

基于奖惩与信用约束机制的稀土企业环保监督监管三方演化博弈研究

严世龙¹, 朱文兴^{2*}

1. 江西理工大学商学院, 江西 南昌 330000;

2. 江西理工大学有色金属产业发展研究院, 江西 赣州 341000



摘要:稀土行业的环保合规对其持续健康发展至关重要,但存在环保监管寻租、监管缺失和监督不力等问题。通过构建稀土企业、地方生态环境厅(局)与中华人民共和国生态环境部(生态环境部)的三方演化博弈模型,分析了各方演化策略与系统均衡点的稳定性,并运用数值仿真探讨了各参数调整对策略选择的影响。研究表明:(1)生态环境部有力的奖惩机制能够遏制稀土企业与地方生态环境厅(局)之间的寻租行为,但增长的奖励额将抑制中央政府严格监督的积极性;(2)生态环境部需设定符合“对企业的奖惩金额与严格监督时遭受的信用损失总和大于其寻租收益,或对地方生态环境厅(局)的奖惩总额大于其合谋收益”的奖惩机制,才能够有效保障行业的持续发展;(3)单纯依靠效益成本调控或奖惩措施的治理效用有限,生态环境部联合共治,发挥奖惩与信用约束机制的协同效应,同时提升惩罚与信用损失,增加奖励与减少环保成本,才是规范企业经营的有效途径。

关键词:稀土行业;环保监管寻租;合谋;监督监管;联合共治;三方演化博弈

中图分类号:F425 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)05-1135-12 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.05.341
引用格式:严世龙,朱文兴.基于奖惩与信用约束机制的稀土企业环保监督监管三方演化博弈研究[J].黄金科学技术,2025,33(5):1135-1146. YAN Shilong, ZHU Wenxing. Research on the Tripartite Evolutionary Game of Environmental Protection Supervision and Regulation in Rare Earth Industry Based on Reward, Punishment and Credit Constraint Mechanisms[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(5): 1135-1146.

稀土在高科技、新能源和国防建设等领域发挥着至关重要的作用,是保障国家安全和经济可持续发展的战略性资源(赵桂梅等,2024)。但稀土企业在开采与冶炼过程中会产生大量的废水、废气和固体废弃物(李顺等,2024),而处理“三废”需要投入高昂环保成本,因此企业处理“三废”的内在驱动力相对匮乏。为此,国家出台了大量相关环保规制政策,如《中华人民共和国环境保护法》中规定生态环境部门负责环保核查执法工作;《中华人民共和国环

境影响评价法》中规定生态环境部门负责对稀土开采和冶炼项目进行审批;《关于进一步强化生态环境保护监管执法的意见》要求地方生态环境厅(局)加强对稀土企业的环保监管,旨在形成“中央监督、地方监管、企业落实”的环保监督监管制度(李存芳等,2022)。然而,稀土企业面临着高昂的环保成本,可能会产生寻租的动机,部分地方生态环境厅(局)基于区域经济发展考量,可能与寻租企业合谋。同时,由于信息的不对称性(Akerlof, 1995),生态环境部

收稿日期:2024-10-29;修订日期:2025-04-25

基金项目:国家社会科学基金项目“产品空间视角下中国稀有矿产资源产业升级路径及政策选择研究”(编号:20XGL016)和江西省哲学社会科学重点研究基地项目“‘能耗’双控背景下江西有色金属产业低碳发展对策研究”(编号:22SKJD17)联合资助

作者简介:严世龙(2000—),男,江西赣州人,硕士研究生,从事供应链管理研究工作。E-mail:17770787477@163.com

*通信作者:朱文兴(1975—),男,江西余江人,教授,博士,从事资源与矿业经济、矿业工程研究工作。E-mail:81536597@qq.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

难以获取地方监管的真实数据,使得国家环保政策得不到有效执行。综上所述,针对稀土行业中环保监管寻租的现象,研究有效的环保监督监管策略以遏制寻租行为、规范企业经营具有重要的现实意义。

目前学术界已系统性地研究了监管寻租行为的演化博弈,涵盖了食品与医药安全监管(朱立龙等,2019,2021)、控排企业检测(王丹丹等,2022)以及化学品检查(李煜等,2024)等多个行业领域。在监管寻租研究中,政府相关部门是重要研究主体,如政府奖惩措施能够促进高污染企业开展绿色治理(Zhang et al, 2022),改善公共采购决策(周雄勇等,2024),促进低碳生产优化(刘琦铀等,2024),以及加强物流服务商ESG承诺(Zhang et al, 2024)等,表明政府的奖惩措施会影响各主体的策略选择。此外,关于稀土领域演化博弈的研究也较为丰富,如矿山修复(Yan et al, 2020)、绿色矿山建设(陈婉菁等,2021)、环境治理(王秀丽等,2022)、协同创新(贾扬蕾等,2023)和技术革新(Jia et al, 2023)等方面的博弈研究。

由此可见,虽然当前对监管寻租行为的研究已从多行业开展,但在稀土行业尤其是地方政府与企业合谋的监管难题仍需进一步深入探讨。同时,多数研究仅考虑政府的奖惩机制,未能结合行业政策挖掘其他因素。此外,目前稀土领域的研究较少涉及“遏制寻租、绿色发展”角度。鉴于此,本文主要研究以下3个问题:第一,引入寻租理论如何构建有效模型并解析稀土行业政企合谋监管难题?第二,引入的信用损失与市场规范因子将如何影响相关主体的策略选择?第三,单参数与多参数的交互将如何影响各主体及系统的策略演化?探讨上述问题,不仅能为稀土企业合规经营与遏制寻租提供理论支撑,也能为生态环境部及地方生态环境厅(局)完善监督监管策略、构建协同治理机制提供科学依据。

1 模型假设与构建

1.1 模型假设

(1)主体假设

参照《中华人民共和国环境保护法》、《中华人民共和国环境影响评价法》和《稀土工业污染物排

放标准》中的相关要求,明确了生态环境部及地方生态环境厅(局)要对稀土企业的排放标准及经营行为进行监督和监管,要求企业达标排放、环保经营。因此,在稀土企业环保监督监管系统中存在三方博弈主体,即稀土企业(简称“企业”)、地方生态环境厅(局)(简称“地方政府”)和生态环境部(简称“中央政府”),其中参与主体均为有限理性人,以自身利益最大化为目标。

(2)行为策略假设

企业的策略集合为(合规经营,违规经营),其中合规经营指企业严格遵守国家相关规定处理“三废”,违规经营指企业为了规避高额环保成本而开展违规行为,如非法排放、夜间偷排和环保设备“挂名运行”等。设置选择2种策略的概率分别为 x 和 $1-x$,其中 $x \in [0, 1]$ 。地方政府的策略集合为(监管,合谋),其中监管指积极落实上级的政策与要求,对违规企业进行整改与关停,合谋指地方政府与企业串通,掩盖其违规行为。设置选择2种策略的概率分别为 y 和 $1-y$,其中 $y \in [0, 1]$ 。

中央政府的策略集合为(严格监督,宽松监督),其中严格监督指中央政府实时对地方政府对企业政策执行情况进行监查与管控并采取奖惩措施,宽松监督指中央政府仅拟订政策,但对企业与地方政府的寻租行为不予理睬,且不采取奖惩措施。设置选择2种策略的概率分别为 z 和 $1-z$,其中 $z \in [0, 1]$ 。基于上述构建三方动态演化逻辑图(图1)。

(3)参数设定

企业经营总收益为 R_e ,维持经营的必要成本为 C_e ,当企业选择合规经营时需要投入环保成本 C_{ep} ,

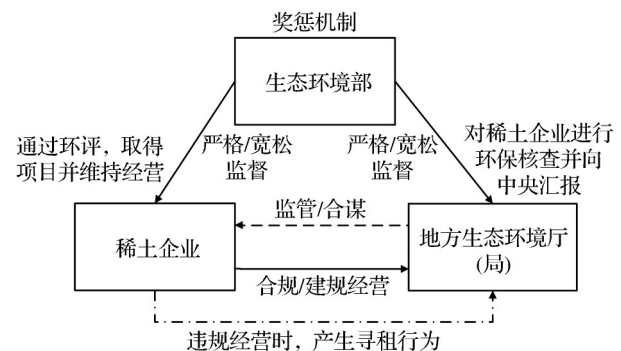


图1 三方动态演化逻辑图

Fig. 1 Logic diagram of the evolution of tripartite dynamics

如矿山修复、“三废”处理、环保设备购置和绿色技术创新等,此策略有利于保护生态环境,为中央政府提高公信力(S_g)。为了规避排污费与环保税,企业选择违规经营,不投入环保成本,但需通过环评(EIA),则向地方政府寻租,并支付寻租成本(B_e),若寻租成功,则会给中央政府带来修复环境的成本(C_{ge});地方政府面对企业的寻租,若选择监管策略,则如实上报给中央,对企业进行整改。若选择合谋策略,则放松对环评报告的核查,篡改检测信息并协助伪造数据,最后编造环境监测报告上交给中央,此合谋行为需支出投机成本(B_a);中央政府选择严格监督时,需支出监督成本(C_g),对合规企业给予环保设备购置税减免和绿色生产财政补贴等奖励(L_e),对执行监管的地方政府根据生态补偿政策予以补贴(L_a),对违规企业与合谋地方政府依法予以罚款(F_e 与 F_a),并记录企业的违规行为造成信用损失(λC_{ei}), $\lambda(1<\lambda<2)$ 代表中央政府严格监督对市场规范的潜在影响即市场规范因子(何鹏等,2023)。其中,奖惩机制通过补贴与罚款以引导企业经营行为,而信用约束机制通过记录企业违规行为并降低其市场信用评级,二者形成协同互补效应:前者通过经济杠杆调节短期行为决策,后者通过信用损失约束长期寻租动机。若选择宽松监督策略,则仅记录企业违规行为造成信用损失(C_{ei}),不作奖惩,且监管成本为零。由于监督不力,中央

政府将会受到上级部门的处罚(F_g)。其中,各参数均大于0,且 $B_e+C_{ei}<C_{ep}$ 、 $B_a<B_e$ 、 $F_g>C_{g0}$ 。

1.2 模型构建

基于上述假设,构建企业、地方政府和中央政府的三方演化博弈收益矩阵,通过矩阵展示三方策略选择的关联性,并为后续计算复制动态方程提供数值依据,如表1所示。

表1 三方博弈收益矩阵
Table 1 Three-party game payoff matrix

稀土企业	地方生态环境厅(局)	生态环境部	
		严格监督 z	宽松监督 $1-z$
合规经营 x	监管 y	$R_e+L_e-C_e-C_{ep}$ L_a	$R_e-C_e-C_{ep}$ 0
	合谋 $1-y$	$S_g-C_g-L_e-L_a$ $R_e+L_e-C_e-C_{ep}$ $-B_a-F_a$ $S_g-C_g-L_e+F_a$	S_g $R_e-C_e-C_{ep}$ $-B_a$ S_g
违规经营 $1-x$	监管 y	$-F_e-C_e-\lambda C_{ei}$ L_a $F_e-C_g-L_a$	$-C_e-C_{ei}$ 0 0
	合谋 $1-y$	$R_e-B_e-F_e-C_e-\lambda C_{ei}$ $B_e-B_a-F_a$ $F_a+F_e-C_g-C_{ge}$	$R_e-B_e-C_e-C_{ei}$ B_e-B_a $-C_{ge}-F_g$

2 模型分析

2.1 稀土企业的策略稳定性分析

企业选择合规经营或违规经营策略的期望收益以及平均期望收益为(E_{e1} , E_{e2} , \bar{E}_e),表示为

$$\begin{cases} E_{e1} = yz(R_e+L_e-C_e-C_{ep}) + y(1-z)(R_e-C_e-C_{ep}) + z(1-y)(R_e+L_e-C_e-C_{ep}) + (1-y)(1-z)(R_e-C_e-C_{ep}) \\ E_{e2} = z[(1-y)(R_e-B_e)-F_e-C_e-\lambda C_{ei}] + (1-z)[(1-y)(R_e-B_e)-C_e-C_{ei}] \\ \bar{E}_e = xE_{e1} + (1-x)E_{e2} \end{cases} \quad (1)$$

企业的复制动态方程为

$$F(x) = dx/dt = x(E_{e1} - \bar{E}_e) = x(x-1)[C_{ep} - B_e - (1-z+\lambda z)C_{ei} - z(L_e+F_e) - y(R_e-B_e)] \quad (2)$$

由此得 $F(x)$ 关于 x 的一阶导数及假定 $P(y)$ 分别为

$$d[F(x)]/dx = (2x-1)[C_{ep} - B_e - (1-z+\lambda z)C_{ei} - z(L_e+F_e) - y(R_e-B_e)] \quad (3)$$

$$P(y) = C_{ep} - B_e - (1-z+\lambda z)C_{ei} - z(L_e+F_e) - y(R_e-B_e) \quad (4)$$

依据微分方程稳定性定理,企业实现策略处于稳定状态须满足 $F(x)=0$ 且 $d[F(x)]/dx<0$ 。又因为 $\partial P(y)/\partial y<0$ 且当 $y^* = [C_{ep} - B_e - (1-z+\lambda z)C_{ei} - z(L_e+F_e)] / (R_e - B_e)$ 时, $P(y^*)=0$ 。因此,当 $y<y^*$ 时, $P(y)>0$,

$d[F(x)]/dx|_{x=0}<0$,此时 $x=0$ 为企业的演化稳定策略(ESS),即企业偏向于选择违规经营策略;当 $y>y^*$ 时, $d[F(x)]/dx|_{x=1}<0$, $x=1$ 为 ESS;当 $y=y^*$ 时, $d[F(x)]/dx=0$,无法确定演化稳定策略。企业策略演化相位图如图2所示,其中 A_1 表示企业向 $x=0$ 演化, A_2 表示企业向 $x=1$ 演化。

由图2可知,企业的演化稳定策略选择受到自身总收益、寻租成本、寻租收益、信用损失和奖惩力度等因素的影响。当企业的稳定策略为违规经营时,存在 $y<y^*$ 。通过采取以下措施:(1)提高企业盈利总收益,降低环保成本;(2)增加寻租成本;(3)提

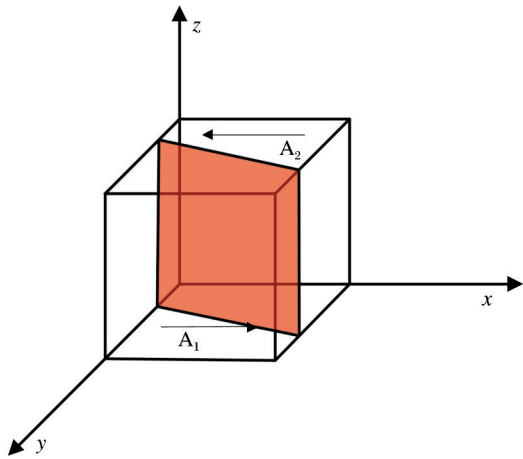


图2 稀土企业策略演化相位图

Fig. 2 Phase diagram of rare earths corporate strategy evolution

高信用损失;(4)增强奖惩力度。当 $y > y^*$ 时,企业的稳定策略将转向合规经营。

同时,企业选择合规经营策略不仅受到以上诸多因素的影响,还与中央政府选择严格监督策略的概率相关。因 $y^* = [C_{cp} - B_e - (1-z+\lambda z)C_{ei} - z(L_e + F_e)] / (R_e - B_e)$,随着 z 的增大, y^* 减小, $y > y^*$ 的概率增大,当 $y > y^*$ 时,企业的稳定策略为合规经营。因此,中央政府实时严格监督能够引导企业合规经营。

2.2 地方生态环境厅(局)策略稳定性分析

地方政府选择监管或合谋策略的期望收益以及平均期望收益为 $(E_{a1}, E_{a2}, \bar{E}_a)$,表示为

$$\begin{cases} E_{a1} = xzL_a + (1-x)zL_a \\ E_{a2} = x(-B_a - zF_a) + (1-x)(B_e - B_a - zF_a) \\ \bar{E}_a = yE_{a1} + (1-y)E_{a2} \end{cases} \quad (5)$$

地方政府的复制动态方程为

$$F(y) = dy/dt = y(E_{a1} - \bar{E}_a) = y(y-1)[(1-x)B_e - B_a - z(L_a + F_a)] \quad (6)$$

由此得 $F(y)$ 关于 y 的一阶导数及假定 $M(z)$ 分别为

$$d[F(y)]/dy = (2y-1)[(1-x)B_e - B_a - z(L_a + F_a)] \quad (7)$$

$$M(z) = (1-x)B_e - B_a - z(L_a + F_a) \quad (8)$$

$$\begin{cases} E_{g1} = x[S_g + F_a - C_g - L_e - y(L_a + F_a)] + (1-x)[F_a + F_e - C_g - C_{ge} - y(L_a + F_a - C_{ge})] \\ E_{g2} = xS_g + (1-x)(1-y)(-C_{ge} - F_g) \\ \bar{E}_g = zE_{g1} + (1-z)E_{g2} \end{cases} \quad (9)$$

由于 $M(z)$ 为关于 z 的减函数且当 $z^* = [(1-x)B_e - B_a] / (L_a + F_a)$ 时, $M(z^*) = 0$ 。因此,当 $z < z^*$ 时, $M(z) > 0$, $d[F(y)]/dy|_{y=0} < 0$,此时 $y=0$ 为ESS;当 $z > z^*$ 时, $d[F(y)]/dy|_{y=1} < 0$, $y=1$ 为ESS;当 $z = z^*$ 时, $d[F(y)]/dy = 0$,无法确定演化稳定策略。地方政府策略演化相位图如图3所示,其中 B_1 表示地方政府向 $y=1$ 演化, B_2 表示向 $y=0$ 演化。

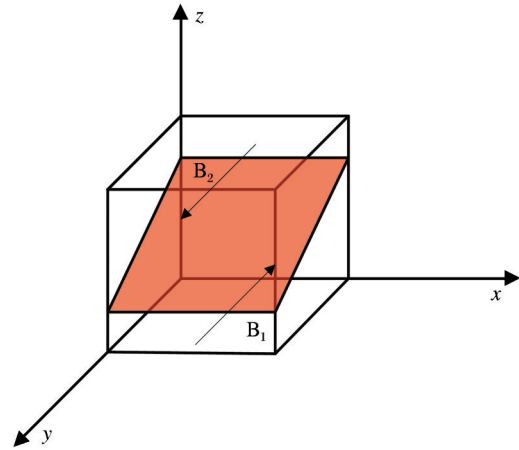


图3 地方生态环境厅(局)策略演化相位图

Fig. 3 Phase diagram of strategy evolution of local ecological environment department (bureau)

由图3可知,地方政府的演化稳定策略选择受到合谋的投机成本和奖惩力度等因素的影响。当地方政府的稳定策略为合谋时,存在 $z < z^*$ 。通过采取以下措施:(1)增加合谋的投机成本;(2)加强对寻租行为的打击力度,完善奖惩机制。当 $z > z^*$ 时,地方政府的稳定策略将转向监管。

同理,地方政府选择监管策略的概率还与企业选择合规经营的概率有关。因为 $z^* = [(1-x)B_e - B_a] / (L_a + F_a)$,随着 x 的增大, z^* 减小, $z > z^*$ 的概率增大,当 $z > z^*$ 时,地方政府的稳定策略为监管。因此,从源头规范企业经营行为能够有效遏制寻租现象的发生。

2.3 生态环境部策略稳定性分析

中央政府选择严格监督或宽松监督策略的期望收益以及平均期望收益为 $(E_{g1}, E_{g2}, \bar{E}_g)$,表示为

中央政府的复制动态方程为

$$F(z)=dz/dt=z(E_{g1}-\bar{E}_g)=z(z-1)[-F_a-F_e+C_g-F_g+x(F_e+F_g+L_e)+y(F_a+F_g+L_a)-xyF] \quad (10)$$

由此得 $F(z)$ 关于 z 的一阶导数及假定 $Q(x)$ 分别为

$$d[F(z)]/dz=(2z-1)[-F_a-F_e+C_g-F_g+x(F_e+F_g+L_e)+y(F_a+F_g+L_a)-xyF] \quad (11)$$

$$Q(x)=-F_a-F_e+C_g-F_g+x(F_e+F_g+L_e)+y(F_a+F_g+L_a)-xyF_g \quad (12)$$

由于 $Q(x)$ 为关于 x 的增函数且当 $x^*=[F_a+F_g+F_e-C_g-(L_a+F_a+F_g)y]/[L_e+F_e+F_g(1-y)]$ 时, $Q(x^*)=0$ 。因此,当 $x < x^*$ 时, $Q(x) < 0$, $d[F(z)]/dz|_{z=1} < 0$, 此时 $z=1$ 为 ESS; 当 $x > x^*$ 时, $d[F(z)]/dz|_{z=0} < 0$, 此时 $z=0$ 为 ESS; 当 $x=x^*$ 时, $d[F(z)]/dz=0$, 无法确定演化稳定策略。中央政府策略演化相位图如图 4 所示, 其中 C_1 表示中央政府向 $z=1$ 演化, C_2 表示中央政府向 $z=0$ 演化。

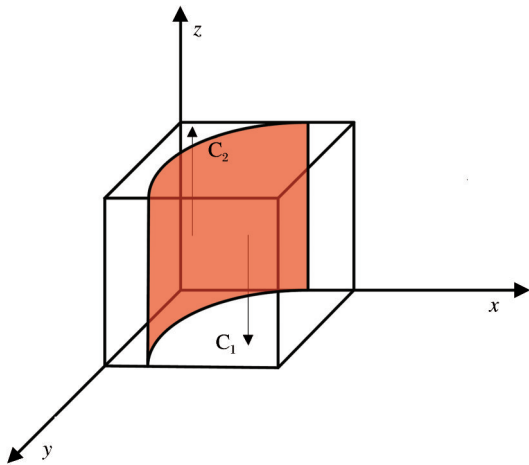


图 4 中央政府策略演化相位图

Fig. 4 Phase diagram of strategy evolution of central government

由图 4 可知, 中央政府的演化稳定策略选择受到奖惩力度、开展严格监督的成本和失责受到的处罚等因素的影响。当中央政府的稳定策略为宽松监督时, 存在 $x > x^*$, 可以采取以下措施: (1) 提高对监督乏力政府的处罚力度; (2) 适当加强惩罚力度, 削弱奖励力度。当 $x < x^*$ 时, 中央政府的稳定策略将转向严格监督。

同理, 中央政府选择严格监督策略的概率还与地方政府选择监管的概率相关。因为 $x^*=[F_a+F_g+$

$F_e-C_g-(L_a+F_a+F_g)y]/[L_e+F_e+F_g(1-y)]$, 随着 y 的增大, x^* 减小, $x > x^*$ 的概率增大, 当 $x > x^*$ 时, 中央政府的稳定策略为宽松监督。因此, 地方政府尽心尽责监管时, 可能会引起中央政府懈怠。

2.4 演化博弈系统均衡点的稳定性分析

通过雅可比矩阵的局部稳定性分析来判断均衡点稳定性。系统的雅可比矩阵为

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} & \frac{\partial F(x)}{\partial z} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} & \frac{\partial F(y)}{\partial z} \\ \frac{\partial F(z)}{\partial x} & \frac{\partial F(z)}{\partial y} & \frac{\partial F(z)}{\partial z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \quad (13)$$

式中: $a_1=(1-2x)[-C_{ep}+B_e+(1-z+\lambda z)C_{ei}+z(L_e+F_e)-y(B_e-R_e)]$; $a_2=(x^2-x)(B_e-R_e)$; $a_3=(x-x^2)[L_e+F_e+(1-\lambda)C_{ei}]$; $b_1=(y-y^2)B_e$; $b_2=(1-2y)[B_a-B_e+z(L_a+F_a)+xB_e]$; $b_3=(y-y^2)(L_a+F_a)$; $c_1=(z^2-z)[L_e+F_e+(1-y)F_g]$; $c_2=(z^2-z)[L_a+F_a+(1-x)F_g]$; $c_3=(2z-1)[-F_a-F_g-F_e+C_g+x((L_e+F_e+F_g)+y(L_a+F_a+F_g)-xyF_g)]$ 。

对于探讨非对称博弈中演化稳定均衡, 演化稳定策略不可能为混合策略, 因此只需要分析纯策略 (Selten, 1980), 仅针对 8 个纯策略均衡点进行分析。联立三方复制动态方程并令其均等于零, 可得 8 个纯策略均衡点分别为 $E_1(0,0,0)$ 、 $E_2(1,0,0)$ 、 $E_3(0,1,0)$ 、 $E_4(0,0,1)$ 、 $E_5(1,1,0)$ 、 $E_6(1,0,1)$ 、 $E_7(0,1,1)$ 和 $E_8(1,1,1)$ 。将均衡点代入雅可比矩阵中, 可得各点对应的特征值。由李雅普诺夫第一法则可知: 当特征值均为负时, 均衡点为稳定点; 当特征值均为正时, 均衡点为不稳定点; 当特征值不全为正或负时, 均衡点为鞍点 (Lyapunov, 1992)。讨论各均衡点特征值与稳定性条件如表 2 所示。

推论 1: 当 $F_e+L_e > C_{ep}-B_e-\lambda C_{ei}$ 或 $F_a+L_a > B_e-B_a$ 时, 系统仅存在唯一稳定点 $E_5(1,1,0)$ 。

推论 1 表明: 当企业的奖惩金额与严格监督时遭受的信用损失总和大于其寻租收益, 或地方政府受到的奖惩总和大于其合谋收益时, 系统朝向 (合格经营, 监管, 宽松监督) 的策略演化。因此, 中央政府需设计科学的奖惩机制才能够有效遏制企业与地方政府的寻租行为。

推论 2: 当 $F_e+L_e < C_{ep}-B_e-\lambda C_{ei}$ 且 $F_a+L_a < B_e-B_a$ 时, 系统存在 2 个稳定点 $E_4(0,0,1)$ 和 $E_5(1,1,0)$ 。

表2 均衡点稳定性分析

Table 2 Equilibrium point stability analysis

均衡点	特征值	稳定性条件
$E_1(0, 0, 0)$	$\lambda_1 = B_c - C_{ep} + C_{ci} < 0, \lambda_2 = B_a - B_c < 0, \lambda_3 = F_g + F_e + F_a - C_g > 0$	鞍点
$E_2(1, 0, 0)$	$\lambda_1 = -B_c + C_{ep} - C_{ci} > 0, \lambda_2 = B_a > 0, \lambda_3 = F_a - C_g - L_c$	当 $F_a - L_c > C_g$ 时, 不稳定点
$E_3(0, 1, 0)$	$\lambda_1 = R_c - C_{ep} + C_{ci} > 0, \lambda_2 = B_c - B_a > 0, \lambda_3 = F_c - C_g - L_a$	当 $F_c - L_a > C_g$ 时, 不稳定点
$E_4(0, 0, 1)$	$\lambda_1 = L_c + B_c - C_{ep} + \lambda C_{ci} + F_c, \lambda_2 = L_a - B_c + B_a + F_a, \lambda_3 = C_g - F_a - F_g - F_c < 0$	当 $L_c + F_c < -B_c + C_{ep} - \lambda C_{ci}$ 且 $L_a + F_a < B_c - B_a$ 时, 稳定点
$E_5(1, 1, 0)$	$\lambda_1 = -R_c + C_{ep} - C_{ci} < 0, \lambda_2 = -B_a < 0, \lambda_3 = -L_a - C_g - L_c < 0$	稳定点
$E_6(1, 0, 1)$	$\lambda_1 = -L_c - B_c + C_{ep} - \lambda C_{ci} - F_c, \lambda_2 = B_a + L_a + F_a > 0, \lambda_3 = -F_a + C_g + L_c$	当 $L_c + F_c < -B_c + C_{ep} - \lambda C_{ci}$ 且 $F_c - L_a < C_g$ 时, 不稳定点
$E_7(0, 1, 1)$	$\lambda_1 = L_c - C_{ep} + \lambda C_{ci} + F_c + R_c > 0, \lambda_2 = -L_a + B_c - B_a - F_a, \lambda_3 = -F_c + C_g + L_a$	当 $L_a + F_a < B_c - B_a$ 且 $F_c - L_a < C_g$ 时, 不稳定点
$E_8(1, 1, 1)$	$\lambda_1 = -L_c + C_{ep} - \lambda C_{ci} - F_c - R_c < 0, \lambda_2 = -L_a - B_a - F_a < 0, \lambda_3 = L_a + C_g + L_c > 0$	鞍点

推论2表明:当企业的环保成本较高、信用损失较小或中央政府奖惩力度较小,同时地方政府合谋收益较高时,由于初始策略点的不同,三方策略可能演化并稳定于(违规经营,合谋,严格监督)或(合规经营,监管,宽松监督)稳定点。在此情形下,中央政府监督乏力,难以遏制地方政府与企业合谋的行为,系统主要向 $E_4(0, 0, 1)$ 演化,只有在企业初始合规经营意愿极高的情况下才可能向 $E_5(1, 1, 0)$ 演化,这与现实目标不符。因此,为避免此情形,中央政府需设定较大的奖惩力度,完善信用管制体系,减轻企业环保成本,同时降低合谋收益。

3 数值仿真分析

3.1 稳定策略仿真分析

为验证上述演化稳定性分析的可靠性,同时更直观地演示不同市场情形对稀土行业监管治理演化路径与稳定状态的影响,本文结合稀土行业现实

情况与相关文献赋以模型数值,并利用MATLAB R2021a进行仿真。

具体赋值依据如下,基于推论1,首先,保证仿真的可行性,依据稀土开采和冶炼过程中高环保成本的特征,设 $R_c=120, C_e=10, C_{ep}=70$;其次,在中央政府奖惩力度合理时,寻租行为受到监督监管,参考相关文献(朱立龙等,2019),设 $C_{ci}=15, B_c=25, B_a=8, \lambda=1.5$;接着,参考相关文献(李煜等,2024),设 $F_g=25, C_g=10$;最后,参考《节能环保产业发展规划》和《环境保护法》中的奖惩办法与文献(刘文君等,2023),设 $L_c=15, L_a=16, F_c=25, F_a=20$ 。

基于推论2,此时企业的环保成本高于上述情况,设 $R_c=120, C_e=10, C_{ep}=90$;其次,此时中央政府监督乏力,在缺乏严格监督时企业通过违规行为能获得较高的收益,设 $C_{ci}=10, B_c=35, B_a=4, \lambda=1.3$;最后,相较于上述奖惩力度小,设 $L_c=10, L_a=8, F_c=15, F_a=10, F_g=25, C_g=10$ 。满足以上数值条件,初始演化路径如图5所示。

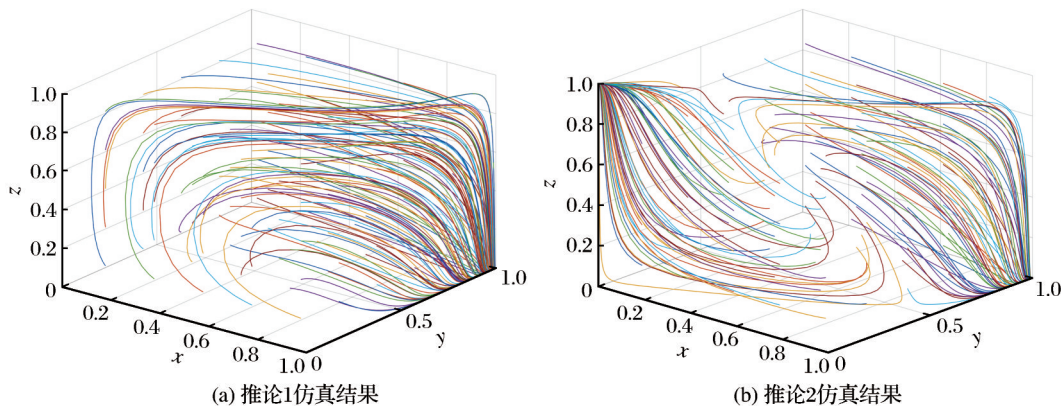


图5 初始演化路径

Fig. 5 Initial evolutionary path

3.2 单参数敏感性仿真分析

$E_4(0,0,1)$ 与现实目标不一致,而 $E_5(1,1,0)$ 与理想目标相同,即在宽松监督的条件下,企业与地方政府均能做到自律,不存在寻租行为。本文研究的目的是如何遏制企业与地方政府之间寻租行为并为中央政府完善环保监督策略,演化博弈的理想稳定点为 $E_5(1,1,0)$,因此仅在 $E_5(1,1,0)$ 即推论1情形下,进行参数敏感性分析。设置初始策略选择概率为 $x=0.5, y=0.5, z=0.5$,并分析 C_{ep} 、 B_e 、 C_{ei} 、 λ 、 L_a 和 F_a 参数变动对演化路径与结果的影响。

首先,分别赋以 $C_{ep}=45, 60, 75$,三方演化路径和结果如图6所示。随着合规经营环保成本的增加,企业趋于合规经营的演化速率减缓,中央政府选择宽松监督的意愿降低,地方政府选择监管的概率减小。

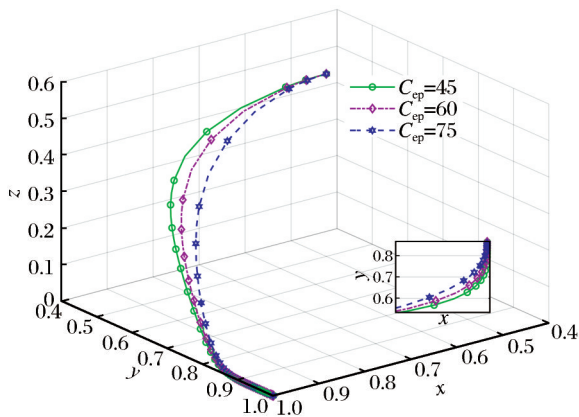


图6 环保成本的影响
Fig. 6 Impact of environmental costs

其次,分别赋以 $B_e=10, 25, 40$,三方演化路径与结果如图7所示。随着寻租成本的增加,企业趋向合规经营的演化速率加快,而地方政府在利益驱动下选择监管的意愿降低,但此时行业监督制度严格,具备有力的奖惩制度,使地方政府仍选择监管策略,中央政府选择宽松监督策略的概率减小。

接着,分别赋以 $C_{ei}=8, 20, 32$,三方演化路径与结果如图8所示。随着违规行为遭受的信用损失加剧,企业趋向合规经营的演化速率加快,企业自觉趋于合规经营策略的行为,促进中央政府向宽松监督策略的演化速率加快,地方政府选择监管策略的概率增大。

然后,分别赋以 $\lambda=1.2, 1.4, 1.8$,三方演化路径

与结果如图9所示。市场规范因子的增大表示政府监督力度越大且市场对失信企业的排斥效应越强,从而信用损失的影响程度增强,企业趋向合规

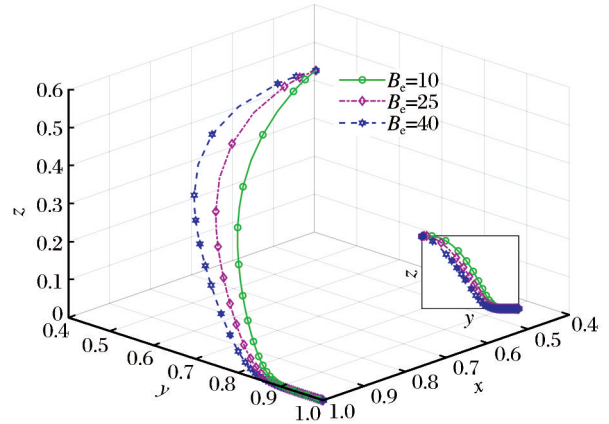


图7 寻租成本的影响
Fig. 7 Impact of rent-seeking costs

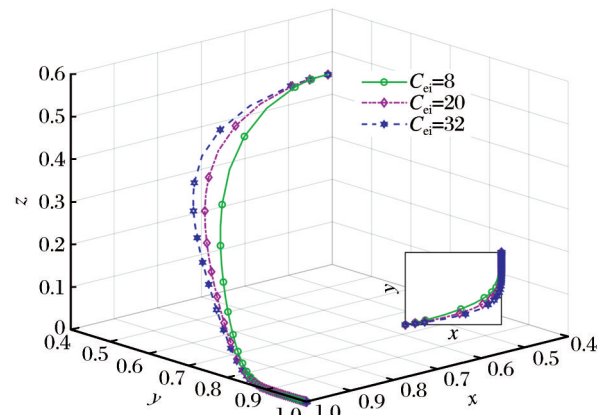


图8 信用损失的影响
Fig. 8 Impact of reputational loss costs

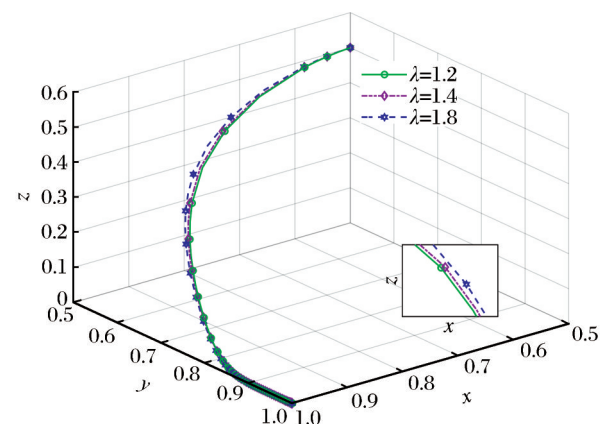


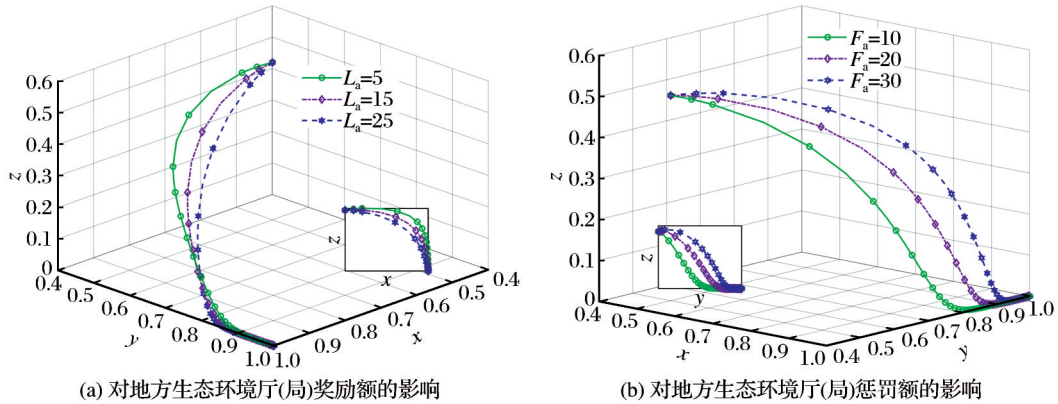
图9 市场规范因子的影响
Fig. 9 Impact of market regulatory factors

经营的演化速率加快,地方政府选择监管策略的概率增大。

最后,分别赋以 $L_a=5, 15, 25, F_a=10, 20, 30$, 三方演化路径与结果如图 10 所示。随着奖励额的增加,地方政府趋向监管的演化速率加快,企业意向选择合规经营策略,而所需支出的奖励额增加,中央政府选择宽松监督的概率增大。同时,随着惩罚

力度的增加,地方政府趋于监管的演化速率加快,企业意向合规经营的概率增大,中央政府选择宽松监督的概率减小。

因此,有力的奖惩机制能够促进企业与地方政府规范运营,但设定的较大的奖励额会抑制中央政府履行严格监督职责,所以要科学合理地设计奖惩机制。



(a) 对地方生态环境厅(局)奖励额的影响

(b) 对地方生态环境厅(局)惩罚额的影响

图 10 对地方生态环境厅(局)奖惩力度的影响

Fig. 10 Impact on the strength of rewards and penalties for environmental testing organizations

3.3 多参数敏感性仿真分析

(1) 多参数对单一主体的影响分析

尽管单参数分析提供了有价值的见解,但忽略了各参数间可能存在的复杂交互作用。因此,多参数敏感性分析的引入是必要的,这能更准确地模拟现实环境中的复杂情境,揭示参数交互对系统演化和策略选择的影响。

在推论 1 的情形下进行分析,图 11 揭示了惩罚力度和信用损失变化对企业策略演化的共同影响。仅 F_e 或 C_{ei} 单独增大时,企业的策略变动幅度小,而 F_e 与 C_{ei} 同时增大时,企业的策略变动幅度大,且最终稳定于合规经营策略。因此,中央政府不仅要加强惩罚力度还要完善信用管制体系,加强信用管制力度,形成“经济惩罚+信用约束”的双重威慑可有效促使企业选择合规经营策略。

图 12 揭示了所需环保成本与奖励额变化对企业策略演化的共同影响。仅 L_e 单独增大时,企业的策略变动幅度小, C_{ep} 单独减小时,策略变动幅度较大,说明降低环保成本是促进企业合规经营的有效途径,但最终并不能完全稳定于合规经营,再单一调控环保成本需要付出较大代价。而 C_{ep} 与 L_e 同时

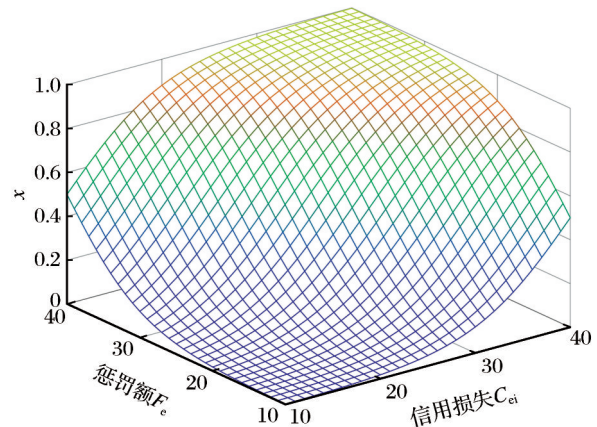


图 11 惩罚额和信用损失对稀土企业策略的影响

Fig. 11 Impact of penalty amounts and reputational loss costs on the strategies of rare earth enterprises

变动时,企业的策略变动幅度大,且最终完全稳定于合规经营策略。因此,中央政府在适当加强奖励力度时,应联合地方政府降低企业环保成本,才能有效引导企业合规经营。

图 13 揭示了信用损失和市场规范因子对企业策略的共同影响。市场规范因子反映了中央政府的监督强度对信用约束的放大效应,当 $\lambda > 1$ 时,信

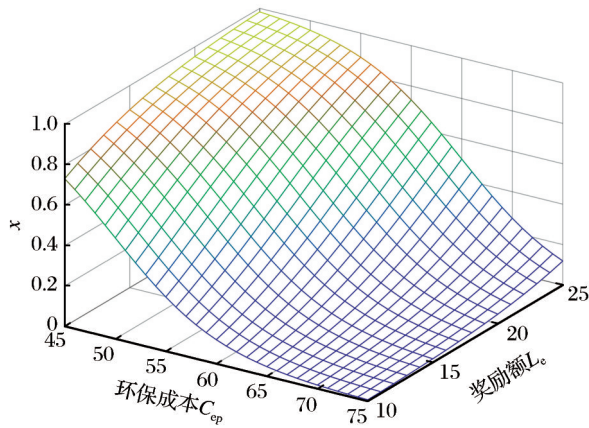


图 12 环保成本与奖励额对稀土企业策略的影响

Fig. 12 Impact of environmental costs and incentive amounts on the strategies of rare earth enterprises

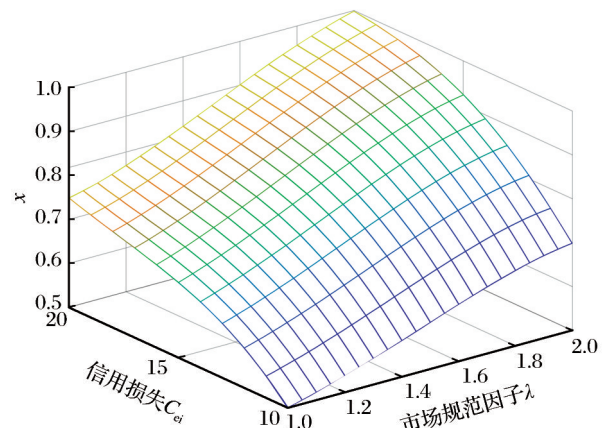


图 13 信用损失和市场规范因子对稀土企业策略的影响

Fig. 13 Impact of credit loss and market regulation factors on the strategies of rare earth enterprises

用损失随监督力度的增强呈非线性增长,表明严格监督能够通过市场机制提升企业的违规成本,增强信用损失程度。

(2)多参数对系统的影响分析

$E_4(0, 0, 1)$ 从现实的角度来看,体现了企业拒绝环保经营,尽管在严格的监督下,地方政府仍与企业合谋,不符合现实目标。因此,为了探究多参数变化使稳定点偏离 $E_4(0, 0, 1)$,分析在推论2的情形下5个参数($C_{ep} \sim C_{ci} \sim B_e \sim F_e \sim L_e$)对系统均衡策略的影响,并探讨如何改变5个参数以避免出现推论2的情形。设 $C_{ep}=(90, 80, 70)$, $C_{ci}=(10, 15, 20)$, $B_e=$

$(25, 30, 35)$, $F_e=(10, 20, 30)$, $L_e=(10, 15, 20)$ 。不同参数设置下的仿真结果如图 14 所示。

由图 14(a)可知,初始状态下,稀土行业市场较为混乱,存在寻租行为。由图 14(b)和图 14(c)可知,随着参数的变动,系统的演化稳定点逐渐偏离 $E_4(0, 0, 1)$ 朝向 $E_5(1, 1, 0)$,市场逐渐规范但仍存在部分寻租行为,最终演变到市场中不存在寻租行为。可得,为避免 $E_4(0, 0, 1)$ 成为演化稳定点可采取减少企业所需投入的环保成本,完善信用管制体系,以及提高寻租成本与加强奖惩力度等措施。

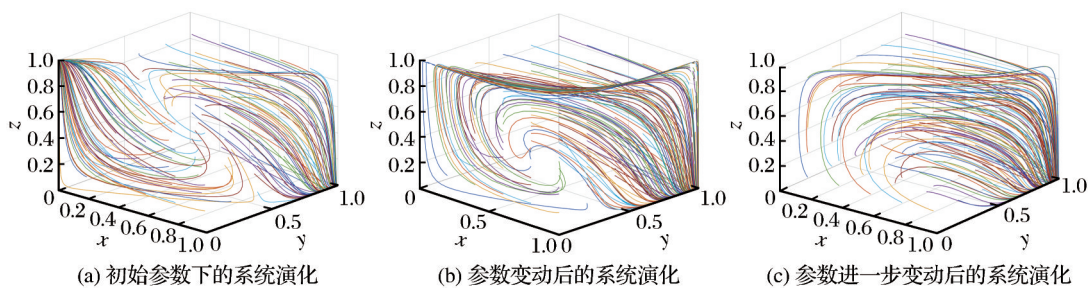


图 14 ($C_{ep} \sim C_{ci} \sim B_e \sim F_e \sim L_e$)对 $E_4(0, 0, 1)$ 的影响

Fig. 14 Impact of ($C_{ep} \sim C_{ci} \sim B_e \sim F_e \sim L_e$) on $E_4(0, 0, 1)$

4 结论与建议

4.1 研究结论

针对稀土企业与地方生态环境厅(局)之间存在寻租行为,本文构建了稀土企业、地方生态环境厅(局)和生态环境部三方演化博弈模型,通过各方

策略稳定性分析、系统均衡点稳定性分析与参数敏感性仿真分析,研究遏制寻租行为的策略,最后依据稳定性条件和各参数的影响关系得出相关结论:

(1)生态环境部有力的奖惩机制能够约束稀土企业与地方生态环境厅(局)的行为,但增大奖励力度将限制自身履责的积极性。

(2)科学的奖惩机制是遏制稀土行业寻租行为的关键。设定符合“对稀土企业的奖惩额与严格监督时遭受的信用损失总和大于其寻租收益,或对地方生态环境厅(局)的奖惩总额大于其合谋收益”的奖惩机制,才能够有效保障稀土行业持续健康发展,遏制寻租可能性。

(3)提升企业盈利、降低企业环保成本、增加企业寻租成本和信用损失是避免违规经营的有力手段。但对于规范型稀土企业,单纯依靠上述效益成本进行调控,或仅依靠奖惩措施来治理,往往效用有限,难以达到预期效果。因此,综合治理才是规范型稀土企业的有效途径。

(4)提升地方生态环境厅(局)合谋的投机成本是遏制合谋行为的有力措施。

4.2 政策建议

基于上述研究结论对稀土企业环保监督监管提出了政策建议:

(1)生态环境部应适当加强奖惩力度。在奖励方面,可设立长期补贴计划,确保企业与地方政府在开展环保工作时持续获得资金支持,而非仅限于一次性补贴。同时,为避免过量的奖励影响中央政府的监督积极性,可采取分阶段补贴制度,包括预奖励与最终奖励,并对违规企业实施奖励追回机制,以缓解资金压力;在惩罚方面,可引入递增罚款机制,排放超标量越多,环保绩效越差,罚款越重,同时完善对于企业高管与地方官员的问责措施。

(2)针对监督稀土企业合规经营的监管行为。为降低环保成本,地方生态环境厅(局)与生态环境部应加强稀土行业生态环境科技支撑,依托国家生态环境科技成果转化综合服务平台联合为企业提供环保技术咨询与培训,减轻企业环保创新投入,接着,可通过推动稀土开采、冶炼企业集群发展,设立污染集中治理设施,以分摊环保成本;为增加寻租成本,中央政府可通过设立跨区联合监管制度,由中央主导,多个省市参与,形成跨地区的协同监管,从而避免单一地方政府对企业的监管;为增加信用损失,中央政府可通过建立环保信用评级体系,强化监督力度,从企业经营、排污行为与设备运行等多维度开展动态分级管理,并完善市场机制,对低等级企业在贷款融资、市场准入、政策支持等方面进行限制,并将企业信用数据录入国家信用系

统,要求企业在市场经营中公示。同时,发挥与奖惩机制的协同效应,通过信用损失约束与经济杠杆调节有效规范企业行为。

(3)针对监督地方生态环境厅(局)的监管行为。为提升合谋的投机成本,中央政府可规范地方政府在检测设备上安装防篡改系统,如数据加密和多因素认证系统,以增强技术防范难度。此外,要求地方政府采用多种检测手段,对环境数据进行多维度重复检测,并设计数据差异比对机制,多维核查检测数据,使环境检测流程更加规范复杂化。同时,为规避寻租可能性,生态环境部可通过设立信息公开制度,要求地方政府实时公开检测显示的污染物排放数据与环保设施运行情况,借助社会公众力量进行监督,以减少合谋的可能性。此外,通过设立专门的中央环保督察组介入地方政府的环保监管工作,推行定期与突击检查,独立验证企业环保数据和设备运行情况,从而减少寻租空间。

参考文献(References):

- Akerlof G, 1995. The market for "lemons": quality uncertainty and the market mechanism [M]//Essential readings in economics. London: Macmillan Education UK.
- Jia Y L, Zheng K K, Zhou Y T, et al, 2023. How to carry out technological innovation in the rare earth industry? [J]. Journal of Industrial and Management Optimization, 19 (11): 7861-7880.
- Lyapunov A M, 1992. The general problem of the stability of motion [J]. International Journal of Control, 55(3): 531-534.
- Selten R, 1980. A note on evolutionarily stable strategies in asymmetric animal conflicts [J]. Journal of Theoretical Biology, 84(1): 93-101.
- Yan G L, Xue F, Li Z X, 2020. Research on ecological restoration mechanism of rare-earth mines based on evolutionary game [J]. Advances in Materials Science and Engineering, (1): 4201945.
- Zhang M D, Shen Q, Zhao Z H, et al, 2024. Commitment or rent-seeking? Government incentive policies for ESG reporting in sustainable e-commerce logistics [J]. International Journal of Production Economics, 268: 109134.
- Zhang T F, Qin H Y, Xu W S, 2022. Environmental regulation, greenwashing behaviour, and green governance of high-pollution enterprises in China [J]. International Journal of En-

- Environmental Research and Public Health, 19(19): 12539.
- 陈婉菁, 吴泽斌, 2021. 惩罚与激励双视角下绿色矿山建设的演化博弈与仿真[J]. 黄金科学技术, 29(6): 884-898.
- Chen Wanjing, Wu Zebin, 2021. Evolutionary game and simulation of green mine construction from the perspective of punishment and incentive[J]. Gold Science and Technology, 29(6): 884-898.
- 何鹏, 尚琦, 王先甲, 等, 2023. “直播+”背景下考虑平台监管的电商供应链演化博弈分析[J]. 系统工程理论与实践, 43(8): 2366-2379. He Peng, Shang Qi, Wang Xianjia, et al, 2023. Evolutionary game analysis of e-commerce supply chain considering platform supervision under the background of “Live streaming +” [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 43(8): 2366-2379.
- 贾扬蕾, 许礼刚, 周怡婷, 2023. 地方政府、稀土企业与新能源企业协同创新演化博弈研究[J]. 运筹与管理, 32(10): 37-42. Jia Yanglei, Xu Ligang, Zhou Yiting, 2023. Evolutionary game research on collaborative innovation among local government, rare earth enterprises and new energy enterprises[J]. Operations Research and Management Science, 32(10): 37-42.
- 李存芳, 仇然, 王语涵, 2022. 资源型企业绿色转型监察监管三方演化博弈及稳定性控制策略[J]. 软科学, 36(3): 99-109. Li Cunfang, Qiu Ran, Wang Yuhan, 2022. Tripartite evolutionary game and stability control strategy of resource-based enterprises' green transformation supervision[J]. Soft Science, 36(3): 99-109.
- 李顺, 韩萧萧, 熊竹楠, 等, 2024. 中国稀土全产业链中的环境和健康风险[J]. 稀土, 45(2): 143-158. Li Shun, Han Xiaoxiao, Xiong Zhunan, et al, 2024. Environmental and health risks in China's rare earth industry chain[J]. Chinese Rare Earths, 45(2): 143-158.
- 李煜, 王腾飞, 周欢, 等, 2024. 政府奖惩机制下港口危化品物流监管的三方演化博弈研究[J]. 工业工程, 27(1): 137-144, 154. Li Yu, Wang Tengfei, Zhou Huan, et al, 2024. A tripartite evolutionary game study on port logistics regulation of hazardous chemicals with government reward and punishment mechanisms [J]. Industrial Engineering Journal, 27(1): 137-144, 154.
- 刘琦铤, 徐禧洛, 张成科, 2024. “双碳”目标下政企及第三方检测机构三方演化博弈分析[J]. 工业工程, 27(1): 145-154. Liu Qiyu, Xu Xiluo, Zhang Chengke, 2024. Tripartite evolutionary game analysis among government, enterprises and third-party detection institutions with the goal of carbon peaking and carbon neutralization[J]. Industrial Engineering Journal, 27(1): 145-154.
- 刘文君, 张婷, 黄聃, 2023. 碳核查机构寻租行为和政府奖惩机制: 基于三方演化博弈的仿真分析[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 48(6): 187-197. Liu Wenjun, Zhang Ting, Huang Dan, 2023. Rent-seeking behavior of carbon verification agencies and government reward-penalty mechanisms: a simulation analysis based on trilateral evolutionary game [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 48(6): 187-197.
- 王丹丹, 菅利荣, 付帅帅, 2022. 基于多方参与的“碳核查”业务权利寻租行为监管及控制研究[J]. 运筹与管理, 31(9): 225-231. Wang Dandan, Jian Lirong, Fu Shuaishuai, 2022. The supervision and control of rent-seeking behavior of carbon verification business rights based on multi-party participation [J]. Operations Research and Management Science, 31(9): 225-231.
- 王秀丽, 张哲源, 李恒凯, 2022. 基于博弈论视角的稀土矿区环境治理及监管策略研究[J]. 运筹与管理, 31(1): 46-51. Wang Xiuli, Zhang Zheyuan, Li Hengkai, 2022. Research on environmental governance and supervision strategy of rare earth mining area based on game theory [J]. Operations Research and Management Science, 31(1): 46-51.
- 赵桂梅, 耿涌, 魏文栋, 2024. 基于可持续发展视角我国稀土资源贸易安全评价研究[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 24(2): 93-105. Zhao Guimei, Geng Yong, Wei Wendong, 2024. Evaluating the trade security of rare earth resources in China from a sustainable development perspective [J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 24(2): 93-105.
- 周雄勇, 许志端, 郗永勤, 2024. 可持续公共采购中寻租监管的动态演化稳定性控制[J]. 运筹与管理, 33(3): 155-161. Zhou Xiongyong, Xu Zhiduan, Xi Yongqin, 2024. Dynamic evolutionary stability control of rent-seeking and supervision in sustainable public procurement [J]. Operations Research and Management Science, 33(3): 155-161.
- 朱立龙, 荣俊美, 张思意, 2021. 政府奖惩机制下药品质量安全监管三方演化博弈及仿真分析[J]. 中国管理科学, 29(11): 55-67. Zhu Lilong, Rong Junmei, Zhang Siyi, 2021. Three-party evolutionary game and simulation analysis of drug quality supervision under the government reward and punishment mechanism [J]. Chinese Journal of Management Science, 29(11): 55-67.
- 朱立龙, 孙淑慧, 2019. 消费者反馈机制下食品质量安全监管三方演化博弈及仿真分析[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 25(3): 94-107. Zhu Lilong, Sun Shuhui, 2019. Tri-

partite evolution game and simulation analysis of food quality and safety supervision under consumer feedback mecha-

nism[J].Journal of Chongqing University (Social Science Edition),25(3):94-107.

Research on the Tripartite Evolutionary Game of Environmental Protection Supervision and Regulation in Rare Earth Industry Based on Reward, Punishment and Credit Constraint Mechanisms

YAN Shilong¹, ZHU Wenxing²

1. Business School, Jiangxi University of Science and Technology, Nanchang 330000, Jiangxi, China;

2. Institute of Nonferrous Metal Industry Development, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China

Abstract: In the context of fostering sustainable and healthy development within the rare earth industry, it is imperative that enterprises adhere to environmentally compliant operations. Nonetheless, the industry is currently confronted with significant challenges, including environmental regulatory rent-seeking, inadequate oversight, and insufficient supervision. These issues not only jeopardize the industry's sustainable development but also pose potential risks to ecological environments. This study introduces an innovative tripartite evolutionary game model that incorporates rare earth enterprises, local ecological-environmental bureaus, and the Ministry of Ecology and Environment (MEE). An in-depth analysis was conducted to investigate the evolutionary strategies of each stakeholder under various scenarios, and the stability of system equilibrium points was thoroughly examined. Additionally, numerical simulations were utilized to systematically assess the impact of key parameter adjustments on strategy selection, thereby providing quantitative scientific evidence to inform the optimization of regulatory policies. The findings indicate that: (1) The implementation of a robust reward-punishment mechanism by the Ministry of Ecology and Environment (MEE) is crucial. This mechanism not only effectively mitigates rent-seeking behavior between rare earth enterprises and local environmental authorities but also steers all stakeholders towards environmentally compliant strategies by dynamically adjusting the intensity of incentives. (2) Excessively high reward levels may have detrimental effects, potentially reducing the central government's motivation for stringent oversight. Consequently, a scientifically designed reward-punishment mechanism must ensure that "the aggregate of rewards/penalties for enterprises and the credit losses incurred under rigorous supervision surpass their rent-seeking benefits, or that the total rewards/penalties for local environmental bureaus exceed their collusion gains." This is vital for ensuring the sustainable development of the industry. (3) The study underscores the limitations of singular governance approaches. The results demonstrate that relying solely on cost-benefit adjustments or traditional reward-punishment measures is inadequate for effective governance. It is recommended that the Ministry of Ecology and Environment (MEE) implement a collaborative governance strategy that capitalizes on the synergistic integration of reward-punishment and credit constraint mechanisms. By intensifying penalty severity and credit losses, alongside augmenting incentives and diminishing corporate environmental costs, the standardization of enterprise compliance can be more effectively realized.

Key words: rare earth industry; environmental regulatory rent-seeking; conspire; oversight and regulation; collaborative governance; tripartite evolutionary game theory