

中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献

刘国华¹, 傅伯杰¹, 方精云²

(1. 中国科学院生态环境研究中心系统生态开放室, 北京 100085; 2. 北京大学城市与环境学系, 北京 100871)

摘要: 利用我国第一次(1973~1976 年)至第四次(1989~1993 年)森林资源清查资料, 依据建立的不同森林类型生物量和蓄积量之间的回归方程, 对我国近 20a 来森林的碳储量进行了推算。结果表明, 我国 4 次森林资源清查中森林的总碳储量分别是 3.75、4.12、4.06 和 4.20Pg C, 虽然存在一定的波动现象, 但总体呈增加的趋势, 自第 1 次森林资源清查末期至第 4 次清查结束的 17a 间, 我国森林共增加 0.45Pg C, 平均每年以 26.5 Tg C 的速率递增, 这说明我国的森林起着—个轻微的 CO₂“汇”的作用。然而, 进一步对我国森林的平均碳密度分析发现, 它们不仅呈逐渐下降的趋势(分别是 39.1、43.1、39.7 和 38.7Mg C/hm²), 而且也远低于世界的平均水平, 这充分说明我国的森林质量比较差, 幼龄林和残次林较多, 但从另一个侧面也反映也如果对现有森林加以更好的抚育和管理, 作为 CO₂ 的“汇”, 我国森林还有很大的潜力。因此, 需要指出的是虽然植树造林至关重要, 但对现有森林的抚育管理也是不容忽视的。

关键词: 碳动态; 生物量; 蓄积量; 碳储量; 碳密度; 碳平衡; 中国森林

Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance

LIU Guo-Hua¹, FU Bo-Jie¹, FANG Jing-Yun² (1. Research Center For Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy Sciences, Beijing 100095, China; 2. Department of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Using the national forest inventory data that surveyed by the Forestry Ministry of P. R. China from 1973 to 1993, carbon storage of Chinese forest are estimated with the method of regression equation between stand biomass and volume in different forest types. The results show that total carbon storage of Chinese forest in the four periods (1973~1976, 1977~1981, 1985~1988, 1989~1993) were 3.75, 4.12, 4.06 and 4.20 Pg C, respectively. Although the results of different periods are fluctuating, their trends are increasing with the time. From 1977 to 1993, the total carbon of Chinese forests had increased 0.45 Pg C and accumulated about 26.5 Tg C per year. It means that Chinese forests played a role as a little sink of atmospheric carbon dioxide in that period. However, mean forest carbon density is decreased with time (The four periods are 39.1, 43.1, 39.7 and 38.7 Mg C/hm², respectively) and far below to the average of global forest. This means that the quality of Chinese forests is very poor, the young forests make up large proportion of Chinese forests. On the other hand, it also reflects that Chinese forests is a huge potential carbon sink in the future if current forests is fostered and managed well. Therefore, foster and management of current forests is very important.

Key words: carbon dynamics; biomass; volume; carbon storage; carbon density; carbon balance; Chinese forests

文章编号: 1000-0933(2000)05-0733-08 中图分类号: Q948.1, S718.5 文献标识码: A

基金项目: 中国科学院“九五”资源与生态环境研究重大资助项目(KZ951-B1-208), 国家自然科学基金重点资助项目(49831020), 中国科学院生态环境研究中心知识创新工程资助项目(RCEES 9903)。

收稿日期: 2000-04-04, 修订日期: 2000-06-20

作者简介: 刘国华(1965~), 男, 江西宁都人, 助研。主要从事全球变化, 碳循环及森林生态学研究。

森林是陆地生物圈的主体,它不仅在维护区域生态环境上起着重要作用,而且在全球碳平衡中也起着巨大的贡献。这是由于森林本身维持着大量的碳库(约占全球植被碳库的 86%以上)^[1,2],同时森林也维持着巨大的土壤碳库(约占全球土壤碳库的 73%)^[3],此外,与其它陆地生态系统相比,森林生态系统具有较高的生产力,每年固定的碳约占整个陆地生态系统的三分之二^[4,5],因此,森林生态系统在调节全球碳平衡、减缓大气中 CO₂ 等温室气体浓度上升以及维护全球气候等方面中具有不可替代的作用。目前大量的研究表明: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 CO₂ 浓度增加的第二大来源^[6,7]。与此同时,人们通过对全球碳通量的估算发现:大气中 CO₂ 浓度的增加、海洋 CO₂ 的吸收与化石燃料燃烧和森林破坏所释放 CO₂ 的量之间还存在着一个巨大的亏空,即前二者的量要小于后二者的量,这就是目前科学家已普遍公认的 CO₂“失汇”(Missing sink)^[8~10]。很多科学家认为造成 CO₂“失汇”的原因是由于对陆地生态系统,尤其是森林生态系统的碳动态缺乏精确的了解,他们认为所遗失的汇主要分布在北半球的陆地生态系统中^[8,11]。现有的许多研究结果也表明北半球温带森林和北方森林起着 CO₂“汇”的作用^[12~20]。因此,为了正确评估森林在全球碳平衡中的作用,在国家(或地区)尺度上利用森林清查资料对森林的碳动态进行更为细致的研究也日益成为人们关注的重点^[17~24]。

由于历史原因,我国对森林生物量的调查研究在 70 年代末和 80 年代初才开始,在近 20a 来已积累了有关这方面大量的研究资料,但是这些研究只是关于林分生物量的实测和推测^[25]。有关全国森林生物量的估测在近几年才开始^[21~23,26],然而这些估测的结果只是某一时间森林现存的生物量,缺乏在时间尺度上对森林生物量和碳储量的动态变化进行研究,因此,无法对我国森林的源汇功能进行正确的评估,从而进一步评价我国森林在全球气候变化中的作用。本文基于这一目的,利用我国历次森林清查资料,估算各个时期森林的碳储量,并进一步分析其动态变化、未来趋势及其在全球碳平衡中的作用。

1 研究资料与方法

1.1 研究资料

本文所用的资料是国家林业部从 1973 年到 1993 年在全国范围内(不包括台湾省和西藏控制线以外的地区)对森林资源连续进行的 4 次清查资料^①,在每次森林资源清查中设计固定样地几个,其资料包括各类林分的龄级、面积和蓄积以及在各省的分布状况等。由于森林清查资料的详细性和权威性,因而在计算国家或地区森林碳平衡时最具有代表性,从而也越来越受到人们的欢迎^[24]。

1.2 研究方法

大尺度森林生物量的估算方法一直是人们关注的焦点,自 70 年代起很多学者就开始对全球范围内的生物量进行估测^[1,27],然而早期的研究主要是根据 IBP 时代在全球各地的实测资料,采用平均生物量的方法估算得到,由于当时各类森林的实测资料较少,而人们在进行生物量的实测时,又往往选择林分生长较为良好的样地,其生物量都较高,从而使得平均生物量偏大,导致全球和区域生物量的估算结果偏高^[23]。随后,生物量与材积的比值法也常被人们用作推算大尺度森林生物量的一种简易方法,他们往往把这一比值看做是一恒定的常数^[19],但实际情况并非如此,它随着材积的变化而变化,只有当材积达到很大的程度时,该值才是一常数^[23]。因而只有对全球森林碳估算技术的发展和改进,全球碳收支的不确定性才能减少到更易于被接受的程度^[28]。随着全球各地有关生物量实测资料的大量增加,人们对提高森林生物量估算的精度变得更加可能,并由此提出一系列研究方法^[21~23,29~31]。目前材积源-生物量法被认为是一种较好的估测森林生物量的方法(Volume-biomass method)^[21,23,31]。因为森林蓄积量是森林生长的立地条件、气候条件和森林年龄级及其它各因素的综合反映,通过对大量森林实测生物量与蓄积量的研究发现在各林分类型中二者之间存在着良好的回归关系^[21,23]。因而这一方法弥补了平均生物量法所带来的一些人为的差异,基本上能很好地体现出其实际情况。本文采用作者此前所建立的各个林分布生的量与蓄积量之间的回归关系

① 中华人民共和国林业部,1977,全国森林资源统计(1973~1976);中华人民共和国林业部,1983,全国森林资源统计(1977~1982);中华人民共和国林业部,1989,全国森林资源统计(1984~1988);中华人民共和国林业部,1994,全国森林资源统计(1989~1993)

(表 1)来估期我国森林生物量,从而进行森林碳动态的分析。但需要说明的是本文中森林的碳储量仅指林木的活生物量,并未包括森林生态系统中的枯死木、下木层、草本层、枯枝落叶层以及森林土壤层等的碳库。森林碳储量为森林生物量乘以系数 0.5(即每克干物质的碳含量)^[20,24,32]。

表 1 不同林分类型生物量与蓄积量回归方程一览表^[21,23]

Table 1 The regression equation(RQ)between biomass and volume with different forests

林分类型 Type of forest stands	生物量(B)-蓄积(V)回归方程 RQ of biomass-volume	样本数 Number of sample	相关系数 Correlation coefficient
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	$B=0.3999V+22.5410$	74	0.97
马尾松,云南松 <i>Pinus massoniana</i> , <i>P. yunnanensis</i>	$B=0.52V$	12	
红松 <i>P. koraiensis</i>	$B=0.5185V+18.22$	19	0.95
落叶松 <i>Larix</i>	$B=0.9671V+5.7598$	13	0.99
云冷杉 <i>Picea</i> , <i>Abies</i>	$B=0.4642V+47.499$	19	0.99
樟子松 <i>P. sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	$B=1.11V$		
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	$B=0.7554V+5.0928$	90	0.98
华山松 <i>P. armandii</i>	$B=0.5856V+18.7435$	10	0.95
其它松类 Other oines and conifer forests	$B=0.5168V+33.2378$	22	0.97
柏木类 <i>Cypress</i>	$B=0.6129V+26.1451$	19	0.98
针阔混交林 Mixed conifer and deciduous forests	$B=0.8019V+12.2799$	9	0.998
杨树 <i>Populus</i>	$B=0.4754V+30.6034$	16	0.93
桦木 <i>Betula</i>	$B=0.9644V+0.8485$	6	0.98
栎类 <i>Quercus</i>	$B=1.3288V-3.8999$	6	1.00
樟,楠木,榿,青冈 <i>Cinnamomum</i> , <i>Phoebe</i> , <i>Cyclobalanopsis</i> , <i>Castanopsis</i>	$B=1.0357V+8.0591$	21	0.91
桉树 <i>Eucalyptus</i>	$B=0.7893V+6.9306$	11	1.00
木麻黄,热带林 <i>Casuarina</i> , <i>Tropical forests</i>	$B=0.9505V+8.5648$	12	0.999
樟树及阔叶混交林 <i>Sassafras</i> and mixed broad-leaf forests	$B=0.6255V+91.0013$	19	0.93
杂木林 Nonmerchantable woods	$B=0.7564V+8.3103$	11	0.986
柳杉,铁杉,水杉等 <i>Tsuga</i> , <i>Cryptomeria</i> , <i>Keteleeria</i> etc.	$B=0.4158V+41.3318$	22	0.94

2 结果与讨论

2.1 不同森林类型的碳储量及其动态变化

森林碳库随时间变化的主要驱动力是各森林类型活动生物量的动态变化。由于各个林分类型的物种组成、年龄结构以及环境因子等不同,其碳储量和碳密度也存在着很大的差异。而各林分类型的碳动态又与其面积的变化、演替阶段、年龄组成以及人类干扰等因素密切相关。因此,探讨不同森林类型的碳储量在时间尺度上的动态变化不仅对评估国家或地区尺度上森林在全球碳循环中的作用具有重要意义,而且对于森林的恢复重建以及保护和管理也有较大的指导意义。根据此前建立的不同林分类型蓄积量和生物量之间的回归方程(表 1),利用历次森林清查资料,推算出我国森林各林分在 4 个时段的碳储量,为了了解不同森林对整个森林碳储量的贡献,本文依据其碳储量的大小归结成 3 组,结果列于表 2。第 1 组为高碳储量森林,包括阔叶混交林、栎类(*Quercus*)林、落叶松(*Larix*)林、云杉(*Picea*)林、冷杉(*Abies*)林、桦木(*Betula*)和硬叶阔叶林 7 个森林类型,这几个森林类型是我国森林的主体,它们的分布面积广,分别占各个时期全国森林总面积的 45.4%、50.3%、55.0%和 51.6%,而其碳储量在 4 次森林清查中依次是 2588、2972、3028 和 2999Tg,分别占全国森林总碳储量的 69.1%、72.0%、74.6%和 71.5%,可见这些森林类型是我国森林碳储量的主要贡献者;第 2 组是中碳储量森林,包括马尾松(*Pinus massoniana*)林、云南松(*P. yunnanensis*)林、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林、针叶混交林、针阔混交林、杨树(*Populus*)林和软叶阔叶林等 7 种森林类型,该组中的很多类型是我国的主要造林树种(如马尾松、杉木和杨树等),因而其面积分布也较广,分别占各时期全国森林总面积的 49.5%、36.8%、35.0%和 36.4%,但碳储量相对较低,在 4 个时期中分别是 918、787、692 和 767Tg,仅占各时期内全国森林总碳储量的 24.5%、19.1%、17.0%和 18.3%;第 3 组为

低碳储量森林,包括红松(*P. koraiensis*)林、油松(*P. tabulaeformis*)林等在内的我国大部分森林类型,这些类型多为零星分布,面积较小,仅占各时期全国森林总面积的 5.1%、12.9%、10.0%和 12.0%,因此其碳储量也很低,在各时期内依次为 240、365、340 和 430Tg,分别占全国森林总碳储量的 6.4%、8.9%、8.4%和 10.2%。图 1 直观地表现出 3 组森林的碳储量和面积在各个时期所占的比重及其随时间的变化趋势(图中横坐标 1,2,3,4 依次分别代表第 1 次至第 4 次森林清查的情况,以下相同)。综上所述,我国森林的碳储量主要集中在第 1 组的森林类型中,而且,在 4 次森林清查的 17a 中,该组森林增加的碳储量为 0.4Pg,占全国森林所增加碳储量(0.45Pg)的 89%。由此可见,该组森林在整个中国森林中占据着主导地位,其碳的动态变化将极大地影响整个中国森林在全球碳平衡中的源汇功能。进一步对各组中的森林类型分析发现,在第 1 组中各类森林类型的碳密度普遍较高,如云杉林为 93~104MgC/hm²、冷杉林为 78~85MgC/hm²、阔叶混交林为 73~84MgC/hm²;而第 2 组和第 3 组中各森林类型的碳密度则较低,如马尾松林为 8~12MgC/hm²、杉木要为 13~27MgC/hm²、杨树林为 25~28MgC/hm² 等。但总体来说我国除少数几个森林类型的碳密度与全球相应类型的平均值相当之外,其余大部分类型的碳密度都远小于全球各森林的平均值,例如,Houghton^[33]认为全球热带森林、温带森林和北方森林的碳密度分别是 133、85 和 82Mg C/hm²。

表 2 不同时期各森林类型组的面积和碳储量*
Table 2 Area and carbon storage of each forest type group in different period

时期 Period	森林类型组 Forest type group	面积 Area (M hm ²)	百分比 Percentage (%)	碳储量 Carbon storage (Tg C)	百分比 Percentage (%)	碳密度 Carbon density (Mg C/hm ²)
1973 ~ 1976	第 1 组 Group 1	43.55	45.4	2588	69.1	59.4
	第 2 组 Group 2	47.56	49.5	918	24.5	19.3
	第 3 组 Group 3	4.92	5.1	240	6.4	48.8
	总计 Total	96.03	100.0	3746	100.0	39.0
1977 ~ 1981	第 1 组 Group 1	48.13	50.3	2972	72.0	61.8
	第 2 组 Group 2	35.17	36.8	787	19.1	22.4
	第 3 组 Group 3	12.33	12.9	365	8.9	29.6
	总计 Total	95.63	100.0	4124	100.0	43.1
1984 ~ 1988	第 1 组 Group 1	56.2	55.0	3028	74.6	53.9
	第 2 组 Group 2	35.73	35.0	692	17.0	19.4
	第 3 组 Group 3	10.27	10.0	340	8.4	33.1
	总计 Total	102.20	100.0	4060	100.0	39.7
1989 ~ 1993	第 1 组 Group 1	56.10	51.6	2999	71.5	53.5
	第 2 组 Group 2	39.55	36.4	768	18.3	19.4
	第 3 组 Group 3	12.99	12.0	430	10.2	33.1
	总计 Total	108.64	100.0	4197	100.0	38.7

* 1 M hm²=10⁶hm², 1 Tg C=10¹² gC, 1 MgC=10⁶ gC。

2.2 我国不同龄级森林碳储量及其动态变化

森林的碳储量与森林的年龄组成密切相关,而森林的年龄结构除取决于森林自身的发展演化外,还极大地受外来干扰的影响。干扰的频率越高,幼龄林所占的成分越大,因此,如果其它条件没有改变,常被干扰的森林其碳储量更少,这是由于幼龄林的生物量更小。而在森林发展的整个演替过程中,依据其碳积累的情况,可以把森林的碳动态分为 4 个阶段,即碳积累速率较低的初始阶段或干扰后的再生阶段、碳积累速率最大的逻辑斯谛生长阶段、碳积累速率下降的成熟阶段以及碳分解到土壤的森林死亡阶段。由此可见,森林的碳动态在很大程度上取决于其年龄级的变化。表 3 是我国各个时期幼龄林、中龄林和成熟林的面积、蓄积和碳储量。从表上可知,与其所占的面积相比,我国森林的碳储量主要分布在成熟林中,在各个时期中,虽然它们的面积仅占不同时期森林总面积的 19%~33%之间,但其碳储量却占整个森林碳储量的 40%~60%,而中、幼龄林则刚好相反,这是由于中、幼龄林的碳密度远低于成熟林的碳密度(表 3)。可见,

中、幼龄林所占面积较高是导致我国森林在各个时期的现存碳储量较低的主要原因。为更好地了解各龄级森林在整个森林碳储量的作用及其未来趋势,图2直观地表现它们在各个时期面积和碳储量所占的成分及其动态变化。从图上可看出,虽然成熟林对整个森林碳储量起着很大的作用,但在我国4次森林清查中,由于成熟林的破坏和衰退,其碳储量所占的成分在逐步地降低,而中、幼龄林碳储量所占的比重则越来越大,它们正在逐步发挥其主导作用。随着中、幼龄森林的发展,这种作用将进一步加强,我国森林的碳库也将越来越大。

2.3 我国森林在全球碳平衡中的作用

我国森林的总碳储量由第1次森林清查时的3.75Pg增加到第4次清查的4.20Pg(表2和表3),在从1977年至1993年的17a中我国森林共增加0.45Pg C,平均以每年26.5Tg C的速率递增,说明我国森林在这17a中起着一个碳汇的作用。这与一些学者所估计的北半球森林生态系统是CO₂“失汇”的主要分布地相吻合^[8,11,14]。但是,与北半球其它国家和地区相比,我国森林的碳汇作用相对较弱(整个森林与加拿大森林碳的积累速率相当^[34],而在单位面积上的年积累率则与俄罗斯森林的积累率相等^[35])(表4)。此外,在进一步分析各阶段的碳储量时,发现在不同的时期,我国森林的源汇作用不同。在1977~1981年的5a中,我国森林共积累0.37PgC,每年增加74TgC,说明我国森林在这一时期是一个较强的汇;1982~1988年的7a间,我国森林共损失0.06PgC,每年减少8.6TgC,因此在该时期内我国森林表现为一个弱的碳源,虽然在该时期内我国森林的总面积有所上升,但成熟林的面积却急剧下降,7a间共减少成熟林面积653万hm²,由于成熟林有较高的碳储量,所以这是导致我国森林在该时期内表现为碳源的主要原因;1989~1993年的5a间,由于我国加大了森林保护和植树造林力度,森林面积和蓄积都有较大的增加,而且随着中、幼龄林的发展成熟,这一时期我国森林共积累0.14PgC,每年约增加28TgC,说明我国森林又重新成为一个碳汇。但需要指出的是,与北半球其它国家或地区相比,我国森林的平均碳密度较小(表5),而且呈现出下降的趋势。这说明我国森林的质量较差,森林的中、幼龄林所占的比重过大,而成熟林所占的比重在不断下降,同时也是我国森林在当前表现为一个弱的碳汇的原因。然而从另一个侧面反映,如果对我国森林加以管理和保护,随着我国森林的成熟和发展,我国森林将是一个巨大的潜在的碳汇。在最后一次森林清查中,我国森林的蓄积量以每年197Mm³的速率递增。假如保持这种速率,那么根据粗略地估算可知我国森林碳储量将以91.2~101.7TgC/a的速率增加(每年森林的碳增量(Mg C/a)=每年蓄积的增加量(m³/a)×木材碳密度(Mg C/m)。经计算,在4次森林清查中,我国森林的木材碳密度在0.463~0.516Mg C/m之间,与Kranksina等人^[19]所利用的数值相近。)。依据我国现有对森林管理和保护的现状,相信我国森林的碳汇作用将进一步加强,从而对减缓大气中CO₂浓度上升和维护未来气候稳定做出应有的贡献。

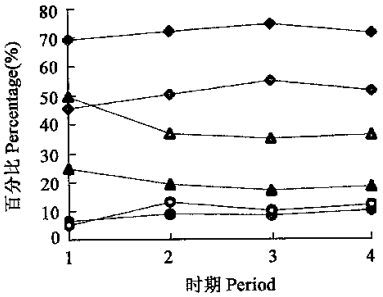


图1 3种森林类型组合的碳储量和面积在不同时期所占全部的百分比

Fig. 1 Percentage of carbon and area of three forest group in the whole forest in different period

◆:第1组的碳储量CS-1;▲:第2组的碳储量CS-2;●:第3组的碳储量CS-3;◇:第1组的面积A-1;△:第2组的面积A-2;○:第3组的面积A-3

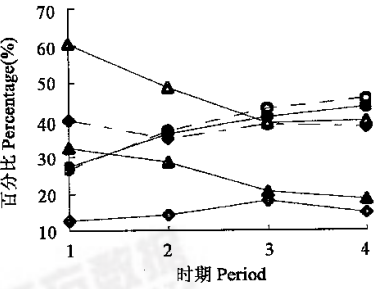


图2 不同时期各森林年龄级的面积和碳储量所占的百分比

Fig. 2 Percentage of area and carbon storage of each forest age-class in different period

◆:幼龄林面积AY;●:中龄林面积AMD;▲:成熟林面积AM;◇:幼龄林碳储量CSY;○:中龄林碳储量CSMD;△:成熟林碳储量CSM

表 3 我国不同时期森林面积、蓄积生物量和碳储量(按龄级划分)

Table 3 Area, volume, biomass and carbon storage of Chinese forest in different period (classifying according to age class)

时期 Period	龄级 Age class	面积 Area (Mhm ²) *	蓄积量 Volume (Mm ³)	总生物量 Total biomass (Pg)	总碳储量 Total carbon storage (PgC)	碳密度 Carbon density (MgC/hm ²)
1973 ~ 1976	幼龄林 Young forests	38.43	525.18	0.96	0.48	12.49
	中龄林 Middle-mature forests	26.27	1793.29	2.00	1.00	38.07
	成熟林 Mature/Overmature forests	31.33	5231.07	4.54	2.27	72.45
	合计 Total	96.03	7549.54	7.50	3.75	39.05
1977 ~ 1981	幼龄林 Young forests	33.45	699.62	1.18	0.59	17.64
	中龄林 Middle-mature forests	34.74	2686.60	3.06	1.53	44.04
	成熟林 Mature/Overmature forests	27.44	4592.15	4.01	2.00	72.89
	合计 Total	95.63	7978.37	8.25	4.12	43.08
1984 ~ 1988	幼龄林 Young forests	39.58	1028.28	1.46	0.73	18.44
	中龄林 Middle-mature forests	41.71	3324.25	3.48	1.74	41.72
	成熟林 Mature/Overmature forests	20.91	3739.10	3.18	1.59	76.04
	合计 Total	102.20	8091.63	8.12	4.06	39.73
1989 ~ 1993	幼龄林 Young forests	41.33	1013.17	1.23	0.62	15.00
	中龄林 Middle-mature forests	47.16	3881.77	3.82	1.91	40.50
	成熟林 Mature/Overmature forests	20.11	4182.23	3.34	1.67	83.04
	合计 Total	108.60	9077.17	8.39	4.20	38.67

* 1Mhm²=10⁶hm²; 1Mm³=10⁶m³.

表 4 不同国家或地区森林碳的净增量(仅指树木活生物量)

Table 4 Net carbon increment (NCI) of forests in different country or region (Live wood biomass only)

国家或地区 Country or region	时期 Period	净碳增量 NCI (TgC/a)	单位面积碳增量 Per unit carbon increment (Mg C/hm ² · a)	文献 References
欧洲 Europe	1971~1990	85~120	0.4~0.6	[12]
俄罗斯 Russia	1988	184.8	0.24	[35]
西班牙 Spain	1966~1974	11	0.93	[21]
美国 USA	1970~1987 1990	87 79	0.43 0.40	[36] [19]
加拿大 Canada	1990~1995	28~86.6		[13,34]
温带 Temperate zone	1990	205~700	0.34~1.16	[13,37]
中国 China	1977~1993	26.5	0.24	本文 This paper

表 5 不同国家和地区森林碳库和平均碳密度

Table 5 Carbon pools and mean carbon density in different country or region

国家或地区 Country or region	森林面积 Area of forests(Mhm ²)	碳库 Carbon pools(Pg C)	平均碳密度 Mean carbon density(Mg C/hm ²)	文献来源 Reference
前苏联 FSU	800	46.3~50.2	57.9~62.7	[40]
俄罗斯 Russia	771.1	25.6~42.1	33.2~47.6	[20,35,38]
美国 USA	200.7	12.1	56.6~61.0	[19]
加拿大 Canada	440.8	15.2	30.7	[39]
温带 Temperate zone	600.0	33.7	57.1	[37]
中国 China	108.6	4.2	38.7	本文 This paper
全球 Globe 万方数据	4165(4827)	359(510)	86(106)	[14]([33])

3 结论

(1)我国森林的碳储量主要集中于云杉林、冷杉林、落叶松、栎类林、桦木林、硬叶阔叶林和阔叶混交林等7个林分类型中,在4个时期中,虽然它们的面积仅占50%左右,但其碳储量却约占整个森林的70%,此外,在4次森林清查中,这些森林类型共增加了0.4PgC,占同期中全国森林碳增量(0.45Pg)的89%,这充分说明这7个森林类型在我国整个森林中占主导地位。因此,这些森林类型碳的动态变化将极大地影响到我国整个森林的源汇功能。

(2)在4次森林清查中,与其所占的面积相比,我国成熟林所占的碳储量比重较大。但是,随着时间的变化,我国森林的中、幼龄林面积和碳储量都呈上升趋势,而成熟林面积和碳储量则呈下降趋势。由此可见,中、幼龄林所发挥的作用越来越大,随着它们的进一步发展成熟,我国森林将是一个潜在的巨大的碳库。

(3)我国森林总碳储量由第1次森林清查时的3.75Pg增加到第4次森林清查时的4.20Pg,从1977年到1993年的17a中共积累了0.45PgC,平均每年以积累26.5TgC的速率递增,说明我国森林起着—个碳汇的作用。

(4)森林的蓄积以最后一次清查时的速度增加(平均每年增加 $197\times10^6\text{m}^3$),我国森林将是一个重要的碳汇,每年森林碳库的净增量将达91.2~101.7TgC。依据我国现有对森林保护和管理的政策以及森林发展演替的规律,达到这一目标是可能的。

参考文献

[1] Woodwell G M, Whittaker R H, Reiners W A, *et al.* The biota and the world carbon budget. *Science*, 1978, **199**: 141~146.

[2] Olson J S, Watts J A, Allison L J. *Carbon in Live Vegetation of Major World Ecosystems*. Report ORNL-5862. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn. 1983. 15~25.

[3] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, *et al.* Soil pools and world life zone. *Nature*, 1982, **298**: 156~159.

[4] Kramer P J. Carbon dioxide concentration, photosynthesis, and dry matter production. *BioScience*, 1981, **31**: 29~33.

[5] Waring R H, Schlesinger W H. *Forest Ecosystems: Concepts and Management*. Inc. Orlando, FL, USA: Academic Press. 1985, 313~335.

[6] Houghton R A. Land-use change and the carbon cycle. *Global Change Biology*, 1995, **1**: 275~287.

[7] Detwiler R P, Hall C S. Tropical forests and the global carbon cycle. *Science*, 1988, **239**: 42~47.

[8] Tans P P, Fung I Y, Takahashi T. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science*, 1990, **247**: 1431~1438.

[9] Siegenthaler U and Sarmiento J L. Atmospheric dioxide and the ocean. *Nature*, 1993, **365**: 119~125.

[10] IPCC. *Spacial Report for the UN Framwork Convention on Climate Change on Radiative Forcing of Climate Change*. 1994. 1~13.

[11] Keeling R F, Piper S C, Heimann M. Global and hemispheric CO₂ sinks deduced from changes in atmospheric O₂ concentration. *Nature*, 1996, **381**: 218~221.

[12] Kauppi P E, Mielikainen K, Kuusela K. Biomass and carbon budget of European Forests, 1971 to 1990. *Science*, 1992, **256**: 70~74.

[13] Sedjo R A. Temperate forest ecosystems in the global carbon cycle. *Ambio*, 1992, **21**: 274~277.

[14] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, **263**: 185~190.

[15] Klchugina T P and Vinson T S. Role of Russian forests in the global carbon balance. *Ambio*, 1995, **24**(5): 258~264.

[16] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology*, 1995, **1**: 77~91.

[17] Kurz W A, Apps M J. Contribution of northern forests to the global C cycle: Canada as a case study. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, **70**: 163~176.

- [18] Turner D P, Kopper G J, Harmon M E, *et al.* A carbon budget for forests of the conterminous United States. *Ecological Applications*, 1995, **5**: 421~436.
- [19] Krankina O N, Harmon M E, Winjum J K. Carbon storage and sequestration in Russian forest sector. *Ambio*, 1996, **25**(4): 284~288.
- [20] Murillo J C R. Temporal variations in the carbon budget of forest ecosystems in Spain. *Ecological Applications*, 1997, **7**(2): 461~469.
- [21] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国森林植被生物量和净生产力. *生态学报*, 1996, **16**(4): 497~508.
- [22] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统碳循环. 见: 王庚晨, 温玉璞主编. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996. 109~128.
- [23] 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): 1984~1991.
- [24] Brown S L, Schroeder P, Kern J S. Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. *Forest Ecology and Management*, 1999, **123**: 81~90.
- [25] 吴刚, 冯宗炜. 中国主要五针松群落学特征及其生物量的研究. *生态学报*, 1995, **15**(3): 260~267.
- [26] 冯宗炜, 王效科, 吴刚. 中国森林生态系统的生物量. 北京: 科学出版社, 1999.
- [27] Whittaker R H, Likens G E. Carbon in the biota. In: G M Woodwell and E V Pecan eds. *Carbon and the Biosphere*. Technical Information Center, Office of Information Services, U. S. Atomic Energy Commission, Springfield, Virginia, USA, 1973, 281~302.
- [28] IGBP. The terrestrial carbon cycle: Implications for Kyoto Protocol. *Science*, 1998, **280**: 1393~1394.
- [29] Brown S and Lugo A E. The storage and production of organic matter in tropical forest and their role in the global carbon cycle. *Biotropica*, 1982, **14**: 161~187.
- [30] Brown S and Lugo A E. Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes. *Science*, 1984, **223**: 1290~1293.
- [31] 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.
- [32] Hakkila P. Utilization of Residual Forest Biomass. Berlin: Springer-Verlag. 1989, 55.
- [33] Houghton R A. Land-use change and terrestrial carbon: the temporal record. In: M J Apps & D T Price eds. *Forest Ecosystems, Forest Management and the Global Carbon Cycle*. NATO ASI Series, Vol. 40. Berlin: Springer-Verlag. 1996, 117~134.
- [34] Potter C S. Terrestrial biomass and the effects of deforestation on the global carbon cycle. *BioScience*, 1999, **49**(10): 769~778.
- [35] Isaev A, Korvin G, Zamolodchikov D, *et al.* Carbon stock and deposition in phytomass of the Russian forests. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, **82**: 247~256.
- [36] Heach C S and Birdsey R A. Carbon trends of productive temperate forests of the conterminous United States. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, **70**: 279~293.
- [37] Heath L S, Kauppi P E, Burschel P, *et al.* Contribution of temperate forests to the world's carbon budget. *Water, Air and Soil Pollution*, 1993, **70**: 55~69.
- [38] Alexeyev V, Birdsey R, Stakanov V, *et al.* Carbon in vegetation of Russian forests: Methods to estimate storage and geographical distribution. *Water, Air and Soil Pollution*, 1995, **82**: 271~282.
- [39] Kurz W A, Apps M J, Webb T M, *et al.* The Carbon Budget of the Canadian Forest Sector: Phase I. Nor-X-326. Forestry Canada. Edmonton, Alberta, Canada. 1992, 40~51.
- [40] Kolchugina T P and Vinson T S. Comparison of two methods to assess the carbon budget of forest biome in the Former Soviet Union. *Water, Air and Soil Pollution*, 1993, **70**: 207~221.