

引用格式: 邵留国, 蓝婷婷. 中国战略性矿产资源国际合作的演化博弈与策略[J]. 资源科学, 2026, 48(3): 666-678. [Shao L G, Lan T T. Evolutionary game and strategies of China's international cooperation on strategic mineral resources[J]. Resources Science, 48(3): 666-678.] DOI: 10.18402/resci.2026.03.12

中国战略性矿产资源国际合作的演化博弈与策略

邵留国^{1,3}, 蓝婷婷^{2,3}

(1. 中南大学商学院, 长沙410083; 2. 怀化学院数字经济与管理学院, 怀化418000;
3. 中南大学金属资源战略研究院, 长沙410083)

摘要:【目的】本文旨在探究在面临大国干预加剧与矿产资源国政策不确定性上升的双重挑战下, 如何保障中国战略性矿产资源可持续供应安全。【方法】本文通过构建矿产资源国、美国与中国的三方演化博弈模型, 分析三方策略互动演化路径及其稳定性条件。【结果】①在多方利益耦合与动态均衡作用下, 系统存在稳定均衡策略, 即矿产资源国维持合作、美国不干预、中国保守应对; ②美国干预行为具有显著的收益驱动特征, 其边际收益提升会强化干预动机, 进而可能促使矿产资源国改变对华合作格局; ③矿产资源国政策转型面临内部结构性约束, 资源民族主义成本的存在显著降低了其转变合作模式的可能性; ④中国的“激励-惩罚”双向政策工具组合, 可有效抑制矿产资源国的策略转向倾向, 压缩美国的干预空间。【结论】本文揭示了战略性矿产地缘博弈中, 美国干预的经济约束与矿产资源国内部冲突成本是维系合作稳定的两大关键机制。因此, 中国应构建一套依据博弈状态动态响应的策略体系, 在风险高企时果断运用反制措施、利益绑定等进取型应对策略保障安全, 在趋于稳定时及时回归成本最优的保守应对策略, 以实现长期利益最大化。

关键词: 战略性矿产资源; 大国干预; 地缘博弈; 三方演化博弈; 数值仿真

DOI: 10.18402/resci.2026.03.12

1 引言

战略性矿产是能源转型与技术革新的重要基础材料^[1-3], 具有可替代性低、全球资源地理分布高度集中的属性^[4-6]。根据国际能源署预测, 在清洁能源技术发展推动下, 到2040年, 锂、钴、稀土等战略性矿产的需求将增长400%以上。中国作为全球最大的战略性矿产进口国和主要对外投资国, 2024年消费了全球55%以上的铜、60%以上的钴、80%以上的锂。王永中等^[7]和宋益等^[8]指出, 中国的多种战略性矿产供应短缺, 需要通过全球供应链进口, 尤其是急需的钴、锂、铜等关键矿产, 对外依存度高达70%。这种高需求和高对外依赖的现实使得中国战略性矿产资源的可持续供应安全面临严峻挑战。

与此同时, 全球能源转型加速重塑着大国竞争格局, 博弈焦点由传统能源转向了战略性矿产资源^[9,10]。一方面, 欧美国家正利用其在定价规则、绿色规范和技术标准上的影响力, 强化对战略性矿产供应链的主导权, 意图通过干预中国矿产资源对外合作格局实施供应链封锁^[11]。国际可再生能源署也警示了能源转型正在放大资源端的地缘政治影响^[12]。另一方面, 矿产资源国为应对地缘风险和经济发展的双重压力, 采取提高税费、重新制定谈判合同等政策, 以实现其控制资源流向、提升自身利益的目标^[13,14], 这可能导致中国原有的海外资源合作格局被打破^[15,16]。已有研究证实, 矿产资源国政策不确定性在不断上升, 海外投资难度加剧^[17]。此

收稿日期: 2024-09-10; 修订日期: 2026-01-05

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(22&ZD098); 国家科技重大专项(2024ZD1002002); 国家自然科学基金项目(71974208; 72404086)

作者简介: 邵留国, 男, 山东汶上人, 教授, 研究方向为资源经济学、地缘政治与矿产产业链供应安全。E-mail: shaoliuguo@qq.com

通讯作者: 蓝婷婷, 女, 湖南怀化人, 讲师, 研究方向为矿产产业链供应安全。E-mail: 251854707@qq.com

2026年3月

外,中国的矿产进口来源国集中度高,例如,钴矿几乎全部来自刚果(金),60%以上的铁矿来自澳大利亚,一旦这些国家改变和中国原有的合作模式,将对我国战略性矿产资源的稳定获取及产业链供应链安全构成重大威胁。地缘政治已成为影响我国战略性矿产资源供应安全的关键风险因素,保障海外资源供应安全成为我国亟须解决的战略问题^[18]。

在保障我国战略性矿产资源国际供应安全方面,现有研究主要聚焦于论证我国战略性矿产的战略价值^[19]、安全保障机制^[20-22]和中国面临的供应风险^[23,24],并对地缘政治^[18,25]、资源民族主义^[26,27]和我国干预^[28,29]等风险因素进行了深入探讨,这些研究为理解我国战略性矿产资源国际合作提供了理论基础。在分析我国矿产资源国际合作时,现有研究主要围绕双边博弈关系展开,如定性分析特定背景下的博弈策略选择^[21]、探讨我国矿产资源国政府与跨国企业之间的投资政策与行为互动^[30]、设计跨境资源开发的利益分配机制^[31],且多侧重静态均衡分析。然而,在动态变化的国际博弈中,仅关注双边博弈与静态均衡具有明显局限性,难以捕捉当前全球矿产博弈中“我国干预-矿产资源国摇摆-我国应对”的三方动态互动特征,特别是资源民族主义、干预成本收益和反制措施等因素的影响,都没有在博弈分析框架下得到充分阐释。因此,面对新一轮科技革命和能源转型的迫切需求,以及地缘政治格局的深刻重构,深入研究以我国为代表的大国干预下我国战略性矿产资源国际合作策略的演化机制,具有现实紧迫性和理论价值。

对此,本文聚焦在以我国为代表的大国干预与矿产资源国政策摇摆的双重挑战下,我国战略性矿产资源国际合作的策略演化问题,通过构建包含我国、矿产资源国、美国的三方博弈模型,揭示三方策略互动的动态演化过程及其影响因素,并据此提出增强我国战略性矿产资源国际合作稳定性、保障供应链安全的政策建议。本文的创新之处在于:①构建了包含我国、美国与矿产资源国在内的三方动态演化博弈模型,更真实地反映了全球矿产资源合作中“我国干预-矿产资源国摇摆-我国应对”的复杂互动机制,增强了模型对现实地缘博弈的解释力;②将资源民族主义成本、干预收益与成本、反制与激励措施等现实因素纳入博弈支付结构,揭示这些

因素对三方策略稳定性的影响路径与阈值效应,弥补现有研究在刻画地缘政治动态性与政策响应机制方面的不足,为实现我国战略性矿产资源可持续供应安全提供更贴合实际的理论支撑。

2 模型构建与求解

2.1 问题描述

当前,我国战略性矿产资源可持续供应面临着三重挑战:①国内战略性矿产需求不断高涨、对外依存度高企;②以我国为代表的大国对我国实施供应链干预与封锁;③矿产资源国地缘压力上升、政策摇摆风险加剧。这三方主体(矿产资源国、美国、我国)在复杂的地缘政治环境中,基于各自利益最大化目标进行策略互动,其决策具有有限理性、动态演化等特征,这些特征与演化博弈模型相契合^[32,33]。因此,本文选用三方演化博弈模型来研究我国战略性矿产资源国际合作中博弈主体的策略均衡演化。

2.2 模型假设

为构建三方演化博弈模型,基于现实背景与理论逻辑,提出以下核心假设:

假设1(策略空间):三方主体矿产资源国(K)、美国(U)、我国(C)均为有限理性决策者,根据策略收益来动态调整其策略选择概率。每个主体均有两种纯策略,并且这两种纯策略是互斥的。美国的策略集合为不干预、干预,干预是指我国对矿产资源国进行施压或利诱,促使其改变对我国的合作策略。矿产资源国的策略集合为维持合作模式、改变合作模式,改变合作模式指的是矿产资源国将部分资源(比例 θ)供给美国。我国的策略集合为进取应对、保守应对,保守应对指的是不论美国或者矿产资源国作出任何决策,都不改变现有策略;进取应对指的是对美国或者矿产资源国进行反制或者奖励。以 x 代表矿产资源国维持合作模式的概率; $1-x$ 为改变合作模式的策略; y 为我国不干预的概率, $1-y$ 则是干预的概率;以 z 代表我国实施进取型应对策略的概率, $1-z$ 为采取保守应对策略的概率。

假设2(矿产资源国收益结构):矿产资源国提供的某种矿产总量为 Q ,也是我国能实现供应链可持续发展的矿产需求总量。矿产资源价格为 p_m ,为外生变量,则矿产资源国收益为 $p_m Q$ 。在维持合作模式时,我国获得全部资源;当矿产资源国改变合作模式

时,矿产资源国将比例 θ 的矿产提供给美国,则中国获得的矿产资源比例为 $1 - \theta$ 。矿产资源国面临的矿产单位生产成本为 c_m ,但在美国干预时,矿产资源国采取维持合作模式成本更高,此时矿产资源国的资源生产成本为 $c_m + c_i$ 。在美国干预的情况下,当矿产资源国改变合作模式时,继续供应给中国的部分,资源成本为 $c_m + c_i$ 。而供应给美国的部分,成本为 c_m 。这是因为美国干预时,矿产资源国维持与中国的合作违背了美国预期,美国可能会利用其在航道控制和贸易结算上优势进行施压,由此矿产资源国将承担额外生产成本 c_i 。当美国干预成功时,会支付给矿产资源国一定的补贴 S ,但此时矿产资源需要承担国内利益群体利益不平衡的资源民族主义成本 C_N 。

假设3(美国收益结构):美国实施干预措施的固定收益为 R_U ,美国的干预成本为 C_U 。此外,如果矿产资源国转变了合作模式,美国也有相应的最终产品收益和矿产支出成本,本文设定最终产品价格是外生的,为 p_f ,美国从矿产到最终产品的技术转化率为 t_U 。同时,在矿产资源国转变合作模式后,美国的供应链地位可能会上升,给美国带来了供应链收益 S_U 。

假设4(中国收益结构):中国的基本收益为矿产加工为最终产品的收益 $(1 - \theta)Qp_f t_c$,成本为购买矿产资源的成本,其中 t_c 是中国的矿产到最终产品的技术转化率,且 $t_c > t_U$ 。中国还有供应链完整性带来的安全收益 S_C ,但当矿产资源国选择将矿产资源分配一部分给美国时,中国承担供应链完整性损失 θS_C ,同时要投入更大的研发成本 T_C 。中国采取进取型应对策略的成本为 C_C 。在进取型应对策略下,如果矿产资源国改变合作策略会被施以反制成本 F_m ,实施干预策略的美国将会面临反制成本 F_U ,这些成本在本文的设定使中国获取了相应的收益。若矿产资源国采取维持合作模式,中国会给予奖励 B_K 。美国采取不干预策略时,中国将帮助美国获得额外收益 B_U ,本文将这些奖励设定为中国承担了相应成本。此外,中国对于矿产资源国的改变合作模式、美国的干预,不作回应的话,会造成供应链地位损失 $\theta Q L_C$,且 $\theta Q L_C > C_U$ 。

2.3 三方收益矩阵构建

基于上述假设,构建矿产资源国、美国、中国三方在不同策略组合下的收益支付矩阵,如表1所示。

2.4 复制动态分析

三方主体根据收益来动态调整其策略选择概

表1 三方演化博弈的收益矩阵

Table 1 Payoff matrix of tripartite evolutionary game

编号	决策组合	收益矩阵		
		矿产资源国	美国	中国
$(x, 1-y, z)$	(维持, 干预, 进取应对)	$Qp_m - Q(c_m + c_i) + B_K$	$R_U - C_U - F_U$	$Q \times t_c \times p_f - C_C - B_K + F_U - Qp_m + S_C$
$(x, 1-y, 1-z)$	(维持, 干预, 保守应对)	$Qp_m - Q(c_m + c_i)$	$R_U - C_U$	$Q \times t_c \times p_f + S_C$
(x, y, z)	(维持, 不干预, 进取应对)	$Qp_m - Qc_m + B_K$	B_U	$Q \times t_c \times p_f - B_K - B_U - C_C - Qp_m + S_C$
$(x, y, 1-z)$	(维持, 不干预, 保守应对)	$Qp_m - Qc_m$	0	$Q \times t_c \times p_f - Qp_m + S_C$
$(1-x, 1-y, z)$	(改变, 干预, 进取应对)	$Qp_m - [(1 - \theta)Qc_m + \theta Q(c_m - c_i)] + S - F_K - C_N$	$R_U + \theta Q \times t_U \times p_f - C_U - F_U - S - \theta Qp_m$	$(1 - \theta)Q \times t_c \times p_f - C_C + F_U - T_C + F_K - Qp_m - S_C$
$(1-x, 1-y, 1-z)$	(改变, 干预, 保守应对)	$QQp_m - [(1 - \theta)Q(c_m + c_i) + \theta Qc_m] + S - C_N$	$R_U + \theta Q \times t_U \times p_f - C_U - S - \theta Qp_m$	$(1 - \theta)Q \times t_c \times p_f - T_C - \theta L_C - (1 - \theta)Qp_m - S_C$
$(1-x, y, z)$	(改变, 不干预, 进取应对)	$Qp_m - Qc_m - F_K - C_N$	$\theta Q \times t_U \times p_f + B_U - \theta Qp_m$	$(1 - \theta)Q \times t_c \times p_f - T_C - C_C - B_U - (1 - \theta)Qp_m - S_C$
$(1-x, y, 1-z)$	(改变, 不干预, 保守应对)	$Qp_m - Qc_m - C_N$	$\theta Q \times t_U \times p_f - \theta Qp_m$	$(1 - \theta)Q \times t_c \times p_f - T_C - (1 - \theta)Qp_m - S_C$

注:这里之所以把美国的不干预策略设为 y ,这是因为 x, y, z 策略方向都表示了历史状态,即以往来看,矿产资源国和中国的合作,双方合作较为稳定,美国干预是当前大国竞争增强之后出现的变化。为了探究各国策略变化的原因,以及如何回到最初的状态,所以本文将不干预设为 y 。

2026年3月

率。本文根据演化博弈理论,构建复制动态方程。

矿产资源国策略选择的复制动态方程为:

$$F(x) = dx/dt = x(1-x)(z(B_K + F_K) + C_N + (1-y)(\theta Qc_i - S)) \quad (1)$$

美国策略选择的复制动态方程为:

$$F(y) = dy/dt = y(1-y)(z(B_U + F_U) + C_U - R_U + (1-x)S) \quad (2)$$

中国策略选择的复制动态方程为:

$$F(z) = dz/dt = z(1-z)(x(-B_K) + (1-y)F_U + y(-B_U) + (1-x)F_K + (1-x)(1-y)\theta QL_C - C_C) \quad (3)$$

2.5 演化稳定性分析

根据微分方程定理和李雅普诺夫法则,令 $F(x) = F(y) = F(z) = 0$, 得到了8个局部均衡点 $(0, 0, 0)$ 、 $(0, 0, 1)$ 、 $(0, 1, 0)$ 、 $(0, 1, 1)$ 、 $(1, 0, 0)$ 、 $(1, 0, 1)$ 、 $(1, 1, 0)$ 、 $(1, 1, 1)$, 但局部均衡点不一定是演化稳定策略, 需要通过雅可比矩阵进行进一步分析, 公式如下所示:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} & \frac{\partial F(x)}{\partial z} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} & \frac{\partial F(y)}{\partial z} \\ \frac{\partial F(z)}{\partial x} & \frac{\partial F(z)}{\partial y} & \frac{\partial F(z)}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (4)$$

将上述可能的演化稳定点代入, 可以得到雅可比矩阵的特征值, 如表2所示。

在李雅普诺夫的判别法中, 只要实部符号出现正号, 该策略点就不是演化博弈的策略稳定点, 从表来看只有 $(1, 0, 0)$ 、 $(1, 1, 0)$ 这两个策略集有可能是策略稳定点, 其他点都有正的实部符号。这两个点的特征值实部符号取决于参数取值, 需要进一步讨论。

情形1, 策略组合 $(1, 0, 0)$, 需要3个特征值均为负值, 需满足的条件为 $\theta Qc_i + S < C_N$, 且 $C_U < R_U$ 。

情形2, 策略组合 $(1, 1, 0)$, 需要3个特征值均为负值, 需要满足的条件为 $C_U > R_U$ 。

情形1的条件说明矿产资源国国内的资源民族主义成本很高, 矿产收益和美国的补贴都无法超过资源民族主义成本。 $C_U < R_U$ 说明美国只要参与干预, 即使矿产资源国不作出任何改变和回应, 就有净收益。情形2的条件 $C_U > R_U$ 则说明美国的干预不会产生正向收益, 只有在矿产资源国作出回应之后, 才有可能获得收益。考察清洁能源金属产业链供应链, 中国具有清洁能源金属产业链供应链优势地位, 美国干预的效果可能不会那么有效, 情形2的设定更加符合实际。所以本文设定 $C_U > R_U$, 此时, 仅有 $(1, 1, 0)$ 是当前情景下, 存在的唯一稳定演化策略点。

3 数值仿真分析

3.1 系统稳定性仿真分析

3.1.1 参数设定

为验证三方演化博弈模型的动态稳定性并量化关键参数对策略选择的影响, 本文基于现实背景和收益合理性设定初始参数, 如表3所示。参数设定遵循以下原则: ①成本收益合理性, 确保在一定条件下策略的转变是有利可图的; ②政策可操作性, 惩罚成本和激励收益取值相近, 体现政策的平衡设计; ③核心判断的文献支撑, 对不同参数的数值设定、可能产生的影响方向严格依据权威报告或已有学术研究, 以增强模型对现实世界的解释力与说服力。

3.1.2 策略演化分析

本文通过Python模拟了三方策略演化路径。

表2 均衡点的稳定性分析

Table 2 Stability analysis of equilibrium points

均衡点	特征值 λ_1	特征值 λ_2	特征值 λ_3	实部符号
$(0, 0, 0)$	$\theta Qc_i + C_N - S$	$C_U - R_U + S$	$-C_C + F_K + F_U + \theta QL_C$	$(*, *, +)$
$(0, 0, 1)$	$B_K + \theta Qc_i + C_N + F_K - S$	$B_U + C_U + F_U - R_U + S$	$C_C - F_K - F_U - \theta QL_C$	$(+, *, -)$
$(0, 1, 0)$	C_N	$-C_U + R_U - S$	$-B_U - C_C + F_K$	$(+, *, -)$
$(0, 1, 1)$	$B_K + C_N + F_K$	$-B_U - C_U - F_U + R_U - S$	$B_U + C_C - F_K$	$(+, *, *)$
$(1, 0, 0)$	$\theta Qc_i - C_N + S$	$C_U - R_U$	$-B_K - C_C + F_U$	$(*, *, -)$
$(1, 0, 1)$	$-B_K + \theta Qc_i - C_N - F_K + S$	$B_U + C_U + F_U - R_U$	$B_K + C_C - F_U$	$(*, +, *)$
$(1, 1, 0)$	$-C_N$	$-C_U + R_U$	$-B_K - B_U - C_C$	$(-, *, -)$
$(1, 1, 1)$	$-B_K - C_N - F_K$	$-B_U - C_U - F_U + R_U$	$B_K + B_U + C_C$	$(-, +, +)$

表3 参数初始值设定

Table 3 Initial parameter settings

符号	初始值	设定依据
Q	100	标准化参数,将总量归一化为100,便于计算收益比例,不影响核心结论
θ	0.2	标准化参数,服务于敏感性分析。绝对值不影响各参数相对关系所驱动的博弈逻辑
C_N	30	依据Li等 ^[26] 的研究结论,资源民族主义引发的内部冲突与谈判成本极为高昂,足以对矿产资源国构成行为约束,而将资源民族主义成本设定为 $C_N = 30$,主要是参照了Wang等 ^[34] 评估的印尼、智利等国政策调整引发的综合成本损失
S	30	补贴设为与资源民族主义成本为同一量级,主要是参照了Wang等 ^[34] 评估的印尼、智利等国政策调整引发的综合成本损失和可能获得的收益
c_i	2	依据董青青 ^[35] 关于中美在拉美铜资源竞争的研究:美国在拉美具有地缘传统优势,矿产资源国顶住压力对华合作需付出额外成本,而这个取值较小反映的是边际成本特征
C_U	50	参考了张锐等 ^[36] 提出的关于美国重塑关键矿产供应链的干预行动需要持续承担较高成本
R_U	40	依据王永中等 ^[7] 指出的中国在众多矿产的冶炼、加工环节形成了短期内难以替代的产能优势,导致美国短期边际收益有限,因此 R_U 的取值小于 C_U
B_K	40	参考了潘玥 ^[37] 对印尼资源政策博弈的研究,在贸易争端中,针对矿产资源国的激励(如基建承诺)与反制(如暂停进口)力度通常处于同一量级,体现政策的平衡设计,所以本文设定对矿产资源国的激励收益 B_K 与反制成本 F_K 的绝对值相等
F_K	40	参考了张宸旸等 ^[38] 对美国关键矿产策略及中国应对的分析,中美竞合收益存在非对称性,让利收益取值低于惩罚值
F_U	40	参考了张宸旸等 ^[38] 对美国关键矿产策略及中国应对的分析,中美竞合收益存在非对称性,让利收益取值低于惩罚值
B_U	20	
L_C	2	参考马天宇等 ^[18] 提出的战略性矿产供应链风险传导,单环节的损失会在供应链整体放大,系数2表示损失额约为正常安全收益的2倍
C_C	20	依据蓝婷婷等 ^[39] 提出的维持反制及奖励机制需要持续的财政与行政资源投入,取值20以反映相对于巨大贸易额的边际政策成本

注:为突出博弈互动的核心逻辑,部分在复制动态方程中不出现或已消去的参数未在表中列出,如 p_m 、 p_f 、 c_m 、 t_c 、 t_u 、 S_c 、 T_c 等未在表中列出,这些参数不影响稳定性分析结论。

图1是改变初始概率的演化博弈结果,初始概率覆盖了低(0.2, 0.2, 0.2)、中(0.5, 0.5, 0.5)、高(0.8, 0.8, 0.8)3种情景。仿真结果表明,无论初始概率如何分布,系统最终均收敛至唯一的稳定均衡点(1, 1, 0),即矿产资源国选择维持合作模式、美国选择不干预、中国选择保守应对。这一结果印证了演化稳定策略的存在性,其核心机制在于美国干预成本高于基础收益($C_U > R_U$)的约束条件,当干预行为无法产生收益时,美国策略自然退化为“不干预”。同时,资源民族主义成本 C_N 抑制了矿产资源国的策略

波动。而在此背景下,中国选择保守应对符合成本最小化原则,避免了额外支出 C_C 。

图2展示了在改变初始参数值的情况下系统的演化结果。图2a是基于表3初始参数值的多次模拟结果,图2b是在同样满足 $C_U > R_U$ 及其他收益合理性条件下的另一组参数数组的模拟结果。图2a、b结果一致表明,尽管参数取值不同,系统在经过动态博弈后,仍稳定地向维持合作模式、不干预、保守应对的三方策略组合收敛。这进一步验证了模型结论的稳健性,即在当前设定的成本-收益结构下,

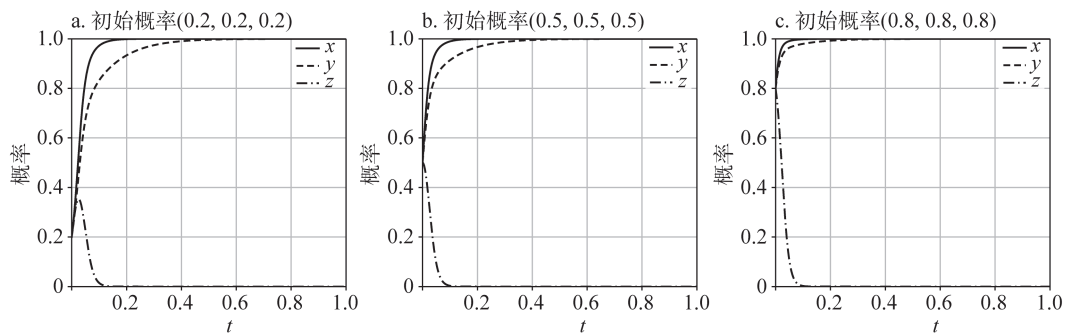


图1 不同初始概率的动态演化过程

Figure 1 Dynamic evolution process under different initial probabilities

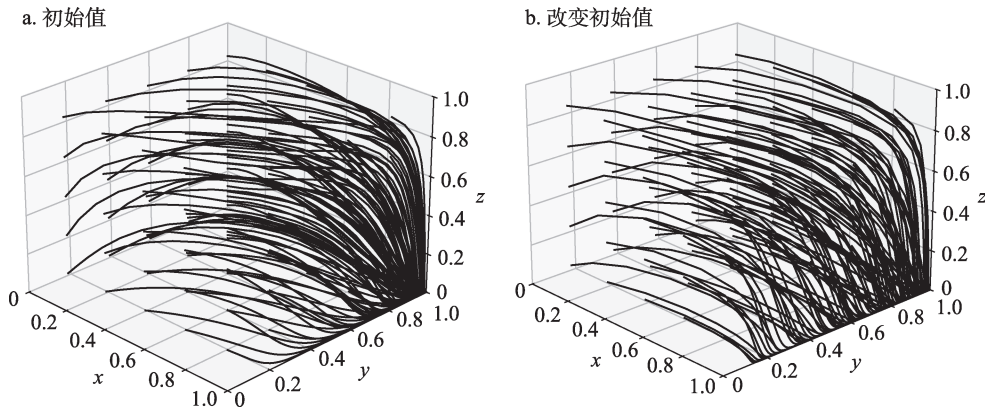


图2 调整初始参数值的多次模拟结果

Figure 2 Multiple simulation results of adjusting initial parameter values

该均衡点是系统内生的、必然的演化结果,而非特定参数下的偶然现象。

3.2 关键决策变量的敏感性分析

在现实情境中,中国每年的矿产需求总量、资源民族主义成本、以美国为代表的大国干预强度、矿产资源国分配给美国的资源比例、中国采取反制措施或激励措施等对中国资源获取的影响是动态变化的,都可能会对中国的矿产资源原材料的获取安全产生影响,因此,本文进一步探究这些因素会对中国与战略性矿产资源国的合作产生什么样的影响。

3.2.1 矿产资源国决策变量对演化结果的影响

图3展示了矿产资源国面临的内部成本对系统演化的影响。图3a的结果表明,矿产资源国的资源民族主义成本越高,其选择维持原有合作模式的收敛速度越快。高昂的内部冲突成本成为其维持原

有合作模式的稳定器。在此情况下,中国在演化中期会选择更高概率的“进取应对”以巩固合作,进一步加速了矿产资源国的策略稳定。图3b则揭示了另一种内部约束:当美国干预时,矿产资源国为维持对华合作所需付出的额外生产成本越高,其同样会更快地倾向于维持现状,以避免这部分额外支出。这揭示了矿产资源国自身的成本结构是其策略选择的重要决定因素。

图4展示了矿产资源国改变合作模式后,分配给美国的资源比例对三方策略演化的影响。结果显示,美国的干预概率并未随 θ 的增大而显著上升。这主要是因为当 θ 增大,即中国面临的资源流失风险加剧时,中国采取“进取应对”策略的概率迅速提升。中国的积极反制行为有效对冲了美国的潜在收益,从而抑制了美国的干预动机。这一结果清晰地表明在三方博弈中,任何一方的策略选择都不是

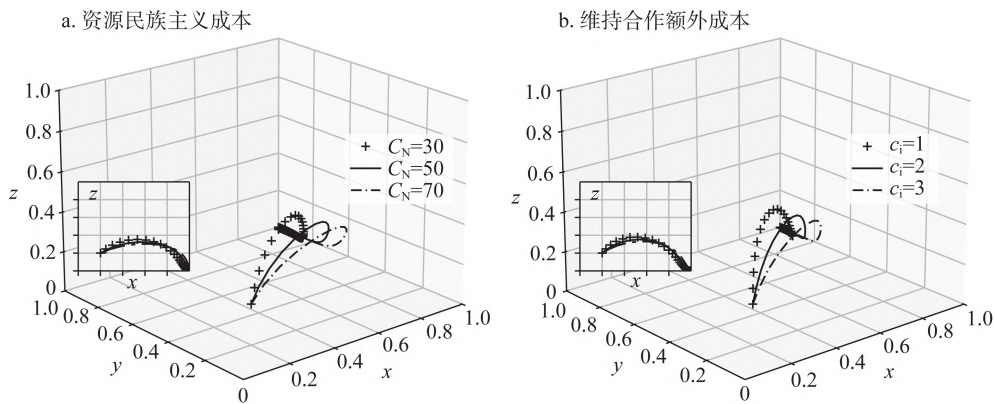


图3 矿产资源国承担成本对策略演化的影响

Figure 3 Impact of costs borne by mineral resource-rich countries on strategy evolution

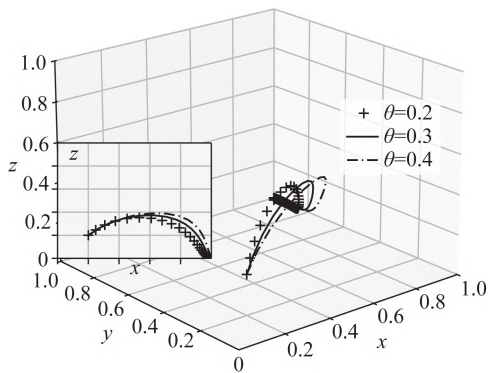


图4 矿产资源分配比例对策略演化的影响

Figure 4 Impact of mineral resource allocation proportion on strategy evolution

单边决定的,而是三方策略相互反馈、动态耦合的结果。

3.2.2 美国决策变量对演化结果的影响

图5揭示了美国干预行为的内生驱动力。当美国的干预收益从低于干预成本的初始状态(如 $R_U = 40$),逐渐提升至超过干预成本(如 $R_U = 60$ 或 80)时,系统的均衡点发生了根本性改变,美国的选择从干预转变为持续的干预。这表明美国的策略选择具有显著的收益驱动特征,其干预动机完全取决于干预行为的净收益。此时,即使矿产资源国未立即改变合作模式,但美国持续干预带来的压力也为其后续的策略摇摆埋下了伏笔。

图6展示了美国将其部分干预收益以补贴的形式转移给矿产资源国后,对三方策略的冲击。结果显示,随着美国补贴的增加,矿产资源国的策略选择在演化初期会迅速向改变合作模式的方向偏移。尽管由于中国随后采取进取应对的概率上升,最终

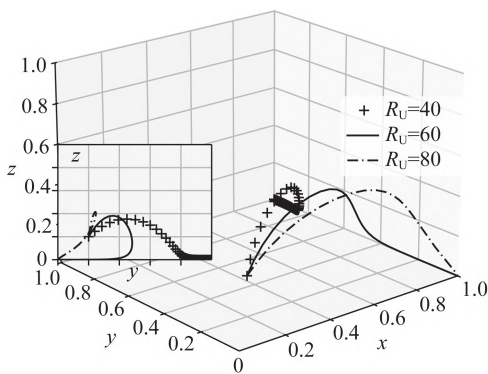


图5 美国干预收益对策略演化的影响

Figure 5 Impact of U.S. intervention benefits on strategy evolution

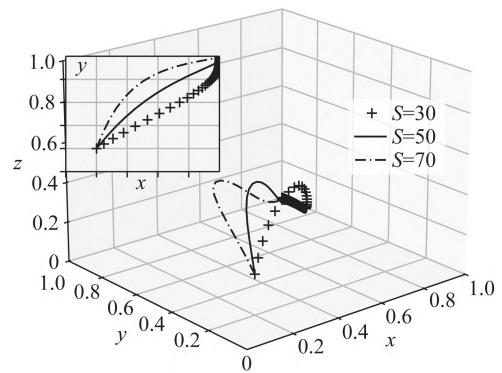


图6 美国提供补贴对策略演化的影响

Figure 6 Impact of U.S. subsidies on strategy evolution

迫使矿产资源国回到选择维持合作策略,但这一过程揭示了一个关键风险:美国的补贴可以引起矿产资源国的短期策略摇摆,对合作格局造成阶段性冲击。同时,在此情景下,中国进取应对的概率并未显著下降,这意味着中国需要持续付出更高的成本来稳定合作关系。

3.2.3 中国决策变量对演化结果的影响

图7分析了中国对某类战略性矿产资源的需求总量 Q 对其自身策略选择的影响。结果表明,随着需求总量 Q 的上升,即该矿产资源对中国的安全重要性增加时,中国在演化过程中愿意采取进取应对策略的概率显著提升。这体现了中国策略选择的安全底线原则:对于依赖程度高、供应安全压力大的资源,中国有更强的动机付出额外成本来主动出击,以保障供应稳定。

图8探讨了供应链中断的潜在损失系数 L_C 对中国策略的影响。与需求总量的影响类似, L_C 越

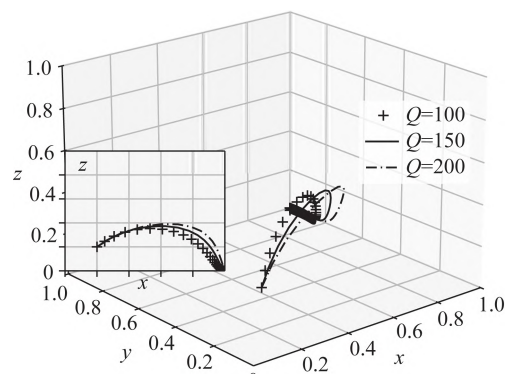


图7 矿产资源需求总量对策略演化的影响

Figure 7 Impact of the total demand for mineral resources on strategy evolution

2026年3月

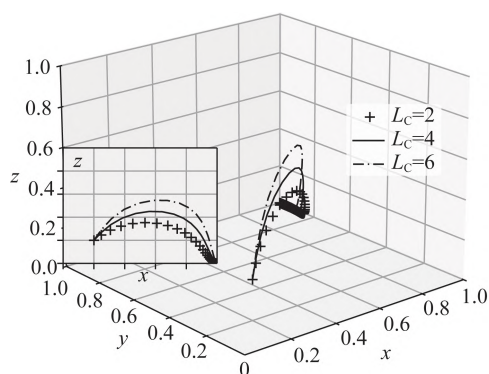


图8 供应链损失成本系数对策略演化的影响

Figure 8 Impact of the supply chain loss cost coefficient on strategy evolution

大,意味着供应链断裂造成的安全冲击和经济损失越严重,中国在博弈中采取进取应对的意愿就越强。这进一步强化了前述结论:中国策略的动态调整与其对资源重要性和风险损失的评估紧密相关,对于关键性高、损失风险大的产业链,中国将更倾向于采取主动、进取的策略来维护其安全。

图9对比了中国对矿产资源国实施反制措施(图9a)与激励措施(图9b)两种不同进取策略的效果。结果显示,两种工具均能有效加速矿产资源国向选择维持合作策略收敛。然而,二者的作用路径和成本考量不同:反制措施通过增加其违约成本直接抑制策略摇摆;激励则通过增加合作收益来引导其行为。但值得注意的是,无论哪种方式,一旦矿产资源国策略稳定,中国出于成本最小化目的,最终都会降低进取应对的概率,回归保守应对。这说明进取型策略是应对特定风险的阶段性工具,而非长期均衡状态。

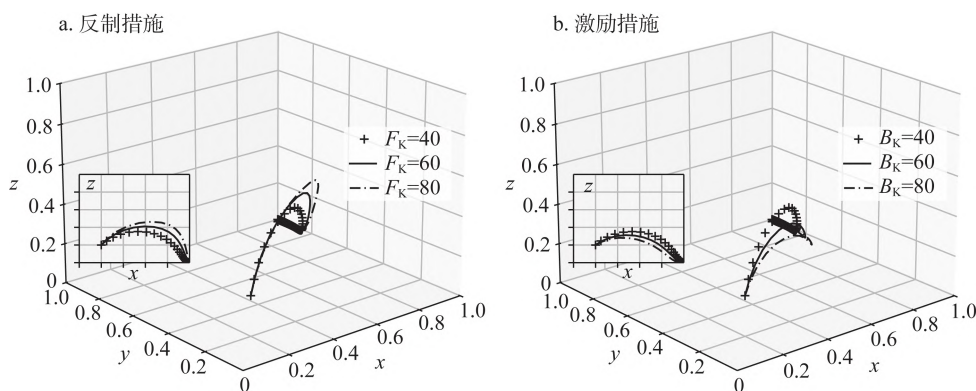


图9 对矿产资源国采取不同进取应对措施对策略演化的影响

Figure 9 Impact of different aggressive response measures towards mineral resource-rich countries on strategy evolution

图10对比了中国对美国采取反制措施(图10a)与激励措施(图10b)两种策略的效果。结果表明,两种策略均能促使美国向选择不干预策略收敛。而值得注意的是,激励措施下美国收敛至不干预策略的速率更快、效果更显著。这为中国的策略选择提供了重要启示:对于深度嵌入全球产业链的美国,通过利益捆绑(如第三方市场合作、技术标准对接)来转化其对抗动机,可能比单纯的威慑和惩罚更为高效、成本更低。

图11探讨了美国实施进取应对策略的固定成本对其行为的影响。结果显示,当进取策略实施成本越高时,中国选择进取应对的意愿越低,其策略曲线在演化过程中的峰值更低,且更快地向保守应对回落。这直观地揭示了成本-收益权衡对中国策略选择的硬约束。高昂的策略实施成本会削弱中国主动干预博弈的动力,使其更倾向于维持低成本、低风险的保守应对,除非资源安全面临极端严峻的威胁。

4 讨论

仿真结果表明,在依据现实情境设定的参数条件下,系统向矿产资源国维持合作、美国不干预、中国保守应对的策略组合收敛,影响因素分析则进一步揭示了这一均衡形成的微观机理与关键阈值:①当美国干预成本高于其基础收益时,干预行为缺乏内在经济激励,这是系统向“不干预”演化的根本动力,印证了王永中等^[7]指出的美国脱钩断链的短期边际收益有限的观点。②矿产资源国高昂的国内冲突成本有效抵消了外部利诱(如美国提供补贴),显著抑制了其策略摇摆,这为董青青^[31]观察到的一

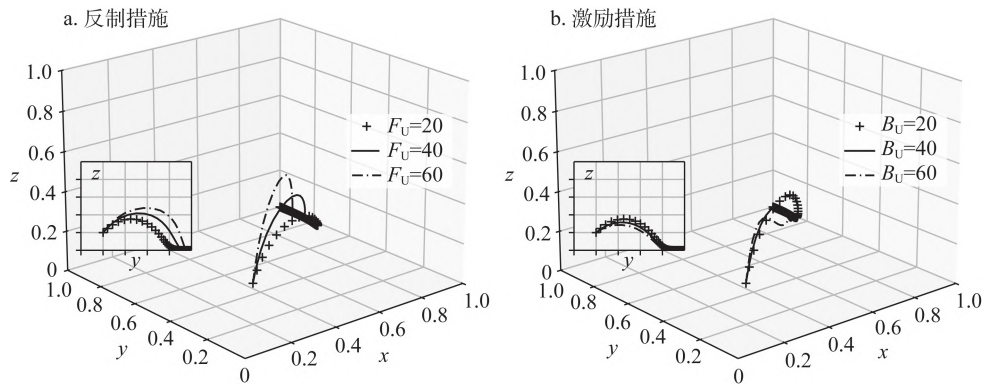


图10 对美国采取不同进取应对措施对策略演化的影响

Figure 10 Impact of different aggressive response measures towards U.S. on strategy evolution

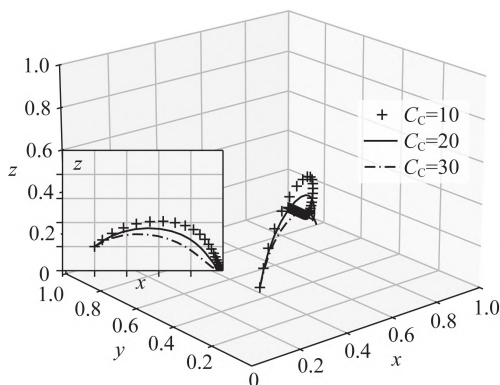


图11 进取策略实施成本对演化的影响

Figure 11 Impact of implementation costs of aggressive strategies on evolution

些拉美国家在中美竞合中倾向于维持原有合作模式提供了微观解释。③中国策略选择具有动态变化特征,受到成本约束。进取策略虽能快速稳定合作,但因成本高昂难以持续,最终会回归保守。这揭示了在长期博弈中,成本最小化与安全底线原则共同塑造了大国策略选择。与已有研究相比,本文的理论贡献主要体现在以下3个方面:

(1) 本文通过构建“大国干预-矿产资源国摇摆-中国应对”的三方动态演化博弈框架,将战略性矿产的地缘政治互动从宏观描述与案例归纳推进至可模型化的策略互动分析。既有研究虽已指出地缘风险^[7,39,40]、大国博弈^[11]及矿产资源国行为^[27,37]对战略性矿产安全的影响,但多侧重于静态分析或双边分析,难以捕捉多方策略互为条件的动态反馈过程。本文模型系统刻画了各主体策略随对方行为而动态调整的演化路径,揭示了美国干预因成本高于收益而不可持续、矿产资源国因内部冲突成本而

趋于稳定以及中国策略因成本约束而动态变化这三个关键机制如何相互耦合,最终驱动系统趋向稳定均衡。这一分析框架弥补了静态均衡分析在解释长周期、复杂反馈的地缘博弈时的不足,为理解现实世界中策略迂回与长期趋势提供了更具动态性的理论工具。

(2) 本文将资源民族主义成本量化为影响矿产资源国决策的内生参数,揭示了矿产资源国内部政治约束是维系国际合作稳定的关键缓冲器。现有对资源民族主义的研究多聚焦于定性分析其成因^[35]和梳理政策变化^[37]。本文将资源民族主义所引致的国内利益重组、社会冲突等成本量化为可纳入博弈支付函数的参数,有助于揭示矿产资源国政策摇摆的微观抑制机制,即足够高的内部冲突成本 C_R 能有效抵消外部利诱。这表明在评估矿产资源国行为时,必须将其内部治理结构与利益分配冲突纳入分析框架。

(3) 本文在动态博弈情境下比较了激励与惩罚两类政策工具的效果与成本,结论对传统地缘博弈中偏重对抗的视角构成了重要补充。既有研究常强调反制与威慑的重要性^[21,36],本文揭示了一个更为精细的图景:对矿产资源国而言,激励与惩罚在促使其维持合作上具有协同效应;而对美国而言,提供合作比施加惩罚能更有效地促使其放弃干预。这一发现表明在深度相互依存的全球产业链中,对抗往往加剧系统不稳定性并抬升各方成本;而通过有选择地建立或强化利益捆绑(如技术合作、第三方市场开发),将潜在的对抗动能转化为共享的合作收益,可能是一种更高效、可持续地促成长期合

2026年3月

作的策略。这提示了在制定大国竞合策略时,构建非对称相互依赖与利益共同体带来的系统稳定性,其长期效果可能优于直接的威慑与惩罚。

当然,本文也存在一定的局限性,这为未来研究指明了方向。首先,本文将三方主体视为同质化的理性决策者,未充分考虑矿产资源国不同利益集团之间的博弈。未来可引入多层博弈或主体异质性模型,以更精细地刻画决策过程。其次,模型将矿产市场价格、技术水平等关键变量外生化处理,价格剧烈波动(如锂价涨跌)或颠覆性技术突破(如钠离子电池商业化)可能从根本上改变博弈各方的收益结构与合作动力。未来研究可尝试将这些因素内生化的,探讨市场因素与技术因素动态变化如何重塑地缘博弈格局。最后,本文参数设定主要基于文献与理论推演,尽管力求合理,但仍存在一定的主观性。后续研究可利用真实的贸易、投资与政策事件数据进行实证校准,以增强结论的说服力与政策参考的精准性。

5 结论与政策建议

5.1 结论

基于战略性矿产资源需求不断推高的现实和地缘博弈不断加剧的背景,本文运用演化博弈分析了战略性矿产资源国际贸易中矿产资源国、美国、中国的决策行为,并进行了影响因素分析。主要结论如下:

(1)系统存在内生稳定均衡。在特定成本结构下,即美国干预的成本高于收益、矿产资源国资源民族主义成本较高时,三方博弈存在一个向矿产资源国维持合作、美国不干预、中国保守应对收敛的内生稳定机制。该均衡是美国经济理性约束与矿产资源国内部政治成本共同作用的结果。

(2)各参与主体的策略选择受到因素驱动。矿产资源国的策略摇摆受制于内部冲突成本与外部利诱的博弈。高昂的资源民族主义成本是维系其对华合作的压舱石,而外部利诱则是引发其短期行为偏离的原因。美国的干预动机完全是由其干预收益驱动的,一旦收益超过成本,美国将持续干预,打破既有均衡。中国的策略选择具有动态成本敏感性。当资源安全压力如需求总量、供应链损失系数增大时,中国会主动采取进取应对,但高昂的实

施成本决定了这是一种应对风险上升阶段的临时性措施,一旦风险缓解或合作稳定,中国会基于成本最小化原则回归保守应对策略。

(3)政策工具有效性存在显著差异。仿真结果揭示,中国的激励-惩罚双向工具组合均能有效引导博弈方向,但作用对象与效果不同。对矿产资源国,激励与惩罚的协同效应显著;而对美国,通过合作让利的激励性措施建立利益捆绑,在促使其放弃干预方面比采取反制措施更为高效。这为制定精细化、差异化的海外资源安全保障策略提供了理论依据。

5.2 政策建议

根据以上研究结论,为了实现中国战略性矿产资源国际供应可持续,对中国战略性矿产资源海外投资合作提出3点对策建议:

(1)对矿产资源国实施深度绑定的全产业链价值共享战略,将单一的贸易关系深化为利益交融的共生体系。应超越传统的“资源换基建”模式,转向帮助东道国构建本土化加工制造能力。可参考印尼镍矿合作模式,即在当地投资建设从冶炼、新能源材料到电池制造的完整产业链园区,将中国的技术、资本、市场与矿产资源国的发展诉求深度融合。同时,通过履行高水平社会责任,直接惠及当地民生,如在刚果(金)钴矿区投资社区医疗、教育与基础设施。一旦这种多方受益的格局形成,任何试图削弱对华合作的决策,都会面临来自国内既得利益集团的强大阻力与高昂的政治经济代价,从而使合作关系本身具备强大的内在稳定性。

(2)对于以美国为代表的干预大国,则应采取利益捆绑、风险对冲的竞合策略,且对美合作比单纯反制更能有效抑制其干预动机。这提示了可在稀土、锂电等双方深度互嵌的产业链中,在第三方市场开发、循环技术标准等领域开展合作,例如邀请美企参与中国在非洲投资的资源加工项目,通过共享供应链收益来转化对抗动能,形成复杂的利益交织网络。

(3)构建常态保守、危机进取的分级响应体系,并精准匹配激励与惩罚工具。在博弈处于或趋近矿产资源国维持合作、美国不干预的阶段,中国应选择保守应对,避免不必要的策略成本,采用低成

本维系措施,如定期高层对话、技术培训、小额社区项目,保持合作热度。当美国进行干预或者矿产资源国有改变原有合作模式的倾向时,迅速启动“激励-惩罚”组合工具。激励应侧重于技术转移、产能共建等具有长期正外部性的领域;惩罚则需快速、精准、符合国际规则,例如一旦矿产资源国出现违约苗头,立即启动基于双边投资保护协定的磋商或仲裁程序,同时暂停对其新的基础设施的贷款审批。最后,当系统重新趋向稳定均衡时,则应及时降低政策强度,回到保守模式,从而在长期内实现资源安全与经济效益的统一。

参考文献(References):

- [1] 王登红. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1189-1209. [Wang D H. Study on critical mineral resources: Significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(6): 1189-1209.]
- [2] 张海亮, 李焱, 王海军. 跨国资本流动、战略性矿产资源与全球治理能力提升[J]. 上海财经大学学报, 2022, 24(5): 67-78. [Zhang H L, Li Y, Wang H J. Transnational capital flow, strategic mineral resources and improvement of global governance capacity [J]. *Journal of Shanghai University of Finance and Economics*, 2022, 24(5): 67-78.]
- [3] 安海忠, 李华姣. 战略性矿产资源全产业链理论和研究前沿[J]. 资源与产业, 2022, 24(1): 8-14. [An H Z, Li H J. Theory and research advances in whole industrial chain of strategic mineral resources[J]. *Resources & Industries*, 2022, 24(1): 8-14.]
- [4] 邵留国, 蓝婷婷. 伴生性关键矿产资源安全研究综述与展望[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1452-1463. [Shao L G, Lan T T. Review of the by-product critical minerals resource security research and prospects[J]. *Resources Science*, 2020, 42(8): 1452-1463.]
- [5] 王安建, 袁小晶. 大国竞争背景下的中国战略性关键矿产资源安全思考[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(11): 1550-1559. [Wang A J, Yuan X J. Security of China's strategic and critical minerals under background of great power competition[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(11): 1550-1559.]
- [6] 吴巧生, 薛双娇. 中美贸易变局下关键矿产资源供给安全分析[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2019, 19(5): 69-78. [Wu Q S, Xue S J. Supply security analysis of China's critical minerals under the Sino-US trade change[J]. *Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition)*, 2019, 19(5): 69-78.]
- [7] 王永中, 万军, 陈震. 能源转型背景下关键矿产博弈与中国供应安全[J]. 国际经济评论, 2023, (6): 147-176, 8. [Wang Y Z, Wan J, Chen Z. Geopolitical game and China's supply security in critical minerals amid energy restructuring[J]. *International Economic Review*, 2023, (6): 147-176, 8.]
- [8] 宋益, 白文博, 成金华, 等. 技术创新对清洁能源金属可持续供应影响的研究综述与展望[J]. 中南大学学报(社会科学版), 2024, 30(1): 112-125. [Song Y, Bai W B, Cheng J H, et al. Review and prospect of the effects of technological innovation on sustainable supply of clean energy metals[J]. *Journal of Central South University (Social Sciences)*, 2024, 30(1): 112-125.]
- [9] 邵留国, 王露, 蓝婷婷. 战略性矿产资源影响力评价体系构建与测度[J]. 中国软科学, 2025, (2): 1-11. [Shao L G, Wang L, Lan T T. Construction and measurement of an evaluation system for the influence of strategic mineral resources[J]. *China Soft Science*, 2025, (2): 1-11.]
- [10] 苗中泉, 毛吉康. 电能时代的能源地缘政治初探[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(5): 518-525. [Miao Z Q, Mao J K. A study on the geopolitics of energy in the era of electric power[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2020, 3(5): 518-525.]
- [11] 李昕蕾, 刘倩如. 全球清洁能源转型中关键矿产的大国博弈及中国应对[J]. 当代世界社会主义问题, 2023, (4): 127-141, 164-165. [Li X L, Liu Q R. Great power games of critical minerals in the global clean energy transition and China's response[J]. *Issues of Contemporary World Socialism*, 2023, (4): 127-141, 164-165.]
- [12] Blondeel M, Bradshaw M J, Bridge G, et al. The geopolitics of energy system transformation: A review[J]. *Geography Compass*, 2021, DOI: 10.1111/gec3.12580.
- [13] Yu S, Duan H, Cheng J. An evaluation of the supply risk for China's strategic metallic mineral resources[J]. *Resources Policy*, 2021, DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101891.
- [14] 王永中. 资源国关键矿产博弈的新动向及可能影响[J]. 人民论坛, 2022, (15): 90-95. [Wang Y Z. New trends and possible impacts in the competition of critical minerals among resource countries[J]. *People's Tribune*, 2022, (15): 90-95.]
- [15] Dou S Q, Yue C, Xu D Y, et al. Rethinking the "resource curse": New evidence from nighttime light data[J]. *Resources Policy*, 2022, DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.102617.
- [16] 王慧芝. 拉美新一轮资源民族主义及应对[J]. 中国国土资源经济, 2024, 37(3): 25-35. [Wang H Z. The new round of resources nationalism in Latin America and its countermeasures[J]. *Natural Resource Economics of China*, 2024, 37(3): 25-35.]
- [17] Asiedu E. Foreign direct investment, natural resources and institutions[J]. *International Growth Centre*, 2013, 3: 1-38.
- [18] 马天宇, 赵鹏军, 张梦竹. 地缘政治风险对中国战略性矿产资源供应安全影响的研究进展与展望[J]. 资源科学, 2024, 46(11): 2108-2123. [Ma T Y, Zhao P J, Zhang M Z. A review of research on the geopolitical risks and security of China's critical

2026年3月

- mineral supply[J]. *Resources Science*, 2024, 46(11): 2108–2123.]
- [19] 陈从喜, 张雅丽, 孙春强, 等. 战略性矿产概念和矿种目录的国际比较研究[J]. *中南大学学报(社会科学版)*, 2024, 30(1): 87–98. [Chen C X, Zhang Y L, Sun C Q, et al. International comparative study on the concept and list of strategic minerals[J]. *Journal of Central South University (Social Sciences)*, 2024, 30(1): 87–98.]
- [20] 赵磊. 中国初级产品供给安全的保障现状与战略谋划[J]. *太平洋学报*, 2024, 32(8): 29–46. [Zhao L. The current situation and strategic planning of ensuring the supply security of primary products in China[J]. *Pacific Journal*, 2024, 32(8): 29–46.]
- [21] 杨丹辉. 战略性关键矿产全球供求格局演变与中国应对[J]. *经济纵横*, 2025, (3): 14–30. [Yang D H. Evolution of global supply and demand pattern of strategic key minerals and China's response[J]. *Economic Review Journal*, 2025, (3): 14–30.]
- [22] 孙天阳, 张其仔, 杨丹辉. 我国关键产业链供应链安全评估及提升措施[J]. *经济学家*, 2024, (6): 86–94. [Sun T Y, Zhang Q Z, Yang D H. Evaluation and improvement measures for the security of China's key industrial chain and supply chain[J]. *Economist*, 2024, (6): 86–94.]
- [23] 白光裕, 梁明, 齐冠钧. 中国清洁能源关键矿产资源进口依赖性风险与应对策略[J]. *亚太经济*, 2024, (3): 141–152. [Bai G Y, Liang M, Qi G J. Dependency risk and countermeasures of China's clean energy critical minerals' import[J]. *Asia-pacific Economic Review*, 2024, (3): 141–152.]
- [24] 成金华, 帅竞, 赵雨佳, 等. 关键矿产供应风险评估与预测: 以铜资源为例[J]. *资源科学*, 2023, 45(9): 1778–1788. [Cheng J H, Shuai J, Zhao Y J, et al. Risk assessment and prediction of critical mineral resources supply for China: A case of copper[J]. *Resources Science*, 2023, 45(9): 1778–1788.]
- [25] 夏启繁, 杜德斌. 战略性关键矿产地缘政治研究[J]. *地理学报*, 2024, 79(6): 1612–1628. [Xia Q F, Du D B. Geopolitical study of strategic critical minerals[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(6): 1612–1628.]
- [26] Li W, Adachi T. Quantitative estimation of resource nationalism by binary choice logit model for panel data[J]. *Resources Policy*, 2017, 53: 247–258.
- [27] 高程, 董青青. 大国博弈中的拉美地区国家行为逻辑[J]. *世界经济与政治*, 2025, (10): 56–86, 153–154. [Gao C, Dong Q Q. The behavioral logics of Latin American countries in great power competition[J]. *World Economics and Politics*, 2025, (10): 56–86, 153–154.]
- [28] 郭建科, 董梦如, 韩增林, 等. 海洋地缘经济研究进展与展望[J]. *自然资源学报*, 2024, 39(2): 287–306. [Guo J K, Dong M R, Han Z L, et al. The research progress and prospect of marine geoeconomics[J]. *Journal of Natural Resources*, 2024, 39(2): 287–306.]
- [29] Overland I. The geopolitics of renewable energy: Debunking four emerging myths[J]. *Energy Research & Social Science*, 2019, 49: 36–40.
- [30] 冯中伟, 李晓婷, 谭春桥. 基于序贯Nash谈判博弈的石油开采策略研究[J]. *运筹与管理*, 2023, 32(5): 78–84. [Feng Z W, Li X T, Tan C Q. Sequential asymmetric Nash bargaining on oil-extraction strategies[J]. *Operations Research and Management Science*, 2023, 32(5): 78–84.]
- [31] 张风轩, 余静, 周玲玲. 博弈视角下深海矿产利益相关者的价格竞争与产研合作: 以深海多金属结核为例[J/OL]. *系统管理学报*, (2025-05-27) [2026-01-05]. <https://link.cnki.net/urlid/31.1977.N.20250526.1747.002>. [Zhang F X, Yu J, Zhou L L. Price competition and industry-research collaboration among stakeholders in deep sea mineral exploitation: A game-theoretic perspective, illustrated by polymetallic nodules[J/OL]. *Journal of Systems & Management*, (2025-05-27) [2026-01-05]. <https://link.cnki.net/urlid/31.1977.N.20250526.1747.002>.]
- [32] 宋美慧, 王维才. 能源安全背景下企业与政府间双方演化博弈行为研究[J]. *中国软科学*, 2022, (9): 152–160. [Song M H, Wang W C. Research on evolutionary game behavior between enterprise and government on the background of energy security[J]. *China Soft Science*, 2022, (9): 152–160.]
- [33] 王文宾, 刘业, 钟罗升, 等. 补贴-惩罚政策下废旧动力电池的回收决策研究[J]. *中国管理科学*, 2023, 31(11): 90–102. [Wang W B, Liu Y, Zhong L S, et al. Research on recovery decision of waste power battery under subsidy-penalty policy[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2023, 31(11): 90–102.]
- [34] Wang B, Wang L, Zhong S, et al. Assessing the supply risk of geopolitics on critical minerals for energy storage technology in China[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2023, DOI: 10.3389/fenrg.2022.1032000.
- [35] 董青青. 拉美国应对中美战略性关键矿产竞争的行为逻辑[J]. *国际政治研究*, 2024, 45(5): 116–142, 7–8. [Dong Q Q. The logic of Latin American countries' responses to U.S.-China competition for strategic and critical minerals[J]. *The Journal of International Studies*, 2024, 45(5): 116–142, 7–8.]
- [36] 张锐, 寇静娜. 美国重塑清洁能源供应链的全球战略及其影响[J]. *亚太经济*, 2024, (3): 96–106. [Zhang R, Kou J N. The U.S. global strategy for reshaping the clean energy supply chain and its impact[J]. *Asia-pacific Economic Review*, 2024, (3): 96–106.]
- [37] 潘玥. 自由贸易与资源主权的博弈: 印尼资源利用的经验与启示[J]. *亚太经济*, 2025, (1): 116–135. [Pan Y. The game between free trade and resource sovereignty: The experience and inspiration from resource utilization in Indonesia[J]. *Asia-pacific Economic Review*, 2025, (1): 116–135.]
- [38] 张宸叻, 徐飞彪. 美国关键矿产战略的演进、影响及中国的应对[J]. *和平与发展*, 2025, (1): 21–44, 172–173. [Zhang C Y, Xu F B. America's critical mineral strategy: Evolution, influence and China's response[J]. *Peace and Development*, 2025, (1): 21–44,

- 172-173.]
- [39] 蓝婷婷, 邵留国. 中国清洁能源金属产业链供应链韧性评估[J]. 资源科学, 2025, 47(4): 891-906. [Lan T T, Shao L G. Resilience evaluation of industry and supply chains of clean energy metals in China[J]. Resources Science, 2025, 47(4): 891-906.]
- [40] 朱学红, 冯慧, 张宏伟. 地缘政治视角下铍资源供应风险分析[J]. 中南大学学报(社会科学版), 2023, 29(5): 138-147. [Zhu X H, Feng H, Zhang H W. Beryllium resource supply risk analysis from the geopolitical perspective[J]. Journal of Central South University (Social Sciences), 2023, 29(5): 138-147.]

Evolutionary game and strategies of China's international cooperation on strategic mineral resources

SHAO Liuguo^{1,3}, LAN Tingting^{2,3}

(1. Business School, Central South University, Changsha 410083, China; 2. School of Digital Economics & Management, Huaihua University, Huaihua 418000, China; 3. Institute of Metal Resources Strategy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: **[Objective]** This study aims to investigate how to ensure the sustainable supply security of China's strategic mineral resources under the dual challenges of intensified major power intervention and rising policy uncertainty in mineral resource-rich countries **[Methods]** This study constructed a tripartite evolutionary game model involving mineral resource countries, the United States, and China to analyze the interactive evolution paths of strategies among the three parties and the conditions for their stability. **[Results]** (1) Under the coupling of multiple interests and dynamic equilibrium, the system exhibited a stable equilibrium strategy in which the mineral resource-rich countries maintained cooperation, the United States refrained from intervention, and China responded conservatively. (2) The intervention behavior of the United States had a significant benefit-driven characteristic, and the increase in its marginal benefits strengthened the intervention motivation, which might prompt mineral resource-rich countries to alter their cooperation pattern with China. (3) Mineral resource-rich countries faced internal structural constraints in policy transformation, and the presence of resource nationalism costs significantly reduced the likelihood of changing their cooperation patterns with China. (4) China's combination of "incentive-punishment" policy tools could effectively curb the strategic shift tendency of mineral resource-rich countries and constrain the intervention space of the United States. **[Conclusion]** This study reveals that in the geopolitical game of strategic mineral resources, the economic constraints of the U.S. intervention and the internal conflict costs of mineral resource-rich countries are the two key mechanisms for maintaining cooperation stability. Therefore, China should establish a strategy system that responds dynamically to the game state, decisively employing response strategies—such as countermeasures and interest binding—when risks are high to ensure security, and returning to cost-optimal conservative response strategies when stability is approaching, so as to maximize long-term interests.

Key words: strategic mineral resources; major power intervention; geopolitical game; tripartite evolutionary game; numerical simulation