

中国稀有轻金属关键性动态评估 ——以锂和铍为例

黄健柏^{1,2}, 孙芳^{1,2*}

(1. 中南大学商学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学金属资源战略研究院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 经济新常态下, 战略性新兴产业成为拉动经济发展的新动能, 稀有轻金属为提高我国战略性新兴产业国际地位和水平提供了核心竞争力。选取两种主要稀有轻金属锂和铍, 从供应风险、环境风险、经济风险三个维度对稀有轻金属在 2009 ~ 2016 年期间进行关键性评估。研究结果表明: (1) 锂在供应风险维度呈现相对稳定低风险, 环境风险维度波动变化处于高风险水平, 经济风险在 2013 ~ 2015 年波动剧烈风险水平高; (2) 铍相较锂而言在供应风险、环境风险和经济风险均呈现高风险水平。总体而言, 锂和铍的整体风险水平达到关键性判定基准值, 应该充分重视稀有轻金属关键性动态评估机制构建。

关键词: 锂; 铍; 供应风险; 环境风险; 经济风险

中图分类号: F426.32 文献标识码: A 文章编号: 1004-8227(2020)04-0879-10

DOI: 10.11870/cjlyzyhj202004009

稀有轻金属主要包括锂、铍、铷、铯, 具备密度小化学性质活泼的优良特性, 是战略性新兴产业发展的重要物质基础。其中, 锂被誉为“白色石油”, 在可持续发展的国家战略背景下, 新能源汽车和锂电产业的快速发展拉动锂需求, 迎来锂黄金时代; 铍优越的热性能使其成为国防军工领域的重要原材料, 在中国大力推进国防军队现代化建设背景下, “尖端金属”铍具有不可替代优势。战略性新兴产业的迅速崛起对稀有金属表现出强劲的高需求, 稀有金属资源将成为未来各国战略性新兴产业发展制高点的关键。

稀有金属资源对保障经济安全、国防安全具有至关重要的作用。随着新一轮技术变革的发展, 世界各国为保障经济与国防安全增强国际竞争力, 纷纷开始进行稀有金属关键性评估。“关键材料储存法”(美国国家研究委员会, 2008 年)列出了美国国防工业的 42 种关键原料^[1]。“欧盟委员会原材料倡议”(2008), 2017 年发布《欧盟关键原材料》确定 26 种至关重要原材料^[2]; 日本经济产业省 2009 制定《稀有金属战略》、《矿产资源保障战略》(2012)提出了 30 种战略性矿产^[3];

德国地质资源办公室(Hilpert 和 Mildner, 2013 年)的报告以国家商品协调的必要问题为中心政策^[4]; 自然资源部为满足国家经济安全和战略性新兴产业发展需求出台《全国矿产资源规划(2016 ~ 2020 年)》, 将锂等新兴矿种列入制定战略性新兴产业矿产目录^[5]。在激烈全球化竞争背景下, 稀有轻金属关键性动态评估对于保障国家资源安全、保持国际竞争地位、实现制造强国具有重要意义。

金属资源关键性主要体现在其对于国家经济发展、生态可持续发展以及供应安全方面发挥关键作用, 由此本文将“关键性”界定为: 如果某种金属现在或未来存在供应中断风险, 并且对环境可持续发展和国家经济发展具有重大影响, 那么我们认为这种金属是关键性金属。稀有金属关键性评估一直是国内外学者的研究热点, 其中, Achzet 等^[6]对 15 种金属资源关键性评估方法进行比较, 并对评估方法中的每一因素进行分析, 包括指标选择以及权重设定。王昶等^[7]揭示新形势下我国金属资源安全机理, 总结国内外关于战略性金属的关键性评估方法。国内外学者分别从供

收稿日期: 2019-04-18; 修回日期: 2019-07-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(71633006)

作者简介: 黄健柏(1954 ~), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为资源经济与管理。E-mail: jbhuan@csu.edu.cn

* 通讯作者 E-mail: sunfangmiracle@163.com

应风险、环境风险、经济风险 3 个视角对稀有金属资源风险进行评估。从供应风险视角出发, Graedel 等^[8-9]站在国家层面形成了包含地质储量和技术创新、社会监管以及地缘政治 3 个因素的供应风险体系, 没有衡量金属原材料的可替代性和回收率对于供应风险的影响。王昶等^[10]在 Graedel 基础上从资源供应潜力和资源供应能力两个方面构建一套全球供应风险评估体系。沙景华等在资源供应风险评价中综合考虑了市场供需、价格或进出口、资源、政治多种因素, 在全球、区域、国家层面提出综合性风险治理措施^[11-13], 并未考虑技术进步对于供应安全的影响。欧盟关键原材料供应风险分析中考虑了由全球供应集中度带来的地缘政治因素、金属原材料技术替代和回收率 4 个影响因素, 其中供应集中度带来的地缘政治因素主要以欧盟进口国产量为依据, 伴随着经济全球一体化, 世界各国经济联络网越来越复杂, 应该综合考虑主要生产国政治风险对于供应风险的影响。从环境风险视角出发, Nuss^[14]使用全寿命周期方法评估金属资源环境影响, 李鹏飞等^[15,16]在 Steen 研究结果^[17]基础上测算出环境影响, 无法动态地体现每年环境风险变化。欧盟提出利用环境绩效指数进行定量分析, 环境绩效指数涉及 9 个政策领域共计 20 个评估指标, 更加综合专业地评估各个国家环境管理水平, 针对中国可持续发展战略背景下, 本文利用全球供应集中度和环境绩效指数衡量各生产国的环境风险, 在综合考虑金属回收率和可替代性基础上在国家层面综合求得每种金属环境风险, 将环境风险单独作为关键性评估的一个维度更能凸显出绿色可持续发展理念。从经济风险视角出发, 王昶等^[18]提出经济发展通过价格和金属资源需求影响国家金属资源安全。Georges^[19]利用国际原材料转化指标衡量附加值不同金属产品对于矿产资源安全性的影响。毛佳等^[20]、张艳飞等^[21]二维评价体系中利用金属消费在各个行业部门消费衡量每种金属关键性, 低估了稀有金属价值, 不能完全的体现出稀有金属所产生经济重要性。杨丹辉等^[17]通过 22 种稀有金属在战略性新兴产业重要性衡量其经济重要性, 不能及时全面的反映稀有金属经济风险水平。国外大多数学者将经济重要性因素划分为供应受限脆弱性维度子指标, 本文认为关键性评估中应该突出经济维度风险水平, 将其单独作为一个评估维度, 并根据高附加值金属产

品和低附加值金属原材料之间进出口贸易差额来反应经济风险水平。

本文基于此, 结合我国经济发展与资源禀赋实际情况, 从供应风险、环境风险、经济风险三个维度对稀有轻金属进行关键性评估, 通过计算每一维度各金属的关键性分数, 最后通过指标加权得出关键结果。通过突出环境风险对于关键性评估影响, 完善已有的关键性评估体系, 量化各金属产品附加值转换对于经济风险影响, 更加真实地反映每种金属所产生经济风险, 选取 2009 ~ 2016 年时间段进行动态分析, 更加贴切的刻画出稀有轻金属资源关键性。稀有轻金属中铷和铯属于伴生金属大多赋存于锂云母中, 含量少且很难精确测度, 因此本文选取锂和铍作为主要稀有轻金属进行关键性动态评估分析。

1 稀有轻金属应用及现状分析

锂作为自然界中具有高熔点、高沸点最轻的银白色金属, 在其主要应用领域: 电池(46%)、陶瓷和玻璃(27%)、润滑脂(7%)、聚合物生产(5%)、连续铸造保护剂粉末(4%)、空气处理(2%)都发挥着至关重要的作用。

表 1 中国稀有轻金属锂供需量(万 t)

Tab. 1 Supply and demand of rare light metal in China

年份	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
需求量	2.03	3.58	3.68	5.5	6.3	6.58	7.87	9.3	12.47
供应量	3.16	4.11	4.08	4.91	5.74	6.19	6.14	8.6	12.34

中国锂资源占全球储量 20%, 锂的消费需求占全球 50% 以上。自 2011 年至今我国锂资源一直处于供不应求状况(表 1), 需要依靠进口满足国内锂需求。2017 年全球锂盐产量为 23.54 万吨(折合碳酸锂当量), 我国锂消费总量达到 12.47 万吨, 主要是因为新兴市场快速崛起尤其是新能源汽车产业的发展一直拉动国内需求。2017 年, 新能源汽车实现产量 79.4 万辆销量 77.7 万辆, 同比分别增长 53.8% 和 53.3%。继 2018 年 2 月 13 日财政部发布《调整完善新能源汽车推广应用财政补贴政策》^[22], 新能源汽车在市场需求和政策支持环境下销售量快速上升, 锂原材料锂消费量将持续上升。

铍是一种灰白色的碱土金属, 在高新技术、航空航天、国防武器装备制造等关键领域具有关键应用, 其中: 21% 的铍产品用于消费电子产品,

19%用于工业部件,14%用于汽车电子产品,11%用于国防应用,9%用于电信基础设施,6%用于能源应用,医疗应用2%,其他应用18%。《中国制造2025》中明确将集成电路及专用装备作为大力推动的重点领域之一,终端市场需求的增加将对铍资源需求的增长形成强有力的支撑,随着世界各国军事工业和尖端科学的发展,尤其是原子能工业,未来对铍及铍产品的需求将继续保持增长态势^[23]。

日本(24.84%),中国(18.26%),美国(14.51%),比利时(12.21%)是全球主要锂进口国,2016年四国占世界总进口量占69.82%。中国和美国既是资源储备大国又是消费大国,出于对本国资源的保护以及资源开发技术的限制,需依靠进口满足国内需求。全球锂主要生产国有澳大利亚(43.49%),智利(32.79%),阿根廷(12.79%),中国(6.98%),四国在2009~2017年生产量平均占世界总生产量的92.73%。生产

国同时也是主要出口国:智利(49.51%),美国(9.97%),阿根廷(15.48%)和中国(11.12%),2016年四国占世界总出口量的86.09%,从图中可以看到澳大利亚和巴西并不参与全球锂的出口,对于锂资源几乎完全是国家内部利用。稀有金属分布具有分散性,导致生产国集中垄断性,由此会引起锂价格操纵以及由于生产国国内政治稳定或外贸政策引起一系列供应风险和经济风险。

铍作为国防军工领域重要原材料,其生产和进出口具有一定局限性。铍主要进口国挪威(45.27%)、西班牙(14.90%)、美国(5.29%),出口国保加利亚(40.59%)、纳米比亚(15.11%)、斯洛伐克(9.82%),中国生产量占世界总量的9.09%,进口量远大于出口量并且每年进口量不稳定,而铍生产国美国、莫桑比克生产量达到90%左右,全球集中度高,可能会带来比较高的供应风险。



注: USGS, UN data 中进口量和出口量为 0 的数据直接忽略,在图中不进行表示,单位 t

图1 2016年全球稀有轻金属锂和铍生产贸易图

Fig. 1 Production and majors rare light metal global flows

2 研究方法

2.1 稀有轻金属关键性评估体系

深化供给侧改革,培育发展新动能,稀有金属资源对战略新兴行业特别是关系国计民生和产业命脉的领域至关重要,稀有金属关键性评估体系的构建为实现制造强国战略提供保障,对国家

金属资源安全战略具有积极意义。

稀有轻金属关键性评估体系包含3个维度:供应风险、环境风险、经济风险。中国稀有轻金属关键性评估中,既要考虑到稀有金属分布分散性导致各个国家资源分布不均衡,进而由各个国家治理风险引起的供应风险,又要考虑到稀有金属的回收率和替代性因素可以缓解供应风险水平;环境绩效指数所反映的各生产国环境保护水

平会影响稀有金属资源供应能力;高附加值产品经济价值可以弥补由于低附加值初级产品缺失所需考虑的供应风险,通过稀有金属资源产品进出口金额进行定量分析,衡量稀有轻金属资源对我国经济风险影响。本文最终形成了以供应风险、环境风险、经济风险构成的稀有轻金属资源关键性评估体系(表 2)。

本文基于欧盟提出的关键性指标计算公式,在原有二维评估体系基础上进行了拓展,我们现在考虑以下 3 个方面。(1) 供应风险,根据欧盟 2017 年关键原材料报告提供指标,经过计算比较分析后使用金属生产国集中度代替主要进口国集中度;(2) 环境风险,本文考虑到中国对于生态安全的重视,加入以环境绩效指数为主计算的环境风险指标;(3) 经济风险指标,不仅考虑到上游市场的原材料,而且考虑了这一原料用于生产和交换的半成品或最终产品的下游市场。最后,为了评估总体关键性,将 3 个维度指标分数进行加权平均即可衡量稀有轻金属关键性。

表 2 稀有轻金属关键性评估体系

Tab. 2 Critical assessment system of rare light metal in China

维度	指标
供应风险(SR)	稀有金属可替代性指数(σ)
$SR = \sigma_i(1 - r_i) \sum_c (P_c)^2 WGI$	回收利用率(r)
	生产国产量(p)
	国家治理风险(WGI)
环境风险	稀有金属可替代性指数(σ)
$ER = \sigma_i(1 - r_i) \sum_c (P_c)^2 EPI$	回收利用率(r)
	生产国产量(p)
	环境绩效指数(EPI)
经济风险 EI	上游市场主要矿种产品进出口金额
	下游市场主要矿种产品进出口金额

2.2 数据来源与指标计算

稀有轻金属可替代性指数、回收利用率数据来源于欧盟关键原材料报告,生产量数据来源于世界矿产年报和美国地质调查局(USGS),世界治理指数(WGI)来源于世界银行,环境绩效指数(EPI)来源于美国耶鲁大学和哥伦比亚大学所构成的联合研究中心,稀有轻金属原材料和产品金属进出口数据来源于联合国数据库和 WIND 数据库。

2.2.1 供应风险指标(SR)

供应风险指标计算公式为稀有金属 i (σ_i) 的可替代性指数与生命周期内(r_i) 的回收率和赫芬

达赫-赫希曼指数的三次乘积,其中赫芬达赫-赫希曼指数是以各生产国生产量(P_c) 的平方为权重对各生产国国家治理风险(WGI) 进行加权所得。

$$SR = \sigma_i(1 - r_i) \sum_c (P_c)^2 WGI \quad (1)$$

(1) 可替代性指数

可替代性取决于替代品的价格和性能以及可替代技术,由于可用替代品的存在有可能减少对候选物料的需求,因此可以缓解候选物料当前供应组合中国有的供应风险,因此稀有金属矿产的可替代性被认为是可能降低供应风险的参数。Fraunhofer ISI 已经给出了 4 个价值“以专家意见为基础”来衡量不同程度的可替代性(表 3): 值为 0 意味着可以免费替代; 0.3 意味着以相对较低的成本替代是可行的; 0.7 意味着替代是可能的高成本; 1 意味着替代不可能或非常困难。

$$\sigma_i = \sum A_{ij} \times \sigma_{ij} \quad (2)$$

式中: σ_i 是第 i 种稀有金属的可替代性指数; A_{ij} 为第 i 种稀有金属在第 j 个应用领域中消费量占比; σ_{ij} 是第 i 种稀有金属在 j 消费领域的可替代性强度。

表 3 可替代强度指数

Tab. 3 Evaluation method of substitutability intensity index

指数	说明
0	极易完全被替代, 无需额外成本
0.3	容易替代, 低额外成本
0.7	可替代, 高额外成本或性能损失
1	不可替代

(2) 回收利用率

稀有金属矿产在生命周期的各个阶段, 对产品和各种生产残渣进行有效回收, 大大减少对原材料的需求, 从而缓解了关键原材料面临的供应风险, 故而稀有金属产品回收率被认为是可能降低供应风险的参数。回收率越高, 说明稀有金属供应安全越有保障, 供应风险越小。本文参考联合国环境规划署国际资源小组的报告“金属的回收利用率”^[24] 和欧盟关键材料报告中关于回收利用报告的数据。

(3) 生产国产量

供应风险考虑了各个生产国在物质总产量中的重要性, 各国家稀有金属生产量数据来自于世界矿产报告(World mining data)^[25] 和美国地质调查局(USGS)^[26] 的统计资料, 然后计算出每个国家生产量占世界中生产量的百分比(表 4)。

表4 全球锂生产集中程度

Tab. 4 Degrees of lithium concentration of global production

生产国	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
阿根廷	0.145	0.123	0.089	0.078	0.090	0.109	0.113	0.163
澳大利亚	0.253	0.295	0.329	0.374	0.330	0.322	0.353	0.409
巴西	0.012	0.009	0.005	0.005	0.007	0.007	0.007	0.006
智利	0.310	0.378	0.433	0.393	0.379	0.359	0.329	0.343
中国	0.134	0.098	0.083	0.095	0.135	0.145	0.139	0.057
葡萄牙	0.011	0.009	0.007	0.003	0.004	0.003	0.003	0.006
美国	0.077	0.054	0.041	0.028	0.029	0.031	0.029	0.027
津巴布韦	0.040	0.033	0.013	0.023	0.026	0.025	0.027	0.026
合计	18 140	25 724	29 712	33 653	29 559	32 075	31 749	35 000

(4) 国家治理风险

WGI是由世界银行^[27]构建和发布的一个反映国家的治理水平并且适用于稀有金属的不同生命周期阶段指标,其中包括暴力和责任性,政治稳定,政府有效性,腐败程度,法律制度,监管质量6个子指标,最差治理在-2.5之间,2.5最好的。取6个子指标的平均值,并进行调整规范化为: $10 - [(WGI + 2.5) * 2]$,随着这种重新规范化,范围从[-2.5; 2.5]变为[0~10](表5)。因

表5 锂生产国国家治理指数

Tab. 5 Governance indicators of the World Bank:

Exporting countries to France

生产国	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
阿根廷	-0.37 5.75	-0.27 5.53	-0.21 5.42	-0.32 5.63	-0.34 5.68	-0.39 5.77	-0.31 5.63	-0.03 5.06
澳大利亚	1.59 1.81	1.60 1.81	1.62 1.76	1.61 1.78	1.58 1.84	1.61 1.79	1.55 1.90	1.54 1.91
巴西	0.08 4.84	0.13 4.74	0.11 4.79	0.06 4.87	0.00 5.01	-0.04 5.07	-0.13 5.26	-0.15 5.30
加拿大	1.64 1.72	1.61 1.78	1.61 1.78	1.62 1.76	1.62 1.77	1.44 2.11	1.66 1.68	1.66 1.67
智利	1.17 2.66	1.22 2.56	1.19 2.62	1.20 2.61	1.19 2.62	1.18 2.64	1.08 2.84	1.02 2.95
中国	-0.53 6.07	-0.58 6.15	-0.56 6.11	-0.56 6.13	-0.56 6.11	-0.47 5.95	-0.46 5.93	-0.42 5.84
葡萄牙	1.04 2.93	0.95 3.10	0.93 3.15	0.95 3.10	0.98 3.05	0.96 3.08	1.06 2.89	1.06 2.89
美国	1.23 2.55	1.25 2.50	1.26 2.48	1.28 2.45	1.23 2.53	1.23 2.54	1.25 2.50	1.24 2.52
津巴布韦	-1.69 8.38	-1.19 7.38	-1.48 7.96	-1.41 7.83	-1.36 7.72	-1.32 7.63	-1.20 7.41	-1.20 7.40

注: 每个国家对应第一行数据是根据世界银行6个子指标值得求算数平均数; 每个国家对应第二行数据是根据欧盟提供标准化方法对其进行规范化后的数据。利用赫芬达尔-赫希曼指数(HHI)求得源于国家政治风险导致集中供应风险, HHI指数的上升表明供应风险较高, 如果风险较高的国家对全球大部分生产负责, 则这一风险将更加难以克服。

此, 根据世界银行的平均值为2.5的国家, 调整后为0, 而-2.5的国家为10, 分数越低表示生产国治理效果越好, 供应风险越低。

2.2.2 环境风险(ER)

稀有金属资源的开发利用对环境的破坏会影响国家出于生态保护而制定的限制性政策, 稀有金属资源开发利用对于环境破坏性越大, 环境治理越好的国家对于开采资源限制性越强, 也就意味着供应风险越大。与供应风险计算类似, 稀有金属可替代性指标和回收利用率指标测算与数据获取与供应风险维度是相同的, 此外, 采用环境国家指数(ER)来反映由于环境原因而产生的国家风险。这是基于每个国家的环境绩效指数, 同时考虑到国家风险的集中度, 可替代性和回收利用率, 所有的价值都适当地按比例缩放, 以使得ER的值在0和10之间, 更高的值表示环境国家风险。

该式衡量各个生产国为保护环境所采取措施造成的风险, 该风险会减少金属资源的供应。

$$ER = \sigma_i(1 - r_i) \sum_c (P_c)^2 EPI \quad (3)$$

(1) 环境绩效指数

环境风险评估采用由美国耶鲁大学和哥伦比亚大学建立的联合研究中心编制的生产国的“环境绩效指数”(EPI)^[28], 该指数根据公共健康和生态系统活力两项政策类别下的25项绩效指标对全球163个国家进行排名。EPI排名为每个国家在面临一系列环境压力下所做出的努力进行衡量, EPI排名靠前的国家代表该国家环境治理措施更加健全, 由于某种稀有金属资源开发利用所带来的环境危害可能会直接减少该生产国的供应量, 进而增加该种稀有金属整体关键性。

由于每年的指标权重不同, 我们根据2016年报告中各指标权重计算公式, 对2009~2016年数据进行重新计算, 并即将计算结果规范化 $EPI \in [0-10]$ 。

2.2.3 经济风险(EI)

经济风险是将金属原材料创造附加值所产生经济影响作为风险衡量的一个维度, 在考虑到稀有战略性金属原材料特殊性基础上选取各种原材料产生的进出口附加值构成衡量指标, 经济风险维度出发点是拥有高附加值产品或半成品(下游市场)的国家可以更好地抵制由于原材料(上游市

场) 短缺所带来的风险, 进而降低该种稀有金属资源总体的关键性。

本文将包含国际原材料转换价格因素的经济风险纳入关键性分析, 矿产资源丰富的国家对上游金属原材料采取国家措施进行保护(例如双重定价、出口配额及对矿业投资的限制), 加大了地缘政治引起的原材料关键性问题。然而, 通过下游市场的半产品或最终产品在国际贸易间的流通转换可以缓解价格上涨所增加的关键性。

$$EI = \frac{\sum_i (E_i - I_i)}{\sum_i (E_i + I_i)} \quad (4)$$

式中: E_i 是上游材料和下游产品 i 的出口价值, I_i 是上游材料和下游产品 i 的进口价值。

构造的等式中, $EI \in [-1; 1]$ 。只有金属原

材料的生产国可以通过国际贸易使得经济风险达到 1。然而, 非金属原材料生产国即使在上下游市场均是净出口国经济风险也不会达到 1, 只有当上游市场和下游市场进口值无限小时经济风险才会无限接近于 1。本文将 EI 指标规范化: $10 - [(EI \text{ 值} + 1) * 5]$, EI 是 10 表示该种稀有金属风险最大, EI 为 0 代表风险最低。

(1) 上游市场主要矿种产品进出口金额

根据矿种进行贸易流动确定主要产品, 本文以稀有轻金属锂进行定量分析, 选取上游市场主要五种产品: 氢氧化锂、氧化锂、氯化锂、碳酸锂、钴酸锂(表 6), 进出口数据来源于 WIND 数据库。

表 6 中国锂上游产品贸易流动 (万美元)

Tab. 6 Lithium international trade of China

出口	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
氢氧化锂	1 115.28	1 459.30	2 600.21	2 331.84	3 129.91	4 319.86	70 95.67	13 819.46
氧化锂	5.23	2.87	34.11	59.71	74.56	148.34	156.91	110.82
氯化锂	67.01	135.01	141.57	143.84	206.46	216.29	252.04	429.20
碳酸锂	1 412.95	1 686.55	2 581.97	2 980.41	1 485.78	1 265.19	1 240.08	1 656.37
钴酸锂	9 300.37	13 318.11	15 821.70	21 887.27	181 863.10	22 895.59	30 266.98	18 240.53
合计	11 900.84	16 601.84	21 179.56	27 403.07	186 759.81	28 845.27	39 011.68	34 256.38
进口	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
氢氧化锂	23.67	34.33	17.69	147.50	135.35	41.84	101.94	146.16
氧化锂	253.41	39.31	44.27	166.73	136.10	78.32	90.39	42.48
氯化锂	1 946.24	979.99	1 264.48	823.27	1 193.07	2 326.47	2 603.69	1 861.55
碳酸锂	1 962.29	2 111.04	3 269.77	4 235.21	7 117.78	6 410.25	6 412.77	9 454.40
钴酸锂	6 991.40	5 529.58	6 184.12	7 342.00	17 205.55	22 095.32	20 934.79	22 212.34
合计	11 177.01	8 694.25	10 780.33	12 714.71	25 787.85	30 952.20	30 143.58	33 716.93

(2) 下游市场主要矿种产品进出口金额

本文选取锂下游市场两大产品: 锂的原电池及原电池组、锂离子电池(表 7), 进出口数据来源于 WIND 数据库。虽然锂金属应用领域广泛, 单一电池产品并不能代表整个锂下游市场产品,

但是考虑到电池行业是拉动锂消费的主要领域, 并且未来锂在电池行业的消费量仍将持续增长, 因此选取锂的原电池及原电池组和锂离子电池作为下游市场主要产品。

表 7 中国锂下游产品贸易流动 (万美元)

Tab. 7 International trade in lithium products of China

出口	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
锂的原电池	6 885.49	9 217.66	10 822.33	12 054.57	13 570.35	18 090.29	24 790.46	38 482.79
锂离子电池	352 287.12	350 666.24	404 231.13	228 723.31	208 704.43	487 903.84	613 853.46	643 811.84
合计	359 172.61	359 883.91	415 053.46	240 777.88	222 274.78	505 994.13	638 643.92	682 294.63
进口	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
锂的原电池	17 509.19	17 819.40	19 744.80	18 678.96	18 121.33	19 602.42	22 624.20	20 818.27
锂离子电池	450 229.89	480 468.23	456 779.67	234 067.24	156 434.56	333 3539.77	337 212.89	322 065.21
合计	467 739.08	498 287.63	476 524.47	252 746.20	174 555.88	3 353 142.19	359 837.09	342 883.48

3 结果分析

3.1 供应风险

基于欧盟关键原材料报告中供应风险临界值设定标准,本文认为供应风险评估结果超过临界值1即为关键的。在2009~2016年的分析期间,锂供应风险几乎稳定在0.567左右,低于临界值1,供应风险维度达不到关键水平。由于各生产国产量及国家治理风险变动使其供应风险在0.5~0.639的范围内波动,峰值0.639仍然低于1的临界点,主要是因为锂主要生产国集中,2016年澳大利亚和智利两国占全球生产量的75%左右,同时,澳大利亚和智利国家治理风险稳定在较低水平1.91和2.95左右,使其供应风险保持在稳定水平。

铍在分析期间平均供应风险稳定在2.006,始终大于临界值1,2013年达到最高值2.147。总体来说,稀有轻金属铍在供应风险维度关键性高,并且大于锂供应风险。

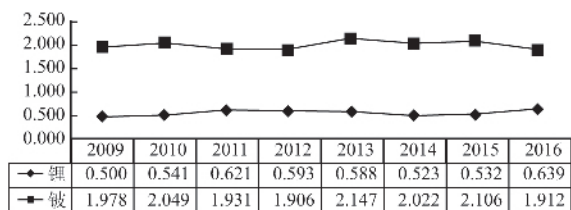


图2 供应风险评估结果

Fig. 2 Assessment result of supply risk

3.2 环境风险

环境风险评估方法根据供应风险评估方法进行改进,欧盟关键原材料清单中将环境风险临界值标准设定为1,本文认为环境风险评估结果超过临界值1即为关键的。稀有金属锂环境风险在分析期间一直高于临界值1,2009~2012年环境风险保持上升的趋势,主要是因为澳大利亚和智利两个主要生产国产量持续上涨,高生产集中度对环境风险产生重要影响并在2012年达到峰值2.038。生产量占据全球近70%左右的澳大利亚和智利的生产量自2012年开始也处于下降趋势,加之各生产国环境绩效指数下降趋势,使得2014年达到最低值1.516。稀有金属锂在环境风险维度安全性低,说明主要锂生产国环境治理措施健全,开发加工锂矿及其产品时对于环境的破坏会使得国家出于对环境保护而限制减少锂矿及其产

品的生产量,同时,加快稀有金属锂回收技术和替代技术的发展有助于缓解开发加工过程中造成的环境风险。

铍在分析期间环境风险平均值为6.570,具有高风险波动性大的特点,主要是因为铍全球供应的集中度高且主要生产国产量非常不稳定。总体来说,锂和铍都具有较高的环境风险,铍相较于锂来说不稳定性更高。

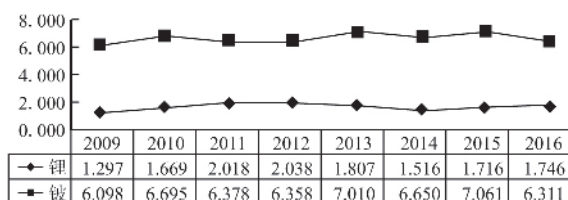


图3 环境风险评估指标

Fig. 3 Assessment result of environment risk

3.3 经济风险

欧盟关键原材料报告中将经济风险临界值标准设置为5,Georges对稀有金属锂进行经济风险评估时也一致将经济风险临界值标准设置为5,本文认为经济风险评估结果超过临界值5即为关键的。根据表6和表7列出锂产品贸易流动数据,2009~2013年EI值趋于稳定,出口增速明显大于进口增速,自2012年开始处于非关键低风险区间,2014年上游市场金属原材料和下游市场高附加值金属产品进口贸易额远高于出口贸易额,导致经济风险达到8.64峰值,2014年后,出口贸易额远大于进口贸易额,规范化EI稳定在3.55左右,反应了中国经济在锂市场的安全状态。

根据图4可以看出铍的经济风险很高,几乎达到10峰值,主要是因为进口低附加值原材料价值大于高附加值产品出口价值进而导致了非常高的经济风险。总体来说,锂经济风险水平低并不足以达到临界值5的关键性,铍经济风险水平整体居高,应该引起重视。

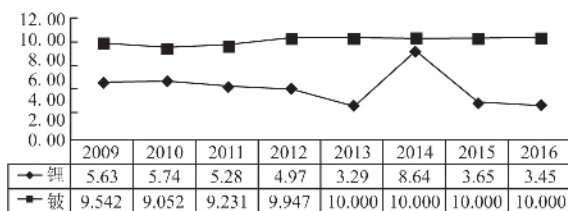
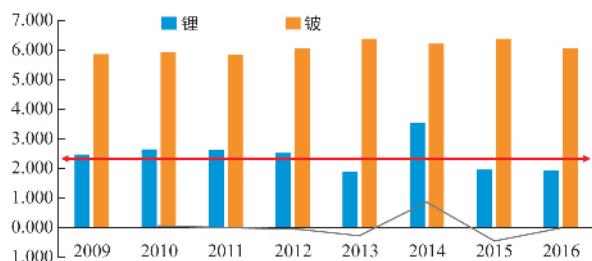


图4 经济风险评估指标结果

Fig. 4 Assessment result of economic risk

3.4 稀有轻金属锂和铍关键性评估结果

稀有轻金属关键性评估结果是通过加权平均方式对供应风险、环境风险、经济风险 3 个维度进行聚合, 其中关键性临界值标准设定是根据三维指标临界值标准通过加权平均方式求得, 因此本文认为稀有轻金属风险超过临界值 2.33 即为关键的。由图 5 所示, 锂在分析期间整体风险水平达到临界值但是风险波动比较剧烈, 2009 ~ 2013 年期间风险总体水平呈下降趋势, 主要是经济风险水平下降幅度大, 而 2014 年经济风险水平达到峰值拉动整体风险水平抬高, 之后随着经济风险稳定后整体风险水平稳定在临界值以下。铍在分析期间保持较高的整体风险水平, 说明铍是中国关键原材料。总体来说, 稀有轻金属是我国的关键原材料。



注: 图中红色线为达到关键性临界值 2.33 基准线, 红线以上表示计算结果达到关键性水平, 红线以下表示风险水平并未达到关键。

图 5 关键性评估结果

Fig. 5 Assessment result of criticality

4 结论与建议

本文通过完善稀有金属关键性评估体系, 选取锂和铍两种金属分别从供应风险、环境风险、经济风险三个维度对稀有轻金属进行定量评估, 分析比较锂和铍在各个维度风险水平以及整体关键性大小, 选取 2009 ~ 2016 年为分析期间对锂和铍进行动态分析可以更加真实地反映出稀有轻金属关键性水平。

日益严峻的能源匮乏和环境危机使得“工业维生素”稀有金属成为全球范围内大国博弈的焦点, 突破战略性金属资源的约束为战略性新兴产业迅速崛起奠定坚实物质基础。稀有轻金属资源在高端制造业和国防军工领域的重要作用使其在全球范围内呈现出高风险的关键性, 各国纷纷制定关键原材料战略来保障国家资源安全。本文根

据中国稀有金属资源实际情况, 从环境、经济、资源和国家风险等因素出发进行稀有金属资源关键性评估, 本文提出以下几点建议:

(1) 建立稀有轻金属关键性评估动态机制。《中国制造 2025》将新能源汽车产业列为重点发展领域之一, 近几年新能源汽车井喷式发展对于锂构成强劲需求, 时时刻刻评估稀有轻金属锂关键性有助于我国新能源汽车产业保持竞争优势, 推进产业结构升级。

(2) 完善稀有轻金属资源开采加工过程中生态环境保护措施。一方面, 严格把控矿产资源开发源头对环境影响, 实现矿山开采绿色环保模式; 另一方面, 提高产业链各个环节中稀有金属资源的回收率, 减少资源浪费。

(3) 促进稀有轻金属资源产业升级, 高附加值产品创新增强竞争力。我国虽然稀有金属资源丰富, 但是主要是初级产品形式, 经济利益流入少, 在国际上缺乏定价话语权, 提高稀有金属资源主要应用领域科学技术水平, 加大高附加值产品研发实现产业结构升级, 实现制造强国战略目标。

(4) 健全稀有轻金属资源战略储备机制, 根据每种稀有金属资源安全性合理规划国内资源开发能力, 并结合全球矿产资源市场, 优化稀有金属资源储备结构, 在满足国内需求基础上降低供应风险, 充分利用我国资源优势保障国家金属资源安全。

参考文献:

- [1] NATIONAL RESEARCH COUNCIL (US). Committee on critical mineral impacts on the US economy. minerals, critical minerals, and the US economy [M]. Washington: National Academies Press, 2008.
- [2] EUROPEAN COMMISSION. Report of the Ad-hoc working group on defining critical raw materials: Critical raw materials for the EU 2017 [EB/OL]. http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw_materials/files/docs/crm_reporton_critical_raw_materials_en.pdf.
- [3] 日本経済産業省. 資源確保戦略[EB/OL]. (2012-06-27) [201703-07]. http://www.enecho.meti.go.jp/category/resources_and_fuel/strategy/pdf/shinenseisaku2.pdf.
- [4] HILPERT H G, MILDNER S A. Fragmentation or cooperation in global resource governance? A comparative analysis of the raw materials strategies of the G20, [M] SWP Research Paper, 2013. (<http://www.swp-berlin.org/fileadmin/contents/produkt>)

- ucts/research_papers/2013_RP01_hlp_mdn. pdf) .
- [5] 中国国土资源部. 全国矿产资源规划 2008—2015 [EB/OL]. http://www.mlr.gov.cn/xwdt/zytz/200901/t20090107_113776.htm.
The Ministry of Land and Resources of PRC. The national mineral resources planning (2008—2015) [EB/OL]. http://www.mlr.gov.cn/xwdt/zytz/200901/t20090107_113776.htm.
- [6] ACHZET B, HELBIG C. How to evaluate raw material supply risks: An overview [J]. Resources Policy, 2013, 38(4): 435–447.
- [7] 王 昶, 宋慧玲, 左绿水, 等. 国家金属资源安全研究回顾与展望[J]. 资源科学, 2017, 39(5): 805–817.
WANG C, SONG H L, ZUO L S, et al. Review and prospects of national metal resource security [J]. Resources Science, 2017, 39(5): 805–817.
- [8] GRAEDEL T E, HARPER E M, NASSAR N T, et al. Criticality of metals and metalloids [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(14): 4257–4262.
- [9] GRAEDEL T E, BARR R, CHANDLER C, et al. Methodology of metal criticality determination [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(2): 1063–1070.
- [10] 王 昶, 孙 晶, 左绿水, 等. 新能源汽车关键原材料全球供应风险评估[J]. 中国科技论坛, 2018(4): 83–93.
WANG C, SUN J, ZUO L S, et al. Global supply risk assessment of key raw materials for new energy vehicles [J]. Forum on Science and Technology in China, 2018(4): 83–93.
- [11] 刘全文, 沙景华, 闫晶晶, 等. 中国铬资源供应风险评价与对策研究[J]. 资源科学, 2018(3).
LIU Q W, SHA J H, YAN J J, et al. Risk assessment and countermeasures of china's chromium resources supply [J]. Resources Science, 2018(3).
- [12] 范松梅, 沙景华, 闫晶晶, 等. 中国铁矿石资源供应风险评价与治理研究[J]. 资源科学, 2018(3).
FAN S M, SHA J H, YAN J J, et al. Risk Assessment and governance of China iron ore resources supply [J]. Resources Science, 2018(3).
- [13] 刘全文, 沙景华, 闫晶晶, 等. 中国钴资源供应风险评价与治理研究[J]. 中国矿业, 2018(1): 50–56.
LIU Q W, SHA J H, YAN J J, et al. Risk assessment and governance of cobalt resource supply in China [J]. China Mining Magazine, 2018(1): 50–56.
- [14] NUSS P, ECKELMAN M J. Life cycle assessment of metals: Ascientific synthesis [J]. Plos One, 2014, 9(7): e101298.
- [15] 李鹏飞, 杨丹辉, 渠慎宁, 等. 稀有矿产资源的全球供应风险分析——基于战略性新兴产业发展的视角[J]. 世界经济研究, 2015(2): 96–104, 129.
LI P F, YANG D H, QU S N, et al. Analysis on global supply risk of rare minerals: From the perspective of strategic emerging industry development [J]. World Economy Studies, 2015(2): 96–104, 129.
- [16] 李鹏飞, 杨丹辉, 渠慎宁, 等. 稀有矿产资源的战略性评估——基于战略性新兴产业发展的视角[J]. 中国工业经济, 2014(7): 44–57.
LI P F, YANG D H, QU S N, et al. A strategic assessment of rare minerals based on the perspective of strategic emerging industries development [J]. China Industrial Economics, 2014(7): 44–57.
- [17] STEEN B. A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000-General and data of the default method [R]. Sweden: Chalmers University of Technology, 1999.
- [18] 王 昶, 黄健柏. 中国金属资源战略形势变化及其产业政策调整研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(S3): 391–394.
WANG C, HVANG J B. The changes in stategic of China's metal resources and the adjustment of the industrial policy [J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(S3): 391–394.
- [19] DAW G. Security of mineral resources: A new framework for quantitative assessment of criticality [J]. Université Paris1 Panthéon-Sorbonne (Post-Print and Working Papers), 2017, 53(9): 173–189.
- [20] 毛 佳, 李鹏远, 周 平. 中国主要贵金属资源利用及关键性评估[J]. 工业技术经济, 2017, 36(11): 37–43.
MAO J, LI P Y, ZHOU P. Major precious metal resources utilization and criticality assessment in China [J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2017, 36(11): 37–43.
- [21] 张艳飞, 陈其慎, 于汶加, 等. 中国矿产资源重要性二维评价体系构建[J]. 资源科学, 2015, 37(5): 883–890.
ZHANG Y F, CHEN Q S, YU W J, et al. Building a two dimensional coordinate evaluation system of mineral resource importance [J]. Resources Science, 2015, 37(5): 883–890.
- [22] 财政部. 调整完善新能源汽车推广应用财政补贴政 [EB/OL]. (2018-02-42) [2018-06-11] http://jjs.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/zhengcefagui/201802/t20180213_2815574.html
Ministry of Finance. Adjust and improve the financial subsidy policy for the promotion and application of new energy vehicles [EB/OL]. (2018-02-42) [2018-06-11] http://jjs.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/zhengcefagui/201802/t20180213_2815574.html
- [23] 陈其慎, 于汶加, 张艳飞. 点石: 未来 20 年全球矿产资源产业发展研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
CHEN Q S, YU W J, ZHANG Y F. Golden touch: Research on the development of the global mineral resources industry in the next 20 years [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [24] UN DATA, 2000–2015. United Nations Data. (<http://data.un.org/>). UNEP, 2011. Recycling rates of metal: a status report. In: 2nd Report of the Global Metal Flows Working Group of UNEP. (http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metals_Recycling_Rates_110412-1.pdf).
- [25] WORLD MINING DATA, 2018. International organizing committee for the world mining congresses. (<http://www.wmc>

- org. pl) .
- [26] U. S. Geological Survey , 2009 – 2018. Mineral Commodity Summaries , Minerals Information. (<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/>) .
- [27] KAUFMANN D , KRAAY A , ET MASTRUZZI M. , 2015. Worldwide governance indicators. ([http://info. Worldbank. org/governance/wgi](http://info.Worldbank.org/governance/wgi)) .
- [28] Yale Center for Environmental Law and Policy , International Earth Science Information Network (CIESIN) , 2016 Environmental Performance Index [OL]. 2016-01-28. [http://epi. yale. edu](http://epi.yale.edu).

Dynamic Criticality Assessment of Rare Light Metals in China: Case Study of Lithium and Beryllium

HUANG Jian-bai^{1 2} , SUN Fang^{1 2}

(1. Business School , Central South University , Changsha 410083 , China; 2. Metal Resource Strategic Research Institute , Central South University , Changsha 410083 , China)

Abstract: Strategic emerging industries have become the driving force for economic growth with the background of New Normal of China's economy , while rare light metals have provided core competitiveness for improving the international status and level of strategic emerging industries. In this paper , we learn from the European Union criticality methodology to assess criticality of lithium and beryllium between 2009 and 2016 from three assessment components: supply risk , environment risk and economic risk. The results show that: (1) Lithium presents a relatively low level in the supply risk , a high risk level in the environmental risk , and a higher level in the economic risk with drastic fluctuation during the period 2013–2015 , having a high risk. (2) Compared with lithium , beryllium is at a higher risk level in the three risk dimensions. In general , the critical assessment results of lithium and beryllium have reached the critical benchmark value , and we should pay adequate attention to the construction of dynamic criticality assessment mechanism.

Key words: lithium; beryllium; supply risk; environmental risk; economic risk