

# 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡

周玉荣

于振良 赵士洞

(中国科学院植物研究所, 北京 100093) (中国科学院自然资源综合考察委员会, 北京 100101)

**摘要** 在广泛收集资料的基础上, 估算了我国主要森林生态系统的碳贮量和碳平衡通量, 分析了它们的区域特征。主要结果如下: 1) 我国森林生态系统的平均碳密度是  $258.83 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 基本趋势是随纬度的增加而增加; 其中植被的平均碳密度是  $57.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 随纬度的增加而减小; 土壤碳密度约是植被碳密度的 3.4 倍, 其区域特点与植被碳密度呈相反趋势, 随纬度升高而增加; 凋落物层平均碳密度是  $8.21 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 随水热因子的改善而减小。2) 森林生态系统有机碳库包括植被、土壤和凋落物层 3 个部分, 采用林业部调查规划设计院 1989~1993 年最新统计的我国森林资源清查资料, 估算我国主要森林生态系统碳贮量为  $281.16 \times 10^8 \text{ t}$ , 其中植被碳库、土壤碳库、凋落物层碳库分别为  $62.00 \times 10^8 \text{ t}$ ,  $210.23 \times 10^8 \text{ t}$ ,  $8.92 \times 10^8 \text{ t}$ 。落叶阔叶林、暖性针叶林、常绿落叶阔叶林、云冷杉 (*Picea-Abies*) 林、落叶松 (*Larix*) 林占森林总碳贮量的 87%, 是我国森林主要的碳库。3) 我国森林生态系统在与大气的气体交换中表现为碳汇, 年通量为  $4.80 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ , 基本规律是从热带向寒带, 碳汇功能下降, 这取决于系统碳收支的各个通量之间的动态平衡; 阔叶林的固碳能力大于针叶林。我国森林生态系统可以吸收生物物质、化石燃料燃烧和人口呼吸释放总碳量 ( $9.87 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ) 的 48.7%。

**关键词** 碳密度 碳贮量 碳循环 碳平衡

## CARBON STORAGE AND BUDGET OF MAJOR CHINESE FOREST TYPES

ZHOU Yu-Rong

(Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093)

YU Zhen-Liang and ZHAO Shi-Dong

(Commission for Integrated Survey of Natural Resources, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

**Abstract** The regional characteristics of carbon storage and carbon dioxide fluxes of major Chinese forest ecosystems were studied from the points of internal biological cycle, based on published data regarding forest biomass, productivity, the organic carbon content of soil profile, stand and annual weight of the litter, soil respiration etc. The results are as follows: the average carbon density of Chinese forest ecosystem is  $258.83 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , showing a generally increasing trend with increasing latitude; carbon density of the vegetation, soil and litter is  $57.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $193.55 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , and  $8.21 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , respectively; the characteristics of the carbon density of these three fractions (vegetation, soil, litter) were also analyzed; from the recent areal data provided by the Ministry of Forestry of China in 1989-1993 the total carbon storage of Chinese forests was estimated to be  $281.16 \times 10^8 \text{ t}$ , in which the vegetation, soil and litter were  $62.00 \times 10^8 \text{ t}$ ,  $210.23 \times 10^8 \text{ t}$ ,  $8.92 \times 10^8 \text{ t}$ , making up 22.2%, 74.6%, 3.2%, respectively of the total, the carbon storage of deciduous broad-leaved forests, warmer temperate coniferous forests, evergreen/evergreen-deciduous broad-leaved forests, *Picea-Abies* forests, and *Larix* forests were the major carbon pool of the forest, making up 87% of the total; in China the net flux between the forest ecosystem and the atmosphere is  $4.80 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ , and the forest ecosystem acts as a carbon sink when exchanged with the atmosphere, absorbing 48.7% of the carbon dioxide from burning of biomass, fossil fuel and human respiration ( $9.87 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ). Generally, the carbon dioxide fixing capacity of the deciduous forest is higher than the coniferous forests, decreasing with increasing latitude.

**Key words** Carbon density, Carbon storage, Carbon circulation, Carbon balance

收稿日期: 1999-01-08 修订日期: 1999-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (10049571030) 和中国科学院生态系统研究网络项目 (KZ95T-04-02-08)

本文修改过程中承蒙李凌浩博士、方精云博士提出宝贵意见, 特此致谢!

碳循环的研究是了解生物圈的重要途径,这对于估计  $\text{CO}_2$  及其他温室气体含量及他们与生物圈的相互作用至关重要 (Berrien & Brasewell, 1994)。碳循环的研究首先是碳贮量和碳通量。随着国际社会对全球气候变化的重视,  $\text{CO}_2$  作为最重要的一种温室气体,其源与汇成为全球关注的热点。近年来进行的大尺度的碳平衡研究已被广泛用来分析国家和地区、生物群落和经济区的碳状况,但由于生态系统的多样性,这种计算结果很不一致,陆地生态系统的碳贮量与年净碳通量仍是碳循环研究中几个最不确定的因素。森林作为最主要的植被类型,生物量和净生产力约占整个陆地生态系统的86%和70%,土壤碳贮量约占世界陆地土壤总碳库的73% (Post *et al.*, 1982),故森林状况很大程度上决定了陆地生物圈是碳源还是碳汇。森林生态系统在碳循环中的作用很大程度上取决于其高的碳密度。目前,我国森林生态系统碳循环研究已经有了一些点上的分散资料的积累,但基于森林生态系统碳循环大量数据综合性的研究极为有限,除少数区域、国家尺度森林植被碳贮量和年净固碳量的研究外 (方精云等, 1996a; 1996b; 康惠宁等, 1996; 罗天祥, 1996; 吴仲民等, 1997; 李意德等, 1998), 多数研究停留在斑块或点的水平上; 对森林植被生物量、生产力的研究较多,而对森林土壤有机碳含量、土壤有机质分解的研究则很不够,尤其是土壤呼吸,国内几乎是空白,使得区域尺度土壤碳循环的研究几乎没法进行。

## 1 方 法

森林生态系统的碳贮库由植被、凋落物和土壤3个分室组成,其碳贮量分别由这3个库的碳密度及各林分类型面积决定。植被碳贮量是基于生物量乘以转换比率,即干物质中碳的比重计算得来。这里讨论的生物量是某一时间内测到的生物体的总重量,即现存量 (不包括凋落物贮量)。不同森林植被因其群落组成、年龄结构、林分起源的差异,其转换率略有不同,本文采用国际上常用的转换率0.45 (Olson *et al.*, 1983; Levine *et al.*, 1995)。

森林凋落物层是森林生态系统的一大特征 (这里的凋落物不包括土壤中根系更新形成的凋落物),是年凋落物量与分解量的差值。凋落物碳贮量通

过凋落物的现存生物量乘以比例系数0.5得来。

土壤有机碳贮量根据土壤剖面有机质百分含量推算 (Fang *et al.*, 1996):

土壤有机碳 = 土壤容重  $\times$  采样深度  $\times$  土壤有机质百分含量  $\times 0.58 \times$  面积

0.58这一换算因子是指  $< 2 \text{ mm}$  的土壤颗粒有机质含碳量,是一个世纪以前 Bemmelen 提出的 (Jenny, 1988)。由于土壤类型分布与植被类型分布几乎是一致的 (Goto *et al.*, 1994),故本文利用植被面积代替土壤类型的面积计算森林土壤碳贮量。

碳贮量不仅与碳密度有关,还与森林面积的获得途径有关。本文各种森林类型的面积采用林业部规划设计院1989~1993年森林资源统计<sup>1)</sup>数据,针叶林基本根据统计资料的类别,按照资料情况个别地作了归类;阔叶林则划分为4大类:落叶阔叶林、硬叶常绿阔叶林、常绿落叶阔叶林、热带林。落叶阔叶林包括栎 (*Quercus*) 类、杨桦 (*Populus-Betula*) 类、桐类 (*Paulownia*) 及其它非亚热带地区的阔叶混交林、阔叶林 (硬阔类、软阔类、杂木林等);热带林包括广东、广西、云南、四川、贵州等省的桉树 (*Eucalyptus*)、木麻黄 (*Casuarina*) 及海南省的阔叶林。

森林生态系统碳平衡包括输入与输出两个过程,输入与输出的差值即为生态系统的净生产量 (Net ecosystem production, NEP),若 NEP 为正,表明生态系统是  $\text{CO}_2$  汇,为负,则是  $\text{CO}_2$  源。碳的输入主要是植被对  $\text{CO}_2$  的固定,输出包括群落呼吸、凋落物和土壤有机碳分解释放  $\text{CO}_2$ ,凋落物分解释放  $\text{CO}_2$  量几乎没有报道,这个分量与其他分量相比小得多,所以,系统的碳收支 = 植被总光合量 - 群落呼吸量 - 土壤呼吸量 (不含根系呼吸,在群落呼吸量中已考虑),而植被的年净固碳量 = 年总光合作用 - 群落年呼吸量 - 地上年凋落物碳量,故系统的碳收支 = 净固碳量 + 地上凋落物碳量 - 土壤非根呼吸。年净固碳量,这里指的是植被年净增长量净初级生产力 (NPP) - 年凋落物量折合成碳量。

本文是在广泛收集资料的基础上经过数据的整理、分析后形成的。其中森林生物量、生产力数据来源于文献中的实测样地,共720条记录<sup>2)</sup>;土壤有机碳主要依据熊毅等 (1987) 和张万儒 (1986),并搜集近20年的文献资料,共420条记录;年凋落物量与

1) 林业部调查规划设计院, 1998. 全国森林资源统计 (1989~1993) (内部资料)。

2) 部分数据来自罗天祥博士学位论文数据库部分, 内部交流。

表 1 我国森林生态系统的碳密度和碳贮量 \*  
Table 1 The carbon density and the storage of Chinese major forest ecosystems

林分类型 Stand types	面积 Area (10 <sup>6</sup> hm <sup>2</sup> )	碳密度 Carbon density (t·hm <sup>-2</sup> )				碳贮量 Carbon storage(10 <sup>8</sup> t)			
		植被 Vegetation	土壤 Soil	凋落物 Litter	总计 Total	植被 Vegetation	土壤 Soil	凋落物 Litter	总计 Total
落叶松林 <sup>1)</sup>	9.6870	60.20	166.52	20.08	246.8	5.83	16.13	1.95	23.91
云冷杉林 <sup>2)</sup>	7.5608	82.01	360.79	20.79	463.59	6.20	27.28	1.57	35.05
樟子松林 <sup>3)</sup>	0.6324	31.10	134.61	5.65	171.36	0.20	0.85	0.04	1.09
阔叶红松林 <sup>4)</sup>	2.0005	68.17	185.00	9.46	262.63	1.36	3.70	0.19	5.25
温性针叶林 <sup>5)</sup>	4.2810	43.26	189.56	11.34	244.16	1.85	8.12	0.49	10.46
暖性针叶林 <sup>6)</sup>	29.5398	47.97	110.30	5.55	163.82	14.17	32.58	1.64	48.39
针叶、针阔混交林 <sup>7)</sup>	1.3333	64.76	335.58	7.66	408.00	0.86	4.47	0.10	5.43
落叶阔叶林 <sup>8)</sup>	36.0958	47.75	208.90	5.85	262.5	17.24	75.40	2.11	94.75
硬叶常绿阔叶林 <sup>9)</sup>	3.9929	100.73	205.23	3.205	309.16	4.02	8.19	0.13	12.34
常绿、常绿落叶阔叶林 <sup>10)</sup>	12.6100	73.68	257.57	5.43	336.68	9.29	32.48	0.68	42.45
热带林 <sup>11)</sup>	0.8872	110.86	116.49	3.00	230.35	0.98	1.03	0.03	2.04
总计 Total	108.6207	57.07	193.55	8.21	258.83	62.00	210.23	8.92	281.16

1) *Larix* forests 2) *Picea-Abies* forests 3) *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forests 4) *P. koraiensis* forests 5) Temperate coniferous forests  
6) Warm temperate coniferous forests 7) Coniferous mixed/coniferous and broad-leaved mixed forests 8) Deciduous broad-leaved forests 9) Sclerophyllous broad-leaved forests 10) Evergreen/evergreen-deciduous broad-leaved forests 11) Tropical forests 表2同此 Table 2 is the same

现存量主要根据文献资料,共250条记录;土壤呼吸数据基本来自国外文献数据,共110条记录<sup>1)</sup>。

2 结果与讨论

2.1 碳密度

由表1可知,我国森林植被平均碳密度是57.07 t·hm<sup>-2</sup>,从樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)林(31.10 t·hm<sup>-2</sup>)到热带林(110.86 t·hm<sup>-2</sup>)变化很大,但大多集中在40~60 t·hm<sup>-2</sup>之间,尤其是温性针叶林和暖性针叶林,相差很小(表1),与 Heath 等(1993)估算全球森林碳贮量时,估算中国碳库时取值58.00 t·hm<sup>-2</sup>相近,但低于世界平均水平(86.00 t·hm<sup>-2</sup>)(Dixon *et al.*, 1994)。原因可能是:一是我国森林年龄结构中,中、幼龄林所占比重较大,其中幼龄林占38.05%,中龄林占33.26%,故碳积累较少(李文华等,1996);二是我国森林质量不高,原始林多数已逐渐演替为次生林,甚至低价的疏林(李文华等,1996)。另外,世界森林碳贮量的估计一般是基于国际生物学计划,那期间的统计结果可能偏高。我国森林凋落物层碳密度一般规律是针叶林高于阔叶林,随着纬度升高而增加,按暖性针叶林、温性针叶林、寒温性针叶林的顺序递增。凋落物层碳密度最大的是云冷杉(*Picea-Abies*)林和落叶松(*Larix*)林,超过20 t·hm<sup>-2</sup>,热带林最小(3.00 t·hm<sup>-2</sup>)。这很大程度上取决于水热因子、地域特点等。一般纬度越高,

分解条件越差,凋落物积累越多。

土壤有机碳含量是土壤碳循环研究的基础,直接取决于地上、地下凋落物的输入和有机质分解,这二者与水热条件紧密相关,故土壤有机碳含量不仅与其上生长的植被关系密切,也受制于当地的气候条件。各种土壤类型各个亚类的土壤碳含量并不均一,由于缺少各个亚类所占森林面积的权重,这里只是一种算术平均,但仍然可以反映出我国森林土壤碳含量的基本规律。由表1可知,我国森林土壤平均碳密度是193.55 t·hm<sup>-2</sup>,约是植被碳密度的3.4倍,其区域特征与植被碳密度呈相反趋势,随纬度升高而增加。土壤碳密度最大的是云冷杉林(360.79 t·hm<sup>-2</sup>),最小的是暖性针叶林和热带林(116.49 t·hm<sup>-2</sup>)。云冷杉林下土壤呼吸较弱,故形成巨大的土壤碳贮库;而热带林下土壤呼吸速率最大,再加上茂密的植被源源不断地从土壤中吸收营养,形成大的植被碳贮库,故土壤碳密度处于较低水平。我国森林土壤平均碳密度与 Kolchugina 和 Vinson(1993)估计的前苏联土壤层碳密度(244.1 t·hm<sup>-2</sup>)相比偏低,但与其他中纬度的国家相比(美国大陆:108.00 t·hm<sup>-2</sup>;澳大利亚:83.00 t·hm<sup>-2</sup>)(Dixon *et al.*, 1994)高得多,接近世界平均值189.00 t·hm<sup>-2</sup>。

由表1可知,我国森林生态系统(植被、凋落物层、土壤)平均碳密度是258.83 t·hm<sup>-2</sup>,其中云冷杉林碳密度最大,暖性针叶林最小;热带林和暖性针叶

1)周玉荣. 1998. 我国主要森林生态系统的碳循环研究. 中国科学院植物研究所. 硕士论文.

林的碳密度偏小。从其净固碳力看,热带林净固碳量最高,暖性针叶林与寒温性针叶林、温性针叶林、阔叶红松林相比,也较高(表2),但其碳密度却偏低。原因可能与所收集的数据有关,也因为我国暖性针叶林和热带林多为次生林,其中幼龄林和中龄林所占比例分别是84.1%、84.0%(李文华等,1996)。

2.2 碳贮量

表1统计得出我国森林生态系统总碳库为281.16×10<sup>8</sup> t,其中土壤碳库为210.23×10<sup>8</sup> t,占总量的74.6%,植被碳库为62.00×10<sup>8</sup> t,占总量的22.2%;凋落物层的碳贮量为 8.92×10<sup>8</sup> t,占总量的3.2%。我国森林面积约占世界的2.6%,植被与土壤碳贮量分别是世界的(3590×10<sup>8</sup> t,7890×10<sup>8</sup> t)(Dixon *et al.*, 1994)1.7%、2.7%,故我国森林生态系统在全球碳循环中的作用是不容忽视的。

2.3 碳平衡

表2是根据文献资料统计得出的我国主要森林生态系统碳平衡的各个通量。结果表明:我国森林生态系统在与大气的气体交换中表现为碳汇,即 NEP 为正,年通量为4.80×10<sup>8</sup> t。根据刘允芬(1995)和方精云等(1996b)的估计结果,我国生物物质和化石燃料燃烧、人体呼吸等每年释放的总碳量为9.87×10<sup>8</sup> t,而我国森林生态系统可以吸收其中的48.7%。单位面积碳汇功能基本规律是阔叶林的固碳能力大于针叶林,随纬度的升高,从热带向寒带其碳汇功能下降。表2中的森林植被年净增长碳量直接反映森林的生长情况。我国森林植被单位面积年净增长碳量

5.54 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,总增长碳量是6.02×10<sup>8</sup> t·a<sup>-1</sup>,占全球净初级生产力(328.5×10<sup>8</sup> t, Lieth, 1975)的1.8%,年净固碳力在2.15~10.06 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>之间,最大的是热带林(表2)。

由表2可知,我国森林年凋落碳量都不超过10.00 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。年凋落物量随树种的变化幅度很大,一般规律是随气候带由北向南的推移而逐渐增加,但即使是同一气候带其凋落物量的差别也很大,阔叶树种比针叶树种的年凋落物量大,针阔混交林比针叶纯林年凋落物量大;年凋落碳量最多的是热带林,最小的是落叶松林,仅有0.58 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

国内对于土壤呼吸测定的数据很少,不能用来分析我国森林土壤呼吸量,故仍采用世界相应植被类型的平均土壤呼吸速率估算我国森林土壤呼吸量。Raich 和 Schlesinger(1992)在全球尺度上通过陆地生态系统土壤呼吸的研究认为:根的呼吸量占土壤总呼吸量的30%~70%,故在成熟的森林中,根系呼吸在土壤总呼吸中所占比例取0.5是适宜的。考虑到我国成熟林并不多,根系呼吸占土壤总呼吸量的比值取0.45,这与方精云等(1996b)的观点也是一致的。结果如表2所示:我国森林土壤总呼吸量是6.86×10<sup>8</sup> t·a<sup>-1</sup>,非根呼吸是3.82×10<sup>8</sup> t·a<sup>-1</sup>,这一值表示森林生态系统内循环每年向大气圈释放的 CO<sub>2</sub> 量。

3 小 结

上文初步分析了我国主要森林生态系统3个部

表 2 我国森林生态系统的碳平衡  
Table 2 The carbon budget of Chinese major forest ecosystems(t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>10<sup>8</sup> t·hm<sup>-2</sup>)

林分类型 Stand types	面积 Area (10 <sup>6</sup> hm <sup>2</sup> )	净增长碳量 Net vegetation production		年凋落碳量 Litter production		非根呼吸 Soil respiration except root		碳收支(NEP) Net ecosystem production	
		平均 Mean	总计 Total	平均 Mean	总计 Total	平均 Mean	总计 Total	平均 Mean	总计 Total
落叶松林 <sup>1)</sup>	9.6870	3.90	0.38	0.58	0.06	1.77	0.17	2.71	0.27
云冷杉林 <sup>2)</sup>	7.5608	5.28	0.40	0.77	0.06	1.77	0.13	4.28	0.33
樟子松林 <sup>3)</sup>	0.6324	2.15	0.01	1.40	0.01	1.77	0.01	1.78	0.01
阔叶红松林 <sup>4)</sup>	2.0005	5.25	0.11	1.99	0.04	3.56	0.07	3.68	0.08
温性针叶林 <sup>5)</sup>	4.2810	4.20	0.18	1.84	0.08	3.75	0.16	2.29	0.10
暖性针叶林 <sup>6)</sup>	29.5398	5.89	1.74	2.08	0.61	3.75	1.11	4.22	1.24
针叶、针阔混交林 <sup>7)</sup>	1.3333	7.02	0.09	2.58	0.03	3.75	0.05	5.85	0.07
落叶阔叶林 <sup>8)</sup>	36.0958	4.60	1.66	3.03	1.09	3.56	1.28	4.07	1.47
硬叶常绿阔叶林 <sup>9)</sup>	3.9929	6.64	0.27	3.52	0.14	3.92	0.16	6.24	0.25
常绿、常绿落叶阔叶林 <sup>10)</sup>	12.6100	8.67	1.09	3.52	0.44	4.90	0.62	7.29	0.91
热带林 <sup>11)</sup>	0.8872	10.06	0.09	4.49	0.04	6.93	0.06	7.62	0.07
总计或加权平均 Total or mean	108.6207	5.54	6.02	2.40	2.61	3.52	3.82	4.40	4.80

分的碳贮量及通量,为评价我国森林在全球变化中的作用提供了一些必要参数。我国森林生态系统的平均碳密度是  $258.83 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,基本趋势是随纬度的增加而增加,其中植被的平均碳密度是  $57.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,随纬度的增加而减小,土壤碳密度约是植被碳密度的3.4倍,其区域特点与植被碳密度呈相反趋势,随纬度升高而增加;凋落物层平均碳密度是  $8.21 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,随水热因子的改善而减小。

### 参 考 文 献

- Berrien, M. II & B. H. Braswell. 1994. The metabolism of the earth: understand the carbon cycle. *AMBIO* (人类环境杂志), **23**: 4~12. (in Chinese)
- Dixon, R. K., S. Brown, R. A. Houghton, A. M. Solomon, M. C. Trexler & J. Wisniewski. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystem. *Science*, **263**: 185~190.
- Fang, J. Y. (方精云), G. H. Liu (刘国华) & S. L. Xu (徐嵩龄). 1996a. Biomass and net production of forest vegetation in China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **16**: 497~508. (in Chinese)
- Fang, J. Y. (方精云), G. H. Liu (刘国华) & S. L. Xu (徐嵩龄). 1996b. The carbon circulation of the Chinese land ecosystem and its contribution to the global cycle. In: Wang, R. S. (王如松), J. Y. Fang (方精云), L. Gao (高林) & Z. W. Feng (冯宗炜) eds. *Research on the popular problem about the modern ecology*. Beijing: Chinese Science and Technology Press. (in Chinese)
- Fang, J. Y., G. H. Liu & S. L. Xu. 1996. Soil carbon pool in China and its global significance. *Journal of Environmental Science (China)*, **8**: 249~254.
- Goto, N., A. Sakoda & M. Suzuki. 1994. Modelling of soil carbon dynamics as a part of carbon cycle in terrestrial ecosystems. *Ecological Modelling*, **74**: 183~204.
- Heath, L. S., P. E. Kauppi, P. Burschel, H. Gregor, R. Guderian, G. H. Kohlmaier, S. Lorenz, D. Overdieck, F. Scholz, H. Thoasius & M. Weber. 1993. Contribution of temperate forests to the world's carbon budget. *Water, Air and Soil Pollution*, **70**: 55~69.
- Kang, H. N. (康惠宁), Q. Y. Ma (马钦彦) & J. Z. Yuan (袁嘉祖). 1996. Estimation of the Chinese forest function on carbon sink. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **7**: 230~234. (in Chinese)
- Kolchugina, T. P. & T. S. Vinson. 1993. Carbon sources and sinks in forest biomes of the former Soviet Union. *Global Biogeochemical Cycles*, **7**: 291~304.
- Levine, J. S., W. R. Cofer III, D. R. Cahoon Jr. & E. L. Winstead. 1995. Biomass burning, a driver for global change. *Environmental Science Technology*, **120**: 120~125.
- Li, W. H. (李文华) & F. Li (李飞). 1996. *Research of forest resources in China*. Beijing: China Forestry Publishing House. (in Chinese)
- Li, Y. D. (李意德), Q. B. Zeng (曾庆波), Z. M. Wu (吴仲民), G. Y. Zhou (周光益) & B. F. Chen (陈步峰). 1998. Estimation of amount of carbon pool in natural tropical forest of China. *Forest Research* (林业科学研究), **11**: 156~162. (in Chinese)
- Lieth, H. 1975. Modelling the primary productivity of the world. In: Lieth, H. & R. B. Whittaker eds. *Primary productivity of the biosphere*. New York: Springer-Verlag. 237~263.
- Liu, Y. F. (刘允芬). 1995. A study on the carbon cycle in the agro-ecological system of China. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), **10**: 1~8. (in Chinese)
- Luo, T. X. (罗天祥). 1996. Patterns of net primary productivity for Chinese major forest types and its mathematical models. Ph.D. thesis of Commission for Integrated Survey of Natural Resources, the Chinese Academy of Sciences. (in Chinese)
- Olson, J. S., J. A. Watts & L. J. Allison. 1983. Carbon in live vegetation of major world ecosystems. US Department of Energy DOE/NBGB-0037. (Rep. Ornl-58620, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN)
- Post, W. M., W. R. Emanuel, P. J. Zinke & A. G. Strangenberger. 1982. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, **298**: 156~159.
- Raich, J. W. & W. H. Schlesinger. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, **44B**: 81~99.
- Wu, Z. M. (吴仲民), Q. B. Zeng (曾庆波), Y. D. Li (李意德), G. Y. Zhou (周光益), B. F. Chen (陈步峰), Z. H. Du (杜志鹤) & M. X. Lin (林明献). 1997. A preliminary research on the carbon storage and CO<sub>2</sub> release of the tropical forest soils in Jianfengling, Hainan Island, China. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **21**: 416~423. (in Chinese)
- Xiong, Y. (熊毅) & Q. K. Li (李庆逵). 1987. *The soil of China*. 2nd ed. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- Jenny, H. (translated by Li, X. F. (李孝芳), R. H. Huang (黄润华) & Y. X. Tang (唐耀先)). 1988. *Soil resources: origin and properties*. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- Zhang, W. R. (张万儒). 1986. *Chinese forest soil*. Beijing: Science Press. (in Chinese)

责任编辑:张丽赫