

•研究报告•

基于森林碳库动态评估神农架国家级自然保护区的保护成效

邓舒雨^{1,2} 董向忠³ 马明哲^{1,2} 臧振华^{1,4}
徐文婷¹ 赵常明¹ 谢宗强¹ 申国珍^{1*}

1 (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)

2 (中国科学院大学, 北京 100049)

3 (北京丹青园林绿化有限责任公司, 北京 100093)

4 (北京林业大学森林资源与生态系统过程北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 保护区是维持生物多样性和生态系统功能的最有效方式, 但其保护成效有待提升, 土地利用变化是重要影响因素之一。本研究以神农架国家级自然保护区为对象, 基于神农架地区近20年的调查研究和数据积累, 通过异速生长模型、生物量方程、抽样加权等方法, 对比分析了土地利用方式转变格局下神农架国家级自然保护区森林生态系统地上、地下、凋落物、粗木质残体、土壤有机碳5个碳库动态, 分析论证了20年间(1990–2010)神农架保护区对森林生态系统碳库的保护成效。研究发现, 林地占神农架保护区总面积的92.76%, 其中针叶林(51.85%)、落叶阔叶林(35.11%)及常绿阔叶林(4.47%)3种森林类型合计占林地面积的98.56%。20年间神农架保护区林地面积增加了0.11%, 灌木林地和耕地面积分别减少了8.85%和6.06%。神农架保护区2010年碳储量为24.24 Tg C (22.57–26.62 Tg C), 土壤有机碳和地上碳合计占全部碳储量的90.68%。常绿阔叶林、落叶阔叶林和针叶林3种森林类型碳储量占神农架保护区碳储量的95%。20年间神农架保护区5个碳库碳储量均有所增加, 共固碳25.04 kt C (21.83–29.57 kt C), 固碳率为1.21 kt C/年(1.09–1.48 kt C/年), 其中地上生物量碳库和土壤有机碳库分别增加14.50 kt C (11.81–18.31 kt C)和6.84 kt C。保护区内总碳库碳密度高于保护区外22.37 t C/ha。研究结果表明, 神农架国家级自然保护区在保护森林固碳能力方面取得了一定的成效。

关键词: 神农架国家级自然保护区; 固碳; 保护成效; 森林; 碳库

Evaluating the effectiveness of Shennongjia National Nature Reserve based on the dynamics of forest carbon pools

Shuyu Deng^{1,2}, Xiangzhong Dong³, Mingzhe Ma^{1,2}, Zhenhua Zang^{1,4}, Wenting Xu¹, Changming Zhao¹, Zongqiang Xie¹, Guozhen Shen^{1*}

1 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Beijing Danqing Gardening Co., Ltd, Beijing 100093

4 Key Laboratory for Forest Resources Ecosystem Processes of Beijing, Beijing Forestry University, Beijing 100083

Abstract: Nature reserves are a cornerstone of global conservation strategies. However, the effectiveness of the reserve in conserving ecosystem function such as carbon storage is poorly understood. The Shennongjia National Nature Reserve is a conservation icon and has taken exceptional efforts to protect forests. It provides a unique case to address this question. Here, we quantified the carbon storage from aboveground carbon, belowground carbon, litter, coarse woody debris, and soil organic carbon inside and outside the Shennongjia National Nature Reserve between 1990 and 2010, based on inventory data and digitized historical

收稿日期: 2017-09-05; 接受日期: 2017-12-10

基金项目: 科技基础性工作专项(2015FY1103002)和国家重点研发计划(2016YFC050330304)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: snj@ibcas.ac.cn

land cover maps. The result showed that the woodland covered 92.76% of the reserve, most of which was coniferous forest (51.85%), deciduous broad-leaved forest (35.11%), and evergreen broad-leaved forest (4.47%). Between 1990 and 2010, the area of the woodland has increased 0.11%, while the area of shrubland and cropland has declined 8.85% and 6.06%, respectively. The Shennongjia National Natural Reserve has accumulated 24.24 Tg carbon (22.57–26.62 Tg C) until 2010, of which 90.68% was contributed by soil organic carbon and aboveground carbon. A total of 95% of the carbon storage in Shennongjia National Nature Reserve are contributed by evergreen broad-leaved forest, deciduous broad-leaved forest and coniferous forest. Between 1990 and 2010, the aboveground carbon pool and soil organic carbon pool has increased 14.50 kt C (11.81–18.31 kt C) and 6.84 kt C, respectively. The carbon density inside the reserve is 22.37 t C/ha higher than that outside the reserve. Our results indicated that the Shennongjia National Nature Reserve is efficiently conserving forest carbon.

Key words: Shennongjia National Nature Reserve; carbon sequestration; conservation effectiveness; forest ecosystem; carbon pool

建立自然保护区是维持生物多样性和生态系统功能稳定的最有效方式(Joppa et al, 2008; Pouzols et al, 2014)。截至2014年底,全球已建立197,368处自然保护区,保护区覆盖了全球陆地面积的15.4%(Juffe-Bignoli et al, 2014)。到目前为止,我国已建立2,750处自然保护区,其中国家级自然保护区446处,占国土陆地面积的14.88% (<http://www.zhb.gov.cn/hjzl/zghjzkqb/lnzghjzkqb/>)。

保护区对生物多样性和生态系统服务功能的保护是否达到了预期目的?在多大程度上发挥了保护功能?这些是保护生物学研究中需要探讨的问题(Andam et al, 2008; Wu et al, 2011; Hill et al, 2015; Ren et al, 2015),目前,有关保护区保护成效的研究大多集中于生物多样性保护方面(Bruner et al, 2001; Rodrigues et al, 2004; Cao et al, 2015; Jenkins et al, 2015; Chen et al, 2017)。如英国的一项研究表明,保护区内鸟类与蝴蝶等物种的定居率是保护区外的4.2倍,257种无脊椎动物中,98%的物种倾向于在保护区内定居(Thomas et al, 2012)。美国尽管建立了庞大的自然保护地体系,但大部分保护地位于美国西部,而亟需保护的物种则大多分布于美国东南部,保护地未能很好地保护这些物种(Jenkins et al, 2015)。我国81%的植物群落都受到至少一处自然保护区的保护(Wu et al, 2011),保护区分别保护了13.1%的植物生境、17.9%的哺乳动物栖息地和16.4%的鸟类栖息地。但研究同时发现,我国现有保护区网络对植物、两栖和爬行动物关键栖息地的保护成效不容乐观(Xu et al, 2017)。

保护区在保护生物多样性的同时还维持着生态系统的众多服务功能,固碳是其中的重要功能之

一(Ouyang et al, 2016; Xu et al, 2017)。森林是陆地生态系统的主体,维持着陆地地表大量的碳库(约占全球植被碳库的86%以上),同时也维持着巨大的土壤碳库(约占全球土壤碳库的73%) (Tans et al, 1990; Dixon et al, 1994)。森林碳储量即便小幅度的变动,也可能影响整个大气CO₂的浓度,进而对陆地生态系统的分布、组成、结构和功能产生影响(Schimel et al, 2000)。保护森林的固碳能力已成为自然保护区的一项重要功能之一。

关于保护区保护森林固碳的成效,目前仅开展了少量研究(Gaston et al, 2008; Willcock et al, 2016; Bowker et al, 2017; Scherer et al, 2017)。Scharlemann等(2010)通过对全球热带森林保护区内外对比研究发现,保护区内热带森林生物量和土壤有机碳损失是保护区外的一半。Willcock等(2016)对非洲生物多样性热点区域保护区建立前后森林碳动态研究发现,保护区建立半个世纪后,保护区外森林面积减少了0.7%,而保护区内森林面积增加了2.7%。同时,由于保护区的建立,保护区内森林以4.8 Mg C/ha的速率吸收固定碳,而保护区外未受保护的森林则以11.9 Mg C/ha的速率丧失碳。土地利用变化是影响森林固碳能力的重要因素之一(Joppa & Pfaff, 2009; Houghton et al, 2012),由土地类型转变导致的CO₂排放占人为CO₂排放的35% (Lambin et al, 2001; Foley et al, 2005)。

湖北神农架国家级自然保护区(以下简称神农架保护区)保存有我国北亚热带完好的常绿落叶阔叶混交林(谢宗强等, 2017),孕育了丰富的生物多样性,形成了多样的森林生态系统,为秦巴山地提供了巨大的生态服务功能。20世纪70年代,神农架曾

进行过大规模的森林采伐, 森林生态系统结构和功能遭到严重破坏(湖北省神农架林区地方志编纂委员会, 1996)。1986年神农架国家级自然保护区建立, 1990年成为联合国教科文组织人与生物圈(MAB)保护区, 2013年成为世界地质公园, 2016年被列入世界自然遗产地名录。由此保护区内的森林开始逐步受到严格的保护(王翠玲等, 2017)。本研究基于对神农架地区近20年的调查研究和数据积累, 对比分析了保护区内外森林生态系统的5个碳库动态, 以期评估神农架保护区的建立是否对森林固碳起到保护作用, 为探讨我国保护区的保护成效问题提供借鉴。

1 数据与方法

1.1 研究区域概况

神农架保护区位于湖北省神农架林区西南部, 地理坐标为 $110^{\circ}03'05''$ – $110^{\circ}33'50''$ E, $31^{\circ}21'20''$ – $31^{\circ}36'20''$ N。总面积70,467 ha, 核心区面积38,425 ha。保护区为大巴山脉东段组成的中山地貌, 呈近东西方向延伸, 地势西南高东北低, 最高海拔神农顶3,106.2 m, 为华中第一峰, 最低海拔400 m (神农架南坡)。保护区地跨中亚热带和北亚热带, 年平均气温 7.4°C , 最冷月(1月)平均气温 -4.3°C , 最热月(7月)平均气温 17.2°C 。年降水量800 mm–2,500 mm, 有明显的季节性。

1.2 数据获取

(1)森林群落调查数据。在保护区内沿海拔梯度设置14条调查样线, 每条样线按海拔每升高100 m设置1个森林样地, 或选取特殊的群落类型设置样地。森林样地大小为 $20\text{ m} \times 30\text{ m}$ 或 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$, 共调查127个。记录地名、经纬度、海拔、坡向、坡度、土壤类型等群落环境因子, 乔木层每木调查, 记录种名、树高、胸径和冠幅等(马明哲等, 2017)。

(2)文献数据。以“生物量”、“碳储量”、“异速生长方程”、“生物量方程”等关键词检索国内外文献, 收集神农架地区、湖北省及附近地区对森林群落优势种地上、地下生物量、碳储量计算方程。获取得到保护区42个生物量估算方程(附录1)(罗云建等, 2015; 生态系统固碳项目技术规范编写组, 2015)。土壤有机碳估算采用SoilGrids (www.soilgrids.org)数据, 精度为250 m。该数据通过机器学习方法, 依

据全球150,000个点的调查数据对世界不同类型土壤碳进行模型估计(Hengl et al, 2017)。本研究基于SoilGrids数据, 按政府间气候变化专门委员会(IPCC)标准计算地表30 cm土壤有机碳含量(IPCC, 2006), 单位为 t C/ha 。

(3)土地利用数据。该数据采用面向对象(object-based)分类技术, 基于神农架地区Landsat TM/ETM数据和HJ-1卫星数据, 结合地面调查数据, 分别生成1990年、2000年和2010年30 m分辨率的土地覆盖数据(吴炳方等, 2014; 张磊等, 2014)。

1.3 森林生态系统碳库组成及核算

本研究依据IPCC (2016)的碳库定义, 将神农架保护区森林碳库分为地上碳库、地下碳库、粗木质残体碳库、凋落物碳库、土壤有机碳库5个碳库。

其中, 地上碳库依据地上生物量估算。地上生物量为胸径大于5 cm的木本植物生物量, 包括树干、树桩、枝、树皮、籽实和叶(生态系统固碳项目技术规范编写组, 2015)。其生物量基于样地实际调查的优势树木的胸径、树高, 通过生物量估算方程计算得到。地下碳库依据地下生物量估算。地下生物量为全部树木活根生物量, 直径不足2 mm的细根不计在内(IPCC, 2006)。其生物量采用地上地下关系式进行换算(附录2)(生态系统固碳项目技术规范编写组, 2015)。粗木质残体碳库包括倒伏于地面的树干、死根和直径 $\geq 10\text{ cm}$ 的树桩。凋落物碳库即地表枯枝落叶层。通过不同土地利用类型凋落物和粗木质残体生物量密度值或生物量碳密度值, 结合IPCC (2006)的凋落物碳库缺省值, 得到保护区相应土地利用类型的碳值。对只有生物量而没有碳密度值的植被类型, 采用生物量碳转换系数0.5进行换算(Fang et al, 2001; Chen et al, 2013)(附录3, 4)。土壤有机碳即土壤中细根和死有机物质中的碳元素含量。数据分析处理使用ArcGIS、R、SigmaPlot等软件完成。

对地上和地下生物量的估算结果采用重抽样方法生成加权平均值的置信区间。

1.4 不同土地利用类型碳密度值

使用ArcGIS软件将已有碳储量值的样点与土地利用类型进行匹配。并按样地面积平方根对样地碳储量进行抽样加权, 获取不同土地类型碳密度值(Willcock et al, 2012)。

1.5 土地利用变化下碳储量变化

通过土地利用类型面积变化计算碳储量值变化(Lai et al, 2016):

$$\Delta C_{CONVERSION} = \sum_i [(B_{AFTERi} - B_{BEFOREi}) \times \Delta A_{TO_OTHERSi}]$$

其中, $\Delta C_{CONVERSION}$ 为土地利用类型转变下的碳储量变化值, B_{AFTERi} 、 $B_{BEFOREi}$ 和 $\Delta A_{TO_OTHERSi}$ 分别表示转变后的碳储量、转变前的碳储量和转变为另一区域的面积, i 为发生转变的土地利用类型。

1.6 保护区碳保护的有效性

本文选取神农架保护区边界外5 km缓冲区作为保护区外区域(Carranza et al, 2014; Willcock et al, 2016), 计算1990–2010年20年间碳储量变化率和碳密度变化值, 并同保护区内对比, 分析保护区的有效性。

2 结果

2.1 神农架保护区20年(1990–2010年)间的土地利用变化

统计结果表明, 在2010年, 神农架保护区林地占保护区总面积的92.76%, 其中针叶林(51.85%)、落叶阔叶林(35.11%)及常绿阔叶林(4.47%) 3种森林类型合计占林地面积的98.56% (表1)。与1990年相比, 20年间, 神农架保护区林地面积增加了0.11%, 灌木林地和耕地面积分别减少了8.85%和6.06% (表1)。

2.2 神农架保护区主要森林类型碳库变化

分析神农架保护区2010年各碳库碳储量发现, 神农架保护区总碳储量为24.24 Tg C (22.57–26.62 Tg C)。其中, 地上碳库8.58 Tg C (7.19–10.58 Tg C),

土壤有机碳库13.40 Tg C, 占全部碳储量的90.68%, 地下、凋落物和粗木质残体碳库分别为1.81 Tg C (1.53–2.19 Tg C)、0.29 Tg C和0.16 Tg C (表2)。5个碳库中, 土壤有机碳密度最高(184.30 t C/ha), 其次分别为地上碳密度(117.96 t C/ha (98.84–145.47 t C/ha))、地下碳密度(24.81 t C/ha (21.09–30.13 t C/ha))、凋落物碳密度(3.92 t C/ha)及粗木质残体碳密度(2.22 t C/ha)(表3)。

常绿阔叶林、落叶阔叶林和针叶林3种森林类型碳储量占保护区碳储量的95%, 总碳密度分别为383.75 t C/ha (331.92–514.00 t C/ha)、350.53 t C/ha (318.36–394.01 t C/ha)和340.21 t C/ha (322.42–362.86 t C/ha)。其中, 常绿阔叶林地上碳密度(146.10 t C/ha (102.67–254.45 t C/ha))、地下碳密度(30.81 t C/ha (22.41–52.71 t C/ha))、凋落物碳密度(5.09 t C/ha)和土壤有机碳密度(196.97 t C/ha)均最高(图1)。

2.3 神农架保护区碳保护的有效性

分析发现, 1990–2010年间, 神农架保护区共固碳25.04 kt C (21.83–29.57 kt C), 固碳率为1.21 kt C/年(1.09–1.48 kt C/年)。20年间保护区5个碳库碳储量均有所增加, 其中地上生物量碳库和土壤有机碳库分别增加14.50 kt C (11.81–18.31 kt C)和6.84 kt C。保护区内土壤有机碳密度高于保护区外27.11 t C/ha, 总碳密度高于保护区外22.37 t C/ha (表2, 表3, 图2)。

3 讨论

本研究分析了神农架保护区1990–2010年间森林的固碳成效。研究发现, 1990–2010年间神农架保

表1 神农架国家级自然保护区土地利用格局
Table 1 Land use types and their areas in Shennongjia National Nature Reserve

土地利用类型 Land use type	1990年面积 Area in 1990 (ha)	1990年占比 Proportion in 1990 (%)	2010年面积 Area in 2010 (ha)	2010年占比 Proportion in 2010 (%)
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	3,245.71	4.46	3,249.13	4.47
落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forest	25,448.97	34.99	25,532.75	35.11
针叶林 Coniferous forest	37,694.08	51.83	37,713.32	51.85
针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	622.14	0.86	624.78	0.86
灌木林 Shrubland	380.97	0.52	347.26	0.48
耕地 Cropland	2,056.3	2.83	1,931.7	2.66
其他 Other	3,281.99	4.51	3,331.22	4.58

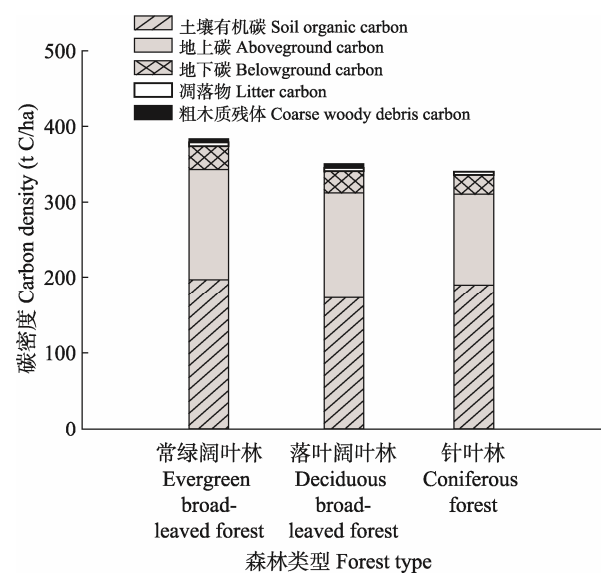


图1 神农架自然保护区主要森林类型各碳库碳密度
Fig. 1 Carbon density of different carbon pools of main forestry lands in Shennongjia National Nature Reserve

保护区森林5个碳库碳储量均有所增加, 土壤有机碳库碳密度及总碳库碳密度高于保护区外, 保护区固碳

取得了一定成效。

土壤碳积累和释放是陆地生态系统碳循环中一个重要组成部分, 在全球碳循环及全球变化的研究中具有重要的作用。全球森林碳库的69%和31%为土壤和植被碳库(Dixon et al, 1994)。土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库, 全球约有1,400–1,500 Pg碳以有机形式储存于土壤中, 土壤碳储量是陆地植被碳库 (500–600 Gt C) 的2–3倍 (Schlesinger, 1990)。我国2,473种不同土壤类型碳密度为3.5–252.6 t C/ha (Xie et al, 2007)。崔鸿侠等(2012, 2014)研究发现, 神农架马尾松(*Pinus massoniana*)林、华山松(*Pinus armandii*)林、巴山冷杉(*Abies fargesii*)林的土壤碳储量分别为57.79 t C/ha、116.07 t C/ha和170.62 t C/ha。本研究发现, 神农架保护区土壤有机碳库碳密度为184.30 t C/ha, 高于保护区外27.11 t C/ha, 土壤有机碳储量占总碳储量的55%, 是地上碳库碳密度的1.6倍。该结果也与Willcock等(2012)得出的土壤碳占据全部碳储量的60%, 超过地上碳2倍的结论相吻合。

表2 神农架自然保护区1990–2010年间各碳库碳储量变化
Table 2 Carbon storage of different carbon pools in Shennongjia National Nature Reserve between 1990 and 2010

	地上碳库 Aboveground carbon	地下碳库 Belowground carbon	凋落物碳库 Litter carbon	粗木质残体碳库 Coarse woody debris carbon	土壤有机碳库 Soil organic carbon	总计 Total
1990 (Tg C)	8.57	1.80	0.29	0.16	13.40	24.21
2000 (Tg C)	8.58	1.81	0.29	0.16	13.40	24.23
2010 (Tg C)	8.58	1.81	0.29	0.16	13.40	24.24
1990–2010年变化量	14.50	3.01	0.21	0.49	6.84	25.04
△C _{storage} 1990–2010 (kt C) (1990–2000; 2000–2010)	(13.93; 0.57)	(2.88; 0.13)	(0.44; –0.24)	(0.52; –0.03)	(3.97; 2.87)	(21.74; 3.30)
1990–2010年变化率	0.17	0.17	0.07	0.30	0.05	0.10
Change rate of carbon storage during 1990–2010 (%) (1990–2000; 2000–2010)	(0.16; 0.01)	(0.16; 0.01)	(0.16; –0.02)	(0.32; –0.02)	(0.03; 0.02)	(0.09; 0.01)

表3 神农架自然保护区内外1990–2010年各碳库碳密度(t C/ha)
Table 3 Carbon density (t C/ha) of different carbon pools inside and outside Shennongjia National Nature Reserve between 1990 and 2010

	地上碳库 Aboveground carbon		地下碳库 Belowground carbon		凋落物碳库 Litter carbon		粗木质残体碳库 Coarse woody debris carbon		土壤有机碳库 Soil organic carbon		总计 Total	
	内 Inside	外 Outside	内 Inside	外 Outside	内 Inside	外 Outside	内 Inside	外 Outside	内 Inside	外 Outside	内 Inside	外 Outside
1990	117.76	121.10	24.77	25.42	3.92	4.00	2.22	2.51	184.21	157.04	332.87	310.08
2000	117.95	121.63	24.81	25.53	3.93	4.02	2.22	2.52	184.26	157.20	333.17	310.90
2010	117.96	121.60	24.81	25.53	3.92	4.02	2.22	2.51	184.30	157.19	333.22	310.85
1990–2010年增加量	0.20	0.50	0.04	0.10	0	0.02	0.01	0.01	0.09	0.15	0.34	0.77
△C _{density} 1990–2010 (1990–2000; 2000–2010)	(0.19; 0.01)	(0.52; –0.02)	(0.04; 0)	(0.11; –0.01)	(0.01; 0)	(0.02; –0.01)	(0.01;0) (0.01; 0)	(0.01; 0) (0.01; 0)	(0.05; 0.04)	(0.16; –0.01)	(0.30; 0.04)	(0.82; –0.05)

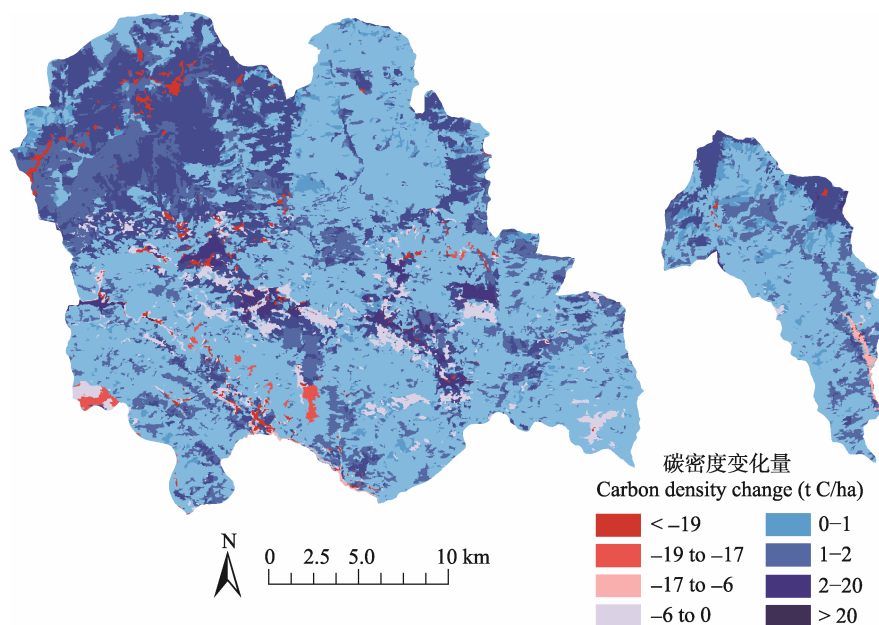


图2 神农架自然保护区1990–2010年碳密度变化量

Fig. 2 Carbon density change in Shennongjia National Nature Reserve between 1990 and 2010

本研究发现,神农架保护区林地占保护区总面积的92%。神农架自1970年设置林区政府以来,采伐木材为林区主要生产任务,森林覆盖率由开发前的75.4%下降至63.5%,林木蓄积量急剧下降(湖北省神农架林区地方志编纂委员会,1996)。神农架保护区1982年建立后,开始了由采伐向森林资源保护的转变,木材年产量调减4.8万 m^3 (郑重等,1997),森林蓄积量每年增加17万 m^3 (湖北省神农架林区地方志编纂委员会,1996)。保护区的建立有效缓解了神农架保护区内森林的丧失(王翠玲等,2017)。而同期相比,神农架保护区外森林砍伐严重,直到国家实施天然林保护工程和退耕还林工程后,砍伐才全面禁止。目前,保护区内1990–2010年间碳储量变化率为0.1%,较保护区外碳储量变化率低0.15%,主要由于保护区外多为幼龄林,恢复迅速,优势种生长迅速,而保护区内多为中龄林或成熟林(郑重等,1997)。保护区内土壤碳密度高于保护区外,而土壤碳为碳库组成的最主要部分,因此保护区内总碳密度高于保护区外。

本研究从地上、地下、凋落物、粗木质残体、土壤有机碳库5个方面估算了神农架保护区的固碳有效性。地上碳估算通过胸径、树高、材积等指标,利用生物量方程或异速生长模型估算生物量,是区域尺度上估算碳储量的常用方法(Chave et al, 2005;

Nogueira et al, 2008; Singh et al, 2011)。生物量方程或异速生长模型主要针对优势物种碳储量的估算,在估算碳储量时,其结果往往有一定的不确定性(Xiang et al, 2011; Willcock et al, 2012, 2016)。对地上和地下生物量的估算结果,采用重抽样方法生成加权平均值的置信区间,考虑了调查区域面积的不确定性,保证了各个碳库估算的可靠性(Willcock et al, 2012)。另外,凋落物碳库、粗木质残体碳库实测值较少,但其在总碳储量中所占比重低(IPCC, 2006)。土壤有机碳采用的 SoilGrids250m (www.soilgrids.org)数据通过交叉验证保证了数据的可靠性(Hengl et al, 2017)。

事实证明,神农架保护区的建立,在一定程度上维持了森林生态系统的固碳能力,取得了一定的固碳保护成效。

参考文献

- Andam KS, Ferraro PJ, Pfaff A, Sanchez-Azofeifa GA, Robalino JA (2008) Measuring the effectiveness of protected area networks in reducing deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 105, 16089–16094.
- Bowker JN, de Vos A, Ament JM, Cumming GS (2017) Effectiveness of Africa's tropical protected areas for maintaining forest cover. *Conservation Biology*, 31, 559–569.
- Bruner AG, Gullison RE, Rice RE, da Fonseca GAB (2001)

- Effectiveness of parks in protecting tropical biodiversity. *Science*, 291, 125–128.
- Cao MT, Peng L, Liu SQ (2015) Analysis of the network of protected areas in China based on a geographic perspective: Current status, issues and integration. *Sustainability*, 7, 15617–15631.
- Carranza T, Balmford A, Kapos V, Manica A (2014) Protected area effectiveness in reducing conversion in a rapidly vanishing ecosystem: The Brazilian Cerrado. *Conservation Letters*, 7, 216–223.
- Chave J, Andalo C, Brown S, Cairns MA, Chambers JQ, Eamus D, Fölster H, Fromard F, Higuchi N, Kira T, Lescure JP, Nelson BW, Ogawa H, Puig H, Riéra B, Yamakura T (2005) Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145, 87–99.
- Chen QQ, Xu WQ, Li SG, Fu SL, Yan JH (2013) Aboveground biomass and corresponding carbon sequestration ability of four major forest types in south China. *Chinese Science Bulletin*, 58, 1551–1557.
- Chen YH, Zhang J, Jiang JP, Nielsen SE, He FL (2017) Assessing the effectiveness of China's protected areas to conserve current and future amphibian diversity. *Diversity and Distributions*, 23, 146–157.
- Cui HX, Xiao WF, Huang ZL, Zeng LX, Pan L, Pang HD (2014) Soil organic carbon storage of three coniferous forests in Shennongjia Nature Reserve. *Journal of Northeast Forestry University*, 42, 69–72. (in Chinese with English abstract) [崔鸿侠, 肖文发, 黄志霖, 曾立雄, 潘磊, 庞宏东 (2014) 神农架3种针叶林土壤碳储量比较. *东北林业大学学报*, 42, 69–72.]
- Cui HX, Xiao WF, Pan L, Huang ZL, Wang XR, Pang HD (2012) Characteristics of soil carbon storage of *Abies fargesii* forest in Shennongjia. *Scientia Silvae Sinicae*, 48, 107–111. (in Chinese with English abstract) [崔鸿侠, 肖文发, 潘磊, 黄志霖, 王晓荣, 庞宏东 (2012) 神农架巴山冷杉林土壤碳储量特征. *林业科学*, 48, 107–111.]
- Dixon RK, Solomon AM, Brown S, Houghton RA, Trexler MC, Wisniewski J (1994) Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263, 185–190.
- Editorial Committee of Hubei Shennongjia Forestry District Local Chronicles (1996) Shennongjia chronicles. Hubei Science and Technology Press, Wuhan. (in Chinese) [湖北省神农架林区地方志编纂委员会 (1996) 神农架志. 湖北科学技术出版社, 武汉.]
- Fang JY, Chen AP, Peng CH, Zhao SQ, Ci LJ (2001) Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 292, 2320–2322.
- Foley JA, DeFries R, Asner GP, Barford C, Bonan G, Carpenter SR, Chapin FS, Coe MT, Daily GC, Gibbs HK, Helkowski JH, Holloway T, Howard EA, Kucharik CJ, Monfreda C, Patz JA, Prentice IC, Ramankutty N, Snyder PK (2005) Global consequences of land use. *Science*, 309, 570–574.
- Gaston KJ, Jackson SF, Cantú-Salazar L, Cruz-Piñón G (2008) The ecological performance of protected areas. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 39, 93–113.
- Hengl T, de Jesus JM, Heuvelink GBM, Gonzalez MR, Kilibarda M, Blagotic A, Shangguan W, Wright MN, Geng XY, Bauer-Marschallinger B, Guevara MA, Vargas R, MacMillan RA, Batjes NH, Leenaars JGB, Ribeiro E, Wheeler I, Mantel S, Kempen B (2017) SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS ONE*, 12, e0169748.
- Hill R, Miller C, Newell B, Dunlop M, Gordon IJ (2015) Why biodiversity declines as protected areas increase: The effect of the power of governance regimes on sustainable landscapes. *Sustainability Science*, 10, 357–369.
- Houghton RA, House JI, Pongratz J, van der Werf GR, DeFries RS, Hansen MC, Le Quéré C, Ramankutty N (2012) Carbon emissions from land use and land-cover change. *Biogeosciences Discussions*, 9, 835–878.
- IPCC (2006) 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Institute for Global Environmental Strategies, Kanagawa, Japan.
- Jenkins CN, van Houtan KS, Pimm SL, Sexton JO (2015) US protected lands mismatch biodiversity priorities. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 122, 5081–5086.
- Joppa LN, Loarie SR, Pimm SL (2008) On the protection of “protected areas”. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 105, 6673–6678.
- Joppa LN, Pfaff A (2009) High and far: Biases in the location of protected areas. *PLoS ONE*, 4, e8273.
- Juffe-Bignoli D, Burgess ND, Bingham H, Belle EMS, de Lima MG, Deguignet M, Bertzky B, Milam AN, Martinez-Lopez J, Lewis E, Eassom A, Wicander S, Geldmann J, van Soesbergen A, Arnell AP, O'Connor B, Park S, Shi YN, Danks FS, MacSharry B, Kingston N (2014) Protected Planet Report 2014. UNEP-WCMC, Cambridge, UK.
- Lai L, Huang XJ, Yang H, Chuai XW, Zhang M, Zhong TY, Chen ZG, Chen Y, Wang X, Thompson JR (2016) Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010. *Science Advances*, 2, e1601063.
- Lambin EF, Turner BL, Geist HJ, Agbola SB, Angelsen A, Bruce JW, Coomes OT, Dirzo R, Fischer G, Folke C, George PS, Homewood K, Imbernon J, Leemans R, Li XB, Moran EF, Mortimore M, Ramakrishnan PS, Richards JF, Skånes H, Steffen W, Stone GD, Svedin U, Veldkamp TA, Vogel C, Xu JC (2001) The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11, 261–269.
- Luo YJ, Wang XK, Lu F (2015) Comprehensive Database of Biomass Regressions for China's Tree Species. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [罗云建, 王效科, 逯非 (2015) 中国主要林木生物量模型手册. 中国

- 林业出版社, 北京.]
- Ma MZ, Shen GZ, Xiong GM, Zhao CM, Xu WT, Zhou YB, Xie ZQ (2017) Characteristic and representativeness of the vertical vegetation zonation along the altitudinal gradient in Shennongjia Natural Heritage. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 1127–1139. (in Chinese with English abstract) [马明哲, 申国珍, 熊高明, 赵常明, 徐文婷, 周友兵, 谢宗强 (2017) 神农架自然遗产地植被垂直带谱的特点和代表性. *植物生态学报*, 41, 1127–1139.]
- Nogueira EM, Fearnside PM, Nelson BW, Barbosa RI, Keizer EWH (2008) Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. *Forest Ecology and Management*, 256, 1853–1867.
- Ouyang ZY, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu JG, Xu WH, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao EM, Jiang L, Lu F, Wang XK, Yang GB, Gong SH, Wu BF, Zeng Y, Yang W, Daily GC (2016) Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 352, 1455–1459.
- Pouzols FM, Toivonen T, Minin ED, Kukkala A, Kullberg P, Kuusterä J, Lehtomäki J, Tenkanen H, Verburg PH, Moilanen A (2014) Global protected area expansion is compromised by projected land-use and parochialism. *Nature*, 516, 383–386.
- Ren GP, Young SS, Wang L, Wang W, Long YC, Wu RD, Li JS, Zhu JG, Yu DW (2015) Effectiveness of China's national forest protection program and nature reserves. *Conservation Biology*, 29, 1368–1377.
- Rodrigues ASL, Andelman SJ, Bakarr MI, Boitani L, Brooks TM, Cowling RM, Fishpool LDC, da Fonseca GAB, Gaston KJ, Hoffmann M, Long JS, Marquet PA, Pilgrim JD, Pressey RL, Schipper J, Sechrest W, Stuart SN, Underhill LG, Waller RW, Watts MEJ, Xie Y (2004) Effectiveness of the global protected area network in representing species diversity. *Nature*, 428, 637–640.
- Scharlemann JPW, Kapos V, Campbell A, Lysenko I, Burgess ND, Hansen MC, Gibbs HK, Dickson B, Miles L (2010) Securing tropical forest carbon: The contribution of protected areas to REDD. *Oryx*, 44, 352–357.
- Scherer L, Curran M, Alvarez M (2017) Expanding Kenya's protected areas under the convention on biological diversity to maximize coverage of plant diversity. *Conservation Biology*, 31, 302–310.
- Schimel D, Melillo J, Tian HQ, McGuire AD, Kicklighter D, Kittel T, Rosenbloom N, Running S, Thornton P, Ojima D, Parton W, Kelly R, Sykes M, Neilson R, Rizzo B (2000) Contribution of increasing CO₂ and climate to carbon storage by ecosystems in the United States. *Science*, 287, 2004–2006.
- Schlesinger WH (1990) Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature*, 348, 232–234.
- Singh V, Tewari A, Kushwaha SPS, Dadhwal VK (2011) Formulating allometric equations for estimating biomass and carbon stock in small diameter trees. *Forest Ecology and Management*, 261, 1945–1949.
- Tans PP, Fung IY, Takahashi T (1990) Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science*, 247, 1431–1438.
- Technical Manual Writing Group of Ecosystem Carbon Sequestration Project (2015) Observation and Investigation for Carbon Sequestration in Terrestrial Ecosystems. Science Press, Beijing. (in Chinese) [生态系统固碳项目技术规范编写组 (2015) 生态系统固碳观测与调查技术规范. 科学出版社, 北京.]
- Thomas CD, Gillingham PK, Bradbury RB, Roy DB, Anderson BJ, Baxter JM, Bourn NAD, Crick HQP, Findon RA, Fox R, Hodgson JA, Holt AR, Morecroft MD, O'Hanlon NJ, Oliver TH, Pearce-Higgins JW, Procter DA, Thomas JA, Walker KJ, Walmsley CA, Wilson RJ, Hill JK (2012) Protected areas facilitate species' range expansions. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 109, 14063–14068.
- Wang CL, Zang ZH, Qiu Y, Deng SY, Feng ZY, Xie ZQ, Xu WT, Liu L, Chen QS, Shen GZ (2017) The effectiveness of Shennongjia National Nature Reserve in conserving forests and habitat of Sichuan snub-nosed monkey. *Biodiversity Science*, 25, 504–512. (in Chinese with English abstract) [王翠玲, 臧振华, 邱月, 邓舒雨, 冯朝阳, 谢宗强, 徐文婷, 刘蕾, 陈全胜, 申国珍 (2017) 湖北神农架国家级自然保护区森林和川金丝猴栖息地的保护成效. *生物多样性*, 25, 504–512.]
- Willcock S, Phillips OL, Platts PJ, Balmford A, Burgess ND, Lovett JC, Ahrends A, Bayliss J, Doggart N, Doody K, Fanning E, Green JMH, Hall J, Howell KL, Marchant R, Marshall AR, Mbilinyi B, Munishi PKT, Owen N, Swetnam RD, Topp-Jorgensen EJ, Lewis SL (2012) Towards regional, error-bounded landscape carbon storage estimates for data-deficient areas of the world. *PLoS ONE*, 7, e44795.
- Willcock S, Phillips OL, Platts PJ, Swetnam RD, Balmford A, Burgess ND, Ahrends A, Bayliss J, Doggart N, Doody K, Fanning E, Green JMH, Hall J, Howell KL, Lovett JC, Marchant R, Marshall AR, Mbilinyi B, Munishi PKT, Owen N, Topp-Jorgensen EJ, Lewis SL (2016) Land cover change and carbon emissions over 100 years in an African biodiversity hotspot. *Global Change Biology*, 22, 2787–2800.
- Wu BF, Yuan QZ, Yan CZ, Wang ZM, Yu XF, Li AN, Ma RH, Huang JL, Chen JS, Chang C, Liu CL, Zhang L, Li XS, Zeng Y, Bao AM (2014) Land cover changes of China from 2000 to 2010. *Quaternary Sciences*, 34, 723–731. (in Chinese with English abstract) [吴炳方, 苑全治, 颜长珍, 王宗明, 于信芳, 李爱农, 马荣华, 黄进良, 陈劲松, 常存, 刘成林, 张磊, 李晓松, 曾源, 包安明 (2014) 21世纪前十年的中国土地覆盖变化. *第四纪研究*, 34, 723–731.]
- Wu RD, Zhang S, Yu DW, Zhao P, Li XH, Wang LZ, Yu Q, Ma J, Chen A, Long YC (2011) Effectiveness of China's nature reserves in representing ecological diversity. *Frontiers*

- in Ecology and the Environment, 9, 383–389.
- Xiang WH, Liu SH, Deng XW, Shen AH, Lei XD, Tian DL, Zhao MF, Peng CH (2011) General allometric equations and biomass allocation of *Pinus massoniana* trees on a regional scale in southern China. Ecological Research, 26, 697–711.
- Xie ZB, Zhu JG, Liu G, Cadisch G, Hasegawa T, Chen CM, Sun HF, Tang HY, Zeng Q (2007) Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s. Global Change Biology, 13, 1989–2007.
- Xie ZQ, Shen GZ, Zhou YB, Fan DY, Xu WT, Gao XM, Du YJ, Xiong GM, Zhao CM, Zhu Y, Lai JS (2017) The outstanding universal value and conservation of the Shennongjia World Natural Heritage Site. Biodiversity Science, 25, 490–497. (in Chinese with English abstract) [谢宗强, 申国珍, 周友兵, 樊大勇, 徐文婷, 高贤明, 杜彦君, 熊高明, 赵常明, 祝燕, 赖江山 (2017) 神农架世界自然遗产地的全球突出普遍价值及其保护. 生物多样性, 25, 490–497.]
- Xu WH, Xiao Y, Zhang JJ, Yang W, Zhang L, Hull V, Wang Z, Zheng H, Liu JG, Polasky S, Jiang L, Xiao Y, Shi XW, Rao EM, Lu F, Wang XK, Daily GC, Ouyang ZY (2017) Strengthening protected areas for biodiversity and ecosystem services in China. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 114, 1601–1606.
- Zhang L, Wu BF, Li XS, Xing Q (2014) Classification system of China land cover for carbon budget. Acta Ecologica Sinica, 34, 7158–7166. (in Chinese with English abstract) [张磊, 吴炳方, 李晓松, 邢强 (2014) 基于碳收支的中国土地覆被分类系统. 生态学报, 34, 7158–7166.]
- Zheng Z, Zhan YH, Xie JL (1997) Shennongjia of China. Hubei Science and Technology Press, Wuhan. (in Chinese) [郑重, 詹亚华, 谢继伦 (1997) 中国神农架. 湖北科学技术出版社, 武汉.]

(责任编辑: 唐志尧 责任编辑: 时意专)

附录 Supplementary Material

附录1 用于估算碳储量的地上生物量模型

Appendix 1 Aboveground biomass models used for estimating carbon storage

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2017240-1.pdf>

附录2 不同植被类型地上、地下生物量换算关系式

Appendix 2 The conversion between aboveground biomass and belowground biomass of different land cover types

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2017240-2.pdf>

附录3 研究区域土地利用类型的凋落物碳库碳储量

Appendix 3 The carbon storage of litter carbon pool in different land use types in the study area

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2017240-3.pdf>

附录4 研究区域不同土地利用类型的粗木质残体碳库碳储量

Appendix 4 The carbon storage of coarse woody debris carbon pool in different land use types in the study area

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2017240-4.pdf>

邓舒雨, 董向忠, 马明哲, 臧振华, 徐文婷, 赵常明, 谢宗强, 申国珍. 基于森林碳库动态评估神农架国家级自然保护区的保护成效. 生物多样性, 2018, 26(1): 27–35.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2017240>

附录1 用于估算碳储量的地上生物量模型

Appendix 1 Aboveground biomass models used for estimating carbon storage

物种类型	研究范围	林分起源	来源	地上模型	相关系数 R	决定系数 R ²	样本量 n
Species	Study area	Forest stand	Reference	Model			
云冷杉通用 <i>Picea</i> spp. <i>Abies</i> spp.	全国	—	—	$B=0.2848D^{2.1344}$	—	0.962	55
冷杉 <i>Abies fabri</i>	吉林	天然林	陈传国等, 1984 陈传国等, 1989	$B=0.0763D^{2.4578}$	0.9954	—	20
油麦吊云杉 <i>Picea brachytyla</i> var. <i>complanata</i>	云南	天然林	吴兆录等, 1994	$B=0.0561D^{2.4254}$ $+0.0125D^{2.306}$ $+0.0106D^{2.4539}$ $-5.9633+0.9984D$	0.9898, 0.991, 0.948, 0.9256	—	—
油桐 <i>Vernicia fordii</i>	湖南	人工林	何方等, 1990	$B=0.0202D^{2.9265}$ $-0.0052D^{2.6381}$	0.9952, 0.9882	—	18
元宝槭 <i>Acer truncatum</i>	北京	人工林	阎海平等, 1997 田奇凡等, 1997	$B=0.0506(D^2H)^{0.8812}$ $+0.014(D^2H)^{0.8358}$ $+0.0115(D^2H)^{0.9786}$ $+0.0125(D^2H)^{0.6869}$	0.995, 0.962, 0.996, 0.913	—	8
红桦 <i>Betula</i> <i>albo-sinensis</i>	陕西	天然林	陈存根等, 1996	$B=e^{-3.7933}(D^2H)^{0.9104}$ $+e^{-4.2775}(D^2H)^{0.8102}$ $+e^{-5.9351}D^{3.3593}$ $+e^{-5.5693}D^{2.3901}$ $+e^{-12.1436}D^{3.9339}$	0.9972, 0.9967, 0.9858, 0.9871, 0.9826	—	—
亮叶桦	福建	天然林	宋丁全等, 2002	$B=0.0283D^{2.4533}H^{0.3455}$	0.9999,	—	6

邓舒雨, 董向忠, 马明哲, 臧振华, 徐文婷, 赵常明, 谢宗强, 申国珍. 基于森林碳库动态评估神农架国家级自然保护区的保护成效. 生物多样性, 2018, 26(1): 27–35.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2017240>

物种类型	研究范围	林分起源	来源	地上模型	相关系数 R	决定系数 R ²	样本量 n
Species	Study area	Forest stand	Reference	Model			
<i>Betula luminifera</i>				$+0.0189D^{1.9122}H^{0.2508}$ $+0.0021D^{2.0737}H^{1.2093}$ $+0.1111D^{1.065}H^{0.2048}$	0.996, 0.9881, 0.9872		
阔叶树通用	全国	—	—	$B=0.0622D^{2.5289}$	—	0.933	1140
杉木通用	全国	—	—	$B=0.0785D^{2.373}$	—	0.843	110
<i>Cunninghamia lanceolata</i>							
柏木	贵州	次生林	安和平等, 1991	$B=0.127(D^2H)^{0.7978}$	0.9884	—	—
<i>Cupressus funebris</i>							
青冈	湖南	次生林	Zheng et al., 2008	$B=1.1963D^{1.4829}$ $-(0.2485D^{0.8636}$ $+0.0369D^{1.0145}$ $+0.0092D^{1.0216})$	—	0.9833, 0.9425, 0.977, 0.986	8
<i>Cyclobalanopsis glauca</i>							
米心水青冈	湖北	天然林	王向雨等, 2007	$B=0.246D^{2.08}$ $+0.0074D^{2.84}$ $+0.00055D^{3.2}$	0.9908, 0.9913, 0.9989	—	—
<i>Fagus engleriana</i>							
榕树	云南	次生林	冯志立等, 1999	$B=0.0253(D^2H)^{0.9546}$ $+0.0013(D^2H)^{1.2487}$ $+0.1179+0.001(D^2H)$	0.9988, 0.9816, 0.9786	—	8
<i>Ficus microcarpa</i>							
针叶树通用	全国	—	—	$B=0.1112D^{2.3689}$	—	0.926	900
日本落叶松通用	全国	—	—	$B=172.329[(0.01D)^2H]^{1.1346}$	—	0.922	35
<i>Larix kaempferi</i>							
石栎	浙江	次生林	陈启瑞, 1993	$B=-3.114+0.4371D^2$	0.9974	—	20

邓舒雨, 董向忠, 马明哲, 臧振华, 徐文婷, 赵常明, 谢宗强, 申国珍. 基于森林碳库动态评估神农架国家级自然保护区的保护成效. 生物多样性, 2018, 26(1): 27–35.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2017240>

物种类型	研究范围	林分起源	来源	地上模型	相关系数 R	决定系数 R ²	样本量 n
Species	Study area	Forest stand	Reference	Model			
<i>Lithocarpus glaber</i>							
木姜子	云南	次生林	冯志立等, 1999	$B=0.1071+0.0254(D^2H)$	0.9401,	–	7
<i>Litsea pungens</i>				$+0.0125(D^2H)^{0.9054}$	0.9362,		
				$+0.0000055(D^2H)^{1.666}$	0.9505		
檫木	福建	人工林	何贵平等, 2001	$B=10^{-1.8346}(D^2H)^{1.0884}$	0.8841	–	8
<i>Sassafras tzumu</i>							
刨花润楠	江西	天然林	钟全林等, 2001	$B=2.71828^{-3.0557}(D^2H)^{0.9429}$	0.9517	–	37
<i>Machilus pauhoi</i>							
楠木	福建	人工林	廖涵宗等, 1988	$B=10^{-1.0514}(D^2H)^{0.8541}$	0.9713	–	10
<i>Phoebe zhennan</i>							
水杉通用	全国	–	–	$B=143.256[(0.01D)^2H]^{0.7589}$	–	0.967	35
<i>Metasequoia glyptostroboides</i>							
华山松	甘肃	人工林	程堂仁等, 2007	$B=2.71828^{-2.2962}D^{2.4119}$	0.998,	–	86
<i>Pinus armandii</i>				$-2.71828^{-6.1087}D^{3.0376}$	0.9886		
巴山松	陕西	天然林	肖瑜, 1992	$B=0.0221(D^2H)^{0.9469}$	0.996,	–	78
<i>Pinus henryi</i>				$+0.0041(D^2H)^{0.943}$	0.988,		
				$+0.014D^{2.454}$	0.98,		
				$+0.0173D^{2.3207}$	0.956		
马尾松通用	全国	–	–	$B=0.107D^{2.3755}$	–	0.954	100
<i>Pinus massoniana</i>							
山杨	吉林	天然林	陈传国等, 1984;	$B=0.5046D^{1.9615}$	0.9534	–	12
<i>Populus</i>			陈传国等, 1989				

邓舒雨, 董向忠, 马明哲, 臧振华, 徐文婷, 赵常明, 谢宗强, 申国珍. 基于森林碳库动态评估神农架国家级自然保护区的保护成效. 生物多样性, 2018, 26(1): 27–35.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2017240>

物种类型	研究范围	林分起源	来源	地上模型	相关系数 R	决定系数 R ²	样本量 n
Species	Study area	Forest stand	Reference	Model			
<i>daurica</i>							
锐齿槲栎	湖北	天然林	王向雨等, 2007	$B=0.029D^{2.74}$	0.9961,	–	–
<i>Quercus aliena</i>				$+0.036D^{2.35}$	0.9813,		
<i>var. acutiserrata</i>				$+0.0088D^{2.44}$	0.9756		
栓皮栎	甘肃	人工林	程堂仁等, 2007	$B=e^{-1.2141D^{2.1159}}$	0.9863,	–	87
<i>Quercus variabilis</i>				$-e^{-2.347D^{2.1003}}$	0.9933		
杜鹃	云南	天然林	吴兆录等, 1994	$B=11.3267*0.0023^{(1/D)}$	0.9892,	–	–
<i>Rhododendron</i>				$+2.3486*0.0014^{(1/D)}$	0.8439,		
<i>simsii</i>				$+0.8559*0.0107^{(1/D)}$	0.8113		
山矾	湖南	人工林	高述超等, 2010	$B=0.0975(D^2H)^{0.8083}$	–	0.9863,	6
<i>Symplocos</i>				$+0.0236(D^2H)^{0.6793}$		0.9898,	
<i>sumuntia</i>				$+0.0631(D^2H)^{0.8124}$		0.9851,	
				$+0.23(D^2H)^{0.452}$		0.9192	
狭叶珍珠花	云南	天然林	党承林等, 1994	$B=2.6894-5.2195/D$	0.9645,	–	28
<i>Lyonia ovalifolia</i>				$+0.8309-1.4361/D$	0.965,		
<i>var. lanceolate</i>				$-0.0363+0.0126D^2$	0.9287		
桦类通用	全国	–	–	$B=0.6352D^{1.9296}$	–	0.912	90
<i>Betulaceae</i> spp.							
白栎	湖南	人工林	欧阳硕龙等, 2010	$B=0.0263(D^2H)^{0.9174}$	0.9978,	–	70
<i>Quercus fabri</i>				$+0.0081(D^2H)^{0.8915}$	0.9948,		
				$+0.0811(D^2H)^{0.6404}$	0.9909,		
				$+0.0153(D^2H)^{0.7501}$	0.9836		
落叶栎类通用	全国	–	–	$B=0.0664D^{2.5907}$	–	0.967	65
臭椿	广西	人工林	杨主泉, 2013	$B=0.876+0.0124(D^2H)$	0.811,	–	–

邓舒雨, 董向忠, 马明哲, 臧振华, 徐文婷, 赵常明, 谢宗强, 申国珍. 基于森林碳库动态评估神农架国家级自然保护区的保护成效. 生物多样性, 2018, 26(1): 27–35.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2017240>

物种类型	研究范围	林分起源	来源	地上模型	相关系数 R	决定系数 R ²	样本量 n
Species	Study area	Forest stand	Reference	Model			
<i>Ailanthus altissima</i>				$-[0.118+0.001(D^2H)]$	0.945		
枫香树 <i>Liquidambar formosana</i>	湖南	人工林	欧阳硕龙等, 2010	$B=0.0252(D^2H)^{0.9614}$ $+0.005(D^2H)^{0.9553}$ $+0.0053(D^2H)^{1.0132}$ $+0.0072(D^2H)^{0.8658}$	0.9956, 0.9934, 0.9916, 0.9618	—	120
连香树 <i>Cercidiphyllum japonicum</i>	四川	人工林	潘开文等, 1999	$B=0.7199D^{1.5455}$	0.9924	—	15
山桐子 <i>Idesia polycarpa</i>	贵州	天然林	赵家梅等, 2012	$B=0.2678D^{1.8682}$	—	0.9969	5
猴樟 <i>Cinnamomum bodinieri</i>	云南	人工林	萧自位等, 2012	$B=0.2191D^{1.9916}$ $-0.045D^{1.9674}$	0.981, 0.973	—	12
杨树通用 <i>Populus spp.</i>	全国	—	—	$B=0.2498D^{2.1331}$	—	0.973	175
毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>	河南	人工林	刘元本等, 1984	$B=0.0895D^{2.5453}$ $-0.0148D^{2.4465}$	0.9975, 0.9857	—	13
榆树 <i>Ulmus pumila</i>	内蒙古	天然林	李刚等, 2011	$B=e^{-4.221}D^{2.588}$ $+e^{-3.456}D^{2.32}$ $+e^{-3.532}D^{1.76}$	— 0.978, 0.985, 0.96		10
樟树通用 <i>Cinnamomum spp.</i>	全国	—	—	$B=315.81[(0.01D)^2H]^{1.1846}$	—	0.985	30

邓舒雨, 董向忠, 马明哲, 臧振华, 徐文婷, 赵常明, 谢宗强, 申国珍. 基于森林碳库动态评估神农架国家级自然保护区的保护成效. 生物多样性, 2018, 26(1): 27–35.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2017240>

附录 2 不同植被类型地上、地下生物量换算关系式。**W** 表示地下生物量/kg; **B** 表示地上生物量/kg。

Appendix 2 The conversion between aboveground biomass and belowground biomass of different land cover types

类型	地上地下关系式	决定系数
Forest type	Conversion between aboveground biomass and belowground biomass	Determination coefficient
所有森林	$W=10^{-0.37}B^{0.859}$	0.762
云杉属、冷杉属、圆柏属	$W=10^{-0.549}B^{0.945}$	0.613
杉木	$W=10^{-0.294}B^{0.798}$	0.819
柏木属、福建柏属	$W=10^{-0.79}B^{1.047}$	0.892
落叶松属	$W=10^{-0.16}B^{0.763}$	0.599
红松	$W=10^{-0.644}B^{0.993}$	0.857
马尾松、黄山松	$W=10^{-0.338}B^{0.779}$	0.735
油松	$W=10^{-0.307}B^{0.811}$	0.693
其他温带松柏类	$W=10^{-0.251}B^{0.793}$	0.485
其他亚热带松柏类	$W=10^{-0.745}B^{1.024}$	0.847
桉木属、桦木属、杨属	$W=10^{-0.366}B^{0.887}$	0.841
栎属、其他温带落叶阔叶林	$W=10^{-0.266}B^{0.877}$	0.742
其他亚热带落叶阔叶林	$W=10^{-0.283}B^{0.802}$	0.802
苦槠、青冈栎属、石栎属	$W=10^{-0.365}B^{0.902}$	0.802
其他常绿阔叶林	$W=10^{-0.177}B^{0.8}$	0.793
热带森林	$W=10^{-0.531}B^{0.949}$	0.816
温带针阔混交林	$W=10^{-0.728}B^{1.024}$	0.84
亚热带常绿阔叶林	$W=10^{-0.691}B^{1.001}$	0.78
针叶林	$W=10^{-0.332}B^{0.82}$	0.765
阔叶林	$W=10^{-0.275}B^{0.875}$	0.826
针阔叶混交林	$W=10^{-0.711}B^{1.012}$	0.822
落叶林	$W=10^{-0.253}B^{0.837}$	0.729
常绿林	$W=10^{-0.415}B^{0.87}$	0.792

邓舒雨, 董向忠, 马明哲, 臧振华, 徐文婷, 赵常明, 谢宗强, 申国珍. 基于森林碳库动态评估神农架国家级自然保护区的保护成效. 生物多样性, 2018, 26(1): 27–35.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2017240>

附录3 研究区域土地利用类型的凋落物碳库碳储量

Appendix 3 The carbon storage of litter carbon pool in different land use types in the study area

类型	研究范围	来源	生物量碳密度	生物量密度
Forest type	Study area	Reference	Carbon storage per hectare(t C/ha)	Biomass per hectare(t/ha)
针阔混交林	三峡库区	曾立雄, 2007	—	6.32
落叶阔叶林	三峡库区	曾立雄, 2007	—	8.51
常绿阔叶林	三峡库区	曾立雄, 2007	—	10.18
灌木林	三峡库区	曾立雄, 2007	—	7.51
草地	宁夏	刘延惠, 2011	—	0.49
草甸	宁夏	刘延惠, 2011	—	0.82
亚热带常绿针叶树	全球	IPCC, 2006	4.1	—

邓舒雨, 董向忠, 马明哲, 臧振华, 徐文婷, 赵常明, 谢宗强, 申国珍. 基于森林碳库动态评估神农架国家级自然保护区的保护成效. 生物多样性, 2018, 26(1): 27–35.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2017240>

附录4 研究区域不同土地利用类型的粗木质残体碳库碳储量
Appendix 4 The carbon storage of coarse woody debris carbon pool in different land use types in the study area

类型	研究范围	来源	生物量碳密度	生物量密度
Forest type	Study area	Reference	Carbon storage per hectare(t C/ha)	Biomass per hectare(t/ha)
松阔混交林	江西	吴春生, 2016	0.521±0.08	1.248±0.33
常绿阔叶林	江西	吴春生, 2016	4.781±0.37	11.293±1.23
针叶林	广东鼎湖山	吕琨珑, 2013	0.09	—
		唐旭利, 2005		
锐齿槲栎林	秦岭	张洋, 2012	5.58	—