



论文

1977~2008 年中国森林生物量碳汇的时空变化

郭兆迪^①, 胡会峰^②, 李品^①, 李怒云^③, 方精云^{①④*}^① 北京大学城市与环境学院生态学系, 北京大学地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871;^② 中国科学院植物研究所, 植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093;^③ 中国绿色碳汇基金会, 北京 100714;^④ 中国科学院学部-北京大学气候变化研究中心, 北京 100871

* 联系人, E-mail: jyfang@urban.pku.edu.cn

收稿日期: 2013-04-07; 接受日期: 2013-04-14; 网络版发表: 2013-05-07

全球变化研究国家重大科学研究计划(批准号: 2010CB950600)、国家自然科学基金(批准号: 31021001, 30721140306)和中国科学院战略性先导科技专项(批准号: XDA05050503)与国家林业局“中国森林生态系统的碳汇计量与预测”项目资助

摘要 森林在区域和全球碳循环中起着关键作用. 研究中国森林生物量碳源汇变化对于估算区域碳收支和制定应对气候变化的森林管理政策有重要意义. 利用 1977~2008 年间 6 期的森林资源清查资料, 通过评估生物量碳库变化来估算中国森林生物量碳汇大小及其变化. 森林按其用途和形态特征, 分为林分、经济林和竹林三大类别. 采用连续生物量转换因子法估算林分生物量碳库, 平均生物量法估算经济林和竹林生物量碳库. 结果显示, 在 1977~2008 年间, 中国森林生物量碳库累计增加(即生物量碳汇)1896 TgC (1 Tg=10¹² g), 其中, 林分、经济林和竹林分别增加 1710, 108 和 78 TgC; 年均生物量碳汇为 70.2 TgC/a, 相当于抵消中国同期化石燃料排放 CO₂ 的 7.8%. 研究还表明, 中国人工林的生物量碳库持续增加, 生物量碳汇为 818 TgC, 占林分总碳汇的 47.8%; 各龄级林分的生物量碳汇都有不同程度的增加: 老龄林、中龄林和幼龄林分别增加 930, 391 和 388 TgC. 由于现阶段中国森林具有林龄小、平均碳密度低和人工林面积大的特点, 因此未来中国森林生物量增汇潜力巨大.

关键词森林
生物量碳库
碳汇
森林资源清查
中国

森林生物量占全球陆地植被总生物量的 85%~90%, 且每年森林通过光合作用和呼吸作用与大气进行的碳交换量占整个陆地生态系统碳交换量的 90%, 因此, 森林在区域碳和全球碳循环中发挥着关键作用^[1~12]. 当森林受到干扰时可能成为碳源, 但干扰过后, 森林的再生长可以固定和储存大量的碳从而成为碳汇^[11,13~16]. 因此, “京都议定书”明确指出了造林和再造林在抵消温室气体排放方面的作用^[14].

生物量碳库及其变化是陆地碳循环研究的核心

问题之一. 近年来, 很多国家采取大规模、统计上有效布设的抽样方法进行了区域或国家范围的森林清查, 为计算区域或国家尺度的森林生物量提供了宝贵的实测数据^[3,5,7,15,17,18]. 例如, Brown 和 Schroeder^[15]基于美国森林清查数据, 估算得到美国东部森林生物量在 20 世纪 80 年代末~90 年代初年均累积约 174 TgC(1 Tg=10¹² g), 而 90 年代初美国工业碳排放量为 1.3 PgC/a(1 Pg=10¹⁵ g)^[19], 因此, 美国东部森林生物量碳汇相当于抵消同期美国工业碳排放的 13%.

引用格式: 郭兆迪, 胡会峰, 李品, 等. 1977~2008 年中国森林生物量碳汇的时空变化. 中国科学: 生命科学, 2013, 43: 421~431

英文版见: Guo Z D, Hu H F, Li P, et al. Spatio-temporal changes in biomass carbon sinks in China's forests during 1977~2008. Sci China Life Sci, 2013, 56, doi: 10.1007/s11427-013-4492-2

同样, 欧洲陆地生态系统吸收了人为源 CO_2 排放量的 7%~12%^[7].

中国森林面积广阔, 位列世界第 5^[20], 森林类型丰富, 从南到北分布着热带亚热带常绿阔叶林、温带阔叶林、温带针阔混交林和寒温带针叶林, 为研究森林碳循环提供了不可多得的研究素材^[21]. 此外, 自 20 世纪 70 年代以来, 中国实施了大规模的人工造林、护林项目(如三北和长江等重点防护林体系建设工程、天然林资源保护工程、退耕还林工程), 使中国森林近几十年来发挥着重要的碳汇作用^[3,11,18,22~32]. 2001 年, Fang 等人^[3]基于森林资源清查数据估算了中国森林生物量碳库在 1949~1998 年间的变化, 得出年均碳汇为 0.021 PgC/a. 10 年后, 在 Pan 等人^[11]的研究中, 1990~1999 和 2000~2007 年两个时期中国森林生物量年均碳汇分别为 0.060 和 0.115 PgC/a. 这些研究均显示了中国森林生物量在区域和全球碳收支中的重要性, 但对于各森林类型、各龄级的生物量碳库的贡献以及在各省区的分布还缺少系统的、详细的研究. 因此, 本研究基于最新的森林资源清查数据, 在估算 1977~2008 年间中国整体森林生物量碳库及其变化的基础上, 分别估算了林分、经济林和竹林的生物量碳库, 并分析不同起源、不同地带性和不同龄级的林分对森林总碳库和总碳汇的贡献.

1 数据与方法

采用 6 期全国森林资源清查数据, 即 1977~1981, 1984~1988, 1989~1993, 1994~1998, 1999~2003 和 2004~2008 年. 该数据将中国森林划分为林分、经济林和竹林三大类别. 其中, 林分按各省区, 分别给出了各优势树种及林分起源(天然林和人工林)按龄级统计的面积和蓄积数据; 而经济林和竹林则分别给出了各省区的面积数据. 需要说明的是, 由于清查数据中缺少台湾、香港、澳门的详细数据, 因此本研究计算结果不包含这些地区.

森林生物量的估算方法随着野外实测数据的不断完善和研究的不断深入, 由早期的平均生物量密度法发展到平均生物量转换因子法, 再到连续生物量转换因子法(生物量转换因子: biomass expansion factor, BEF, 指生物量与蓄积量的比值)^[33,34]. 依据森林资源清查数据特点, 本研究采用连续 BEF 函数法计算林分生物量, 采用平均生物量密度法计算经济

林和竹林生物量, 并以 0.5 作为生物量的碳转换系数.

1.1 林分

早期研究表明, BEF 可以表达为蓄积量密度的函数^[3,14,15,17,23,35,36], 其中形如公式(1)的倒数函数方法被证明可以实现由样地实测到区域推算的尺度转换^[37], 因此, 采用公式(1)的方法计算中国林分的生物量. BEF 函数参数详见网络版附表 1, 方法的具体介绍参见早期研究^[3,18,34].

$$\text{BEF} = a + b/x, \quad (1)$$

式中, x 是蓄积量密度, a , b 为某一种森林类型的常数, BEF 为生物量转换因子.

中国森林资源清查数据中林分的划分标准在 1994 年由郁闭度大于 0.3 改为郁闭度大于等于 0.2. 因此, 为了统一标准以便进行各时期的比较, 早期研究利用 1994~1998 年调查期的双重标准数据, 建立了在省区水平上两种标准的面积以及总碳库之间的线性换算关系^[18]. 为实现更精确的转换, 采用幂函数转换关系将标准统一转换为郁闭度大于等于 0.2, 即:

$$\text{AREA}_{0.2} = 1.290 \times \text{AREA}_{0.3}^{0.995} (R^2 = 0.996, n = 30), \quad (2)$$

$$\text{CARBON}_{0.2} = 1.147 \times \text{CARBON}_{0.3}^{0.996} (R^2 = 0.999, n = 30), \quad (3)$$

式中, AREA 和 CARBON 分别为省级林分面积(单位: 10^4 ha)和生物量碳库(TgC), 下脚标 0.3 和 0.2 分别表示郁闭度大于 0.3 和郁闭度大于等于 0.2 的林分标准.

此外, 由于早期的森林资源清查数据没有给出人工林分和天然林分按优势树种统计的数据, 仅提供了这两种起源林分各自在各省区的总面积和总蓄积, 所以不能采用网络版附表 1 中按树种的 BEF 函数计算人工林分和天然林分各自的生物量. 不过, 依据早期研究的方法可以建立区域水平的生物量转换因子函数^[38]. 本研究首先采用网络版附表 1 中按树种的 BEF 函数计算得到各省区总林分的生物量, 然后由计算结果建立了省区水平上总林分生物量密度与蓄积量密度的关系(公式 4, 图 1). 这样, 依据公式 4 可以分别计算各省区人工林分和天然林分的生物量, 从而得到各省区这两种起源林分的生物量比例, 再将总林分生物量按比例分配给人工林分和天然林分.

$$\text{BD} = 0.704 \times \text{VD} + 19.953 (R^2 = 0.968, n = 211), \quad (4)$$

式中, BD 和 VD 分别是省区水平的林分生物量密度(Mg/ha , $1 \text{ Mg} = 10^6 \text{ g}$)和蓄积量密度(m^3/ha).

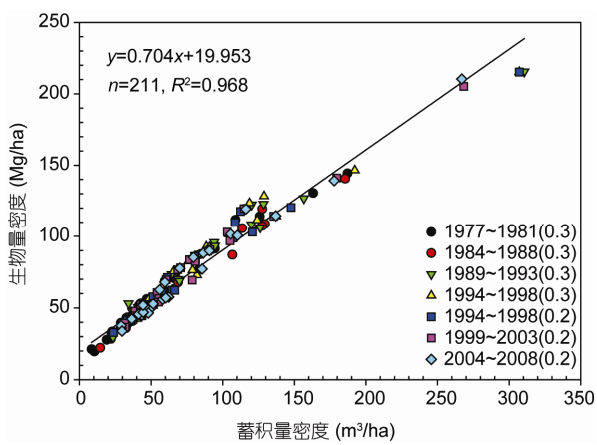


图 1 省区水平上林分生物量密度与蓄积量密度的关系

图例括号中的 0.3 表示林分标准为郁闭度大于 0.3 的数据, 0.2 表示郁闭度大于等于 0.2 的数据

1.2 经济林与竹林

以往计算经济林生物量是采用平均生物量密度为 23.7 Mg/ha 的方法^[22], 由于森林资源清查数据仅提供了经济林的面积数据, 因此, 本研究沿用此方法.

森林资源清查数据提供了毛竹和杂竹的面积数据. 为了估算中国竹林生物量碳库及其变化, 本研究广泛收集相关文献, 分别建立了毛竹和杂竹生物量数据库, 包含 37 组毛竹生物量数据和 43 组杂竹生物量数据, 得到毛竹和杂竹的平均生物量密度分别为 81.9 和 53.1 Mg/ha, 据此估算竹林的生物量.

2 结果

2.1 中国森林总生物量碳库和碳汇

中国森林总生物量碳库由 1977~1981 年调查期的 4972 TgC(即 4.972 PgC)增加到 2004~2008 年调查期

的 6868 TgC, 净增加 1896 TgC, 年均增加速率为 70.2 TgC/a(表 1). 由表 1 可见, 不同时期的碳汇大小差异较大: 最小碳汇(10.1 TgC/a)出现在 1994~1998 年调查期, 最大碳汇(114.9 TgC/a)出现在最近一期(2004~2008 年). 这表明中国森林植被的碳汇功能在显著增加.

作为森林的主体, 中国林分面积占森林总面积的 84.4%~89.5%, 贮存了森林总生物量碳库的 93.2%~94.9%, 在 1977~2008 年间林分生物量碳库累计增加 1710 TgC, 年均碳汇为 63.3 TgC/a, 占森林总碳汇的 90.2%. 林分生物量碳库仅在 1994~1998 年间略有减少(主要是由于森林面积的统计误差所致), 其他时期均为增加, 特别是在最近一期(2004~2008 年), 年均碳汇高达 112.9 TgC/a. 单位面积的林分生物量碳密度也有所增加, 由研究初期(1977~1981 年)的 38.2 MgC/ha, 增加到研究末期(2004~2008 年)的 41.3 MgC/ha.

此外, 经济林和竹林的面积分别占中国森林总面积的 8.2%~12.9%和 2.3%~3.0%, 生物量碳库分别占 2.7%~4.1%和 2.4%~2.9%. 在 1977~2008 年间, 经济林和竹林生物量碳库分别增加 108 和 78 TgC, 年均碳汇为 4.0 和 2.9 TgC/a, 分别为中国森林生物量碳汇贡献了 5.7%和 4.1%.

2.2 林分生物量碳库的时空分布

图 2 分别显示研究初期(1977~1981 年)和末期(2004~2008 年)中国各省区林分生物量碳库和碳密度, 以及在 1977~2008 年间各省区林分碳汇和林分面积的绝对变化. 在 1977~1981 年调查期, 林分生物量碳库最大的省区是黑龙江(801.8 TgC), 占全国总碳库的 17.0%, 其次是西藏(621.9 TgC)、云南(556.6 TgC)、

表 1 中国森林生物量碳库和碳汇

调查期(年)	全部森林			林分				经济林			竹林		
	面积 10 ⁴ ha	碳库 TgC	碳汇 TgC/a	面积 10 ⁴ ha	碳库 TgC	碳密度 MgC/ha	碳汇 TgC/a	面积 10 ⁴ ha	碳库 TgC	碳汇 TgC/a	面积 10 ⁴ ha	碳库 TgC	碳汇 TgC/a
1977~1981	13798	4972		12350	4717	38.2		1128	134		320	121	
1984~1988	14898	5178	29.5	13169	4885	37.1	23.9	1374	163	4.2	355	131	1.4
1989~1993	15960	5731	110.6	13971	5402	38.7	103.5	1610	191	5.6	379	138	1.5
1994~1998	15684	5781	10.1	13241	5388	40.7	-2.9	2022	240	9.8	421	154	3.1
1999~2003	16902	6293	102.3	14279	5862	41.1	94.9	2139	253	2.8	484	177	4.7
2004~2008	18138	6868	114.9	15559	6427	41.3	112.9	2041	242	-2.3	538	199	4.3
1977~2008			70.2				63.3			4.0			2.9

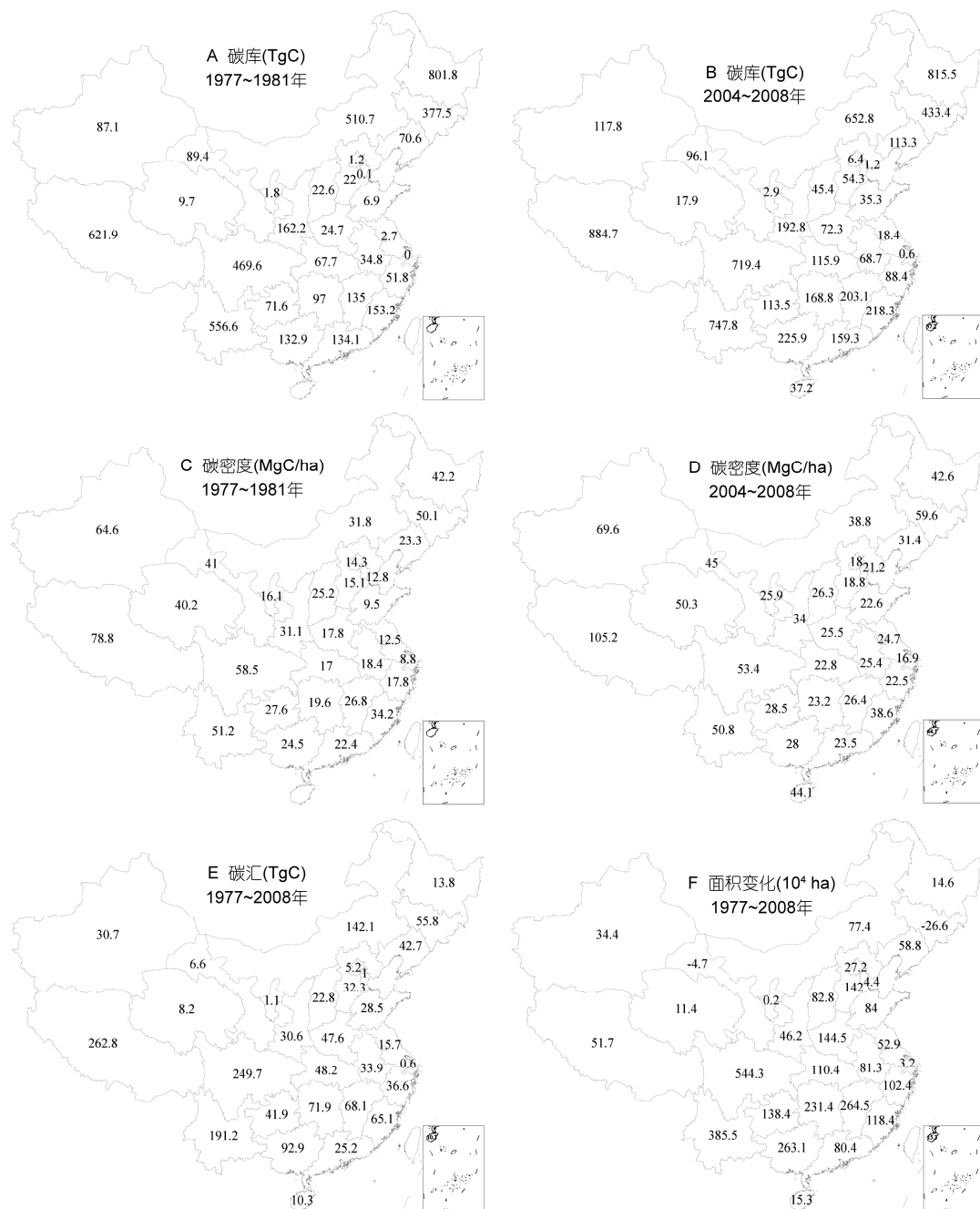


图2 中国各省区 1977~2008 年前后两期林分生物量碳库和碳密度对比及碳汇和面积变化

A: 1977~1981 年碳库分布; B: 2004~2008 年碳库分布; C: 1977~1981 年碳密度分布; D: 2004~2008 年碳密度分布; E: 1977~2008 年碳汇分布; F: 1977~2008 年面积变化分布

内蒙古(510.7 TgC)和四川(469.6 TgC), 分别占全国总林分生物量碳库的 13.2%, 11.8%, 10.8%和 10.0%; 各省区林分生物量碳密度范围是 8.8 MgC/ha(上海)~78.8 MgC/ha(西藏), 其中有 8 个省区高于同期全

国林分平均生物量碳密度(38.2 MgC/ha); 在 2004~2008 年调查期, 林分生物量碳库最大的省区变成了西藏(884.7 TgC), 占全国总碳库的 13.8%, 其次是黑龙江(815.5 TgC)、云南(747.8 TgC)、四川(719.4 TgC)

和内蒙古(652.8 TgC), 分别占全国总林分生物量碳库的 12.7%, 11.6%, 11.2%和 10.2%; 林分生物量碳密度范围是 16.9 MgC/ha(上海)~105.2 MgC/ha(西藏), 其中有 9 个省区高于同期全国林分平均生物量碳密度(41.3 MgC/ha).

由图 2 可知, 1977~2008 年间, 所有省区的林分生物量都在增加, 即起着碳汇作用. 其中, 最大的碳汇出现在西藏, 净吸收 262.8 TgC(占全国林分总碳汇的 15.4%), 其次分别为四川(249.7 TgC)、云南(191.2 TgC)和内蒙古(142.1 TgC), 分别占全国林分总碳汇的 14.6%, 11.2%和 8.3%. 此外, 除吉林和甘肃两省的林分面积分别减少 26.6×10^4 和 4.7×10^4 ha 外, 其他省区的林分面积均有所增加.

2.3 人工林和天然林的碳库及其变化

表 2 列出了中国人工林分和天然林分在 1977~2008 年间生物量碳库及其变化. 自 20 世纪 70 年代末以来, 由于中国实施了大规模的造林、再造林工程, 人工林分的面积净增加 24.05×10^6 ha, 占林分面积净增量的 74.9%, 占森林面积净增量的 55.4%. 同时, 人工林分的生物量碳库由研究初期(1977~1981 年)的 250 TgC 增加到研究末期(2004~2008 年)的 1067 TgC, 净增加 3 倍多, 其占林分总碳库的比例也由研究初期的 5.3%增加到研究末期的 16.6%.

在 1977~2008 年间, 人工林分生物量持续表现为碳汇, 共吸收 818 TgC, 年均碳汇为 30.3 TgC/a, 分别占中国林分和森林总碳汇的 47.8%和 43.1%. 同时期的天然林分并不是一直保持碳汇功能, 其中有两个时期(1984~1988 和 1994~1998 年)天然林分生物量碳库略有减少, 共减少 132 TgC, 但在其他时期碳库都有所增加, 共增加 1024 TgC. 因此, 在整个调查期, 天然林分生物量碳库净增加 892 TgC, 年均碳汇为

33.0 TgC/a. 值得注意的是, 自 20 世纪 90 年代后期以来, 天然林分生物量碳库持续增加. 由表 2 还可见, 调查期人工林分的生物量碳密度显著增加, 由研究初期的 15.6 MgC/ha 增加到研究末期的 26.7 MgC/ha, 但仅相当于同期天然林分生物量碳密度的 37.7%~57.5%. 这说明未来即使人工林分不再增加种植面积, 仅凭现有人工林分的生长, 仍然可以吸收大量的碳.

人工林分和天然林分生物量碳汇在空间分布上有明显差异(图 3). 所有省区的人工林分均表现为碳汇. 其中, 最大的是四川(81.1 TgC), 其次是福建(68.9 TgC)、黑龙江(60.9 TgC)和湖南(58.6 TgC). 而天然林分在 25 个省区中表现为碳汇, 最大的几个省区分别为西藏(262.1 TgC)、四川(168.6 TgC)、云南(152.4 TgC)和内蒙古(95.8 TgC). 天然林分生物量碳库表现为碳源的省区为黑龙江(-47.2 TgC)、广东(-13.3 TgC)、甘肃(-4.5 TgC)、福建(-3.8 TgC)和上海(-0.02 TgC).

2.4 不同地带性森林类型的碳库及其变化

中国拥有从南方的热带雨林到北方的寒温带针叶林, 近乎北半球的所有主要森林类型. 为了研究不同地带性森林类型的生物量碳库及其碳汇的贡献, 通过森林资源清查数据中优势树种信息将林分划分为 5 个地带性森林类型, 即寒温带针叶林、温带针叶林、温带落叶阔叶林、温带/亚热带混交林和常绿阔叶林^[39].

表 3 显示了 1977~2008 年间中国各地带性森林类型的生物量碳库和碳汇. 在 1977~1981 年调查期, 最大的碳库是寒温带针叶林, 占林分总碳库的 31.0%, 其他森林类型依次为常绿阔叶林、温带落叶阔叶林、温带/亚热带混交林和温带针叶林, 分别占林分总碳

表 2 中国人工林分和天然林分生物量碳库和碳汇

调查期(年)	人工林分				天然林分			
	面积 10 ⁴ ha	碳库 TgC	碳密度 MgC/ha	碳汇 TgC/a	面积 10 ⁴ ha	碳库 TgC	碳密度 MgC/ha	碳汇 TgC/a
1977~1981	1595	250	15.6		10755	4468	41.5	
1984~1988	2347	418	17.8	24.1	10822	4467	41.3	-0.1
1989~1993	2675	526	19.7	21.6	11296	4876	43.2	81.9
1994~1998	2914	642	22.0	23.3	10326	4746	46.0	-26.2
1999~2003	3229	836	25.9	38.7	11049	5026	45.5	56.2
2004~2008	4000	1067	26.7	46.2	11559	5360	46.4	66.7
1977~2008				30.3				33.0

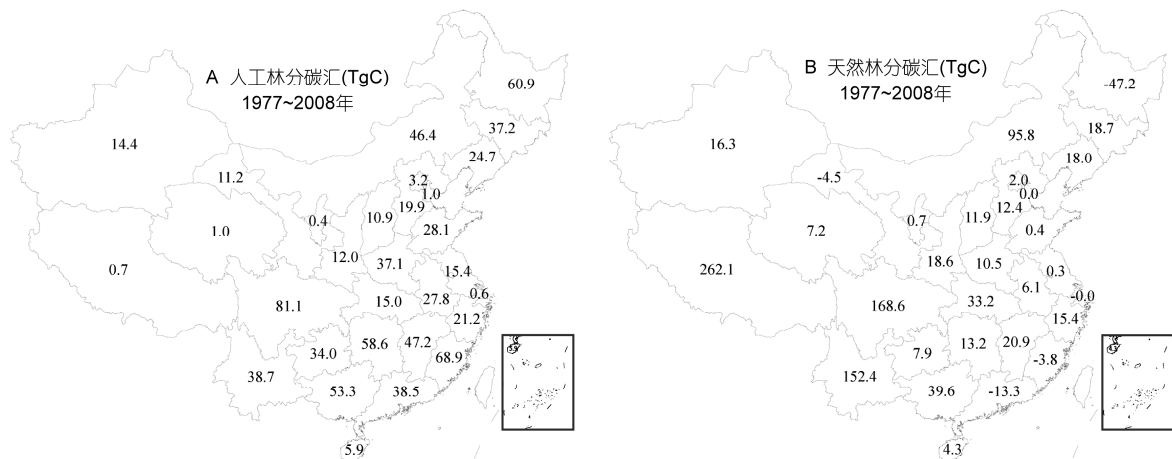


图 3 1977~2008 年间中国各省区人工林分和天然林分生物量碳汇
A: 人工林分碳汇分布; B: 天然林分碳汇分布

表 3 中国不同地带性森林类型的生物量碳库及其变化

森林类型	调查期(年)	面积 10 ⁴ ha	碳库 TgC	碳密度 MgC/ha	碳汇 TgC/a
寒温带针叶林	1977~1981	2174	1463	67.3	
	1984~1988	2196	1481	67.4	2.6
	1989~1993	2350	1683	71.6	40.4
	1994~1998	2131	1637	76.8	-9.3
	1999~2003	1826	1263	69.2	-74.7
	2004~2008	1805	1242	68.8	-4.3
	1977~2008				-8.2
温带针叶林	1977~1981	837	284	33.9	
	1984~1988	1055	319	30.3	5.0
	1989~1993	1114	386	34.6	13.3
	1994~1998	1025	335	32.7	-10.2
	1999~2003	1144	410	35.8	15.0
	2004~2008	1573	552	35.1	28.4
	1977~2008				9.9
温带落叶阔叶林	1977~1981	2425	870	35.9	
	1984~1988	3793	1400	36.9	75.7
	1989~1993	4129	1539	37.3	27.8
	1994~1998	3694	1566	42.4	5.4
	1999~2003	3824	1626	42.5	11.8
	2004~2008	3820	1577	41.3	-9.7
	1977~2008				26.2
温带/亚热带混交林	1977~1981	3697	816	22.1	
	1984~1988	3459	703	20.3	-16.2
	1989~1993	4158	901	21.7	39.7
	1994~1998	4239	1016	24.0	23.1
	1999~2003	4528	1256	27.7	47.9
	2004~2008	3855	1156	30.0	-20.0
	1977~2008				12.6
常绿阔叶林	1977~1981	3217	1284	39.9	
	1984~1988	2666	982	36.8	-43.2
	1989~1993	2221	893	40.2	-17.8
	1994~1998	2151	834	38.8	-11.9
	1999~2003	2956	1308	44.3	94.9
	2004~2008	4506	1901	42.2	118.6
	1977~2008				22.8

库的 27.2%, 18.5%, 17.3% 和 6.0%。经过近 30 年的变化, 各森林类型的碳库比例也发生了变化, 研究末期最大的碳库存储在常绿阔叶林中, 占林分总碳库的 29.6%, 其次分别为温带落叶阔叶林(24.5%)、寒温带针叶林(19.3%)、温带/亚热带混交林(18.0%)和温带针叶林(8.6%)。除了寒温带针叶林的生物量碳库减少外, 其他 4 种森林类型生物量碳库均在增加: 增加最多的是温带落叶阔叶林, 净增加 706 TgC, 年均碳汇为 26.2 TgC/a; 其次是常绿阔叶林、温带/亚热带混交林和温带针叶林。对寒温带针叶林而言, 在 1977~1993 年间碳库保持增加, 共增加 220 TgC, 但在 1994~2008 年间, 碳库开始减少, 共减少 441 TgC, 所以, 在整个调查期, 净减少 221 TgC, 年均碳释放为 8.2 TgC/a。各地带性森林类型生物量碳库的变化与其面积的变化密切相关: 除了寒温带森林面积减少了 3.69×10^6 ha 外, 其他 4 种森林类型的面积均有所增加。

由表 3 还可知, 1977~2008 年间, 5 种地带性森林类型的生物量碳密度均在增加, 增加的相对比例最大的是温带/亚热带混交林, 碳密度增加了 35.9%。整个研究期间碳密度最大的森林类型是寒温带针叶林, 如 2004~2008 年调查期的碳密度高达 68.8 MgC/ha。

2.5 不同龄级的林分生物量碳库及其变化

森林资源清查数据中, 1977~1981 年调查期的龄级划分为 3 个, 即幼龄林、中龄林和成熟林; 之后各调查期划分为 5 个龄级, 即幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林。为便于各个时期的比较, 将近熟林、成熟林和过熟林归为一个林龄组——老龄林。图 4 显示中国林分 3 个龄组的面积、生物量碳库和碳密度的变化。老龄林占林分总面积的 54.4%~55.0%; 在 1977~2008 年间, 生物量碳库净增加 930 TgC, 年均碳汇为 34.5 TgC/a, 对林分总碳汇的贡献为 54.4%。中龄林和幼龄林的面积分别占 22.9%~32.6% 和 12.8%~17.0%; 二者生物量碳汇十分接近, 分别为 391 TgC(年均碳汇为 14.5 TgC/a) 和 388 TgC(年均碳汇为 14.4 TgC/a), 分别占林分总碳汇的 22.9% 和 22.7%。

森林面积的增加是碳库增加的重要原因之一。面积增量由多到少依次为老龄林、幼龄林和中龄林, 分别增加 12.73×10^6 , 10.76×10^6 和 8.60×10^6 ha, 分别占林分面积总增量的 39.7%, 33.5% 和 26.8%。另外,

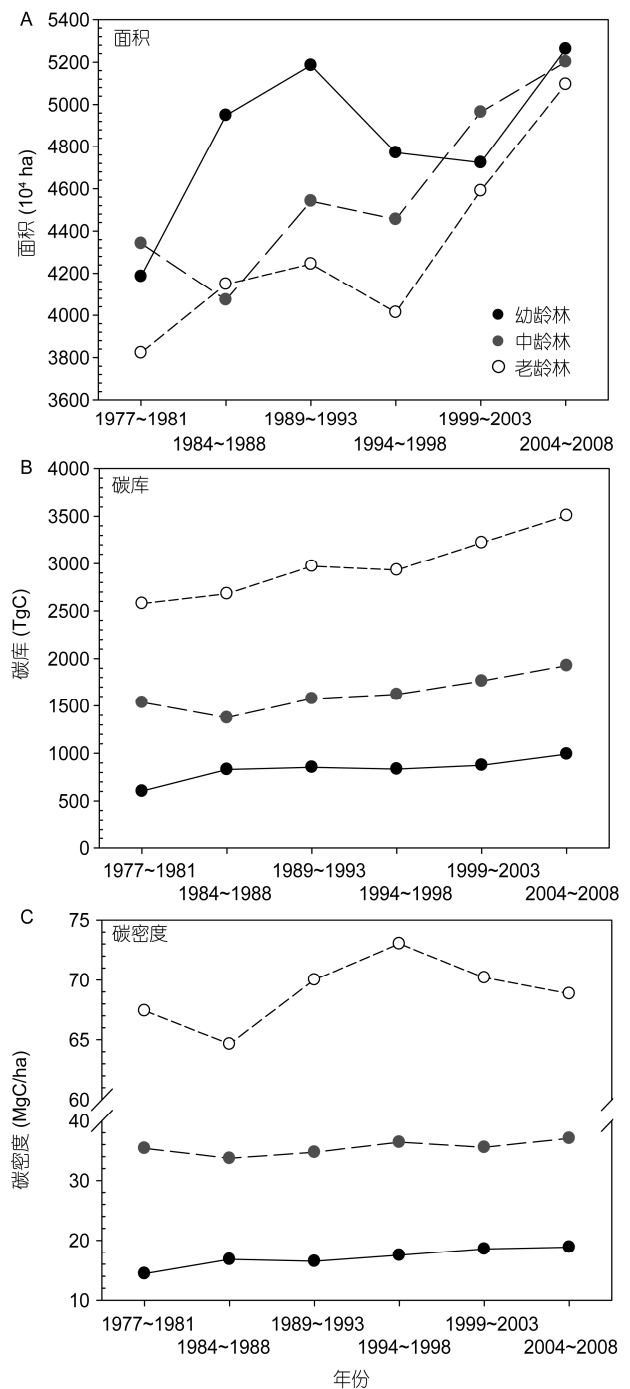


图 4 1977~2008 年间中国林分各龄级组的面积、生物量碳库及碳密度变化

A: 面积变化; B: 碳库变化; C: 碳密度变化

森林生长也是各个龄级生物量碳库增加的一个重要原因。研究初期(1977~1981 年), 幼龄林、中龄林和老龄林生物量碳密度依次为 14.4, 35.4 和 67.4

MgC/ha; 到研究末期(2004~2008 年), 碳密度依次增加到 18.9, 37.1 和 68.8 MgC/ha. 值得注意的是, 老龄林的生物量碳密度分别是中龄林和幼龄林的 1.9 和 3.7 倍, 表明如果中龄林和幼龄林继续生长, 将会具有很大的碳汇潜力.

3 讨论

3.1 中国森林生物量碳汇

本研究得到 1977~2008 年间中国森林生物量的年均碳汇为 70.2 TgC/a; 其中, 林分碳汇为 63.3 TgC/a, 经济林碳汇为 4.0 TgC/a, 竹林碳汇为 2.9 TgC/a. 早期研究采用线性森林标准转换关系得到 1977~2003 年间中国林分生物量碳汇为 75.2 TgC/a^[18], 高于本研究结果, 其可能的主要原因是林分标准由郁闭度大于 0.3 向郁闭度大于等于 0.2 转换过程中采用线性关系低估了前几期的林分生物量碳库. 另有研究显示, 在 1990~1999 和 2000~2007 年两个时期中国森林生物量碳汇分别为 60 和 115 TgC/a^[11], 与本研究相近时期的碳汇结果十分接近: 本研究中 1989~1998 年间森林平均碳汇为 60 TgC/a(1989~1993 和 1994~1998 年两期碳汇的平均值, 见表 1)和 1999~2008 年间森林平均碳汇为 109 TgC/a (1999~2003 和 2004~2008 年两期碳汇的平均值, 表 1).

Pan 等人^[26]采用植株密度方程估算竹林的生物量碳库, 在 1977~1993 年间, 竹林生物量碳库由 65 TgC 增加到 80 TgC; 而本研究将竹林分成毛竹和杂竹两部分, 依据大量文献中毛竹和杂竹的生物量密度分别进行生物量估算, 结果显示竹林生物量碳库在 1977~1993 年间由 121 TgC 增加到 138 TgC. 可见, 在竹林生物量碳库估算方面, 本研究结果显著高于 Pan 等人^[26]的结果, 但估算的竹林生物量碳汇结果十分接近.

为了与其他国家和地区的森林碳汇进行比较, 依据 1977~2008 年间 6 期的森林面积平均值 159.0×10^6 ha, 计算得出该期间中国森林单位面积的碳汇为 0.44 MgC/ha/a. 同样, 可以计算出各相邻两期的碳汇: 0.21 MgC/ha/a(1977~1988 年), 0.72 MgC/ha/a(1984~1993 年), 0.06 MgC/ha/a(1989~1998 年), 0.63 MgC/ha/a(1994~2003 年)和 0.66 MgC/ha/a(1999~2008 年). 依据 Pan 等人^[11]结果, 列出了同样基于森

林资源清查数据得到的北半球主要国家和地区的森林生物量碳汇(表 4). 可见, 不论是本研究还是其他研究得到的各个国家和地区的森林碳汇在不同时期都存在显著差异; 若按中国整个研究期(1977~2008 年)的平均碳汇(0.44 MgC/ha/a)进行比较, 中国处于较低水平, 但自 20 世纪 90 年代中期以来, 中国森林的碳汇有所增加(0.63~0.66 MgC/ha/a), 与美国和俄罗斯水平相当, 但仍低于欧洲和日本.

3.2 人工林分和天然林分的碳汇贡献

中国拥有世界上最大的人工林面积, 它们在固碳和改善区域环境方面发挥着重要作用. 本研究结果显示, 中国人工林分在 1977~2008 年间持续发挥碳汇作用, 约一半的林分碳汇来自人工林分(表 2). 这归因于人工林分面积和生物量碳密度的持续增加.

尽管天然林分的面积是人工林分的 4 倍多, 但其生物量碳汇大小仅相当于人工林分. 影响天然林分碳汇大小也主要取决于面积和生物量碳密度的变化. 自 1998 年起, 中国开展天然林资源保护工程, 天然林分的面积得以持续增加, 生物量碳密度也略有增加, 因而使得天然林分生物量碳库也增长显著.

3.3 中国森林碳汇的减排作用

依据《中国统计年鉴》中的能源消耗和水泥生产数据, 采用早期计算方法^[40]得到 1977~2008 年间中国化石燃料 CO₂ 排放量为 27.7 PgC, 年均排放速率为 895 TgC/a. 因此, 同时期中国森林生物量碳汇(70.2 TgC/a)可以抵消掉 7.8%的中国化石燃料 CO₂ 排放, 其中林分可以抵消 7.1%的化石燃料 CO₂ 排放. Pan 等人^[11]的研究显示, 在 1990~1999 和 2000~2007 年两个时期, 中国森林生物量碳汇占森林(包含枯死木、收获

表 4 北半球主要国家和地区森林生物量碳汇能力(根据文献[11]整理得到)

国家/地区	碳汇能力(MgC/ha/a)	
	1990~1999 年	2000~2007 年
中国 ^{a)}	0.43	0.77
加拿大	0.03	-0.21
美国 ^{b)}	0.47	0.58
欧洲	1.09	1.31
日本	1.01	0.99
俄罗斯	0.33	0.61

a) 不含台湾、香港和澳门地区; b) 仅包含美国本土和阿拉斯加东南部

的木材产品、生物量、凋落物和土壤)碳汇的 44.4%~63.2%, 依据该比例和本研究得出的森林生物量碳汇, 可以粗略估算 1977~2008 年间中国整个森林的碳汇为 111.1~158.1 TgC/a. 因此, 中国森林碳汇可以抵消中国同期化石燃料 CO₂ 排放的 12.4%~17.7%.

3.4 未来中国森林生物量碳汇

如果中国继续开展造林再造林工程、天然林保护工程, 以及有效的森林管理, 未来中国森林生物量碳库会继续增加, 碳汇潜力巨大, 体现在两个方面: 面积增加和森林生长.

(1) 增加森林面积. 在 2004~2008 年调查期, 中国森林覆盖率为 20.4%, 其中林分覆盖率为 16.2% (155.6×10^6 ha), 生物量碳密度为 41.3 MgC/ha. 根据中国林业中长期规划, 到 2030 年森林覆盖率将达到 24%^[41], 如果假定林分占森林面积的比例不变, 那么林分面积到 2030 年将达到 183.1×10^6 ha, 若碳密度保持 2004~2008 年期的水平不变(41.3 MgC/ha), 其生物量碳库将达到 7562 TgC, 则未来 20 年林分生物量碳汇可达 1135 TgC.

(2) 森林生长. 在 2004~2008 年调查期, 人工林分面积(40.0×10^6 ha)仅占林分总面积的 25.7%, 生物量碳密度仅为 26.7 MgC/ha, 而同期天然林分的生物量碳密度高达 46.4 MgC/ha. 如果人工林分能够生长达到天然林分的生物量碳密度, 那么可增加固定 788 TgC. 此外, 林分的幼龄林和中龄林占了林分总面积的 67.2%(幼龄林面积为 52.6×10^6 ha, 中龄林面积为 52.0×10^6 ha), 其生物量碳密度仅为 18.9 和 37.1 MgC/ha, 远低于老龄林的碳密度(68.8 MgC/ha). 如

果现有的幼龄林和中龄林能够生长至成熟期, 达到老龄林的生物量碳密度, 那么这些森林将能增加固定 4273 TgC. 也就是说, 即便不增加森林面积, 仅凭森林的生长, 中国森林生物量仍具有很大的碳汇潜力.

3.5 误差估计

有关基于国家尺度森林清查数据估算森林生物量碳库及其变化的误差分析少见报道. Phillips 等人^[42]分析了美国东南 5 省的森林蓄积及其变化的估算误差, 其误差来源包括采样误差、测量误差和回归误差, 其结果显示, 区域森林蓄积及其变化的估算误差主要是由采样误差产生的(占总变异的 90%~99%), 然而, 蓄积误差只是森林生物量碳库误差分析的第一步, 还需要进一步分析由蓄积向生物量转换过程中的回归误差. 本研究采用的森林清查数据, 其森林面积和蓄积的调查精度在 90%以上(其中, 北京、天津、上海的蓄积精度在 85%以上)^[43]. 本研究采用连续 BEF 法将林分蓄积量转换为生物量, 大多数优势树种 BEF 函数的 R^2 在 0.8 以上. 因此, 数据和方法上具有相对较高的精度, 以往研究显示对于全国尺度森林生物量的估算误差不超过 3%^[22]. 经济林和竹林生物量碳库的估算误差可能主要来源于平均生物量密度的估算方法. 一般生物量密度方法往往会因野外样地测量选择生长条件较好的森林, 而获得较高的生物量密度, 从而高估了区域森林生物量^[34].

此外, 本研究未包含森林外树木的生物量, 如疏林、四旁树和散生木, 而这一部分树木对于固定 CO₂ 也起了重要作用^[44], 今后有待量化研究.

致谢 感谢美国普林斯顿大学博士后陈安平、中国科学院生态环境研究中心刘国华和其他相关人员在早期建立野外样地生物量数据库做出的贡献.

参考文献

- 1 Kauppi P E, Mielikainen K, Kusela K. 1992. Biomass and carbon budget of European forests, 1971 to 1990. *Science*, 1992, 256: 70–74
- 2 Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263: 185–190
- 3 Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292: 2320–2322
- 4 Fang J Y, Brown S, Tang Y H, et al. Overestimated biomass carbon pools of the northern mid- and high latitude forests. *Climatic Change*, 2006, 74: 355–368

- 5 Pacala S W, Hurtt G C, Baker D, et al. Consistent land- and atmosphere- based US carbon sink estimates. *Science*, 2001, 292: 2316–2320
- 6 Goodale C L, Apps M J, Birdsey R A, et al. Forest carbon sinks in the northern Hemisphere. *Ecol Appl*, 2002, 12: 891–899
- 7 Janssens I A, Freibauer A, Ciais P, et al. Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO₂ emissions. *Science*, 2003, 300: 1538–1542
- 8 Bonan G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, 320: 1444–1449
- 9 杨同辉, 宋坤, 达良俊, 等. 中国东部木荷-米槠林的生物量和地上净初级生产力. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40: 610–619
- 10 张全智, 王传宽. 6 种温带森林碳密度与碳分配. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40: 621–631
- 11 Pan Y, Birdsey R A, Fang J Y, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333: 988–993
- 12 贺金生. 中国森林生态系统的碳循环: 从储量、动态到模式. *中国科学: 生命科学*, 2012, 42: 252–254
- 13 Brown S, Sathaye J, Cannell M, et al. Mitigation of carbon emission to the atmosphere by forest management. *Commonwealth Forest Rev*, 1996, 75: 80–91
- 14 Brown S L, Schroeder P, Kern J S. Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. *Forest Ecol Manage*, 1999, 123: 81–90
- 15 Brown S L, Schroeder P E. Spatial patterns of aboveground production and mortality of woody biomass for eastern U.S. forests. *Ecol Appl*, 1999, 9: 968–980
- 16 Hu H F, Wang G G. Changes in forest biomass carbon storage in the South Carolina Piedmont between 1936 and 2005. *Forest Ecol Manage*, 2008, 255: 1400–1408
- 17 Fang J Y, Oikawa T, Kato T, et al. Biomass carbon accumulation by Japan's forests from 1947 to 1995. *Global Biogeochem Cycles*, 2005, 19, GB2004, doi: 10.1029/2004GB002253
- 18 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981-2000 年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37: 804–812
- 19 Marland G, Andres R J, Boden T A. Global, regional, and national CO₂ emissions. In: Boden T A, Kaiser D P, Sepanski R J, eds. *Trends '93: a compendium of data on global change*. ORNL/CDIAC-65. Oak Ridge: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, 1994. 505–584
- 20 国家林业局. 中国森林资源报告——第七次全国森林资源清查. 北京: 中国林业出版社, 2009. 2
- 21 方精云, 唐艳鸿, Son Y. 碳循环研究: 东亚生态系统为什么重要? *中国科学: 生命科学*, 2010, 40: 561–565
- 22 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国森林植被的生物量和净生产量. *生态学报*, 1996, 16: 497–508
- 23 Fang J Y, Wang G G, Liu G H, et al. Forest biomass of China: an estimation based on the biomass-volume relationship. *Ecol Appl*, 1998, 8: 1084–1091
- 24 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: 733–740
- 25 Wang X K, Feng Z W, Ouyang Z Y. The impact of human disturbance on vegetative carbon storage in forest ecosystems in China. *Forest Ecol Manage*, 2001, 148: 117–123
- 26 Pan Y D, Luo T X, Birdsey R, et al. New estimates of carbon storage and sequestration in China's forests: effects of age-class and method on inventory-based carbon estimation. *Climatic Change*, 2004, 67: 211–236
- 27 Piao S L, Fang J Y, Zhu B, et al. Forest biomass carbon stocks in China over the past 2 decades: estimation based on integrated inventory and satellite data. *J. Geophys Res*, 2005, 110, G01006, doi: 10.1029/2005JG000014
- 28 Piao S L, Fang J Y, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458: 1009–1013
- 29 Piao S L, Ito A, Li S G, et al. The carbon budget of terrestrial ecosystems in East Asia over the last two decades. *Biogeosciences*, 2012, 9: 3571–3586
- 30 徐新良, 曹明奎, 李克让. 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究. *地理科学进展*, 2007, 26: 1–10
- 31 吴庆标, 王效科, 段晓男, 等. 中国森林生态系统植被固碳现状和潜力. *生态学报*, 2008, 28: 517–524
- 32 刘双娜, 周涛, 魏林艳, 等. 中国森林植被的碳汇/源空间分布格局. *科学通报*, 2012, 57: 943–950
- 33 Fang J Y, Wang Z M. Forest biomass estimation at regional and global levels, with special reference to China's forest biomass. *Ecol Res*, 2001, 16: 587–592
- 34 Guo Z D, Fang J Y, Pan Y D, et al. Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: a comparison of three methods. *Forest Ecol Manage*, 2010, 259: 1225–1231
- 35 Brown S, Lugo A E. Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of Brazilian Amazon. *Interciencia*, 1992, 17: 8–18
- 36 Schroeder P, Brown S, Mo J, et al. Biomass estimation for temperate broadleaf forests of the United States using inventory data. *Forest Sci*, 1997, 43: 424–434
- 37 方精云, 陈安平, 赵淑清, 等. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 *Science* 一文(*Science*, 2001, 291: 2320-2322)的若干说明. *植物生态学报*, 2002, 26: 243–249

- 38 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. 植物学报, 2001, 43: 967-973
- 39 Fang J Y. Forest productivity in China and its responses to global climate change. *Acta Phytoecol Sin*, 2000, 24: 513-517
- 40 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳循环及其全球意义. 见: 王庚辰, 温玉璞, 主编. 温室气体浓度和排放检测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996. 81-149
- 41 徐冰, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 2000~2050 年中国森林生物量碳库: 基于生物量密度与林龄关系的预测. 中国科学: 生命科学, 2010, 40: 587-594
- 42 Phillips D L, Brown S, Schroeder P E, et al. Towards error analysis of large-scale forest carbon budgets. *Global Ecol Biogeogr*, 2000, 9: 305-313
- 43 肖兴威. 中国森林资源清查. 北京: 中国林业出版社, 2005
- 44 郭兆迪. 中国森林生物量碳库及生态系统碳收支的研究. 博士学位论文. 北京: 北京大学, 2011



论 文

附录

附表 1 中国主要森林类型的 BEF 函数参数^[34]

森林类型	方程参数: $BEF=a+b/x^a$				
	a	b	n	R^2	P
云杉、冷杉	0.5519	48.861	24	0.7764	<0.001
杉木	0.4652	19.141	90	0.9401	<0.001
柏木	0.8893	7.3965	19	0.8711	<0.001
落叶松	0.6096	33.806	34	0.8212	<0.001
红松	0.5723	16.489	22	0.9326	<0.001
华山松	0.4581	32.666	10	0.7769	<0.001
马尾松、云南松	0.5034	20.547	51	0.8676	<0.001
樟子松	1.112	2.6951	15	0.8478	<0.001
油松	0.869	9.1212	112	0.9063	<0.001
其他针叶林	0.5292	25.087	18	0.8622	<0.001
铁杉、油杉、柳杉	0.3491	39.816	30	0.7899	<0.001
针阔混	0.8136	18.466	10	0.9953	<0.001
桦木	1.0687	10.237	9	0.7045	<0.005
木麻黄	0.7441	3.2377	10	0.9549	<0.001
落叶栎	1.1453	8.547	12	0.9795	<0.001
桉树	0.8873	4.5539	20	0.802	<0.001
亮叶林(常绿阔叶)	0.9292	6.494	23	0.8259	<0.001
落叶橡木混交林	0.9788	5.3764	32	0.9333	<0.001
非商用林	1.1783	5.5585	17	0.9483	<0.001
杨树	0.4969	26.973	13	0.9183	<0.001
热带林	0.7975	0.4204	18	0.8715	<0.001

a) BEF 为生物量转换因子(Mg/m^3), x 为蓄积密度(m^3/ha)