

DOI: 10.5846/stxb201905301136

龙飞, 祁慧博. 面向森林碳汇供给的企业减排路径选择机理与政策模拟. 生态学报, 2020, 40(21): 7966-7977.

Long F, Qi H B. Selection mechanism and policy simulation of enterprises' emission-reduction path facing forest carbon sequestration supply. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7966-7977.

面向森林碳汇供给的企业减排路径选择机理与政策模拟

龙 飞, 祁慧博*

浙江农林大学 经济管理学院, 杭州 311300

摘要: 采用我国碳交易试点省市中钢铁、火电、化工 3 个碳排放密集型行业 89 家企业 2759 个减排单位为样本, 通过构建企业减排路径选择模型, 模拟分析面向森林碳汇供给的企业在不同减排政策影响下的减排路径及其行业差异。研究表明: (1) 企业购买森林碳汇、技术减排和购买配额的成本分别为 210 元/t、319 元/t 和 158 元/t, 因边际减排成本不同, 行业间企业减排路径选择受减排政策的影响存在明显差异; (2) 为激励企业购买森林碳汇以抵消碳排放, 应对不同行业企业采取有差别政策, 综合考虑补贴投入和激励效果, 应分别对火电企业实施 102 元/t 的技术减排补贴, 对化工企业给予技术减排补贴和购买森林碳汇补贴各 83 元/t, 对钢铁企业购买森林碳汇进行 168 元/t 的补贴; (3) 在以上分行业施策的影响下, 3 个行业企业经不同减排路径成本比较后, 均将有约 50% 的减排单位选择购买森林碳汇。结合国家应对气候变化战略目标和各行业发展规律, 研究结果为积极引导企业节能减排、充分挖掘森林碳汇市场潜力、减小企业减排成本压力等提供了科学依据。

关键词: 森林碳汇供给; 企业减排路径; 选择机理; 政策模拟

Selection mechanism and policy simulation of enterprises' emission-reduction path facing forest carbon sequestration supply

LONG Fei, QI Huibo*

School of Economics and Management, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China

Abstract: Based on 2759 emission reduction units of 89 enterprises in three carbon emission intensive industries including steel, thermal power and chemical industry in China's carbon trading pilots, this paper constructs an enterprise emission-reduction path selection model to simulate and analyze the emission reduction paths and industrial differences of enterprises facing forest carbon sequestration supply under the influence of different emission reduction policies. The results show that: (1) the cost of purchasing forest carbon sequestration, technology emission reduction and purchasing quota are 210 yuan/ton, 319 yuan/ton and 158 yuan/ton, respectively. Because of the different marginal emission reduction cost, there are obvious differences in the selection of emission reduction path among enterprises in different industries affected by the emission reduction policy. (2) In order to encourage enterprises to purchase forest carbon sequestration to offset their carbon emissions, different policies should be adopted for enterprises in different industries. Considering the subsidy input and incentive effect comprehensively, government should implement 102 yuan/ton technology emission reduction subsidies for thermal power enterprises, 83 yuan/ton technology emission reduction subsidies and 83 yuan/ton forest carbon sequestration subsidies respectively for chemical enterprises, as well as 168 yuan/ton carbon sequestration subsidies for steel enterprises.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71473230, 71803180, 71873126); 教育部人文社科青年基金项目 (18YJCZH140); 浙江省自然科学基金项目 (LQ17G030009)

收稿日期: 2019-05-30; 修订日期: 2020-07-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huiboqi2005@126.com

(3) Under the influence of the above policies according to different industries, about 50% of emission reduction units from each industry will choose to purchase forest carbon sequestrations by comparing the cost of different emission reduction paths. Combined with the national strategic goal of coping with climate change and the development law of various industries, the results of this paper provide a scientific basis for actively guiding enterprises to save energy and reduce emissions, fully tapping the market potential of forest carbon sequestration, and reducing the cost pressure of emission reduction for the enterprises.

Key Words: forest carbon sequestration supply; enterprise emission-reduction path; selection mechanism; policy simulation

鉴于森林碳汇在气候变化中的重要作用和成本优势,更为主要的是这种方式不会对现有的经济发展模式、发展速度造成太大的负面影响,中国政府已将增加森林碳汇作为应对气候变化的重要举措,并提出了相应的行动方案与发展目标。早在 2004 年,中国就启动了森林碳汇试点项目,2007 年《应对气候变化国家方案》中确定增加森林碳汇是重点领域之一并正式对外公布,2009 年 9 月,中国在纽约召开的联合国气候变化峰会上提出大力增加森林碳汇,“争取到 2020 年森林面积比 2005 年增加 4000 万 hm^2 ,森林蓄积量比 2005 年增加 13 亿立方米”的“双增”发展目标。在该目标的激励下,我国目前各项绿色碳汇基金行动与碳汇造林活动正在积极开展,截至全国性碳交易市场正式启动前夕,中国绿色碳汇基金已获资 6 亿多元人民币,在全国二十多个省(区)共完成碳汇造林 8 万多 hm^2 ,组织实施了 44 个大中型会议的碳中和林项目,预计今后 10 年可固定 CO_2 达 1.5 亿 $\text{t}^{[1]}$,这些成果的取得必将使中国未来森林碳汇的供给能力进一步得到提高。伴随着我国森林碳汇供给能力的不断上升,森林碳汇已经成为我国碳交易市场的第一大碳汇供给品种,为企业进行不同减排路径的选择提供了充足的碳汇供给资源。尤其是随着我国 7 个省市碳交易试点市场的形成和 2017 年全国性碳交易市场的构建,我国的碳排放密集型减排企业将要根据自身碳排放情况,或自身进行技术减排,或到碳交易市场上购买或出售碳排放配额、或通过购买各类碳汇项目以冲抵自身碳排放量^[2]。这种市场化的方式为我国碳排放密集型行业企业减排提供了灵活履约机制,也有利于实现森林生态服务功能价值补偿,从而适应了现阶段我国绿色低碳发展、产业转型升级的需求。那么,面向森林碳汇供给的企业究竟如何在多种减排路径选择中形成对森林碳汇的有效需求?需要怎样的激励政策引导和激发市场对森林碳汇的需求?不同行业之间在减排路径选择和激励政策配套方面有无差别?这些问题的研究对于未来挖掘我国森林碳汇市场潜力,促进我国森林碳汇产业可持续发展具有重要的理论价值与现实意义,开展相关的前期研究迫在眉睫。

1 文献回顾与研究述评

《京都议定书》确定了联合履约机制、碳排放贸易机制和清洁发展机制这三种灵活的减排机制^[3-6],发达国家的企业可按照这三种机制进行减排路径选择;但发展中国家的企业减排路径选择则主要根据其碳市场发展来决定^[7-9],目前我国企业主要有自行技术减排、购买碳市场排放配额和购买森林碳汇等 CCER (Chinese Certified Emission Reduction, 中国核证减排量)(以下简称“森林碳汇减排”)这三种减排路径。已有文献研究了试点省市企业减排路径选择的政策背景^[2,7-9],并比较分析了不同减排路径的成本:如部分学者基于方向性距离函数测算了企业自行技术减排的碳边际减排成本^[10-14];有的学者则运用造林成本、蓄积量转换、影子价格、期权定价等方法估计出森林碳汇供给成本^[15-22],并对森林碳汇最终价值形成的因素进行定量分析^[15-25];再有部分学者则基于 EPPA 模型、CGE 模型、VAR 模型等宏观经济模型测算社会平均减排成本,以作为碳市场排放配额的影子价格^[7,10,26-27]。上述研究为本文提供了思路和借鉴,但在森林碳汇供给背景下企业如何进行减排路径选择的机理研究方面还有待深入。

除减排成本分析之外,现有研究还探讨了企业减排路径选择的影响因素及政策效应。例如,孟卫军等^[28]研

究了技术减排补贴政策对企业减排路径选择的影响;李怒云等^[1]则认为森林碳汇减排补贴能更好地实现森林碳汇的外部收益;席斯等^[8]则认为同时给予企业以上两种补贴可从根本上改变企业的生产经营模式,提升企业的可持续发展能力。需要指出的是,上述政策措施虽在理论上得到越来越多的肯定,有的甚至开始付诸实施^[29],但这些政策对企业进行减排路径选择的影响程度实证研究尚不多见。

本文在系统梳理和分析国内外碳市场发展现状与趋势的基础上,以我国 7 个碳交易试点中的北京、上海、湖北、广东 4 省市为案例区,选择火电、化工、钢铁 3 个碳排放密集型行业为代表性行业,结合国内外碳市场建设发展阶段和行业特征,构建面向森林碳汇供给的企业减排路径选择模型,揭示企业在不同减排政策激励下的减排路径选择机理,模拟分析不同行业企业购买森林碳汇的影响因素及影响程度,为积极引导企业节能减排、充分挖掘森林碳汇市场潜力、减小企业减排成本压力等提供科学依据。

2 研究区概况

我国 7 省市碳交易试点于 2013 年至 2014 年相继启动运行,这 7 个碳交易试点分别位于广东、湖北、上海、深圳、北京、天津和重庆,2019 年总人口 2.5 亿,占全国总人口的近 20%,GDP 为 11 万亿人民币,占全国总 GDP 的 30%,工业总产值约占全国的 36%,能源消耗约占全国的 23%,碳排放密集型行业企业约占全国的 40%。经过 6 年的建设,试点碳市场以具有一定规模和活跃度,2019 年累计成交量 6.96 千万吨 CO₂,累计成交额约为 15.62 亿元人民币,分别比 2018 年同比增加 11%和 24%,对全国碳市场建设的意义重大。遵照国家发改委颁发的《中国温室气体自愿减排交易活动管理办法(暂行)》以及《温室气体自愿减排项目审定与核证指南》,7 个省市碳交易试点均允许企业使用一定比例的 CCER 项目(包括林业 CCER 项目)以抵消企业自身的碳排放。虽然 CCER 于 2015 年初才上市,但市场供需两旺,为试点省市的碳排放密集型企业降低减排成本、确保持续经营、实现灵活履约提供了契机,也为我国森林碳汇需求空间拓展提供了经验。尤其是北京、上海、湖北、广东 4 个碳交易试点建设发展速度相对较快,CCER 交易相对集中,因此,本文主要针对这 4 个试点省市的碳排放密集型企业开展实地调研,对研究面向森林碳汇供给的企业减排路径选择机理具有较强的代表性。

3 研究方法与设计

3.1 森林碳汇供给成本(FSC)测算方法

森林碳汇供给成本(Forest-carbon-sequestration Supply Cost,FSC)测算方法主要分为两类:一类是直接计算法,如造林成本法、边际成本法、蓄积量转换法等^[15,18,30-31];另一类是间接计算法,如成本效益分析法、碳税率法、影子价格法、期权定价法等^[17-21],而大多数学者则在综合运用这两种方法对森林碳汇供给成本进行估算的基础上,结合较为成熟的模型对森林碳汇供给成本形成的关键因素进行定量分析,如张颖等通过建立一个以林木蓄积量转换法为基础的森林碳汇总量的计算方法,再引入最小值法求出了我国森林碳汇供给的最优价格^[32]。本研究拟采用此方法对森林碳汇供给成本进行测算。该方法根据最优模型法原理和森林生长的特性等,设置离散时间经济系统控制方程如下:

$$C \begin{cases} C(t+1) = C(t) + G(t) - W(t) - L(t) \\ C(t_0) = C_0 \\ C(t) \geq 0, 0 \leq L(t) \leq L(t)_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $C(t)$ 表示森林蓄积的碳储量, $G(t)$ 表示森林生长的碳储量, $W(t)$ 表示森林枯损的碳储量, $L(t)$ 表示森林采伐损失的碳储量, t 表示年份,各碳储量单位为吨(t)。 $L(t)$ 为控制变量, $C(t)$, $G(t)$ 和 $W(t)$ 为状态变量。森林碳汇核算就是在方程(1)的约束下,使森林生物碳储量损失的价值最小,即:

$$\min J = \varphi(C(N), N) + \sum_{t=1}^{t-1} F(C(t), L(t), t) \quad (2)$$

式中, $\varphi(C(N), N)$ 表示森林碳储量价值的终端约束。

3.2 企业碳边际减排成本(MAC)测算方法

本研究采用方向性距离函数来度量企业自行技术减排的碳边际减排成本(Marginal Abatement Cost, MAC),以估算企业愿意支付的碳市场价格。根据 Boyd 和 Fare 的假设^[10-11],企业投入 $x \in R_+^N$,生产期望产出 $y \in R_+^D$ 和非期望产出 $c \in R_+^U$, (y, c) 隶属于生产集 $\Omega(x)$, 即 $\Omega(y, c) \in \Omega(x)$, $\Omega(x)$ 为凸的、有界的闭集合。这里的期望产出为企业产品产值,非期望产出为碳排放,投入有资本、劳动和能源 3 种要素。假定生产集 $\Omega(x)$ 投入具有强可处置性,产出具有联合性,且联合具有弱可处置性。则得到产出距离函数:

$$\vec{D}_0(x, y, c; g_y, -g_c) \in \text{Max} \{ \beta : (y + \beta g_y, c - g_c) \in \Omega(x) \} \quad (3)$$

该产出距离函数满足传递性,即:

$$\vec{D}_0(x, y + \alpha g_y, c - \alpha g_c; g_y, -g_c) = \vec{D}_0(x, y, c; g_y, -g_c) - \alpha, \alpha \in R \quad (4)$$

据此,可计算出 CO₂ 边际减排成本为:

$$\text{MAC} = P_y \left[\frac{\partial \vec{D}_0(x, y, c; g_y, -g_c)}{\partial c} / \frac{\partial \vec{D}_0(x, y, c; g_y, -g_c)}{\partial y} \right] \quad (5)$$

式中,MAC 为企业碳边际减排成本, P_y 为企业期望产出产品的市场价格, y 为产品产值, c 为碳排放量。

3.3 碳配额价格(EQP)测算方法

相关研究普遍认为,碳交易市场比较接近完全竞争市场,基于碳配额价格保护的政策,碳市场中应制定排放配额价格(Emission Quota Price, EQP)下限^[10,33],且排放配额价格下限应等于地区碳边际减排成本乘以该地区年碳强度降低指数,即:

$$\text{EQP} = \text{SAC} \times \Omega \quad (6)$$

式中, EQP 为排放配额价格下限, SAC 为地区碳边际减排成本, Ω 为地区年碳强度降低指数,根据国家统一碳强度减排目标,2020 年单位 GDP 的 CO₂ 排放比 2005 年下降 40%—45%,本文即按最高减排目标 45% 计算,15 年时间每年碳强度需降低 3%,但实际上 2018 年单位 GDP 碳排放强度已下降 45.8%,年均下降 4%,因此 Ω 为 4%。而地区碳边际减排成本(SAC)同样根据方向性距离函数来度量,可得:

$$\text{SAC} = P_y \left[\frac{\partial \vec{D}_0(X, Y, C; G_Y, -G_C)}{\partial C} / \frac{\partial \vec{D}_0(X, Y, C; G_Y, -G_C)}{\partial Y} \right] \left(\frac{\Theta_c}{\Theta_Y} \right) \quad (7)$$

式中, $\vec{D}_0$ 为地区方向产出距离函数, P_y 为企业期望产出产品的市场价格, Y 为地区 GDP 值, C 为地区二氧化碳排放总量。 Θ_c 与 Θ_Y 为地区无效率因子:

$$\Theta_c = \frac{1}{1 - \vec{D}_0(X, Y, C; G_Y, -G_C) (G_C/C)} \quad (8)$$

$$\Theta_Y = \frac{1}{1 - \vec{D}_0(X, Y, C; G_Y, -G_C) (G_Y/Y)} \quad (9)$$

4 面向森林碳汇供给的企业减排路径选择

根据以上企业单位减排成本(UEC)分布特征,结合碳交易试点相关政策文件^[8,34-35],提出如下假设:

假设 1: 给予购买森林碳汇的企业单位购买量政策补贴为 S_1 , 则企业购买森林碳汇的单位减排成本为 $\text{UEC} = \text{FSC} - S_1$;

假设 2: 给予自行技术减排企业的单位减排量政策补贴为 S_2 , 则企业自行技术减排的单位减排成本为 $\text{UEC} = \text{MAC} - S_2$;

假设 3: 目前试点地区配额可发放宽松,则企业购买碳排放配额的单位减排成本为 $\text{UEC} = \text{EQP}$ 。

在上述假设下,追求减排成本最小化的企业将会做出 3 种不同的减排路径选择:

当 $MAC-S_2 < FSC-S_1$, 且 $MAC-S_2 < EQP$ 时, 企业选择自行技术减排, 其所占比例为:

$$J(S_1, S_2) = [1 - \int_{FSC-S_1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(MAC-S_2)}} e^{-\frac{[x-\hat{E}(MAC-S_2)]^2}{2\sigma^2(MAC-S_2)}} dx] \times I_{|MAC-S_2 \leq EQP|} \quad (11)$$

其中:

$$I_{|MAC-S_2 \leq EQP|} = \begin{cases} 1, & \text{如果 } MAC - S_2 \leq EQP \\ 0, & \text{如果 } MAC - S_2 > EQP \end{cases}$$

当 $EQP < MAC-S_2$, 且 $EQP < FSC-S_1$ 时, 企业选择购买配额, 其所占比例为:

$$P(S_1, S_2) = [1 - \int_{FSC-S_1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(MAC)}} e^{-\frac{[x-\hat{E}(MAC)]^2}{2\sigma^2(MAC)}} dx] \times I_{|EQP < MAC-S_2|} \quad (12)$$

其中:

$$I_{|EQP < MAC-S_2|} = \begin{cases} 1, & \text{如果 } EQP < MAC - S_2 \\ 0, & \text{如果 } EQP \geq MAC - S_2 \end{cases}$$

当 $FSC-S_1 < MAC-S_2$, 且 $FSC-S_1 < EQP$ 时, 企业选择购买森林碳汇, 其所占比例为:

$$T(S_1, S_2) = [\int_{-\infty}^{FSC-S_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(MAC-S_2)}} e^{-\frac{[x-\hat{E}(MAC-S_2)]^2}{2\sigma^2(MAC-S_2)}} dx] \times I_{|FSC-S_1 \leq MAC-S_2|} + \\ \int_{-\infty}^{FSC-S_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(MAC)}} e^{-\frac{[x-\hat{E}(MAC)]^2}{2\sigma^2(MAC)}} dx] \times I_{|FSC-S_1 \leq EQP|} \quad (13)$$

其中:

$$I_{|FSC-S_1 < MAC-S_2|} = \begin{cases} 1, & \text{如果 } FSC - S_1 \leq MAC - S_2 \\ 0, & \text{如果 } FSC - S_1 > MAC - S_2 \end{cases}$$

$$I_{|FSC-S_1 < EQP|} = \begin{cases} 1, & \text{如果 } FSC - S_1 \leq EQP \\ 0, & \text{如果 } FSC - S_1 > EQP \end{cases}$$

5 不同减排成本测算结果

5.1 森林碳汇供给成本

根据公式(1)与(2), 运用宏观面板数据计算出试点期间(2014年)我国森林碳汇供给成本(FSC)值。原始数据来源于1994—2013年全国森林资源清查结果。由于我国森林资源每5年清查一次, 森林蓄积量、森林生长量、森林枯损量和森林采伐量在每一个清查期内数据基本相同, 由此算得的各项碳汇指标也基本相同, 结果如表1。

将上述数据代入森林碳汇核算模型为:

$$C(t+1) = 0.983C(t) + 0.024 \quad (14)$$

以上回归方程 R^2 值为 0.795, 调整后的 R^2 值为 0.761, F 值为 23.272, Sig. 值为 0.000。因此, 森林采伐损失的碳汇量与 GDP 之间的具体关系式表示为:

$$GDP = -4907800632 + 22127219.48L(t) - 2481944.88L^2(t) \quad (15)$$

$$\min J_{27} = 9.83C(t) - 2316.86 + \sum_{t=1}^{26} (-4907800632 + 22127219.48L(t) - 2481944.88L^2(t)) \quad (16)$$

森林碳汇的状态方程表示为:

$$C \begin{cases} C(t+1) = 0.983C(t) + 0.024 \\ C(t=1994) = 130.53 \\ C(t) \geq 0, 0 \leq L(t) \leq L(t)_{\max} = 11.59 \end{cases} \quad (17)$$

表 1 1994—2013 年中国森林碳汇相关指标
Table 1 The relevant indicators of forest carbon sequestration in China from 1994 to 2013

年份 Year	GDP/(亿元)	森林蓄积 碳储量/亿 t Carbon storage of forest volume	森林生长 碳储量/亿 t Carbon storage of forest increment	森林碳消耗量/亿 t Forest carbon consumption		
				森林采伐量 Forest felling quantity	森林枯损量 Forest mortality	合计 Total
1994	48197.86	130.53	5.31	4.72	0.63	5.35
1995	60793.73	130.53	5.31	4.72	0.63	5.35
1996	71176.59	130.53	5.31	4.72	0.63	5.35
1997	78973.03	130.53	5.31	4.72	0.63	5.35
1998	84402.28	130.53	5.31	4.72	0.63	5.35
1999	89677.05	144.31	5.76	4.23	1.02	5.25
2000	99214.55	144.31	5.76	4.23	1.02	5.25
2001	109655.17	144.31	5.76	4.23	1.02	5.25
2002	120332.69	144.31	5.76	4.23	1.02	5.25
2003	135822.76	144.31	5.76	4.23	1.02	5.25
2004	159878.34	158.96	6.63	4.39	1.16	5.55
2005	184937.37	158.96	6.63	4.39	1.16	5.55
2006	216314.43	158.96	6.63	4.39	1.16	5.55
2007	265810.31	158.96	6.63	4.39	1.16	5.55
2008	314045.43	158.96	6.63	4.39	1.16	5.55
2009	340902.81	175.37	4.90	3.87	1.37	5.24
2010	401512.80	175.37	4.90	3.87	1.37	5.24
2011	473104.05	175.37	4.90	3.87	1.37	5.24
2012	519470.10	175.37	4.90	3.87	1.37	5.24
2013	568845.21	175.37	4.90	3.87	1.37	5.24

令哈密顿函数 $H(t)$ 为:

$$H(t) = H(C(t), L(t), \lambda(t+1), t) = 9.83C(t) - 2316.86 - 4907800632 + 22127219.48L(t) - 2481944.88L^2(t) + \lambda^T(t+1) \times 9.83C(t) = -4907800632 + 22127219.48L(t) - 2481944.88L^2(t) + (0.983\lambda^T(t+1) + 9.83)C(t) \quad (18)$$

$$\text{由 } \lambda(t) = \frac{\partial H(t)}{\partial C(t)}, \text{得 } \lambda(t) = 0.983C(t) + 9.83$$

$$\text{由 } \frac{\partial H(t)}{\partial L(t)} = 0, \text{得 } L(t) = 4.46$$

$$\text{由 } \lambda(N) = \frac{\partial \varphi(N)}{\partial C(N)}, \text{得 } \lambda(N) = 9.83$$

9.83 美元是生产储汇成本,根据相关学者研究,森林碳汇供给成本还包括前期准备、基准线测量、项目规划、环境与社会效益评估、审核申报、谈判与签约等交易成本^[31,36],约为生产储汇成本的 2.1—3 倍,取中间值 2.5 倍,这样森林碳汇供给成本为 34.405 美元,按照 2014 年年均汇率 1 美元=6.113 元人民币计算得森林碳汇供给成本(FSC)为 210.32 元/t。

5.2 企业碳边际减排成本

本文选择北京、上海、湖北、广东 4 个试点省市的火电、化工和钢铁 3 个行业作为碳排放密集型代表行业,按照各试点这 3 个行业目前参与减排的企业数量比例,共计选取 89 家减排企业作为被调查企业,每家被调查企业再选取 31 个具有独立投入-产出核算的能耗单位作为样本减排单位,总计 2759 家样本减排单位,其中火电 1054 家,化工 899 家,钢铁 806 家。根据国际评估减排效果惯例的时间间隔要求^[14,34,37],收集这 2759 家样

本企业单位减排后连续 3 年(2012—2014)的生产投入-产出数据,共获取 8277 个样本数据点,分布如表 2:

表 2 样本减排单位数据点分布

Table 2 Data point distribution of sample emission reduction units

试点省市 Carbon trading pilots	火电 Thermal power industry	化工 Chemistry industry	钢铁 Steel industry	合计 Total
北京	651	186	186	1023
上海	1767	1581	1209	4557
广东	465	279	558	1302
湖北	279	651	465	1395
合计 Total	3162	2697	2418	8277

三个行业样本减排单位投入—产出年平均数据如下表 3:

表 3 三个行业样本减排单位投入—产出年平均数据

Table 3 Annual average input-output data of emission reduction units in three industry samples

行业 Industry	年份 Year	固定资产 投资/(万元) Fixed assets investment	从业人 员/(万人) The employed person	工业中间 投入/(万元) Industrial intermediate input	原煤消耗/t Raw coal consumption	工业总产 值/(万元) Total industrial output value	CO ₂ 排放量/t CO ₂ emission
火电 Thermal power	2012	52233.41	371	27592.62	1144741	40235.82	2209694
	2013	54217.47	379	29630.46	1190327	44210.83	2297688
	2014	58246.82	382	30152.62	1221909	44803.67	2358650
化工 Chemical industry	2012	40063.77	226	24950.38	43655.85	36691.19	584268
	2013	42056.12	232	25778.92	44547.92	37780.37	585990
	2014	42395.46	237	27058.38	46012.46	38604.02	588817
钢铁 Steel	2012	167497.22	536	92599.77	2965435	116771.51	5724183
	2013	184448.61	545	99682.77	3366625	131020.72	6498595
	2014	208810.57	564	107274.42	3777549	145782.63	7291803
平均值 Mean	—	94441.05	385	51635.59	1533422	70655.64	3126632
标准差 Standard deviation	—	70390.17	137	36384.73	1477403	46056.18	2667929

对上述样本数据采用方向性距离函数计算得到 3 个行业样本企业减排后连续 3 年的平均减排成本数据,见表 4。

表 4 不同行业样本单位减排成本/(元/t)

Table 4 Emission reduction cost of the sample unit

行业 Industry	2012	2013	2014	平均值 Mean	标准差 Standard deviation
火电 Thermal power	352.90	380.98	387.33	373.74	118.32
化工 Chemical industry	309.22	316.07	344.98	323.42	132.98
钢铁 Steel	234.86	253.50	289.55	259.30	97.80

5.3 碳配额价格

考虑到配额交易在 7 个试点省市的普适性,本研究以 7 个试点省市减排后连续 3 年(2012—2014)的投入-产出指标数据为基础,测算各试点省市的碳边际减排成本,从而得出碳排放配额价格下限。与微观企业层面一样,在宏观区域层面上,选择能源、资本与劳动力作为基本投入要素,选择 GDP 作为期望产出,CO₂排放作为非期望产出。数据来源为相应年份的《中国统计年鉴》以及各样本省市统计年鉴的投入产出数据,其中能源投入方面参《中国能源统计年鉴》,选取原煤、洗精煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、其它油制品、液化石油气、天然气和电力等 12 种能源作为各样本省市的主要能源投入,并按照各能源的折标准煤和碳排放系数折算出各样本省市总的 CO₂排放量,如表 5。

表 6 是采用方向性距离函数得出的 7 个试点省市减排后连续 3 年的平均社会减排成本数据。由此可得,7 个试点省市减排后连续 3 年的平均社会减排成本(SAC)为 3942.84 元/t,根据公式(6),得到 4 个样本省市碳排放配额价格下限(EQP)为 157.71 元/t。

表 5 2012—2014 年 7 个试点省市 CO₂ 排放量/万 tTable 5 CO₂ emission in 7 carbon trading pilots from 2012 to 2014

年份 Year	上海	天津	北京	重庆	深圳	广东	湖北	平均 Average
2012	15786.11	12413.51	6149.76	7237.53	2791.82	50486.42	35969.71	18690.69
2013	16239.63	13107.62	6049.25	7641.69	2814.76	49326.65	37201.76	18911.62
2014	15634.29	12993.58	5062.88	7613.58	2807.54	26692.37	49746.69	15634.29
平均 Mean	15886.68	12838.24	5753.96	7497.60	2804.71	42168.48	40972.72	18274.63

表 6 2012—2014 年 7 个试点省市社会边际减排成本/(元/t)

Table 6 Social marginal cost of emission reduction in 7 carbon trading pilots from 2012 to 2014

年份 Year	上海	天津	北京	重庆	深圳	广东	湖北	平均 Average
2012	4256.74	3164.78	4764.13	1916.52	2913.54	5763.49	2786.58	3652.25
2013	4517.08	3201.44	5278.65	2021.77	3031.72	6277.82	3142.79	3924.46
2014	5112.65	3213.67	5879.87	2114.63	3120.58	6742.97	3578.27	4251.81
平均 Mean	4628.82	3161.628	5307.55	1968.821	2987.714	6261.43	3169.21	3942.84

6 不同政策情景下企业减排路径选择模拟分析

根据面向森林碳汇供给的企业减排路径选择机理,将不同减排成本测算结果代入本文构建的企业减排路径选择模型,得出不同政策情景下分行业的企业减排路径选择模拟结果:

6.1 火电企业减排路径选择

自行技术减排的企业单位数:

$$Q_{J(s_1, s_2)}^{\text{火电}} = 1054 \times \left[1 - \int_{210.32-s_1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 118.32} e^{-\frac{[x-(373.74-s_2)]^2}{2 \times 118.32^2}} dx \right] \times I_{|373.74-s_2 \leq 157.71|} \quad (19)$$

购买配额的单位数:

$$Q_{P(s_1, s_2)}^{\text{火电}} = 1054 \times \left[1 - \int_{210.32-s_1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 118.32} e^{-\frac{(x-373.74)^2}{2 \times 118.32^2}} dx \right] \times I_{|157.71 < 373.74-s_2|} \quad (20)$$

购买森林碳汇的单位数:

$$Q_{T(s_1, s_2)}^{\text{火电}} = 1054 \times \left[\int_{-\infty}^{210.32-s_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 118.32} e^{-\frac{[x-(373.74-s_2)]^2}{2 \times 118.32^2}} dx \right] \times I_{|210.32-s_1 \leq 373.74-s_2|} + \int_{-\infty}^{210.32-s_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 118.32} e^{-\frac{(x-373.74)^2}{2 \times 118.32^2}} dx \times I_{|210.32-s_1 \leq 157.71|} \quad (21)$$

6.2 化工企业减排路径选择

自行技术减排的企业单位数:

$$Q_{J(s_1, s_2)}^{\text{化工}} = 899 \times \left[1 - \int_{210.32-s_1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 132.98} e^{-\frac{[x-(323.42-s_2)]^2}{2 \times 132.98^2}} dx \right] \times I_{|323.42-s_2 \leq 157.71|} \quad (22)$$

购买配额的单位数:

$$Q_{P(s_1, s_2)}^{\text{化工}} = 899 \times \left[1 - \int_{210.32-s_1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 132.98} e^{-\frac{(x-323.42)^2}{2 \times 132.98^2}} dx \right] \times I_{|157.71 < 323.42-s_2|} \quad (23)$$

购买森林碳汇的单位数:

$$Q_{T(s_1, s_2)}^{\text{化工}} = 899 \times \left[\int_{-\infty}^{210.32-s_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 132.98} e^{-\frac{[x-(323.42-s_2)]^2}{2 \times 132.98^2}} dx \right] \times I_{|210.32-s_1 \leq 323.42-s_2|} + \int_{-\infty}^{210.32-s_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 132.98} e^{-\frac{(x-323.42)^2}{2 \times 132.98^2}} dx \times I_{|210.32-s_1 \leq 157.71|} \quad (24)$$

6.3 钢铁企业减排路径选择

自行技术减排的企业单位数:

$$Q_{J(S_1, S_2)}^{\text{钢铁}} = 806 \times \left[1 - \int_{210.32-S_1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 97.80} e^{-\frac{[x-(259.30-S_2)]^2}{2 \times 97.80^2}} dx \right] \times I_{|259.30-S_2 \leq 157.71|} \quad (25)$$

购买配额的单位数:

$$Q_{P(S_1, S_2)}^{\text{钢铁}} = 806 \times \left[1 - \int_{210.32-S_1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 97.80} e^{-\frac{(x-259.30)^2}{2 \times 97.80^2}} dx \right] \times I_{|157.71 < 259.30-S_2|} \quad (26)$$

购买森林碳汇的单位数:

$$Q_{T(S_1, S_2)}^{\text{钢铁}} = 806 \times \left[\int_{-\infty}^{210.32-S_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 97.80} e^{-\frac{[x-(259.30-S_2)]^2}{2 \times 97.80^2}} dx \right] \times I_{|210.32-S_1 \leq 259.30-S_2|} + \int_{-\infty}^{210.32-S_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 97.80} e^{-\frac{(x-259.30)^2}{2 \times 97.80^2}} dx \times I_{|210.32-S_1 \leq 157.71|} \quad (27)$$

减排主体单位以上述模型为基础,在不同政策背景下进行不同减排路径的比较与选择。为了直观反映减排主体微观决策行为的宏观“涌现”效应,本研究采用多主体(Multi-Agent)仿真集成平台 NetLogo 对不同政策情景下的企业减排路径选择进行模拟分析。模拟流程设计中,样本减排单位中自行技术减排、购买配额与购买森林碳汇的单位分别表示为“技术”、“配额”与“碳汇”三类虚拟主体(Agent),这三类虚拟主体分别采用公式(19)~(27)作为其行为规则;考虑到购买森林碳汇存在抵消比例限制、配额同样不能全覆盖的政策现实,以及不同行业碳排放差异、不同试点省市减排强度差异,虚拟主体决策行为规则中再添置一个修正因子模型^[10,14,37]:

$$N_{+-}[n_+, n_-] \equiv N_{+-}(Q_T) = v \exp \left\{ \frac{-(ECI \times D_t + f(\xi_1) + f(\xi_2))}{\Theta} \right\} \quad (28)$$

$$N_{-+}[n_+, n_-] \equiv N_{-+}(Q_T) = v \exp \left\{ \frac{+(ECI \times D_t + f(\xi_1) + f(\xi_2))}{\Theta} \right\}$$

式中, N 代表购买森林碳汇的单位(Q_T)的增减率,它由修正的增加量 n_+ 与减少量 n_- 共同决定, v 表示样本省市购买森林碳汇抵消比例,样本省市平均值设为 8%; ECI 表示样本省市初始期能耗强度(吨标准煤/万元 GDP),北京、上海、广东、湖北分别为 0.582、0.712、0.664、1.183; D_t 表示样本省市年度平均碳排放强度下降目标,北京、上海、广东、湖北分别为 18%、19%、18%、16%; Θ 表示不同试点省市配额覆盖率,样本省市均值设为 95%,以上变量赋值均来自调研数据。 ξ_1 表示样本中不同行业比例系数,根据表 1 火电 38.20%,钢铁 29.21%,化工 32.59%; ξ_2 表示样本中不同行业碳排放变化系数,根据表 2 整理计算得,火电 6.74%,钢铁 27.38%,化工 0.78%。模拟时,用 Logistic 方法自动获取 $f(\xi_1)$ 与 $f(\xi_2)$ 的函数转换规则。

6.4 情景模拟结果比较分析

参照试点省市减排模式,初始化情景设定为“假设 3”,即各行业配额发放宽松,则企业选择购买排放配额的单位减排成本为 $UEC = EQP$,所有企业皆购买配额,没有企业选择技术减排或购买森林碳汇。在此基础上,设定下列 3 种政策情景(S_1 与 S_2 两种政策的实施限额参照当前试点省市相关碳减排补贴政策文件^[8,29,38],假定在 0—168 元之间浮动),模拟得出不同行业企业减排路径选择。为使结果具有可比性,本文着重描述了三个行业选择不同减排路径的企业单位数所占比重。

这些行业的企业选择不同减排路径的行为依据与差异原因在于:基于上述“4”中企业减排路径选择的“追求减排成本最小化”理论假设,不同行业不同企业由于其自身边际减排成本存在差异,同样政策类型与政策幅度的激励,自身边际减排成本低于政策激励后购买森林碳汇或配额减排支出的,则这些行业的减排企业仍旧会选择自身技术减排,否则会相机选择购买配额或购买森林碳汇减排;对于自身边际减排成本等于政策激励后购买森林碳汇或配额减排支出的,则根据随机过程理论和上述修正因子模型(28),企业的减排路径选

择会存在随机性和耦合性,不同社会责任意识的企业,不同生态环保理念的企业会选择不同的减排路径。发现和认识这些差异的政策意义在于:政府在设计减排政策激励时,目标要明确,如果要提升企业对森林碳汇的购买需求,则根据不同行业不同企业的边际减排成本制定出适当的补贴幅度就十分重要,否则非但达不到既定的政策激励目标,反而会导致稀缺减排资源的浪费。下面对三种政策情景下不同行业企业的减排路径选择进行一个具体的描述与分析。

情景一:单独实施 S_1 ,即仅给予购买森林碳汇的企业单位购买量政策补贴。

由图 1 可看出,随着 S_1 由 0 至 168 元不断提升,三个行业企业购买配额的单位数逐步下降,而购买森林碳汇和技术减排的单位数不断上升,且购买森林碳汇的单位数增长迅速。当 S_1 到达 168 元时,火电企业中购买森林碳汇、购买配额和技术减排的单位数之比为 34:62:4;化工企业和钢铁企业中这一比例为 45:45:10 和 52:36:12。

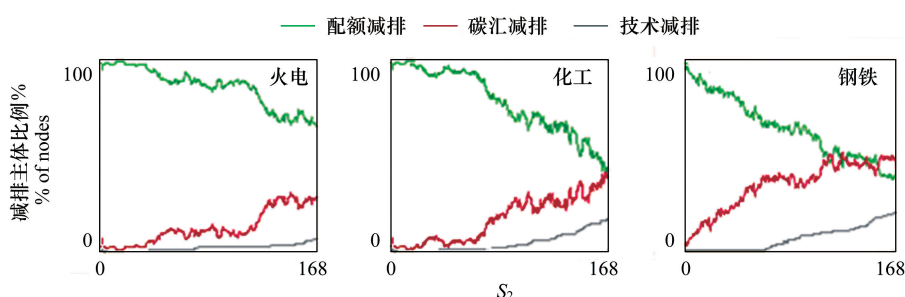


图 1 单独实施 S_1 时火电、化工和钢铁企业的模拟结果

Fig.1 Simulation results of thermal power, chemical and steel enterprises when S_2 is implemented separately

情景二:单独实施 S_2 ,即给予自行技术减排企业的单位减排量政策补贴。

由图 2 可看出,随着 S_2 由 0 至 168 元不断提升,三个行业企业购买配额的单位数先降后增,技术减排的单位数逐渐上升,而购买森林碳汇的单位数则先增后降,但不同行业减排路径选择的“拐点”有别:从各行业购买森林碳汇的单位数占比达峰来看,当 S_2 达到 102 元时,火电企业购买森林碳汇的单位数占 49%;当 S_2 达到 91 元时,化工企业购买森林碳汇的单位数占 38%;当 S_2 达到 64 元时,钢铁企业购买森林碳汇的单位数占 49%。从各行业技术减排的单位数占比达峰来看:当 S_2 到达 168 元时,火电企业中购买森林碳汇、购买配额和技术减排的单位数之比为 9:49:42;化工企业和钢铁企业中这一比例分别为 4:49:47 和 1:54:45。

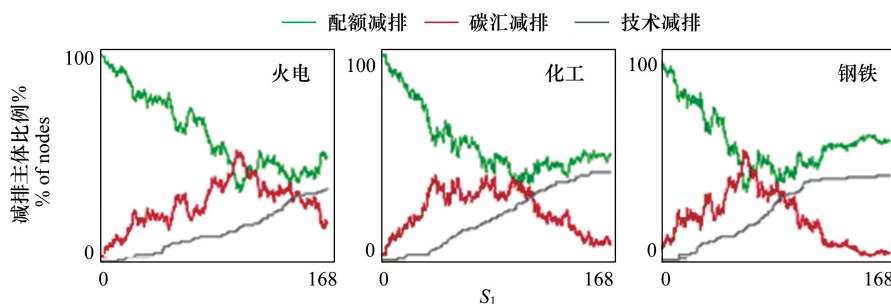


图 2 单独实施 S_2 时火电、化工和钢铁企业的模拟结果

Fig.2 Simulation results of thermal power, chemical and steel enterprises when S_2 is implemented separately

情景三:同时实施 S_1 与 S_2 ,即对购买森林碳汇和自行技术减排的企业均给予单位减排量政策补贴。

由图 3 可看出,在 S_1 与 S_2 分别由 0 至 168 元不断提升的同时,三个行业企业购买配额的单位数呈下降趋势,技术减排的单位数呈上升趋势,购买森林碳汇的单位数依然是先增后降的。从各行业购买森林碳汇的单

位数占比达峰来看,火电企业在 S_1 与 S_2 均为 94 元时,购买森林碳汇的单位数占 48%;化工企业在 S_1 与 S_2 均为 83 元时,购买森林碳汇的单位数占 48%;而钢铁行业在 S_1 与 S_2 均为 41 元时,购买森林碳汇的单位数占 39%。超过这三个阈值后,购买森林碳汇的企业单位数下降,购买配额的企业单位数小幅上升或降幅减小,技术减排的企业单位数则加速度上升。当 S_1 与 S_2 到达 168 元时,火电企业购买森林碳汇、购买配额和技术减排的单位数之比为 24:38:38;化工企业和钢铁企业中这一比例分别为 3:49:48 和 5:60:35。

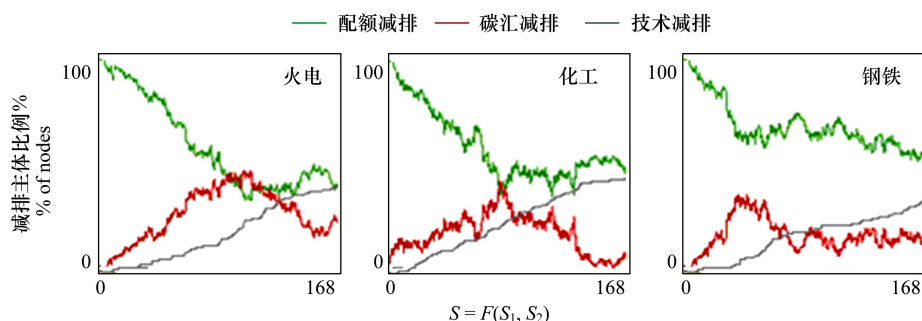


图3 同时实施 S_1 与 S_2 时火电、化工和钢铁企业的模拟结果

Fig.3 Simulation results of thermal power, chemical and steel enterprises when S_2 is implemented separately

7 结论与讨论

本文选择4个试点省市3个碳排放密集型行业89家企业的2759个减排单位为样本,基于企业减排路径选择模型,模拟分析了面向森林碳汇供给的企业受不同减排政策影响而选择的减排路径及其行业差异。研究表明:

假设企业有购买森林碳汇、技术减排和购买配额三种减排路径可选,则在总量控制和碳交易背景下,以利润最大化为目标的企业会对这三种减排成本进行比较。基于宏观统计年鉴数据和微观企业调研数据测算得出,上述三种减排成本分别为210元/t、319元/t和158元/t,较低的配额价格可作为当前碳交易试点配额交易为主且交易活跃的原因,而三种减排成本差异则为研究未来逐步收紧配额,面向林业碳汇供给,激励企业实质减排提供政策依据。

鉴于影响企业减排路径选择的因素众多,且行业间存在投入产出结构和能源利用效率等差异,在以提升森林碳汇需求为目的而设计减排政策时,有必要区分行业和补贴类型。通过政策情景模拟发现,综合考虑政策补贴的投入及各行业购买森林碳汇的比重,则分别应对火电企业实施102元/t的技术减排补贴,对化工企业给予技术减排补贴和购买森林碳汇补贴各83元/t,对钢铁企业购买森林碳汇进行168元/t的补贴。

正是考虑到各行业的实际情况,如果基于以上补贴类型和补贴标准进行分业施策,样本地区钢铁、化工和火电企业中分别有52%、48%和49%的单位购买森林碳汇,此时各行业中森林碳汇需求可望达到最高水平。这对于在进一步扩大森林碳汇市场潜力的同时,引导各行业积极节能减排,改善经营作业方式,减小减排成本压力,克服短期“技术天花板”局限等而言具有积极效应。

需要进一步讨论的问题是:(1)鉴于目前森林碳汇交易市场尚未真正建立,本研究所计算的森林碳汇供给成本是通过理论推导与推算出来的;(2)本文的配额价格下限按照七个试点省市的社会减排成本进行测算,随着全国统一碳市场的建立,应该按照全国所有省区的社会减排成本来测算才较为合理和更具普适性;(3)现实碳市场中,技术减排和购买配额减排是企业当前两种主要减排方式,购买森林碳汇减排目前尚局限于实施抵消机制的部分试点碳市场中,但本研究基于“理性人”假设,把购买森林碳汇减排与技术减排及购买配额减排作为三种平等的减排路径以供企业自行选择,同时在政策情景设定上设置了购买森林碳汇减排的补贴政策(S_1)以考察政策激励对企业购买森林碳汇减排的决策影响,但随着碳市场在减排资源优化配置中的基础作用不断提升,应当进一步探寻如何通过对碳市场相关管理措施的设置与完善,让碳市场能够自行激励企业在多种减排路径选择中,优先考虑购买森林碳汇进行减排,从而构建起减排与增汇之间的市场经济联系,

真正实现以市场化的方式还原林业生态服务价值,降低环境治理成本,促进社会整体经济效率的提升;(4) 本文对企业减排路径的选择基于减排成本比较的“理性人”假设,尚未纳入企业社会责任、企业生态环保理念等因素对其减排路径选择的影响,社会责任感与生态环保理念较强的企业在选择减排路径时,会优先考虑社会生态效益,如优先考虑购买森林碳汇进行减排等,而把减排成本比较放在第二位。因此,如何在企业减排路径选择研究中,纳入各种非理性因素及潜在的自然、经济与政策等风险因素的影响仍需进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] 李怒云. 林业应对气候变化与碳汇交易. 国土绿化, 2017, (1): 11-13.
- [2] 鄢德春. 创新碳抵消机制设计增强上海碳市场跨省区辐射力. 科学发展, 2013, (3): 92-100.
- [3] Kossoy A, Guigon P. State and Trends of the Carbon Market 2012. Washington: World Bank, 2012: 75.
- [4] Massetti E, Tavoni M. A developing Asia Emission Trading Scheme (Asia ETS). Energy Economics, 2012, 34 Suppl 3: S436-S443.
- [5] 周宏春. 世界碳交易市场的发展与启示. 中国软科学, 2009, (12): 39-48.
- [6] 王灿, 陈吉宁, 邹骥. 中国实施清洁发展机制的潜力分析. 中国环境科学, 2005, 25(3): 310-314.
- [7] 崔连标, 范英, 朱磊, 毕清华, 张毅. 碳排放交易对实现我国“十二五”减排目标的成本节约效应研究. 中国管理科学, 2013, 21(1): 37-46.
- [8] 席斯. 七省市碳交易试点方案浮出. 能源研究与利用, 2012, (5): 9-10.
- [9] 陈洁民, 王雪圣, 李慧东. 多哈气候峰会下亚太地区碳排放交易市场发展现状分析. 亚太经济, 2013, (2): 41-46, 40-40.
- [10] 陈诗一. 边际减排成本与中国环境税改革. 中国社会科学, 2011, (3): 85-100.
- [11] Kesicki F, Strachan N. Marginal Abatement Cost (MAC) curves: confronting theory and practice. Environmental Science & Policy, 2011, 14(8): 1195-1204.
- [12] Boyd G A, Tolley G, Pang J. Plant level productivity, efficiency, and environmental performance of the container glass industry. Environmental and Resource Economics, 2002, 23(1): 29-43.
- [13] Chambers R G, Chung Y, Färe R. Profit, directional distance functions, and Nerlovian efficiency. Journal of Optimization Theory and Applications, 1998, 98(2): 351-364.
- [14] 刘明磊, 朱磊, 范英. 我国省级碳排放绩效评价及边际减排成本估计: 基于非参数距离函数方法. 中国软科学, 2011, (3): 106-114.
- [15] Newell R G, Stavins R N. Climate change and forest sinks: factors affecting the costs of carbon sequestration. Journal of Environmental Economics and Management, 2000, 40(3): 211-235.
- [16] Nhung N T H. Forest Management for Carbon Sequestration: A Case Study of Eucalyptus Urophylla and Acacia Mangium in Yen Bai Province, Vietnam. Singapore: EEPSEA, 2009.
- [17] 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.
- [18] 郝婷婷, 李顺龙. 黑龙江省森林碳汇潜力分析. 林业经济问题, 2006, 26(6): 519-522, 526-526.
- [19] Van Kooten G C, Binkley C S, Delcourt G. Effect of carbon taxes and subsidies on optimal forest rotation age and supply of carbon services. American Journal of Agricultural Economics, 1995, 77(2): 365-374.
- [20] Hoen H F, Solberg B. Potential and economic efficiency of carbon sequestration in forest biomass through silvicultural management. Forest Science, 1994, 40(3): 429-451.
- [21] Uzawa H. Global warming initiatives: the pacific rim//Dornbusch R, Poterba J M, eds. Global Warming: Economic Policy Responses. Cambridge: The MIT Press, 1991.
- [22] Englin J, Callaway J M. Global climate change and optimal forest management. Natural Resource Modeling, 1993, 7(3): 191-202.
- [23] Ahn S E. How feasible is carbon sequestration in Korea? A study on the costs of sequestering carbon in forest. Environ Resource Econ, 2008, 41(1): 89-109.
- [24] Stavins R N, Richards K R. The Cost of U.S. Forest-Based Carbon Sequestration. Arlington: Pew Center on Global Climate Change, 2005.
- [25] Stainback G A, Alavalapati J R R. Economic analysis of slash pine forest carbon sequestration in the southern U.S. Journal of Forest Economics, 2002, 8(2): 105-117.
- [26] 张跃军, 魏一鸣. 化石能源市场对国际碳市场的动态影响实证研究. 管理评论, 2010, (6): 34-41.
- [27] 巴曙松, 吴大义. 能源消费、二氧化碳排放与经济增长——基于二氧化碳减排成本视角的实证分析. 经济与管理研究, 2010, (6): 5-11, 101-101.
- [28] 孟卫军. 溢出率、减排研发合作行为和最优补贴政策. 科学学研究, 2010, 28(8): 1160-1164.
- [29] 姜霞, 黄祖辉. 经济新常态下中国林业碳汇潜力分析. 中国农村经济, 2016, (11): 57-67.
- [30] James D, Francisco H A. Cost-Benefit Studies of Natural Resource Management in Southeast Asia. Singapore: Springer, 2015.
- [31] 于金娜, 姚顺波. 基于碳汇效益视角的最优退耕还林补贴标准研究. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(7): 34-39.
- [32] 张颖, 吴丽莉, 苏帆, 杨志耕. 我国森林碳汇核算的计量模型研究. 北京林业大学学报, 2010, 32(2): 194-200.
- [33] 韩洁平, 刘璇. 中国碳市场排放配额价格下限的制定研究. 时代金融, 2013, (8): 211-212.
- [34] 漆雁斌, 张艳, 贾阳. 我国试点森林碳汇交易运行机制研究. 农业经济问题, 2014, (4): 73-79.
- [35] 王文军, 谢鹏程, 胡际莲, 王乐, 赵黛青. 碳税和碳交易机制的行业减排成本比较优势研究. 气候变化研究进展, 2016, 12(1): 53-60.
- [36] 王杏芝, 高建中. 从市场主体角度探析森林碳汇市场发展. 林业调查规划, 2011, 36(1): 117-119, 139-139.
- [37] 陈丽荣, 曹玉昆, 朱震锋, 苏蕾. 企业购买林业碳汇指标意愿的影响因素分析. 林业经济问题, 2016, 36(3): 276-281.
- [38] 邓祥征, 葛全胜, 林英志. 碳汇管理政策影响分析模型与应用. 地理与地理信息科学, 2008, 24(6): 84-87, 92-92.