

引用格式: 曹先磊. 碳交易机制下造林碳汇项目投资时机与投资期权价值分析[J]. 资源科学, 2020, 42(5): 825-839. [Cao X L. Investment timing and option value of afforestation carbon sequestration project under carbon trading mechanism[J]. Resources Science, 2020, 42(5): 825-839.] DOI: 10.18402/resci.2020.05.03

碳交易机制下造林碳汇项目投资时机与投资期权价值分析

曹先磊

(山西财经大学国际贸易学院, 太原 030006)

摘要: 碳交易试点机制可为造林碳汇项目投资提供额外资金支持。但是, 在该机制下造林碳汇项目的顺利开展仍面临着较大的经济政策不确定性。充分考虑上述特征, 从投资者视角揭示造林碳汇项目投资时机临界阈值和投资的期权价值, 可为造林碳汇项目投资者的最优决策和政府推动造林碳汇项目投资的政策制定提供更全面的参考。为此, 基于实物期权最优投资时机选择理论, 利用 Faustmann-Hartman 模型测度造林碳汇项目价值, 运用动态规划法求解造林碳汇项目在项目前期规划备案阶段和项目建设阶段最优投资时机临界阈值和投资期权价值的解析表达式, 并以湿地松为例, 对造林碳汇项目最优投资时机临界阈值及投资期权价值进行了实证与模拟分析。研究发现: ①湿地松造林碳汇项目在项目前期规划备案阶段和项目建设阶段的投资期权价值分别为 0.12 万和 0.59 万元/hm², 最优投资时机临界阈值分别为 79.23 和 57.33 元/t, 理性的投资者只有在大于临界阈值时, 才会从事立即投资, 否则选择延迟投资。②碳价格波动率、碳汇交易成本、劳动力价格变量对湿地松造林碳汇项目投资时机临界阈值和投资期权价值有显著的影响; 上述因素提高增加了项目投资的期权价值和最优投资时机临界阈值, 但最优投资时机临界阈值提高却延迟了最优投资的时机; ③木材价格上涨、项目备案成功率提高将使最优投资时机临界阈值下降, 即上述因素提高可缩短投资者延迟投资的时机。基于此, 为促进造林碳汇项目投资、发挥林业在应对和适应气候变化中的作用, 政府应进一步完善碳价格波动调控政策和项目备案管理政策, 并采取综合措施降低碳汇交易成本。此外, 考虑到林业投资所具有的长期性、公益性等典型特征及中国劳动力价格不断上涨的趋势, 未来相关部门还需建立和实施林业碳汇补贴制度。

关键词: 碳交易; 造林碳汇项目; 投资时机; 实物期权; 动态规划法

DOI: 10.18402/resci.2020.05.03

1 引言

全球气候变化已是不争的事实, 积极推动造林和再造林等林业项目投资建设, 增加大气中的碳吸收是有效应对全球气候变化的重要手段^[1,2]。一方面, 森林生态系统作为陆地生态系统最大的碳库, 是全球碳循环中的重要组成部分^[2,3]; 另一方面, 通过造林和再造林、增加现有森林的碳密度等林业活动, 增加碳吸收、减缓碳释放不仅潜力巨大, 而且具明显的成本优势^[1,4,5]。为此, 积极开展上述林业活动

已在应对全球气候变化的国际政治和法律框架中得到体现, 并成为世界主要国家应对气候变化的战略选择^[6-8]。但是, 由于林业生产具有周期长、投资大、流动性差等特征, 使得造林和再造林等林业项目投资建设的顺利开展面临着资金不足、融资渠道缺乏等突出问题^[9,10]。

随着中国碳交易试点市场的建设与完善, 碳交易机制为中国造林碳汇项目的投资建设提供了新的资金支持^[11]。该试点交易机制在总量控制下以配

收稿日期: 2019-08-10 修订日期: 2019-10-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(71873126); 山西省哲学社会科学规划项目(2019B127); 国家社会科学基金项目(17BGL127)。

作者简介: 曹先磊, 男, 河南台前人, 讲师, 博士, 研究方向为森林资源与环境经济。E-mail: 872202969@qq.com

额交易为主,同时还不同程度准许企业开发囊括造林活动在内的中国核证减排量(China Certified Emission Reduction, CCER)项目进行交易,用以抵消控排企业等量的碳排放,进而为造林碳汇项目的投资建设提供额外资金。据统计,截至2017年3月,中国累计申请备案的CCER项目达2742个,其中林业CCER项目97个,预期未来可产生15.02亿吨CCER,按照中国林业碳汇20元/t的平均价格水平,造林碳汇等林业项目的CCER将可带来300亿元收入^[12]。可见,中国碳交易试点市场的稳定健康发展对中国造林碳汇项目的投资等林业增汇活动起了重要支持作用。

然而,在碳交易机制下造林碳汇项目的投资建设还有着严格的技术要求,且面临较大的经济与政策等不确定性。一方面,在碳交易机制下,林业碳汇主要表现为特定林业活动所额外增加的森林碳汇,这使得造林碳汇项目投资与其他土地利用方式或投资者的潜在选择密切相连,且在较长的生产周期内存在较大的技术和自然条件不确定性^[13];另一方面,林业碳汇需求主要通过国家碳排放权配额、林业碳汇抵消参与等政策来产生^[14,15]。但受中国整体减排目标、工业行业减排配额数量与分配方式、能源产品价格、CCER项目准入门槛、市场投机与热钱等因素影响,使得中国造林碳汇项目投资建设还面临较大的碳价格不确定性^[16,17]。而上述不确定性可显著地改变造林碳汇项目投资者对未来收益的预期,从而影响投资决策行为。因此,在碳交易机制下,将上述主要不确定性纳入一个整体分析框架,从投资者微观角度系统探究造林碳汇项目最优投资时机临界阈值等问题,将有助于更精准地揭示出驱动造林碳汇项目投资的关键因子,进而为有关部门推进造林碳汇项目的支持政策和保障措施提供参考。

鉴于此,本文将重点关注上述不确定性对造林碳汇项目投资决策的可能影响。在系统梳理国内外相关研究的基础上,拟选择实物期权理论和方法,对造林碳汇项目的最优投资时机和投资期权价值进行建模和理论分析;然后,以湿地松为例,对造林碳汇项目最优投资时机临界阈值与投资期权价

值展开实证检验与模拟研究,以期揭示出碳交易机制下影响最优投资时机和投资期权价值的关键因子,以为造林碳汇项目投资者的最优决策和政府推动造林碳汇项目投资的支持政策提供参考依据。

2 模型选择

2.1 实物期权及最优投资时机选择理论

实物期权是在金融期权的基础之上发展而来的,这一概念最早由Myers^[18]在1977年提出。由于考虑到不确定性、投资决策的灵活性以及沉没成本的存在,基于实物期权的投资决策理论得到快速发展,并成为投资决策研究领域的前沿理论。其中,实物期权最优投资时机选择理论认为,通过等待可以获取关于未来主要产品的价格、各项投入成本等方面的市场信息,以降低决策中面临的不确定性^[19,20];因此,理性的投资者在不确定的市场环境中往往选择等待而不是立即投资。同时,基于项目的投资往往是不可逆的和可以推迟的,因此,在不确定的市场环境中,投资者为获得最大的预期收益,就面临着如何寻找最优投资时机的现实问题^[19,20]。目前,实物期权最优投资时机选择理论和求解方法已经得到不断拓展并在项目投资决策领域得以应用。如:Bernanke^[21]通过引入贝叶斯学习指出,等待是有价值的,且是服从随机过程的。McDonald等^[22]、Dixit^[23]还对等待对投资的影响以及最优投资规则作了开创性的研究。同时,考虑到实物期权的标的资产很难在资本市场进行交易,也很难构造出与项目价值完全相同的资产动态组合,一些学者利用动态规划法对景区和可再生能源项目的投资时机和投资期权价值进行了分析,使该方法成为了应用较为广泛的求解分析方法^[19,20]。在此基础上,一些学者还将投资决策所涉及的变量,由项目价值扩展到引起项目价值波动的主要产品价格或者投入成本等更为基本的变量,并把变量所服从的随机过程,由几何布朗运动逐渐扩展到均值回归过程、泊松跳跃过程等^[19]。上述研究极大地丰富了实物期权最优投资时机选择理论,并从理论层面扩展到了适用于诸多领域的最优投资时机决策模型^[19,20,24-27]。

2.2 造林碳汇等林业项目投资期权

在国外,随着实物期权在自然资源领域的广泛应

2020年5月

用^[27],其也逐渐被引入林业项目投资评价中^[25,26,28,29]。其中:Duku-Kaakyire等^[26]通过比较静态 Faustmann 林业投资模型和实物期权分析方法,展示了实物期权如何将投资者柔性决策策略所具有的价值,用期权的形式给予量化,进而为不确定条件下林业项目投资分析提供了更为现实的框架。Manley^[29]在原木价格和碳价格均遵循随机游走的条件下,利用随机动态规划法确定了新西兰碳排放交易制度下预期的裸地价值,并分析了不同价格变动对土地价值的影响。在国内,一些学者把实物期权理论引入林业项目投资,初步介绍了林业项目投资在不同阶段蕴含的实物期权类型,并把该方法应用到了林业项目期权价值评价^[30]、林木轮伐期确定^[31]等方面。此外,贺晓波等^[32,33]还尝试借鉴复合实物期权的基本思想,对考虑碳汇收益的林业项目价值进行了评估,并对林业碳汇项目投资决策过程进行了动态模拟。这些研究为科学认识造林碳汇等林业项目的实物期权投资决策框架、林业项目投资期权价值及其求解方法提供了基础,也为相关部门应对气候变化的林业行动方案制定提供了理论指导。

但是,专门针对中国造林碳汇项目投资的相关研究仍存在进一步提升的空间。首先,在碳交易机制下,造林碳汇项目投资除了具有不确定性外,还具有阶段性特点,如:根据造林碳汇项目投资进展,其可以划分为项目前期规划备案和项目建设运营两个阶段。而上述两阶段具有一定的连续和关联性,使得造林碳汇项目投资具有一定的复合实物期权特征。其次,考虑上述特征,专门基于实物期权最优投资时机选择理论和方法,分析中国造林碳汇项目不同阶段的最优投资时机临界阈值和投资期权价值的研究尚未出现。事实上,实物期权最优投资时机选择理论可以将碳汇收益的不确定性、造林碳汇项目投资的阶段性及在不同阶段投资者所具有的柔性决策(如延迟投资)纳入到一个整体的分析框架,并可为本文提供一套科学的研究方法。鉴于此,本文将在已有研究基础上,基于实物期权最优投资时机选择理论和方法,对造林碳汇项目最优

投资时机和投资期权价值展开研究。具体而言:首先,利用 Faustmann-Hartman 模型测度造林碳汇项目价值;然后,利用动态规划法求解造林碳汇项目在项目不同运行阶段的最优投资时机临界阈值和投资期权价值的解析表达式;最后,以湿地松为例,对造林碳汇项目投资时机临界阈值和投资期权价值展开实证检验与模拟分析。

3 模型与数据

3.1 研究假设与模型建立

3.1.1 研究假设

根据实物期权最优投资时机选择理论和求解的前提条件,结合碳交易机制下造林碳汇项目投资建设的阶段性、碳价格不确定性等特征,本文提出如下假设:

H1:造林碳汇项目投资中不考虑外部竞争^①,即造林碳汇项目投资中所蕴含的实物期权都是独占的。并且造林碳汇投资者对于外来风险的态度是中性的,即投资者在作出任何决策时,不受自己主观偏见的影响,也不存在套利的机会。

H2:造林碳汇项目自建设开始到项目结束的时期内获得的收益为 π ,造林碳汇项目运行各阶段的总投资额为 $C_d = C_1 + C_2$ 。其中,造林碳汇项目前期规划备案阶段的各项投资总额的贴现值为 C_1 ,用以表征该阶段的期权执行成本;造林碳汇项目建设和运营阶段的各项投资总额的贴现值为 C_2 ,用以表征该阶段的期权执行成本。项目备案和预期核证减排量获得签发的不确定性用其事前预期碳汇量满足MRV(可测量、可报告和可核查)和《碳汇造林项目方法学》(以下简称《方法学》)要求的概率 ρ 表示,即投资者以概率 ρ 获得一个造林碳汇项目投资的实物期权,其失败的概率为 $1-\rho$,此时就意味着项目业主将不再继续投资,并损失投资成本 C_1 。

H3:造林碳汇项目总计入期限为 T , $T = T_1 + T_2$ 。其中,项目前期规划备案阶段的时间段为 T_1 ;项目建设和运行阶段的时间段为 T_2 。假设 t_1 时刻为造林碳汇投资者完成前期规划和备案的时间点,从0到时刻 t_1 ,如果未来市场恶化,造林者将放弃项目建

①当然,若考虑造林碳汇项目投资外部竞争者的威胁,将会影响期权的价值,此种情况一般考虑结合博弈论来进行讨论,本文对此情景不作分析。

设与运营,则损失前期规划备案阶段各项投资成本 C_1 ; t_2 表示造林碳汇项目终止运行的时间点。

H4:造林碳汇项目销售核证减排量的价格用 P_c 表示,假设碳价格 P_c 是一个随机变量且服从几何布朗运动,根据 Dixit 等^[34]的模型:

$$dP_c/P_c = \mu dt + \sigma dz \quad (1)$$

式中: dP_c/P_c 为核证减排量价格的变化速率, dP_c 为核证减排量价格的变化量; μ 为 P_c 的碳汇价格预期增长率,若资本市场不是充分和“完善”的情况下,等于风险调整贴现率 r 减去便利收益 δ ^[24]; σ 为碳汇价格预期增长率的标准差; dt 为时间的增量, dz 为标准维纳过程的增量,其中, $dz = \varepsilon_t \sqrt{dt}$, ε_t 服从标准正态分布, $\varepsilon_t \sim N(0, 1)$ 。

3.1.2 造林碳汇项目价值评价模型

在实物期权投资决策分析框架中,造林碳汇项目价值,即为标的资产价值。借鉴已有文献,本文将借鉴林业领域最经典的 Faustmann-Hartman 模型对造林碳汇项目在项目期内获得的收益进行测度^[32,35],并利用无限期的折现值表征造林碳汇项目价值:

$$V(P_c) = NPV_w^\infty + NPV_c^\infty = \frac{P_t Q(t) e^{-rt} + \int_0^t P_c Q'(t) e^{-rt} dt - C}{1 - e^{-rt}} \quad (2)$$

式中: $V(P_c)$ 为造林碳汇的项目价值,其可表征为无限期木材收益 (NPV_w^∞) 和碳汇收益 (NPV_c^∞) 的贴现值之和; P_t 和 P_c 分别为木材价格和碳价格,其中,不同胸径下的木材价格不同;木材价格在不同地区、不同时间可能存在明显差异^[36],为便于计算,根据实地调查和文献资料查阅,本文湿地松材原木价格取其均值 700 元/m³,并在后文对木材价格变化可能对最优投资时机临界阈值和投资期权价值的影响进行数值模拟分析; r 为连续贴现率,本文取银行长期存款利率 5%; $Q(t)$ 为树龄为 t 年时的单位面积蓄积量,它等于单位面积种植株数 (株/hm²) 与单株蓄积量的乘积, $Q'(t)$ 为 $Q(t)$ 的导数,结合《方法学》要求并参考文献[37],单株湿地松蓄积生长量方程为 $Q_d(t) = 0.2023 \times (1 - e^{-0.01t})^{3.991}$ 。 C 为造林碳汇项目投资产生的各项成本,包括造林成本、管护成本、基础设施建设成本以及由造林碳汇项目审定、核证与监测等产生碳汇交易成本^[38-40]。根据成本产生的

时间可进一步表示为: $C = C_f + C_m + C_h$ 。其中, C_f 为造林支出、造林当年基础设施建设、林业三防投入、碳汇交易成本(项目审定)等成本之和; C_m 为造林后每年抚育成本(仅前3年有)、林业三防成本以及碳汇交易(碳汇核证与监测)成本之和; C_h 为采伐运输成本。

对上述变量进行分析的基础上,为把造林碳汇项目价值表述为关于碳价 P_c 的函数:一方面,对公式(2)进行分解,可以得到木材收益扣除各项投入成本后的现值模型 V_w :

$$V_w = \frac{\delta P_t Q(t) e^{-rt} - C}{1 - e^{-rt}} = \frac{\delta(P_t - C_h) Q(t) e^{-rt} - C_f - C_m(1 - e^{-rt}) / (1 - e^{-rt})}{1 - e^{-rt}} \quad (3)$$

式中:湿地松的出材率 δ 取值为 0.75。

另一方面,根据《IPCC 土地利用、土地利用变化和林业优良做法指南》和《方法学》碳库选择保守性原则,在计算碳汇量时,本文将重点选择地上生物量碳库^[36]。同时,在考虑碳汇价值时,需将地上蓄积量转换为碳含量。因此,对公式(2)进行分解,可以得到碳汇收益现值模型 V_c ,具体如下:

$$V_c = \frac{\int_0^t P_c \lambda Q'(t) e^{-rt} dt}{1 - e^{-rt}} \quad (4)$$

$$\text{令 } V_c = \theta P_c, \text{ 则 } \theta = \frac{\int_0^t \lambda Q'(t) e^{-rt} dt}{1 - e^{-rt}} \quad (5)$$

式中: θ 为碳汇实物量参数; λ 为碳转换系数,是基本木材密度 D (0.424)、生物量扩展因子 BEF (1.614) 和生物量含碳率 CF (0.511) 的乘积,取值为 0.350。

基于对式(2)的分解,造林碳汇项目价值可表述为关于碳价格 P_c 的函数,具体为:

$$V(P_c) = V_w + \theta P_c \quad (6)$$

3.1.3 造林碳汇项目投资期权价值评价模型

(1)项目建设阶段。用 $F_2(P_c)$ 表示造林碳汇项目在项目建设阶段的投资期权价值,执行成本为 C_2 ,主要包括造林与抚育过程中的用工成本、化肥投入成本,林业三防投入成本、基础设施建设成本以及为获得核证减排量而额外增加的监测与核证等费用;造林碳汇项目价值 $V(P_c)$ 被视为标的资产价值。借鉴 Dixit 等^[34]的论述和期权价值求解过程, $F_2(P_c)$ 满足以下动态规划方程:

2020年5月

$$\frac{1}{2}\sigma^2 P_c^2 F''_2(P_c) + \mu P_c F'_2(P_c) - r F_2(P_c) = 0 \quad (7)$$

式中: $F'_2(P_c) = \frac{\partial F_2}{\partial P_c}$, $F''_2(P_c) = \frac{\partial^2 F_2}{\partial P_c^2}$ 。式(7)的齐次部分表示造林碳汇项目在项目建设阶段的投资期权价值。该齐次部分的一般解可以写成以两个根为幂的线性组合:

$$F_2(P_c) = A_1 P_c^{\beta_1} + A_2 P_c^{\beta_2} \quad (8)$$

式中: A_1 、 A_2 分别是由边界条件所决定的常数; β_1 和 β_2 分别是标准二次方程 $\frac{1}{2}\sigma^2 \beta(\beta-1) + \mu\beta - k = 0$ 中的正负根, 计算公式如下:

$$\beta_1 = \frac{1}{2} - \frac{r-\delta}{\sigma^2} + \sqrt{\left(\frac{r-\delta}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}} > 1 \quad (9)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{2} - \frac{r-\delta}{\sigma^2} - \sqrt{\left(\frac{r-\delta}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}} < 0 \quad (10)$$

若 P_{c2}^* 表示投资者在造林碳汇项目建设阶段进行投资的最优时机临界阈值, 则公式(8)的边界条件约束为:

$$\begin{cases} F_2(0) = 0 \\ F_2(P_{c2}^*) = V(P_{c2}^*) - C_2 \\ F'_2(P_{c2}^*) = V'(P_{c2}^*) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $F_2(0) = 0$, 表示当碳价为零时, 造林碳汇项目在项目建设阶段的投资期权 F_2 将永不执行, 也就是说此时的期权价值为零。该条约束符合造林碳汇项目额外性论证要求, 即没有碳汇收益, 造林活动在经济上并不具有可行性。 $F_2(P_c) = V(P_c) - C_2$ 为价值匹配条件, 来自于动态规划中的连续性表示造林碳汇项目投资期权 F_2 的值与已知项目终止回报值 ($V(P_c) - C_2$) 在最优投资时机临界阈值 P_{c2}^* 上相等。 $F'_2(P_{c2}^*) = V'(P_{c2}^*)$ 为光滑粘贴条件, 要求造林碳汇项目的投资期权价值和终止回报价值这两个函数的导数在边界阈值 P_{c2}^* 处也相等。

根据式(8), $\beta_2 < 0$, 当 P_c 趋向于 0 时, 则有 $P_c^{\beta_2}$ 趋向于 ∞ , 此时造林碳汇项目建设阶段的投资期权价值将趋向于 0, 因此 $A_2 P_c^{\beta_2}$ 的值应当等于 0。于是有:

$$F_2(P_c) = A_1 P_c^{\beta_1} \quad (12)$$

根据上述边界约束条件, 可以推导出造林碳汇项目在项目建设阶段投资期权价值的匹配条件和光滑粘贴条件, 分别为:

$$A_1 P_{c2}^{\beta_1} = V_w + \theta P_{c2}^* - C_2 \quad (13)$$

$$\beta_1 A_1 P_{c2}^{\beta_1-1} = \theta \quad (14)$$

根据公式(14)可以推导出 $A_1 = \frac{\theta}{\beta_1} P_{c2}^{*1-\beta_1}$, 将其

代入公式(13)可以求出纳入林业生产环境和碳汇交易市场环境变量在内的造林碳汇项目最优投资时机临界阈值的解析表达式:

$$P_{c2}^* = \frac{\beta_1}{\theta(\beta_1-1)} (C_2 - V_w) \quad (15)$$

式中: P_{c2}^* 为造林碳汇项目在项目建设阶段期权被执行的最优时机临界阈值, 即只有当碳市场价格大于等于该阈值时, 投资者才会执行投资期权, 从事投资, 否则延迟投资。式(12)中造林碳汇项目在建设阶段的投资期权价值, 适用于 $P_c < P_{c2}^*$ 的情况; 在 $P_c \geq P_{c2}^*$ 时, 造林碳汇项目在项目建设阶段的投资期权将被执行, 即投资者将从事投资; 因此, 该投资期权价值可表示为:

$$F_2(P_c) = \begin{cases} A_1 P_c^{\beta_1}, & P_c < P_{c2}^* \\ \theta P_c + V_w - C_2, & P_c \geq P_{c2}^* \end{cases} \quad (16)$$

(2)项目规划备案阶段。用 $F_1(P_c)$ 表示造林碳汇项目在项目前期规划备案阶段的投资期权价值, 该阶段执行成本为 C_1 , 主要包括编写 PDD 文件和项目审定投入的各项初始投入成本。由于只有执行造林碳汇项目前期规划备案阶段的投资期权 $F_1(P_c)$ 才可能拥有项目建设阶段的投资期权 $F_2(P_c)$, 因此可以认为项目前期规划备案阶段的期权 $F_1(P_c)$ 是一个复合期权, 借鉴已有研究^[20], 复合期权 $F_1(P_c)$ 的价值将由 $F_2(P_c)$ 的价值推导得出。上节给出了造林碳汇项目在项目建设阶段的最优投资时机临界阈值和投资期权价值的解析表达式 P_{c2}^* 和 $F_2(P_c)$ 。同理, 可以推导出造林碳汇项目在前期规划备案阶段的最优投资时机临界阈值 P_{c1}^* 和投资期权价值 $F_1(P_c)$ 的解析表达式, 具体如下:

$$P_{c1}^* = \frac{\beta_1}{\rho\theta(\beta_1-1)} (\rho C_2 + C_1 - \rho V_w) \quad (17)$$

式中: P_{c1}^* 为造林碳汇项目在项目前期规划备案阶段期权被执行的最优时机临界阈值, 即只有当碳价格大于临界阈值 P_{c1}^* 时, 投资者才执行该阶段投资期权, 从事投资; ρ 为投资者获得一个造林碳汇项目投资实物期权的概率, 即项目备案成功的概率。

相应的投资实物期权价值为:

$$F_1(P_c) = \rho(V_w + \theta P_c - C_2) - C_1 \quad (18)$$

3.2 模型变量与数据来源

3.2.1 模型变量

根据公式(15)-(18)可知,造林碳汇项目最优投资时机临界阈值和投资期权价值的解析表达式可以写为多个参数变量的隐函数。因此,有效的造林碳汇项目投资时机选择及促进造林碳汇项目投资的林业碳汇交易政策应该根据具体碳交易状况、林业行业环境以及具体项目特征而制定。根据模型涉及的相关变量参数及其内涵,本节将对各参数变量划分为3类,具体变量分类与变量描述情况如表1。从表1可以看出各变量的分类情况:

第一类:宏观变量参数,或者叫做外生变量。包括碳汇价格波动率 σ 、碳交易价格 P_c 、风险调整贴现率 r 、价值漏损率 δ 和项目备案成功率 ρ 等。其中: σ 、 P_c 和 ρ 变量只受宏观经济发展、碳交易环境等影响,其相对稳定。此外, P_c 也是本文延迟柔性决策下实物期权对应标的资产的主要不确定性来源。

第二类:微观项目参数。包括 C 、 V_w 、 θ 、 λ 等。这些参数因具体的项目不同而存在显著的差异,且参数内部之间(如投入产出)也存在一定内在

联系(公式(3)和(4))。同时,在资本市场运行状况不是充分和“完善”的条件下,上述部分参数也将对价值漏损率和风险调整贴现率产生一定影响^[24],因此对这类变量进行分析时,必须考虑相关性,不适合单独作数值模拟分析。但可以对 V_w 进行单变量分析,以考察其他外生变量(如劳动力价格、木材价格、碳汇交易成本)对投资时机和投资期权价值的影响。

第三类:主观性参数。主要包括碳价格预期增长率 μ 与中间变量参数 β 。

考虑到二阶段造林碳汇项目最优投资时机临界阈值和投资期权价值的解析表达式中,部分变量参数的经济含义并不是十分明确。为此,本文对这3类变量进一步分解,可以得到经济含义更加明确的参数变量,具体见表2。

3.2.2 数据来源及说明

为了使研究结果具有普遍意义,本文在选择当前碳交易市场环境变量参数时,主要是根据当前中国碳交易市场环境状况以及造林碳汇项目市场开发与交易状况来选择和确定。其中,碳汇价格波动率参数,主要利用中国7个碳交易所2013年6月17日—2017年3月3日的日交易价格高频数据计算得到,结果见表1。碳汇交易成本参数数据,主要通过

表1 模型中各参数变量分类及描述统计

Table 1 Classification and descriptive statistics of variables in the model

分类	变量	内容	单位	求解方法(取值)
微观项目参数	V_w	木材销售的收入与各项投入之差	万元/hm ²	式(4)
	C_1	项目备案立项阶段的投资额贴现值	万元/hm ²	0.01
	C_2	项目建设与运营阶段的投资额贴现值	万元/hm ²	5.43
	θ	碳汇实物量参数	t	式(6)
	T	项目计入期限	年	20
宏观变量参数	r	风险调整贴现率 ^a	%	1.03
	δ	便利收益(价值漏损率) ^b	%	1.02
	σ	碳汇价格波动率	%	34.0(历史数据法)
	ρ	项目备案成功率	%	15.2
主观参数	μ	碳价格预期增长率	%	0.01
	β_1	中间变量参数	—	式(10)

注:a. 风险调整贴现率为造林碳汇项目投资者所要求的碳汇投资回报率^[24],可用不同项目计入期碳汇收益价值与投资总成本比值的平均值来表征。b. 价值漏损率(Payout Rate)是指因持有实物期权、推迟投资损失的利润率,即推迟投资的机会成本;可用不同项目计入期生产带来的碳汇收益价值与投资项目价值之比的均值来表征。其中,碳汇收益测度时,本文主要通过系统梳理全国7个区域碳交易试点市场和2个自愿减排交易市场已出现的多例林业碳汇交易案例,并利用加权(交易量)平均的方法确定当前林业碳汇价格,取值为20元/t。

表2 模型变量分类及分析方法

Table 2 Classification and analysis methods of variables

分类	变量	单位	分析方法及原因
碳市场环境	碳价波动率	%	数值模拟分析
	碳汇交易成本	万元	数值模拟分析
	项目备案成功率	%	数值模拟分析
	价值漏损率	%	受碳汇价格、项目价值及投入总成本等因素的影响,不适合单独作数值模拟分析
	风险调整贴现率	%	受碳汇价格、项目价值及投入总成本等因素的影响,不适合单独作数值模拟分析
林业生产环境	固碳量	t	受碳汇价格、项目价值及投入总成本等因素的影响,不适合单独作数值模拟分析
	劳动力价格	元/工日	数值模拟分析
	木材价格	元/m ³	数值模拟分析
主观参数	投资者要求的回报率	%	由风险调整贴现率和价值漏损率确定,不作数值模拟分析

造林碳汇项目调查获得,项目备案成功率以及碳汇量计量相关参数数据,主要通过中国自愿减排交易信息平台以及已有文献查阅获取^[12],结果见表1。在选择当前林业生产环境变量参数时,主要是根据当前林业行业一般水平,并结合江西省湿地松造林碳汇项目案例点的实际调查情况来确定。

江西省湿地松造林碳汇项目是2005年2月16日以来的无林地,造林开始年份为2009年,种植密

度为1800株/hm²,该项目区域涉及江西省13个县市,总面积约17257.2 hm²,项目计入期为20年。同时,该项目是中国较早开展的并获得项目备案和减排量签发的造林碳汇项目。因此,选择该典型案例具有一定的代表性,且可获得本文所需要的数据。经课题组于2019年8月对该项目的造林企业和林业主管部门问卷调查后,对单位面积(hm²)湿地松造林碳汇成本进行整理和汇总,见表3。其中,营林

表3 单位面积湿地松造林碳汇成本投入

Table 3 Afforestation costs of slash pine carbon sequestration forests per unit area

项目	单位	数量	单价/元	总金额/元
营造林成本				31920.0
造林支出				9120.0
清山用工	工日/hm ²	22.5	140.0	3150.0
整地用工	工日/hm ²	18.0	140.0	2520.0
栽植用工	工日/hm ²	12.0	140.0	1680.0
扩穴培土用工	工日/hm ²	7.5	140.0	1050.0
种苗费用	株/hm ²	1800.0	0.4	720.0
前3年抚育总支出(共5次)	元/hm ²	—	—	22800.0
除杂抚育用工	工日/hm ²	75.0	140.0	10500.0
施肥抚育用工	工日/hm ²	30.0	140.0	4200.0
间伐抚育支出	工日/hm ²	22.5	140.0	3150.0
化肥费用	kg/hm ²	1650.0	3.0	4950.0
林业三防年投入 ^a	元/hm ² /a	1.0	1500.0	1500.0
造林当年基础设施建设	元/hm ²	1.0	1500.0	1500.0
木材采运费用	m ³	—	170.0	—
碳汇交易成本 ^b	元/hm ² /a	1.0	59.5	59.5

注: a. 主要是指防火、防病、防盗投入; b. 各国学者主要采用威廉姆森交易费用分类方式研究碳汇交易成本,即根据林业碳汇项目的实施程序所发生的各项费用来划分和衡量碳汇的各项交易成本。参考已有文献^[38,39],本文中把碳汇交易成本主要界定为项目实施过程中发生的编写PDD文件费用(30万元/项)、项目审定成本(20万元/项)、监测成本(20万元/次)与核证成本(15万元/次)^[40];相应的单位面积碳汇交易成本由整个项目的碳汇交易成本除以项目总面积所得。

支出 9120 元/hm²、后续 3 年总抚育支出 22800 元/hm²、20 年计入期年均碳汇交易成本为 59.5 元/hm²。因此, C_f 为: $9120.0+1500.0+1500.0+59.5=12179.5$ 元/hm²; 前 3 年 C_m 为: $22800.0 \div 3+1500.0+59.5=9159.5$ 元/hm², 此后年份 C_m 为: $1500.0+59.5=1559.5$ 元/hm²; 采伐运输成本 C_b 为 170 元/m³(实地调查数据)。

4 结果与分析

4.1 当前条件下造林碳汇项目投资时机和投资期权价值分析

基于解析表达式(15)-(18)和各参数的计量结果, 可计算得到当前条件下湿地松造林碳汇项目最优投资时机临界阈值和投资期权价值(表4)。从表4可以看出:

(1)湿地松造林碳汇项目在项目前期规划备案阶段的最优投资时机临界阈值(79.23元/t)显著高于项目建设阶段(57.33元/t), 这表明投资者一旦开始前期规划备案阶段的投资, 只要碳价格不低于项目建设阶段最优投资时机临界阈值, 就会连续投资直至造林碳汇项目投入运营。但是, 在国内外不同碳市场交易环境下, 项目业主投资时机选择可能存在一定差异。根据中国碳市场信心指数(China Carbon Market Confidence Index, CMCI), 结合中国7个碳交易所实际情况, 当前中国林业碳汇价格在14~90元/t之间^[36,41,42]。尽管在该区间投资者存在立即投资的可能性, 但由于国内碳价格平均水平(20元/t)低于湿地松造林碳汇项目最优投资时机的临界阈值, 投资者仍可能选择继续等待, 推迟投资直至达到临界阈值^[43]。而国际碳交易市场的低位和高位碳价格区间为68~255元/t^[41,42]。由于国际高位水平和低位水平的均值高于不同阶段湿地松造林碳汇项

目投资的最优时机临界阈值, 因此, 从经济学角度看, 理性的投资者将可能立即展开造林碳汇投资, 并通过国际碳交易获得额外碳汇收益。

(2)在项目不同运行阶段, 湿地松造林碳汇项目的投资期权价值也存在一定差异, 主要表现为项目建设阶段显著高于项目前期规划备案阶段。具体而言, 在前期规划备案阶段, 湿地松造林碳汇项目的投资期权价值为0.12万元/hm²; 而在项目建设阶段为0.59万元/hm²; 后者较前者高3.92倍, 两者差异非常显著。这主要是因为项目前期规划备案阶段的投资期权属于复合实物期权, 其价值主要来自于对未来增长投资的期权, 而不是直接的现金流。同时, 在造林碳汇项目的建设阶段, 其各项投入远大于项目前期规划备案阶段。

4.2 不同条件下造林碳汇项目投资时机和投资期权价值的敏感性分析

随着中国碳市场建设加快, 未来碳交易市场环境变量参数可能发生明显变化。同时, 不同地区之间林业生产环境也存在一定差异; 即便是同一地区在不同时间林业生产环境差异也较为明显。所以政策制定者更关注的是在技术经济参数变化时, 最优的政策应该如何制定和调整。因此, 有必要进一步探讨技术经济参数变化对最优投资时机临界阈值和投资期权价值的影响及差异。

4.2.1 碳汇价格波动率变化的敏感性分析

由图1可以看出: 碳汇价格波动率对湿地松造林碳汇项目最优投资时机临界阈值和投资期权价值均有显著正影响, 这表明在其他因素保持不变的条件下, 随着碳汇价格波动率提高, 尽管投资期权价值将显著增加, 但这也将使投资者持续等待, 直到碳价格达到最优投资时机临界阈值, 进而使投资者延迟了投资的时机。具体而言, 当碳汇价格波动率由原有水平的34.0%上涨至50.0%时, 湿地松造林碳汇项目在项目前期规划备案阶段及项目建设阶段的投资期权价值将分别上涨到0.3万元/hm²和1.2万元/hm², 上涨105.2%, 上涨较为明显; 投资时机临界阈值也分别上涨到150.4元/t和108.8元/t, 上涨了89.9%, 上涨也较为显著。这表明, 随着碳汇价格波动率的提高, 投资期权价值和投资时机临界阈值也

表4 造林碳汇项目投资时机临界阈值和投资期权价值的计算结果

Table 4 Calculation results of the critical threshold of optimal investment timing and option value of carbon sequestration afforestation project

项目阶段	投资时机临界阈值/ (元/t)	投资期权价值/ (万元/hm ²)
前期规划备案阶段	79.23	0.12
项目建设阶段	57.33	0.59

2020年5月

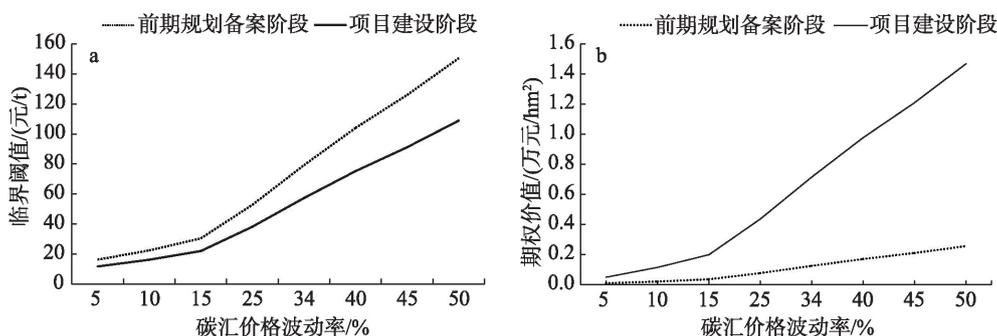


图1 碳汇价格波动率对造林碳汇项目投资时机临界阈值和投资期权价值的影响

Figure 1 Impact of carbon sequestration price volatility on the critical threshold of optimal investment timing and option value of carbon sequestration afforestation project

将显著增加,但这也将使投资者持续等待,并显著延迟了投资的时机。相反,若碳汇价格波动率下降,将引致投资期权价值下降,并将缩短投资者延迟投资的时机,碳汇价格波动率持续下降,甚至可促使投资者立即投资。上述分析表明,碳汇价格波动率是影响造林碳汇项目投资的重要因素。

4.2.2 碳汇交易成本变化的敏感性分析

由图2可知:碳汇交易成本变化对造林碳汇项目最优投资时机临界阈值和投资期权价值均有显著的正向影响,这表明,在其他因素保持不变的条件下,随着碳汇交易成本提高,造林碳汇项目投资期权价值将增加,但却使投资者延迟了投资的时机。具体而言,当碳汇总交易成本由原有水平上涨50%时,湿地松造林碳汇项目在不同阶段的投资期权价值将分别上涨到0.2万元/hm²和0.8万元/hm²,分别上涨44.0%和41.7%,上涨较为显著;最优投资时机临界阈值将分别上涨到114.1元/t和81.2元/t,

上涨也较为显著。这表明由于碳汇交易成本不确定性的增加,将使投资者持续等待直到达到最优投资时机临界阈值,进而延迟了投资的时机。相反,若碳汇交易成本下降,尽管将引致投资期权价值下降,但将会缩短投资者延迟投资的时机,碳汇交易成本持续下降甚至可促使投资者立即投资。这一结果与已有研究得出的交易成本是影响造林碳汇项目投资重要因素的结论一致^[38,39]。

4.2.3 项目备案成功率变化的敏感性分析

项目备案成功率不仅能够较好地反映项目实施是否符合《方法学》相关技术要求,而且还可从侧面反映出项目备案政策环境的不确定性。因此,为探究上述因素变化对湿地松造林碳汇项目投资的可能影响,本节将以项目备案成功率作为测度指标,探究其对湿地松造林碳汇项目最优投资时机临界阈值和投资期权价值的影响。由图3可以看出:项目备案成功率对湿地松造林碳汇项目前期规划

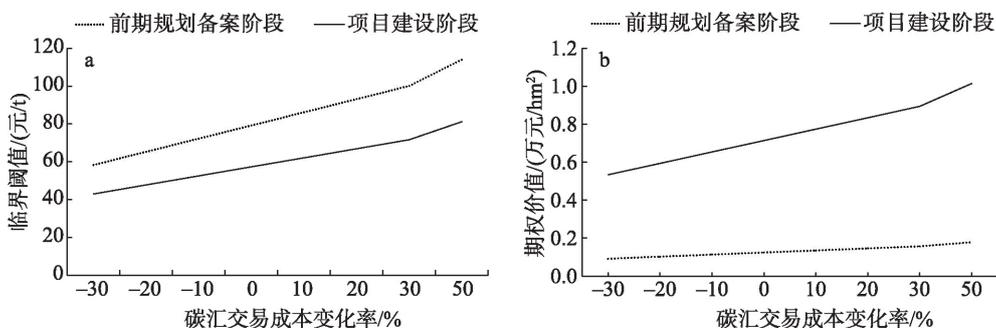


图2 碳汇交易成本对造林碳汇项目投资时机临界阈值和投资期权价值的影响

Figure 2 Impact of carbon sequestration transaction cost on the critical threshold of optimal investment timing and option value of carbon sequestration afforestation project

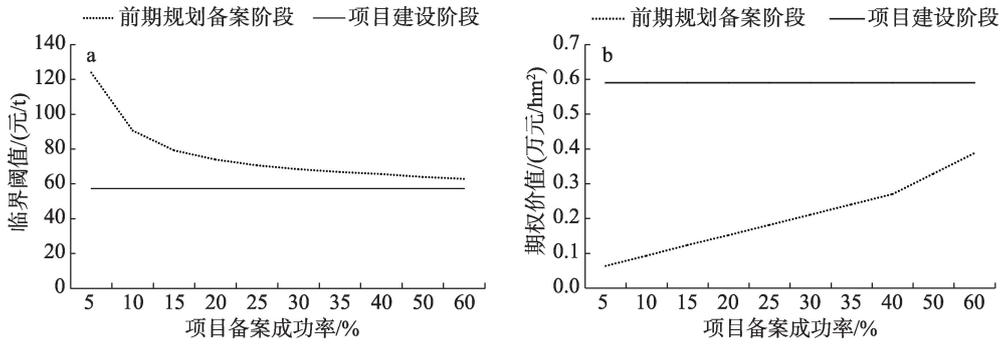


图3 项目备案成功率对造林碳汇项目投资时机临界阈值和投资期权价值的影响

Figure 3 Impact of project filing success rate on the critical threshold of optimal investment timing and option value of carbon sequestration afforestation project

备案阶段的投资期权价值有较为显著的正向影响,而对该阶段最优投资时机临界阈值有负向影响。这表明,在其他因素保持不变的条件下,随着项目备案成功率提高,投资期权价值将显著增加,并将缩短投资者延迟投资的时机。具体而言,在其他条件保持不变的情况下,当项目备案成功率由原有水平15.2%提高到60.0%时,项目前期规划备案阶段的投资期权价值将上涨到0.39万元/hm²,上涨2.25倍,上涨极为显著;而最优投资时机临界阈值将下降到62.88元/t,下降20.63%,下降显著。这表明,项目备案成功率提高将可缩短投资者延迟投资的时机。而项目备案成功率主要与项目建设是否符合《方法学》相关技术要求和国家项目备案管理政策有关,这蕴含的政策含义是,加快推广碳汇造林相关技术,宣传造林碳汇项目备案管理政策,以提高项目备案成功率是促进造林碳汇项目投资的重要措施。此外,项目备案成功率对项目建设阶段投资期

权价值和最优投资时机临界阈值并没有直接影响;这是因为该阶段的投资期权价值和最优投资时机临界阈值与项目备案成功率并没有直接的关系。

4.2.4 木材价格变化的敏感性分析

从图4可以看出:木材价格变化对投资期权价值和最优投资时机临界阈值均有极为显著负向影响,即木材价格提高相应的投资期权价值和投资时机临界阈值也将显著下降。这表明,在其他因素保持不变的条件下,尽管木材价格上涨降低了造林碳汇投资的期权价值,但将缩短投资者延迟投资的时机,甚至促进投资者立即投资。具体而言,当木材价格由原有水平上涨10%达到770元/m³时,湿地松造林碳汇项目在不同阶段的投资期权价值均低于零,且投资时机临界阈值也低于零,此时项目业主将采取立即投资的决策。反之,当木材价格下降10%到630元/m³时,湿地松造林碳汇项目在不同阶段的投资期权价值将分别上涨到0.7万元/hm²和4.1

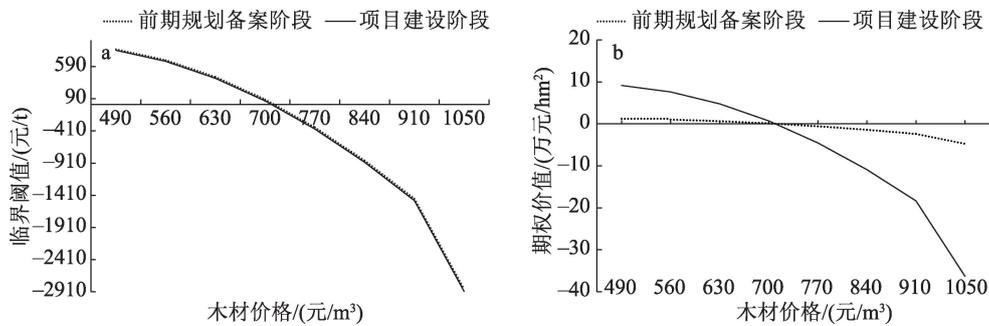


图4 木材价格变化对造林碳汇项目投资时机临界阈值和投资期权价值的影响

Figure 4 Impact of timber price changes on the critical threshold of optimal investment timing and option value of carbon sequestration afforestation project

2020年5月

万元/hm²,分别上涨了4.29倍和5.98倍,上涨极为显著;最优投资时机临界阈值将分别上涨到428.7元/t和409.1元/t,分别上涨了4.41倍和6.14倍,此时投资者将无限期延迟投资直到碳价格达到临界阈值,这表明木材价格是影响造林碳汇项目投资的重要因素。

4.2.5 劳动力价格变化的敏感性分析

从图5可以看出:劳动力价格变化对投资期权价值和最优投资时机临界阈值有着极为显著的正向影响,这表明在其他因素保持不变的情况下,随着劳动力价格上涨,投资期权价值也将显著增加,但将使投资者持续等待直到达到最优投资时机临界阈值,进而使投资者显著延长了投资的时机。具体而言,当劳动力价格上涨50%到达210元/工日时,湿地松造林碳汇项目在不同阶段的投资期权价值将分别上涨到1.2万元/hm²和7.9万元/hm²,投资时机临界阈值将迅速上涨到790.8元/t和769.2元/t,分别上涨了9.0倍和12.4倍,上涨极为显著,此时投资者将无限期延迟投资直到碳价格达到临界阈值,这将使得投资者延迟投资的时机。反之,当劳动力价格下降时,将显著缩短投资者延迟投资的时机;这表明劳动力价格是影响湿地松造林碳汇项目投资的重要因素。这蕴含的政策启示是,在中国劳动力价格不断上涨的趋势下,有效的林业碳汇交易政策必须充分考虑林业行业生产环境特征。

5 结论与政策启示

5.1 结论

本文基于实物期权最优投资时机选择理论,利用Faustmann-Hartman模型测度造林碳汇项目价

值,利用动态规划法求解造林碳汇项目在前期规划备案阶段和项目建设阶段最优投资时机临界阈值和投资期权价值的解析表达式,并以南方集体林区常见树种湿地松为例,对造林碳汇项目最优投资时机临界阈值与投资期权价值展开了实证与模拟分析。结果表明:

(1)湿地松造林碳汇项目在项目前期规划备案阶段的最优投资时机临界阈值(79.23元/t)显著高于项目建设阶段(57.33元/t),这表明投资者一旦开始前期规划备案阶段的投资,只要碳价格不低于57.33元/t,就会连续投资,直至造林碳汇项目投入运营。

(2)碳价格波动率、碳汇交易成本等变量对湿地松造林碳汇项目最优投资时机临界阈值和投资期权价值有较为显著的正影响。即:随着碳汇价格波动率或碳汇交易成本降低,造林碳汇项目投资期权价值和最优投资时机临界阈值将下降,上述因素下降尽管降低了投资期权价值,但会缩短投资者延迟投资的时机;当上述因素继续下降,可能会促使投资者立即投资。

(3)项目备案成功率是影响湿地松造林碳汇项目投资期权价值和最优投资时机临界阈值的重要因素,但影响方向并不相同。具体而言,项目备案成功率对湿地松造林碳汇项目前期规划备案阶段的投资期权价值有较为显著的正向影响,而对最优投资时机临界阈值有显著的负向影响,这表明随着项目备案成功率的提高,项目前期规划备案阶段的投资期权价值将提高,同时,投资者延迟投资的时机也将会缩短。

(4)劳动力价格变量对湿地松造林碳汇项目最

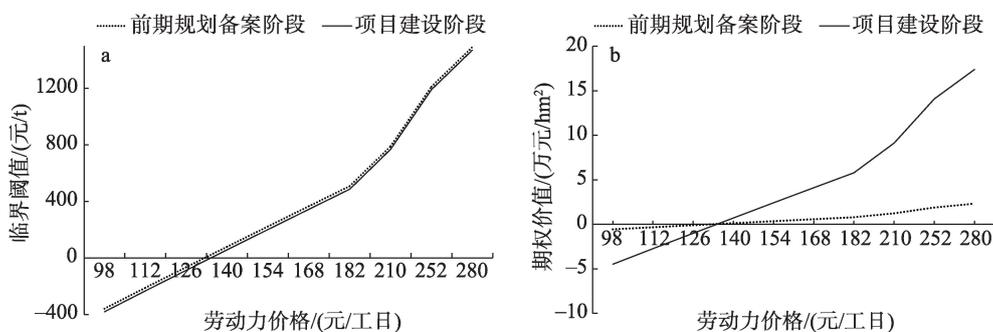


图5 劳动力价格对造林碳汇项目投资时机临界阈值和投资期权价值的影响

Figure 5 Impact of labor price on the critical threshold of optimal investment timing and option value of carbon sequestration afforestation project

优投资时机临界阈值和投资期权价值均有较为显著的正向影响,而木材价格变量对其有显著的负向影响。这表明随着劳动力价格提高,尽管投资期权价值得到显著增加,但却会使投资者延迟最优投资的时机;而木材价格提高,将会使投资者缩短延迟最优投资的时机,木材价格上涨到一定程度甚至促使投资者立即投资。

5.2 政策启示

在全国碳交易市场建设背景下,为有效推进造林碳汇项目投资,发挥林业在应对和适应气候变化中的作用,研究认为:

(1)相关部门需要进一步完善碳价格波动调控政策和项目备案管理政策。碳汇价格波动率和项目备案成功率对湿地松造林碳汇项目最优投资时机临界阈值和投资期权价值均存在显著的影响。而碳汇价格波动状况不仅受碳排放总量控制水平、配额分配政策、碳汇抵消参与政策等因素的影响,而且还受到宏观经济形势、能源、气候谈判、天气条件、政府政策等诸多不稳定因素的影响,因此,碳市场的风险因子更具多样性且波动更为剧烈^[16,17]。同时,项目备案成功率不仅受限于技术应用的合规性,而且还受造林碳汇技术标准、国家备案管理政策等因素的影响。鉴于此,为降低碳价格波动率、提高项目备案成功率,进而促进造林碳汇项目投资,破解碳汇林业发展的资金制约,未来在全国碳交易市场建设时,相关部门需要进一步完善碳价格波动调控政策和林业碳汇项目备案管理政策。

(2)采取综合措施降低林业碳汇交易成本。一方面,随着碳汇交易成本降低,将缩短投资者延迟投资的时机,交易成本下降到一定程度甚至会促进投资者采取立即投资的决策;另一方面,本文的碳汇交易成本并没考虑搜寻森林碳汇买卖双方信息的费用、买卖双方讨价还价确定交易合同的费用、风险管理费用等,事实上,上述成本也较高^[38,39],考虑上述成本将使投资者延迟投资的时机,这对促进造林碳汇项目投资和碳汇增收不利。为此,相关部门还应该简化交易流程、降低林业碳汇固定交易成本和搜寻成本。

(3)适时建立和实施林业碳汇补贴制度。尽管

在林业碳汇价格区间内14~90元/t,投资者存在立即投资的可能性;但是由于中国林业碳汇交易平均价格水平(20元/t)明显低于湿地松造林碳汇项目最优投资时机的临界阈值;且随着木材价格下降、劳动力价格上涨,最优投资时机临界阈值将显著提高。特别是,在中国劳动力价格不断上涨的背景下,造林碳汇项目最优投资时机的临界阈值甚至明显高于国际碳汇价格的高位水平(68~255元/t),这对推进造林碳汇项目投资建设、发挥林业在应对和适应气候变化中的作用极为不利。因此,考虑到林业行业所具有的长期性、公益性等典型特征及中国劳动力要素价格不断上涨的趋势,为促进造林碳汇项目投资,发挥林业在应对和适用气候变化中的作用,未来相关部门在完善和优化碳交易市场运行机制的同时,还应该适时建立和实施林业碳汇补贴制度。

参考文献(References):

- [1] Bastin J F, Finegold Y, Garcia C, et al. The global tree restoration potential[J]. *Science*, 2019, 365(6448): 76-79.
- [2] Newell R G, Stavins R N. Climate change and forest sinks: Factors affecting the costs of carbon sequestration[J]. *Journal of Environmental Economics & Management*, 2000, 40(3): 211-235.
- [3] Pan Y, Birdsey R A, Fang J Y, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. *Science*, 2011, 333(6045): 988-933.
- [4] 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[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 1995, 77(2): 365-374.
- [5] Benítez P, McCallum I, Obersteiner M, et al. Global Supply for Carbon Sequestration: Identifying Least-Cost Afforestation Sites under Country Risk Consideration[R]. Laxenburg: IIASAIR 2004-04-022, 2004.
- [6] 郑芊卉,周春国,韦海航,等. 各国应对气候变化自主贡献目标及林业对策[J]. *世界林业研究*, 2019, 32(2): 1-6. [Zheng Q H, Zhou C G, Wei H H, et al. National determined contribution in response to climate change and its forestry countermeasures[J]. *World Forestry Research*, 2019, 32(2): 1-6.]
- [7] Araya M M, Hofstad O. Monetary incentives to avoid deforestation under the reducing emissions from deforestation and degradation (REDD)+ climate change mitigation scheme in Tanzania[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2016, 21(3): 1-23.

2020年5月

- [8] 孔凡斌. 林业应对全球气候变化问题研究进展及我国政策机制研究方向[J]. 农业经济问题, 2010, (7): 105-109. [Kong F B. Forest response to global climate change research and research policy mechanism in China[J]. Issues in Agricultural Economy, 2010, (7): 105-109.]
- [9] 蒋海, 张道卫. 林业投资的激励机制与产权制度安排[J]. 农业技术经济, 2001, (1): 8-14. [Jiang H, Zhang D W. Incentives and property rights arrangement for promoting forestry investment[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2001, (1): 8-14.]
- [10] 孔凡斌. 我国林业投资的机制转变和规模结构分析[J]. 农业经济问题, 2008, (9): 91-96. [Kong F B. Analysis on the mechanism change and scale structure of forestry investment in China[J]. Issues in Agricultural Economy, 2008, (9): 91-96.]
- [11] 曾以禹, 吴柏海, 周彩贤, 等. 碳交易市场设计支持森林生态补偿研究[J]. 农业经济问题, 2014, 35(6): 67-76. [Zeng Y Y, Wu B H, Zhou C X, et al. Design of carbon trading market to support forest ecological compensation[J]. Issues in Agricultural Economy, 2014, 35(6): 67-76.]
- [12] 曹先磊, 程宝栋. 中国林业碳汇核证减排项目市场发展的现状、问题与建议[J]. 环境保护, 2018, 46(15): 27-34. [Cao X L, Cheng B D. Market development of forestry carbon sequestration project of China certified emission reduction: Current situation, challenges and suggestions[J]. Environmental Protection, 2018, 46(15): 27-34.]
- [13] 金婷, 吴伟光, 刘强, 等. 林业 CCER 碳汇项目风险评估模型与应用: 以安吉竹林经营碳汇项目为例[J]. 世界林业研究, 2018, 31(4): 91-96. [Jin T, Wu W G, Liu Q, et al. Risk assessment model of forestry-based CCER project and its application: A case study of Anji bamboo forest sink project[J]. World Forestry Research, 2018, 31(4): 91-96.]
- [14] 祁慧博, 龙飞. 基于贝叶斯网络的控排企业林业碳汇需求机理与仿真研究[J]. 资源科学, 2018, 40(9): 1822-1830. [Qi H B, Long F. Mechanism and simulation of carbon emission control enterprises' forestry carbon sequestration demand based on Bayesian network[J]. Resources Science, 2018, 40(9): 1822-1830.]
- [15] 龙飞, 沈月琴, 祁慧博, 等. 基于企业减排需求的森林碳汇定价机制[J]. 林业科学, 2020, 56(2): 164-173. [Long F, Shen Y Q, Qi H B, et al. Forest carbon sequestration pricing mechanism based on enterprises' demand for carbon emission reduction[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(2): 164-173.]
- [16] 辛姜, 赵春艳. 中国碳排放权交易市场波动性分析: 基于 MS-VAR 模型[J]. 软科学, 2018, 32(11): 134-137. [Xin J, Zhao C Y. The volatility analysis of Chinese carbon trading market: Based on the MS-VAR model[J]. Soft Science, 2018, 32(11): 134-137.]
- [17] 张云. 中国碳交易价格驱动因素研究: 基于市场基本面与政策信息的双重视角[J]. 社会科学辑刊, 2018, (1): 111-120. [Zhang Y. Study on the driving factors of China's carbon trade price: A dual perspective based on market fundamentals and policy information[J]. Social Science Journal, 2018, (1): 111-120.]
- [18] Myers S. Determinants of corporate borrowing[J]. Journal of Financial Economics, 1977, 5(2): 147-175.
- [19] 郭淳凡. 基于实物期权的企业景区投资最优时机决策分析[J]. 经济经纬, 2013, (6): 94-99. [Guo C F. The optimal investment timing of visitor attractions based on real options[J]. Economic Survey, 2013, (6): 94-99.]
- [20] 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 P P. Evaluating renewable energy investment options with uncertainty under volatile international carbon prices: A real options approach[J]. Journal of International Trade, 2012, (5): 94-104.]
- [21] Bernanke B S. The determinants of investment: Another look[J]. American Economic Review, 1983, 73(2): 71-75.
- [22] McDonald R, Siegel D. The value of waiting to invest[J]. Quarterly Journal of Economics, 1986, 101(4): 707-728.
- [23] Dixit A. Investment and hysteresis[J]. Journal of Economic Perspectives, 1992, 6(1): 107-132.
- [24] 闻德美, 姜旭朝, 孟科学. 基于实物期权法的海域使用权定价研究[J]. 资源科学, 2016, 38(5): 858-870. [Wen D M, Jiang X C, Meng K X. Valuation of the right to use sea areas based on the real options approach[J]. Resources Science, 2016, 38(5): 858-870.]
- [25] Yin R. Combining forest-level analysis with options valuation approach: A new framework for assessing forestry investment[J]. Forest Science, 2001, 47(4): 475-483.
- [26] Duku-Kaakyire A, Nanang D M. Application of real options theory to forestry investment analysis[J]. Forest Policy & Economics, 2004, 6(6): 539-552.
- [27] Brennan M J, Schwartz E S. Evaluating natural resource investments[J]. The Journal of Business, 1985, 58(2): 135-157.
- [28] Kallio M, Kuula M, Oinonen S. Real options valuation of forest plantation investments in Brazil[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 217(2): 428-438.
- [29] Manley B. How does real option value compare with Faustmann value in the context of the New Zealand Emissions Trading Scheme? [J]. Forest Policy and Economics, 2013, 30: 14-22.
- [30] 朱晓婷, 张绍文. 基于实物期权的林业投资项目价值评价模型研究[J]. 北京林业大学学报(社会科学版), 2018, 17(3): 69-77. [Zhu X T, Zhang S W. The value evaluation model of forestry investment projects based on real options[J]. Journal of Beijing Forestry University (Social Sciences), 2018, 17(3): 69-77.]
- [31] 李子敬, 张守攻, 孙晓梅, 等. 用实物期权法确定日本落叶松纸

- 浆林的最优轮伐期[J]. 林业科学, 2012, 48(5): 61-66. [Li Z J, Zhang S G, Sun X M, et al. Optimal rotation age of *Larix kaempferi* pulpwood plantation by real options approach[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(5): 61-66.]
- [32] 贺晓波, 王冬梅, 曾诗鸿. 附碳汇收益的林业投资项目价值评估: 基于实物期权定价理论[J]. 中国管理科学, 2017, 25(3): 39-48. [He X B, Wang D M, Zeng S H. Valuation for forestry investment projects with carbon sequestration benefits: Base on real option pricing theory[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(3): 39-48.]
- [33] 贺晓波, 张硕, 王冬梅, 等. 基于实物期权定价方法的林业碳汇项目投资决策仿真研究[J]. 运筹与管理, 2019, 28(2): 139-147. [He X B, Zhang S, Wang D M, et al. Research on investment decision-making design and simulation of forestry carbon sequestration project based on real option pricing theory[J]. Operations Research and Management Science, 2019, 28(2): 139-147.]
- [34] Dixit A K, Pindyck R S. Investment under Uncertainty[M]. Princeton: Princeton University Press, 1994.
- [35] Köthke M, Dieter M. Effects of carbon sequestration rewards on forest management: An empirical application of adjusted Faustmann Formulae[J]. Forest Policy & Economics, 2010, 12(8): 589-597.
- [36] 曹先磊, 张颖. 云南思茅松碳汇造林项目减排量、经济价值及其敏感性分析[J]. 生态环境学报, 2017, 26(2): 234-242. [Cao X L, Zhang Y. Analysis on the China certified emission reductions, economic value and its sensitivity of *Pinus Kesiya* var. *langbianensis* afforestation project in Yunnan Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(2): 234-242.]
- [37] 欧玉林. 岳阳市湿地松生长规律初步研究[J]. 湖南林业科技, 1993, 20(2): 17-21. [Ou Y L. A preliminary study on the growth rule of *Pinus elliottii* in Yueyang City[J]. Hunan Forestry Science & Technology, 1993, 20(2): 17-21.]
- [38] Pearson T R H, Brown S, Sohngen B, et al. Transaction costs for carbon sequestration projects in the tropical forest sector[J]. Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change, 2014, 19(8): 1209-1222.
- [39] Galik C S, Cooley D M, Baker J S. Analysis of the production and transaction costs of forest carbon offset projects in the USA[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 112(1): 128-136.
- [40] 曹先磊, 张颖. 落叶松碳汇造林项目 CCER 开发成本动态核算研究[J]. 统计与信息论坛, 2019, 34(3): 43-49. [Cao X L, Zhang Y. Dynamic accounting on the development costs of China Certified Emission Reduction issued by *Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen afforestation and reforestation project[J]. Statistics & Information Forum, 2019, 34(3): 43-49.]
- [41] 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[J]. 资源科学, 2016, 38(3): 485-492. [Huang Z S, Chen Q. Influencing factors analysis of forestry carbon sequestration cost-benefit based on afforestation cost methods[J]. Resources Science, 2016, 38(3): 485-492.]
- [42] 何桂梅, 王鹏, 徐斌, 等. 国际林业碳汇交易变化分析及对我国的启示[J]. 世界林业研究, 2018, 31(5): 1-6. [He G M, Wang P, Xu B, et al. Change analysis of international forestry carbon trading and its enlightenment on China[J]. World Forestry Research, 2018, 31(5): 1-6.]
- [43] 张颖, 张莉莉, 金笙. 基于分类分析的中国碳交易价格变化分析: 兼对林业碳汇造林的讨论[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(2): 116-124. [Zhang Y, Zhang L L, Jin S. Carbon trading price changes in China's carbon emission rights trading trials based on classification analysis: A discussion on forestry carbon sequestration afforestation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(2): 116-124.]

Investment timing and option value of afforestation carbon sequestration project under carbon trading mechanism

CAO Xianlei

(Faculty of International Trade, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, China)

Abstract: The carbon trading pilot scheme will provide additional financial support for investment in afforestation carbon sequestration projects. However, the successful implementation of afforestation carbon sequestration projects under this mechanism still faces great uncertainty of economic policies. Considering these characteristics, revealing the critical threshold of investment

timing and the option value from the perspective of investors can provide a more comprehensive reference for the optimal decision making of investors and policy making for the government to promote investment in afforestation carbon sequestration projects. Therefore, based on the theory of optimal investment timing of real options, the value of carbon sequestration afforestation project is measured by the Faustmann-Hartman model, and the analytical expression of optimal investment timing and option value of carbon sequestration projects in the early planning stage and project construction stage is solved by the dynamic programming method. Then, the critical threshold of optimal investment timing and the investment options value of *Pinus elliottii* afforestation project are empirically examined and simulated. The results show that: (1) The investment options value of *Pinus elliottii* afforestation carbon sequestration project is 0.12 yuan/hm² in the project planning and filing stage and 0.59 yuan/hm² in the project construction stage, respectively. The critical threshold of optimal investment timing is 79.23 yuan/t and 57.33 yuan/t, respectively. Rational investors will only invest immediately when the carbon price are above the critical threshold, otherwise they will choose to delay their investment. (2) Carbon price volatility, carbon sequestration transaction cost, and labor price variables have significant positive effects on the critical threshold of optimal investment timing and investment option value of *Pinus elliottii* afforestation project for carbon sequestration. With the increase of value of the above variables, the investment options value and the critical threshold of optimal investment timing will also increase, but it will delay the timing of investment. (3) The increase of timber price and the success rate of project filing will decrease the critical threshold of optimal investment timing. That is, the increase of value of the above variables can shorten the time for investors to delay investment. The study concludes that in order to promote investment of afforestation carbon sequestration project and for forestry to play the role in coping with and adapting to climate change, relevant government authorities need to establish and improve carbon price fluctuation control policies and project record management policies. At the same time, comprehensive measures should be taken to reduce carbon sequestration transaction costs. In addition, considering the long-term and public welfare characteristics of forestry investment and the rising trend of labor factor prices in China, it is necessary to establish and implement forestry carbon sequestration subsidy system in the future.

Key words: carbon trading; afforestation carbon sequestration project; investment timing; real options; dynamic programming method