植物生态学报, 1997, 21(5): 416 ~ 423
  - 21 骆士寿, 陈步峰, 李意德, 等. 海南岛尖峰岭热带山地雨林土壤和凋落物呼吸研究. 生态学报, 2001, 21(12): 2013 ~ 2017
  - 22 李意德, 吴仲民, 曾庆波, 等. 尖峰岭热带山地雨林生态系统碳平衡的初步研究. 生态学报, 1998, 18(4): 371 ~ 378
  - 23 方运霆, 莫江明. 鼎湖山马尾松林生态系统碳素分配和贮量的研究. 广西植物, 2002, 22(4): 305 ~ 310
  - 24 唐旭利, 周国逸, 温达志, 等. 鼎湖山亚热带季风常绿阔叶林 C 贮量分布. 生态学报, 2003, 23(1): 90 ~ 97
  - 25 陈楚莹, 廖利平, 汪思龙, 等. 杉木人工林生态系统碳素分配与贮量的研究. 应用生态学报, 2000, 11(supp.): 175 ~ 178
  - 26 肖复明. 杉木人工林生态系统碳平衡研究: [硕士学位论文]. 江西农业大学, 2003
  - 27 方昕, 田大伦, 项文化. 速生阶段杉木人工林碳素密度、贮量和分布. 林业科学, 2002, 38(3): 14 ~ 19
  - 28 方昕, 田大伦, 项文化, 闫文德. 第二代杉木中幼林生态系统碳动态与平衡. 中南林学院学报, 2002, 22(1): 1 ~ 6
  - 29 陈存根, 龚立群, 彭鸿, 等. 秦岭锐齿栎林的生物量和生产力. 西北林学院学报, 1996, 11(增刊): 103 ~ 114
  - 30 刘建军, 王得祥, 雷瑞德, 等. 火地塘林区锐齿栎林土壤碳循环的动态模拟. 西北农林科技大学学报, 2003, 31(6): 14 ~ 18
  - 31 刘建军, 王得祥, 雷瑞德, 等. 秦岭天然油松、锐齿栎林地土壤呼吸与 CO<sub>2</sub> 释放. 林业科学, 2003, 39(2): 8 ~ 13
  - 32 王金叶, 车克钧, 蒋志荣. 祁连山青海云杉林碳平衡研究. 西北林学院学报, 2000, 15(1): 9 ~ 14
  - 33 张娜, 于贵瑞, 赵士洞, 等. 长白山自然保护区生态系统碳平衡研究. 环境科学, 2003, 24(1): 24 ~ 32
  - 34 王义祥. 福建省主要森林类型碳库与杉木林碳吸存: [硕士学位论文]. 福州: 福建农林大学, 2004
  - 35 焦秀梅, 项文化, 田大伦. 湖南省森林植被的碳贮量及其地理分布规律. 中南林学院学报, 2005, 25(1): 4 ~ 8
  - 36 曹军, 张德铨, 刘燕华. 近 20 年海南岛森林生态系统碳储量变化. 地理研究, 2002, 21(5): 551 ~ 560
  - 37 张德全, 桑卫国, 李曰峰, 等. 山东省森林有机碳储量及其动态的研究. 植物生态学报, 2002, 26(增刊): 93 ~ 97
  - 38 赵敏, 周广胜. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因素分析. 地理科学, 2004, 24(1): 50 ~ 54
  - 39 方精云, 朴世龙, 赵淑清. CO<sub>2</sub> 失汇与北半球中高纬度陆地生态系统的碳汇. 植物生态学报, 2001, 25(5): 594 ~ 602
  - 40 王效科, 白艳莹, 欧阳志云, 等. 全球碳循环中的失汇及其形成原因. 生态学报, 2002, 22(1): 94 ~ 103
  - 41 方精云. 北半球中高纬度的森林碳库可能远小于目前的估算. 植物生态学报, 2000, 24(5): 635 ~ 638
  - 42 王长耀, 布和敖斯尔, 狄小春. 遥感技术在全球环境变化研究中的作用. 地球科学进展, 1998, 13(3): 278 ~ 284