

矿产资源安全巨系统理论方法与实践

陈其慎*, 张艳飞, 邢佳韵, 龙涛, 郑国栋, 王琨, 任鑫, 李振清, 李强

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 矿产资源的自然属性、经济属性和社会属性, 决定了矿产资源安全涉及众多资源类型、宏大空间分布、超长产业链条、巨大产业规模、跨越时空配置、复杂因素影响、层次纷繁多样。矿产资源安全规模之大、层次之多、影响因素之复杂难以穷尽, 是一个复杂巨系统。如何使矿产资源安全巨系统高效运转以服务经济社会发展, 是一项复杂性科学难题。本文引入系统科学的研究思路, 提出了矿产资源安全巨系统概念, 刻画了矿产资源安全巨系统的结构和组成, 揭示了自然资源、经济、社会等因素对矿产资源安全巨系统的驱动机理, 形成了矿产资源安全巨系统理论。在此基础上, 建立了涵盖以系统思维研究构建矿产资源安全保障的理论知识模型、构建基于大数据平台的仿真实验系统、积极推动政府决策与反馈三大环节的矿产资源安全系统工程学研究新方向, 提出了建立矿产资源安全的总体设计部的战略思想。研究成果已应用于国家资源安全保障工作实践, 有效支撑了国家矿产资源安全保障工作。

关键词: 矿产资源安全; 巨系统; 系统工程学; 大数据平台

中图分类号: F416.1 **文献标识码:** A

Theoretical Method and Practice of Giant System for Mineral Resource Security

Chen Qishen*, Zhang Yanfei, Xing Jiayun, Long Tao, Zheng Guodong, Wang Kun,
Ren Xin, Li Zhenqing, Li Qiang

(Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The natural, economic, and social attributes of mineral resources determine that the security of mineral resources involves numerous resource types, large spatial distribution, ultra-long industrial chains, huge industrial scale, spatial and temporal configurations, complex factors, and multiple levels; it is a complex and giant system with a large scale, multiple levels, and complex influencing factors. How to make this system operate efficiently and serve economic and social development is a complex scientific issue. This study puts forward a concept of giant system for mineral resource security by introducing the research idea of system science, depicts the structure and composition of the giant system, and reveals the driving mechanism of the giant system by natural resource, economic, social, and other factors. On this basis, a new research direction of system engineering of mineral resource security is established, which involves building a theoretical knowledge model for mineral resource security guarantee using a system thinking, constructing a simulation experiment system based on a big data platform, and actively promoting government decision-making and feedback. Furthermore, a major strategic idea of establishing an overall design department for mineral resource security is proposed. The research results have been applied to and effectively supported national resource security guarantee in China.

Keywords: mineral resource security; giant system; system engineering; big data platform

收稿日期: 2023-09-17; 修回日期: 2023-10-26

通讯作者: *陈其慎, 中国地质科学院矿产资源研究所研究员, 研究方向为矿产资源调查评价、安全保障与管理; E-mail: chenqishen@126.com

资助项目: 自然资源部中国地质调查局项目(DD20211405, DD20230040); 国家自然科学基金项目(42271281)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

矿产资源的自然属性决定了资源的稀缺性和分布不均衡性,矿产资源的经济属性决定了资源的供应无法满足需求,矿产资源的社會属性决定了资源争夺的必然性。随着科技的进步,人类所发现和开发的矿产资源越来越多,但全球人口规模不断增长,资源需求总量不断增大,争夺愈演愈烈。当前,世界资源安全形势是二战以来最严峻的时期。一是应对气候变化,人类能源革命、技术革命、产业革命快速演变,正对矿产资源需求产生深远影响^[1]。二是世界百年未有之大变局加速演进,国际局势复杂动荡,矿产资源安全供应难度加大,安全风险形势严峻^[2-5]。美国、欧盟、俄罗斯、日本等密集出台矿产资源安全保障措施,国际资源博弈烈度陡增,资源安全保障的迫切性达到前所未有的高度^[6-12]。

确保矿产资源安全巨系统高效运转、服务经济社会发展,是一项复杂性科学难题,也是一项系统工程。长期以来,国内外矿产资源战略研究者就矿产资源安全问题开展了大量研究,如2000年前后提出的矿产资源安全的定义、机理、框架^[13-15]以及适应当时形势的安全保障战略,陆续完成了不同矿种的安全评价研究^[16-21]。面对新的国际地缘形势,研究者对资源安全与地缘政治、资源安全与全链条管理等问题开展了进一步探讨^[22,23]。然而,随着人类科技革命、产业革命不断演化,国际地缘政治格局日趋动荡,矿产资源开发利用日益复杂,安全保障的难度不断加大,常规研究思路和方法已难以满足新形势下资源安全保障的需求。主要体现在两个方面:一是矿产资源安全保障理论体系尚未建立,难有系统思维,“只见树木不见森林”。矿产资源勘查、开发、利用产业链条长,涉及领域广,学者往往只注重于某个环节或某个领域,缺乏系统思维和理论指导。二是缺乏资源安全研究的现代化科技手段,难以快速发现和有效解决问题。在矿产种类不断扩大、用途不断增加、产业链条不断延伸、国际贸易网络不断扩张、交易日趋复杂等各种要素不断交织的情况下,矿产资源安全已成为一个分布于全球的宏大体系,各种因素瞬息万变,人脑难以直接有效处理。因此,需要利用大数据的方法,监测矿产资源生产、交易、运输、使用的各个环节,提

升决策效率。

系统科学是由钱学森等人提出并被认为是现代科学技术体系的新兴科学技术^[24-26],在航天、军事、人体科学、地理科学、社会管理、农业、水资源、土地资源、疫情管理等多个领域得到广泛应用,支持各领域的产品研发、学科建设、组织管理^[27-41];整合整体论与还原论的哲学思想^[26],运用定性与定量相结合的综合集成方法,研究复杂系统的运行机理,进而构建模型并指导实践。系统科学在多个领域应用并有效提高了各领域的管理效率,是矿产资源安全研究的一把“金钥匙”。本文将系统科学的研究思想引入矿产资源安全研究领域,建立了矿产资源安全系统工程学研究新方向,以矿产资源安全巨系统为研究对象,研究巨系统结构,抓住巨系统的主要矛盾,刻画巨系统形态,揭示巨系统的运行机理,建立巨系统模型,评估发现巨系统运转存在的主要问题,提出矿产资源安全保障优化解决方案,并应用于国家资源安全保障工作实践。

二、矿产资源安全巨系统的概念与特征

(一) 矿产资源安全巨系统的概念

系统科学根据系统的子系统种类数量及其关联关系的复杂程度,把系统分为简单系统和巨系统两大类。在巨系统中,如果其子系统种类繁多且有层次结构、相互之间关系复杂,就称为复杂巨系统^[24-26]。矿产资源安全涉及众多资源类型、宏大空间分布、超长产业链条、巨大产业规模、跨越时空配置、复杂因素影响、层次纷繁多样,其规模之大、层次之多、影响因素之复杂难以穷尽,符合巨系统的特征。

矿产资源安全随着经济社会的发展,展现出更加突出的系统性和复杂性,具体体现在3个方面。第一,矿产资源产出于自然界,矿产的富集是一种特殊的自然现象,其分布受地质规律控制,呈现出天然的集中性和不均一性,没有哪个国家拥有自身发展所需的全部矿产资源,这是矿产资源供需失衡和矿产资源安全问题出现的自然基础,自然因素有其稳定性(不以人力为转移),同时也有其复杂性(至今尚有大量问题未被研究清楚)。第二,矿产的开发、生产、利用和回收是经济现象,矿产资源能

否被采出变成矿产品并进一步被加工、使用和回收的决定因素是经济因素，即市场供需因素。矿产品有全球性的市场、区域性的市场和某一个国家、省份的市场，还有期货市场、现货市场等。市场变化（主要表现为价格）的复杂性和不确定性，造成了矿产资源安全的复杂性和不确定性。第三，人类社会的不确定性，是造成矿产资源安全系统日益复杂多变的根本原因，是决定矿产资源的自然属性在经济中如何表现的核心，包括科技、地缘政治、国家政策、企业行为等多个方面。大国博弈会对全球矿产资源的产业链供应链体系产生系统性冲击，带来全球原有矿产资源安全体系的重构，各方参与博弈主体的政策取向会影响系统的发展方向。当今社会正面临低碳转型，碳交易规则正在成为影响矿产品市场的重要因素，低碳转型的科技发展正在全方位改变全球矿产资源的需求格局。例如，新能源汽车动力电池技术的变化涉及锂、钴、镍、石墨、锰、镁、钠、钒等多种矿产资源，高镍低钴化的技术趋势会造成镍、钴需求的变化，钠电池的技术突破有可能改变现有锂电池的技术格局，这些都造成了矿产资源安全空前的复杂性和不确定性。

矿产资源安全涉及“能源-黑色金属-有色金属-非金属”多矿种，“国内-国外”多区域，“勘查-开发-加工-使用-回收-储备”多环节，产业规模巨大，“铁路/公路/管线-港口/口岸-航线-海峡”等运输通道多节点，“资源风险-社会风险-地缘风险-自然风险-投资环境风险”多要素，地质学、矿床学、采矿学、系统科学、经济学、社会科学、环境生态学、计算机科学等多学科。矿产资源安全巨系统是在矿产资源的自然、经济、社会三重属性共同作用下，各个子系统之间经过长期能量和信息交换而形成的一个有机整体，是一个复杂巨系统（见图1）。该系统的中心是矿产资源基本的自然属性，即元素的物理化学性质，决定了元素的分布、生产和使用方式；外围是经济社会属性作用下的多重多维复杂子系统，并与外部环境进行开放的能量和信息交换。矿产资源需求子系统和供应子系统在复杂的科技、政策、金融、贸易等复杂经济社会因子系统的共同作用下，不断相互匹配。当供应有效匹配需求时，系统能够稳定运行；当系统出现紊乱时，供需匹配失衡，矿产资源安全巨系统运行将出现问题。

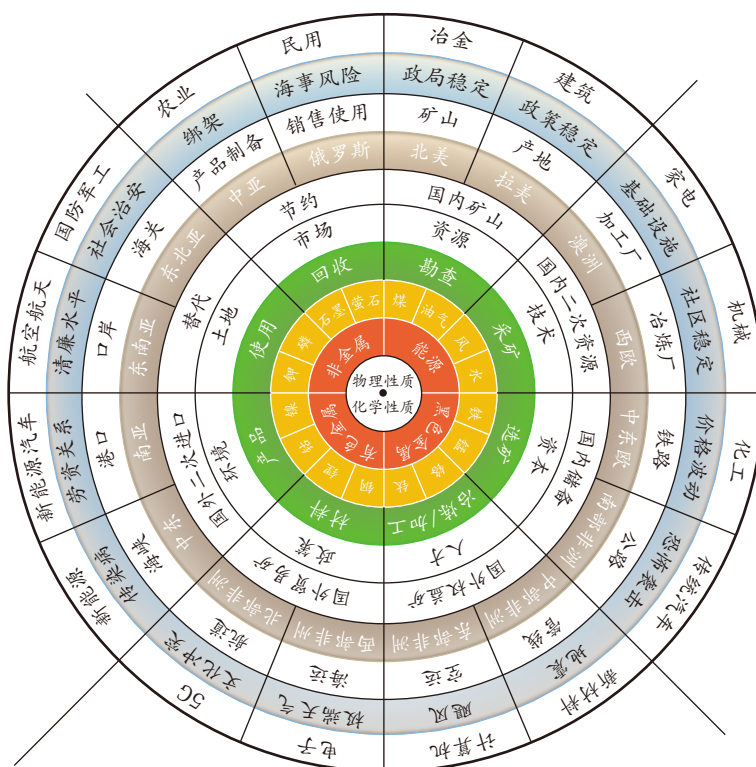


图1 矿产资源安全巨系统概念图
注：5G表示第五代移动通信。

（二）矿产资源安全巨系统的特征

一是系统性特征。矿产资源安全系统涉及多矿种、国内国外、产业链上下游，是一个庞大的巨系统，包括众多子系统，具有较强的系统性。从矿产资源的属性上看，矿产资源巨系统包括地质资源子系统、经济子系统、社会子系统。从资源的供需功能上看，包括供应子系统、需求子系统、市场子系统。从矿种上看，每一个矿种都是一个子系统。从产业链上看，资源勘查、开采、冶炼、加工、二次回收等每一个环节都是一个子系统。矿产资源巨系统的子系统众多，难以穷举。

二是层次性特征。“矿产资源安全巨系统”拥有众多层级子系统，无限延伸。例如，国家子系统下有省级子系统、县级子系统、矿山子系统、采矿子系统等。且微观、中观、宏观关联性强，某一项微观事件的爆发可能会导致一座矿山停产，某一座大型矿山的停产可能会造成某一类矿产供应中断，甚至会影响某一个国民经济行业的安全。

三是复杂性特征。矿产资源安全系统的影响因素复杂，包括资源、科技、政策、经济、社会、地缘政治、自然灾害等方面，相互影响、相互作用。例如，资源要素包括资源储量、赋存条件、矿石类型等；社会要素包括政局稳定性、恐怖主义、社区环境、文化冲突等；自然灾害要素包括地震、火山、飓风、极端天气等。同时，矿产资源安全系统既有系统内部和整体之间的复杂性，又有子系统相互作用的复杂性。

四是开放性特征。矿产资源安全系统与社会系统、科技系统、经济系统、地缘政治系统、军事系统以及不同国家资源安全系统是相互作用、相互影响的，存在能量和信息交换，尤其是与其他国家资源安全系统有较强的对抗性或互补性。因此，随着时间的不断变化，矿产资源安全系统也在不断发展变化。

三、矿产资源安全巨系统的结构

（一）矿产资源安全巨系统的层级关系

矿产资源安全巨系统与上下左右系统之间有3种层级关系。首先，矿产资源安全巨系统是更大的系统——国家安全巨系统的子系统，且相互之间有能量和信息交换。其次，矿产资源安全巨系统与经济

安全巨系统、国防安全巨系统、社会安全巨系统、粮食安全巨系统等是同一个层级的系统，地位和作用相同，且相互之间有一定的能量和信息交换。再次，矿产资源安全巨系统是由无数个子系统组成的，子系统下面又有子系统，且相互存在密切的能量和信息交换。

（二）矿产资源安全巨系统的组成结构

矿产资源安全巨系统是在宏观、中观、微观、渺观等不同尺度上，由资源子系统、经济子系统、社会子系统三大子系统以及子系统的子系统构成的，且随着时间的变化，巨系统在不断发展变化。矿产资源安全巨系统的组成结构可以按照系统的属性、空间尺度大小、时间维度进行刻画（见图2）。从系统的属性来看，资源子系统可划分为地质调查子系统、勘查子系统、采选子系统、冶炼加工子系统、应用与回收子系统、储备子系统、自然灾害子系统等；经济子系统可划分为产业子系统、科技子系统、政策子系统、需求子系统等；经济和资源子系统交汇处会出现市场子系统，市场子系统可划分为定价子系统、物流子系统、仓储子系统等；社会子系统可划分为地缘政治子系统、法律法规子系统、战争冲突子系统、人才子系统等。从系统的空间维度来看，矿产资源安全巨系统的子系统分为宏观、中观、微观、渺观等4个尺度，宏观尺度上有全球子系统/区域子系统/矿种子系统等，中观尺度上有国家子系统/省份子系统/成矿带子系统等，微观尺度上有企业子系统/矿山子系统等，渺观尺度上有矿体子系统/尾矿库子系统/冶炼厂子系统等；每一类具有相同功能的系统，都可以按照系统的空间维度来进行划分。从时间维度看，又可分为当前系统、近期系统、中期系统、远期系统等。

（三）子系统之间的能量和信息交换

子系统之间、层级系统之间有着密切的能量和信息交换，相互影响、共同发挥作用。从资源和社会两个子系统看，社会子系统对矿产资源安全的影响更加复杂和深刻，资源子系统更多影响的是矿产资源安全系统的底层结构。从需求子系统和供应子系统来看，一方面需求子系统可以影响供应子系统的规模效率；另一方面，供应子系统又会约束需求子系统的规模和效率，通过两者的能量和信息交

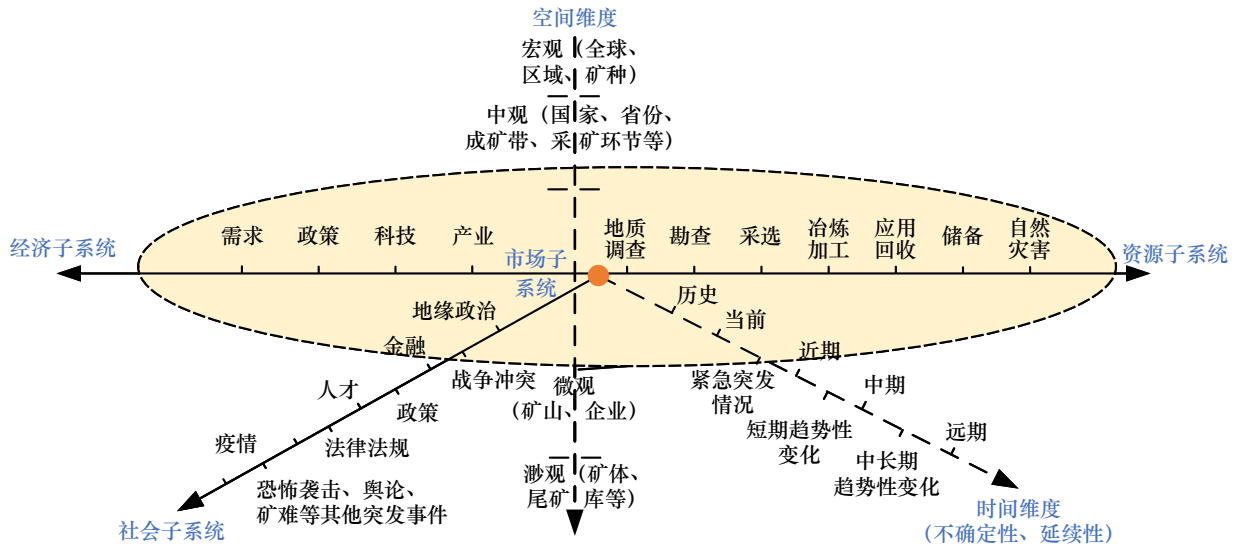


图2 矿产资源安全巨系统的组成结构

换，最终实现需求子系统和供应子系统的平衡。同时，国家间、产业间、企业间也存在不同层次的能量和信息交换，从而形成竞争或合作关系。从下级子系统和上级子系统的关系来看，有着密切的能量和信息交换，会相互影响。

时间维度是在所有尺度上、所有功能子系统都起作用的维度。时间是个连续体，矿产资源安全巨系统是一个处于不断发展变化中的系统，历史的因素会在当下起作用，当下的状态决定着未来的趋势。突发性的时间因素会造成系统的紊乱，系统内在的调整和运行会使其从紊乱状态回归平衡，如果造成系统紊乱的因素过于强烈，则会促使系统重整。当能量和信息交换及时有效时，系统结构会达到最优化，系统的整体功能也会达到最大化，反之则系统结构会趋于不合理，功能会出现紊乱。同时系统具有开放性，随着系统与外部能量与信息的交流，系统结构和形态也会不断发生变化。

四、矿产资源安全巨系统的驱动机理

矿产资源安全巨系统是一个有机整体，是在自然、经济、社会三重属性共同驱动下，通过各子系统之间能量和信息交换，不断发展演化并发挥作用。在这个有机整体中，经济属性往往具有较强的主动性，会主动作用于自然属性，可以解释为由于经济的发展，带动自然资源的开发利用。而自然属性又有一定的阈值，当经济属性的需求超过了自然

属性的阈值，自然属性就会反作用于经济属性。社会属性也往往具有较强的主动性，会主动作用于经济和自然两个属性，可以解释为由于国家间资源竞争加剧，限制了资源的供应，造成对经济发展的破坏。在各个子系统之间，各自也存在着不同的驱动机理，需要在未来不断的去研究拓展。下面从矿产资源的三重属性对“矿产资源安全巨系统”的驱动机理来进行初步探讨。

（一）经济属性对矿产资源安全巨系统的驱动机理

从矿产资源的经济属性出发，矿产资源的“经济子系统-产业子系统-资源需求子系统-矿业发展子系统”等多环节存在相互驱动关系，这些子系统间的相互驱动机理，可以用经济-资源-矿业发展全周期传导规律来解释（见图3）。一个国家经济

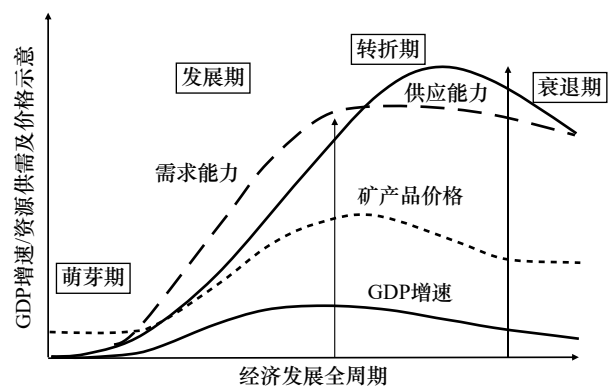


图3 经济-资源-矿业发展全周期传导规律
注：GDP表示国内生产总值。

发展的阶段和水平决定了矿产资源需求的种类和规模，资源需求拉动矿产资源的开发利用，矿产资源的经济发展水平和需求规模一定程度上决定着这个国家的矿业发展规模。从农业社会—工业化快速发展阶段—工业化中后期—后工业化阶段，随着经济的发展，产业结构不断演进，矿产资源需求的种类、结构和规模不断变化。例如，早期农业社会需要的矿产资源数量极少；进入工业化快速发展阶段，随着人口增长、工业化和城镇化的快速推进，煤炭、石油、铁、铜、铝等大宗矿产资源需求数量快速增加；到了工业化中后期，社会基础设施建设水平的不断完善，导致大宗基础原料矿产的需求逐步达到高位平台期，但战略性新兴产业的发展又引发了稀土、锂等关键矿产资源需求的上升，且产业结构越完整，所需要的矿产的种类数量越多、规模越大。矿产资源的供应在经济社会发展的不同时期随着需求变化而变化，由于矿产资源天然赋存于地表之下，人类勘查、开发矿产资源需要一个相对较长的周期，因此，在需求萌发的初期，矿产资源开发的滞后性造成其难以及时满足需求，供不应求引发资源价格的快速增加，而在工业化中后期，由于资源开发的滞后性，其需求的减少没有及时反馈至供应子系统，供应子系统的再度滞后造成供过于求和资源价格的下行。矿产品供应和价格的变化导致整个矿业呈现出从“萌芽期—发展期—转折期—衰退期”的周期

性演变。该演变过程揭示了矿产资源安全巨系统中经济子系统对资源子系统的驱动机理。需要说明的是，这一规律是在假定一个理想的、资源自给自足的走工业化道路的经济体下提出的规律，在实际环境中，其系统间相互作用的过程要更加复杂。

为进一步剖析产业子系统与矿种子系统的演化机理，在系统研究美国、日本等发达国家历史数据信息和经验的基础上，总结提出了资源—产业“雁行式”演进规律，揭示了单矿种子系统、产业子系统之间的相互作用机理以及矿种子系统的演化规律。从巨系统的角度看，不同产业在不同的经济和技术背景下，需要不同种类和不同数量的矿产资源，典型工业化国家产业发展遵循建筑→冶金→家电→机械制造→化工与汽车→电力→计算机、电子→新能源、新能源汽车→航天军工→其他新兴产业的由低级到高级的“雁行式”演进顺序，而支撑每一产业发展的主要矿产资源的消费峰值到来的时间以及相关矿业行业发展顶峰到来的时间也随之同步演进^[43]，即遵循钢铁、锰、钒等→铝、膨润土、叶蜡石等→铬、铜、镉等→镍、钨、钼等→铅、铋、铂族等→镓、铍、铟等→锂、稀土、萤石等的演进序列，各产业及相应矿产资源消费峰值整体呈“雁行式”演进（见图4）。该驱动机理揭示了矿产资源安全巨系统中产业子系统对矿种子系统的驱动机理。

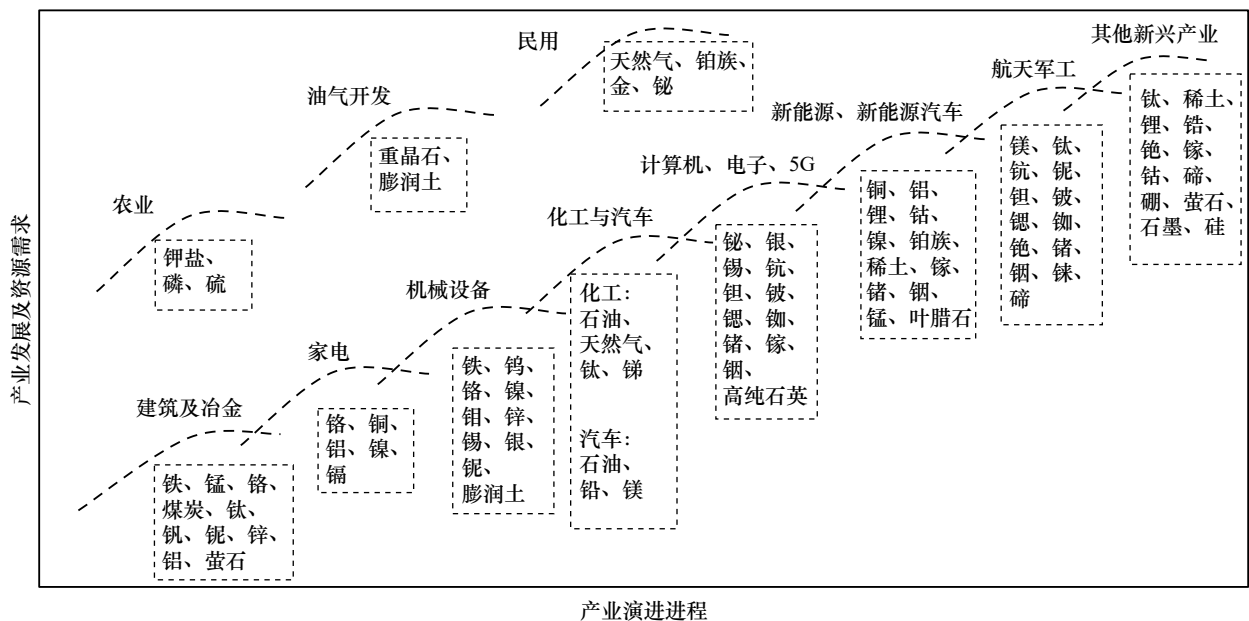


图4 资源—产业“雁行式”演进规律

(二) 自然属性对矿产资源安全巨系统的驱动机理

自然属性在一个国家矿产资源安全的基本结构中起决定作用，即矿产资源的禀赋状态，如我国的稀土、钨等资源较为丰富，在满足本国需求的同时还可以出口，参与他国的矿产资源安全系统，而我国的铬资源高度稀缺，只能通过进口来满足需求。不同国家的资源禀赋会形成不同的矿业发展状态，也会决定不同国家保障矿产资源安全的手段和方式。例如，日本、英国等国家由于资源匮乏，约束了矿业的发展，限制了国内矿产资源的供应，不得不依赖进口、储备、循环利用、节约利用、替代等手段解决资源安全问题，从而整体影响了其矿产资源安全系统的结构和状态。而加拿大、澳大利亚等国家资源丰富，不但能满足本国需求，还可以供应全球，因此其矿产资源安全系统与其他国家的安全系统具有较大的差异^[42]。这些例子充分体现了矿产资源的自然属性对矿产资源安全巨系统的驱动作用。

(三) 社会属性对矿产资源安全巨系统的驱动机理

社会属性对矿产资源安全的驱动关系极其复杂，其中国家矿产资源安全子系统演进以及国家矿产资源安全子系统之间的竞争博弈，是社会属性对资源安全驱动的一个重要体现。具体可以表现为，在矿产资源的有限性、分布的不均一性以及资源市场的垄断性的背景特征下，一个国家随着经济发展和综合实力的不断提升，其保障安全的需要意味着其不仅要发展国内矿业，还要在全球范围内获取资源，

发展其境外的矿产资源供应链体系，因而其矿产资源安全系统势必与他国产生竞争，地缘政治、军事、金融、科技、政策等手段都会成为与他国竞争博弈的手段。如果具备相近实力的竞争主体大于2个，就会造成国际矿产资源供应链的不稳定性和不确定性，此时各个国家需要不断调整自身的矿产资源安全系统结构和状态，以适应新的形势（见图5）。地缘竞争会演化成矿产资源的竞争，矿产资源的竞争是地缘竞争的重要体现。当前，世界各国均在调整本国的矿产资源战略政策，也是适应新的形势不断调整其矿产资源安全系统状态的表现。

五、矿产资源安全巨系统的研究方法：矿产资源安全系统工程学

针对矿产资源安全巨系统复杂性科技难题，研究团队借鉴钱学森的系统论思想，提出了矿产资源安全保障理论体系，揭示客观世界中矿产资源安全巨系统的结构形态、驱动机理，建设知识模型；其次，参照知识模型，构建大数据平台开展仿真实验研究，反复迭代逼近真实，得出优化结论；最后，将研究结论和建议反馈到决策主体，由决策主体通过调整政策、规划等手段最终来调节优化客观世界的资源安全巨系统。整个过程既要系统思维研究整体问题，又要借助现代化技术手段仿真模拟客观世界，还要将仿真结论在还原论思想指导下应用于

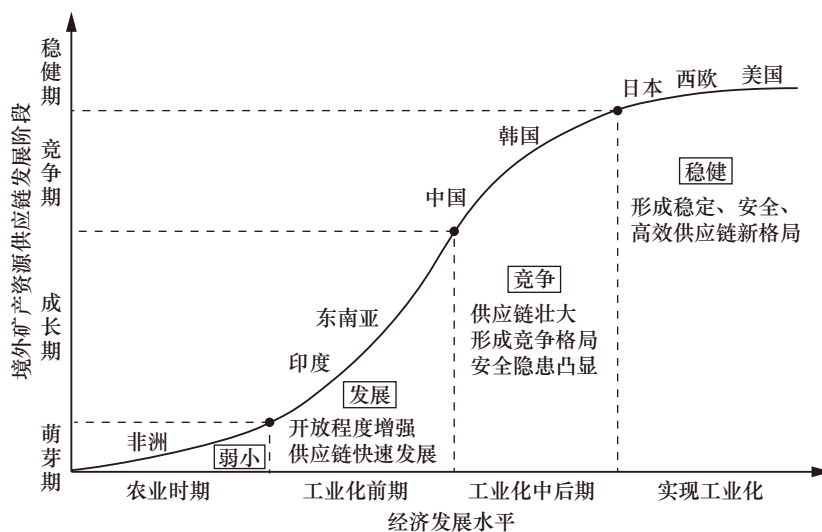


图5 矿产资源供应链安全演变规律

客观世界，将理论和实践、整体和局部、定性和定量、时间和空间有机结合起来，是一项系统工程，该研究方向即为矿产资源安全系统工程学。

(一) 以系统思维研究构建矿产资源安全保障的理论知识模型

以矿产资源安全巨系统为研究对象，采用系统思维方法研究和剖析巨系统的主要结构，研究子系统间相互运行的作用机理，形成矿产资源安全的理论知识模型。以我国的矿产资源安全保障实践为例，为对矿产资源安全进行动态仿真、模拟、监测，首先确立我国矿产资源安全的总体目标，即在任何状态下都能够经济、足量地满足国家经济社会发展对资源的总体需求。研究我国矿产资源的需求子系统，分析需求的主要矿种及其影响因素，总结随着经济社会发展和产业结构变化，我国矿产资源需求随之发生的趋势性变化特征；其次，研究我国矿产资源安全的供应子系统，包括我国矿产资源的禀赋特征、矿产资源供应链特征和产业链特征；依次地，研究全球矿产品市场子系统、我国矿产品市场子系统，全球地缘政治、产业政策、中国政策、环保等社会子系统。一级子系统间的相互作用构成子系统间关键指标相互影响的作用链，这些作用链将构成我国资源安全保障的理论知识模型，指导矿产资源安全巨系统的动态仿真和预测。

(二) 构建基于大数据平台的仿真实验系统

矿产资源安全巨系统的研究需借助大数据、云

计算和人工智能技术，将包含理论研究形成的子系统间关键指标相互影响的作用链转变成知识图谱，并让系统不断地进行深度学习、迭代、仿真实验，使系统反复迭代逼近真实，以期实现平台的智能化运行和决策指导（见图6）。以我国矿产资源安全研究实践为例，将矿产资源安全的历史本底数据及其复杂的影响因素数据集成，构建矿产资源安全巨系统大数据平台，经过反复实验和迭代构建形成一个虚拟的资源安全运行巨系统，当外部事件发生时，如局部的冲突事件发生，系统可以自动化运行事件的演化规率和对资源安全系统的影响概率、影响规模及损失，并给出系统响应的最优策略。

(三) 积极推动政府决策与反馈

巨系统的仿真结果需要反馈至外部世界，指导外部世界的实践。因此，一个国家的矿产资源安全巨系统平台需要由国家部门组织专家力量进行建设和运行。系统运行的结论和建议要及时反馈到决策主体，由决策主体通过调整政策、规划等手段最终来调节客观世界系统。决策部门需要根据决策的建议做顶层设计，由各级政府部门、科研机构、行业协会、地勘单位、矿业企业统一协作，通过科技研发、工程建设、产品进出口贸易等手段，完成顶层设计的任务目标。在决策执行过程中，会形成一个评估和反馈机制，现实世界的反馈信息要进一步在系统中进行模拟，进而及时调整决策的方向，最终实现由决策主体通过调整政策、规划等手段调节客观世界系统，保障国家的矿产资源安全（见图7）。

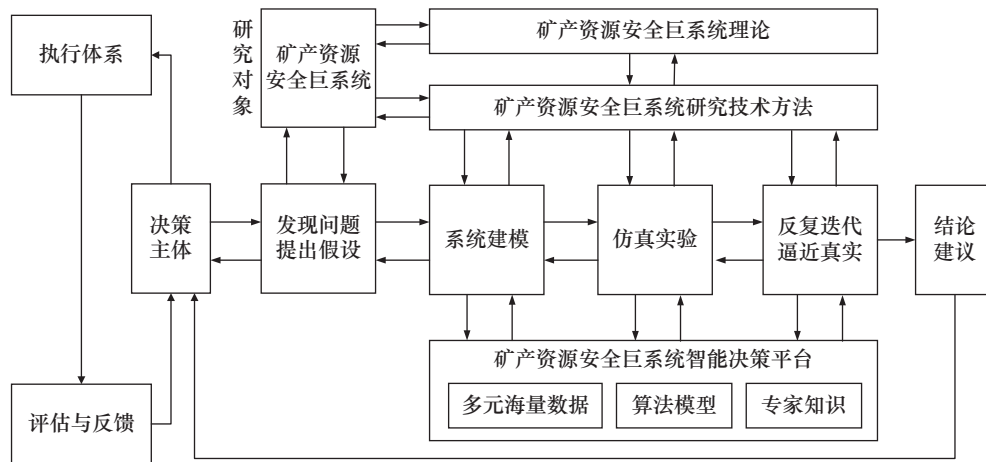


图6 矿产资源安全巨系统的研究框架

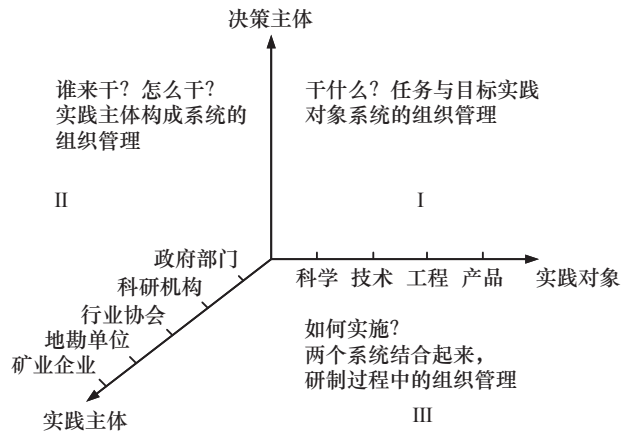


图7 矿产资源安全巨系统的管理决策实施框架

（四）研究实践

长期以来，笔者研究团队坚持以系统性的思维研究矿产资源安全问题。一是不断探索矿产资源安全巨系统子系统之间的运行和驱动机理^[42-44]。二是高度重视整体性研究。例如，在全矿种的优选评价上，提出了战略性矿产二维评价技术，为国家首次厘定战略性矿产目录奠定了理论技术基础^[9]。又如，为了综合衡量一个国家的矿产资源安全状况，提出了总需求、总供应和总体对外依存度、通道依存度的概念和评价方法，提出了围绕整个供应链条的综合评价理论技术^[45]和全链条的保障战略建议。三是始终坚持围绕矿产资源安全不同空间和时间维度下各个子系统开展精细化研究，如在石油、铁、铜、锂、钴、镍等单矿种，美国、日本、欧洲、俄罗斯、印度、中亚、非洲和东南亚等重点国家和地区，重点矿山以及重点企业等不同维度上开展精细化研究，并已初步搭建了全球性矿产资源安全巨系统大数据平台。研究成果在中国工程院“矿产资源强国战略”^[46]、“国家关键矿产及其材料产业供应链高质量发展战略”^[47]两项咨询项目中得到了系统应用，对自然资源部“全国矿产资源国情调查与潜力评价”项目起到了理论支撑，并将进一步在国家矿产资源增储上产、区块出让等重大工作中发挥作用，更好保障国家矿产资源安全。

六、结语

本文针对矿产资源安全复杂性特征，将矿产资源安全整体作为一个系统，提出了矿产资源安全巨

系统的概念、特征、结构和运行机理，构建了基于大数据平台的矿产资源安全巨系统研究的方法论，提出了矿产资源安全系统工程学研究新方向。矿产资源安全巨系统概念和理论技术体系的提出，一方面是基于当下日益复杂的国际环境，另一方面是基于笔者研究团队多年研究经验的集成性思考，有利于应对我国当前复杂严峻的资源保障形势，系统提升我国矿产资源的安全保障能力。

钱学森认为，复杂的总体协调任务不可能靠一个人完成，因为他不可能精通整个系统所涉及的全部专业知识，这就要求以一种组织、一个集体来对这种大规模协调活动进行统一指挥^[29]；提出了总体设计部的思路，成功指导了我国军事、国防、航天等各个部门的科技研发。在当前形势下，我国矿产资源安全巨系统问题的解决，也需要配备由相关的战略专家、各级决策主体和智能化平台组成的总体设计部，协调多部门、多主体，协调局部利益与整体利益、短期经济利益与安全利益、生态利益与安全利益等多种利益主体，能够依靠智能化平台动态监测、预警国家矿产资源安全状况，提出实时决策，共同保障国家矿产资源安全长治久安。尽管如此，矿产资源安全巨系统的研究框架还需继续发展和深化，力争建成虚拟矿产资源运行巨系统，以科学、高效、及时、智慧地应用于矿产资源安全保障的实践和决策。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: September 17, 2023; **Revised date:** October 26, 2023

Corresponding author: Chen Qishen is a research fellow from the Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences. His major research fields include mineral resources investigation and evaluation, security and management. E-mail: chenqishen@126.com

Funding project: Project of China Geological Survey, Ministry of Natural Resources (DD20211405, DD20230040); National Natural Science Foundation of China (42271281)

参考文献

- [1] International Energy Agency. The role of critical minerals in clean energy transitions [EB/OL]. (2022-06-04)[2023-05-22]. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>.
 - [2] 曹宛鹏. 美国在南海及周边地区的军事权力增长及军事存在演变 [J]. 世界地理研究, 2022, 31(4): 726-736.
- Cao W P. The growth of U.S. military power and evolution of its

- military presence in the South China Sea and its surrounding areas [J]. *World Geographical Research*, 2022, 31(4): 726–736.
- [3] 张雅丽, 陈丽萍, 陈静, 等. 主要发达国家矿产资源安全保障战略 [J]. *国土资源情报*, 2019 (11): 24–30.
Zhang Y L, Chen L P, Chen J, et al. Security strategy of mineral resource sin major developed countries [J]. *Land and Resources Information*, 2019 (11): 24–30.
- [4] 陈其慎, 张艳飞, 邢佳韵, 等. 新冠疫情以来全球矿业发展态势 [N]. *中国矿业报*, 2021-10-22(02).
Chen Q S, Zhang Y F, Xing J Y, et al. Global mining development since COVID-19 [N]. *China Mining News*, 2021-10-22(02).
- [5] 陈甲斌, 刘超, 冯丹丹, 等. 矿产资源安全需要关注的六个风险问题 [J]. *中国国土资源经济*, 2022, 35(1): 15–21.
Chen J B, Liu C, Feng D D, et al. Six risk prob lens of mineral resources security need to focus on [J]. *Natural Resource Economics of China*, 2022, 35(1): 15–21.
- [6] European Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. European critical raw materials act [EB/OL]. (2023-03-16)[2023-05-22]. https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/european-critical-raw-materials-act_en.
- [7] U.S. Department of Commerce. A federal strategy to ensure secure and reliable supplies of critical minerals [EB/OL]. (2019-06-04) [2023-05-22]. <https://www.commerce.gov/data-and-reports/reports/2019/06/federal-strategy-ensure-secure-and-reliable-supplies-critical-minerals>.
- [8] Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan. 重要鉱物に係る安定供給確保を図るための取組方針 [EB/OL]. (2023-01-19) [2023-05-22]. https://www.meti.go.jp/policy/economy/economic_security/metal/index.html.
- [9] 陈其慎, 张艳飞, 邢佳韵, 等. 国内外战略性矿产厘定理论与方法 [J]. *地球学报*, 2021, 42(2): 137–144.
Chen Q S, Zhang Y F, Xing J Y, et al. Methods of strategic mineral resources determination in China and abroad [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2021, 42(2): 137–144.
- [10] 陈其慎, 张艳飞, 倪善芹, 等. 日本矿产资源经略强国战略分析 [J]. *中国矿业*, 2017, 26(12): 8–15.
Chen Q S, Zhang Y F, Ni S Q, et al. Discussion on the mineral resources strategic power in Japan [J]. *China Mining Magazine*, 2017, 26(12): 8–15.
- [11] 邢佳韵, 陈其慎, 龙涛, 等. 发达国家战略性矿产安全保障举措及启示 [J]. *自然资源情报*, 2023 (1): 28–36.
Xing J Y, Chen Q S, Long T, et al. Research on critical minerals security strategy of developed countries [J]. *Natural Resources Information*, 2023 (1): 28–36.
- [12] 葛建平, 刘佳琦. 关键矿产战略国际比较——历史演进与工具选择 [J]. *资源科学*, 2020, 42(8): 1464–1476.
Ge J P, Liu J Q. International comparison of critical mineral strategies: Historical evolution and tool selection [J]. *Resources Science*, 2020, 42(8): 1464–1476.
- [13] 王礼茂, 郎一环. 中国资源安全研究的进展及问题 [J]. *地理科学进展*, 2002 (4): 333–340.
Wang L M, Lang Y H. Progress and problems of resources security studies in China [J]. *Progress in Geography*, 2002 (4): 333–340.
- [14] 姚子龙, 谷树忠. 资源安全机理及其经济学解释 [J]. *资源科学*, 2002 (5): 46–51.
Yao Y L, Gu S Z. Mechanism and economic definition of resources security [J]. *Resources Science*, 2002 (5): 46–51.
- [15] 谷树忠, 姚子龙, 沈镭, 等. 资源安全及其基本属性与研究框架 [J]. *自然资源学报*, 2002 (3): 280–285.
Gu S Z, Yao Y L, Shen L, et al. Conceptual framework and research focus of resource security [J]. *Journal of Natural Resources*, 2002 (3): 280–285.
- [16] 沈镭, 成升魁. 论国家资源安全及其保障战略 [J]. *自然资源学报*, 2002 (4): 393–400.
Shen L, Cheng S K. On the national resources security and its guaranteeing strategies [J]. *Journal of Natural Resources*, 2002 (4): 393–400.
- [17] 第8号国情报告. 两种资源两个市场——构建中国资源安全保障体系研究 [J]. *科学新闻*, 2001, 173(2): 24–25.
National Report No. 8. Two resources and two markets—Research on building China’s resource security guarantee system [J]. *Science News*, 2001, 173(2): 24–25.
- [18] 欧强, 马哲, 李天骄. 中国小金属海外供应安全评价 [J]. *中国矿业*, 2019, 28(8): 56–60.
Ou Q, Ma Z, Li T J. Security assessment of overseas supply of China’s minor metals [J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(8): 56–60.
- [19] 孙永波, 汪云甲. 矿产资源安全评价指标体系与方法研究 [J]. *中国矿业*, 2005 (4): 36–37.
Sun Y B, Wang Y J. The study of evaluating index system and way in mineral resources security [J]. *China Mining Magazine*, 2005 (4): 36–37.
- [20] 马伟东, 古德生. 我国铁矿资源基础安全评价研究 [J]. *矿冶工程*, 2008, 28(6): 5–7.
Ma W D, Gu D S. Research on safety evaluation of iron ore resource in China [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2008, 28(6): 5–7.
- [21] 周娜, 吴巧生, 薛双娇. 新时代战略性矿产资源安全评价指标体系构建与实证 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(12): 55–65.
Zhou N, Wu Q S, Xue S J. A new security evaluation framework of strategical minerals in the new era [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(12): 55–65.
- [22] 田郁溟, 琚宜太, 周尚国. 我国战略矿产资源安全保障若干问题的思考 [J]. *地质与勘探*, 2022, 58(1): 217–228.
Tian Y M, Ju Y T, Zhou S G. Thinking on several problems of China’s strategic mineral resources security guarantee [J]. *Geology and Exploration*, 2022, 58(1): 217–228.
- [23] 彭忠益, 卢珊, 胡翱. 大数据驱动下国家矿产资源安全现代化治理: 逻辑理路与模式构建 [J]. *中南大学学报(社会科学版)*, 2023, 29(2): 11–21.
Peng Z Y, Lu S, Hu A. Big-data-driven national mineral resources security management: Logical path and model construction [J]. *Journal of Central South University (Social Sciences)*, 2023, 29(2): 11–21.
- [24] 钱学森. 开创复杂巨系统的科学与技术——祝中国系统工程学会第八届学术年会的召开 [J]. *系统工程理论与实践*, 1995 (1): 1–2.
Qian X S. Science and technology for creating complex giant systems—Wishing the 8th academic annual meeting of the Chinese society of systems engineering [J]. *Systems Engineering-Theory*

- & Practice, 1995 (1): 1–2.
- [25] 钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论 [J]. 自然杂志, 1990 (1): 3–10.
Qian X S, Yu J Y, Dai R W. A new field of science—Open complex giant systems and their methodology [J]. Chinese Journal of Nature, 1990 (1): 3–10.
- [26] 于景元. 钱学森系统科学思想和系统科学体系 [J]. 科学决策, 2014 (12): 2–22.
Yu J Y. Qian Xuesen's system science thought and system science system [J]. Scientific Decision Making, 2014 (12): 2–22.
- [27] Boulding K E. General systems theory: The skeleton of science [J]. Management Science, 1956, 2(3): 197–286.
- [28] Backlund A. The definition of system [J]. Kybernetes, 2000, 29(4): 444–451.
- [29] 李明华. 航天复杂巨系统工程管理体系及实施初探 [J]. 工程研究—跨学科视野中的工程, 2020, 12(2): 155–163.
Li M H. Preliminary exploration of engineering management system of complex giant aerospace system and implementation [J]. Journal of Engineering Studies, 2020, 12(2): 155–163.
- [30] 姚监复. 农业机械化是农业巨系统的子系统 [J]. 农业工程, 2011, 1(1): 14–15.
Yao J F. Agricultural mechanization is the subsystem of agricultural giant system [J]. Agricultural Engineering, 2011, 1(1): 14–15.
- [31] 李少华, 董增川, 董四方. 水资源复杂巨系统及其和谐性探析 [J]. 水利发展研究, 2007 (7): 10–14.
Li S H, Dong Z C, Dong S F. Analysis on the complex giant system of water resources and its harmony [J]. Water Resources Development Research, 2007 (7): 10–14.
- [32] 钱学森. 系统科学、思维科学与人体科学 [J]. 福建体育科技, 1996 (3): 57–63.
Qian X S. Systems science, thinking science and somatic science [J]. Fujian Sports Science and Technology, 1996 (3): 57–63.
- [33] 钱学森. 现代地理科学系统建设问题 [J]. 地理环境研究, 1989 (2): 1–6.
Qian X S. On the construction of modern geographic science systems [J]. Geographical Environment Research, 1989 (2): 1–6.
- [34] 钱学森, 许国志, 王寿云. 组织管理的技术——系统工程 [J]. 上海理工大学学报, 2011, 33(6): 520–525.
Qian X S, Xu G Z, Wang S Y. The technology of organization and management—Systems engineering [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2011, 33(6): 520–525.
- [35] Ahlborg H, Ruiz-Mercado I, Molander S, et al. Bringing technology into social-ecological systems research — Motivations for a socio-technical-ecological systems approach [J]. Sustainability, 2019, 11(7): 2009.
- [36] Dearing J A, Braimoh A K, Reenberg A, et al. Complex land systems: The need for long time perspectives to assess their future [J]. Ecology & Society, 2010, 15(4): 1–19.
- [37] Polhill J G, Edmonds B. Cognition and hypocognition: Discursive and simulation-supported decision-making within complex systems [J]. Futures, 2023 (148): 103121.
- [38] Yu C H, Zhu Y P, Luo H T, et al. Design assessments of complex systems based on design oriented modelling and uncertainty analysis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023 (188): 109988.
- [39] Li A, Grimm V, Sullivan A, et al. Ecological modelling [J]. Ecological Modelling, 2021 (457): 109685.
- [40] Bithell M, Edmonds B. The systematic comparison of agent-based policy models—It's time we got our act together! [J]. Review of Artificial Societies and Social Simulation, 2021: 77046.
- [41] Yang M, Sun Hao, Geng S Y. On the quantitative resilience assessment of complex engineered systems [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023 (174): 941–950.
- [42] 陈其慎, 于汶加, 张艳飞, 等. 矿业发展周期理论与中国矿业发展趋势 [J]. 资源科学, 2015, 37(5): 891–899.
Chen Q S, Yu W J, Zhang Y F, et al. Mining development cycle theory and development trends in Chinese mining [J]. Resources Science, 2015, 37(5): 891–899.
- [43] 陈其慎, 于汶加, 张艳飞, 等. 资源—产业“雁行式”演进规律 [J]. 资源科学, 2015, 37(5): 871–882.
Chen Q S, Yu W J, Zhang Y F, et al. Resources-industry 'flying geese' evolving pattern [J]. Resources Science, 2015, 37(5): 871–882.
- [44] 陈其慎, 张艳飞, 邢佳韵, 等. 矿产资源供应基地评价与供应链调查理论技术方法 [J]. 地球学报, 2021, 42(2): 159–166.
Chen Q S, Zhang Y F, Xing J Y, et al. Theoretical and technical methods of mineral resource supply base evaluation and supply Chain investigation [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021, 42(2): 159–166.
- [45] 任鑫, 张艳飞, 邢佳韵, 等. 我国硫酸镍产业发展趋势及对策研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 40–48.
Ren X, Zhang Y F, Xing J Y, et al. Development trend and countermeasures of nickel sulfate industry in China [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 40–48.
- [46] 陈其慎, 干勇, 延建林, 等. 从矿产资源大国到矿产资源强国: 目标、措施与建议 [J]. 中国工程科学, 2019, 21(1): 49–54.
Chen Q S, Gan Y, Yan J L, et al. Transition from a large to a powerful country in mineral resources: Objectives, measures and proposals [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(1): 49–54.
- [47] 干勇, 彭苏萍, 毛景文, 等. 我国关键矿产及其材料产业供应链高质量发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 1–9.
Gan Y, Peng S P, Mao J W, et al. High-quality development strategy for the supply chain of critical minerals and its material industry in China [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 1–9.