

中国天然林保护工程的固碳能力估算

胡会峰, 刘国华*

(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:大气中 CO_2 浓度的升高作为引起全球气候变化最主要的驱动力已经得到广泛的认同。为此, 2005 年 2 月 16 号生效的《京都议定书》明确提出了植树造林、再造林是一条行之有效的减缓全球气候变化的重要措施。我国作为世界上人工林面积最大的国家, 实施的一系列林业政策和工程, 对大气中 CO_2 的减排起到了重要作用。以天然林保护工程为例, 利用我国第 4 次森林资源清查资料和林业统计年鉴, 依据估算森林碳储量的材积源—生物量方法对该工程实施 5a 来(1998~2002)的固碳能力进行初步研究, 以期为我国的气候和外交谈判提供理论依据和数据佐证。研究结果表明, 天然林保护工程实施 5a 来, 工程区累计造林 $302.6 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、新增人工林累计固 $\text{C} 21.32 \text{ Tg}$ ($1 \text{ Tg} = 10^{12} \text{ g}$), 其中, 东北、长江上游、黄河中上游 3 个地区分别累计固碳 6.39、12.59、2.34 Tg 。另外, 天然林保护工程实施后, 5a 内累计减少木材产量 $964.98 \times 10^4 \text{ m}^3$, 累计减少 22.75 Tg 的碳释放。总体而言, 天然林保护工程实施 5a 来累计固碳 44.07 Tg , 平均年际固碳 8.81 Tg/a , 相当于我国每年 CO_2 排放量的 1.2%。

关键词:天然林保护工程; 固碳能力; 人工林; 累计碳储量; 中国

文章编号: 1000-0933(2006)01-0291-06 **中图分类号:** Q945.11, Q948.1, S718.5 **文献标识码:** A

Carbon sequestration of China's National Natural Forest Protection Project

HU Hui-Feng, LIU Guo-Hua* (Key Laboratory of Systems Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 291~296.

Abstract: Rising atmospheric carbon dioxide concentration is one of major driving factors for the climate change. In order to reduce the negative effect of the climate change, the Kyoto Protocol, which came into force in Feb 16, 2005, drew the conclusion that reforestation and afforestation were cost-effective means to mitigate global warming. As the largest plantation countries in the world, China has implemented a series of important policies and nationwide afforestation and reforestation programs since the 1970s.

As one of six major forest projects in China pushed by National Forestry Bureau, National Natural Forest Protection Project (NNFPP), launched in 1998 in 12 provinces, could not only improve local environmental conditions and eliminate local forest deterioration, but also play an important role in increasing China's forest carbon sequestration through increasing the area of plantation and reducing the timber production. To accurately estimate the carbon sequestration of the NNFPP and provide basic data for China's diplomatically international climate treaties, we estimated the carbon sequestration of this project by using the volume-biomass method and China's forest inventory database (1989~1993) and National Forestry Statistics from 1998 to 2002. The results showed that the area of reforestation and afforestation in this project had increased to $302.61 \times 10^4 \text{ hm}^2$ at the end of 2002 and the carbon storage of the NNFPP was 21.32 Tg over the period of 1998~2002. The increase of carbon sequestration from reducing the timber production was 22.75 Tg . In total, the storage of carbon sequestration was 44.07 Tg , equal to about

基金项目: 国家重点基础研究发展资助项目(2002CB412503); 中国科学院知识创新重大资助项目(KZCX1-SW-01-17); 国家自然科学基金资助项目(4032101)。

收稿日期: 2005-01-11; **修订日期:** 2005-11-30

作者简介: 胡会峰(1980~), 男, 山西孟县人, 硕士生, 主要从事全球碳循环及恢复生态学研究. E-mail: hfh80@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: ghliu@mail.rcees.ac.cn

Foundation item: Major State Basic Research Development Program of China (No. 2002CB412503), Knowledge Innovation Project of CAS (No. KZCX1-SW-01-17), and the National Natural Science Foundation of China (No. 4032101)

Received date: 2005-01-11; **Accepted date:** 2005-11-30

Biography: HU Hui-Feng, Master candidate, mainly engaged in global carbon cycle and restoration ecology. E-mail: hfh80@yahoo.com.cn

1.2% of total national industrial CO₂ emission during this period. For different regions and subprojects, Nature Forest Protection Project of the Northeastern China, upper reach of the Yangtze River and middle reach of the Yellow River have led an increase of 76.15, 160.09, and 66.38 10⁴ hm² at the end of 2002 in the area of reforestation and afforestation, respectively, which accounted for 25.2%, 52.9% and 21.9% of total area of this project. These three major regions and subprojects have accumulated carbon of 6.39, 12.60, and 2.34 Tg C, which consisted of 30.0%, 59.1% and 10.9% of total accumulated carbon, respectively.

Key words: National Natural Forest Protection Project; carbon sequestration; afforestation; reforestation; carbon storage; China

大气中 CO₂ 浓度的升高作为全球气候变暖最主要的驱动力,已经得到广泛的共识^[1,2],其浓度已经由工业革命前的 280ml/m³ 增加到 2001 年 370ml/m³,并以 1~1.5ml/(m³·a)的速度递增^[3,4],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℃^[2]。为减缓大气中 CO₂ 增加、保护全球气候系统,于 2005 年 2 月 16 日开始生效的《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对陆地生态系统的有效管理来增加其固碳能力,并且管理成效可以部分抵消承担减排任务国家的碳减排份额,这些管理措施包括减少森林砍伐、造林、再造林(限 1990 年以后)和加强对现有陆地生态系统(森林、草地、农田、湿地)的肥料、病虫害、火灾和抚育管理等^[5]。

作为世界上最大的发展中国家^[6],同时也是世界上人工林面积最大的国家,自 20 世纪 70 年代以来,我国的森林面积和森林覆盖率持续增加,不仅对改善我国的生态环境状况起到重要作用,而且对固定大气中的 CO₂ 也发挥了积极作用^[7]。为正确评价我国森林碳库在全球碳循环和碳平衡中的地位,20 世纪 90 年代初以来,我国学者利用国家林业部的全国 5 次森林资源清查统计资料,研究了中国森林植被的碳储量及其动态变化^[7-9],但对我国实施的重大林业政策及林业工程的固碳能力研究还不多。

为正确评估我国林业政策及林业工程在碳固定方面的作用,本文选取林业部 1998 年开始启动的天然林保护工程(以下简称天保工程)为例,研究该工程自实施以来的植被固碳能力,以期为我国人工林固碳能力评估和外交谈判提供理论依据和数据佐证。

1 研究资料与方法

1.1 天然林保护工程

天然林保护工程是我国六大林业重点工程之一,以从根本上遏制生态环境恶化,保护生物多样性,促进社会、经济的可持续发展为宗旨;以对天然林的重新分类和区划,调整森林资源经营方向,促进天然林资源的保护、培育和发展为措施,以维护和改善生态环境,满足社会和国民经济发展对林产品的需求为根本目的的生态建设及重建工程。工程的主要任务包括加快工程区内宜林荒山荒地造林绿化和全面停止长江上游、黄河中上游地区工程区天然林的商品性采伐,大幅度调减长江上游、黄河中上游地区和东北、内蒙古等重点国有林区木材产量两个方面。工程在 1998 年试点启动的 12 个省(区、直辖市)(内蒙古、吉林、黑龙江、海南、重庆、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、新疆)的基础上,于 2000 年在全国 17 个省(区、直辖市)正式全面启动。工程包括长江上游、黄河中上游地区以及东北、内蒙古等重点国有林区的 3 个区域子工程,共涉及 17 个省(区、直辖市)(长江上游,以长江三峡库区为界,包括:湖北、重庆、四川、贵州、云南、西藏 6 省(区、直辖市);黄河中上游地区,以小浪底库区为界,包括河南、陕西、山西、内蒙古^①、宁夏、甘肃、青海 7 省(区);东北、内蒙古等重点国有林区包括黑龙江、吉林、内蒙古、新疆、海南五省(区)),区内分布有天然林 0.733 亿 hm²,占全国 1.067 亿 hm² 天然林的 69%。

1.2 研究资料

本文所用的基本资料是中国林业统计年鉴(1998~2002 年)^[10]和国家林业部的全国第四次森林资源清查

① 为研究方便,本文统一将内蒙古划归为东北、内蒙古等重点国有林区

资料(1989~1993年)^①。

1.3 研究方法

对区域及国家等大尺度森林生物量的估算方法一直是人们关注的焦点,一般来说,推算区域尺度的森林生物量方法有3类:平均生物量法、平均换算因子法和换算因子连续函数法^[11, 12]。基于国家森林清查资料,利用换算因子连续函数法建立的材积源——生物量法(Volume-biomass method)被国内外学者认为是一种较好的估算大尺度森林生物量的方法^[13-16]。国内学者也利用不同的材积源——生物量换算函数结合建国以来国家林业部的5次森林清查资料计算了不同时期我国森林生物量及碳库^[7-9, 14-16]。通过比较发现,方精云等^[14]建立的不同树种的生物量-蓄积的函数关系($B = aV + b$)解决了由样地实测到区域推算的尺度转换问题^[17],具有很好的适应性。本文中天保工程全国及不同区域新增人工林的固碳能力(相对于天保工程实施前的1997年)就是利用方精云等在1996年建立起来的全国主要树种的生物量—蓄积回归函数,结合第4次森林资源清查资料中全国各省区幼龄林平均固碳率来估算的(碳转换率采用0.5^[7],幼龄林平均年龄根据不同地区气候和植被特征划分^②);天保工程中每年减少的商品材产量带来的固碳量,是根据第4次森林资源清查资料中全国用材林成、过成熟林的蓄积平均C密度(0.4 Mg/m³)来估算的(商品材出材率按0.59计算^③),由于缺乏各个省区的详细减产的清单,因此本文只是估算了全国范围的减产固碳量。具体的研究技术流程图详见图1。

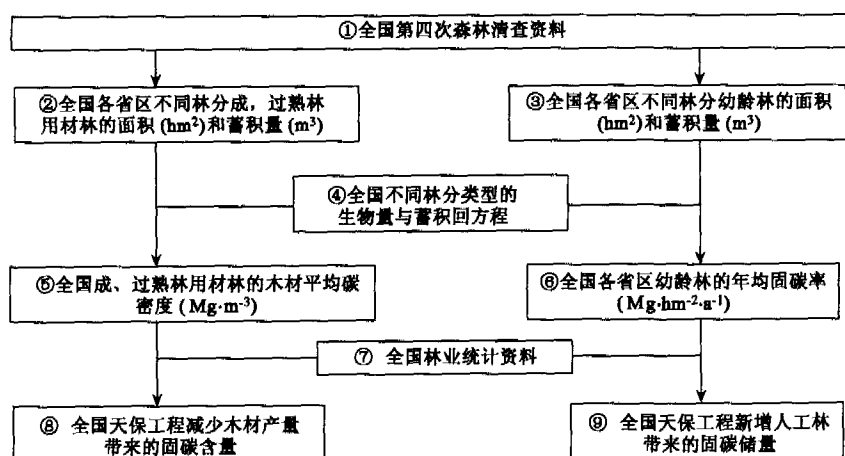


图1 研究分析的流程图

Fig.1 The flow chart of the research

①The National Forest Resource Inventory database for 19989 ~ 1993. ②The Area (hm²) and Volume (m³) of mature and over-mature timber production forest in different provinces for different forest types. ③The Area (hm²) and Volume (m³) of Young Forest in different provinces for different forest types. ④The regression equation (RQ) between biomass and volume with different forests. ⑤The average Volume-Density (Mg/m³) of mature and over-mature timber production forest. ⑥The annual average rate of carbon sequestration (Mg/(hm²·a)) of Young Forest in different provinces. ⑦National Forestry Statistics database from 1998 to 2002. ⑧The storage of carbon sequestration from reducing wood production. ⑨The storage of carbon sequestration from increasing area of reforestation and afforestation

需要指出的是本文中估算的天保工程固碳量仅指由于人工林面积增加以及商品材产量减产而引起的植被碳储量的增加,不包括由于土地利用方式改变后引起的土壤碳库的变化和天保工程区对天然林抚育管理、天然林的自然更新生长引起的碳库变化。

① 中华人民共和国林业部, 1994, 全国森林资源统计(1989~1993年)

② 幼龄林年龄划分: 东北及黄河地区除海南为 10a 外, 其余各省均为 20a; 长江地区各省均为 15a

③ 国家林业局森林资源管理司, 2002, 全国 2001~2005 年年森林采伐限额资料汇编

2 结果

2.1 天保工程新增人工林的固碳能力

天保工程的一个重要目标就是加快天保工程区宜林荒山荒地造林绿化,自 1998 年启动以来,到 2002 年为止工程累计新增人工幼龄林 $302.6 \times 10^4 \text{ hm}^2$,但不同年份各个省(区、直辖市、国有林区)的承担天保任务有所偏重、加入天保工程的时间也不一样,再加上可适宜造林区域的逐年减少,使得年际之间增长率在 -10.72% (2000 年) $\sim +122.36\%$ (2001 年)之间波动。总体而言,由于年年都在造林,因此相比工程启动前的 1997 年,1998~2002 年期间每年累积的人工林面积是呈现递增趋势的,只是每年增幅不同而已。根据图 1 的研究流程计算表明:相比 1997 年,这些新增人工林在 1998~2002 的 5a 间累计固碳 21.32 Tg,平均每年固碳 4.26 Tg,按单位面积计算,全国平均固碳率为 $1.41 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (表 1)。

表 1 全国天然林保护工程 1998~2002 年间新增人工林面积及固碳储量

Table 1 National Natural Forest Protection Project (NNFPP) increased reforestation and afforestation area and the storage of carbon sequestration from 1998 to 2002

省份 Provinces	年均幼龄林固 碳率($\text{Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$) Average annual rate of carbon sequestration in young forests	每年造林面积 (10^3 hm^2) Reforestation and afforestation area						固碳储量 ^① (Gg) Storage of carbon sequestration					
		1998	1999	2000	2001	2002	1998~2002	1998	1999	2000	2001	2002	1998~2002
全国 Nation	1.41	318.0	477.6	426.4	948.1	856.1	3026.1	417.8	1511.9	3204.2	6099.5	10089.8	21323.2
长江 Yangtze River	1.57	199.7	282.7	303.9	439.7	374.8	1600.9	259.2	898.9	1952.5	3624.8	5860.4	12595.7
贵州 Guizhou	1.46	11.9	80.6	48.2	13.3	23.3	177.3	17.4	152.7	358.7	584.1	843.6	1956.6
湖北 Hubei	1.05		14.1		20.9	4.1	39.2		14.8	29.6	66.3	107.4	218.1
四川 Sichuan	1.29	147.0	146.1	187.2	281.5	230.5	992.3	189.0	565.9	1183.5	2163.0	3438.9	7540.4
西藏 Xizang	2.04			0.4		1.1	1.6			0.9	1.8	5.0	7.7
云南 Yunnan	2.10	0.3	7.5	17.6	68.6	95.1	189.0	0.6	16.9	70.1	267.4	664.3	1019.2
重庆 Chongqing	1.29	40.6	34.3	50.4	55.4	20.7	201.5	52.2	148.5	309.7	542.1	801.2	1853.7
黄河 Yellow River	0.70	20.4	13.4	38.6	276.3	315.0	663.8	30.8	82.6	194.3	621.4	1407.0	2336.1
甘肃 Gansu	1.84	13.2	8.7	15.8	51.0	45.5	134.1	24.3	64.7	134.3	297.8	545.2	1066.3
河南 Henan	0.81				14.4	10.4	24.8				11.7	31.7	43.4
宁夏 Ningxia	1.70			11.5	14.1	13.3	39.0			19.6	63.3	129.8	212.8
青海 Qinghai	1.92	0.3	0.7	1.0	2.9	19.6	24.5	0.6	2.5	6.3	15.8	62.8	87.9
山西 Shanxi	1.05			2.7	72.9	63.1	138.7			2.8	82.1	227.4	312.3
陕西 Shaanxi	0.86	7.0	4.0	7.6	120.9	163.1	302.6	6.0	15.4	31.2	150.8	410.1	613.4
东北 Northeast of China	1.68	97.9	181.5	83.9	232.0	166.2	761.5	127.8	530.5	1057.4	1853.4	2822.5	6391.5
海南 Hainan	2.73	0.3	1.7	4.5	4.4		10.9	0.8	6.3	24.0	53.7	83.4	168.0
黑龙江 Heilongjiang	1.37	47.3	46.2	43.1			136.6	64.8	192.8	379.8	566.7	753.7	1957.8
吉林 Jilin	2.03	9.7	67.7	15.0	20.0	0.5	112.9	19.7	177.0	364.8	593.1	822.6	1977.2
内蒙古 Inner Mongolia	1.04	40.0	64.3	20.8	206.6	165.7	497.4	41.6	149.9	279.8	624.3	1140.9	2236.6
新疆 Xinjiang	1.70	0.6	1.5	0.6	1.0		3.7	1.0	4.5	9.1	15.5	21.8	52.0

① 固碳储量是相对于天保工程实施前的 1997 年而言 The storage of carbon sequestration relates to 1997; $1 \text{ Gg} = 10^9 \text{ g}$

在区域上,由于所处的地理位置、气候条件差别很大,使得辖区内林分的类型和生长状况差异显著,造成其年固碳率差异明显,在 $0.81 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (河南) $\sim 2.73 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (海南)之间波动。再考虑到各个区域每年承担的天保任务及侧重点不同,比如东北、内蒙古国有林区主要以调减木材产量为主;长江上游、黄河中上游天保区以保护长江、黄河源头,宜林荒山荒地绿化为主,因此造成了各个区域每年造林面积的波动起伏,因此不同区域 5a 来的固碳储量变化也不尽相同:东北、内蒙古天保工程区造林面积呈现波动式增长,截止 2002 年,累计造林 $76.15 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占整个天保工程的 25.2%,5a 来累计固碳 6.39 Tg,占整个天保工程人工幼龄林固碳量的 30%,平均单位面积固碳率为 $1.68 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,是 3 个区域中最高的;长江上游天保区除 2002 年外,其它年份造林面积都呈递增趋势,5a 来累计造林 $160.09 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占整个天保工程造林面积的 52.9%,5a 来累计固碳 12.60 Tg,占整个天保工程固碳量的 49.1%,平均单位面积固碳率为 $1.57 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,高于全国平均水平;黄河中上游天保区的造林情况类似与长江上游地区,除 1999 年造林面积略有下降外,其它年份造林面

积都是递增的,特别是 2000 年由于工程区内一些省份(河南、宁夏、山西)刚刚启动天保工程,使得 2001 年比 2000 年造林面积增加了 5 倍多,5a 来该地区累计造林 $66.38 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占整个天保工程造林面积的 21.9%,5a 来累计固碳 2.34 Tg,占整个天保工程固碳量的 10.9%,由于该区域的天保工程总体上晚于其余两个地区,因此平均单位面积固碳率仅为 $0.70 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,是全国平均值的一半。

2.2 天保工程减少商品材产量的固碳能力

天保工程另一项主要措施是全面停止长江上游、黄河中上游工程区天然林的商品性采伐,大幅调减工程区内国有林区的木材产量,而这一部分减少的木材产量带来的固碳量按《京都议定书》有关规定也可以认为是天保工程增加的碳收益。1998~2002 年期间天保工程区累计减少商品材产量 $964.98 \times 10^4 \text{ m}^3$,占同期木材总产量($7181.32 \times 10^4 \text{ m}^3$)的 13%,年际减产幅度因工程任务的调整而不同,5.16%(2002 年)到 21.15%(2000 年)之间波动。依据图 1 的统计流程得到:5a 来,天保工程区因减产带来的固碳量为 22.75 Tg,占整个天保工程 5a 来的累计固碳量(44.07 Tg)的 51.6%,平均每年固碳 4.55 Tg/a (表 2)。由于缺乏各个省区每年减产情况的详细清单,因此 3 个子工程区及各个省区 5a 来的减产变化情况及固碳量没有进一步分析。

3 讨论

林业政策和林业工程不仅在改善生态环境方面起着重要的作用,而且由此而引起的固碳能力也越来越受到重视,尤其是在 2005 年《京都议定书》正式生效之后,很多国家和地区都已展开了相应的研究^[19, 20]。本文通过对我国六大林业工程之一——天然林保护工程的研究表明:天保工程实施 5a 来(1998~2002 年),该工程所带来的固碳能力为 44.07 Tg ,平均每年固碳 8.81 Tg ,这些固定的碳相当于同期我国 CO_2 总排放量(按 2000 年 2690 Tg 计算^[6])的 1.2%。

由于本次研究只是初步尝试定量地评估重大区域或国家尺度林业政策和林业工程产生的生态效益,特别是面临当前全球比较紧迫的人为管理带来的碳收益问题,因此研究中还有许多不足之处,例如由于工程刚开始实施,一些值可能会导致高估,但是,本计算也仅仅是指植被部分,而没有包括因工程的实施而导致土壤改善或恶化所固定或释放的碳以及其它相应管理措施带来的固碳效益,有关研究表明,因植被恢复而使土壤改善所固定的碳也是巨大的^[21, 22];对于幼龄林的生长只是按照平均年际生长率来考虑,并没有考虑到幼龄林的生长是一个动态的非直线的生长方式;对天保工程中加强幼龄林的抚育管理、病虫害、火灾防止带来的固碳效益,由于缺乏数据和合理的估算方法没有考虑,而这些管理措施带来的固碳潜力也不可低估^[20]。因此,如果进一步加强对该工程实施的管理措施,那么随着时间的推移,将很大程度地提高该工程的固碳能力,这对于抵消我国化石燃料燃烧所释放的 CO_2 量将起到举足轻重的作用。

References:

- [1] Wofsy S C, Goulliden M L, Munger J M, *et al.* Next exchange of CO_2 in a mid-latitude forest. *Science*, 1993, 260: 1314~1317.
- [2] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, *et al.* eds. *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, 2001.
- [3] Kirschbaum M U F. To sink or burn? A discussion of the potential contributions of forests to greenhouse gas balances through storing carbon or providing biofuels. *Biomass and Bioenergy*, 2003, 24: 297~310.
- [4] Poulton P R, Pye E, Hargreaves P R, *et al.* Accumulation of carbon and nitrogen by old arable land reverting to woodland. *Global Change Biology*, 2003,

表 2 全国天然林保护工程 1998~2002 年间木材减产及固碳储量

Table 2 National Natural Forest Protection Project (NNFPP) reduced wood production and carbon storage from 1998 to 2002

年份 Year	木材产量 (10^4 m^3) Wood production	减产量 ^① (10^4 m^3) Reduction production	减产带来的固 碳储量 ^① (Tg) Storage of carbon sequestration by reduction
1998	1813.20	292.00	1.99
1999	1691.70	413.50	2.81
2000	1333.90	771.30	5.25
2001	1202.30	902.90	6.14
2002	1140.22	964.98	6.57
1998~2002	7181.32		22.75

①减产量和固碳储量都是相对于天保工程实施前的 1997 年而言
Reduction production and storage of carbon sequestration by reduction both
relate to 1997

9: 942 ~ 955.

- [5] UNFCCC. The Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. UNEP: WMO, 1997.
- [6] Streets D G, Jiang K J, Hu X L, *et al.* Recent reductions in China's greenhouse gas emissions. *Science*, 2001, 294: 1835 ~ 1837.
- [7] 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.
- [8] Liu G H, Fu B J, Fang J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 733 ~ 740.
- [9] Zhao M, Zhou G S. Carbon storage of forest vegetation and its relationship with climatic factors. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(1): 50 ~ 54.
- [10] National Forestry Bureau eds. China Forestry Statistical yearbook 1998, 1999, 2000, 2001, 2002. Beijing: Chinese Forestry Press, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003.
- [11] Fang J Y. Forest biomass carbon pool in middle and high latitudes in North Hemisphere is probably much smaller than present estimates. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24: 635 ~ 638.
- [12] Fang J Y, Wang Z M. Forest biomass estimation at regional and global levels, with special reference to China's forest biomass. *Ecological Research*, 2001, 16: 375 ~ 381.
- [13] Brown S, Gillespie A J R, Lugo A E. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science*, 1989, 35: 881 ~ 902.
- [14] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Biomass and net production of forest vegetation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(5): 497 ~ 508.
- [15] Fang J Y, Wang G G, Liu G H, *et al.* Forest biomass of China: an estimate based on the biomass-volume relationship. *Ecological Applications*, 1998, 8 (4): 1084 ~ 1091.
- [16] 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.
- [17] Fang J Y, Chen A P, Zhao S Q, *et al.* Estimating biomass carbon of China's forests: supplementary notes on report published in *Science* (291: 2320-2322) by Fang *et al.* (2001). *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(2): 243 ~ 249.
- [18] College of forestry, Northwest A&F University, eds. Concise forestry dictionary. Beijing: Science Press, 1980. 376 ~ 377.
- [19] Gurney K, Neff J. Carbon Sequestration Potential in Canada, Russia and the United States Under Article 3.4 of the Kyoto Protocol. *World Wildlife Fund*, July 2000.
- [20] Nabuurs G J, Dolman A J, Verkaik E, *et al.* Article 3.3 and 3.4 of the Kyoto Protocol: consequences for industrialised countries' commitment, the monitoring needs, and possible side effects. *Environ Sci & Policy*, 2000, 3: 123 ~ 134.
- [21] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8 (4): 345 ~ 360.
- [22] Paul K I, Polglase P J, Nyakuengama J G, *et al.* Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management*, 2002, 168: 241 ~ 257.

参考文献:

- [8] 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.
- [9] 赵敏, 周广胜. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析. *地理科学*, 2004, 24(1): 50 ~ 54.
- [10] 国家林业局编. 中国林业统计年鉴 1998, 1999, 2000, 2001, 2002. 北京: 中国林业出版社, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003.
- [11] 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.
- [14] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. *生态学报*, 1996, 16(5): 497 ~ 508.
- [17] 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(2): 243 ~ 249.
- [18] 西北林学院编. 简明林业词典. 北京: 科学出版社, 1980. 376 ~ 377.