

基于造林再造林项目的杉木固碳成本收益分析

曾 程¹, 沈月琴^{1,2}, 朱 臻¹, 冯娜娜¹

(1. 浙江农林大学 经济管理学院, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 浙江省农民发展研究中心, 浙江 临安 311300)

摘要: 通过林业活动固碳已成为应对气候变化的重要措施。根据土地利用机会成本及净现值的基本原理, 以中国南方集体林区典型林场为案例点, 以杉木 *Cunninghamia lanceolata* 为案例树种, 借鉴 Benítez 固碳模型和杉木生长模型, 基于造林再造林项目, 对浙江、福建、江西等 3 省的杉木固碳成本进行了分析。结果表明: 考虑土地农业生产机会成本且利率为 5% 的情况下, 杉木固碳成本江西 < 浙江 < 福建, 江西省固碳成本最低, 是 3 省中最适宜造林固碳的省份; 3 省的固碳成本对利率、木材价格都敏感。利率越低, 木材价格越高, 最优轮伐期越短, 杉木固碳成本越低。固碳成本与利率、木材价格的变化关系为使用政策手段降低固碳成本提供了可能。图 3 表 3 参 16

关键词: 林业经济学; 杉木; 固碳; 成本收益; 最优轮伐期

中图分类号: S792

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2015)01-0127-06

Cost and benefit of *Cunninghamia lanceolata* carbon sequestration based on AR-projects

ZENG Cheng¹, SHEN Yueqin^{1,2}, ZHU Zhen¹, FENG Nana¹

(1. School of Economics and Management, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. Center for Farmers' Development in Zhejiang Province, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: Forest carbon sequestration is widely accepted as a significant strategy to mitigate climate change. Based on the basic principles of land use opportunity cost and net present value, and applied Benítez model of carbon sequestration and *Cunninghamia lanceolata* growth model, this paper analyzed the cost-benefit of carbon sequestration of afforestation projects in Zhejiang, Jiangxi and Fujian Provinces. The results indicated that when the opportunity cost of land use was considered and the interest rate was 5 per cent, the cost of carbon sequestration in Jiangxi Province was lower than that in Zhejiang and Fujian Provinces; in terms of the cost of carbon sequestration, Jiangxi Province was the most suitable place for carbon sequestration. The costs of carbon sequestration in three provinces were all sensitive to the interest rate and timber price. The lower the interest rate was, the higher the timber price would be, and the shorter the optimum rotation and the lower the carbon sequestration cost. The correlation among the cost of carbon sequestration, interest rate and timber price makes it possible to use policy tools to reduce the cost of carbon sequestration. [Ch, 3 fig. 3 tab. 16 ref.]

Key words: forest economics; *Cunninghamia lanceolata*; carbon sequestration; cost-benefit; optimal rotation

森林生态系统是全球碳库的重要组成部分。通过造林再造林创造碳汇的潜力巨大, 固碳成本低^[1-3]。中国南方集体林区自然条件优越, 适宜林木的快速生长, 增加森林碳汇供给的优势明显^[4-5], 杉木 *Cunninghamia lanceolata* 是南方集体林区的代表性树种, 研究杉木固碳成本及其影响因素具有重要的意义。

收稿日期: 2014-02-20; 修回日期: 2014-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71073148, 71203198)

作者简介: 曾程, 从事林业经济研究。E-mail: 263483235@qq.com。通信作者: 沈月琴, 教授, 博士生导师, 从事林业经济理论与政策、气候变化与森林碳汇等研究。E-mail: shenyueqin-zj@163.com

目前,国内关于固碳成本研究主要是基于造林成本法的固碳价值研究^[6-9],缺乏对固碳成本收益的研究,对利率、木材价格等影响固碳成本因素的研究更少。国外学者对不同地区不同树种的固碳成本已经做了丰富的研究。如 Benítez 等^[1-2]分别考察过全球和拉丁美洲非森林地区造林再造林项目(AR-PROJECT)的固碳成本,分别识别出了固碳成本较低的地区,这些地区更适合造林固碳。浙江、福建、江西等 3 省是中国杉木主要产区,3 省杉木固碳造林的比较成本优势是本研究探讨的问题。因此,本研究将基于浙江、福建、江西等 3 省杉木重点产区国有林场的数据,探讨分析利率、木材价格等因素对造林再造林项目固碳成本的影响,以期发现降低固碳成本的有效途径。

1 案例点、模型和数据

1.1 案例点

本研究选取南方集体林区中杉木分布较多的浙江、福建、江西等 3 省作为研究地区,根据杉木经营的代表性和典型性原则,从 3 省的杉木主要分布区域选取 13 个林场作为案例点(表 1)。案例林场的选择充分考虑区域代表性和杉木经营状况的差异,基本能反映所在省份杉木的经营水平。

表 1 案例点基本情况

Table 1 Basic situation of case position

省份	林场名称	林场面积/hm ²	总收入/万元	杉木林面积比例/%
浙江	开化林场	8 375	2 799	64.2
	景宁林业总场	5 870	715	28.0
	庆元实验林场	8 015	1 909	34.0
	文成石垟林场	5 295	800	37.0
福建	政和林场	5 000	1 100	30.0
	顺昌林场	21 755	3 959	50.0
	永安林场	3 653	188	38.9
江西	银坞林场	6 600	229	35.0
	枫树山林场	24 533	4 000	31.0
	西窑林场	3 234	125	41.0
	双圳林场	6 533	650	
	珍珠山林场	7 633	150	
	生态林场	8 000	700	

数据来源:实地调研。

1.2 模型

1.2.1 固碳成本模型 本研究主要采用 Benítez 等^[1]提出的造林固碳成本模型。Benítez 等通过该模型研究全球农业低效率地区替代造林的固碳成本,并利用地理信息系统(GIS)数据得到全球固碳成本较低地区的分布。该模型考虑了林地净现值、木材价格、木材产出利率和放弃农业生产的土地机会成本等因素,研究一块土地究竟适合造林固碳还是农业生产。模型假定土地所有者可以自主改变土地的利用方式,并且造林再造林项目只发生在适合的土地上。因此,本研究在分析过程中假定土地所有者可以自由决策所属土地的利用方式,但其决策仅包括造林固碳抑或农业生产,且固碳造林用地适合造林且不会威胁粮食安全。本研究选择的模型综合考虑了土地净现值、造林再造林成本、木材收益、碳汇收益、轮伐期、利率和土地的机会成本等因素。

从“经济人”理性出发,造林固碳只有在固碳成本低于碳价格的地区发生。因此造林对农业生产的替代要综合考虑造林过程及农业生产的成本,即该块土地用于造林的林地净现值 V_{NPF} 要大于等于农业生产的净现值 V_{NPA} 。当 V_{NPF} 等于 V_{NPA} 时,可以得到固碳造林替代农业生产的最低碳价格。 V_{NPF} 具体公式为:

$$V_{\text{NPF}} = \left[\delta Q(T) e^{-rT} (P_T - C) - R + \int_0^T \alpha P_C Q'(t) e^{-rt} dt - P_C \alpha (1 - \beta) Q(T) e^{-rT} \right] [1 - e^{-rT}]^{-1}. \quad (1)$$

式(1)中: δ 为杉木出材率,设定为 0.7^[10]; $Q(T)$ 为 T 年生林木采伐量; T 为轮伐期; P_T 为木材价格; C

为 1 m^3 木材的采运成本； r 为实际利率，这里采用国家规定的营林业基准收益率 8%； R 为造林成本和历年的管护成本以及采伐成本和运输成本等现值， $\delta Q(T)e^{-\tau T}(P_T-C)-R$ 为木材净收益现值； α 为碳转换系数，设定为 0.225^[11]； P_C 为碳价格； β 为未腐烂且固定下来的木材在总量中所占的比例，设定为 5%^[10]；

$\int_0^T \alpha P_C Q'(t)e^{-\tau t}dt - P_C \alpha (1-\beta) Q(T)e^{-\tau T}$ 为碳汇的净收益。 V_{NPA} 具体公式如下：

$$V_{\text{NPA}}=\frac{a}{r}。$$

(2)

式(2)中： a 为 1 a 内农地生产净现值， r 为实际利率。当 $V_{\text{NPA}}=V_{\text{NPF}}$ 时，得到固碳造林用地和农业生产用地具有相同净现值时的碳价格，具体公式如下：

$$P_C=\frac{\frac{a}{r} [1-e^{-\tau T}]-[\delta Q(T)e^{-\tau T}(P_T-C)-R]}{\int_0^T \alpha Q'(t)e^{-\tau t}dt-\alpha(1-\beta)Q(T)e^{-\tau T}}。$$

(3)

与企业只会在产品价格高于成本时才会生产一样，不同省份只会在市场碳价格高于固碳成本时，才会将农地用于固碳造林，式(3)中测算的最低碳价格即为固碳成本价格。固碳成本越低的省份在碳汇交易中将获得更高的收益。

1.2.2 木材生产模型 国内学者对杉木生产模型进行过研究^[12-14]。由于不同地区的气候条件、立地指数等不同，造成模型有所差异。本研究地区为浙江、福建、江西等 3 省，自然条件相似，因此，采用周国模等^[12]杉木人工林生长模型，具体公式如下：

$$\ln \bar{D}=4.504\ 156-0.036\ 179\ I_s-0.084\ 218\ \ln N-12.031\ 347/B；$$

(4)

$$\ln M=1.638\ 213+0.121\ 188\ I_s+0.524\ 874\ \ln N-28.389\ 612/B。$$

(5)

式(4)和式(5)中： I_s 为地位指数，这里采用中等立地条件进行比较(在实地调研中收集了不同林场好、中、差等 3 种立地条件下的地块情况，其中好、差立地条件在大部分林场中都不多，因此，中等立地条件更具代表性，使用中等立地条件计算比较)； N 为密度，根据实地调查平均为 $2\ 500\text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ ； B 为林龄； $\bar{D}$ 为杉木的平均胸径，相关系数为 0.945 9； M 为林分材积或蓄积，相关系数为 0.891 6。

1.3 数据

1.3.1 杉木经营成本 根据专家访谈和实地调查，杉木经营成本包括：①造林成本，包括第 1 年的整地成本、栽植成本、种苗及肥料成本、补植成本以及第 1~4 年的幼林抚育成本，其中劳动力工价为 $100.00\text{ 元}\cdot\text{工日}^{-1}$ 。②历年的管护成本。③杉木的采伐运输成本。笔者把不同时间点上发生的成本贴现到相同时点，再求平均成本(表 2)。

表 2 杉木经营成本

Table 2 Operating cost of *Cunninghamia lanceolata*

时间	经营成本/(元·hm ⁻²)			时间	经营成本/(元·hm ⁻²)		
	浙江	福建	江西		浙江	福建	江西
第 1 年	10 341.98	18 120.39	13 714.28	第 4 年	575.00	1 000.00	3 840.62
第 2 年	3 050.83	6 381.04	4 037.07	采运成本	245.66	390.74	210.83
第 3 年	1 725.00	6 373.33	543.75				

数据来源：实地调研。

1.3.2 杉木木材价格 根据实地调查和来自木材市场的数据，不同直径的杉木木材平均价格如表 3 所示。

1.3.3 农业生产数据 1 a 内农地生产净现值 a 参考仲伟周等^[15]的方法。假设地区 i 的土地用于农业生产，并且农作物从种植到收获的周期为 1 a，则 1 a 内单位面积(hm^2)土地的农业生产净现值 a_i 为： $a_i=Q_i-C_i$ 。其中： Q_i 为 1 a 内的农业产值(不包括林业、渔业、牧业)， C_i 为 1 a 内的农业种植成本。因此 1 a 内农业生产的销售利润率 S_i 为： $S_i=a_i/Q\times 100\%$ 。

假设农业生产每年的种植成本和产值不变，则无限个种植期内农业生产净现值 A_i 为：

表 3 杉木木材价格

Table 3 Price of *Cunninghamia lanceolata*

直径/cm	价格/(元·m ⁻³)	直径/cm	价格/(元·m ⁻³)	直径/cm	价格/(元·m ⁻³)
<6	300	8~12	800	>16	1 000
6~8	600	12~16	900		

数据来源：实地调研。

$$A_i = a_i \sum_{t=1}^{\infty} (1+r)^{-t} = \frac{a_i}{r}。$$

假设每年的农业生产销售利润率 S_i 等于折现率 r ，则可得： $A_i = Q_i$ ，即用于农业生产的单位面积 (hm^2) 土地永久净现值为该年的农业产值。考虑到土地利用替代的可能性，本研究使用各省杉木种植区数据进行研究，分别为浙江丽水 2 191.44 元· hm^{-2} ，福建南平 3 989.88 元· hm^{-2} 和江西鹰潭 1 225.05 元· hm^{-2} (数据来源于 2012 丽水统计年鉴、2012 南平统计年鉴和 2012 鹰潭统计年鉴)。

2 模拟结果与分析

利用杉木生长模型和 Benítez 等^[1]提出的造林固碳成本模型，结合浙江、福建、江西等 3 省的杉木经营数据，可以计算出不同轮伐期的 3 省杉木固碳成本，并分析固碳成本随利率、木材价格等的变动情况。

2.1 不同轮伐期下 3 省杉木固碳成本

图 1 显示：不同轮伐期下 3 省的固碳成本不同。随着轮伐期的增加，固碳成本先减少后增加，原因在于固碳成本由林地净现值进一步测算得出，固碳成本与林地净现值变动负相关。林地净现值与轮伐期的关系表现为随轮伐期增加，林地净现值先增加后减少，由此导致固碳成本先减少后增加。在利率 8% 的水平下，浙江、福建、江西等 3 省的最低固碳成本分别出现在轮伐期的 29 a，32 a，29 a，最低固碳成本分别为 709 元· hm^{-2} ，1 451 元· hm^{-2} 和 641 元· hm^{-2} ，江西省相比其他 2 省存在固碳成本优势，比浙江、福建分别低 68 元和 810 元，主要原因是江西省农业生产的平均收益低，固碳造林机会成本小。江西省是 3 省中造林固碳潜力最大的省份。

假定国际碳交易市场上的高位碳价格^[16]30 欧元· t^{-1} 为各地区造林固碳的市场价格，国家发改委审核清洁发展技术计划项目规定的 8 欧元· t^{-1} 为碳最低定价，通过银行换算成人民币，市场价格约为 255 元· t^{-1} ，最低定价约为 68 元· t^{-1} 。在碳高位价格情景下，3 省的固碳成本高于市场价格，不能获得造林固碳收益；在碳最低定价的情景下，3 省的固碳成本高于碳最低定价。相比于福建，浙江、江西 2 省都更适合造林固碳。总体来看，3 省中适合造林固碳的省份为江西。

2.2 利率对 3 省杉木固碳成本影响

森林经营是一种回收期长的投资行为，利率对造林固碳有较大影响，当利率较高时，机会成本较大，反之亦然。因此，讨论利率对固碳成本的影响具有重要的意义，不同利率水平下 3 省固碳成本如图 2 所示。

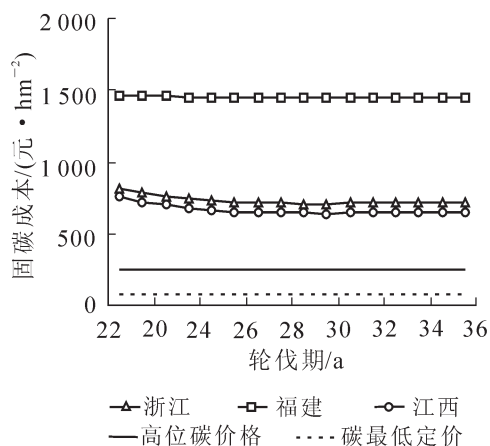


图 1 不同轮伐期下 3 省杉木固碳成本

Figure 1 Cost of carbon sequestration in different rotation

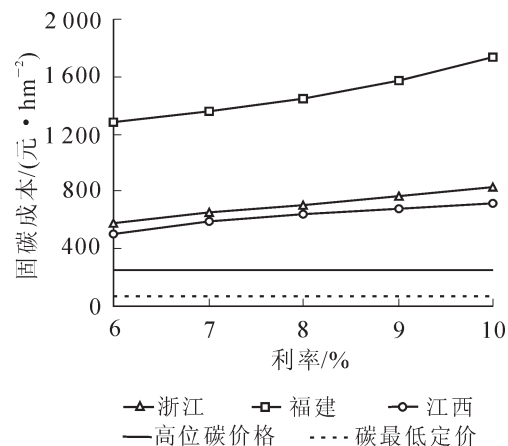


图 2 利率对 3 省杉木固碳成本影响

Figure 2 Impact of interest rate on the cost of carbon sequestration

固碳成本与利率变动正相关。具体来看，3 省固碳成本都随着利率的上升而增加。主要原因在于，随着利率的上升，碳汇造林的机会成本上升，对造林和采伐产生不同影响，导致轮伐期增加，固碳成本上升。同一利率水平下，杉木固碳成本江西<浙江<福建。

从成本收益上看，3 省的固碳成本都是高于高位碳价格的。福建的固碳成本受利率影响较大，表现为固碳成本曲线的快速上升；浙江、江西的固碳成本则受利率影响较小。不同利率水平下，江西省的造林固碳成本都是最低的，具有造林固碳的成本优势。

2.3 木材价格对 3 省杉木固碳成本影响

木材是森林的主要产出，在不考虑碳时，木材价格是影响森林经营的关键因素，但木材价格的高低是否对固碳成本会有影响，是本节主要探讨的问题。木材价格对 3 省固碳成本影响如图 3 所示。

固碳成本与木材价格变动负相关。具体来看，3 省杉木固碳成本都随着木材价格的上升而减少。主要原因在于，随着木材价格的上升，森林经营者更倾向采伐木材，获得收益，使轮伐期缩短，而轮伐期影响着固碳成本，导致固碳成本下降。

随着木材价格变动，浙江、福建、江西等 3 省的固碳成本一直为正，同一木材价格变动水平下，杉木固碳成本江西<浙江<福建。

从成本收益上看，3 省杉木固碳成本一直高于高位碳价格，不能获得固碳造林的收益；但福建的固碳成本远高于浙江、江西 2 省，浙江、江西在一定程度上更适合造林固碳。3 省中江西的造林固碳成本最低，具有造林固碳的优势。

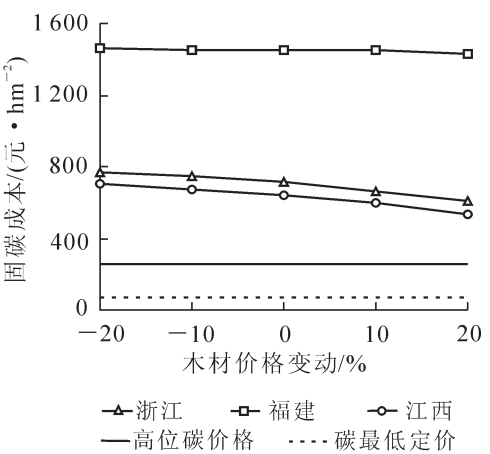


图 3 木材价格对 3 省杉木固碳成本影响
Figure 3 Impact of timber price on the cost of carbon sequestration

3 结论与讨论

本研究基于中国南方集体林区浙江、福建、江西等 3 省 13 个案例林场杉木经营数据，结合现有的杉木生长模型，采用固碳成本模型测算了浙江、福建、江西等 3 省的固碳成本，并探讨了利率、木材价格变化对固碳成本的影响，可以得出以下结论：①在 8%利率水平下，采用国有林场杉木数据测算，浙江、福建、江西固碳成本分别为 709 元·hm⁻²，1 451 元·hm⁻² 和 641 元·hm⁻²。福建固碳成本远高于浙江和江西，是由 2 个方面原因造成的：一方面，福建的杉木经营成本较高。浙江、福建、江西等的杉木经营成本分别为 15 938.47 元·hm⁻²，30 842.21 元·hm⁻² 和 24 346.55 元·hm⁻²；另一方面，福建的农业净现值是 3 省中最高的。江西省杉木造林有固碳成本优势。当利率、木材价格变动时，江西省仍然是固碳成本最低的省份，这主要是因为江西省农业生产收益较低，造林固碳机会成本低。和仲伟周等^[15]的研究结论相同，江西是 3 省中固碳成本最低的省份。②利率、木材价格对杉木固碳成本有影响，表现为利率与固碳成本正相关，杉木价格与固碳成本负相关，即利率越低，木材价格越高，最优轮伐期越短，杉木固碳成本越低。值得注意的时，固碳成本对利率的变化更为敏感，当利率下降时，固碳成本下降的幅度更大。③计算得到的固碳成本低于 Benítez 等^[1]、仲伟周等^[15]的相关研究，主要原因多方面的：首先，本研究更多使用实地调研的地块数据，相比于统计数据可能更符合实际情况。其次，林业税费的减少使得固碳成本降低。

需要说明的是，本研究从造林再造林项目固碳造林的角度出发，分析不同省份的固碳成本收益，探索适合开展造林固碳项目的省份。影响固碳成本的因素较多，本研究只分析了利率、木材价格 2 个因素，而实际中政府政策、劳动力成本等因素都会影响杉木固碳成本，尤其是碳补贴和碳税等政策实施极有可能改变杉木经营的林分结构和种植密度，会增加种苗、化肥等的投入，木材产出也会改变。同时，本研究基于一定的假设情景，所得结论反映的是该省固碳成本的平均水平。事实上，立地条件、经营措施等的变化都可能对结论产生影响。另外，本研究如使用国有林场数据，可能存在对其他杉木经营主体的效率高估，笔者将在后续研究中尝试使用农户的杉木经营数据进行更加深入的分析。

4 参考文献

- [1] BENÍTEZ P C, McCALLUM I, OBERSTEINER M, *et al.* The economics of tree-planting for carbon mitigation: a global assessment [G]/HEIJMAN W. *Regional Externalities*. Berlin: Springer, 2007: 307 – 321.
- [2] BENÍTEZ P C, OBERSTEINER M. Site identification for carbon sequestration in Latin America: a Grid-Based economic approach [J]. *For Polic Econ*, 2006, **8**(6): 636 – 651.
- [3] STAVINS R N. The costs of carbon sequestration: a revealed-preference approach [J]. *Am Econ Rev*, 1999, **89**(4): 994 – 1009.
- [4] 沈月琴, 王小玲, 王枫, 等. 农户经营杉木林的碳汇供给及其影响因素[J]. 中国·人口资源环境, 2013, **23**(8): 42 – 47.
SHEN Yueqin, WANG Xiaoling, WANG Feng, *et al.* Carbon sequestration supply and its influencing factor for farmers operating fir in Chinese southern collective forest zone [J]. *China Popul Resour Environ*, 2013, **23**(8): 42 – 47.
- [5] 朱臻, 沈月琴, 吴伟光, 等. 碳汇目标下农户森林经营最优决策及碳汇供给能力: 基于浙江和江西 2 省调查[J]. 生态学报, 2013, **33**(8): 2577 – 2585.
ZHU Zhen, SHEN Yueqin, WU Weiguang, *et al.* Household optimal forest management decision and carbon supply: case from Zhejiang and Jiangxi Provinces [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(8): 2577 – 2585.
- [6] 侯元兆, 张佩昌, 王琦. 中国森林资源核算研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 1995: 134 – 136.
- [7] 任志远, 李晶. 陕南秦巴山区植被生态功能的价值测评[J]. 地理学报, 2003, **58**(4): 503 – 511.
REN Zhiyuan, LI Jing. The valuation of ecological services from the vegetation ecosystems in the Qinling-Daba Mountains [J]. *Acta Geogr Sin*, 2003, **58**(4): 503 – 511.
- [8] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 等. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价[J]. 自然资源学报, 2004, **19**(4): 480 – 491.
ZHAO Tongqian, OUYANG Zhiyuan, ZHENG Hua, *et al.* Forest ecosystem services and their valuation in China [J]. *J Nat Resour*, 2004, **19**(4): 480 – 491.
- [9] 许志晖, 丁登山. 南昆山自然保护区生态系统服务功能价值评估[J]. 经济地理, 2006, **26**(4): 677 – 680.
XU Zhihui, DING Dengshan. Evaluation of the eco-economy benefit in Nankun Mountain Nature Reserve [J]. *Econ Geogr*, 2006, **26**(4): 677 – 680.
- [10] 沈月琴, 王枫, 张耀启, 等. 中国南方杉木森林碳汇供给的经济分析[J]. 林业科学, 2013, **49**(9): 140 – 147.
SHEN Yueqin, WANG Feng, ZHANG Yaoqi, *et al.* Economic analysis of Chinese fir forest carbon sequestration supply in south China [J]. *Sci Silv Sin*, 2013, **49**(9): 140 – 147.
- [11] 余光英. 中国碳汇林业可持续发展及博弈机制研究[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 200 – 234.
- [12] 周国模, 郭仁鉴, 韦新良. 浙江省杉木人工林生长模型及主伐年龄的确定[J]. 浙江林学院学报, 2001, **9**(3): 219 – 222.
ZHOU Guomo, GUO Renjian, WEI Xinliang. Growth model and cutting age of Chinese fir planted forest in Zhejiang Province [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2001, **18**(3): 219 – 222.
- [13] 吴载璋, 吴锡麟. 福建杉木人工林生长模型的研究[J]. 福建林业科技, 2004, **31**(4): 11 – 14.
WU Zaizhang, WU Xilin. Studies of the growth model of *Cunninghamia lanceolata* plantation in Fujian [J]. *J Fujian For Sci Technol*, 2004, **31**(4): 11 – 14.
- [14] 陈则生. 杉木人工林经济成熟龄的研究[J]. 林业经济问题, 2010, **30**(1): 22 – 26.
CHEN Zesheng. The research on age at economic maturity of Chinese fir plantations [J]. *Issu For Econ*, 2010, **30**(1): 22 – 26.
- [15] 仲伟周, 邢治斌. 中国各省造林再造林工程的固碳成本收益分析[J]. 中国·人口资源环境, 2012, **22**(9): 33 – 41.
ZHONG Weizhou, XING Zhibin. Analysis on cost and benefit of carbon sequestration in each province of China: based on afforestation and reforestation project [J]. *China Popul Resour Environ*, 2012, **22**(9): 33 – 41.
- [16] 俞萍萍. 国际碳贸易价格波动对可再生能源投资的影响机制: 基于实物期权理论的分析[J]. 国际贸易问题, 2012(5): 94 – 104.
YU Pingping. Evaluating renewable energy investment options with uncertainty under volatile international carbon prices: a real options approach [J]. *J Intern Trade*, 2012(5): 94 – 104.