

DOI: 10.5846/stxb201809292123

胡峻崧, 黄访, 铁烈华, 刘雄, 魏圣钊, 黄从德. 四川省森林植被固碳经济价值动态. 生态学报, 2019, 39(1): - .

Hu J X, Huang F, Tie L H, Liu X, Wei S Z, Huang C D. Economic value dynamics of carbon sequestration in forest vegetation of Sichuan Province. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(1): - .

四川省森林植被固碳经济价值动态

胡峻崧¹, 黄 访², 铁烈华¹, 刘 雄¹, 魏圣钊¹, 黄从德^{1,*}

¹ 四川农业大学林学院, 成都 611130

² 重庆大学经济与工商管理学院, 重庆 400044

摘要: 正确估算森林植被固碳经济价值可为森林生态系统的生态效益评价提供基础数据。利用 1997 年和 2014 年两期四川省森林资源清查数据, 依据不同森林类型的生物量与蓄积量回归方程和支付意愿法, 估算了四川省两个时期森林植被的固碳经济价值。结果表明, 从 1997 年到 2014 年, 四川省森林植被固碳经济价值由 703.17 亿元增长到 865.75 亿元, 净增长 162.58 亿元, 年均增长 9.56 亿元, 年均增长率为 1.36%; 在两个时期, 云冷杉林的固碳经济价值比重最大, 分别占总固碳经济价值的 54.82% 和 46.62%, 表明云冷杉森林植被类型在全省森林植被固碳经济价值中占有重要的地位; 四川省天然林和人工林植被的固碳经济价值均呈增加趋势, 并且人工林植被固碳经济价值年均增长速率(7.42%) 明显高于天然林(1.03%); 四川省森林植被固碳经济价值总体上随林龄的增加而增加。研究结果说明, 实施包括天然林保护工程在内的森林保护和经营管理措施对提高森林植被的固碳经济价值具有重要的作用。

关键词: 生物量; 碳储量; 固碳经济价值; 森林植被; 四川省

Economic value dynamics of carbon sequestration in forest vegetation of Sichuan Province

HU Junxi¹, HUANG Fang², TIE Liehua¹, LIU Xiong¹, WEI Shengzhao¹, HUANG Congde^{1,*}

¹ College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

² Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract: Correctly estimating the economic value for the sequestration of carbon in forest vegetation can provide basic data for the evaluation of eco-benefits in forest ecosystems. We used forest resource inventory data of Sichuan Province from 1997 and 2014 to estimate the economic value of forest carbon sequestration in Sichuan Province in two periods. The results show that from 1997 to 2014, the economic value of forest carbon sequestration in Sichuan Province increased from 70.317 billion yuan to 86.575 billion yuan. The net increase was 16.258 billion yuan and the average annual growth was 0.956 billion yuan, with an average annual growth rate of 1.36%. In 1997 and 2014, spruce fir forest had the largest economic value, which accounted for 54.82% and 46.62% of the total carbon sequestration economic value, respectively. This indicates that spruce fir forest plays an important role in the economic value of forest carbon sequestration in the province. The economic value of carbon sequestration in natural forests and planted forests in Sichuan Province showed an increasing trend, and the economic value in planted forests (7.42%) was significantly higher than that in natural forests (1.03%). The economic value of forest carbon sequestration in Sichuan Province generally increased with the increase of forest age groups. The results show that the implementation of forest protection and management measures, including natural forest protection projects, played an important role in improving the economic value of forest carbon sequestration.

基金项目: 长江上游生态安全协同创新中心开放基金项目; 成都市森林碳储量及增汇潜力研究(2017-Y2500W-17)

收稿日期: 2018-09-29; **网络出版日期:** 2018-11-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyxq100@aliyun.com

Key Words: biomass; carbon stock; economic value of carbon sequestration; forest vegetation; Sichuan Province

森林作为重要的陆地生态系统,每年固定的碳约占整个陆地生态系统的三分之二^[1],这表明森林生态系统在全球碳平衡中做出了巨大的贡献^[2]。森林生态系统的碳储量不仅是研究森林生态系统与大气间碳交换的基本参数,也是估算森林生态系统固碳经济价值的关键因子^[3]。20 世纪 90 年代末期,随着《京都议定书》的出台和签署,森林的固碳价值成为了经济学界、生态学界和会计学界所关注的共同话题^[4]。准确估算森林的固碳经济价值,可为森林生态系统的生态效益评价以及生态补偿机制中的补偿量计算提供基础数据。

目前,我国学者围绕森林植被碳储量及固碳经济价值做了大量的研究,取得显著的成就。刘国华等^[5]利用我国 4 次森林资源清查成果数据,估算了我国 4 次森林植被的总碳储量分别为 3.75、4.12、4.06 Pg C 和 4.20 Pg C。黄从德等^[6]、焦燕等^[7]、刘兆丹等^[8]和樊登星等^[9]利用省市级的森林资源清查数据,对四川省、黑龙江省、湖南省和北京市等区域尺度上的森林植被碳储量进行了估算,结果表明,四川省、黑龙江省、湖南省和北京市等省市的森林植被碳储量均呈增加趋势,森林植被均起着碳汇作用。王兵等^[10]利用我国第 7 次森林资源清查数据,对全国森林的生态系统服务功能进行价值评估,我国森林服务功能总价值为 10.01 万亿元/a,其中森林植被的固碳释氧经济价值为 1.56 万亿元/a。张春华等^[11]、王磊等^[12]和曹扬等^[13]分别估算了山东、江苏和陕西等省的森林植被固碳经济价值。但由于我国幅员辽阔,植被类型多样,加之森林植被固碳经济价值的估算方法较多,尚缺乏统一的估算方法,导致估算结果存在较大的不确定性^[13]。

四川省森林资源丰富,是我国三大重点林区之一^[14]。四川省森林是西南林区的主体,大多分布在长江上游地区,是维系长江流域生态平衡的重要天然屏障^[6]。然而,对于该区域森林植被固碳经济价值的研究却鲜有报到。本文在课题组前期研究的基础上,利用四川省 1997 年和 2014 年两期林资源清查数据,结合森林生物量与蓄积量回归模型和森林固碳经济价值评估方式,估算了 1997 年和 2014 年四川省森林植被固碳经济价值,旨在为四川省森林植被生态效益评价提供基础数据。

1 研究区概况

四川省位于中国西南腹地,地处长江上游,辖区面积 48.6 万 km²,居中国第五位。地理坐标为 97°21′—108°33′E,26°03′—34°19′N,气候区域差异明显,四川盆地属亚热带湿润气候,川西南属亚热带半湿润气候,川西北属高原高寒气候区。四川省位于中国大陆地势三大阶梯中的第一级和第二级,处于第一级青藏高原和第二级长江中下游平原的过渡带,西部为高原山地,东部为盆地丘陵。全省森林资源分布不均,资源富集量按川西高山高原区、盆周山区、川西南山区和盆地丘陵区依次递减。全省森林以天然林占绝对优势,主要分布在川西地区,以云杉林、冷杉林及高山栎林为主;人工林主要分布于四川盆地及周围山地,以杉木、马尾松、柏木、柳杉等为主。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究所用的数据来源于 1997 年和 2014 年四川省森林资源清查成果。森林资源清查成果包括不同优势树种、不同起源和不同龄级乔木林的面积和蓄积。

2.2 研究方法

2.2.1 森林植被碳储量的估算

森林植被碳储量由乔木层、灌木层、草本层和枯落物层的碳储量组成,本文森林植被碳储量仅指乔木层碳储量。乔木层碳储量为生物量乘以含碳量,乔木层含碳量采用目前国际上常用的转换系数 50%^[15]。乔木层生物量采用课题组^[6]基于 180 个实测生物量样地数据建立的四川省 12 种主要森林类型的生物量与蓄积量回归模型($W = a V^b$)进行估算,各模型参数见表 1。

式中: W 为单位面积生物量 (Mg/hm^2); V 为单位面积蓄积量 (m^3/hm^2); a 、 b 为参数。

表 1 森林乔木层生物量与蓄积量关系模型
Table 1 Relationship between biomass and volume in forest tree layer

森林类型 Forest type	方程参数 Parameters of equation		样本数 Number of sample	相关系数 Correlation coefficient
	a	b		
桉 <i>Eucalyptus robusta</i>	2.5878	0.6261	16	0.9635 **
柏木 <i>Cupressus funebris</i>	1.2237	0.8592	15	0.9905 **
硬阔 Hardwood	0.6573	1.0502	11	0.9823 **
柳杉 <i>Cryptomeria fortune</i>	0.8707	1.0239	14	0.9986 **
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	1.0513	0.9373	20	0.9773 **
软阔 Softwood	2.1529	0.6085	14	0.9503 **
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	0.1807	1.2771	11	0.9847 **
杨 <i>Populus</i>	0.7629	0.9505	39	0.9885 **
云冷杉 <i>Abies and Picea</i>	2.137	0.7532	25	0.9793 **
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	0.8569	0.8564	16	0.9841 **
樟、楠 <i>Cinnamomum and Phoebe</i>	1.0726	1.0128	21	0.9835 **
其他松类 Other <i>Pinus</i>	0.5272	1.0793	19	0.9978 **

* * $P < 0.01$

2.2.2 森林植被固碳经济价值的估算

森林植被固碳经济价值是森林植被碳储量与固碳单价的乘积。固碳单价采用黄宰胜^[16]以重点能耗工业企业为问卷对象,通过分段常数指数模型测算得到固碳价格 47.36 元/ $\text{t} \cdot \text{CO}_2$,纯碳的价格为 174 元/ $\text{t} \cdot \text{C}$ 。

3 结果与分析

3.1 不同森林植被类型固碳经济价值动态

由表 2 可以看出,从 1997—2014 年,四川省森林植被固碳经济价值呈增长趋势,由 703.17 亿元增长到 865.75 亿元,净增长 162.58 亿元,年均增长 9.56 亿元,年均增长率为 1.36%。

表 2 四川省不同森林植被类型的固碳经济价值
Table 2 The carbon sequestration value of different forest types in Sichuan Province

森林类型 Forest type	1997 年			2014 年		
	面积 Area / (10^4hm^2)	碳储量 Carbon stock/ (Tg C)	固碳价值 Carbon sequestration value/ (10^8CNY)	面积 Area / (10^4hm^2)	碳储量 Carbon stock/ (Tg C)	固碳价值 Carbon sequestration value/ (10^8CNY)
桉 <i>Eucalyptus robusta</i>	—	—	—	6.32	0.68	1.18
柏木 <i>Cupressus funebris</i>	129.36	18.21	31.68	145.14	36.21	63.01
硬阔 Hardwood	143.28	64.99	113.09	179.21	93.08	161.95
柳杉 <i>Cryptomeria fortune</i>	14.27	4.33	7.53	24.74	11.69	20.34
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	70.76	10.96	19.06	53.91	15.99	27.82
软阔 Softwood	143.75	20.57	35.79	189.25	30.3	52.72
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	36.98	3.04	5.29	34.01	6.1	10.61
杨 <i>Populus</i>	19.76	4.32	7.51	17.47	4.99	8.67
云冷杉 <i>Abies and Picea</i>	315.5	221.54	385.48	329.72	231.97	403.63
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	95.4	13.39	23.31	83.52	16.03	27.89
樟、楠 <i>Cinnamomum and Phoebe</i>	10.41	6.36	11.07	3.88	2.07	3.61
其他松类 Other <i>Pinus</i>	83.9	36.42	63.37	94.69	48.46	84.31
合计 Total	1063.37	404.12	703.17	1161.86	497.56	865.75

从 1997 年到 2014 年的 17a 间,除樟、楠类的固碳经济价值有所减少外,其他森林植被类型的固碳经济价值均有不同程度的增加。其中,硬阔和柏木类的增长较多,净增量分别为 48.86 亿元和 31.33 亿元,年均增长分别为 4.71 亿元和 1.84 亿元,年均增长率为 5.82% 和 2.54%;桉和杨类的固碳经济价值净增较少,分别为 1.18 亿元和 1.16 亿元;其他松类、云冷杉、软阔、柳杉、马尾松、杉木和云南松类的固碳经济价值净增量介于 4.59—20.95 亿元之间。

在 1997 年和 2014 年,各森林类型都以云冷杉类的固碳经济价值最大,分别为 385.48 亿元和 403.63 亿元,占四川省森林植被总固碳经济价值的 54.82% 和 46.62%。硬阔类、云南松类、软阔类和柏木类的固碳经济价值介于 30—170 亿元之间,占总固碳经济价值的 4%—19% 之间。其他森林类型的固碳经济价值都小于 30 亿元,占总固碳经济价值的 4% 以下。这表明,云冷杉森林植被类型在全省森林植被固碳经济价值中占有重要的地位。

3.2 不同起源的森林植被固碳经济价值动态

由表 3 可以看出,从 1997 年到 2014 年,四川省天然林植被的碳储量分别占总碳储量的 91.14% 和 90.28%,天然林植被碳储量远大于人工林,这主要与它们所占的面积有关,天然林面积分别占同期森林的 81.75% 和 75.89%。四川省天然林和人工林植被的固碳经济价值均呈增加趋势。天然林植被固碳经济价值净增量为 116.66 亿元,年均增加 6.86 亿元,年均增长率 1.03%;人工林植被固碳经济价值净增量为 46.92 亿元,年均增加 2.76 亿元,年均增长率 7.42%。这表明,四川省人工林植被固碳经济价值增长速率明显高于天然林。

表 3 四川省不同起源的森林植被固碳经济价值

Table 3 The carbon sequestration value of forest with different origins in Sichuan Province

清查期 Period	天然林 Natural forest			人工林 Planted forest		
	面积 Area/ (10^4hm^2)	碳储量 Carbon stock/ (Tg C)	固碳价值 Carbon sequestration value/(10^8CNY)	面积 Area/ (10^4hm^2)	碳储量 Carbon stock/ (Tg C)	固碳价值 Carbon sequestration value/(10^8CNY)
1997	869.34	382.74	664.97	194.03	21.38	37.2
2014	881.76	449.22	781.63	280.1	48.34	84.12

3.3 不同龄组的森林植被固碳经济价值动态

由图 1 可以看出,四川省森林植被的固碳经济价值总体上随林龄的增加而增加(近熟林的固碳经济价值有所下降)。从 1997 年到 2014 年,各龄组的森林植被固碳经济价值均呈增加趋势。其中,过熟林和幼龄林植被的固碳经济价值净增量较大,分别为 47.78 亿元和 46.68 亿元,年均增量分别为 2.81 亿元和 2.75 亿元,年均增长率分别为 1.07% 和 8.94%;其次是中龄林、成熟林和近熟林,净增量分别为 31.99 亿元、19.35 亿元和 16.79 亿元,年均增量分别为 1.88 亿元、1.14 亿元和 0.99 亿元,年均增长率分别为 1.74%、0.53% 和 1.15%。从 1997 年到 2014 年,成熟林固碳经济所占比例呈下降趋势,而幼、中龄林固碳经济价值比例呈增长趋势。主要原因是幼、中龄林的碳储量呈增加趋势,由 1997 年占森林植被总碳储量的 19.79% 增长到 2014 年的 25.16%。

4 讨论与结论

4.1 四川省森林植被固碳经济价值动态

本研究表明,从 1997 年到 2014 年的 17 a 间,四川省森林植被固碳经济价值呈增长趋势。其主要原因是近年来开展的一系列林业工程(如天然林保护工程、退耕还林工程等)使得四川省森林面积由 1997 年的 1063.37万 hm^2 增长到 2014 年的 1161.86万 hm^2 ,碳储量由 411.06 Tg C 增长到 479.92 Tg C,近而导致森林植被固碳经济价值的增长。2014 年四川省森林植被固碳经济价值(865.75 亿元)远高于同期陕西^[13](278.63 亿元)、山东^[11](83.28 亿元)和河南^[17](191.64 亿元)等省的森林植被固碳经济价值。这表明四川森林对全国森林固碳经济价值做出了重要的贡献。

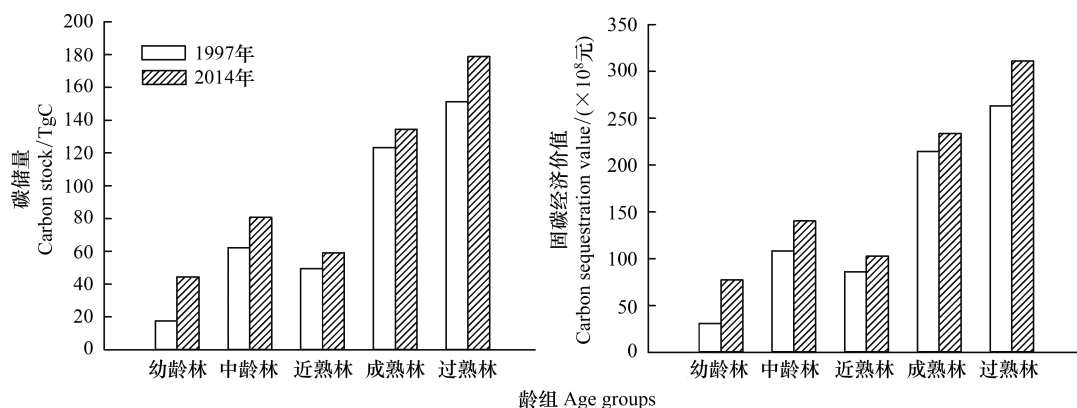


图1 四川省不同龄组的森林植被碳储量和固碳经济价值

Fig.1 Carbon stock and carbon sequestration economic value of forest stands among different age groups in Sichuan Province

4.2 经营管理与森林植被固碳经济价值

森林植被固碳经济价值是碳储量和单位固碳价格两方面因素共同作用的结果^[18],当固碳价格确定时,碳储量就成为决定森林植被固碳经济价值的关键因素。《京都议定书》中明确提出了人类可以通过陆地生态系统的有效管理来提高固碳潜力^[19],对森林生态系统加以更好的管理,森林的碳汇作用将更加明显^[5]。这些管理措施主要包括减少采伐森林和保护好现有森林,增加森林的面积,恢复和重建退化森林生态系统等^[20]。本研究表明,在两次森林资源调查中,云冷杉林的固碳经济价值最大。其主要原因一是云冷杉林的面积在两次清查期所占的比重最大,分别为 27.75%和 29.67%;二是云冷杉林主要分布在川西亚高山区域,受人为干扰相对较小,生物量高;三是该区域是四川省天然林保护工程实施的重点区域,森林资源得到了有效的保护。这表明我国正在实施的天然保护工程等森林保护措施在提高和保护我国森林固碳经济价值中起到了重要的作用。本研究还表明,从 1997 年到 2014 年,四川省人工林植被的固碳经济价值低于天然林,但人工林的固碳经济价值增长速率(7.42%)明显高于天然林(1.03%)。其主要原因是人工林面积小于天然林,并且人工林普遍存在树种单一、病虫害频繁发生、结构和功能较差等特点^[21],导致人工林植被的碳储量较低,进而影响了人工林植被的固碳经济价值。而人工林绝大部分处于幼、中龄阶段,其生长速度较快导致其碳储量增速较快,进而使其固碳经济价值增长较快。有研究表明,通过提高人工林的经营和管理水平来增强人工林固碳功能是减缓全球变化的一种可能机制和最有可能的选择^[21]。方精云等^[22]研究指出,中国的森林起着一个 CO₂“汇”的作用,而且中国森林植被碳蓄积量增加的主要贡献者是人工林。这表明,加强对四川省现有人工林的经营与管理对提高四川森林植被的固碳经济价值具有重要的意义。

4.3 不同估算方法对森林固碳经济价值的影响

常见的森林固碳经济价值估算方法主要有人工固定二氧化碳成本法、造林成本法、碳税法、损失估算法以及支付意愿法等^[16]。有研究表明,人工固定二氧化碳成本法、造林成本法、碳税法以及损失估算法都是用成本去度量森林的固碳价值,从性质上其并不符合价值的内涵,支付意愿法的设计原理更加契合了市场经济的价格形成和运行机制^[4]。本研究采用支付意愿法估算了四川省森林植被的固碳经济价值(表 2),若采用单价价位 305 元/t C 的造林成本法^[23]来估算,得到四川省 1997 年和 2014 年的森林植被固碳经济价值为 1232.56 亿元和 1517.55 亿元,分别比利用支付意愿法估算的结果增加了 529.39 亿元和 651.80 亿元。杨美丽等^[24]、张鑫等^[25]和黄方^[26]均采用碳税法和造林成本法两种方法估算了森林植被的固碳经济价值,估算得出的森林固碳经济价值相差较大。这说明,采用不同方法估算得出的森林固碳经济价值相差较大,与本研究的结论一致。造成这种差异的主要原因是,固碳价格是评价森林固碳经济价值的主要参数,由于研究区域和研究方法的差异,固碳价格也有所不同^[18]。如 Roh 等^[27]研究得出了韩国企业愿意支付的国内和国外森林固碳价格为 20 美元/t · C 和 28.5 美元/t · C,Plantinga^[28]等估算了南卡罗莱纳州、迈阿密和威斯康星州林业固碳的价格分别

为 50 美元/t · C、230 美元/t · C 和 170 美元/t · C, Sedjo^[29] 首次利用土地机会成本估算了全球的固碳平均减排成本为 3.5–7 美元/t · C。固碳价格的不同, 从而导致估算得出的固碳价值有所差异。

在各种森林固碳经济价值估算方法中, 造林成本法方法简明, 但生物资产成本的影响因素较多(如立地条件、经营方式和相关政策等), 有些因素甚至无法量化, 可能会导致较大的误差^[30-31]; 人工固定二氧化碳成本法只考虑了有形成本和收益, 而无形成本和收益这部分难以量化^[30]; 碳税法所确定的固碳价值较稳定, 但由于各国碳税率的不同, 不利于横向比较^[16]; 支付意愿法的设计原理契合了市场经济的价格形成和运行机制, 然而, 对支付意愿的调查一般只能选择抽样调查的方式, 而不可能选择普查的方式, 调查结果可能会面临由于抽样不合理而导致失真的风险^[4]。因此, 在估算森林固碳经济价值时, 要考虑现实情况, 选择合适的估算方法, 否则只会增加固碳经济价值估算的不确定性。

参考文献 (References):

- [1] Kramer P J. Carbon dioxide concentration, photosynthesis, and dry matter production. *Bioscience*, 1981, 31(1): 29-33.
- [2] 吴庆标, 王效科, 段晓男, 邓立斌, 逯非, 欧阳志云, 冯宗炜. 中国森林生态系统植被固碳现状和潜力. *生态学报*, 2008, 28(2): 517-524.
- [3] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 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*, 2001, 12(1): 13-16.
- [4] 许文强. 森林碳汇价值评价[D]. 昆明: 西南林学院, 2006.
- [5] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献. *生态学报*, 2000, 20(5): 733-740.
- [6] 黄从德, 张健, 杨万勤, 唐宵, 赵安玖. 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态. *生态学报*, 2008, 28(3): 966-975.
- [7] 焦燕, 胡海清. 黑龙江省森林植被碳储量及其动态变化. *应用生态学报*, 2005, 16(12): 2248-2252.
- [8] 刘兆丹, 李斌, 方晰, 项文化, 田大伦, 闫文德, 雷丕锋. 湖南省森林植被碳储量、碳密度动态特征. *生态学报*, 2016, 36(21): 6897-6908.
- [9] 樊登星, 余新晓, 岳永杰, 牛丽丽, 高志亮, 马莉娅. 北京市森林碳储量及其动态变化. *北京林业大学学报*, 2008, 30(S2): 117-120.
- [10] 王兵, 任晓旭, 胡文. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估. *林业科学*, 2011, 47(2): 145-153.
- [11] 张春华, 居为民, 王登杰, 王希群, 王昕. 2004-2013 年山东省森林碳储量及其碳汇经济价值. *生态学报*, 2018, 38(5): 1739-1749.
- [12] 王磊, 丁晶晶, 季永华, 梁珍海, 李荣锦, 阮宏华. 江苏省森林碳储量动态变化及其经济价值评价. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2010, 34(2): 1-5.
- [13] 曹扬, 陈云明, 渠美. 陕西省森林碳储量、生产力及固碳释氧经济价值的动态变化. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2013, 41(5): 113-120.
- [14] 杨小建, 王金锡, 杨慈元. 四川森林资源动态变化与提高森林质量的初步研究. *四川林业科技*, 2006, 27(6): 72-79.
- [15] Levine J S, Cofer III W R, Cahoon D R Jr, Winstead E L. Biomass burning: a driver for global change. *Environmental Science & Technology*, 1995, 29(3): 120A-125A.
- [16] 黄宰胜. 基于供需意愿的林业碳汇价值评价及其影响因素研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
- [17] 贾松伟. 河南省乔木林碳储量动态变化及其碳汇经济价值估算. *河南农业科学*, 2014, 43(5): 149-153.
- [18] 王君彩, 牛晓叶. 低碳背景下森林碳汇的资产属性及其评价方法探讨. *会计之友*, 2013, (8): 13-17.
- [19] 张小全, 侯振宏. 森林、造林、再造林和毁林的定义与碳计量问题. *林业科学*, 2003, 29(2): 145-152.
- [20] 胡会峰, 刘国华. 森林管理在全球 CO₂ 减排中的作用. *应用生态学报*, 2006, 17(4): 709-714.
- [21] 冯瑞芳, 杨万勤, 张健. 人工林经营与全球变化减缓. *生态学报*, 2006, 26(11): 3870-3877.
- [22] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. *植物学报*, 2001, 43(9): 967-973.
- [23] 施溯筠, 李光, 张三焕. 长白山区森林固定 CO₂ 价值的评估. *延边大学学报: 自然科学版*, 2002, 28(2): 134-137.
- [24] 杨美丽, 褚宏洋, 庄皓明, 李颖. 森林碳汇经济价值评估研究—以山东省为例. *山东农业大学学报: 社会科学版*, 2017, 19(2): 77-84.
- [25] 张鑫, 李俊梅. 昆明西山森林公园碳汇功能及其经济价值估算. *环境科学与技术*, 2010, 33(12F): 559-562.
- [26] 黄方. 湖南主要森林生态系统碳汇功能经济价值及其生态对策研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2007.
- [27] Roh T, Koo J C, Cho D S, Youn Y C. Contingent feasibility for forest carbon credit: evidence from South Korean firms. *Journal of Environmental Management*, 2014, 144: 297-303.
- [28] Plantinga A J, Wu J J. Co-benefits from carbon sequestration in forests: evaluating reductions in agricultural externalities from an afforestation policy in Wisconsin. *Land Economics*, 2003, 79(1): 74-85.
- [29] Sedjo R A. Forests: a tool to moderate global warming. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 1989, 31(1): 14-20.
- [30] 刘凯旋, 金笙. 国内森林碳汇市场交易定价方法比较研究. *农业工程*, 2011, 1(2): 96-100.
- [31] 黄宰胜, 陈钦. 基于造林成本法的林业碳汇成本收益影响因素分析. *资源科学*, 2016, 38(3): 485-492.