2025 年 9 月 地 球 学 报 Sep. 2025
第 46 卷 第 5 期: 895-900 Acta Geoscientica Sinica Vol.46 No.5: 895-900
www.cagsbulletin.com

“全量矿产资源系统”理论技术框架

陈其慎[1)], 张德会[2)], 李 强[1)], 张艳飞[1)], 戢兴忠[1)], 王 琨[1)], 蒋宗胜[1)], 李振清[1)], 丁建华[1)], 杨郧城[1)], 余金杰[1)]

1)中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
2)中国地质大学(北京), 北京 100083

摘 要: 随着全球矿产资源格局的重大变化, 传统矿产资源概念范畴受到挑战, 需要重新审视矿产资源范畴, 重新评价矿产资源的数量。本文针对当前严峻的矿产资源形势, 结合国内外生产实践, 探讨了矿产资源的范畴, 界定了“全量矿产资源系统”的概念、范畴、组成结构, 阐释了系统的三大性质, 提出了“资源透视—智能评价—科学利用”全量矿产资源研究技术路线, 探讨提出了基于赋存状态的全量资源透视技术、生产矿山可利用性三维评价方法、未利用矿区可利用性智能评价技术、再生资源可利用性评价方法等全量矿产资源系统研究方法, 以期为客观掌握矿产资源家底、最大可能提高资源保障能力提供理论和方法支撑。

关键词: 矿产资源; 全量矿产资源系统; 资源透视技术; 可利用性

中图分类号: P624.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2025.030201

Theoretical and Technical Framework of the “Full-scale Mineral Resource System”

CHEN Qishen[1)], ZHANG Dehui[2)], LI Qiang[1)], ZHANG Yanfei[1)], JI Xingzhong[1)], WANG Kun[1)], JIANG Zongsheng[1)], LI Zhenqing[1)], DING Jianhua[1)], YANG Yuncheng[1)], YU Jinjie[1)]

1) *Institute of Mineral Resources*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100037;
2) *China University of Geosciences* (*Beijing*), *Beijing* 100083

Abstract: With significant changes in global mineral resource patterns, the traditional concept and scope of mineral resources have been challenged, necessitating a re-examination. In response to the current severe mineral resource situation, this study, along with domestic and international production practices, explores the scope of mineral resources and defines the concept, extent, and composition structure of the “total mineral resource system”. This study summarizes the three major properties and proposes a research technical route of “resource perspective –intelligent evaluation–scientific utilization” for total mineral resources. It discusses and proposes several research methods for the total mineral resource system, such as total resource perspective technology based on the occurrence state, a three-dimensional evaluation method for the availability of production mines, an intelligent evaluation technology for the availability of unexploited mining areas, and evaluation methods for the availability of recycled resources. These methods aim to provide a theoretical and methodological support to objectively grasp the status of mineral resources and maximize the resource’s guarantee capacity.

Key words: mineral resource; total mineral resource system; resource perspective technology; scientific utilization

矿产资源的分布赋存总体是连续的, 埋深从浅到深, 品位从高到低, 共伴生元素含量从多到少, 矿石类型、矿物类型复杂多样, 赋存状态众多。但是, 按照资源储量评价原则, 只有技术经济可行或者预期可行的才能称之为矿, 截然把“矿石”与“岩石”分开来, 矿产资源天然的连续性被“一刀两断”,

本文由深地国家科技重大专项项目(编号: 2024ZD1002000)、中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20230040)和国家自然科学面上基金项目(编号: 42271281)联合资助。
收稿日期: 2025-01-15; 改回日期: 2025-02-21; 网络首发日期: 2025-03-03。责任编辑: 闫立娟。
第一作者简介: 陈其慎, 男, 1979 年生。研究员, 博士生导师。主要从事矿产资源调查评价、安全保障与管理方面的研究。通信地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: chenqishen@126.com。

这种情况与生产实践也不完全相符。全球矿产资源形势已出现三大转变，正在挑战现有资源评价原则：一是从未来的供需格局来看，新一轮科技革命带动矿产资源需求快速增长，人类利用矿产的种类愈多、数量愈大，供应偏紧局面出现(陈其慎等, 2023)。人类利用的矿产资源种类和数量从数千年持续利用的几种金属到利用周期表中几乎所有自然元素。二是从技术水平来看，资源勘查、开发、选冶技术装备水平不断提高，越来越多的技术经济不可行的资源正在转变为经济可行的资源(陈希廉，2007; 陈希廉等，2010)。例如，金矿的边界品位从20世纪60年代的平均约6 g/t降至目前的约1 g/t(Laznicka, 2014)；大量超贫的磁铁矿(TFe品位为8%~20%左右)的资源也已经在开发和利用。三是从国际资源安全形势看，资源供应风险增加，各国开始努力提升本国资源供应能力，技术可行经济不可行的资源也被考虑纳入到资源保障系统中。在此背景下，通过加大技术攻关、财税补贴，开发利用低品位资源、深部资源、共伴生资源、难利用资源、关停矿山资源、城市矿产资源等，成为世界各国解决资源供应安全的重要手段(Simoni et al., 2024；余金杰等, 2025；丁建华等, 2025；戢兴忠等, 2025a, b)。如，美国加快研究从煤炭中提取稀土及其他关键元素(U.S. Department of Energy, 2023)，欧洲重启镁矿山开采，日本强制企业从废旧产品中回收稀有金属。

显然，随着全球矿产资源格局的重大变化，世界各国所开发利用的资源，已经超越了传统矿产资源概念的范畴，需要重新审视矿产资源的范畴，重新评价矿产资源。基于此，本文提出了“全量矿产资源系统”理论框架和“资源透视—智能评价—科学利用”的全量矿产资源研究技术路线，以期为客观掌握矿产资源家底、最大可能提高资源保障能力提供理论和方法支撑。

1 矿产资源的范畴

1.1 有关法规中矿产资源的范畴

美国地质调查局界定矿产资源是在地壳中自然形成的固体、液体或气体聚集物，其形式和数量目前或潜在可被经济地提取(U.S. Geological Survey, 2025)。Haldar et al.(2014)认为矿产资源是由有用浓度组成的矿床，这些浓度可能会也可能不会超过获得有价值矿物的经济成本。据《中华人民共和国矿产资源法》(中华人民共和国全国人民代表大会常务委员会, 2024)，矿产资源是指由地质作用形成、具有利用价值的，呈固态、液态、气态等形态的自然资源。据《固体矿产资源储量分类标准2020》(国家市场监督管理总局等, 2020)，固体矿产资源量是指“经矿产资源勘查查明并经概略研究，预期可经济开采的固体矿产资源”。

两个概念均提到“矿产资源”的界定标准，前者是“具有利用价值”，后者是“预期可经济开采”，前者强调“有用”，后者强调“能赚钱”，显然前者的范畴要大于后者。在评估矿产资源储量时，储量评估师以“预期可经济开采”为标准，划分“矿石”与“岩石”，预期可经济开采的即为矿产资源。但是，以“预期可经济开采”来代替“具有利用价值”，明显缩小了矿产资源的范畴。

1.2 生产实践中矿产资源的范畴

在生产实践中，随着技术不断进步，技术不可行的资源也可能转化为技术可行的资源，经济不可行的资源也可能转化为经济可行的资源，反之，也是存在的。以利用价值的视角来看，为保障国家资源安全，即便是经济不可行的资源，如果技术可行，也具有利用价值，也符合《中华人民共和国矿产资源法》对矿产资源的界定。无论是按照《中华人民共和国矿产资源法》对矿产资源的界定，还是考虑国内外生产实践，按照“预期可经济开采”原则来确定矿产资源，显然缩小了矿产资源的范畴，低估了矿产资源的实际数量。

1.3 资源保障工作中矿产资源的范畴

要最大化提高国内资源保障能力，通常要考虑三方面资源供应来源：一是经济可行的矿产资源，二是技术可行的矿产资源，三是城市矿产资源(再生资源)。美国、欧盟、日本均将再生资源的利用作为资源安全的重要保障手段。如欧盟为保障本土产业链供应链稳定，要求到2030年，欧盟内部再生资源的数量不低于消费量的25%(European Commission, 2023b)。我国为保障国家矿产资源安全，高度重视再生资源的利用，2024年印发了《国务院办公厅关于加快构建废弃物循环利用体系的意见》，明确了废钢铁、废铜、废铝等再生资源利用目标(国务院办公厅, 2024)。因此，在矿产资源安全保障工作中，资源的范畴进一步扩大了，既包括矿产资源，还包括再生资源。

基于以上分析，我们要重新审视什么是矿产资源，如何评价矿产资源，如何利用好矿产资源。应还原矿产资源本来面目，让矿产资源的判定原则回归“具有利用价值”，将全部的矿产资源都纳入到资源勘查评价工作中来，以扩大资源量，提高保障能力，最大限度保障资源安全。

2 “全量矿产资源系统”理论框架

2.1 “全量矿产资源系统”概念

“全量矿产资源系统”定义为，在成矿地质作

用、资源勘查开发、加工使用等过程中赋存、转化、运移的具有利用价值的全部数量的矿产资源系统。

2.2　“全量矿产资源系统”范畴

全量矿产资源系统是由具有利用价值的全元素/全矿物、全赋存状态、全品位、全开发利用状态、全生命周期的各类资源组成的集合体。

(1)全元素/全矿物：包括全部主矿产、共伴生矿产相关成矿元素和矿物。

(2)全赋存状态：包括单质(元素)、矿物形式(载体矿物、富集矿物)、类质同象、吸附等不同的赋存状态。

(3)全品位：包括超低品位矿、低品位矿、工业品位矿等全品位覆盖(图1)。

(4)全开发利用状态：包括生产矿山、停产矿山、关闭矿山、已利用矿区、未利用矿区、潜在资源等所有开发利用状态的资源。

(5)全生命周期：包括地质勘查—矿山建设—采矿—选矿—冶炼分离—加工—消费—回收利用贯穿全生命周期的资源。

需要说明的是，按照矿产资源的定义，再生资源并不属于矿产资源，但再生资源是矿产资源全生命周期中的一个重要环节，是国家资源安全保障的重要组成部分，因此，本文将再生资源也纳入“全量矿产资源系统”中一并考虑(图2)。

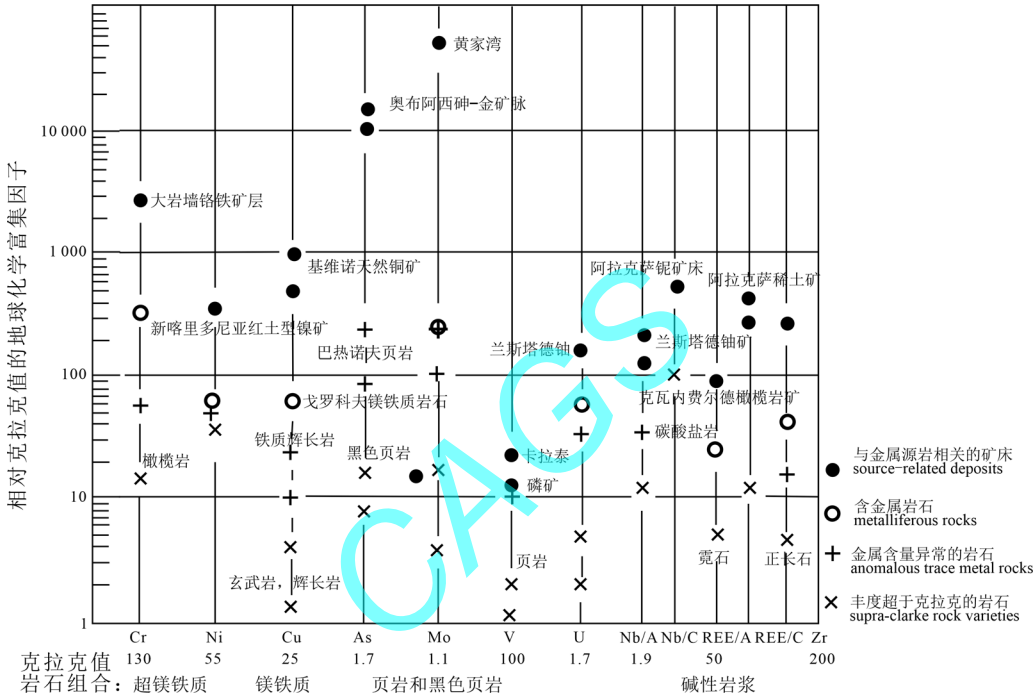

图 1　部分金属品位从岩石到矿石的连续分布(据 Laznicka, 2014)

Fig. 1　Continuous distribution of some metal grades from rock to ore (from Laznicka, 2014)

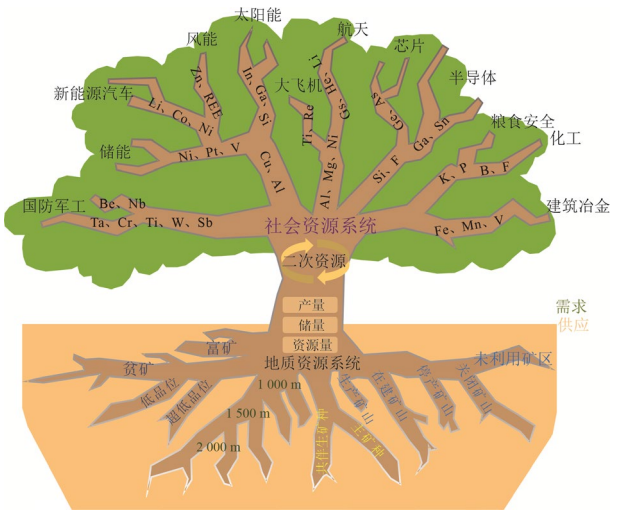

图 2　全量矿产资源系统理论框架

Fig. 2　Framework of the theory of “Full-scale Mineral Resource System”

2.3　“全量矿产资源系统”组成结构

全量矿产资源系统又可以由不同类型的子系统组成。按照自然界和人类社会来划分，全量矿产资源系统是由地质资源系统和社会资源系统两大子系统组成。按照矿种划分，可以分为全量铁矿资源系统、全量铜资源系统、全量锂矿资源系统等。按照成矿地质作用，每一个成矿系统或矿体都可以称之为一个全量矿产资源系统。按照再生资源来说，每一个城市或每一个产业，都可以是一个全量资源系统(图2)。

2.4　“全量矿产资源系统”的性质

全量矿产资源系统具有系统性、活化性、开放性三大性质。

(1)系统性：全量矿产资源系统是由全部有利用价值的资源组成的集合体，不同类型的资源汇聚形

成了保障国家资源安全的“蓄水池”，是一个有机整体，共同发挥作用。

(2)活化性：“有利用价值”是确定矿产资源的原则，随着科技进步和经济社会发展，全量矿产资源系统中的资源是否有利用价值，是一个动态变化且可逆的过程。

(3)开放性：根据矿产资源安全巨系统理论，全量矿产资源系统是矿产资源安全巨系统的资源子系统，它受社会系统、自然灾害系统等外部系统的影响，同时也会对这些系统产生影响(陈其慎等，2023)。

3 全量矿产资源研究技术方法探讨

全量矿产资源系统研究的总体技术路线是“资源透视—智能评价—科学利用”，一是要通过一定的技术方法，实现资源透视，尽最大可能扩充资源范围，摸清资源整体状况，做到全量化。二是针对全量矿产资源系统开展科学评价研究，包括成矿规律、元素赋存规律、选冶性能、资源消费、资源回收利用等不同方面的评价研究工作，快速评价可开发利用的资源数量，做到增量化，并找出制约资源开发利用的关键问题。三是针对科学评价的结论，提出合理保护和科学利用资源的建议。部分技术方法如下。

3.1 基于赋存状态的全量资源透视技术

随着三维建模技术的普及，国内大量矿区已有丰富的成矿元素三维模型，可以在成矿元素含量模型的基础上，统计分析共伴生矿产的含量，研究成矿元素在地层、断层、矿体中的空间富集规律及不同元素含量相关性，推断共伴生矿产资源分布情况。结合未上表的低品位、共伴生资源情况，圈定出矿床较完整的矿化域，采用克里金插值法等地质统计学方法，建立全量资源三维透视模型，精细研究刻画成矿机理，丰富完善现有成矿理论，结合地、物、化、遥数据资料，预测现有矿山深边部资源潜力，研究主元素和共伴生元素之间赋存规律，推动共伴生资源的再评价，通过资源透视实现资源的全量化。

3.2 生产矿山可利用性三维评价方法

研究生产矿山建设成本和经营成本、采矿贫化率、选矿回收率、市场价格等要素，采用《矿床工业指标论证技术要求》(DZ/T0339-2020) (中华人民共和国自然资源部，2020)，建立边际品位-价格曲线。基于生产矿山全量资源三维透视模型，以矿块为单元计算平均品位和资源量，根据边际品位-价格曲线，形成三维矿体经济模型，智能评价出不同价格下生产矿山可利用的资源量和空间分布，通过评价实现资源的增量化。

3.3 未利用矿区可利用性智能评价技术

采用神经网络、Xgboost等机器学习算法，对生产矿山已知信息进行智能学习，厘定影响矿山成本的矿床类型、矿石工业类型、资源储量规模、矿体埋深、矿石品位、矿体厚度、开采方式、开采回采率、选矿方法、水电路等关键因子，提取成本影响因子关键参数，建立不同矿产成本智能评价模型。基于成本智能评价模型，分矿种、分成矿区带、分矿床类型开展未利用矿区智能评价，以各矿体为单元估算预期成本，动态评价不同市场价格下矿体资源可利用性，为盘活一批未利用资源、建设一批新矿山提供支撑。

3.4 全量再生资源评价方法

再生资源评价研究涉及三方面工作，一是通过系统的物质流调查研究工作，摸清当前我国再生资源数量、分布和空间赋存状态，通过再生资源透视实现再生资源的全量化。二是建立全量再生资源可利用性评价方法，评价全量再生资源的可利用性，实现再生资源增量化。三是分析研究限制再生资源开发利用存在的制约因素，提高再生资源利用率。

3.5 全量矿产资源评价工作实证

第一作者所在的中国地质科学院矿产资源研究所国情调查研究团队，按照全量矿产资源系统理论方法的指导，已联合全国各省国情调查队伍，开展了“全国部分战略性矿产低品位、共伴生资源再评价”、“全国未利用矿区调查评价”等工作，逐步探索建立生产矿山、未利用矿区及其共伴生、低品位资源的评价技术方法，评价增储了一批资源，并优选了部分可利用性强的资源，提出了探矿权区块建议，有力推动了增储上产工作(中国地质调查局，2025)。

4 开展“全量矿产资源系统”研究的意义

4.1 矿产资源安全保障意义

当今世界，新质生产力快速发展，新一轮科技革命正在推动人类生产方式、生活方式重大变革，气候变化将彻底改变以化石能源为主的能源利用方式，将进一步增加矿产资源需求，全球矿产资源供不应求的局面将不断加剧。大国博弈加快演进，矿产资源产业链供应链安全受到挑战，各国矿产资源保障压力不断增大。因此，美国(Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition and Sustainment, 2018; U.S. Department of Commerce, 2019; U.S. Department of Energy, 2023)、欧盟(European Commission, 2023a, b)、日本等均在增加矿产资源的

保障能力(METI, 2009, 2023)。全量矿产资源系统可以最大范围的将全部有利用价值的资源统筹考虑，为最大化保障资源安全提供坚实理论技术支撑。

4.2　找矿增储意义

全量矿产资源系统理论，要精细化研究共伴生、低品位、非常规矿产资源的含量分布特征，成矿元素在地层、构造、岩体中的空间富集规律及元素组合，推断共伴生矿产资源分布情况，圈定出矿床较完整的矿化域。一是，可以通过三维定量研究，精细刻画成矿机理，丰富完善现有成矿理论。二是可以指导就矿找矿工作，预测现有矿山深边部资源潜力。三是可以根据元素赋存状态，研究主元素和共伴生元素之间赋存规律，推动共伴生资源的再评价，提高资源储量。

4.3　科学高效利用资源意义

通过全量矿产资源研究工作，可以精细化研究不同赋存状态、不同品位、不同开发利用状态的资源，评价资源的可利用性和开发利用效率，并有针对性的提出开发利用建议。一是对不同赋存状态、不同类型的资源，可以提出不同的采选冶用方案，科学高效利用资源。二是针对不同品位、不同埋深等不同可利用性资源，可以提出提高资源可利用性，梯次开发利用的建议。三是针对不同开发利用状态的资源，可以针对生产矿山、关闭矿山、未利用矿区、压覆资源，提出盘活资源、提高产能的建议。

4.4　保护与节约资源的意义

当前，由于对全量矿产资源家底不清，开发利用状况不清，在资源开发利用过程中，存在资源利用效率不高和资源浪费等问题。全量矿产资源研究可以最大限度的掌握有多少资源、分布在什么地方、利用的效果如何，如何更加科学的保护和节约资源。例如，大量低品位、共伴生资源没有得到重视，进入尾矿中，大量的社会废弃物，由于缺乏科学管理，没有转化为再生资源。

5　结论与讨论

本文分析了全球矿产资源形势出现的三大转变，正在迫使世界各国重新审视矿产资源安全保障问题，提出了现有资源评价原则正面临挑战。针对该问题，分析了《中华人民共和国矿产资源法》和《固体矿产资源储量分类标准2020》对矿产资源的界定，提出了两种界定中存在的差异，建议还原矿产资源本来面目，让矿产资源的判定原则回归“具有利用价值”，将全部的矿产资源都纳入到资源勘查评价工作中来。建立了全量矿产资源理论框架，界定了“全量矿产资源系统”的概念、范畴、组成结构，阐释了系统的三大性质。提出了“资源透视—智能评价—科学利用”的全量矿产资源研究技术路线，总结了开展“全量矿产资源系统”研究的意义。

本文提出的全量矿产资源系统理论技术框架以及新认识和新结论，仅是阶段性初步研究成果，理论方法还不成熟，认识和观点还有待进一步分析，仅以此文抛砖引玉。

Acknowledgements:

This study was supported by Deep Earth National Science and Technology Major Special Project (No. 2024ZD1002000), China Geological Survey (No. DD20230040), and National Natural Science Foundation of China (No. 42271281).

参考文献:

陈其慎, 张艳飞, 邢佳韵, 等, 2023. 矿产资源安全巨系统理论方法与实践[J]. 中国工程科学, 25(6): 191-201.

陈希廉, 2007. “软硬兼施”扩充矿产可利用资源[J]. 世界有色金属, (4): 14-16.

陈希廉, 曹乐农, 2010. 试论表外矿和超贫矿的合理利用[M]//中国实用矿山地质学(下册). 北京: 冶金工业出版社: 5.

丁建华, 蒋宗胜, 毕珉烽, 等, 2025. 中国钽矿资源特征和勘查开发利用现状[J]. 地球学报, 46(5): 954-964.

国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会, 2020. 固体矿产资源储量分类: GB/T 17766-2020[S]. 北京: 中国标准出版社.

国务院办公厅, 2024. 国务院办公厅关于加快构建废弃物循环利用体系的意见 [EB/OL]. (2024-02-06)[2025-01-10]. https://www.gov.cn/gongbao/2024/issue_11186/202402/content_6934547.html.

戢兴忠, 李强, 陈其慎, 等, 2025a. 基于成矿区带的钒矿共伴生、低品位资源开发利用指标调查与潜力评估[J]. 地球学报, 46(5): 909-918.

戢兴忠, 李强, 丁建华, 等, 2025b. 中国钒矿床类型、资源禀赋与开发利用现状[J]. 地球学报, 46(5): 965-978.

余金杰, 杨郧城, 陈其慎, 等, 2025. 中国钨矿的矿床类型划分、空间分布和开发利用现状[J]. 地球学报, 46(5): 945-953.

中国地质调查局, 2025. 中国地质调查局 2024 年度地质调查十大进展、地质科技十大进展评选结果公示[EB/OL]. [2025-01-13]. https://www.cgs.gov.cn/tzgg/tzgg/202501/t20250113_779664.html.

中华人民共和国全国人民代表大会常务委员会, 2024. 中华人民共和国矿产资源法(2024 年 11 月 8 日第十四届全国人民代表大会常务委员会第十二次会议修订)[EB/OL]. [2025-01-10]. http://www.npc.gov.cn/npc/c2/c30834/202411/t20241108_440885.html.

中华人民共和国自然资源部, 2020. 矿床工业指标论证技术要求: DZ/T 0339-2020[S]. 北京: 中国标准出版社.

References:

CHEN Qishen, ZHANG Yanfei, XING Jiayun, et al., 2023. Theoretical Method and Practice of Giant System for Mineral Resource Security[J]. Strategic Study of Chinese Academy of

Engineerng, 25(6): 191-201(in Chinese with English abstract).

CHEN Xilian, 2007. Expanding utilizable mineral resources by closely uniting the soft science and hard science[J]. World Nonferrous Metals, (4): 14-16(in Chinese with English abstract).

CHEN Xilian, CAO Lenong, 2010. A Preliminary Discussion on the Rational Utilization of Off-Balance Sheet Ore and Super Lean Ore[M]//Practical Mine Geology in China (Volume 2). Beijing: Metallurgical Industry Press: 5(in Chinese).

China Geological Survey, 2025. The results of the selection of the top ten progress of geological survey and the top ten progress of geological science and technology by China Geological Survey in 2024 were publicized[EB/OL]. [2025-01-13]. https://www.cgs.gov.cn/tzgg/tzgg/202501/t20250113_779664.html(in Chinese).

DING Jianhua, JIANG Zongsheng, BI Minfeng, et al., 2025. Characteristics, Exploration, Development and Utilization Status of Tantalum Resources in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 46(5): 954-964(in Chinese with English abstract).

European Commission, 2023a. Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 - Final Report[EB/OL]. (2023-03-16)[2025-01-10]. https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/study-critical-raw-materials-eu-2023-final-report_en.

European Commission, 2023b. European Critical Raw Materials Act[EB/OL]. (2023-03-16)[2025-01-10]. https://eur-lex.europa. eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1252&qid=1720020986785.

General Office of the State Council, 2024. Opinions of The General Office of the State Council on Accelerating the construction of a waste recycling system[EB/OL]. (2024-02-06)[2025-01-10]. https://www.gov.cn/gongbao/2024/issue_11186/202402/content_6934547.html(in Chinese).

HALDAR S K, TIŠLJAR J, 2014. Introduction to Mineralogy and Petrology[M]. Amsterdam: Elsevier: 1-37. doi:10.1016/B978-0-12-408133-8.00001-8.

JI Xingzhong, LI Qiang, CHEN Qishen, et al., 2025a. Investigation of Development and Utilization Indicators and Potential Evaluation for Paragenetic, Coexisting and Low-grade Mineral Resources of Vanadium based on the metallogenic belts in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 46(5): 909-918(in Chinese with English abstract).

JI Xingzhong, LI Qiang, DING Jianhua, et al., 2025b. Deposit Types, Resource Endowments, Development and Utilization of Vanadium Ore in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 46(5): 965-978(in Chinese with English abstract).

LAZNICKA P, 2014. Giant Metallic Deposits–a Century of Progress[J]. Ore Geology Reviews, 62: 259-314. doi: 10.1016/j.oregeorev.2 014.03.002.

Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, 2020. Requirements for study of deposit industrial criteria: DZ/T 0339-2020[S]. Beijing: Standards Press of China(in Chinese).

Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition and Sustainment, 2018. Assessing and strengthening the U.S. manufacturing and defense industrial base and supply chain resilience[R/OL]. (2018-09-01)[2025-01-10]. https://www.federalregister.gov/documents/2017/07/26/2017-15860/assessing-and-strengthening-the-manufacturing-and-defense-industrial-base-and-supply-chain.

SIMONI M U, DRIELSMA J A, ERICSSON M, et al., 2024. Mass-balance-consistent geological stock accounting: A new approach toward sustainable management of mineral resources[J]. Environmental Science & Technology, 58(2): 971-990.

Standing Committee of the National People's Congress of the People's Republic of China, 2024. Mineral Resources Law of the People's Republic of China (Revised at the 12th Meeting of the Standing Committee of the 14th National People's Congress on November 8)[EB/OL]. [2025-01-10]. http://www.npc.gov.cn/npc//////c2/c30834/202411/t20241108_440885.html(in Chinese).

State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Pepublic of China, 2020. Solid mineral resources reserves classification: GB/T 17766-2020[S]. Beijing: Standards Press of China(in Chinese).

U.S. Department of Commerce, 2019. A Federal Strategy to Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals[R/OL]. US (2019-06-04)[2025-01-10]. https://www.commerce.gov/data-and-reports/reports/2019/06/federal-strategy-ensure-secure-and-reliable-supplies-critical-minerals.

U.S. Department of Energy, 2023. 2023 DOE Critical Materials Assessment[R/OL]. (2023-06-31)[2025-01-10]. https://www.energy.gov/eere/articles/us-department-energy-releases-2023-critical-materials-assessment-evaluate-supply.

U.S. Geological Survey, 2025. Mineral commodity summaries 2025: U.S. Geological Survey[R/OL]. [2025-01-10]. https://doi.org/10.3133/mcs2025.

YU Jinjie, YANG Yuncheng, CHEN Qishen, et al., 2025. Deposit Types, Spatial Distribution, Development, and Utilization of Tungsten Deposits in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 46(5): 945-953(in Chinese with English abstract).

経済産業省, 2009. レアメタル確保戦略[EB/OL]. (2009-07-28)[2024-05-24]. https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3487098/www.meti.go.jp/press/20090728004/20090728004.html(in Japanese).

経済産業省, 2023. 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_se-curity/metal/index.html(in Japanese).