

废弃矿山生态环境导向开发项目 政府激励政策选择研究

谭德庆,王 宁

(西南交通大学 经济管理学院,成都 610031)

摘要:基于生态环境导向的开发模式构建政府与企业参与的废弃矿山生态修复微分博弈模型,研究了政企双方在三种情形下的废弃矿山生态修复质量投入水平和生态修复质量、特色产业开发投入水平和特色产业品质、特色产品定价以及收益变化。这三种情形分别是政府对企业不实施激励政策、实施生态修复补偿政策以及实施产业扶持政策。结果表明:(1)三种废弃矿山生态修复情形下,政府延长特许期均能够激励企业增加废弃矿山生态修复质量投入和特色产业开发投入,同时差异化调整土地增值收益企业分配比例和特色产业税率可以使激励效果更好;(2)在生态修复补偿与产业扶持政策下,政府对企业生态修复质量投入和特色产业开发投入应该实施差异化激励政策;(3)对于开发技术密集型产业的废弃矿山,政府采用产业扶持政策,政企双方收益更高。对于开发劳动密集型产业的废弃矿山,政府采用生态修复补偿政策,政企双方收益更高;(4)政府通过建立废弃矿山生态环境导向开发示范项目并加大宣传推广力度可以提高双方收益,同时选择产业开发水平越高的企业参与,越有利于双方收益的提高。

关键词:生态环境导向开发模式;废弃矿山;生态修复质量;特色产业开发;微分博弈

DOI:10.13956/j.ss.1001-8409.2025.09.16

中图分类号:F426.1;X322

文献标识码:A

文章编号:1001-8409(2025)09-0120-11

Government Incentive Policy Selection for Eco-environment-oriented Development Projects of Abandoned Mines

TAN De-qing, WANG Ning

(School of Economics and Management, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: Based on the Eco-environment-oriented Development model, this paper constructs a differential game model of ecological restoration of abandoned mines with the participation of the government and enterprises, and studies the input level and ecological restoration quality of abandoned mines, the input level and quality of characteristic industries, the pricing of characteristic products, and the change of income of the government and enterprises in three scenarios. These three scenarios are the government's policy of not implementing incentives for enterprises, the implementation of the ecological restoration compensation policy, and the implementation of the industrial support policy. The results show that, (1) in all three scenarios, the government's extension of the concession period can incentivize enterprises to increase the investment in ecological restoration quality and the development of characteristic industries, and at the same time, the differentiated adjustment of the proportion of land value-added income allocated to enterprises and the tax rate of characteristic industries can make the incentive effect better. (2) Under the ecological restoration compensation and industrial support policy, the government should implement differentiated incentive policies for enterprises' ecological restoration quality inputs and characteristic industry development inputs. (3) For the development of technology-intensive industries in abandoned mines, the government adopts the industrial support policy, which is more profitable for both sides, and for the development of labor-intensive industries in abandoned mines, the government adopts the ecological restoration compensation policy, which is more profitable for both sides. (4) The government can increase the benefit of both sides by establishing the demonstration project of eco-environment-oriented development of abandoned mines and increasing the publicity and promotion efforts, and at the same time, the higher the level of industrial development of enterprises selected to participate in, the more conducive to the improvement of the benefit of both sides.

Key words: eco-environment-oriented development; abandoned mines; ecological restoration quality; characteristic industry development; differential game

引言

矿产资源作为经济社会发展的重要物质基础为我国经济发展和工业化进程做出了突出贡献,但是由于早

期环保意识淡薄、私挖滥采严重造成水土污染、地质灾害隐患、生态系统退化等严重生态环境问题,遗留了大量责任主体灭失的废弃矿山。截至2018年底,我国共

收稿日期:2024-10-08

基金项目:国家社会科学基金项目(22XKS015);教育部人文社会科学研究青年基金项目(22YJC630171);四川省自然科学基金青年项目(2023NSFSC1055);四川省社会科学基金项目(SC22C004)

作者简介:谭德庆(1966—),男,辽宁锦州人,博士、教授、博士生导师,研究方向为博弈理论及应用;王 宁(1990—),女,山西运城人,博士研究生,研究方向为决策科学(通讯作者)。

有历史遗留废弃矿山约99000座^[1],占用损毁土地面积227.01万公顷,是生产矿山占用损毁土地面积的1.7倍^[2],修复费用按照16万元/公顷^[1]保守估计,修复历史遗留废弃矿山共需3632.16亿元,政府财政压力巨大。由于我国历史遗留废弃矿山数量众多、治理资金不足,生态修复工作难度大、质量低,废弃矿山新的生态平衡与可持续发展较难实现,因此“一年绿、二年黄、三年光”的现象屡见不鲜。近几年废弃矿山修复面积每年仅约3万公顷^[3-5],生态修复率远低于国际水平^[6]。废弃矿山生态修复任务艰巨,生态安全形势依然严峻。

生态修复的环境效益与经济成本不匹配是一个世界难题^[7]。为鼓励社会资本^①参与生态环境治理,解决资金缺口大、环境效益难以转变为经济效益的难题,2018年8月,生态环境部首次提出探索开展生态环境导向的开发模式(EOD模式),相继出台十余部相关政策,并于2021年和2022年在废弃矿山生态修复、流域生态保护等领域分批开展94个EOD项目试点工作。基于EOD模式的废弃矿山生态修复就是采取“生态保护修复+产业导入”的方式,利用获得的特许经营权进行废弃矿山生态修复项目建设开发。特色产业主要包括康养等生态产业、电子元器件等环境敏感型产业以及清洁能源产业,其本质是通过市场化方法,以关联产业增值溢价反哺生态修复投入。目前EOD模式在废弃矿山生态修复方面已取得初步成效,例如,作为第一批EOD试点项目的宁城县历史遗留矿山,引入社会资本将生态修复与“旅游+康养+农业经济”产业融合开发,经测算运营期内年平均利润可达4305.6万元/年^[8],可实现特色产业收益补贴生态修复投入。EOD作为环境治理创新模式能有效缓解政府资金投入压力。但是由于目前我国EOD模式仍处于试点探索阶段,存在实践经验少、运行机制不畅、缺乏规范体系等问题,迫切需要理论与方法研究指导实践路径。

关于生态导向开发研究主要包括EOD实施路径^[9-11]、试点项目经验^[8,12,13]和项目评价^[14,15]研究三方面。一是对EOD项目实施路径进行研究。谢向等^[9]结合长江经济带实践案例分析了不同类型EOD项目的生态价值捕获路径。逯元堂等^[10]从项目策划与运作、资金筹集等方面提出EOD的实施路径。王盈盈等^[11]从制度协同、能力提升、市场培育、金融支持四方面提出“PPP+EOD”模式推广建议。二是对当前EOD试点项目进行研究。翁祥健等^[12]分析了当前社会资本参与EOD项目面临的困境。赵云皓等^[13]基于EOD国家试点项目分析了“矿山修复治理+存量资源经营”等生态产品价值实现的4个典型类型。武彩霞等^[8]以某EOD国家试点矿山生态修复项目为例,总结项目产出效果。三是对EOD项目评价研究。袁宏川等^[14]以长江流域综合治理EOD项目为例验证了EOD风险评价体系的科学性及应用性。彭岩波等^[15]提出基于EOD模式的生态保护和田园综合体开发规划,并对其实施成效进行测评。

国内外关于矿山生态修复多集中于生态修复理论^[16,19]、生态修复模式^[6,20-28]和生态修复效果评价^[29-31]以及技术层面^[32-34]研究。一是生态修复理论研

究。卞正富等^[16]认为碳中和要求矿山生态修复向产业替代与升级等方面延伸。李国政^[17]认为新时代矿山生态修复要求与多产业融合发展。刘向敏等^[18]和Cao等^[19]认为生态修复必须与经济发展相结合,实现经济与环境双赢。二是生态修复模式及方案研究。高艳妮等^[6]研究发现矿山生态修复的生态产品价值实现主要有新型产业导入、废弃资源利用和指标权属交易三种模式。刘亦晴^[20]等认为以PPP模式对废弃矿山进行环境治理,不仅可以缓解资金缺口,还可以提高环境治理效率。余慕溪等^[21]认为矿区土地再开发是资源型城市转型升级亟待解决的问题。Qiu等^[22]利用修正的最小累积阻力模型(MCR)提出中国矿业城市基于生态条件的景观空间优化方案。Wang等^[23]根据多种生态系统服务的时空变化确定密集采矿区的修复重点。刘亦晴等^[24]通过构建演化博弈模型对矿业遗迹旅游开发进行研究。Yan等^[25]通过构建演化博弈模型对稀土矿山修复中央、地方政府和矿山企业三方利益主体策略进行研究。刘亦晴等^[26]通过构建地方政府与社会资本参与的演化博弈模型对矿山废弃地治理PPP模式进行研究并提出政策建议。许礼刚^[27]通过构建多方利益主体参与的演化博弈模型,提出离子型稀土开发负外部性多元共治模式。闫光礼^[28]对离子型稀土矿山环境修复的演化博弈模型和策略进行研究。三是矿山生态修复效果评估研究。Chen等^[29]研究发现治理体系不完善和治理资金不足是矿山生态修复难以推进的主要原因。Vicenc等^[30]提出RESTOQUARRY这一采石场修复评估方法并进行测试。Zhang等^[31]对煤矿区农民生态修复绩效满意度进行评价。此外,还有Li等^[32],He等^[33]和Mieke等^[34]学者对矿山生态修复技术层面进行研究。

通过上述文献的梳理不难看出,近些年矿山生态修复已发展到生态与经济相融合的生态导向开发阶段,但是由于缺乏治理资金,废弃矿山生态修复开展进度并不理想。废弃矿山这类以生态环境治理为主的EOD项目由于前期修复难度大、投入高、周期长,特色产业的发展在起步阶段较为困难,往往需要政府补贴以激励社会资本投入^[10]。然而,通过梳理现有文献未发现基于EOD模式对政府如何激励企业参与废弃矿山生态修复的研究。微分博弈是一个动态系统,是在状态变量按照状态方程动态变化的情况下,得出利益相关者最优策略。废弃矿山生态环境导向开发是一个长期的、连续的政企双方动态博弈过程,政府和企业在做投资决策时,不仅与项目当前的生态修复规模和特色产业品质这两个状态有关,而且与项目进展时间相关。微分博弈作为解决此类连续动态问题的有效方法,可以科学准确地刻画出政府和企业随系统状态和时间变化的动态决策过程。然而,在环境研究领域,微分博弈多用于跨界污染控制、碳减排决策等方面,没有发现将微分博弈应用于废弃矿山生态修复的论文。

鉴于此,本文基于EOD模式构建政府与企业为博弈方的微分博弈模型,探讨政府如何激励企业开展废弃矿山生态修复和特色产业开发,比较分析政府实施生态修复补偿政策还是特色产业扶持政策对环境保护和经济

①社会资本是指在经济体系中,由私人部门或非政府实体提供的资金和资源等,主要包括民营资本、民间资本、外国企业和外商投资企业等。

发展更有益。研究结果为政府推广 EOD 模式进行废弃矿山生态修复提供政策依据,对资源枯竭型城市转换发展动能、寻找新的经济增长点实现可持续发展具有现实意义。

1 问题描述与研究假设

假设一个由政府(下标 z 表示)和社会资本(企业,下标 q 表示)组成的基于 EOD 的废弃矿山生态修复博弈,且双方均理性。废弃矿山 EOD 项目的主要收益来源为土地增值及特色产业导入后形成的经营性收益。

假设 1:政府、企业 t 时刻对废弃矿山生态修复质量投入水平分别为 $u(t)$ 和 $v(t)$,根据环境治理类文献^[35],设定 t 时刻生态修复质量投入成本分别为 $\frac{d_z}{2}u^2(t)$ 和 $\frac{d_q}{2}v^2(t)$,其中, $d_z > 0$ 和 $d_q > 0$ 分别是政府与企业废弃矿山生态修复的成本系数。

假设 2:废弃矿山生态修复质量的动态变化为:

$$\dot{Y}(t) = \alpha u(t) + \beta v(t) + \delta(Y(t) - Q), Y(0) = 0 \quad (1)$$

式(1)中, $Y(t)$ 为 t 时刻废弃矿山生态修复质量, $\alpha > 0$ 和 $\beta > 0$ 分别表示政府和企业生态修复质量投入水平对生态修复质量的影响系数,表征政府和企业生态修复技术水平。 $Q > 0$ 为生态修复质量标准,表征废弃矿山生态系统功能实现自我修复须达到的生态修复质量, $\delta > 0$ 表示废弃矿山生态系统功能恢复后的自我修复系数或生态系统功能未恢复的自我退化系数。

假设 3:政府、企业 t 时刻对特色产业开发的投入水平分别为 $m(t)$ 和 $n(t)$,借鉴现有文献^[36],假设 t 时刻特色产业开发成本为 $\frac{f_z}{2}m^2(t)$ 和 $\frac{f_q}{2}n^2(t)$,其中, $f_z > 0$ 和 $f_q > 0$ 分别是政府与企业特色产业开发的成本系数。

假设 4:政府和企业对特色产业的投资可以提高产业品质,特色产业品质的动态变化为:

$$\dot{H}(t) = gm(t) + kn(t), H(0) = 0 \quad (2)$$

式(2)中, $H(t)$ 为 t 时刻特色产业品质, $g > 0$ 和 $k > 0$ 分别表示政府和企业特色产业开发投入水平对特色产业品质的影响系数,表征政府和企业特色产业开发水平。

假设 5:废弃矿山生态修复后土地增值产生的边际收益为 $\pi(t) = \eta Y(t)$,其中, $\eta > 0$ 表示生态修复质量对生态修复后土地增值收益的影响系数,政府和企业对土地增值产生的收益分配比例分别为 λ 和 $1 - \lambda$, $S_0 > 0$ 为废弃矿山规模,则政府、企业获得的土地增值收益分别为 $\lambda \pi(t) S_0$ 和 $(1 - \lambda) \pi(t) S_0$ 。

假设 6:企业经营特色产业获得收益,特色产业品质会影响特色产品需求。同时,由于特色产业一般为生态开发型、环境敏感型和清洁能源产业,受生态环境影响较大,因此废弃矿山生态修复质量也会影响特色产品需求。假设特色产品的销量为 $D(t) = (a - bp(t))(\sigma H(t) + \omega Y(t))$,其中 $a > 0$ 为特色产业市场规模, $b > 0$ 为消费者价格敏感系数, $p(t)$ 为特色产品的价格, $\sigma > 0$ 和 $\omega > 0$ 分别为特色产业品质和生态修复质量对特色产品销量的影响系数。

假设 7:废弃矿山生态修复会为政府带来社会效益,如改善当地居民的生活环境和生活质量。假设单位规模

的废弃矿山生态修复带来的社会效益为 $\varphi = \zeta Y(t)$,其中, $\zeta > 0$ 为生态修复质量对社会效益的影响系数, $S_0 > 0$ 为废弃矿山规模,则废弃矿山生态修复的社会效益为 $\zeta Y(t) S_0$ 。

2 博弈模型求解与分析

政府效用函数由废弃矿山生态修复产生的土地增值收益、特色产业税收、社会效用、生态修复质量投入成本和特色产业开发成本构成,考虑有限特许期 T ,政府的效用目标函数具体如下:

$$J_z = \int_0^T e^{-rt} \left[\lambda \pi(t) S_0 + \tau(a - bp(t))(\sigma H(t) + \omega Y(t)) p(t) + \zeta Y(t) S_0 - \frac{d_z}{2} u^2(t) - \frac{f_z}{2} m^2(t) \right] dt \quad (3)$$

企业效用函数由土地增值收益、经营特色产业的净收益、生态修复质量投入成本和特色产业开发成本构成,考虑有限特许期 T ,企业的效用目标函数具体如下:

$$J_q = \int_0^T e^{-rt} \left[(1 - \lambda) \pi(t) S_0 + (1 - \tau)(a - bp(t))(\sigma H(t) + \omega Y(t)) p(t) - \frac{d_q}{2} v^2(t) - \frac{f_q}{2} n^2(t) \right] dt \quad (4)$$

式(4)中, $\tau > 0$ 为企业经营特色产业税率, $r > 0$ 为贴现率且 $r > \delta$ 。

将基于生态环境导向开发模式分别研究政府和企业无政策、生态修复补偿政策、产业扶持政策下废弃矿山生态修复质量投入水平、特色产业开发投入水平以及企业特色产品定价。

2.1 无政策情形(情形 1)

无政策情形用下标 N 表示,此时政府和企业独立承担各自的生态修复质量成本和特色产业开发成本,政府和企业各自目标函数和约束条件分别为:

$$\begin{aligned} \max_{u_N(t), m_N(t)} J_{zN} &= \int_0^T e^{-rt} \left[\lambda \eta Y_N(t) S_0 + \tau(a - bp_N(t))(\sigma H_N(t) + \omega Y_N(t)) p_N(t) + \zeta Y_N(t) S_0 - \frac{d_z}{2} u_N^2(t) - \frac{f_z}{2} m_N^2(t) \right] dt \\ s. t. \begin{cases} \dot{Y}_N(t) = \alpha u_N(t) + \beta v_N(t) + \delta(Y_N(t) - Q), \\ Y_N(0) = 0 \\ \dot{H}_N(t) = gm_N(t) + kn_N(t), H_N(0) = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \max_{v_N(t), n_N(t), p_N(t)} J_{qN} &= \int_0^T e^{-rt} \left[(1 - \lambda) \eta Y_N(t) S_0 + (1 - \tau)(a - bp_N(t))(\sigma H_N(t) + \omega Y_N(t)) p_N(t) - \frac{d_q}{2} v_N^2(t) - \frac{f_q}{2} n_N^2(t) \right] dt \\ s. t. \begin{cases} \dot{Y}_N(t) = \alpha u_N(t) + \beta v_N(t) + \delta(Y_N(t) - Q), \\ Y_N(0) = 0 \\ \dot{H}_N(t) = gm_N(t) + kn_N(t), H_N(0) = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

根据贝尔曼连续型动态规划理论,用HJB方程求解上述模型反馈纳什均衡,可得如下命题^①。

命题1:在无政策情形下,政府和企业废弃矿山生态修复质量投入 u_N^* 、 v_N^* 、特色产业开发投入 m_N^* 、 n_N^* 、特色产品定价 p_N^* 和均衡收益 J_{zN}^* 、 J_{qN}^* 分别为:

$$u_N^* = \frac{\alpha[\omega a^2 \tau + 4bS_0(\lambda\eta + \zeta)]}{4bd_z(r - \delta)}(1 - e^{(T-t)(\delta-r)}) \quad (7)$$

$$v_N^* = \frac{\beta[\omega a^2(1-\tau) + 4(1-\lambda)b\eta S_0]}{4bd_q(r - \delta)}(1 - e^{(T-t)(\delta-r)}) \quad (8)$$

$$m_N^* = \frac{a^2 \sigma \tau g}{4brf_z}(1 - e^{r(t-T)}) \quad (9)$$

$$n_N^* = \frac{a^2 \sigma k(1-\tau)}{4brf_q}(1 - e^{r(t-T)}) \quad (10)$$

$$p_N^* = \frac{a}{2b} \quad (11)$$

$$J_{zN}^* = \frac{\omega a^2 \tau + 4bS_0(\lambda\eta + \zeta)}{4b(r - \delta)}(1 - e^{(T-t)(\delta-r)})Y_N + \frac{a^2 \sigma \tau}{4br} \\ (1 - e^{r(t-T)})H_N + M_{N1}e^{r(t-T)}\left[\frac{1}{r}(1 - e^{r(T-t)}) - \frac{1}{\delta}(1 - e^{\delta(T-t)})\right] + M_{N2}\left[\frac{1}{r}(1 - e^{r(t-T)}) + \frac{2e^{r(t-T)}}{\delta}(1 - e^{\delta(T-t)}) + \frac{e^{r(t-T)}}{r-2\delta}(1 - e^{(T-t)(2\delta-r)})\right] + M_{N3}\left[\frac{1}{r}(1 - e^{2r(t-T)}) + 2(t-T)e^{r(t-T)}\right] \quad (12)$$

$$J_{qN}^* = \frac{\omega a^2(1-\tau) + 4(1-\lambda)b\eta S_0}{4b(r - \delta)}(1 - e^{(T-t)(\delta-r)})Y_N + \frac{a^2 \sigma(1-\tau)}{4br}(1 - e^{r(t-T)})H_N + M_{N4}e^{r(t-T)}\left[\frac{1}{r}(1 - e^{r(T-t)}) - \frac{1}{\delta}(1 - e^{\delta(T-t)})\right] + M_{N5}\left[\frac{1}{r}(1 - e^{r(t-T)}) + \frac{2e^{r(t-T)}}{\delta}(1 - e^{\delta(T-t)}) + \frac{e^{r(t-T)}}{r-2\delta}(1 - e^{(T-t)(2\delta-r)})\right] + M_{N6}\left[\frac{1}{r}(1 - e^{2r(t-T)}) + 2(t-T)e^{r(t-T)}\right] \quad (13)$$

其中,

$$M_{N1} = \frac{\omega a^2 \tau + 4bS_0(\lambda\eta + \zeta)}{4b(r - \delta)}Q\delta$$

$$M_{N3} = \frac{a^4 \sigma^2 \tau}{16b^2 r^2} \left[\frac{k^2(1-\tau)}{f_q} + \frac{g^2 \tau}{2f_z} \right]$$

$$M_{N2} = \frac{\omega a^2 \tau + 4bS_0(\lambda\eta + \zeta)}{16b^2(r - \delta)^2} \left\{ \omega a^2 \left[\frac{\beta^2(1-\tau)}{d_q} + \frac{\alpha^2 \tau}{2d_z} \right] + 4bS_0 \left[\frac{\beta^2 \eta(1-\lambda)}{d_q} + \frac{\alpha^2(\lambda\eta + \zeta)}{2d_z} \right] \right\}$$

$$M_{N4} = \frac{\omega a^2(1-\tau) + 4(1-\lambda)b\eta S_0}{4b(r - \delta)}Q\delta$$

$$M_{N6} = \frac{a^4 \sigma^2(1-\tau)}{16b^2 r^2} \left[\frac{k^2(1-\tau)}{2f_q} + \frac{g^2 \tau}{f_z} \right]$$

$$M_{N5} = \frac{\omega a^2(1-\tau) + 4(1-\lambda)b\eta S_0}{16b^2(r - \delta)^2} \left\{ \omega a^2 \left[\frac{\beta^2(1-\tau)}{2d_q} \right] \right\}$$

$$+ \frac{\alpha^2 \tau}{d_z} \left\{ \frac{\beta^2 \eta(1-\lambda)}{2d_q} + \frac{\alpha^2(\lambda\eta + \zeta)}{d_z} \right\} \left\{ \right\}$$

将 u_N^* 、 v_N^* 和 m_N^* 、 n_N^* 分别代入式(1)和式(2),可得废弃矿山生态修复质量和特色产业品质的动态最优轨迹为:

$$Y_N^*(t) = Y_N^{SS} \left[\frac{1}{\delta}(e^{\delta t} - 1) + \frac{1}{r-2\delta}e^{(\delta-r)(T-t)}(e^{(2\delta-r)t} - 1) \right] + Q(1 - e^{\delta t}) \quad (14)$$

$$H_N^*(t) = H_N^{SS} \left[t + \frac{e^{-rT}}{r}(1 - e^{rt}) \right] \quad (15)$$

其中,

$$Y_N^{SS} = \frac{1}{4b(r - \delta)} \left\{ \omega a^2 \left[\frac{\beta^2(1-\tau)}{d_q} + \frac{\alpha^2 \tau}{d_z} \right] + 4bS_0 \left[\frac{\beta^2 \eta(1-\lambda)}{d_q} + \frac{\alpha^2(\lambda\eta + \zeta)}{d_z} \right] \right\}$$

$$H_N^{SS} = \frac{a^2 \sigma \left[\tau g^2 f_q + (1-\tau)k^2 f_z \right]}{4brf_q f_z}$$

推论1:在无政策情形下,政府通过延长特许期 T 能够促进企业提高生态修复质量投入和特色产业开发投入,并且提高土地增值收益企业分配比例 $1-\lambda$ 与延长特许期对企业生态修复质量投入具有正交互效应,降低税率 τ 与延长特许期对企业生态修复质量和特色产业开发投入均具有正交互效应。

证明:对式(8)求特许期 T 一阶导数、 T 与土地增值收益政府分配比例 λ 和 T 与税率 τ 的混合导数,可得到:

$$\frac{\partial v_N^*}{\partial T} = \frac{\beta[\omega a^2(1-\tau) + 4(1-\lambda)b\eta S_0]}{4bd_q}e^{(T-t)(\delta-r)} > 0$$

$$\frac{\partial^2 v_N^*}{\partial T \partial \lambda} = -\frac{\beta \eta S_0}{d_q}e^{(T-t)(\delta-r)} < 0$$

$$\frac{\partial^2 v_N^*}{\partial T \partial \tau} = -\frac{\omega a^2 \beta}{4bd_q}e^{(T-t)(\delta-r)} < 0$$

对式(10)求特许期 T 一阶导数和 T 与税率 τ 混合导数,可得到:

$$\frac{\partial n_N^*}{\partial T} = \frac{a^2 k \sigma(1-\tau)}{4bf_q}e^{r(t-T)} > 0$$

$$\frac{\partial^2 n_N^*}{\partial T \partial \tau} = -\frac{a^2 k \sigma}{4bf_q}e^{r(t-T)} < 0$$

由此,可得到推论1。

2.2 生态修复补偿政策(情形2)

生态修复补偿政策用下标 E 表示。此方式下政府以补贴企业部分生态修复质量成本的形式为企业生态补偿,假设政府补贴企业生态修复质量成本比例为 $\varphi(t)$ ($0 < \varphi(t) < 1$),政府和企业各自目标函数和约束条件分别为:

$$\max_{u_E(t), m_E(t), \varphi(t)} J_{zE} = \int_0^T e^{-rt} \left[\lambda \eta Y_E(t) S_0 + \tau(a - bp_E(t)) \right]$$

$$(\sigma H_E(t) + \omega Y_E(t))p_E(t) + \zeta Y_E(t) S_0 - \frac{d_z}{2} u_E^2(t) - \frac{f_z}{2} m_E^2(t) - \frac{\varphi(t)}{2} d_q v_E^2(t) \Big] dt$$

①具体推理过程备索。

$$s. t. \begin{cases} \dot{Y}_E(t) = \alpha u_E(t) + \beta v_E(t) + \delta(Y_E(t) - Q), \\ Y_E(0) = 0 \\ \dot{H}_E(t) = g m_E(t) + k n_E(t), H_E(0) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \max_{v_E(t), n_E(t), p_E(t)} J_{qE} &= \int_0^T e^{-rt} \left[(1 - \lambda) \eta Y_E(t) S_0 + (1 - \tau) \right. \\ &\quad \left. (a - b p_E(t)) (\sigma H_E(t) + \omega Y_E(t)) \times p_E(t) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1 - \varphi(t)}{2} d_q v_E^2(t) - \frac{f_q}{2} n_E^2(t) \right] dt \\ s. t. \begin{cases} \dot{Y}_E(t) = \alpha u_E(t) + \beta v_E(t) + \delta(Y_E(t) - Q), \\ Y_E(0) = 0 \\ \dot{H}_E(t) = g m_E(t) + k n_E(t), H_E(0) = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

根据贝尔曼连续型动态规划理论,用HJB方程求解上述模型Stackelberg均衡,可得如下命题2^①。

命题2:在生态修复补偿政策下,政府和企业废弃矿山生态修复质量投入 u_E^* 、 v_E^* 、特色产业开发投入 m_E^* 、 n_E^* 、政府补贴企业生态修复质量成本比例 φ^* 、特色产品定价 P_E^* 和均衡收益 J_E^* 、 J_{qE}^* 分别为:

$$u_E^* = \frac{\alpha[\omega a^2 \tau + 4b(\lambda \eta + \zeta) S_0]}{4bd_z(r - \delta)} (1 - e^{(T-t)(\delta-r)}) \quad (18)$$

$$v_E^* = \frac{\beta[\omega a^2(1 + \tau) + 4bS_0[(1 + \lambda)\eta + 2\zeta]]}{8bd_q(r - \delta)} (1 - e^{(T-t)(\delta-r)}) \quad (19)$$

$$m_E^* = \frac{a^2 \sigma \tau g}{4brf_z} (1 - e^{r(t-T)}) \quad (20)$$

$$n_E^* = \frac{a^2 \sigma k(1 - \tau)}{4brf_q} (1 - e^{r(t-T)}) \quad (21)$$

$$\varphi^* = \frac{\omega a^2(3\tau - 1) + 4b\eta S_0(3\lambda - 1) + 8bS_0\zeta}{\omega a^2(\tau + 1) + 4bS_0[(\lambda + 1)\eta + 2\zeta]} \quad (22)$$

$$P_E^* = \frac{a}{2b} \quad (23)$$

$$J_E^* = \frac{\omega a^2 \tau + 4bS_0(\lambda \eta + \zeta)}{4b(r - \delta)} (1 - e^{(T-t)(\delta-r)}) Y_E + \frac{a^2 \sigma \tau}{4br} (1 - e^{r(t-T)}) H_E + M_{E1} e^{r(t-T)} \left[\frac{1}{r} (1 - e^{r(T-t)}) - \frac{1}{\delta} (1 - e^{\delta(T-t)}) \right] + M_{E2} \left[\frac{1}{r} (1 - e^{r(t-T)}) + \frac{2e^{r(t-T)}}{\delta} (1 - e^{\delta(T-t)}) + \frac{e^{r(t-T)}}{r - 2\delta} (1 - e^{(T-t)(2\delta-r)}) \right] + M_{E3} \left[\frac{1}{r} (1 - e^{2r(t-T)}) + 2(t - T)e^{r(t-T)} \right] \quad (24)$$

$$J_{qE}^* = \frac{\omega a^2(1 - \tau) + 4(1 - \lambda)b\eta S_0}{4b(r - \delta)} (1 - e^{(T-t)(\delta-r)}) Y_E + \frac{a^2 \sigma(1 - \tau)}{4br} (1 - e^{r(t-T)}) H_E + M_{E4} e^{r(t-T)} \left[\frac{1}{r} (1 - e^{r(T-t)}) - \frac{1}{\delta} (1 - e^{\delta(T-t)}) \right] + M_{E5} \left[\frac{1}{r} (1 - e^{r(t-T)}) + \frac{2e^{r(t-T)}}{\delta} (1 - e^{\delta(T-t)}) + \frac{e^{r(t-T)}}{r - 2\delta} (1 - e^{(T-t)(2\delta-r)}) \right] + M_{E6}$$

$$\left[\frac{1}{r} (1 - e^{2r(t-T)}) + 2(t - T)e^{r(t-T)} \right] \quad (25)$$

其中,

$$M_{E1} = \frac{\omega a^2 \tau + 4bS_0(\lambda \eta + \zeta)}{4b(r - \delta)} Q\delta, \quad M_{E3} = \frac{a^4 \sigma^2 \tau}{16b^2 r^2}$$

$$\begin{aligned} &\left[\frac{k^2(1 - \tau)}{f_q} + \frac{g^2 \tau}{2f_z} \right] \\ M_{E2} &= \frac{\alpha^2[\omega a^2 \tau + 4bS_0(\lambda \eta + \zeta)]^2}{32b^2(r - \delta)^2 d_z} \\ &+ \frac{\beta^2[\omega a^2(1 + \tau) + 4bS_0[(1 + \lambda)\eta + 2\zeta]]^2}{128b^2(r - \delta)^2 d_q} \\ M_{E4} &= \frac{\omega a^2(1 - \tau) + 4(1 - \lambda)b\eta S_0}{4b(r - \delta)} Q\delta \\ M_{E6} &= \frac{a^4 \sigma^2(1 - \tau)}{16b^2 r^2} \left[\frac{k^2(1 - \tau)}{2f_q} + \frac{g^2 \tau}{f_z} \right] \\ M_{E5} &= \frac{\omega a^2(1 - \tau) + 4(1 - \lambda)b\eta S_0}{16b^2(r - \delta)^2} \left\{ \omega a^2 \left[\frac{\beta^2(1 + \tau)}{4d_q} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{\alpha^2 \tau}{d_z} \right] + 4bS_0 \left\{ \frac{\beta^2[(1 + \lambda)\eta + 2\zeta]}{4d_q} + \frac{\alpha^2(\lambda \eta + \zeta)}{d_z} \right\} \right\} \end{aligned}$$

将 u_E^* 、 v_E^* 和 m_E^* 、 n_E^* 分别代入式(1)和式(2),可得废弃矿山生态修复质量和特色产业品质的动态最优轨迹为:

$$Y_E^*(t) = Y_E^{SS} \left[\frac{1}{\delta} (e^{\delta t} - 1) + \frac{1}{r - 2\delta} e^{(\delta-r)(T-t)} (e^{(2\delta-r)t} - 1) \right] + Q(1 - e^{\delta t}) \quad (26)$$

$$H_E^*(t) = H_E^{SS} \left[t + \frac{e^{-rt}}{r} (1 - e^r) \right] \quad (27)$$

其中,

$$\begin{aligned} Y_E^{SS} &= \frac{1}{4b(r - \delta)} \left\{ \omega a^2 \left[\frac{\beta^2(1 + \tau)}{2d_q} + \frac{\alpha^2 \tau}{d_z} \right] + 4bS_0 \left\{ \frac{\beta^2[(1 + \lambda)\eta + 2\zeta]}{2d_q} + \frac{\alpha^2(\lambda \eta + \zeta)}{d_z} \right\} \right\} \\ H_E^{SS} &= \frac{a^2 \sigma [\tau g^2 f_q + (1 - \tau) k^2 f_z]}{4brf_z f_q} \end{aligned}$$

推论2:在生态修复补偿政策下,对于生态修复后社会效益较高(即 $\zeta > \zeta_i^*$) 的废弃矿山,政府需要补贴企业生态修复质量成本比例 φ^* 才能有效激励企业生态修复质量投入。

证明:观察式(22)可知,存在 $\zeta = \zeta_i^* = \frac{\omega a^2(1 - 3\tau) + 4bS_0\eta(1 - 3\lambda)}{8bS_0}$, 当 $\zeta > \zeta_i^*$ 时,有 $\varphi^* > 0$ 。

由此易得到推论2。

推论3:在生态修复补偿政策下,政府通过延长特许期 T 能够促进企业提高生态修复质量投入和特色产业开发投入,并且降低土地增值收益企业分配比例 $1 - \lambda$ 和适度提高税率 τ 与延长特许期对企业生态修复质量投入均具有正交互效应,降低税率 τ 与延长特许期对企业特色产业开发投入具有正交互效应。

证明:对式(19)求特许期 T 一阶导数和 T 与土地增值收益政府分配比例 λ 混合导数可得到:

①具体推理过程备索。

$$\frac{\partial v_E^*}{\partial T} = \frac{\beta \{ \omega a^2 (1 + \tau) + 4bS_0 [(1 + \lambda) \eta + 2\zeta] \}}{8bd_q} e^{(T-t)(\delta-r)} > 0$$

$$\frac{\partial^2 v_E^*}{\partial T \partial \lambda} = \frac{\beta \eta S_0}{2d_q} e^{(\delta-r)(T-t)} > 0$$

$$\frac{\partial^2 v_E^*}{\partial T \partial \tau} = \frac{\omega a^2 \beta}{8bd_q} e^{(\delta-r)(T-t)} > 0$$

对式(21)求特许期 T 一阶导数和 T 与税率 τ 混合导数可得到:

$$\frac{\partial n_E^*}{\partial T} = \frac{a^2 k \sigma (1 - \tau)}{4bf_q} e^{r(t-T)} > 0, \frac{\partial^2 n_E^*}{\partial T \partial \tau} = -\frac{a^2 k \sigma}{4bf_q} e^{r(t-T)} < 0$$

由此,可得到推论3。

命题2、推论2和推论3说明,在生态修复补偿政策下,政府补贴企业生态修复成本可以激励企业增加生态修复质量投入,而且土地增值收益政府分配比例和特色产业税率越高,政府可以补贴企业的成本比例越高,能更好地激励企业加大生态修复质量投入,从而提高废弃矿山生态修复质量增加项目收益,最终惠及政企双方。

2.3 产业扶持政策(情形3)

产业扶持政策用下标 I 表示。此方式下政府以补贴企业部分特色产业开发成本的形式扶持企业开发特色产业,假设政府补贴企业产业开发成本比例为 $\theta(t)$ ($0 < \theta(t) < 1$),政府和企业各自目标函数和约束条件分别为:

$$\begin{aligned} \max_{u_I(t), m_I(t), \theta(t)} J_{-I} &= \int_0^T e^{-rt} \left[\lambda \eta Y_I(t) S_0 + \tau (a - bp_I(t)) (\sigma H_I(t) + \omega Y_I(t)) p_I(t) + \zeta Y_I(t) S_0 - \frac{d_z}{2} u_I^2(t) - \frac{f_z}{2} m_I^2(t) - \frac{\theta(t)}{2} f_q n_I^2(t) \right] dt \\ \text{s.t.} \begin{cases} \dot{Y}_I(t) = \alpha u_I(t) + \beta v_I(t) + \delta (Y_I(t) - Q), \\ Y_I(0) = 0 \\ \dot{H}_I(t) = gm_I(t) + kn_I(t), H_I(0) = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \max_{v_I(t), n_I(t), p_I(t)} J_{qI} &= \int_0^T e^{-rt} \left[(1 - \lambda) \eta Y_I(t) S_0 + (1 - \tau) (a - bp_I(t)) (\sigma H_I(t) + \omega Y_I(t)) p_I(t) - \frac{d_q}{2} v_I^2(t) - \frac{1 - \theta(t)}{2} f_q n_I^2(t) \right] dt \\ \text{s.t.} \begin{cases} \dot{Y}_I(t) = \alpha u_I(t) + \beta v_I(t) + \delta (Y_I(t) - Q), \\ Y_I(0) = 0 \\ \dot{H}_I(t) = gm_I(t) + kn_I(t), H_I(0) = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (29)$$

根据贝尔曼连续型动态规划理论,用 HJB 方程求解上述模型 Stackelberg 均衡,可得如下命题3^①。

命题3:在产业扶持政策下,政府和企业生态修复质量投入 u_I^* 、 v_I^* 、特色产业开发投入 m_I^* 、 n_I^* 、政府补贴企业产业开发成本比例 θ^* 、特色产品定价 p_I^* 和均衡收益 J_{-I}^* 、 J_{qI}^* 分别为:

$$u_I^* = \frac{\alpha [\omega a^2 \tau + 4bS_0 (\lambda \eta + \zeta)]}{4bd_z (r - \delta)} (1 - e^{(T-t)(\delta-r)}) \quad (30)$$

$$v_I^* = \frac{\beta [\omega a^2 (1 - \tau) + 4(1 - \lambda) b \eta S_0]}{4bd_q (r - \delta)} (1 - e^{(T-t)(\delta-r)}) \quad (31)$$

$$m_I^* = \frac{a^2 \sigma \tau g}{4bf_z} (1 - e^{r(t-T)}) \quad (32)$$

$$n_I^* = \frac{a^2 \sigma k (1 + \tau)}{8bf_q} (1 - e^{r(t-T)}) \quad (33)$$

$$\theta^* = \frac{3\tau - 1}{1 + \tau} \quad (34)$$

$$p_I^* = \frac{a}{2b} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} J_{-I}^* &= \frac{\omega a^2 \tau + 4bS_0 (\lambda \eta + \zeta)}{4b(r - \delta)} (1 - e^{(T-t)(\delta-r)}) Y_I + \frac{a^2 \sigma \tau}{4br} \\ &\quad (1 - e^{r(t-T)}) H_I + M_n e^{r(t-T)} \left[\frac{1}{r} (1 - e^{r(T-t)}) - \frac{1}{\delta} (1 - e^{\delta(T-t)}) \right] + M_n \left[\frac{1}{r} (1 - e^{r(t-T)}) + \frac{2e^{r(t-T)}}{\delta} (1 - e^{\delta(T-t)}) \right] \\ &\quad + \frac{e^{r(t-T)}}{r - 2\delta} (1 - e^{(T-t)(2\delta-r)}) \left] + M_B \left[\frac{1}{r} (1 - e^{2r(t-T)}) + 2(t - T) e^{r(t-T)} \right] \right] \quad (36) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_{qI}^* &= \frac{\omega a^2 (1 - \tau) + 4(1 - \lambda) b \eta S_0}{4b(r - \delta)} (1 - e^{(T-t)(\delta-r)}) Y_I \\ &\quad + \frac{a^2 \sigma (1 - \tau)}{4br} (1 - e^{r(t-T)}) H_I + M_n e^{r(t-T)} \left[\frac{1}{r} (1 - e^{r(T-t)}) - \frac{1}{\delta} (1 - e^{\delta(T-t)}) \right] + M_B \left[\frac{1}{r} (1 - e^{r(t-T)}) + \frac{2e^{r(t-T)}}{\delta} (1 - e^{\delta(T-t)}) \right] \\ &\quad + \frac{e^{r(t-T)}}{r - 2\delta} (1 - e^{(T-t)(2\delta-r)}) \left] + M_{\kappa} \left[\frac{1}{r} (1 - e^{2r(t-T)}) + 2(t - T) e^{r(t-T)} \right] \right] \quad (37) \end{aligned}$$

其中,

$$M_n = \frac{\omega a^2 \tau + 4bS_0 (\lambda \eta + \zeta)}{4b(r - \delta)} Q \delta$$

$$M_B = \frac{a^4 \sigma^2}{32b^2 r^2} \left[\frac{k^2 (1 + \tau)^2}{4f_q} + \frac{g^2 \tau^2}{f_z} \right]$$

$$\begin{aligned} M_n &= \frac{\omega a^2 \tau + 4bS_0 (\lambda \eta + \zeta)}{16b^2 (r - \delta)^2} \left\{ \omega a^2 \left[\frac{\beta^2 (1 - \tau)}{d_q} + \frac{\alpha^2 \tau}{2d_z} \right] \right. \\ &\quad \left. + 4bS_0 \left[\frac{\beta^2 \eta (1 - \lambda)}{d_q} + \frac{\alpha^2 (\lambda \eta + \zeta)}{2d_z} \right] \right\} \end{aligned}$$

$$M_{\kappa} = \frac{\omega a^2 (1 - \tau) + 4(1 - \lambda) b \eta S_0}{4b(r - \delta)} Q \delta$$

$$M_{\kappa} = \frac{a^4 \sigma^2 (1 - \tau)}{16b^2 r^2} \left[\frac{k^2 (1 + \tau)}{4f_q} + \frac{g^2 \tau}{f_z} \right]$$

$$\begin{aligned} M_B &= \frac{\omega a^2 (1 - \tau) + 4(1 - \lambda) b \eta S_0}{16b^2 (r - \delta)^2} \left\{ \omega a^2 \left[\frac{\beta^2 (1 - \tau)}{2d_q} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{\alpha^2 \tau}{d_z} \right] + 4bS_0 \left[\frac{\beta^2 \eta (1 - \lambda)}{2d_q} + \frac{\alpha^2 (\lambda \eta + \zeta)}{d_z} \right] \right\} \end{aligned}$$

将 u_I^* 、 v_I^* 和 m_I^* 、 n_I^* 分别代入式(1)和式(2),可得废弃矿山生态修复质量和特色产业品质的动态最优轨

①具体推理过程备索。

迹为:

$$Y_I^*(t) = Y_I^{ss} \left[\frac{1}{\delta} (e^{\delta t} - 1) + \frac{1}{r - 2\delta} e^{(\delta - r)(T - t)} (e^{(2\delta - r)t} - 1) \right] + Q(1 - e^{\delta t}) \quad (38)$$

$$H_I^*(t) = H_I^{ss} \left[t + \frac{e^{-rT}}{r} (1 - e^{-rt}) \right] \quad (39)$$

其中,

$$Y_I^{ss} = \frac{1}{4b(r - \delta)} \left\{ \omega a^2 \left[\frac{\beta^2(1 - \tau)}{d_q} + \frac{\alpha^2 \tau}{d_z} \right] + 4bS_0 \left[\frac{\beta^2 \eta(1 - \lambda)}{d_q} + \frac{\alpha^2(\lambda \eta + \zeta)}{d_z} \right] \right\}$$

$$H_I^{ss} = \frac{a^2 \sigma \left[2\tau g^2 f_q + k^2 f_z(1 + \tau) \right]}{8b r f_q}$$

推论4:在产业扶持政策下,对于特色产品税率较高(即 $\tau > \tau_1^*$)的特色产业,政府需要补贴企业特色产业开发成本比例 θ^* 才能有效激励企业产业开发投入。

证明:观察式(34)可知,存在 $\tau = \tau_1^* = \frac{1}{3}$ 时,当 $\tau > \tau_1^*$ 时,有 $\theta^* > 0$ 。

由此,可得到推论4。

推论5:在产业扶持政策下,政府通过延长特许期 T 能够促进企业提高生态修复质量投入和特色产业开发投入,并且提高土地增值收益企业分配比例 $1 - \lambda$ 和降低税率 τ 与延长特许期对企业生态修复质量投入均具有正交互效应,适度提高税率 τ 与延长特许期对企业特色产业开发投入具有正交互效应。

证明:对式(31)求特许期 T 一阶导数和 T 与土地增值收益政府分配比例 λ 混合导数可得到:

$$\frac{\partial v_I^*}{\partial T} = \frac{\beta[\omega a^2(1 - \tau) + 4(1 - \lambda)b\eta S_0]}{4bd_q} e^{(T - t)(\delta - r)} > 0$$

$$\frac{\partial^2 v_I^*}{\partial T \partial \lambda} = -\frac{\beta \eta S_0}{d_q} e^{(T - t)(\delta - r)} < 0$$

$$\frac{\partial^2 v_I^*}{\partial T \partial \tau} = -\frac{\omega a^2 \beta}{4bd_q} e^{(T - t)(\delta - r)} < 0$$

当 $\tau < \tau_1^*$ 时,对式(33)求特许期 T 一阶导数和 T 与税率 τ 混合导数可得到:

$$\frac{\partial n_I^*}{\partial T} = \frac{a^2 \sigma k(1 + \tau)}{8b f_q} e^{r(t - T)} > 0$$

$$\frac{\partial^2 n_I^*}{\partial T \partial \tau} = \frac{a^2 \sigma k}{8b f_q} e^{r(t - T)} > 0$$

由此,可得到推论5。

命题3、推论4和推论5说明,政府补贴企业特色产业开发成本可以激励企业加大特色产业开发投入,并且特色产品销售政府收益越高,政府可以补贴企业的特色产业开发成本比例更高,能更好地激励企业加大投入,从而提高特色产业品质增加特色产品销售收益,最终惠及政企双方。

3 不同情形比较分析

为进一步从环境和经济角度分析哪种形式更有效,下面对三种情形所得均衡结果、废弃矿山生态修复质量、特色产业品质和双方最优收益进行比较分析。

命题4:生态修复补偿政策能够提高企业生态修复质量投入水平,产业扶持政策能够提高企业特色产业开发投入水平。

证明:由命题1至命题3可知:

$$v_E^* - v_N^* = \frac{\beta[\omega a^2(3\tau - 1) + 4b\eta S_0(3\lambda - 1) + 8bS_0\zeta]}{8bd_q(r - \delta)} (1 - e^{(\delta - r)(T - t)})$$

根据推论2可知,只有在 $\zeta > \zeta_1^*$ 时, $\varphi^* > 0$,政府才实施生态修复补偿政策。观察上式可知,当 $\zeta > \zeta_1^*$ 时, $v_E^* - v_N^* > 0$ 。又因为 $v_N^* = v_I^*$,可知, $v_E^* > v_N^* = v_I^*$ 。

$$n_I^* - n_N^* = \frac{a^2 \sigma k(3\tau - 1)}{8b r f_q} (1 - e^{r(t - T)})$$

根据推论4可知,只有在 $\tau > \tau_1^*$ 时,政府才实施产业扶持政策,观察上式可知,当 $\tau > \tau_1^*$ 时, $n_I^* - n_N^* > 0$ 。又因为 $n_N^* = n_E^*$,可知, $n_I^* > n_N^* = n_E^*$ 。

由此,可得到命题4。

命题5:生态修复补偿政策能够提高废弃矿山生态修复质量,产业扶持政策能够提高特色产业品质。

证明:由式(26)、式(14)可得:

$$Y_E^* - Y_N^* = \frac{\beta^2[\omega a^2(3\tau - 1) + 4bS_0\eta(3\lambda - 1) + 8bS_0\zeta]}{8bd_q(r - \delta)} F_1(t)$$

其中, $F_1(t) = \frac{1}{\delta} (e^{\delta t} - 1) + \frac{1}{r - 2\delta} e^{(\delta - r)(T - t)} (e^{(2\delta - r)t} - 1)$,设 $f_1(x) = \frac{e^{tx} - 1}{x}$,对 $f(x)$ 求 x 的一阶导数可得 $\frac{\partial f_1(x)}{\partial x} = \frac{1 + e^{tx}(tx - 1)}{x^2} > 0$,由 $r > \delta$,可知 $f_1(\delta) > f_1(2\delta - r)$,因此, $f_1(\delta) - e^{(\delta - r)(T - t)} f_1(2\delta - r) > 0$,即 $F_1(t) > 0$ 。

根据推论2可知,只有在 $\zeta > \zeta_1^*$ 时, $\varphi^* > 0$,政府才实施生态修复补偿政策,由 $\zeta > \zeta_1^*$ 可知, $Y_E^* - Y_N^* > 0$ 。

由式(14)、式(38)可知: $Y_N^* = Y_I^*$,可得 $Y_E^* > Y_N^* = Y_I^*$ 。

由式(15)、式(39)可得: $H_I^* - H_N^* = \frac{a^2 k^2 \sigma(3\tau - 1)}{8b r f_q} F_2(t)$ 。

其中, $F_2(t) = t + \frac{e^{-rT}}{r} (1 - e^{-rt})$,对 $F_2(t)$ 求 t 的一阶导数可得:

$$\frac{\partial F_2(t)}{\partial t} = 1 - e^{r(t - T)} > 0$$

因为 $F_2(0) = 0$,可知 $F_2(t) > 0$ 。根据推论4可知,只有在 $\tau > \tau_1^*$ 时,政府才实施生态修复补偿政策,因此,当 $\tau > \tau_1^*$ 时, $\frac{a^2 k^2 \sigma(3\tau - 1)}{8b r f_q} > 0$,因此, $H_I^* - H_N^* > 0$ 。

由式(15)、式(27)可知 $H_N^* = H_E^*$,可得 $H_I^* > H_N^* = H_E^*$ 。

由此,可得到命题5。

命题6:三种情形下,特色产品定价相同。生态修复补偿政策和产业扶持政策均可以提高特色产品销量,但是,对于特色产业开发水平较高($k > k_1^*$)的企业,产业扶持政策下特色产品销量更高;相反,生态修复补偿政

策下特色产品销量更高。

证明:由命题1至命题3可知:

$$p_N^* = p_E^* = p_I^* = \frac{a}{2b}$$

则基于生态导向开发模式的三种情形下,特色产品销量为:

$$D_i^*(t) = (a - bp_i^*(t))(\sigma H_i^*(t) + \omega Y_i^*(t)) = \frac{a}{2}(\sigma H_i^*(t) + \omega Y_i^*(t)), i = (N, E, I)$$

由命题5可知:

$$H_I^* > H_E^* = H_N^*, Y_E^* > Y_I^* = Y_N^*$$

$$D_E^*(t) - D_I^*(t) = \frac{a}{2}[\sigma(H_E^*(t) - H_I^*(t)) + \omega(Y_E^*(t) - Y_I^*(t))] = \frac{a}{16b} \left\{ \frac{\omega \beta^2 F_1(t)}{d_q(r-\delta)} [\omega a^2(3\tau-1) + 8bS_0\zeta + 4bS_0\eta(3\lambda-1)] - \frac{a^2 k^2 \sigma^2 (3\tau-1)}{rf_q} F_2(t) \right\}$$

观察上式可知,在 $\zeta > \zeta_1^*$ 且 $\tau > \tau_1^*$ 的情况下,存在

$$k_1^* = \sqrt{\frac{\omega \beta^2 rf_q [\omega a^2(3\tau-1) + 4bS_0\eta(3\lambda-1) + 8bS_0\zeta] F_1(t)}{a^2 \sigma^2 d_q(r-\delta)(3\tau-1) F_2(t)}}$$

当 $k > k_1^*$ 时, $D_E^*(t) - D_I^*(t) < 0$; 当 $k < k_1^*$ 时, $D_E^*(t) - D_I^*(t) > 0$ 。

由此可知,当 $k > k_1^*$ 时, $D_I^*(t) > D_E^*(t) > D_N^*(t)$; 当 $k < k_1^*$ 时, $D_E^*(t) > D_I^*(t) > D_N^*(t)$

由此,可得到命题6。

命题7:生态修复补偿政策和产业扶持政策均能够提高政企双方收益;对于产业品质对销量影响较小(即 $\sigma < \min\{\sigma_1^*, \sigma_2^*\}$) 的特色产业,生态修复补偿政策下政企双方收益均高于产业扶持政策,反之,对于产业品质对销量影响较大(即 $\sigma > \max\{\sigma_1^*, \sigma_2^*\}$) 的特色产业,产业扶持政策下政企双方收益均高于生态修复补偿政策。

证明:由式(12)、式(24)可得:

$$J_{zE}^* - J_{zN}^* = \frac{\Delta_2}{4b(r-\delta)} (1 - e^{(T-t)(\delta-r)}) (Y_E^* - Y_N^*) + \frac{\beta^2 \Delta_1^2 e^{r(t-T)}}{128b^2 d_q(r-\delta)^2} F_3(t)$$

$$\text{其中, } \Delta_1 = \omega a^2(3\tau-1) + 4bS_0[(3\lambda-1)\eta + 2\zeta],$$

$$\Delta_2 = \omega a^2 \tau + 4bS_0(\lambda\eta + \zeta), F_3(t) = \frac{e^{r(T-t)} - 1}{r} + \frac{e^{(2\delta-r)(T-t)} - 1}{2\delta-r} - \frac{2(e^{\delta(T-t)} - 1)}{\delta}, \text{设 } f_2(x) = \frac{e^{(T-t)x} - 1}{x},$$

则 $F_3(t) = f_2(r) + f_2(2\delta-r) - 2f_2(\delta)$ 。

对 $f_2(x)$ 求 x 的一阶导数和二阶导数可得:

$$\frac{\partial f_2(x)}{\partial x} = \frac{1 + e^{(T-t)x} [x(T-t) - 1]}{x^2} > 0$$

$$\frac{\partial^2 f_2(x)}{\partial x^2} = \frac{\left\{ [1 - (T-t)x]^2 + 1 \right\} e^{(T-t)x} - 2}{x^3} > 0$$

可知, $f_2(x)$ 为单调递增凹函数。则由 $\delta - (2\delta - r) = r - \delta$, 可知 $F_3(t) > 0$, 由命题6可知 $Y_E^* > Y_N^*$, 因此, $J_{zE}^* - J_{zN}^* > 0$ 。

由式(12)、式(36)可得:

$$J_{zI}^* - J_{zN}^* = \frac{a^2 \sigma \tau}{4br} (1 - e^{r(t-T)}) (H_I^* - H_N^*) + \frac{a^4 k^2 \sigma^2 (1-3\tau)^2}{128b^2 r^2 f_q} F_4(t)$$

其中, $F_4(t) = \frac{1}{r} (1 - e^{2r(t-T)}) + 2(t-T)e^{r(t-T)}$, 对

$F_4(t)$ 求 t 的一阶导数可得 $\frac{\partial F_4(t)}{\partial t} = 2e^{r(t-T)} [1 + r(t-T)] - 2e^{2r(t-T)} < 0$, 而 $F_4(T) = 0$, 可知 $F_4(t) \geq 0$, 由命题5可知 $H_I^* > H_N^*$, 因此, $J_{zI}^* - J_{zN}^* > 0$ 。

由式(24)、式(36)可得:

$$J_{zE}^* - J_{zI}^* = \frac{\beta^2 \Delta_1 \Delta_2}{32b^2 d_q(r-\delta)^2} (1 - e^{(T-t)(\delta-r)}) F_1(t) - \frac{a^4 k^2 \sigma^2 \tau (3\tau-1)}{32b^2 r^2 f_q} (1 - e^{r(t-T)}) F_2(t) + \frac{\beta^2 \Delta_1^2}{128b^2 d_q(r-\delta)^2} e^{r(t-T)} F_3(t) - \frac{a^4 k^2 \sigma^2 (1-3\tau)^2}{128b^2 r^2 f_q} F_4(t)$$

观察 $J_{zE}^* - J_{zI}^*$ 可知,

$$\text{当 } \sigma = \sigma_1^* = \sqrt{\frac{r^2 f_q [\beta^2 \Delta_1 [4\Delta_2(1 - e^{(T-t)(\delta-r)}) F_1(t) + \Delta_1 e^{r(t-T)} F_3(t)]]}{(r-\delta)^2 d_q [a^4 k^2 (3\tau-1) [4\tau(1 - e^{r(t-T)}) F_2(t) + (3\tau-1) F_4(t)]]}}$$

时, $J_{zE}^* - J_{zI}^* = 0$ 。

令 $\Psi_1 = J_{zE}^* - J_{zI}^*$ 对 Ψ_1 求 σ 的一阶导数可得,

$$\frac{\partial \Psi_1}{\partial \sigma} = -\frac{a^4 k^2 \sigma (3\tau-1) [4\tau(1 - e^{r(t-T)}) F_2(t) + (3\tau-1) F_4(t)]}{64b^2 r^2 f_q} < 0$$

因此,当 $\sigma < \sigma_1^*$ 时, $J_{zE}^* > J_{zI}^*$; 当 $\sigma > \sigma_1^*$ 时, $J_{zE}^* < J_{zI}^*$ 。

由此可知,当 $\sigma < \sigma_1^*$ 时, $J_{zE}^* > J_{zI}^* > J_{zN}^*$; 当 $\sigma > \sigma_1^*$ 时, $J_{zI}^* > J_{zE}^* > J_{zN}^*$ 。

$$J_{qE}^* - J_{qN}^* = \frac{\Delta_3(1 - e^{(T-t)(\delta-r)})}{4b(r-\delta)} (Y_E^* - Y_N^*) + \frac{\beta^2 \Delta_3 \Delta_1 e^{r(t-T)}}{64b^2 (r-\delta)^2 d_q} F_3(t) > 0$$

其中, $\Delta_3 = \omega a^2(1-\tau) + 4(1-\lambda)b\eta S_0$ 。

$$J_{qI}^* - J_{qN}^* = \frac{\Delta_3(1 - e^{(T-t)(\delta-r)})}{4b(r-\delta)} (Y_I^* - Y_N^*) + \frac{a^4 k^2 \sigma^2 (1-\tau)(3\tau-1)}{64b^2 r^2 f_q} F_4(t) > 0$$

$$J_{qE}^* - J_{qI}^* = \frac{\beta^2 \Delta_1 \Delta_3}{32b^2 d_q(r-\delta)^2} (1 - e^{(T-t)(\delta-r)}) F_1(t) - \frac{a^4 k^2 \sigma^2 (1-\tau)(3\tau-1)}{32b^2 r^2 f_q} (1 - e^{r(t-T)}) F_2(t)$$

$$+ \frac{\beta^2 \Delta_3 \Delta_1}{64b^2 (r-\delta)^2 d_q} e^{r(t-T)} F_3(t) - \frac{a^4 k^2 \sigma^2 (1-\tau)(3\tau-1)}{64b^2 r^2 f_q} F_4(t)$$

观察 $J_{qE}^* - J_{qI}^*$ 可知,

$$\text{当 } \sigma = \sigma_2^* = \sqrt{\frac{\beta^2 r^2 f_q \Delta_1 \Delta_3 [2(1 - e^{(T-t)(\delta-r)}) F_1(t) + e^{r(t-T)} F_3(t)]]}{a^4 k^2 (r-\delta)^2 d_q (3\tau-1) (1-\tau) [2(1 - e^{r(t-T)}) F_2(t) + F_4(t)]]}}$$

时, $J_{qE}^* - J_{qI}^* = 0$ 。

令 $\Psi_2 = J_{qE}^* - J_{qI}^*$ 对 Ψ_2 求 σ 的一阶导数可得,

$$\frac{\partial \Psi_2}{\partial \sigma} = \frac{ak\sigma(\tau-1)(3\tau-1)[2(1 - e^{r(t-T)}) F_2(t) + F_4(t)]}{bf_q} < 0$$

因此,当 $\sigma < \sigma_2^*$ 时, $J_{qE}^* > J_{qI}^*$;当 $\sigma > \sigma_2^*$ 时, $J_{qE}^* < J_{qI}^*$ 。

综上可知,当 $\sigma < \sigma_2^*$ 时, $J_{qE}^* > J_{qI}^* > J_{qN}^*$;当 $\sigma > \sigma_2^*$ 时, $J_{qI}^* > J_{qE}^* > J_{qN}^*$ 。

由此,可得到命题7。

命题4至命题7说明三种情形下,(1)生态修复补偿政策和产业扶持政策能对无政策情形进行帕累托改进,有效提升政企双方整体收益。(2)对于企业而言,生态修复补偿政策能激励企业提高生态修复质量投入进而提升废弃矿山生态修复质量,政府产业扶持政策能激励企业提高产业开发投入进而提升特色产业品质,而且实施这两项政策带来的收益增长惠及政企双方。(3)生态修复补偿政策更适于产业品质对销量影响较小的特色产业,这是因为对于这类产业生态修复补偿政策带来的土地增值和产品销售收益高于产业扶持政策带来的收益;与之相反,产业扶持政策更适于产业品质对销量影响较大的产业。(4)政府可选择生态修复补偿政策以最大化废弃矿山生态修复质量,选择产业扶持政策以最大化特色产业品质。

4 数值模拟与分析

根据假设要求和现实逻辑,选取参数范围内通过Mathematical 12.0数值模拟对以上命题进行直观分析和验证。不失一般性,假定基准参数 $\alpha = 0.6, \beta = 0.5, r = 0.3, \delta = 0.05, g = 0.6, k = 0.5, \omega = 0.05, d_z = 2, d_q = 3, f_z = 2, f_q = 3, a = 20, b = 5, \sigma = 0.25, \lambda = 0.3, \eta = 0.2, T = 50, S_0 = 10, \zeta = 0.1, \tau = 0.5, Q = 25$,当考察某个因素的影响时,其他因素为固定值。

由图1、图2可知,在无政策情形下,废弃矿山生态修复质量和特色产业品质都是最低的;与之相比,在生态修复补偿政策下,生态修复质量有一定的提高,在产业扶持政策下,特色产业品质有一定的提高。另外可以看出,在生态修复补偿政策下,生态修复质量增长速度最快;在产业扶持政策下,特色产业品质增长速度最快。

由图3和图4可知,在无政策情形下,政府和企业收益最低,生态修复补偿政策和产业扶持政策均能提高政府和企业收益,且当特色产业品质对销量影响较小($\sigma = 0.08$)时,在生态修复补偿政策下政企双方收益最高,当特色产业品质对销量影响较大($\sigma = 0.25$)时,在产业扶持政策下政企双方收益最高,这是因为对于产业品质对销量影响较大的特色产业,政府通过对企业产业开发给予补贴带来的双方收益增长高于政府对企业生态修复

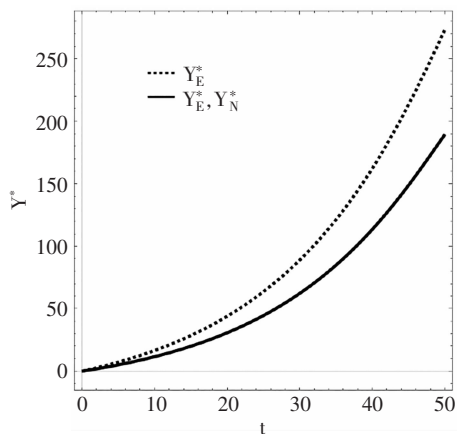


图1 废弃矿山生态修复质量最优轨迹

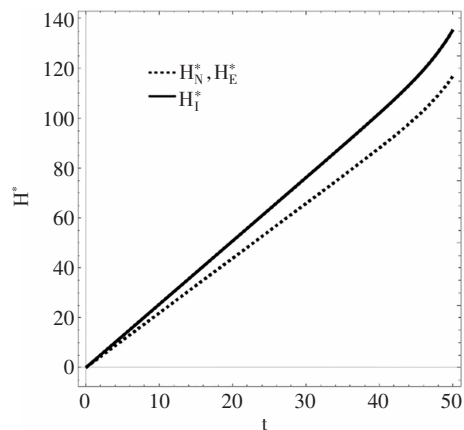


图2 特色产业品质最优轨迹

复给予补贴带来的收益增长,而对于产业品质对销量影响较小的特色产业,则与之相反。由图5可知,对于产业品质对销量影响不同的特色产业,政企总收益与政企各自收益在两种政策下表现出相同特点,在此不再赘述。

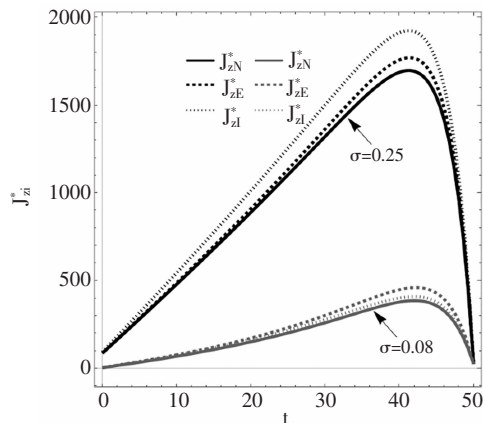


图3 三种情形下政府收益对比

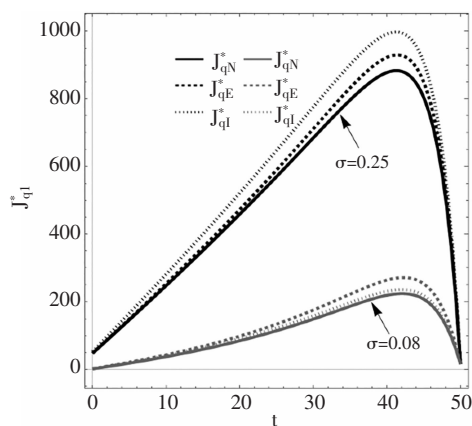


图4 三种情形下企业收益对比

由图6、图7可以看出,随着废弃矿山生态导向开发的进行,在特许期快要结束阶段,企业生态修复质量投入和产业开发投入呈现明显降低且降低速度逐渐加快,印证了企业在 t 时刻进行投入决策时,不仅会考虑系统当前的生态修复质量和特色产业品质,还会考虑当前投

入在特许期 $[t, T]$ 内产生的未来收益。对于企业来说,在特许期结束后,企业不再取得项目收益,为使利润最大化,企业会选择降低投入,且越临近终点 T 时刻企业降低投入的速度会越快,这也是在特许期快要结束阶段政企双方收益逐渐下降的原因。

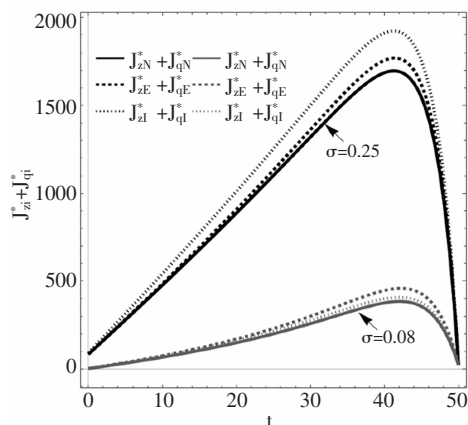


图5 三种情形下政企总收益对比

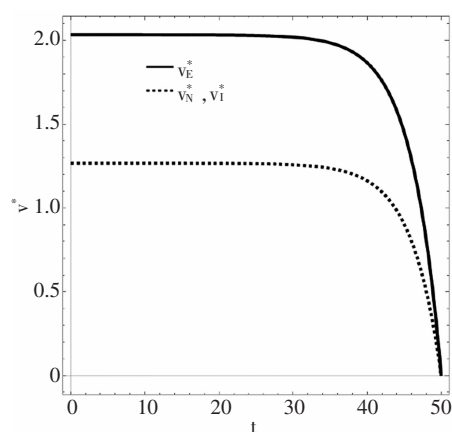


图6 企业生态修复质量投入水平

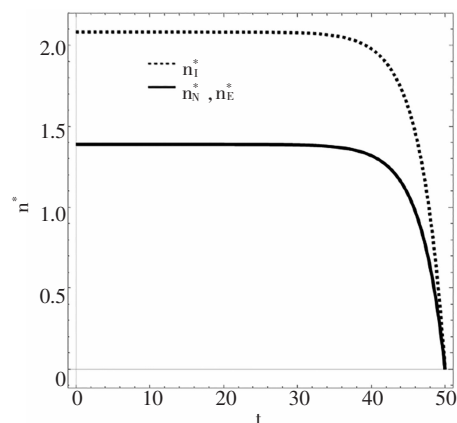


图7 企业特色产业开发投入水平

取 $t=20$,绘制产业品质对产品销量影响系数 σ 和企业特色产业开发水平 k 对政府和企业收益的影响如图8所示。由图可知,在无政策情形下,随着产业品质对产品销量影响系数和企业特色产业开发水平的提高,

政府和企业的收益均会增加且变化趋势呈现明显边际递增,可以看出 σ 和 k 对双方收益均表现出正交互效应。这说明,提高产业品质对产品销量的影响系数能进一步提高双方收益,并且特色产业开发水平越高的企业,收益提高效果越明显。在其他两种情形下,呈现结果类似,不再列示。

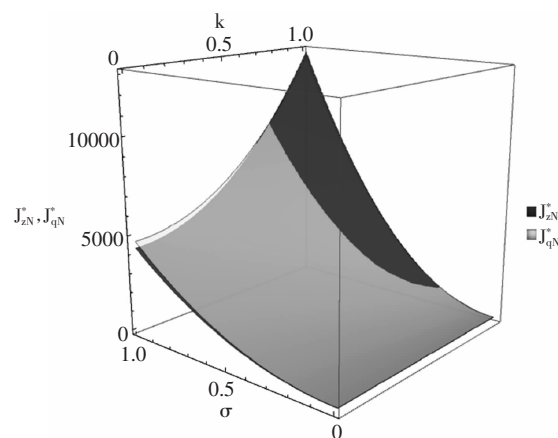


图8 σ 与 k 对政府和企业收益的影响

5 结语

本文基于生态环境导向开发模式考虑了政府与企业在无政策、生态修复补偿政策与产业扶持政策下进行废弃矿山生态修复,通过建立微分博弈模型求得均衡解,分析比较三种情形下政府如何激励企业增加生态修复质量投入和特色产业开发投入。

5.1 研究结论

根据研究结果能够得到如下结论:(1)在三种情形下,政府延长特许期均能够激励企业增加废弃矿山生态环境导向开发投入,在此基础上,差异化调整土地增值收益分配比例和特色产业税率与延长特许期对企业投入具有正交互效应。(2)政府应该针对废弃矿山社会效益和特色产业税率的高低,选择实施生态修复补偿政策或产业扶持政策。(3)为提高特色产品销量,在生态修复补偿政策下,政府应该选择特色产业开发水平较低的企业参与废弃矿山EOD项目;反之,在产业扶持政策下,政府应该选择特色产业开发水平较高的企业。(4)生态修复补偿政策和产业扶持政策相对于无政策情形均可以实现经济与环境的帕累托改善,提高政企双方收益。(5)特色产业品质对产品销量的影响系数与企业特色产业开发水平对政企双方收益具有正交互效应。

5.2 管理启示

基于以上结论,本文可得到如下管理启示:(1)在引入社会资本进行废弃矿山生态环境导向开发时,为激励企业增加投入,政府可以适当延长项目特许期,同时差异化调整土地增值收益分配比例和特色产业税率可以使激励效果更好。(2)对于社会效益较高的废弃矿山,政府才需要实施生态修复补偿政策,对于税率较高的特色产业,政府才需要实施特色产业扶持政策。(3)为提高特色产品销量和政企双方收益,对于开发技术密集型产业的废弃矿山,因这类产业技术先进复杂,产业品质对产品销量影响较大,政府应该实施产业扶持政策引进特色

产业开发水平较高的企业参与废弃矿山 EOD 项目;对于开发劳动密集型产业的废弃矿山,由于这类产业技术低端、产品同质化严重,产业品质对产品销量影响较小,政府应该实施生态修复补偿政策引进特色产业开发水平较低的企业参与废弃矿山 EOD 项目。(4)政府通过建立废弃矿山 EOD 示范项目并加大宣传推广力度可以提高政企双方收益,同时,在项目招标审批过程中,选择产业开发水平更高的企业参与,更有利于双方收益的提高。

5.3 研究不足与展望

本文的研究结果对政府如何基于生态环境导向的开发模式开展废弃矿山生态修复实现生态敏感区保护修复与绿色发展,对资源枯竭型城市如何产业转型升级实现高质量发展具有现实指导意义和参考价值。本文考虑了政府面对单一 EOD 项目如何决策,未来将引入更多的博弈参与方,比如在多个 EOD 项目、多家企业同时并存时政府该如何决策的问题。另外,本文未考虑外部不确定性因素影响,未来也会做进一步研究。

参考文献:

- [1] 张进德,郝富瑞. 我国废弃矿山生态修复研究[J]. 生态学报, 2020,40(21):7921-7930.
- [2] 杨金中,许文佳,姚维岭,等. 全国采矿损毁土地分布与治理状况及存在问题[J]. 地学前缘,2021,28(4):83-89.
- [3] 自然资源部. 2019 年中国矿产资源报告[R]. 北京:地质出版社,2019,9.
- [4] 自然资源部. 2020 年中国矿产资源报告[R]. 北京:地质出版社,2020,10.
- [5] 自然资源部. 2021 年中国矿产资源报告[R]. 北京:地质出版社,2021,10.
- [6] 高艳妮,王世曦,杨春艳,等. 基于矿山生态修复的生态产品价值实现主要模式与路径[J]. 环境科学研究,2022,35(12):2777-2784.
- [7] 李坦,徐帆,祁云云. 从“共饮一江水”到“共护一江水”——新安江生态补偿下农户就业与收入的变化[J]. 管理世界,2022,38(11):102-124.
- [8] 武彩霞,高存红,杨薇. 基于 EOD 理念的矿山修复模式应用——以某矿山生态修复项目为例[J]. 中国工程咨询,2022(1):96-100.
- [9] 谢向向,杨沛,景方圆,等. 生态环境导向的开发模式下长江经济带生态价值捕获路径研究[J]. 环境保护,2022,50(17):19-23.
- [10] 逮元堂,赵云皓,辛璐,等. 生态环境导向的开发(EOD)模式实施要义与实践探析[J]. 环境保护,2021,49(14):30-33.
- [11] 王盈盈,王守清. 生态导向的政府和社会资本合作(PPP+EOD)模式之探讨[J]. 环境保护,2022,50(14):44-48.
- [12] 翁祥健,杨汕,郭伟. 社会资本参与生态环境导向(EOD)项目面临的困境及对策研究[J]. 建筑经济,2022,43(8):22-28.
- [13] 赵云皓,徐志杰,辛璐,等. 生态产品价值实现市场化路径研究——基于国家 EOD 模式试点实践[J]. 生态经济,2022,38(7):160-166.
- [14] 袁宏川,罗鹏,段跃芳,等. 生态文明建设背景下的 EOD 项目风险评价体系构建[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2022,36(7):254-263.
- [15] 彭岩波,宋卫红,杨晓燕,等. 基于 EOD 模式的朱家林田园综合体规划研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2020,56(3):462-466.
- [16] 卞正富,于昊辰,韩晓彤. 碳中和目标背景下矿山生态修复的路径选择[J]. 煤炭学报,2022,47(01):449-459.
- [17] 李国政. 新时代矿山地质修复模式的升级与重塑:基于“地质修复 3.0”的概念分析[J]. 西北地质,2019,52(4):270-278.
- [18] 刘向敏,马宗奎,张超宇,等. 矿山生态修复工程管理现状、问题与对策建议[J]. 中国国土资源经济,2020,33(4):23-28.
- [19] Cao S, Xia C, Li W, et al. Win-Win Path for Ecological Restoration[J]. Land Degradation and Development, 2020,32(1):430-438.
- [20] 刘亦晴,许春冬. 废弃矿山环境治理 PPP 模式:背景、问题及应用[J]. 科技管理研究,2017,37(12):240-246.
- [21] 余慕溪,王林秀,袁亮,等. 资源型城市矿区土地增值收益分配影响因素研究[J]. 中国软科学,2019(4):152-159.
- [22] Qiu S, Yu Q, Niu T, et al. Restoration and Renewal of Ecological Spatial Network in Mining Cities for the Purpose of Enhancing Carbon Sinks: The Case of Xuzhou, China[J]. Ecological Indicators, 2022,143:109313.
- [23] Wang Z, Luo K, Zhao Y, et al. Modelling Regional Ecological Security Pattern and Restoration Priorities after Long-Term Intensive Open-Pit Coal Mining[J]. Science of the Total Environment, 2022,835:155491.
- [24] 刘亦晴,唐杨,梁雁茹,等. 矿业遗迹旅游开发监管的演化博弈与稳定性分析[J]. 运筹与管理,2023,32(2):83-89+96.
- [25] Yan G, Xue F, Li Z. Research on Ecological Restoration Mechanism of Rare-Earth Mines Based on Evolutionary Game[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020(1):1-17.
- [26] 刘亦晴,梁雁茹,张建玲. 矿山废弃地治理 PPP 模式演化博弈分析[J]. 中国矿业,2019,28(2):54-59+71.
- [27] 许礼刚. 离子型稀土开发负外部性多元共治理论及应用[D]. 北京科技大学,2023.
- [28] 闫光礼. 离子型稀土矿山环境修复演化博弈模型与策略研究[D]. 北京科技大学,2020.
- [29] Chen Z, Yang Y, Zhou L, et al. Ecological Restoration in Mining Areas in the Context of the Belt and Road Initiative: Capability and Challenges[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2022,95:106767.
- [30] Vicenl C, Oriol O, Josep M. Restoquarry: Indicators for Self-Evaluation of Ecological Restoration in Open-Pit Mines[J]. Ecological Indicators, 2019,102:437-445.
- [31] Zhang P, Ye Q, Yu Y, et al. Research on Farmers' Satisfaction with Ecological Restoration Performance in Coal Mining Areas Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation[J]. Global Ecology and Conservation, 2021,32:e01934.
- [32] Li S, Bi Y, Kong W, et al. Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Ecological Restoration in Coal Mining Areas[J]. Russian Journal of Ecology, 2015,46(5):431-437.
- [33] He Y, Chen S, Zhang B, et al. Multimedia Tilt Photography-Assisted Remote Sensing Technology in Mine Ecological Restoration[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022:1442738.
- [34] Mieke V, Michael B, Nicole E, et al. Changes in Soil Microbial Communities in Post Mine Ecological Restoration: Implications for Monitoring Using High Throughput DNA Sequencing[J]. Science of the Total Environment, 2020,749:142262.
- [35] 凌星元,孟卫东,黄波,等. 基于多种污染物损害视角的地方政府间环境规制合作策略研究[J]. 中国管理科学,2022,30(2):169-180.
- [36] 赵黎明,宋瑶,殷建立. 战略性新兴产业、传统产业与政府合作策略研究[J]. 系统工程理论与实践,2017,37(3):642-663.

(责任编辑:秦颖)