

# 全球森林生态系统碳储量、固碳能力 估算及其区域特征<sup>\*</sup>

刘魏魏<sup>1,2</sup> 王效科<sup>1\*\*</sup> 逯 非<sup>1</sup> 欧阳志云<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; <sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要** 从气候地带性和地理区域分布两方面对森林生态系统碳储量及固碳能力, 以及土地利用变化对森林固碳的影响和森林固碳估算不确定性的原因进行综述. 据估算, 全球森林生态系统碳储量为 652~927 Pg C, 固碳能力达到 4.02 Pg C · a<sup>-1</sup>. 各气候地带森林碳储量表现为热带最大(471 Pg C), 寒带次之(272 Pg C), 温带(113~159 Pg C) 最小, 固碳能力表现为热带(1.02~1.3 Pg C · a<sup>-1</sup>) 最大, 温带次之(0.8 Pg C · a<sup>-1</sup>) 寒带(0.5 Pg C · a<sup>-1</sup>) 最小; 各地理区域森林碳储量表现为南美洲(187.7~290 Pg C) 最大, 其次是欧洲(162.6 Pg C)、北美洲(106.7 Pg C)、非洲(98.2 Pg C) 和亚洲(74.5 Pg C), 而大洋洲(21.7 Pg C) 最小, 固碳能力为南美洲热带(1276 Tg C · a<sup>-1</sup>) 和非洲热带(753 Tg C · a<sup>-1</sup>) 较大, 其次是北美洲(248 Tg C · a<sup>-1</sup>) 和欧洲(239 Tg C · a<sup>-1</sup>), 而东亚(98.8~136.5 Tg C · a<sup>-1</sup>) 较小. 为进一步减少森林生态系统固碳估算的不确定性, 今后应综合运用连续长期观测技术、样地清查、遥感分析和模型模拟等方法.

**关键词** 森林生态系统; 碳储量; 固碳能力; 区域分布

文章编号 1001-9332(2015) 09-2881-10 中图分类号 X24 文献标识码 A

**Regional and global estimates of carbon stocks and carbon sequestration capacity in forest ecosystems: A review.** LIU Wei-wei<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-ke<sup>1</sup>, LU Fei<sup>1</sup>, OUYANG Zhi-yun<sup>1</sup> (<sup>1</sup>State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; <sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2015, 26(9): 2881–2890.

**Abstract:** As a dominant part of terrestrial ecosystems, forest ecosystem plays an important role in absorbing atmospheric CO<sub>2</sub> and global climate change mitigation. From the aspects of zonal climate and geographical distribution, the present carbon stocks and carbon sequestration capacity of forest ecosystem were comprehensively examined based on the review of the latest literatures. The influences of land use change on forest carbon sequestration were analyzed, and factors that leading to the uncertainty of carbon sequestration assessment in forest ecosystem were also discussed. It was estimated that the current forest carbon stock was in the range of 652 to 927 Pg C and the carbon sequestration capacity was approximately 4.02 Pg C · a<sup>-1</sup>. In terms of zonal climate, the carbon stock and carbon sequestration capacity of tropical forest were the maximum, about 471 Pg C and 1.02–1.3 Pg C · a<sup>-1</sup> respectively; then the carbon stock of boreal forest was about 272 Pg C, while its carbon sequestration capacity was the minimum, approximately 0.5 Pg C · a<sup>-1</sup>; for temperate forest, the carbon stock was minimal, around 113 to 159 Pg C and its carbon sequestration capacity was 0.8 Pg C · a<sup>-1</sup>. From the aspect of geographical distribution, the carbon stock of forest ecosystem in South America was the largest (187.7–290 Pg C), then followed by European (162.6 Pg C), North America (106.7 Pg C), Africa (98.2 Pg C) and Asia (74.5 Pg C), and Oceania (21.7 Pg C). In addition, carbon sequestration capacity of regional forest ecosystem was summed up as listed below: Tropical South America forest was the maximum (1276 Tg C · a<sup>-1</sup>), then were Tropical Africa (753 Tg C · a<sup>-1</sup>), North America (248 Tg C · a<sup>-1</sup>) and European (239

\* 中国科学院战略先导科技专项(XDA05050602, XDA05060102)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: wangxk@rcees.ac.cn

2014-11-18 收稿 2015-05-05 接受.

Tg C · a<sup>-1</sup>), and East Asia (98.8–136.5 Tg C · a<sup>-1</sup>) was minimum. To further reduce the uncertainty in the estimations of the carbon stock and carbon sequestration capacity of forest ecosystem, comprehensive application of long-term observation, inventories, remote sensing and modeling method should be required.

**Key words:** forest ecosystem; carbon stock; carbon sequestration; regional distribution.

DOI:10.13287/j.1001-9332.20150630.005

近年来,由于人类矿物燃料燃烧和土地利用变化的加剧,大气 CO<sub>2</sub> 浓度已由 1980 年的 338 ppm 上升到 2014 年的 399 ppm<sup>[1]</sup>,超过工业革命前 40%<sup>[2]</sup>。2013 年 CO<sub>2</sub> 排放速率达 10.7 Pg C · a<sup>-1</sup><sup>[1]</sup>。大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高不仅造成全球气温升高、极地冰雪融化、海平面上升、气候变化和极端天气发生<sup>[3]</sup>,还导致作物锌、铁营养元素减少,威胁人类营养<sup>[4]</sup>。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告指出,2030 年确保全球变暖幅度不超过 2 °C<sup>[5]</sup>,因此控制大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高是 21 世纪重要的任务之一<sup>[6]</sup>。目前,控制大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高的战略措施有:减少排放、通过陆地与海洋生物手段固碳、将 CO<sub>2</sub> 以液态形式储存在地下、增加地球云层覆盖、增强对太阳辐射的反射,其中通过陆地与海洋手段固碳是最有希望的方法<sup>[7]</sup>。陆地生态系统在减缓大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加中的作用已经得到共识<sup>[5-6]</sup>。

陆地生态系统通过光合作用把大气 CO<sub>2</sub> 固定在植被和土壤中<sup>[6,8]</sup>。作为重要的碳汇,陆地生态系统固碳功能一直受到广泛关注<sup>[6,8-9]</sup>,尤其是作为重要陆地生态系统的森林。目前,陆地生态系统总碳库为 1950~3150 Pg C<sup>[5-6,8,10]</sup>,其中植被碳库为 450~650 Pg C<sup>[5-6,8,10]</sup>,碳密度为 2~133 t C · hm<sup>-2</sup><sup>[10]</sup>;土壤碳库为 1500~2500 Pg C<sup>[5-6,10]</sup>,1 m 深土壤碳密度为 42~709 t C · hm<sup>-2</sup><sup>[10-11]</sup>。陆地生态系统的固碳能力已由 19 世纪 80 年代碳中状态和上升到 19 世纪 90 年代净碳增汇(1.1±0.9) Pg C · a<sup>-1</sup>和 21 世纪初净碳增汇(1.5±0.9) Pg C · a<sup>-1</sup><sup>[5,12]</sup>。若不考虑土地利用变化,21 世纪初陆地生态系统固碳能力已达到 2.6~2.85 Pg C · a<sup>-1</sup><sup>[5,12-16]</sup>,约占全球碳汇的 27%<sup>[16]</sup>。在全球陆地生态系统中,北半球是一个大的土壤碳汇<sup>[10,17-19]</sup>,净碳增汇为 0.5~2.1 Pg C · a<sup>-1</sup><sup>[19-21]</sup>,其中欧洲固碳能力最大,其次是北美、俄罗斯和东亚<sup>[22-29]</sup>(表 1);热带地区是一个大的植被碳汇<sup>[5,10]</sup>。由于 CO<sub>2</sub> 施肥作用、土地利用变化和管理,陆地生态系统净碳汇以(1.4±0.7) Pg C · a<sup>-1</sup> 速度增长,到 2050 年固碳能力将增至约 5 Pg C · a<sup>-1</sup><sup>[6]</sup>。

森林作为重要陆地生态系统具有保存现有碳库、增加碳汇和替代矿物燃料的功能<sup>[30]</sup>,以及减少

大气 CO<sub>2</sub> 浓度、缓解气候变化的潜力<sup>[31]</sup>。森林可以从大气中吸收 CO<sub>2</sub> 并储存在植被和土壤中<sup>[32-33]</sup>。据估计,现有森林植被碳密度为 3~60 t C · hm<sup>-2</sup>,土壤碳密度为 10~1000 t C · hm<sup>-2</sup><sup>[34]</sup>;整个森林碳储量占全部陆地碳储量的 33%~46%<sup>[10,35-36]</sup>,森林储存了 80% 以上陆地地上碳储量,70% 以上陆地土壤有机碳<sup>[37]</sup>,是陆地生态系统最重要的碳库,其固碳功能对陆地生态系统固碳作用和全球及区域气候变化具有重要影响<sup>[38-45]</sup>。森林固碳能力受当地气候条件、火灾、病虫害、综合管理措施等多方面强烈影响<sup>[46-48]</sup>,这些因素具有较大的区域性,因此森林固碳能力也呈现出很大的区域差异<sup>[46]</sup>。而了解全球和区域森林生态系统碳源/汇分布和固碳能力,对于预测管理全球碳循环和地球气候行为至关重要<sup>[49]</sup>。虽然有很多关于全球或者具体某一地点森林固碳能力的报道<sup>[39-45,50]</sup>,但就全球和区域森林碳储量和固碳状况特征分布的研究较少,少有的研究由于采用的情景假设和估算方法差异,估算结果存在很大的不确定性<sup>[49]</sup>。因此,本文针对全球森林生态系统固碳状况及区域分布格局这一问题,在搜集已发表文献的基础上<sup>[39,51-75]</sup>综述了全球和区域森林生态系统碳储量现状及固碳能力变化状况,以期明确全球和区域森林生态系统固碳特征分布状况及其在缓解大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加中的作用。

表 1 不同区域或国家陆地生态系统的固碳能力

Table 1 Regional or national carbon sequestration capacity of terrestrial ecosystems

区域/国家 Region or national	面积 Area (×10 <sup>6</sup> hm <sup>2</sup> )	固碳能力 Carbon sequestration capacity (Pg C · a <sup>-1</sup> )	时期 Period	文献 Reference
欧洲 Europe	500	0.90±0.20	2001—2005	[22]
北美洲 North America	—	0.60±0.02	2000—2005	[23]
南美洲 South America	1780	-0.30±0.30	2000—2005	[24]
东亚 East Asia	1200	0.25±0.10	1990—2009	[25]
南亚 South Asia	450	0.15±0.24	2000—2009	[26]
美国 America	—	0.15~0.33	1990—2005	[27]
俄罗斯 Russia	1710	0.60	1990—2007	[28]
澳大利亚 Australia	731	0.04±0.03	1990—2009	[29]

## 1 全球森林生态系统区域划分方法与研究方法

根据全球陆地地理区域(七大洲)分布,着重搜集除南极洲以外的六大洲及其主要国家的森林生态系统面积、碳储量、碳密度、固碳能力和固碳速率数据。根据气候地带性原则,将全球森林生态系统按寒带、温带和热带划分为3种森林生态系统类型。另外,按照各气候带上分布的主要国家或区域,以及可以搜集到的国家或区域森林生态系统固碳方面的数据,将各气候带森林生态系统进行进一步划分,其中分布在寒带的国家主要有俄罗斯、加拿大、芬兰、挪威和瑞典;分布在温带的国家主要有美国、英国、比利时、丹麦、爱尔兰、荷兰、奥地利、法国、德国、瑞士、希腊、葡萄牙、西班牙、意大利、乌克兰、中国、日本、韩国、澳大利亚、新西兰和其他温带国家;分布在热带的地区主要有亚洲热带地区、非洲热带地区和美洲热带地区。

森林生态系统碳储量及固碳能力的估算方法很多,有利用森林清查资料、遥感数据、气候驱动或遥感驱动模型进行估算的<sup>[76]</sup>。不同的估算方法会对估算结果产生一定的差异,使用不同的空间尺度也会对估算结果产生影响<sup>[76]</sup>。因此,这些估算方法和时空尺度在评述森林碳储量及固碳能力时必须明确。本文整理了森林碳储量和固碳能力的估算方法(表2)。

## 2 全球森林生态系统固碳状况及区域特征分布

### 2.1 全球森林生态系统碳储量和碳密度及区域分布

全球森林面积约  $4.0 \times 10^9 \sim 4.2 \times 10^9 \text{ hm}^2$ <sup>[35, 51]</sup>, 占陆地面积的 31%<sup>[51]</sup>。全球森林碳储量为 652~927 Pg C<sup>[39, 51]</sup>, 占全球有机碳储量的 33%~46%<sup>[10, 35-36]</sup>, 其中 42%~50% 储存在植被中<sup>[39, 51-52]</sup>, 11%~13% 储存在枯死木和枯枝落叶中, 44%~45% 储存在土壤中<sup>[39, 51]</sup>。从不同气候地带性碳储量分布上看, 热带森林碳储量(471±93 Pg C)<sup>[10, 39, 53]</sup> > 寒带森林碳储量(272±23 Pg C)<sup>[39]</sup> > 温带森林碳储量(113~159 Pg C)<sup>[10, 39, 53]</sup>。热带森林碳储量最大, 其中 56% 储存在植被中, 32% 储存在土壤中<sup>[39]</sup>; 温带森林碳储量最小, 约 33% 储存在植被中, 67% 储存在土壤中<sup>[54]</sup>。虽然温带森林碳储量小, 但温带造林面积大, 林龄偏小, 未来固碳潜力巨大<sup>[53]</sup>。寒带森林碳储量约 20% 储存在植被中, 60% 储存在土壤中<sup>[39]</sup>。可以看出, 随着纬度的升高, 森林植被碳储量呈递减趋势, 而森林

土壤碳储量呈增加趋势。不同气候地带性碳密度方面: 寒带森林碳密度(449 t C · hm<sup>-2</sup>) > 热带森林碳密度(269 t C · hm<sup>-2</sup>) > 温带森林碳密度(168 t C · hm<sup>-2</sup>)<sup>[10, 53-54]</sup>。寒带森林碳密度是所有森林中最高的, 其中土壤碳密度高达 378 t C · hm<sup>-2</sup>, 这是由于夏天时间短以及针叶林高酸度土壤造成土壤有机质分解非常缓慢<sup>[54]</sup>; 热带森林植被碳密度是所有森林中最高的, 而土壤碳密度处于中值, 这可能与温暖潮湿条件下土壤有机碳分解较快有关<sup>[54]</sup>; 温带森林碳密度最小, 但温带造林面积大, 林龄偏小, 随着林龄增加, 未来碳密度有很大的提升空间<sup>[53]</sup>。不同温度带主要国家森林生态系统碳储量和碳密度见表2。

从地理区域森林生态系统碳储量来看, 南美洲(187.7~290 Pg C)和欧洲(162.6 Pg C)森林生态系统碳储量最大, 其次是北美洲(106.7 Pg C)、非洲(98.2 Pg C)和亚洲(74.5 Pg C), 而大洋洲最小(21.7 Pg C)<sup>[24, 39, 41, 43, 51]</sup>(图1A)。全球各区域森林生态系统碳密度变化趋势与各区域森林生态系统碳储量变化趋势一致(图1B)。

南美洲森林约占整个大洲的一半。FAO<sup>[51]</sup>基于IPCC指南方法<sup>[55]</sup>估计的南美洲森林总碳储量为 187.7 Pg C, 其中植被碳储量为 112.2 Pg C, 土壤碳储量为 75.5 Pg C。Gibbs 等<sup>[56]</sup>和 Malhi 等<sup>[57]</sup>利用森林清查数据估算的仅亚马逊热带森林总碳储量为 259~290 Pg C, 其中植被碳储量达 95~126 Pg C, 土壤碳储量为 164 Pg C<sup>[56]</sup>。FAO 估算的土壤碳储量较小, 可能与 IPCC 缺省方法仅估算 30 cm 深土壤碳储量有关。总体来看, 南美洲森林生态系统碳储量为 187.7~290 Pg C<sup>[24, 51]</sup>。南美成熟林近年来碳吸收量几乎可以抵消当地化石燃料燃烧和森林砍伐造成的

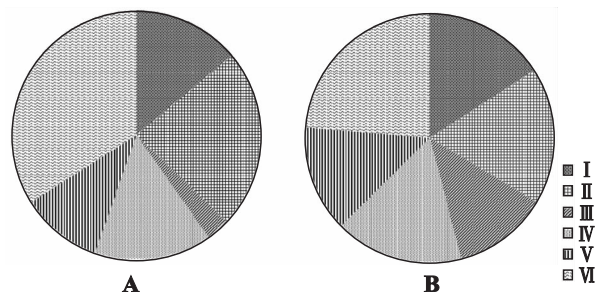


图1 全球各区域森林生态系统碳储量(Pg C, A)和碳密度(t C · hm<sup>-2</sup>, B)

Fig.1 Carbon stocks (Pg C, A), carbon density (t C · hm<sup>-2</sup>, B) of regional forest ecosystems in globe.

I: 非洲 Africa; II: 欧洲 Europe; III: 大洋洲 Oceania; IV: 北美洲 North America; V: 亚洲 Asia; VI: 南美洲 South America.

表 2 全球不同区域或国家森林生态系统碳储量、碳密度、固碳能力和固碳速率

Table 2 Carbon stock, carbon destiny, carbon sequestration capacity and carbon sequestration rate of regional or national forest ecosystems

区域/国家 Region or national	时期 Period	森林面积 Forest area ( $\times 10^6 \text{ hm}^2$ )	碳储量 Carbon stock (Pg C)	碳密度 Carbon density ( $\text{t C} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	固碳能力 Carbon sequestration capacity ( $\text{Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ )	固碳速率 Carbon sequestration rate ( $\text{t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	估算方法 Estimation method	空间尺度 Spatial scale	文献 Reference	
寒带 Boreal	俄罗斯 Russia	1990—2010	809.09	209.00~323.00	248	463.0	0.80	森林清查数据、长期观测数据、统计过程模型、IPCC 指南方法、森林碳收支方法	I	[39, 51, 53]
	加拿大 Canada	1990—2010	310.13	50.40	220	10.0~31.0	0.04	森林清查数据、长期观测数据、统计过程模型、IPCC 指南方法	I	[39, 51]
	芬兰 Finland	1990	23.37	1.73	48 <sup>a</sup> ( 26) <sup>b</sup>	7.1	0.08 <sup>a</sup> ( 0.22) <sup>b</sup>	森林清查数据、土壤碳动态模型	I	[60]
	挪威 Norway	1990	9.57	0.48	29 <sup>a</sup> ( 21) <sup>b</sup>	2.9	0.08 <sup>a</sup> ( 0.22) <sup>b</sup>	森林清查数据、土壤碳动态模型	I	[60]
	瑞典 Sweden	1990	28.02	2.25	47 <sup>a</sup> ( 33) <sup>b</sup>	14.6	0.09 <sup>a</sup> ( 0.43) <sup>b</sup>	森林清查数据、土壤碳动态模型	I	[60]
温带 Temperate	美国 America	1990—2013	304.02	42.90~43.10	150~167	162.0~244.0	0.94	森林清查数据、长期观测数据、统计过程模型、IPCC 指南方法、森林碳收支方法、For-carb2 模型、土地利用变化模型	I	[27, 39, 51, 53, 58]
	英国 England	2010—2020	2.85	0.81	28 <sup>a</sup> ( 36) <sup>b</sup>	2.4~3.4	0.32 <sup>a</sup> ( 0.71) <sup>b</sup>	森林清查数据、土壤碳动态模型	I	[60, 73]
	比利时 Belgium	1990	0.62	0.06	42 <sup>a</sup> ( 54) <sup>b</sup>	0.6	0.24 <sup>a</sup> ( 0.74) <sup>b</sup>	森林清查数据、土壤碳动态模型	I	[60]
	丹麦 Denmark	1990	0.45	0.05	62 <sup>a</sup> ( 52) <sup>b</sup>	0.7	0.34 <sup>a</sup> ( 1.08) <sup>b</sup>	森林清查数据、土壤碳动态模型	I	[60]
	爱尔兰 Ireland	1990	0.43	0.01	13 <sup>a</sup> ( 21) <sup>b</sup>	0.6	0.30 <sup>a</sup> ( 1.13) <sup>b</sup>	森林清查数据、土壤碳动态模型	I	[60]
	荷兰 Netherlands	1990	0.33	0.04	38 <sup>a</sup> ( 71) <sup>b</sup>	0.9	1.07 <sup>a</sup> ( 1.52) <sup>b</sup>	森林清查数据、土壤碳动态模型	I	[60]
	奥地利 Austria	1990	3.88	0.63	71 <sup>a</sup> ( 90) <sup>b</sup>	4.8	0.61 <sup>a</sup> ( 0.61) <sup>b</sup>	森林清查数据、土壤碳动态模型	I	[60]
	法国 France	1990	13.50	1.17	35 <sup>a</sup> ( 52) <sup>b</sup>	11.9	0.33 <sup>a</sup> ( 0.55) <sup>b</sup>	森林清查数据、土壤碳动态模型	I	[60]
	德国 Germany	1990	10.73	1.72	68 <sup>a</sup> ( 93) <sup>b</sup>	18.4	0.84 <sup>a</sup> ( 0.88) <sup>b</sup>	森林清查数据、土壤碳动态模型	I	[60]
	瑞士 Switzerland	1990	1.19	0.26	100 <sup>a</sup> ( 118) <sup>b</sup>	0.8	0.43 <sup>a</sup> ( 0.27) <sup>b</sup>	森林清查数据、土壤碳动态模型	I	[60]
	希腊 Greece	1990	6.12	0.12	8 <sup>a</sup> ( 11) <sup>b</sup>	0.1	0.01 <sup>a</sup> ( 0.01) <sup>b</sup>	森林清查数据、土壤碳动态模型	I	[60]
	葡萄牙 Portugal	1990	3.10	0.15	23 <sup>a</sup> ( 25) <sup>b</sup>	0.4	0.05 <sup>a</sup> ( 0.08) <sup>b</sup>	森林清查数据、土壤碳动态模型	I	[60]
	西班牙 Spain	1990	25.60	0.41	7 <sup>a</sup> ( 8) <sup>b</sup>	5.5	0.00 <sup>a</sup> ( 0.22) <sup>b</sup>	森林清查数据、土壤碳动态模型	I	[60]
	意大利 Italy	1990—2007	8.55	0.56	123~247	16.2	0.31 <sup>a</sup> ( 0.70) <sup>b</sup>	森林清查数据、土壤碳动态模型、遥感数据、样地数据、异速生长方程	II	[60, 74~75]
	乌克兰 Ukraine	—2010	9.70	1.70	—	17.0	—	IPCC 指南方法	I	[51, 73]
	中国 China	2000—2010	149.19~207.00	24.20	155	182.0	1.22	森林清查数据、长期观测数据、统计过程模型、IPCC 指南方法	I	[39, 51]
	日本 Japan	2000—2007	23.64	6.19	66	22.0~37.0	1.59	森林清查数据、生物量扩展因子方法、长期观测数据、统计过程模型	I	[39, 42]
	韩国 Korea	2000—2007	6.21~6.50	—	—	18.0	2.86	森林清查数据、生物量扩展因子方法、长期观测数据、统计过程模型	I	[39, 42, 71]
	澳大利亚 Australia	1990—2010	149.30	16.10~51.00	108	51.0	0.34	森林清查数据、长期观测数据、统计过程模型、IPCC 指南方法、森林碳收支方法	I	[39, 51, 53]
	新西兰 New Zealand	2000—2010	8.27	0.90~2.20	179~259	9.0	1.05	森林清查数据、长期观测数据、统计过程模型、IPCC 指南方法	I	[39, 51, 77]
	其他温带国家 Other temperate counteies	2000—2007	—	—	—	3.0	0.18	森林清查数据、长期观测数据、统计过程模型	I	[39]
热带 Tropical	亚洲热带地区 Tropical Asia	1990—2007	310.00	84.00~97.00	—	711.0	2.38	森林清查数据、长期观测数据、统计过程模型、森林碳收支方法	III	[39, 53]
	非洲热带地区 Tropical Africa	1990—2007	527.00	115.00	—	753.0	1.08	森林清查数据、长期观测数据、统计过程模型、森林碳收支方法	III	[39, 53]
	美洲热带地区 Tropical America	1990—2007	918.00	229.00	—	1276.0	1.30	森林清查数据、长期观测数据、统计过程模型、森林碳收支方法	III	[39, 53]

a、b 分别表示土壤和植被的指标 a、b meant soil and plant indices, respectively. I: 国家尺度 National scale; II: 国家/区域尺度 National/regional scale; III: 区域尺度 Regional scale.

碳损失量<sup>[24]</sup>, 其中亚马逊流域森林为长期巨大的碳汇, 不过最近的研究表明, 这种碳汇作用可能正在减弱<sup>[24]</sup>.

北美洲森林面积约  $698.46 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 根据 IPCC 指南方法<sup>[55]</sup> 估算的碳储量为  $106.7 \text{ Pg C}^{[51]}$ . 美国森林是北美主要的碳汇<sup>[27]</sup>. Pan 等<sup>[39]</sup> 结合森林清查数据和长期观测数据, 利用统计过程模型估算的美国森林碳储量为  $42.9 \text{ Pg C}$ ; 美国 EPA<sup>[58]</sup> 利用森林清单数据和 IPCC 指南方法估算的碳储量为  $43.1 \text{ Pg C}$ . 整体上看, 美国森林碳储量约占北美森林碳储量的 40.3%. 碳密度方面, 西北太平洋地区森林植被碳密度比西南部地区、阿拉巴马州和佛罗里达州的森林植被碳密度高两倍, 洛基山北部、加利福尼亚、大湖区和东北部地区的森林植被碳密度也高于中南部和东南地区的森林植被碳密度<sup>[27]</sup>.

欧洲森林面积约占陆地总面积的  $1/3^{[59]}$ , 由森林清查资料和 IPCC 指南方法估算的碳储量为  $162.6 \text{ Pg C}^{[51]}$ , 其中西欧国家(丹麦、芬兰、瑞典、挪威、比利时、爱尔兰、荷兰、英国、奥地利、法国、德国、瑞士、希腊、意大利、葡萄牙、西班牙)森林面积有  $137.87 \text{ Mhm}^2$ . Liski 等<sup>[60]</sup> 用森林清查资料、森林资源预测和土壤碳动态模型估计西欧森林碳储量将由 1990 年的  $9.7 \text{ Pg C}$  (土壤为  $4.9 \text{ Pg C}$ , 植被为  $4.8 \text{ Pg C}$ ) 增长到 2040 年的  $15 \text{ Pg C}$  (土壤为  $7 \text{ Pg C}$ , 植被为  $8 \text{ Pg C}$ ). 欧洲森林碳储量增加主要原因是森林生物量增加、收获物和扰动减少, 同时输入到土壤的枯枝落叶增加.

东亚森林面积约为  $196.65 \times 10^6 \text{ hm}^2^{[42]}$ . Ito<sup>[61]</sup> 用过程模型模拟的东亚森林总碳储量约为  $73.1 \text{ Pg C}$ , 其中森林植被碳储量约为  $8.9 \text{ Pg C}^{[42]}$ . 东亚各国中, 日本森林面积约占国土面积的  $2/3^{[62]}$ . 森林总碳储量约为  $6.19 \text{ Pg C}$ , 其中森林植被碳储量为  $1.62 \text{ Pg C}^{[42]}$  (根据国家森林清查数据和生物量连续因子转化函数法得出),  $1 \text{ m}$  深土壤碳储量为  $4.57 \text{ Pg C}^{[63]}$  (根据实际调查方法得出). 中国森林总碳储量约为  $24.2 \text{ Pg C}^{[39]}$ , 其中森林植被碳储量由 1970s 的  $4.38 \text{ Pg C}$  增加到 1998 年  $4.75 \text{ Pg C}^{[64]}$  (根据国家森林清查数据和生物量连续因子转化函数法得出) 和 20 世纪初的  $6.15 \text{ Pg C}^{[42]}$ , 预计 2050 年将增加到  $13.09 \text{ Pg C}^{[65]}$ . 亚洲森林碳储量增加主要是实施大面积造林和再造林工程的结果.

## 2.2 全球森林生态系统固碳能力及区域特征

全球森林生态系统固碳能力为  $4.02 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1[39]}$ ; 固碳速率为  $0.6 \sim 4 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1[5]}$ .

从气候地带性分布看, 热带森林固碳能力 ( $1.02 \sim 1.3 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > 温带森林固碳能力 ( $0.8 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > 寒带森林固碳能力 ( $0.5 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$ )<sup>[39, 66]</sup>. 不同温度带主要国家森林生态系统固碳能力见表 2. 在进行地理区域分布特征的分析时, 由于有些区域没能搜集到完整的固碳能力数据, 因此用该区域的部分地区来替代. 总体来说, 南美洲热带 ( $1276 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > 非洲热带 ( $753 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > 北美 ( $248 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > 欧洲 ( $239 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > 东亚地区 ( $98.8 \sim 136.5 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ )<sup>[39, 42-43, 51, 53, 61]</sup>. 固碳能力和固碳速率的变化规律和特征会受到区域环境条件以及人为干扰等因素的影响, 因此, 全球森林生态系统固碳能力呈现一定的区域特征.

在北美地区, Hayes 等<sup>[43]</sup> 结合森林清查资料、陆地生物量模型和大气反演模型估计北美森林固碳能力为  $248 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ , 其中美国、加拿大、墨西哥森林固碳能力分别为  $244$ 、 $31$  和  $27 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ . 因此, 美国为北美地区固碳能力最大的国家, 很多学者就美国森林固碳能力开展了一系列研究. Pan 等<sup>[39]</sup> 结合森林清查数据和长期观测数据, 利用统计过程模型估算的美国森林固碳能力为  $239 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ ; Woodbury 等<sup>[27]</sup> 利用森林清查数据、土地利用变化数据、土壤数据, 结合 Forcarb2 模型和土地利用变化模型估算的固碳能力为  $162 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ ; 美国 EPA<sup>[58]</sup> 利用森林清单数据和 IPCC 指南方法估算的固碳能力为  $218.2 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ . 估算结果差异可能来源于使用的森林清单数据. Pan 等<sup>[39]</sup> 由于数据缺乏未估计阿拉斯加地区森林固碳能力, 而美国 EPA<sup>[58]</sup> 估算中包括了阿拉斯加和夏威夷地区. 总体来说, 美国森林固碳能力为  $162 \sim 244 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1[27, 39, 58]}$ , 固碳能力可以抵消北美  $\text{CO}_2$  排放的 25%<sup>[39]</sup>.

在欧洲地区, 由森林清查资料和 IPCC 指南方法估算的固碳能力为  $239 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1[39]}$ , 固碳速率为  $1.06 \sim 1.75 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1[41]}$ ; Liski 等<sup>[60]</sup> 用森林清查资料、森林资源预测和土壤碳动态模型估计的西欧森林固碳能力 1990 年  $59 \sim 84 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1[60, 67-68]}$ , 到 2040 年将增加到  $113 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$  (土壤为  $43 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ , 植被为  $70 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ )<sup>[60]</sup>. 总体来说, 欧洲森林生态系统可以吸收 7%~12% 的人为  $\text{CO}_2$  排放<sup>[69]</sup>.

在东亚地区, Ito<sup>[61]</sup> 用过程模型模拟的东亚森林固碳能力为  $98.8 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ . Fang 等<sup>[42]</sup> 用森林清查数据和生物量扩展因子方法估算的为  $136.5 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ . Ito<sup>[61]</sup> 由于只包括森林植被和土壤碳库造成估算结果偏小; Fang 等<sup>[42]</sup> 估算结果除包括森林植

被和土壤碳库外,还包括枯木和凋落物碳库.另外, Fang 等<sup>[42]</sup>在估计植被固碳能力基础上,采用美国森林不同碳库比例来估计其他碳库固碳能力也可能造成估算结果的偏差.东亚各国中,朝鲜森林 40 年来森林植被固碳能力呈降低趋势,幅度约为  $-3.6 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[42]</sup>;韩国由于实施森林保护和“五年绿色增长计划”,2010 年森林固碳能力可以抵消该国温室气体排放的 6%<sup>[70-71]</sup>;中国森林植被固碳能力由 1970—1998 年的  $21 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[64]</sup>增加到 21 世纪初的  $75 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[42]</sup>,预计 2050 年将增加到  $145 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[65]</sup>.总体来说,东亚森林生态系统固碳能力为  $98.8 \sim 136.5 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ ,可以抵消该区域化石燃料燃烧  $\text{CO}_2$  排放的 11.8%<sup>[42]</sup>.

全球森林生态系统固碳能力约为全球人为  $\text{CO}_2$  排放的 37.8%.由此可见,森林生态系统对缓解大气  $\text{CO}_2$  浓度增加具有重要作用.然而,由于土地利用变化、森林砍伐、退化和管理不善等原因,导致森林固碳能力不断减少,2005—2010 年全球森林植被碳释放约为  $0.5 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[51]</sup>.除去土地利用变化、森林砍伐和退化造成的碳排放,全球森林净固碳能力为  $(1.2 \pm 0.8) \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[20,39]</sup>.另外,遏制森林砍伐、促进新增森林增长能够提高全球森林植被固碳能力约  $1.3 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[7]</sup>.在目前大气  $\text{CO}_2$  浓度条件下,森林生态系统净初级生产力并没有达到饱和,随着大气  $\text{CO}_2$  浓度升高和  $\text{CO}_2$  施肥作用,以及造林再造林、森林管理等经营措施的实施,森林生态系统净初级生产力将进一步增加<sup>[6]</sup>,固碳能力也将进一步提高.

### 3 土地利用变化对森林生态系统固碳能力的影响

土地利用变化是影响森林生态系统固碳能力的主要因素之一.在考虑土地利用变化的情况下,全球森林生态系统净固碳能力为  $1.2 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[39]</sup>.从气候地带性分布上看,热带森林碳吸收能力为  $1.02 \sim 1.3 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[39,66]</sup>,若考虑土地利用变化导致的碳排放( $1.1 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[39]</sup>),热带森林净固碳能力为  $-0.08 \sim 0.2 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$ ,基本呈现碳中和状态.温带和寒带森林为净碳汇<sup>[39]</sup>.从地理区域分布看,FAO<sup>[51]</sup>根据 IPCC 指南方法,在考虑土地利用变化的情况下,欧洲森林生态系统固碳能力最大( $260 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ ),其次是北美洲( $140 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ )和亚洲( $70 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ ),而大洋洲( $-60 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ )、非洲( $-470 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ )和南美洲( $-780 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ )森林生态系统分别呈碳损失状态<sup>[51]</sup>,因此全球森林生态系统碳损失为  $840 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[51]</sup>.然而,在考虑土地

利用变化情况下, Pan<sup>[39]</sup>结合森林清查数据和长期观测数据,利用统计过程模型估算的全球森林生态系统净固碳能力为  $1200 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ .IPCC 第五次报告<sup>[72]</sup>指出,大气反演表明森林作为碳汇可以抵消土地利用变化引起的碳排放,全球森林呈净碳汇状态.因此,FAO 的结果可能过高地估计了土地利用变化导致的碳排放.从各地理区域森林面积变化对碳汇的影响也可以看出,近十几年来南美洲和非洲森林面积的减少呈现降低趋势<sup>[51]</sup>,而两地区的原有林和再生林的固碳能力可以抵消森林面积减少引起的碳排放<sup>[39]</sup>;亚洲和欧洲森林面积呈现增加趋势(亚洲森林面积的增加主要是由中国大面积造林引起的),北美洲基本保持不变<sup>[51]</sup>.3 个地区森林生态系统呈碳汇状态.因此在考虑土地利用变化情况下,全球森林生态系统仍为净碳汇.

### 4 问题

不同学者对同一地区森林碳储量和固碳能力的估算呈现较大差异<sup>[39,41,51,60,74-75]</sup>,数值的差异反映了森林固碳估算的不确定性.尽管近年来森林固碳估算有了很大的改善,但仍存在极大的不确定性.估算不确定性可能来源于估算样本较少,80%以上的森林固碳估算仅包括森林面积的  $1/3$ <sup>[19]</sup>.此外,估算的不确定性还受到以下因素的影响:

1) 基础数据来源.森林生态系统基础数据一般来自于原位调查、国家森林清单、政府统计报告、模型输出和区域卫星数据,这些来自不同测量方法的国家或者区域数据会呈现一定的差异<sup>[78]</sup>.另外,不同时间和观测地点初始状况的差异也导致估算不确定性的增加.

2) 森林的界定.森林界定的差异也会导致估算的不确定性.有些估算仅包括林地,而有些估算还包括其他有树木生长的土地<sup>[60]</sup>;有些国家(如中国、日本)认定树冠郁闭度  $\geq 20\%$  的为森林,有些国家(如韩国)则认定树冠郁闭度  $\geq 30\%$  的为森林,还有些(FAO)认定树冠郁闭度  $> 10\%$  的为森林<sup>[42]</sup>.森林界定的不一致性导致森林面积估算差异,进而导致森林固碳估算的不确定性.例如,拉丁美洲森林郁闭度从  $10\%$  上升到  $30\%$ ,相应的森林植被碳储量也由  $120 \text{ Pg C}$  降低到  $107 \text{ Pg C}$ <sup>[44]</sup>.森林面积和蓄积量调查时精度的差异也可能导致固碳估算的不确定性,例如中国森林面积和蓄积量调查时要求精度  $> 90\%$ ,而日本则要求误差  $< 3\%$ <sup>[79]</sup>,韩国要求误差  $< 5\%$ <sup>[80-81]</sup>.



3) 森林土壤剖面深度的差异. 森林土壤碳库估算时采取的剖面深度不一样, 导致估算数据的差异. 如 Woodbury 等<sup>[27]</sup>采用土地利用变化模型估算美国森林土壤碳库和 Goodale 等<sup>[19]</sup>利用文献数据基于清单调查的簿记方法和生态模型估算北半球森林土壤碳库时采用 1 m 深土壤剖面, 而有些研究采用 3 m 深土壤剖面. 3 m 深土壤剖面碳储量是 1 m 深土壤剖面碳储量的 1.5 倍<sup>[82]</sup>.

4) 模型的限制. 用于不同时空尺度上固碳模型的原始数据差异、模型参数选择, 以及模型自身误差都可能造成固碳估算的不确定性. 另外, 模型估算受很多因素综合作用, 如光合作用、环境因子和是否考虑营养元素对土壤碳分解的限制等<sup>[23]</sup>. 土壤动态模型依赖初始碳储量的输入, 并把总碳储量分为几个土壤碳模型. 如果初始碳储量输入有误差, 可造成固碳估算的不确定性<sup>[60]</sup>. 森林生态系统固碳速率受植被动态模型影响敏感, 尤其是与森林生产力响应的森林自疏变化和与年龄相关的森林增长率, 以及统计的总植被生物量清单数据<sup>[67]</sup>.

5) 估算方法的差异. 基于不同清单方法估算的森林植被碳储量有很大差别. 例如, 1984—2003 年中国森林植被碳储量利用平均生物量密度方法估算为 5.7~7.7 Pg C, 利用平均速率方法估算为 4.2~6.2 Pg C, 而利用生物量转化因子方法估算为 4.0~5.9 Pg C<sup>[83]</sup>. 森林年龄分级是造成这些差别的主要原因<sup>[83]</sup>. 另外, 蓄积量转化公式的差异也造成森林植被碳估算差异<sup>[84]</sup>. 不同树种森林、不同林龄森林的生物量转化系数不同<sup>[85]</sup>, 有些估算把这些参数均一化也导致了估算的不确定性<sup>[60]</sup>.

## 5 展 望

由于森林生态系统本身具有复杂多变的时空异质性和广泛的内部联系特性, 森林生态系统固碳研究必须涉及到这些时空异质性和内部联系, 从而使得碳储量和固碳能力的估算存在很大的困难和不确定性. 尽管本文根据文献综述分析了当前全球森林生态系统固碳能力和区域特征分布, 但由于引文估算的森林时期不可能完全一致以及引文本身估算的不确定性, 综述分析的固碳范围也存在不确定性. 另外, 本文只考虑了当前全球和区域森林生态系统固碳能力特征分布格局, 由于数据缺乏, 并未考虑各区域森林林龄状况对固碳能力及区域格局特征分布的影响. 因此, 亟需完善长期连续观测系统及区域监测网络的建设, 综合运用遥感解译分析数据、国家统计

数据、样地清查和模型模拟等方法, 统一森林界定标准, 优化模型参数等, 以有效地降低森林固碳估算的不确定性, 为大尺度估算提供合理的参数和数据分析基础.

## 参考文献

- [1] Le Quéré C, Moriarty R, Andrew RM, et al. Global carbon budget 2014. *Earth System Science Data Discussions*, 2014, **7**: 521–610
- [2] International Geosphere-Biosphere Programme. 2011 Climate Change Index. [EB/OL]. (2013-01-30) [2014-11-16]. <http://www.igbpnet/456b5e28e137d8d8c09380002241.html>
- [3] Farrelly DJ, Everard CD, Fagan CC, et al. Carbon sequestration and the role of biological carbon mitigation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, **21**: 712–727
- [4] Myers SS, Zanobetti A, Kloog I, et al. Increasing CO<sub>2</sub> threatens human nutrition. *Nature*, 2014, **510**: 139–142
- [5] IPCC. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- [6] Lal R. Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, **363**: 815–830
- [7] Cusack DF, Axsen J, Shwom R, et al. An interdisciplinary assessment of climate engineering strategies. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2014, **12**: 280–287
- [8] Lal R. Agricultural activities and the global carbon cycle. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, **70**: 103–116
- [9] Thomson AM, César Izaurralde R, Smith SJ, et al. Integrated estimates of global terrestrial carbon sequestration. *Global Environmental Change*, 2008, **18**: 192–203
- [10] IPCC. IPCC Special Report: Land Use, Land-Use Change, and Forestry. Cambridge: Cambridge University Press, 2000
- [11] IPCC. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- [12] Fang JY, Liu GH, Xu SL. Soil carbon pool in China and its global significance. *Journal of Environmental Sciences*, 1996, **8**: 249–254
- [13] Canadell JG, Le Quere C, Raupach MR, et al. Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, **104**: 18866–18870
- [14] Le Quéré C, Raupach MR, Canadell JG, et al. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature Geoscience*, 2009, **2**: 831–836

- [15] Khatiwala S , Primeau F , Hall T. Reconstruction of the history of anthropogenic CO<sub>2</sub> concentrations in the ocean. *Nature* , 2009 , **462**: 346–349
- [16] Le Quéré C , Peters GP , Andres RJ , et al. Global carbon budget 2013. *Earth System Science Data* , 2014 , **6**: 235–263
- [17] Mack MC , Schuur EA , Bret-Harte MS , et al. Ecosystem carbon storage in arctic tundra reduced by long-term nutrient fertilization. *Nature* , 2004 , **431**: 440–443
- [18] Todd-Brown KEO , Randerson JT , Post WM , et al. Causes of variation in soil carbon simulations from CMIP5 earth system models and comparison with observations. *Biogeosciences* , 2013 , **10**: 1717–1736
- [19] Goodale CL , Apps MJ , Birdsey RA , et al. Forest carbon sinks in the northern hemisphere. *Ecological Applications* , 2002 , **12**: 891–899
- [20] Sarmiento JL , Gloor M , Gruber N , et al. Trends and regional distributions of land and ocean carbon sinks. *Biogeosciences* , 2010 , **7**: 2351–2367
- [21] Stephens BB , Gurney KR , Tans PP , et al. Weak northern and strong tropical land carbon uptake from vertical profiles of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Science* , 2007 , **316**: 1732–1735
- [22] Luyssaert S , Abril G , Andres R , et al. The European land and inland water CO<sub>2</sub> , CO , CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O balance between 2001 and 2005. *Biogeosciences* , 2012 , **9**: 3357–3380
- [23] King AW , Hayes DJ , Huntzinger DN , et al. North American carbon dioxide sources and sinks: Magnitude , attribution , and uncertainty. *Frontiers in Ecology and the Environment* , 2012 , **10**: 512–519
- [24] Gloor M , Gatti L , Brienen R , et al. The carbon balance of South America: A review of the status , decadal trends and main determinants. *Biogeosciences* , 2012 , **9**: 5407–5430
- [25] Piao SL , Ito A , Li SG , et al. The carbon budget of terrestrial ecosystems in East Asia over the last two decades. *Biogeosciences* , 2012 , **9**: 3571–3586
- [26] Patra PK , Canadell JG , Houghton RA , et al. The carbon budget of South Asia. *Biogeosciences* , 2013 , **10**: 513–527
- [27] Woodbury PB , Smith JE , Heath LS. Carbon sequestration in the U.S. forest sector from 1990 to 2010. *Forest Ecology and Management* , 2007 , **241**: 14–27
- [28] Dolman AJ , Shvidenko A , Schepaschenko D , et al. An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based , eddy covariance and inversion methods. *Biogeosciences* , 2012 , **9**: 5323–5340
- [29] Haverd V , Raupach MR , Briggs PR , et al. The Australian terrestrial carbon budget. *Biogeosciences* , 2013 , **10**: 851–869
- [30] Schlamadinger B , Bird N , Johns T , et al. A synopsis of land use , land-use change and forestry ( LULUCF ) under the Kyoto Protocol and Marrakech Accords. *Environmental Science & Policy* , 2007 , **10**: 271–282
- [31] Güner ST , Çömez A , Özkan K. Predicting soil and forest floor carbon stocks in Western Anatolian Scots pine stands , Turkey. *African Journal of Agricultural Research* , 2012 , **7**: 4075–4083
- [32] Makumba W , Akinnifesi FK , Janssen B , et al. Long-term impact of a gliricidia-maize intercropping system on carbon sequestration in southern Malawi. *Agriculture , Ecosystems and Environment* , 2007 , **118**: 237–243
- [33] Syampungani S , Chirwa PW , Akinnifesi FK , et al. The potential of using agroforestry as a win-win solution to climate change mitigation and adaptation and meeting food security challenges in southern Africa. *Agricultural Journal* , 2010 , **5**: 80–88
- [34] Sileshi G , Akinnifesi FK , Ajayi OC , et al. Contributions of agroforestry to ecosystems services in the miombo eco-region of eastern and southern Africa. *African Journal of Environmental Science and Technology* , 2007 , **1**: 68–80
- [35] Bonan GB. Forests and climate change: Forcings , feedbacks , and the climate benefits of forests. *Science* , 2008 , **320**: 1444–1449
- [36] Kutch WL , Bahn M , Heinemeyer A. Soil Carbon Dynamics: An Integrated Methodology. Cambridge: Cambridge University Press , 2010: 49–75
- [37] Jandl R , Vesterdal L , Olsson M , et al. Carbon sequestration and forest management. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture , Veterinary Science , Nutrition and Natural Resources* , 2007 , **2**: doi: 10.1079/PAVSNNR-20072017
- [38] Fang JY , Brown S , Tang YH , et al. Overestimated biomass carbon pools of the northern mid- and high latitude forests. *Climatic Change* , 2006 , **74**: 355–368
- [39] Pan YD , Birdsey RA , Fang JY , et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* , 2011 , **333**: 988–993
- [40] Dib AE , Johnson CE , Driscoll CT , et al. Simulating effects of changing climate and CO<sub>2</sub> emissions on soil carbon pools at the Hubbard Brook experimental forest. *Global Change Biology* , 2014 , **20**: 1643–1656
- [41] Bellassen V , Viovy N , Luyssaert S , et al. Reconstruction and attribution of the carbon sink of European forests between 1950 and 2000. *Global Change Biology* , 2011 , **17**: 3274–3292
- [42] Fang JY , Guo ZD , Hu HF , et al. Forest biomass carbon sinks in East Asia , with special reference to the relative contributions of forest expansion and forest growth. *Global Change Biology* , 2014 , **20**: 2019–2030
- [43] Hayes DJ , Turner DP , Stinson G , et al. Reconciling estimates of the contemporary North American carbon balance among terrestrial biosphere models , atmospheric inversions , and a new approach for estimating net ecosystem exchange from inventory-based data. *Global Change Biology* , 2012 , **18**: 1282–1299
- [44] Saatchi SS , Harris NL , Brown S , et al. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* , 2011 , **108**: 9899–9904
- [45] Baccini A , Goetz SJ , Walker WS , et al. Estimated car-



- bon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change*, 2012, **2**: 182–185
- [46] Liu C (刘 畅), Li F-R (李凤日), Jia W-W (贾炜玮), *et al.* Multiple-scale analysis on spatial distribution changes of forest carbon storage in Heilongjiang Province, Northeast China based on local statistics. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25** (9): 2493–2500 (in Chinese)
- [47] Nie H (聂 昊), Wang S-Q (王绍强), Zhou L (周蕾), *et al.* Carbon sequestration potential of forest vegetation in Jiangxi and Zhejiang provinces based on national forest inventory. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22** (10): 2581–2588 (in Chinese)
- [48] Zhou X-Y (周晓宇), Zhang C-Y (张称意), Guo G-F (郭广芬). Effect of climate change on forest organic carbon storage: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21** (7): 1867–1874 (in Chinese)
- [49] Zhou GY, Liu SG, Li ZA, *et al.* Old-growth forests can accumulate carbon in soils. *Science*, 2006, **314**: 1417
- [50] Shin YM, Miah DM, Lee KH. Potential contribution of the forestry sector in Bangladesh to carbon sequestration. *Journal of Environmental Management*, 2007, **82**: 260–276
- [51] FAO. Global Forest Resources Assessment 2010. Rome: FAO, 2010
- [52] The Biomass Mission Advisory Group. A New Era for Measuring Global Forest Properties: The ESA Biomass Mission. Sheffield: University of Sheffield, 2013
- [53] Dixon RK, Solomon AM, Brown S, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, **263**: 185–190
- [54] US Congressional Research Service. Carbon Sequestration in Forests. Washington DC: US CRS, 2009
- [55] IPCC. The Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Tokyo: IPCC, 2006
- [56] Gibbs HK, Brown S, Niles JO, *et al.* Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks making REDD a reality. *Environmental Research Letters*, 2007, **2**: doi: 10.1088/1748-9326/2/4/045023
- [57] Malhi Y, Wood D, Baker TR, *et al.* The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. *Global Change Biology*, 2006, **12**: 1107–1138
- [58] US Environmental Protection Agency. Inventory of US Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2012. Washington DC: US EPA, 2014
- [59] Heil GW, Muys B, Hansen K. Environmental Effects of Afforestation in North-Western Europe. Amsterdam: Springer, 2007
- [60] Liski J, Perruchoud D, Karjalainen T. Increasing carbon stocks in the forest soils of western Europe. *Forest Ecology and Management*, 2002, **169**: 159–175
- [61] Ito A. The regional carbon budget of East Asia simulated with a terrestrial ecosystem model and validated using Asia Flux data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, **148**: 738–747
- [62] Arai H, Tokuchi N. Soil organic carbon accumulation following afforestation in a Japanese coniferous plantation based on particle-size fractionation and stable isotope analysis. *Geoderma*, 2010, **159**: 425–430
- [63] Morisada K, Ono K, Kanomata H. Organic carbon stock in forest soils in Japan. *Geoderma*, 2004, **119**: 21–32
- [64] Fang JY, Chen AP, Peng CH, *et al.* Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, **292**: 2320–2322
- [65] Xu B, Guo ZD, Piao SL, *et al.* Biomass carbon stocks in China's forests between 2000 and 2050: A prediction based on forest biomass-age relationships. *Science China Life Sciences*, 2010, **53**: 776–783
- [66] Lewis SL, Lopez-Gonzalez G, Sonke B, *et al.* Increasing carbon storage in intact African tropical forests. *Nature*, 2009, **457**: 1003–1006
- [67] Zaehle S, Bondeau A, Carter TR, *et al.* Projected changes in terrestrial carbon storage in Europe under climate and land-use change, 1990–2100. *Ecosystems*, 2007, **10**: 380–401
- [68] Janssens IA, Freibauer A, Schlamadinger B, *et al.* The carbon budget of terrestrial ecosystems at country-scale: A European case study. *Biogeosciences*, 2005, **2**: 15–26
- [69] Janssens IA, Freibauer A, Ciais P, *et al.* Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions. *Science*, 2003, **300**: 1538–1542
- [70] Cho SH, Kim H, Roberts RK, *et al.* Effects of changes in forestland ownership on deforestation and urbanization and the resulting effects on greenhouse gas emissions. *Journal of Forest Economics*, 2014, **20**: 93–109
- [71] Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea. Korean National Greenhouse Gas Inventory 2010. Seoul: GGIRCK, 2013
- [72] IPCC. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014
- [73] Hester RE, Harrison RM. Carbon Capture: Sequestration and Storage. UK: Royal Society of Chemistry, 2009
- [74] Bayat AT. Carbon Stock in an Apennine Beech Forest. Enschede, The Netherlands: University of Twente, 2011
- [75] Valle ED, Lamedica DS, Pilli R, *et al.* Land use change and forest carbon sink assessment in an Alpine Mountain area of the Veneto region (northeast Italy). *Mountain Research and Development*, 2009, **29**: 161–168
- [76] Hu H-F (胡会峰), Liu G-H (刘国华). Roles of forest management in global carbon dioxide mitigation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17** (4): 709–714 (in Chinese)
- [77] Hall GMJ, Wiser SK, Allen RB, *et al.* Strategies to estimate national forest carbon stocks from inventory data: The 1990 New Zealand baseline. *Global Change Biolo-*

- gy, 2001, **7**: 389–403
- [78] Kindermann GE, McCallum I, Fritz S, *et al.* A global forest growing stock, biomass and carbon map based on FAO statistics. *Silva Fennica*, 2008, **42**: 387–396
- [79] Japan Agency of Forestry. Forest Resources of Japan 1995. Tokyo: Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, 2000
- [80] Li XD, Yi MJ, Son Y, *et al.* Forest biomass carbon accumulation in Korea from 1954 to 2007. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2010, **25**: 554–563
- [81] Sohngen B, Mendelsohn R. An optimal control model of forest carbon sequestration. *American Journal of Agricultural Economics*, 2003, **85**: 448–457
- [82] Scharlemann JPW, Tanner EVJ, Hiederer R, *et al.* Global soil carbon: Understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*, 2014, **5**: 81–91
- [83] Guo ZD, Fang JY, Pan YD, *et al.* Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: A comparison of three methods. *Forest Ecology and Management*, 2010, **259**: 1225–1231
- [84] Houghton RA, Skole DL, Nobre CA, *et al.* Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature*, 2000, **403**: 301–304
- [85] Li S-M (李士美), Yang C-Q (杨传强), Wang H-N (王宏年), *et al.* Carbon storage of forest stands in Shandong Province estimated by forestry inventory data. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2014, **25**(8): 2215–2220 (in Chinese)

---

作者简介 刘魏魏,女,1985年生,博士研究生.主要从事森林生态系统固碳研究. E-mail: weiweiliu@163.com

责任编辑 孙 菊

---