

陕西省森林生态系统碳储量分布格局分析

崔高阳¹ 陈云明^{2,3*} 曹 扬^{2,3} 安淳淳¹

¹中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西杨凌 712100; ²西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; ³中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100

摘 要 为明晰陕西省森林生态系统碳储量分布格局, 基于2009年森林资源清查资料和2011年调查所得样地实测数据, 对陕西省森林生态系统碳储量、碳密度及其空间分布特征进行了研究分析。结果表明: 陕西省森林生态系统总碳储量为790.75 Tg, 土壤层、植被层和枯落物层碳储量分别占总碳储量的72.14%、26.52%和1.34%; 其中, 栎类碳储量在各森林类型中所占比重最大(44.17%), 中、幼龄林是陕西省森林生态系统碳储量的主要贡献者, 约占总碳储量的49%。陕西省森林生态系统平均碳密度为123.70 t·hm⁻², 土壤层最大, 枯落物层最小, 植被层居中; 碳密度均随龄级增加而升高, 同一龄级表现为天然林高于人工林生态系统。此外, 陕西省森林生态系统碳储量、碳密度分布格局不尽一致, 反映了森林覆盖面积及森林质量对碳储量的影响。未来应加强林地抚育管理水平, 增加造林再造林面积以增加碳储存, 应对全球气候变化。

关键词 碳储量, 森林生态系统, 龄级, 栎类, 碳汇潜力

引用格式: 崔高阳, 陈云明, 曹扬, 安淳淳 (2015). 陕西省森林生态系统碳储量分布格局分析. 植物生态学报, 39, 333–342. doi: 10.17521/cjpe.2015.0032

Analysis on carbon stock distribution patterns of forest ecosystems in Shaanxi Province

CUI Gao-Yang¹, CHEN Yun-Ming^{2,3*}, CAO Yang^{2,3}, and AN Chun-Chun¹

¹Research Center of Institute of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; ²State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; and ³Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China

Abstract

Aims The objective of this study was to understand the distribution patterns of carbon stock in forest ecosystems in Shaanxi Province following the implementation of the ecological restoration project—the Grain for Green—in the 90's of 20th century for combating the severe soil erosion and other environment problems.

Methods Based on forest resources inventory data and field measurements, we estimated carbon storage of tree, shrub, herb, litter, and soil layer within each forest ecosystem of Shaanxi Province.

Important findings Forest ecosystems in Shaanxi Province stored a total of 790.75 Tg C, and the proportion occupied by soil, vegetation and litter carbon were 72.14%, 26.52% and 1.34%, respectively. Carbon storage within *Quercus* spp. was the highest (44.17%) among all forest types. Given the large proportion of the areas occupied, the young and middle-aged forests accounted for almost half of the total carbon stores in forest ecosystems. The average carbon density of forest ecosystem was 123.70 t·hm⁻². Similar to the patterns among carbon pools, carbon density was also highest in soil, lowest in litter, and medium in vegetation for each forest type. Carbon density increased with stand age for natural and planted forest ecosystems, and was higher in the natural forest ecosystems than in the planted forests within the same stand ages. Differences in the spatial patterns between carbon stores and density indicate that carbon storage is related not only to forest quality, but also to forest areas. Therefore we could select tree species with high carbon concentration for reforestation and afforestation, and improve forest management practices to increase carbon sequestration potential, which would be beneficial to mitigation of global climate change.

Key words carbon stores, forest ecosystem, age class, *Quercus* spp., sequestration potential

Citation: Cui GY, Chen YM, Cao Y, An CC (2015). Analysis on carbon stock distribution patterns of forest ecosystems in Shaanxi Province. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 333–342. doi: 10.17521/cjpe. 2015.0032

森林生态系统作为陆地生态系统最大的碳库,在全球碳平衡中发挥着重要的作用。据估计,全球有46.3%的陆地有机碳储存在森林生态系统中,其中森林植被有机碳储量占整个陆地植被碳储量的77%,土壤碳储量约占陆地土壤总碳库的73% (Post *et al.*, 1982)。在国家和地区尺度上,国内外学者开展了大量的有关森林生态系统固碳特征及机制的研究(Botkin *et al.*, 1993; Simpson *et al.*, 1993; Dixon *et al.*, 1994; Fang *et al.*, 2001; 王效科等, 2001; Kurbánov & Post, 2002; 徐新良等, 2007; Hu & Wang, 2008; Yolasigmaz & Keleş, 2009)。例如Botkin等(1993)和Simpson等(1993)、Fang等(2001)和王效科等(2001)、Yolasigmaz和Keleş (2009)分别对北美、中国、土耳其等地区的森林碳储量等固碳特征进行了研究。但这些结果大多是针对森林乔木层的研究,没有充分考虑林下灌草层、凋落物层及土壤层,制约着对森林生态系统固碳特征、碳汇功能的全面理解,也不利于森林生态系统的固碳增汇经营管理。近年来,我国学者分别在四川(黄从德等, 2008)、贵州(李默然和丁贵杰, 2013)、海南(Ren *et al.*, 2014)、吉林(王新闯等, 2011)、广东(张修玉等, 2011)、湖北(王鹏程等, 2009)以及深圳(谭一凡等, 2013)等地开展了深入全面的包括林下植被、凋落物、土壤在内的森林生态系统固碳特征研究,进一步深化了对森林生态系统碳汇功能的认识。但有关陕西省森林生态系统碳储量、碳密度等固碳特征及功能的研究尚未见报道,以前的研究仅停留在关注森林乔木层碳储量(马琪等, 2012; 曹扬等, 2014)。

陕西省是我国水土流失较为严重的区域,在通过天然林资源保护工程、退耕还林工程、重点防护林工程、水土保持工程和天然草场恢复与建设工程等一批重点生态建设工程实施后,陕西省植被覆盖得到了很大的改善。为此,我们根据实地调查并结合陕西省2009年森林资源二类清查资料,对陕西省森林生态系统碳储量、碳密度及其空间分布特征进行研究,试图了解大规模植被恢复后陕西省森林生态系统固碳现状及潜力,为未来固碳增汇经营管理和规划提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

陕西省位于中国西北部(105.50°–111.25° E,

31.70°–39.60° N),南北长约880 km,东西宽约500 km,面积为 $20.58 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。地跨北温带和亚热带,整体属大陆季风性气候,年降水量576.9 mm,年平均气温13.0 °C,无霜期218天左右。由于南北狭长,所跨纬度多,境内南北间气候差异明显。长城沿线以北为温带干旱半干旱气候,陕北其余地区和关中平原为暖温带半湿润气候,陕南盆地为北亚热带湿润气候,山地大部为暖温带湿润气候。类型多样的气候资源蕴育出丰富的植被群落,由北向南依次为温带草原、暖温带森林草原落叶阔叶林、暖温带落叶阔叶林、北亚热带含有常绿阔叶树种的落叶阔叶林植被。据全国第八次森林资源连续清查成果数据显示,陕西省森林覆盖率达41.4%,主要分布在秦岭、巴山、关山、黄龙山和桥山林区。这5大林区有林地面积占全省的79%,林分蓄积量占全省的94%,且以天然次生林为主(马长欣等, 2010; 曹扬等, 2014)。

1.2 研究方法

1.2.1 资料来源及样地设置

本次研究主要依据陕西省2009年公布的森林资源连续清查资料对陕西森林生态系统碳储量、碳密度等固碳特征进行分析。清查资料主要包括地理信息、林地信息、森林类型、面积、蓄积量等。由于森林资源连续清查资料中只有乔木层的相关数据,而没有林下灌草、枯落物、土壤等各层数据信息,本研究根据清查资料中公布的16种森林类型的面积及蓄积量比重,在全省布设121块涵盖这些主要森林类型的样地,调查样地内乔木、灌木、草本、枯落物、土壤各层碳储量,并将在各森林类型对应样地中得到的乔木层与其他各层间碳储量的转换关系,用于森林资源清查资料中除乔木层外其他各层碳储量的推算。

样地设置如下:落叶松(*Larix gmelinii*)样地1块、油松(*Pinus tabulaeformis*)样地13块、华山松(*P. armandii*)样地4块、马尾松(*P. massoniana*)样地3块、其他松类样地1块、柏木(*Cupressus funebris*)样地2块、栎类(*Quercus* spp.)样地55块、桦木(*Betula* spp.)样地8块、硬阔类(Hardwood)样地5块、杨树(*Populus* spp.)样地13块、软阔类(Softwood)样地1块、阔叶混交林样地8块、针阔混交林样地7块。其中,冷云杉(冷杉(*Abies fabri*)和云杉(*Picea asperata*))、铁杉(*Tsuga chinensis*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)

3种森林类型由于没有布设相应的样地,就以所有121块样地中针叶树种的转换关系推算这3种森林类型在森林资源清查资料中所对应的林下灌草层、凋落物层、土壤层碳储量。本文中的栎类主要包括辽东栎(*Quercus wutaishanica*)、麻栎(*Q. acutissima*)、栓皮栎(*Q. variabilis*)、刺叶栎(*Q. spinosa*)、槲栎(*Q. aliena*)等栎属树种;桦木主要包括白桦(*Betula platyphylla*)、红桦(*B. albosinensis*)等;杨树主要包括毛白杨(*Populus tomentosa*)、山杨(*Populus davidiana*)、青杨(*Populus cathayana*)等;硬阔类则主要包括胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、榆树(*Ulmus pumila*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、椴树(*Tilia tuan*)等;软阔类包括垂柳(*Salix babylonica*)、泡桐(*Paulownia* spp.)、漆树(*Toxicodendron vernicifluum*)等。

每块样地设置3个重复样方,每个样方大小为20 m × 30 m,样方内乔木每木检尺,并记录地形、地貌等环境因子;每个样方内设置3个2 m × 2 m的灌木小样方,在每个灌木小样方内设置一个1 m × 1 m的草本小样方,在样方内另外随机设置3个1 m × 1 m的枯落物小样方。采用异速生长方程测算乔木层生物量,全收获法用于林下灌草(地上、地下)、枯落物层生物量的测定,同时取一部分乔木、灌草、枯落物各器官样品用于含碳量的测定。在每个样方内取3个1 m深的土芯(分为0–10、10–20、20–30、30–50、50–100 cm 5层,每层混合取样)用于各层土壤碳含量的测定,同时挖取一个1 m深的土壤剖面用于相应土层容重的测定。采用重铬酸钾氧化法测定以上各样品的碳含量(Liu *et al.*, 1996)。

1.2.2 样地乔木层碳储量测定

根据搜集的适合陕西省各主要树种的异速生长方程求算各样方内所有乔木的生物量,乘以相应器官含碳量累加得到样方内乔木层碳储量。

1.2.3 样地林下灌草、枯落物层碳储量测定

采用全收获法收集各灌木、草本、枯落物小样方内所有样品称其总鲜质量,并取部分样品带回实验室烘干测算含水率,根据含水率将各小样方灌木、草本、枯落物鲜质量换算至其干质量并乘以对应器官含碳量求得样方林下灌草、枯落物层碳储量。

1.2.4 样地土壤层碳储量测定

根据分层采样测定的土壤有机碳含量、容重和对应的土壤层厚度分别计算0–10、10–20、20–30、

30–50和50–100 cm土壤的有机碳储量(厚度不及100 cm的土壤剖面以实际深度计算),各层碳储量累加即为土壤有机碳的储量,以t·hm⁻²表示,公式如下:

$$C_{sOCI} = \sum_{j=1}^5 \left[\frac{1}{10} SOC_{Ci,j} \times BD_{i,j} \times Depth_{i,j} \right]$$

式中, C_{sOCI} 为样方*i*土壤有机碳储量(t·hm⁻²); $SOC_{Ci,j}$ 是样方*i*第*j*层($j = 1, 2, 3, 4, 5$ 分别代表0–10 cm, 10–20 cm, 20–30 cm, 30–50 cm, 50–100 cm)土壤有机碳含量(g·kg⁻¹); $BD_{i,j}$ 是第*j*层土壤容重(g·cm⁻³); $Depth_{i,j}$ 是第*j*层土壤的厚度(cm)。

1.2.5 基于森林资源连续清查资料的乔木层碳储量估算

采用森林乔木生物量-蓄积量转换关系法(徐嵩龄等, 1996; Fang *et al.*, 1998)推算森林资源连续清查资料中各森林类型乔木层生物量,公式如下:

$$B = aV + b$$

式中 B 、 V 分别为林分单位面积生物量和单位面积蓄积量,单位分别为t·hm⁻²和m³·hm⁻²; a 和 b 则为对应于森林类型乔木生物量-蓄积量转换方程的参数。各森林类型的转换参数从之前发表的文献中收集(详见表1)。

将森林资源连续清查资料中各森林类型各龄组的单位面积乔木层蓄积量代入转换方程求得单位面积生物量,之后将各龄组单位面积生物量加权平均分别求得全省及各市两个尺度上各主要森林类型乔木层单位面积生物量,与对应森林类型碳含量相乘即为各森林类型在全省及市两个尺度上单位面积乔木层碳储量。其中各森林类型乔木碳含量由我们样地调查中采集的相应优势树种乔木各器官的碳含量加权平均而来,冷云杉、铁杉、杉木3个森林类型由于没有布设相应样地,它们的乔木碳含量由相近针叶森林类型求平均值而来。本文各森林类型共包括5个林龄组:幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林、过熟林,各龄组的划分及林龄范围因树种而异,具体可参考森林资源规划设计调查主要技术规定(西北林业调查规划设计院, 2004)。

1.2.6 森林碳储量和碳密度分布图

采用Arcgis 10.0地理统计分析软件,基于陕西省地区行政图和各市森林生态系统碳贮量和碳密度数据,对陕西省森林生态系统碳贮量和碳密度进行地理空间分析,得出陕西省森林生态系统碳贮量和碳密度地理空间分布图。

表1 各森林类型林分生物量-蓄积量转换方程
Table 1 Biomass-volume conversion formula for different forest types

森林类型 Forest type	生物量-蓄积量转换方程 Biomass-volume conversion formula	<i>n</i>	<i>R</i> ²	参考文献 Reference
冷云杉 <i>Abies fabri</i> and <i>Picea asperata</i>	<i>B</i> = 0.4642 <i>V</i> + 47.499	13	0.98	Fang <i>et al.</i> , 1998; Liu <i>et al.</i> , 2000
铁杉 <i>Tsuga chinensis</i>	<i>B</i> = 0.4158 <i>V</i> + 41.3318	21	0.88	Liu <i>et al.</i> , 2000; Fang <i>et al.</i> , 2001
落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	<i>B</i> = 0.967 <i>V</i> + 5.7598	8	0.98	Fang <i>et al.</i> , 1998; Liu <i>et al.</i> , 2000
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	<i>B</i> = 0.7554 <i>V</i> + 5.0928	82	0.96	Fang <i>et al.</i> , 1998; Liu <i>et al.</i> , 2000
华山松 <i>Pinus armandii</i>	<i>B</i> = 0.5856 <i>V</i> + 18.7435	9	0.90	Liu <i>et al.</i> , 2000; Fang <i>et al.</i> , 2001
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	<i>B</i> = 0.52 <i>V</i>	12	0.92	Fang <i>et al.</i> , 1998; Liu <i>et al.</i> , 2000
其他松类 Other pines and conifer forests	<i>B</i> = 0.5168 <i>V</i> + 33.2378	16	0.94	Fang <i>et al.</i> , 1998, 2001
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	<i>B</i> = 0.3999 <i>V</i> + 22.541	56	0.95	Fang <i>et al.</i> , 2001
柏木 <i>Cupressus funebris</i>	<i>B</i> = 0.6129 <i>V</i> + 26.1451	11	0.96	Fang <i>et al.</i> , 1998; Liu <i>et al.</i> , 2000
栎类 <i>Quercus</i> spp.	<i>B</i> = 1.3288 <i>V</i> - 3.8999	3	1.00	Fang <i>et al.</i> , 1998; Liu <i>et al.</i> , 2000
桦木 <i>Betula</i> spp.	<i>B</i> = 0.9644 <i>V</i> + 0.8485	4	0.95	Fang <i>et al.</i> , 1998; Liu <i>et al.</i> , 2000
硬阔类 Hardwood	<i>B</i> = 0.7564 <i>V</i> + 8.3103	11	0.97	Fang <i>et al.</i> , 1998
杨树 <i>Populus</i> spp.	<i>B</i> = 0.4754 <i>V</i> + 30.6034	10	0.86	Fang <i>et al.</i> , 2001
软阔类 Softwood	<i>B</i> = 1.0357 <i>V</i> + 8.0591	21	0.83	Fang <i>et al.</i> , 2001
阔叶混交林 Mixed broad-leaf forest	<i>B</i> = 0.6255 <i>V</i> + 91.0013	19	0.86	Fang <i>et al.</i> , 1998
针阔混交林 Mixed coniferous and broad-leaf forest	<i>B</i> = 0.8019 <i>V</i> + 12.2799	9	0.99	Fang <i>et al.</i> , 2001

B, 林分单位面积生物量(t·hm⁻²); *n*, 回归方程中所使用的样本数; *R*², 回归方程的决定系数; *V*, 单位面积蓄积量(m³·hm⁻²)。
B, forest biomass per unit area (t·hm⁻²); *n*, number of trees used in developing the regression model; *R*², coefficient of determination in the regression model; *V*, forest wood volume per unit area (m³·hm⁻²).

2 结果

2.1 陕西省森林生态系统碳密度和碳储量

陕西省森林生态系统平均碳密度为123.70 t·hm⁻²; 其中土壤层碳密度最大(89.24 t·hm⁻²), 其次为植被层(32.80 t·hm⁻²)和枯落物层(1.66 t·hm⁻²)(表2)。各森林类型中, 乔木层、灌木层、枯落物层碳密度以冷云杉、铁杉、桦木、阔叶混交林4种森林类型较大, 草本层碳密度以桦木、硬阔类、软阔类、阔叶混交林4种森林类型较大; 而乔木层碳密度最小的为马尾松林, 灌木层碳密度柏木林最小, 草本层、枯落物层碳密度最小的均为其他松类。各森林类型乔木层、灌木层、草本层、枯落物层碳密度分别介于13.59–69.12 t·hm⁻²、0.30–2.20 t·hm⁻²、0.05–1.02 t·hm⁻²、0.46–3.28 t·hm⁻²。土壤层碳密度和森林生态系统碳密度均以阔叶混交林最大, 马尾松林最小, 其碳密度范围分别介于81.55–97.67 t·hm⁻²、96.80–173.08 t·hm⁻² (表2)。各森林类型乔木层、灌木层、草本层、枯落物层碳密度波动较大, 变异系数均在50%左右, 土壤层和森林生态系统碳密度波动较小, 其中土壤层波动最小, 变异系数仅为5.19%。

陕西省森林生态系统总碳储量为790.75 Tg, 其中土壤层碳储量最高, 为570.49 Tg, 其他各层碳储量分别为: 乔木层200.59 Tg、灌木层6.00 Tg、草本层3.06 Tg、枯落物层10.60 Tg (表2)。以森林各个层次而言, 土壤层和乔木层两层碳储量之和占到陕西省森林生态系统总碳储量的97.51%, 是陕西森林生态系统的主要碳储存库。在各森林类型中, 栎类和硬阔类碳储量分别占到陕西省森林生态系统总碳储量的44.18%和20.66%, 是全省森林生态系统碳储量的主要贡献者(表2)。

2.2 陕西省人工林、天然林生态系统不同龄组碳密度、碳储量变化

陕西省人工林、天然林生态系统碳密度均表现为过熟林>成熟林>近熟林>中龄林>幼龄林(人工林生态系统中成熟林碳密度低于近熟林), 且同一龄组内碳密度都为天然林高于人工林, 说明随着林木生长, 其碳储能力提高, 而天然林碳储能力优于人工林。但是随着进入生长后期, 天然林、人工林生态系统固碳能力呈现下降趋势, 碳密度增速减缓。其中人工林生态系统各龄组间碳密度增量为27.96、7.99、-6.67、9.25 t·hm⁻²; 天然林生态系统各龄组

表2 陕西省森林生态系统碳密度、面积及总碳储量
Table 2 Forest ecosystem carbon density, area, and total stores in Shaanxi Province

森林类型 Forest type	面积 Area (100 hm ²)	碳密度Carbon density (t·hm ⁻²)						森林生态系统 Forest ecosystem	生态系统总碳 储量(Tg) Total forest ecosystem car- bon stores
		乔木层 Tree layer	灌木层 Shrub layer	草本层 Herb layer	枯落物层 Litter layer	土壤层 Soil layer			
冷云杉 <i>Abies fabri</i> and <i>Picea asperata</i>	448	59.27	1.72	0.62	3.00	96.18	160.78		7.20
铁杉 <i>Tsuga chinensis</i>	192	63.49	1.84	0.66	3.21	96.87	166.07		3.19
落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	128	41.34	0.46	0.43	1.35	92.75	136.33		1.75
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	5 533	20.47	0.52	0.25	1.88	85.49	108.61		60.09
华山松 <i>Pinus armandii</i>	1 215	29.60	1.14	0.29	1.84	89.39	122.26		14.85
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	1 471	13.59	0.53	0.12	1.00	81.55	96.80		14.24
其他松类 Other pines and conifer forests	96	23.83	0.32	0.05	0.46	87.16	111.81		1.07
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	1 024	21.41	0.62	0.22	1.08	85.98	109.32		11.19
柏木 <i>Cupressus funebris</i>	1 536	19.67	0.30	0.42	1.33	84.98	106.70		16.39
栎类 <i>Quercus</i> spp.	26 420	37.52	1.00	0.28	1.84	91.58	132.22		349.32
桦木 <i>Betula</i> spp.	2 208	45.14	1.83	0.87	3.03	93.34	144.20		31.84
硬阔类 Hardwood	14 483	23.28	0.80	0.72	1.41	86.59	112.81		163.38
杨树 <i>Populus</i> spp.	2 587	27.57	1.38	0.44	0.79	88.41	118.59		30.68
软阔类 Softwood	5 658	32.21	0.95	1.02	1.06	89.31	124.55		70.47
阔叶混交林 Mixed broad-leaf forest	671	69.12	2.20	0.81	3.28	97.67	173.08		11.61
针阔混交林 Mixed coniferous and broad-leaf forest	256	39.73	1.01	0.30	2.02	92.22	135.29		3.46
加权平均值 Weighted average		31.38	0.94	0.48	1.66	89.24	123.70		
总计 Total (Tg)	63 926	200.59 (25.36%)	6.00 (0.76%)	3.06 (0.38%)	10.60 (1.35%)	570.49 (72.15%)			790.75 (100%)

表中括号内数字为各层碳储量占总碳储量的比例。
Values in parentheses are the corresponding proportions of carbon stored in different layers.

间碳密度增量为29.58、20.13、8.11、6.62 t·hm⁻²(图1A)。陕西省各龄组碳储量中以中、幼龄林所占比重较大, 两者碳储量占到全省碳储量的49%, 其中天然林生态系统碳储量以中龄林最高(177.30 Tg), 人工林生态系统碳储量则以幼龄林最高(47.54 Tg), 各龄组中均表现为天然林生态系统碳储量高于人工林。天然林生态系统碳储量远远高于人工林, 占全省总碳储量的86%(图1B)。

在人工林和天然林中, 各森林类型生态系统碳密度都随着龄级的增加而升高。但是, 天然铁杉林碳密度则呈现降低趋势, 中龄林、近熟林、过熟林碳密度依次为170.79、163.97、148.98 t·hm⁻²; 天然林中的杉木林碳密度则呈现先升后降的趋势, 5个龄组的碳密度依次为93.89、106.94、123.79、113.10、110.67 t·hm⁻²。同一森林类型中, 同一龄组天然林的碳密度大多高于人工林(表3, 表4)。在天然林中, 各森林类型各龄组林分碳储量均以栎类为最高。对于人工林而言, 硬阔类生态系统碳储量最高, 其幼龄林碳密度达到77.42 t·hm⁻², 而其他森林类型缺乏相

应龄组分布, 无法判断其碳储量分布格局(表3, 表4)。

2.3 陕西省森林生态系统碳密度和碳储量地理空间分布格局

陕西省森林生态系统碳密度以关中宝鸡(131.06 t·hm⁻²)、西安(133.40 t·hm⁻²)和陕南汉中(123.52 t·hm⁻²)三地较高, 商洛地区最低(103.36 t·hm⁻²); 其他各地碳密度范围介于112.04–119.50 t·hm⁻²之间(图2)。陕西省森林生态系统碳储量分布格局则与碳密度稍有不同, 主要分布在天然林密集的关山、秦岭、巴山、黄龙山、桥山这5大林区; 其中, 以位于秦岭、巴山之间的汉中、安康和位于黄龙山、桥山的延安三地较高, 碳储量分别为180.18、141.08、159.62 Tg; 其他各地区的碳储量则较低, 处于13.17–102.18 Tg之间, 以铜川市最低(图2)。

3 讨论

3.1 陕西省森林生态系统碳储量、碳密度特征

森林生态系统作为陆地碳循环的重要组成部分

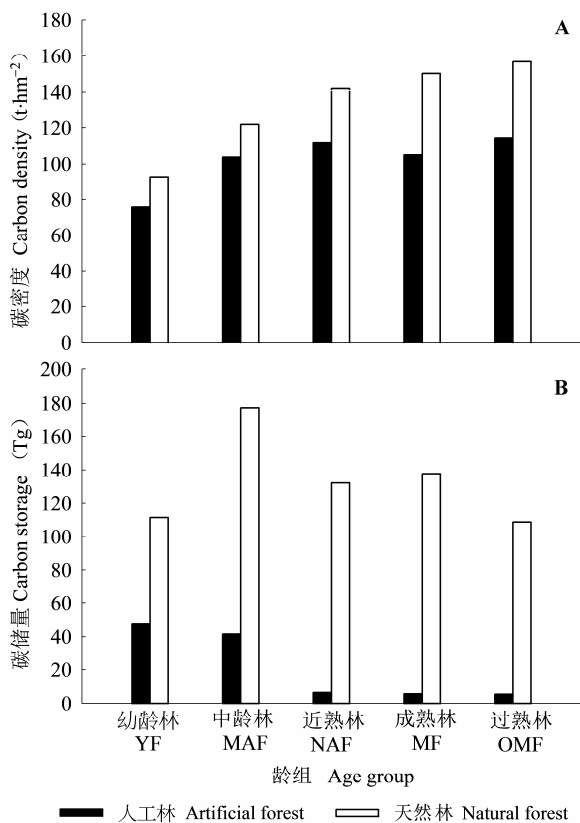


图1 陕西省人工林、天然林生态系统各龄组碳密度(A)、碳储量(B)。

Fig. 1 Carbon density (A) and carbon stores (B) in different age groups of planted and natural forest ecosystems in Shaanxi Province. YF, MAF, NAF, MF, OMF refer to young forest, middle-aged forest, near-mature forest, mature forest, and over-mature forest, respectively.

分, 其固碳特征一直备受关注。本研究根据森林资源清查资料并结合实地调查对陕西省森林生态系统碳密度、碳储量固碳特征进行了分析, 结果表明陕西省森林生态系统总碳储量为790.75 Tg, 其中土壤层、植被层、枯落物层分别为570.49、209.66、10.60 Tg, 所占总储量比重依次为72.15%、26.51%、1.34%。这一比例关系和周玉荣等(2000)在我国主要森林生态系统碳储量碳平衡研究中的结果相似。其中土壤碳库约是植被碳库的3倍, 超过2/3的森林碳储量都储存在土壤中, 说明土壤碳库作为森林生态系统内最大的碳库, 在维持稳定森林碳储量方面具有重要作用, 是森林生态系统碳平衡和碳循环的关键组成部分, 在未来应对全球气候变化中占有重要的地位。但是陕西省森林生态系统以及土壤、植被、枯落物各层平均碳密度却均小于周玉荣等(2000)得到的对应碳密度, 本研究中所得到的陕西

省森林生态系统土壤层、植被层、枯落物层碳密度分别为89.24、32.80、1.66 t·hm⁻²; 周玉荣等(2000)研究所得全国森林生态系统对应各层平均碳密度为193.55、57.07、8.21 t·hm⁻²。其中陕西省森林生态系统植被层碳密度和王效科等(2001)关于中国森林生态系统植物碳储量研究中的结果相近(中国植物碳密度介于36–42 t·hm⁻²); 土壤层碳密度则和李克让(2002)有关中国森林有机碳密度研究中的结果相近(土壤碳密度为81.39 t·hm⁻²)。

以上这些研究结果一方面说明在有关全国大尺度的碳储量、碳密度研究中, 不同的研究者所使用的方法不同会导致其结果相差很大。例如: 周玉荣等(2000)是通过收集以往相关资料文献经过整合分析得出的结果, 有关土壤的数据时间跨度长达20年, 难免会影响其结果的估算精度, 且存在样地尺度推演的高估效应; 而王效科等(2001)、李克让(2002)则分别基于全国第三次森林资源清查资料, 采用森林面积加权法估算中国森林植被和土壤有机碳密度, 所用数据方法较为可靠, 但李克让的研究中也因未考虑土壤类型而存在局限。因而, 很有必要开展省级小区域范围内的固碳特征研究以提高全国大尺度固碳特征研究的精度。另外一方面也说明了陕西省森林生态系统碳密度过低, 森林质量较差。与同时期的四川(黄从德等, 2008)、海南(Ren *et al.*, 2014)、吉林(王新闯等, 2011)等省份相比较, 陕西省森林生态系统碳密度为123.70 t·hm⁻², 低于前三者的161.16、163.7和225.30 t·hm⁻², 这主要是由于陕西省森林碳密度较小的中、幼龄林所占比重过大所致。陕西省森林中、幼龄林面积占全省森林总面积的57.72%, 人工林中、幼龄林更是占到了86.51%。导致这一结果的出现是因为20世纪陕西省为治理严重的水土流失等环境问题实施了一大批的重点生态恢复工程, 营造了大批人工林。虽然中、幼龄林比重较大, 但是通过合理经营, 随着林木生长, 其碳密度也会增大, 能够进一步增加陕西省森林生态系统碳储量, 提升其碳汇功能。

自20世纪80年代起, 经过一批重点生态建设工程实施, 陕西省植被覆盖得到了很大的提升, 森林覆盖率由第三次森林资源清查时(1984–1988年)的21.09%提升至第八次(2009–2013年)的41.4%, 森林植被碳储量也由127.92 Tg (1984–1988年) (王效科等, 2001)增加至现在的200.59 Tg (2004–2008年), 30

表3 陕西省天然林各龄组林分森林生态系统碳密度和碳储量
Table 3 Carbon density and stores of different age groups in natural forest ecosystems of Shaanxi Province

森林类型 Forest type	幼龄林 Young forest		中龄林 Middle-aged forest		近熟林 Near-mature forest		成熟林 Mature forest		过熟林 Over-mature forest	
	碳密度 C density	碳储量 C stores	碳密度 C density	碳储量 C stores	碳密度 C density	碳储量 C stores	碳密度 C density	碳储量 C stores	碳密度 C density	碳储量 C stores
	(t·hm ⁻²)	(Tg)	(t·hm ⁻²)	(Tg)	(t·hm ⁻²)	(Tg)	(t·hm ⁻²)	(Tg)	(t·hm ⁻²)	(Tg)
冷云杉 <i>Abies fabri</i> and <i>Picea asperata</i>			128.85	0.41			150.38	1.92	189.48	3.64
铁杉 <i>Tsuga chinensis</i>			170.79	2.19	163.97	0.52			148.98	0.48
落叶松 <i>Larix gmelinii</i>							188.17	0.60		
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	83.06	4.51	106.75	16.04	135.13	6.05	142.66	5.48	162.70	2.60
华山松 <i>Pinus armandii</i>	100.26	0.32	126.62	6.47	121.06	1.55	137.27	1.76		
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	87.93	1.69	100.68	6.44						
其他松类 Other pines and conifer forests					116.81	0.37	116.77	0.37		
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	97.53	0.62	115.60	1.48	108.98	2.09			136.78	0.88
柏木 <i>Cupressus funebris</i>	102.92	3.29	108.84	3.13	116.87	2.62	117.52	3.01		
栎类 <i>Quercus</i> spp.	91.06	73.67	129.90	72.73	157.16	64.85	161.54	66.15	156.66	61.13
桦木 <i>Betula</i> spp.	90.50	2.61	133.81	6.42	136.42	6.11	145.59	5.12	176.42	11.29
硬阔类 Hardwood	96.29	14.79	118.78	38.36	126.63	19.83	135.45	33.78	137.55	14.50
杨树 <i>Populus</i> spp.	105.15	1.68	112.17	4.30	117.79	4.52	131.30	3.36	137.38	5.26
软阔类 Softwood	88.06	6.19	110.59	15.17	132.96	20.83	157.64	12.61	168.39	7.00
阔叶混交林 Mixed broad-leaf forest	147.07	1.88	171.48	3.82	174.80	2.80	175.70	1.12	205.50	1.97
针阔混交林 Mixed coniferous and broad-leaf forest	92.96	0.30	99.33	0.32			157.20	2.52		
总计 Total	92.29*	111.56	121.86*	177.30	141.99*	132.15	150.11*	137.81	156.72*	108.75

表中标*的数字分别为各龄组碳密度的加权平均值。
Values in the table designated with * are weighted averages of carbon density in each of the age groups.

表4 陕西省人工林各龄组森林生态系统碳密度和碳储量
Table 4 Carbon density and stores of different age groups in planted forest ecosystems of Shaanxi Province

森林类型 Forest type	幼龄林 Young forest		中龄林 Middle-aged forest		近熟林 Near-mature forest		成熟林 Mature forest		过熟林 Over-mature forest	
	碳密度 C density	碳储量 C stores	碳密度 C density	碳储量 C stores	碳密度 C density	碳储量 C stores	碳密度 C density	碳储量 C stores	碳密度 C density	碳储量 C stores
	(t·hm ⁻²)	(Tg)	(t·hm ⁻²)	(Tg)	(t·hm ⁻²)	(Tg)	(t·hm ⁻²)	(Tg)	(t·hm ⁻²)	(Tg)
冷云杉 <i>Abies fabri</i> and <i>Picea asperata</i>	121.15	0.78	131.09	0.42						
落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	75.58	0.24	132.60	0.85						
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	78.20	6.51	105.78	16.91	133.72	0.86				
华山松 <i>Pinus armandii</i>	94.16	0.60	116.97	4.12						
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	93.30	2.39	96.49	3.70						
其他松类 Other pines and conifer forests	101.13	0.32								
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	93.89	1.80	106.94	2.40	123.79	0.79	113.10	0.72	110.67	0.35
柏木 <i>Cupressus funebris</i>	93.50	3.29	102.21	0.98						
栎类 <i>Quercus</i> spp.			93.27	1.49						
桦木 <i>Betula</i> spp.										
硬阔类 Hardwood	77.42	23.75	92.62	6.81	103.03	3.30	101.29	4.54	124.46	0.40
杨树 <i>Populus</i> spp.	105.75	3.36	114.94	2.56	105.51	0.34	143.46	0.46	113.92	4.74
软阔类 Softwood	73.51	4.23	98.61	1.26	120.72	1.16				
阔叶混交林 Mixed broad-leaf forest										
针阔混交林 Mixed coniferous and broad-leaf forest	83.24	0.27								
总计 Total	75.88*	47.55	103.85*	41.50	111.83*	6.44	105.16*	5.72	114.41*	5.49

表中标*的数字分别为各龄组碳密度的加权平均值。由于铁杉没有人工林分布, 所以表中并未给出其相关数据。
Values in the table designated with * are weighted averages of carbon density in each of the age groups. Because there was no planted *Tsuga chinensis* forest stand, the table does not give the relevant data on this forest type.

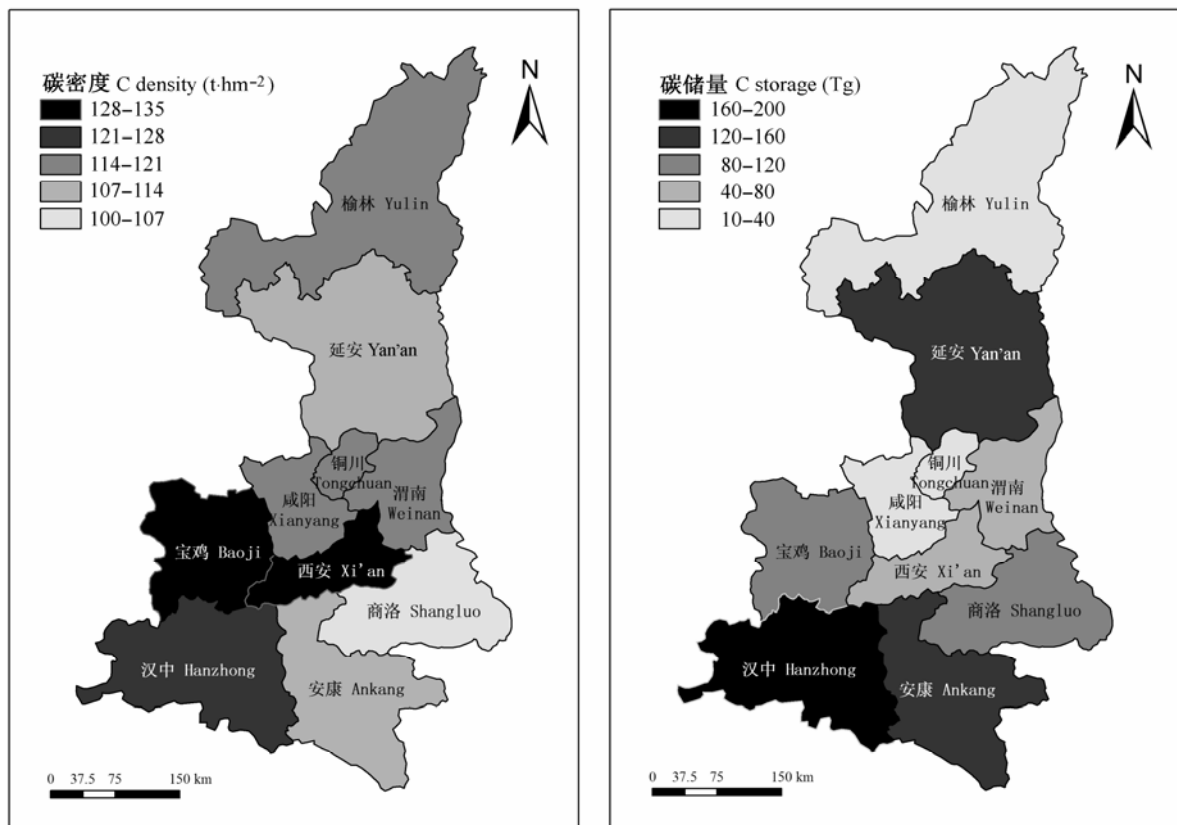


图2 陕西省森林生态系统碳密度(左)、碳储量(右)空间分布格局。

Fig. 2 Spatial distribution patterns of forest ecosystem carbon density (left) and carbon stores (right) in Shaanxi Province.

年间共增加了72.67 Tg, 平均每年增加量为2.42 Tg C, 表现出明显的碳汇效应, 与Fang等(2001)关于中国森林植被碳储量变化结果一致。

3.2 陕西省森林生态系统碳储量、碳密度空间格局

陕西省森林生态系统碳储量和碳密度空间分布格局并不一致, 碳密度以中西部的宝鸡、西安、汉中三地较高, 而碳储量则以位于秦巴山地的汉中、安康和位于黄龙山、桥山的延安三地较大。两者之间的差异性则是由于各地区森林覆盖面积不同所致, 例如尽管延安、安康两地碳密度(112.04、112.40 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)相比全省平均碳密度(123.70 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)处于较低水平, 但两地森林覆盖面积较大, 占到了全省森林面积的19.75%、17.40% (分别为1.4247和1.2551万 km^2), 所以才导致其碳储量在全省所占比重较大。这也从一个方面说明了要提高森林生态系统碳储量不仅要通过对现有林地合理经营抚育提高森林质量, 还要通过造林再造林以增加森林覆盖面积。陕西省除宝鸡、西安、汉中外, 各地区森林生态系统

碳密度均低于全省平均水平, 所以未来通过合理的抚育管理措施提高林地生产力, 能够进一步提升陕西省森林碳汇潜力。

3.3 森林生态系统碳储量估算的不确定性

自全球碳循环中碳失汇问题提出后, 有关研究表明北半球中高纬度陆地生态系统(主要是森林生态系统)是巨大碳汇(Reiners, 1973; Tans *et al.*, 1990; Kauppi *et al.*, 1992; Sedjo, 1992; Dixon *et al.*, 1994; Keeling *et al.*, 1996)。关于森林生态系统碳汇功能的研究也受到了越来越多的重视, 国内外开展了大量有关其固碳现状、速率、潜力的研究, 以期明晰森林生态系统在全球碳循环中的作用。森林生态系统碳库是由乔木层、林下灌草层、枯落物层、土壤层这4部分碳库组成。前期的研究中一般只关注森林乔木层或土壤单一层碳库, 并没有将植被、枯落物、土壤作为一个整体进行研究分析, 不能很好地了解森林生态系统碳汇功能特征, 且在大尺度范围内有关森林固碳的研究, 不同的研究者由于使用的方法

不同给碳储量的估算带来了很大的不确定性(周玉荣等, 2000; Fang *et al.*, 2001; 王效科等, 2001; 李克让, 2002; 徐新良等, 2007)。例如Fang等(2001)、徐新良等(2007)根据国家第一次至第五次森林资源清查资料分别采用不考虑林龄、考虑林龄的生物量-蓄积量函数关系估算全国森林植被碳储量, 前者森林植被碳储量比后者的估算偏高12%–20%, 而森林碳密度比后者的估算偏高12%–25%。因此很有必要采用统一的方法, 在中小尺度上开展森林固碳特征研究, 以减少大尺度研究中带来的误差, 提高森林固碳特征研究结果的精度。

本研究所采用的方法是基于森林资源清查资料并结合样地实地调查, 首先运用徐嵩龄等(1996)、Fang等(1998, 2001)、刘国华等(2000)研究所得的生物量转换因子连续函数法测算乔木层碳储量, 然后根据在样地调查中所获得的各层间碳库转换关系推算森林资源清查资料中除乔木层外其他各层的碳储量, 从而保证了森林生态系统各碳库储量估算时间的一致性。而同期四川(黄从德等, 2008)、吉林(王新闯等, 2011)、三峡(王鹏程等, 2009)等其他省份和地区开展的研究所, 虽然采用的方法大致一样, 但在估算林下灌草、枯落物、土壤各层碳储量时, 只是根据植被类型法将样地调查中所获得的各森林类型灌草层、枯落物层、土壤层碳储量进行了平均, 以代表各森林类型相应碳库储量, 尽管在统计学上是合理的, 但由于森林资源清查数据与样地调查数据的时间不一致, 造成所计算的乔木层碳储量和其他层碳储量并没有处于同一个时间点上, 并不能准确真实地反映森林的固碳现状, 且计算中大多采用0.5作为乔木层生物量与碳储量的转换系数, 而没有采用各树种实测含碳量, 增大了估算结果的误差。

森林固碳现状的准确评估是后续固碳速率、潜力及机制分析的重要基础, 是理解森林生态系统在全球碳平衡和碳循环中所处地位的重要手段。基于各种估算方法所带来的不确定性, 采用统一合理稳健的方法在中小尺度上开展森林固碳研究是未来国家及区域尺度进行全球碳循环研究的稳固保障。未来应加强对各种估算方法的评价筛选, 以减少估算结果的不确定性。

基金项目 国家自然科学基金(41201088和41371506)、中国科学院“西部之光”和中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050203-05)。

致谢 感谢陕西省林业厅和各市林业部门在野外采样调查工作中的支持和配合。

参考文献

- Botkin DB, Simpson LG, Nisbet RA (1993). Biomass and carbon storage of the North American deciduous forest. *Bio-geochemistry*, 20, 1–17.
- Cao Y, Chen YM, Jin B, Qu M (2014). Carbon storage and density of forest vegetation and its spatial distribution pattern in Shaanxi Province. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 28(9), 69–73. (in Chinese with English abstract) [曹扬, 陈云明, 晋蓓, 渠美 (2014). 陕西省森林植被碳储量、碳密度及其空间分布格局. 干旱区资源与环境, 28(9), 69–73.]
- 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.
- 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.
- Fang JY, Wang GG, Liu GH, Xu SL (1998). Forest biomass of China: An estimate based on the biomass-volume relationship. *Ecological Applications*, 8, 1084–1091.
- Huang CD, Zhang J, Yang WQ, Zhang GQ (2008). Characteristics of carbon stock in artificial forest ecosystem in Sichuan Province of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19, 1644–1650. (in Chinese with English abstract) [黄从德, 张健, 杨万勤, 张国庆 (2008). 四川人工林生态系统碳储量特征. 应用生态学报, 19, 1644–1650.]
- Hu HF, Wang GG (2008). Changes in forest biomass carbon storage in the South Carolina Piedmont between 1936 and 2005. *Forest Ecology and Management*, 255, 1400–1408.
- Kauppi PE, Mielikäinen K, Kuusela K (1992). Biomass and carbon budget of European forests, 1971 to 1990. *Science*, 256, 70–74.
- Keeling RF, Piper SC, Heimann M (1996). Global and hemispheric CO₂ sinks deduced from changes in atmospheric O₂ concentration. *Nature*, 381, 218–221.
- Kurbanov EA, Post WM (2002). Changes in area and carbon in forests of the Middle Zavolgie: A regional case study of Russian forests. *Climatic Change*, 55, 157–171.
- Liu GH, Fu BJ, Fang JY (2000). Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance. *Acta Ecologica Sinica*, 20, 733–740. (in Chinese with English abstract) [刘国华, 傅伯杰, 方精云 (2000). 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献. 生态学报, 20, 733–740.]
- Liu GS, Jiang NH, Zhang LD, Liu ZL (1996). *Soil Physical and Chemical Analysis and Description of Soil Profiles*. China Standard Methods Press, Beijing. 24. (in Chinese) [刘光崧, 蒋能慧, 张连第, 刘兆礼 (1996). 土壤理化分析与剖面描述. 中国标准出版社, 北京. 24.]

- Li KR (2002). *Land Use Change & Greenhouse Gases Net Emission with Carbon Cycle in Terrestrial Ecosystem*. Meteorological Press, Beijing. [李克让 (2002). 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环. 气象出版社, 北京.]
- Li MR, Ding GJ (2013). Study on carbon storage of main forest types in southeast part of Guizhou Province. *Journal of Central South University of Forest & Technology*, 33(7), 119–124. (in Chinese with English abstract) [李默然, 丁贵杰 (2013). 贵州黔东南主要森林类型碳储量研究. 中南林业科技大学学报, 33(7), 119–124.]
- Ma CX, Liu JJ, Kang BW, Sun SH, Ren JH (2010). Evaluation of forest ecosystem carbon fixation and oxygen release services in Shaanxi Province from 1999 to 2003. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 1412–1422. (in Chinese with English abstract) [马长欣, 刘建军, 康博文, 孙尚华, 任军辉 (2010). 1999–2003年陕西省森林生态系统固碳释氧服务功能价值评估. 生态学报, 30, 1412–1422.]
- Ma Q, Liu K, Zhang H (2012). Carbon storage by forest vegetation and its spatial distribution in Shaanxi. *Resource Science*, 34, 1781–1789. (in Chinese with English abstract) [马琪, 刘康, 张慧 (2012). 陕西省森林植被碳储量及其空间分布. 资源科学, 34, 1781–1789.]
- Northwest Institute of Forest Investigation and Planning (2004). <http://xbby.forestry.gov.cn/>. Cited: 2014-12-29. [西北林业调查规划设计院 (2004). <http://xbby.forestry.gov.cn/>. 引于2014年12月29日.]
- Post WM, Emanuel WR, Zinke PJ, Stangenberger AG (1982). Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 298, 156–159.
- Reiners WA (1973). Terrestrial detritus and the carbon cycle. *Brookhaven Symposia in Biology*, (30), 303–307.
- Ren H, Li L, Liu Q, Wang X, Li Y, Hui D, Jian S, Wang J, Yang H, Lu H, Zhou G, Tang X, Zhang Q, Wang D, Yuan L, Chen X (2014). Spatial and temporal patterns of carbon storage in forest ecosystems on Hainan Island, southern China. *PLoS ONE*, 9(9), e108163.
- Sedjo RA (1992). Temperate forest ecosystems in the global carbon cycle. *Ambio*, 21, 274–277.
- Simpson LG, Botkin DB, Nisbet RA (1993). The potential aboveground carbon storage of North American forests. In: Wisniewski J, Sampson RN eds. *Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes Quantification of Sinks and Sources of CO₂*. Springer, Netherlands. 197–205.
- Tans PP, Fung IY, Takahashi T (1990). Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science*, 247, 1431–1438.
- Tan YF, Peng YG, Shi ZJ, Wen W (2013). Forest carbon storage and its dynamic change in Shenzhen City. *Journal of Southwest Forest University*, 33(4), 17–24. (in Chinese with English abstract) [谭一凡, 彭友贵, 史正军, 文伟 (2013). 深圳市森林碳储量及其动态变化. 西南林业大学学报, 33(4), 17–24.]
- Wang PC, Xing LJ, Xiao WF, Huang ZL, Pan L, Zeng LX (2009). Organic carbon density and storage of forest ecosystems in Three Gorges Reservoir Area. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 97–107. (in Chinese with English abstract) [王鹏程, 邢乐杰, 肖文发, 黄志霖, 潘磊, 曾立雄 (2009). 三峡库区森林生态系统有机碳密度及碳储量. 生态学报, 29, 97–107.]
- Wang XC, Qi G, Yu DP, Zhou L, Dai LM (2011). Carbon storage, density, and distribution in forest ecosystems in Jilin Province of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22, 2013–2020. (in Chinese with English abstract) [王新闯, 齐光, 于大炮, 周莉, 代力民 (2011). 吉林省森林生态系统的碳储量、碳密度及其分布. 应用生态学报, 22, 2013–2020.]
- Wang XK, Feng ZW, Ouyang ZY (2001). Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 12, 13–16. (in Chinese with English abstract) [王效科, 冯宗炜, 欧阳志云 (2001). 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究. 应用生态学报, 12, 13–16.]
- Xu SL, Fang JY, Liu GH (1996). Biomass and net production of forest vegetation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 16, 497–508. (in Chinese with English abstract) [徐嵩龄, 方精云, 刘国华 (1996). 我国森林植被的生物量和净生产量. 生态学报, 16, 497–508.]
- Xu XL, Cao MK, Li KR (2007). Temporal-spatial dynamics of carbon storage of forest vegetation in China. *Progress in Geography*, 26(6), 1–10. (in Chinese with English abstract) [徐新良, 曹明奎, 李克让 (2007). 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究. 地理科学进展, 26(6), 1–10.]
- Yolasgimaz HA, Keleş S (2009). Changes in carbon storage and oxygen production in forest timber biomass of Balci Forest Management Unit in Turkey between 1984 and 2006. *African Journal of Biotechnology*, 8, 4872–4883.
- Zhang XY, Xu ZC, Zeng FT, Hu XB, Han QP (2011). Carbon density distribution and storage dynamics of forest ecosystem in Pearl River Delta of low subtropical China. *China Environmental Science*, 31(S1), 69–77. (in Chinese with English abstract) [张修玉, 许振成, 曾凡棠, 胡习邦, 韩秋萍 (2011). 珠江三角洲森林生态系统碳密度分配及其储量动态特征. 中国环境科学, 31(S1), 69–77.]
- Zhou YR, Yu ZL, Zhao SD (2000). Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Acta Phytocologica Sinica*, 24, 518–522. (in Chinese with English abstract) [周玉荣, 于振良, 赵士洞 (2000). 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. 植物生态学报, 24, 518–522.]

责任编辑: 刘菊秀 责任编辑: 王 葳