

文章编号: 1004-4051(2024)04-0002-11

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20240316

## 试论分散金属矿产与新质生产力

王登红

(自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所,  
北京 100037)

**摘要:** 分散金属(锗、镓、铟、铊、镉、铋、碲、硒)并不被社会大众所熟悉,但在我国却属于优势矿产资源。分散金属在传统产业中的用途比较局限,用量也不大,有的金属全世界一年也就用十几吨。但是,这 8 种金属个个“身怀绝技”,对战略性新兴产业和未来产业至关重要。比如,镓在液态金属、锗和铟在电子工业、铋在军工领域、铊在战机发动机、碲和硒在光电产业、铋和铊在生物医学领域都具有不可限量的发展潜力。战略性新兴产业和未来产业又是国际竞争的关键环节和焦点领域,需要新质生产力来支撑。加快形成与分散金属密切相关的新质生产力,是实现高质量发展、构建新发展格局的重要路径,也是保障国家经济安全的客观需要。分散金属也是我国矿产资源领域安全保障体系的重要组成部分。因此,加强对分散金属矿产资源的勘查、开发与管理,理清分散金属与新质生产力之间的内在逻辑,探索关键矿产找矿工作部署的战略构想,通过创新引领,加快新一轮找矿突破战略行动的 implementation 步伐,加深社会各界对于分散金属重要性的认知程度,鼓励全社会加大地质找矿投入的力度,对于保障能源资源安全、增强发展新动能具有重要的意义。

**关键词:** 分散金属(锗、镓、铟、铊、镉、铋、碲、硒); 矿产资源; 新质生产力; 战略性新兴产业; 未来产业; 关键矿产

中图分类号: TD-0; V252.6; F407.1; F042.2 文献标识码: A

### Discussion on the dispersed metals resources and new quality productivity

WANG Denghong

(Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Natural Resources, Institute of Mineral Resources,  
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Dispersed metals, including germanium(Ge), gallium(Ga), indium(In), thallium(Tl), rhenium(Re), cadmium(Cd), selenium(Se), tellurium(Te), although not widely recognized by the general public, are indeed valuable mineral resources in China. The utilization of dispersed metals in conventional industries is relatively restricted, with insignificant quantities involved. Even though certain metals are employed at a global scale exceeding ten tons annually, each of these eight metals is critical to strategic emerging and future industries. For instance, gallium exhibits significant applications in liquid metal technologies; germanium and indium are used in the electronics industry; cadmium plays a pivotal role in the military industry; rhenium is used in the aircraft engines; tellurium and selenium are

收稿日期: 2024-02-26 责任编辑: 赵奎涛

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“中国矿产地质志”等资助(编号: DD20221695, DD2019037, DD20160346); 国家重点研发计划“战略性新兴产业矿产资源开发利用”专项“我国西部伟晶岩型锂等稀有金属成矿规律与勘查技术”资助(编号: 2021YFC2901900, 2021YFC2901905); 中国地质调查局地质调查项目“战略新兴产业矿产地质调查工程”资助(编号: DD20230034)

作者简介: 王登红(1967—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事矿产资源研究, E-mail: 847544588@qq.com。

引用格式: 王登红. 试论分散金属矿产与新质生产力[J]. 中国矿业, 2024, 33(4): 2-12.

WANG Denghong. Discussion on the dispersed metals resources and new quality productivity[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(4): 2-12.

employed in the field of photoelectricity; both selenium and tellurium hold immense potential for advancement within the biomedical domain. The support of new quality productivity is crucial for strategic emerging industries and future industries, which are the key focus areas in international competition. The accelerated formation of new quality productivity forces closely related to dispersed metals is essential for achieving high-quality development, establishing a novel development pattern, and ensuring national economic security. Meanwhile, dispersed metals are also an important part of the security system in the field of mineral resources in China. Therefore, it is of great significance to strengthen the exploration, development, and management of dispersed metals resources to clarify the connection between dispersed metals and new quality productivity. Furthermore, it is crucial to explore strategic concepts for mineral prospecting, expedite the innovative implementation of groundbreaking measures, and foster a deeper societal comprehension of the significance of dispersed metals. These efforts are essential for augmenting investment in geological prospecting, ensuring energy resource security, and enhancing the advancement of new momentum.

**Keywords:** dispersed metals (germanium, gallium, indium, thallium, rhenium, cadmium, selenium, tellurium); mineral resource; new quality productivity; strategic emerging industry; future industry; critical mineral

在2023年出现的热词中，“新质生产力”特别引人注目。2023年9月7日下午，习近平总书记在黑龙江省哈尔滨市主持召开新时代推动东北全面振兴座谈会并发表重要讲话时指出：“积极培育新能源、新材料、先进制造、电子信息等战略性新兴产业，积极培育未来产业，加快形成新质生产力，增强发展新动能。”<sup>[1]</sup>显然，新质生产力的提出有助于我国在新阶段牢牢把握新一轮科技革命的战略机遇，有助于推动新兴产业、未来产业的发展，有助于开辟新赛道、增强新动能，进而有助于全面推进中国式现代化，因此，受到全国人民的高度关注，成为热词也就不足为奇。那么，什么是新质生产力？跟中国矿业发展有什么关系？《中国矿业》组织的本专题重点讨论的是分散金属，而分散金属矿产资源与新质生产力又有什么关系？如何充分发挥我国分散金属的资源优势和技术优势，促进新质生产力的加快形成？本文将对此作初步探讨，以抛砖引玉。

## 1 新质生产力的含义

传统概念认为，人类利用自然、改造自然，进行物质资料生产的能力就是生产力。那么，什么是“新质生产力”呢？作为新词，对于新质生产力的概念内涵，还存在不同的理解。但普遍认为，新质生产力是以科技创新为主导，为实现关键性、颠覆性技术突破而产生的生产力。新质生产力是相对于传统生产力而言的，按照马克思主义基本原理，生产力是人类改造自然和征服自然的能力，是推动社会进步最活跃、最革命的要素，生产力发展也是衡量社会发展的根本性标准<sup>[2]</sup>。社会主义的根本任务就是解放生产力、发展生产力。新质生产力也就是新质态的生产力，

有别于传统生产力，涉及领域新、技术含量高、知识密度大，是科技创新发挥主导作用的生产力，代表生产力演化中的一种能级跃迁。其核心要义就是“以新促质”，以创新驱动新经济变革、以新经济引领高质量发展；创新驱动是“新”的关键，高质量发展则是“质”的目标。新质生产力中的“新”，指的是新技术、新模式、新产业、新领域、新动能；新质生产力中的“质”，指的是物质、质量、本质、品质；新质生产力中的“生产力”是推动社会进步最活跃的要素。新质生产力的特点在“新”，关键在“质”，锚定于“生产力”。新质生产力突破了传统的经济增长方式，以高效能、高质量为基本要求，以数字化、网络化、智能化为基本特征<sup>[3-5]</sup>，而数字化、网络化、智能化所需要的直接与间接的产品——如芯片，以及为了制造这些产品而必须的制造业——如氟化工，都将为新质生产力的形成奠定基础。

简言之，传统的生产力指的是人对自然的关系，是改造自然、影响自然并使之适应社会需要的客观物质力量，是人类借助于自然界直接创造财富的能力；而新质生产力是指在前沿科技不断发展、新兴产业不断涌现的新时代所体现出来的在战略性新兴产业、未来产业中直接或者更多的是间接利用自然物质来改造自然、管理社会的全新能力。从人与自然的关系看，本文强调传统生产力更多的是直接利用自然资源，如风能、光能、水能、生物资源、动物资源及煤炭、石油、铁矿等矿产资源，而新质生产力更多的是间接利用自然资源，如驾驭海量数据的能力，而数据本身并非自然界直接产生的。这也是新质生产力强调以数字化、网络化、智能化为特征的原因。

需要强调的是,新质生产力并非是取代传统生产力,而是强调新的“质态”。比如,传统生产力利用风能就是建造“大风车”,但不能实现远距离输送电能;战略性新兴产业可以实现远距离甚至数千千米的超远距离输送,但尚未实现“按需送电”;未来产业则通过大数据管理各地乃至全国的用电信息,通过网络来调度电力资源,进而要求并实现发电厂的“错峰发电”“按需发电”,从而实现对风力发电的科学管理。矿产资源在这一从传统产业到战略性新兴产业再到未来产业的发展过程中,不是被取代了,而是换了一种“质态”。其中,制造风力发电的铁塔仍然需要大量的钢铁(常见的5 MW大型风力发电机,叶片长达60~70 m,加上主塔、基座等需要钢材1 000~1 500 t),制造风力发电机需要大量的稀土等关键小金属(300~1 000 kg),而利用计算机来管理则需要大量的电子设备,电子设备同样离不开分散金属。太阳能发电亦是如此,其中更多的用到了光电转换设备,镓、锗、铟、碲等分散金属对于太阳能发电也是不可或缺的。

## 2 分散金属矿产的概念

分散金属(与稀土、稀有金属并称“三稀金属”)也是一个相对较新的名词,但其概念是明确而具体的,与以往“分散金属”“分散元素”的概念也是一脉相承的。从材料的角度,指的就是锗、镓、铟、铊、镉、镉、硒、碲这8种金属;从基础科学的角度,就是Ge、Ga、In、Tl、Re、Cd、Se、Te这8个在地壳中分散出现的元素;从矿产资源的角度,就是锗、镓、铟、铊、镉、镉、硒、碲这8个在传统产业中用量不大的“小矿种”。

显然,新质生产力的主要领域是战略性新兴产业(也简称为战兴产业)和未来产业,而新型工业化是加快形成新质生产力的主阵地。矿产资源是工业的粮食,而在传统产业中用量很小(每年甚至只有吨级,比黄金还少)的分散金属却将是战略性新兴产业和未来产业所涉及新型工业制造业中所不可或缺的原材料,其用量必将大幅度增加,尤其是其适用范围将大幅度扩展,无论是传统的电子设备还是未来的“脑机接口”,都离不开分散金属。比如,放在手心中就可以“化”了的镓金属,可以用于制造“液态机器”,进入血管等人体器官,以清理“垃圾”。

分散金属虽然在传统产业也发挥过重要作用(如铊用于杀虫剂,以提高粮食产量),但其主要用途毫无疑问将是战略性新兴产业和未来产业。正如学界指出,突破性、颠覆性技术叠加战略性新兴产业和未来产业将促进新质生产力的形成与发展<sup>[2,6]</sup>,而分散

金属正好在突破性、颠覆性技术方面将发挥重要作用。或者说,先进技术的载体将广泛涉及到分散金属,如锗对于半导体领域的意义奠定了其在战略性新兴产业中的地位,镓作为液态金属之一也将在未来产业中发挥不可限量的作用。科学家预言,镓及其合金可以在体积、形态可变化的仪器设备制造业发挥巨大作用,因为镓的熔点只有29.78℃,而沸点却高达2 403℃,是自然界液态条件下温差最大的金属元素。液态的好处就是便于“塑形”,可以制造成形态可变的物件,而29.78℃的熔点正好是非常便于“掌控”的。形象地讲,要让镓保持固态,只要放在一般低于28℃的空调房中即可,而要让镓变成液态,放在手掌心中“捂一捂”即可。目前,我国镓资源丰富,价格为2 000元/kg左右。也就是说,镓的状态和命运与稀土差不多。因此,必须充分吸取我国稀土资源丰富,但稀土专利却被国外垄断的深刻教训,加大科技研发力度,让镓在战略性新兴产业和未来产业中充分发挥作用。尽管目前镓的市场不大,价格不高,但未来市场、未来产业也是可以“积极培育”的。这既是习近平总书记强调“积极培育未来产业,加快形成新质生产力,增强发展新动能”的核心要义,也为以镓为代表的分散金属在战略性新兴产业和未来产业中发挥“颠覆性”作用提供新机遇。

## 3 分散金属在传统产业中的应用

在传统产业中,从材料的角度,锗、镓、铟、铊、镉、镉、硒、碲这8种金属用途广泛,涉及领域很多,但主要起配角作用。这从往年的消耗量明显可见。比如,铊在100年前(至少在1920年)就被用作灭鼠剂,或用作杀虫剂(以杀灭白蚁最为有效),或用作防腐剂(以保护织物和皮革),但由于铊具有剧毒,在使用过程中容易造成二次污染,美国先后于1965年和1972年两次禁止使用铊农药,至1973年基本停止了铊在农业等传统产业中的应用<sup>[7]</sup>。再比如,20世纪80年代以前,镉的最大用途是电镀工业,占镉消费量的50%以上;80年代以后,电镀镉消费量显著下降,到1984年下降为25%,1985年又降为22%,而电池工业镉的用量快速上升,尤其是镍镉电池工业的镉消费比例迅速上升,从1970年的8%,上升到1983年的29%,1986年上升到36%(日本电池工业用镉量占其总消费量的71%)。随着环境保护要求的日益严苛,瑞典、丹麦等西方国家禁止将镉用于电镀、颜料和稳定剂,镉的第一大应用领域也从镍镉电池转移到20世纪以来的光电产品。

总之,这8种分散金属在传统产业中的使用范围较为局限,用量也非常有限,有的甚至被限制使用,

因此,资源调查的工作程度普遍较低,科学研究也不够深入。这在我国更为明显,比如,我国曾经发现世界上唯一的独立成型的碲矿床——四川大水沟碲矿,但其资源储量一直没有被查明,对其用途也没有深入挖掘,直到战略性新兴产业快速发展,尤其是光电领域需要广泛用到碲时,才发现原先探明的碲矿石几乎消耗殆尽,而且其粗加工产品、半成品主要用作出口,甚至被其他国家用于战略储备<sup>[8]</sup>。

#### 4 稀散金属在战略性新兴产业中的应用

战略性新兴产业一般指的是包括新一代信息技术、节能环保、新能源、生物、高端装备、新材料、新能源汽车等7个新兴产业在内的技术密集型产业,有别于劳动力密集型和资源密集型传统产业。稀散金属矿产之所以能够在战略性新兴产业领域发挥关键作用,一方面与其特殊的物理化学性质有关,另一方面也与其开发强度不够大,新产品、新用途层出不穷、迭代快速密切相关,此外还与人们对于这些稀散金属在工业领域中的应用知之甚少有关。

对工具的使用是人类区别于其他动物的基本特征之一,而对由矿产资源衍生的生产资料的高端化、智能化、数字化应用更是现代人类社会发展的标志。从旧石器时代到新石器时代再到铜器、铁器乃至于电器,人类一直在突破性、颠覆性地使用矿产资源,比如将瓷土、陶土烧制成瓷器、陶器,就有了储存水、食物乃至于煮熟食物的容器,人类才告别了“野生状态”。一方面,技术进步使得劳动资料变得更高级、更精密、更尖端,高精尖的机器设备成为人类改造自然的新手段;另一方面,科学技术的进步不断助力发现新物质尤其是自然物(包括矿产资源)的新用途,从而既打开了科技创新的新领域,也创造了人类生存的新世界。例如,当今人们要离开手机,那简直是“寸步难行”,从买火车票,到医院看病,乃至于买菜煮饭,都离不开手机。手机是载体,是看得见的实物载体,而手机背后的信息化平台则是看不见但须臾不可或缺的“数字世界”。

毫无疑问,战略性新兴产业和未来产业的形成与发展必然会形成新的生产方式与生产关系,加快新质生产力的形成。当前,以人工智能、大数据、云计算、物联网等为代表的突破性、颠覆性技术,立足于战略性新兴产业又与实体产业渐行渐远,倒逼原有产业不断转型升级,既带动了新能源、新材料、智能制造等战略性新兴产业的快速发展,也培育了以量子信息、生物制造、人形机器为代表的未来产业。战略性新兴产业的发展和未来产业的出现至少会带来两方面的重要变化:一是引导产业部门生产结构

向着更高效、更智能的方向发展,从而形成新的生产方式;二是通过革新产业的构成要件,衍生出人与自然、人与人之间全新的生产关系<sup>[6]</sup>,而新的生产方式与生产关系也将促进新质生产力的形成与发展。矿产资源尤其是稀散金属矿产资源相对于传统的煤、石油、铁、铜等大宗矿产来说不但是新的生产资料,也有助于构建新的生产关系。能否更多、更快、更好地探明稀散金属矿产资源的家底,并将其在战略性新兴产业中的应用发挥到极致,无疑将在促进新质生产力发展乃至于在国际政治、经济博弈中占据主动。

在新兴信息产业领域的应用。众所周知,在聚焦下一代通信网络、物联网、三网融合、新型平板显示、高性能集成电路和高端软件研发过程中,与战略性新兴产业相关的关键金属矿产发挥着重要作用。比如,液态金属合金的研究可使显示器可大可小,而液态金属除了汞之外,当前最主要的是镓、铟、铊及其合金。信息领域离不开半导体,而锗、镓、铟等半导体金属原料也是我国的优势矿产资源。比如,目前制造LED(Light Emitting Diode, 半导体照明光源)离不开镓,不论哪一种LED都需要用到镓,而我国镓资源十分丰富,无论是铅锌矿还是铝土矿中均伴生有镓,但主要伴生在铝土矿中。虽然我国铝土矿资源并不丰富,需要大量依靠进口,但我国铝土矿在冶金领域中的技术是世界一流的。在铝土矿冶金过程中顺便回收镓,在我国已经拥有成熟的技术。因此,以镓资源优势为基础,加快推进镓在战略性新兴产业中的应用研究,我国是完全可能占据主动的。这一点可以从锂资源与新能源汽车的快速发展中得以旁证。

在节能环保领域中的应用。节能环保依然是当前的主题,既包括矿山环境保护,也包括矿产资源的循环利用(比如城市矿产),还包括矿产资源开采开发过程本身的高效节能,更包括各个领域为了节能环保而开发新的矿产资源,比如锂作为能源金属一旦在可控核聚变发电方面取得突破并实现商用化,则煤炭、石油、天然气乃至于核裂变用到的铀矿资源将或多或少被代替。目前,大量用到稀散金属的风力发电与太阳能发电行业发展很快,对于镓、铟、硒、镉等的需求量也增长很快。

在生物产业领域中的应用。正如前文介绍,铊曾经被用于杀虫剂而在20世纪广泛使用,但随着环境保护力度的加大,铊退出了在农业乃至于整个生物产业的应用。那么,如何既提高农作物的产量(属于传统生产力),又通过改变农产品的结构而带来质

的飞跃(属于新质生产力)呢?其他稀有金属能不能发挥作用呢?其实,市场上广泛销售的富硒茶、富硒大米、富硒苹果等等也已经说明了硒这一稀有金属元素对于新质生产力的重要性。而富硒农产品的出现,本质上不是为了提高产量而是为了“健康”。也就是说,保健农产品是为了提高生活质量,并不是为了填饱肚子。土地属于最原始的生产要素,含有不同矿物质的土地适合于种植不同类型的作物(包括粮食作物和经济作物),在不同的土地上播下不同的种子,收获不同的果实。这似乎天经地义,但也将是新质生产力的一种选择。遗憾的是,我国虽然对富硒土壤的调查较为重视,发现了大面积的富硒土壤,为提高农业生产作出了贡献,但哪些土壤富含有害元素(如镉、铊),则还了解得不够。因此,今后不但要调查有益元素也要调查有害元素,趋利避害,才能产生新质生产力。

在新能源领域中的应用。核能、太阳能、风能、生物质能将领衔新能源。无论是风能发电还是其他方式的“绿色发电”,都离不开发电机,而发电机的制造要使用关键金属矿产。如太阳能电池,离不开镉、碲等半导体原材料,硒化铜太阳能电池、碲化镉电池都是薄膜型太阳能电池的主导产品。

在新能源汽车领域中的应用。新能源汽车领域是我国“弯道超车”(也可以说是另开赛道)的典型领域。2015年我国新能源汽车的产量达到340471辆,销量331092辆;纯电动汽车的产量达到254633辆,销量247482辆(中国汽车工业协会数字),发展势头之迅猛令国内外都大吃一惊。截至2023年7月3日,我国新能源汽车产量达到2000万辆。对于新能源汽车来说,锂毫无疑问是“明星”金属,但无论是新能源汽车本身还是为新能源汽车保驾护航的充电桩等配套设备都离不开稀有金属,如充电桩要用到氯化镱,导航系统要用到铟,电子系统要用到镉、铟等。为了实现在保障安全前提下的快速充电,铜与碲的高性能合金材料被用于超级充电系统。

在高端装备制造业中的应用。世界各大国都在重点发展航空航天、海洋工程装备和高端智能装备业,尤其是近年来以“俄乌冲突”为标志的局部战争以及其他方面的军备竞赛愈演愈烈,军工领域(大到军舰、航空母舰,小到士兵照明用的手电筒)都离不开关键金属。其中,铟、碲、镉等稀有金属在各种发动机、电子仪器仪表、精确制导(时间制导和空间制导)等方面必不可少。以镉为例,除了制造定向导弹要使用镉之外,由单质镉和汞生成的镉汞剂在加热时软化,而在人体温度下却很硬,从而体现出“液态

金属”的特点。这种“液态金属”或“变形金属”在军用和民用两方面都受到高度关注,将成为高端装备制造制造业的基础性原材料。再比如,镉在军事方面尤其是在红外镜头方面用途广泛、用量很大,无论是车辆、舰艇、飞机等高端武器还是红外枪瞄镜头、头盔红外镜头、手持红外镜头等单兵红外装备,都离不开镉。假设每个士兵班(战斗小组)装备2台红外夜视仪,每台大约消耗0.3kg镉<sup>[9]</sup>,则百万大军至少需要6万kg镉,还不包括单兵装备。

在新材料领域中的应用。几乎各种新材料都离不开战略性新兴产业金属矿产,除了稀有金属和稀土金属之外,稀有金属也有其独特性。比如,镓在液态金属冶金领域有着广阔的前景,是电子工业的新宠,被誉为“半导体材料的新粮食”。其中,作为第二代半导体材料的代表,砷化镓(GaAs)材料是目前最成熟的化合物半导体材料之一,与第一代半导体硅材料相比,具有禁带宽、电子迁移率高、电子饱和漂移速度高、能带结构为直接带隙等特点,决定了其在高频、高速、高温及抗辐照等微电子器件研制中的主要地位,砷化镓的直接带隙特性决定了其也可以制作光电器件和太阳能电池。砷化镓材料分两类:半绝缘砷化镓和半导体砷化镓,前者主要用于雷达、卫星电视广播、微波及毫米波通信、无线通信(以手机为代表)及光纤通信等领域,后者主要用于光通信有源器件(LD)、半导体发光二极管(LED)、可见光激光器、近红外激光器、量子阱大功率激光器和高效太阳能电池等光电子领域。对于第三代半导体材料,氮化镓是目前世界上最先进的半导体材料,是新兴半导体光电产业的核心材料和基础器件,在手机快充、5G通信、电源、新能源汽车,以及雷达等方面具有诱人的应用前景。砷化镓聚光太阳能电池和铜铟镱硒(CIGS)太阳能薄膜电池是最突出的两种太阳能电池,均离不开镓<sup>[10]</sup>。

## 5 稀有金属在未来产业中的应用趋势

2024年1月29日,工业和信息化部等七部门联合印发《关于推动未来产业创新发展的实施意见》,列出了重点前瞻部署未来制造、未来信息、未来材料、未来能源、未来空间和未来健康六大产业方向,并强调在突破下一代智能终端、做优信息服务产品、做强未来高端装备三个方面,打造人形机器人、量子计算机、新型显示、脑机接口、6G网络设备、超大规模新型智算中心、第三代互联网、高端文旅装备、先进高效航空装备、深部资源勘探开发装备十大标志性产品方向。无论是三大方面六大产业方向还是十大标志性产品,都离不开稀有金属(包括需要对深部

金属矿产进行勘探与开发)。以镉为例,镉可用于制造高精度的温度计,为深部找矿提供高精度探测设备(深部地温及地温梯度的变化规律将成为找矿标志);深部采矿过程中随时会遇到地压、高温、透水、岩爆、腐蚀、缺氧等灾害,自然人下到数千米深的地下是不现实的,各种各样的机器人就成为必然选择;而无论是自然人采矿还是机器人采矿,都需要观察,都需要精确定位,都需要与地表控制中心保持紧密联系,因此,能够克服地下深部复杂环境的新型显示设备、通讯设备、卫星难以兼顾的网络设备等等就必然被用上。因此,更充分地“用好稀散金属”,将是形成新质生产力的具体体现。

实际上,深海采矿也是未来产业,同样要用到大量的稀散金属。

未来产业并不局限于上述六大产业方向,其产品也不局限于十大标志性产品。8种稀散金属甚至可能还因其“稀缺性”而具有“收藏价值”。可以说,以神舟飞天、蛟龙入海、嫦娥奔月、墨子传信、北斗组网、天眼巡空、天问探火等为标志的新质生产力正在我国持续涌现,但深部探矿、深部采矿(包括深海探矿与深海采矿)的标志性新质生产力尚未现成,正需要通过互联网、大数据、人工智能与包括稀散金属矿产在内的实体经济的深度融合来破题。

## 6 我国稀散金属矿产资源的基本特点

我国稀散金属矿产资源丰富,但研究程度低,资源家底不清,开发利用缺乏规范,产品单一,技术路线较为落后,环境压力较大,离“用得好”的目标还有很大差距<sup>[11-12]</sup>。

### 6.1 镓

我国商务部和海关总署在2023年7月3日发布关于对镓、锗相关物项实施出口管制的公告,引起了社会各界对镓和锗这两种矿产的高度关注。我国镓的资源储量为13.66万t,约占世界总量的75%<sup>[8]</sup>。广西、贵州、河南、山西和云南的查明资源储量合占全国的88.2%。据统计,四川攀枝花钒钛磁铁矿中的镓占世界储量的41%~42%,占国内储量的54%~55%;其次是德兴铜矿,镓储量占全国的15%<sup>[13]</sup>。但实际上,无论是攀枝花还是德兴,都因为镓品位太低而基本上没有利用。因此,对于镓的资源储量,不能仅从储量表上的数据来理解。此外,晋北地区、陕北地区、内蒙古南部的火电厂年排弃的亿吨级粉煤灰不仅氧化铝含量>40%,镓的含量亦高达 $40 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$ ,有些品种粉煤灰镓含量竟达 $100 \times 10^{-6}$ (即灰含镓0.004%~0.010%),远大于镓矿工业品位的 $30 \times 10^{-6}$ ,属富镓粉煤灰,其金属镓总储量也不亚于攀枝花钒

钛磁铁矿。如在粉煤灰提铝的同时回收这部分镓,将改写我国镓的总资源储量,为我国经济的持续发展提供新资源<sup>[14]</sup>。目前,国内已成功制备出超纯镓,并建成15 t/a超纯镓的生产线。我国镓产量虽然在全球占有重要地位,但大部分作为原料性产品出口;我国是世界主要镓原料出口国,同时又是世界镓高端产品和制成品的重要进口国。因此,要从战略高度重视并且在政策上对镓的回收采取相应措施,包括战略储备;要限制镓的低价出口,同时要提高我国镓高端产品的生产技术水平;鼓励科技创新,研发新产品,给予政策、税收等方面的支持,变资源优势为经济优势、技术优势和人才优势。

### 6.2 锗

锗资源比较贫乏,按照目前的用量全世界只够使用40 a。但锗是具有战略性质的光信息材料,可用于卫星上的太阳能锗电池。锗在医疗保健方面的应用也越来越受到关注,尤其是有机锗药物之所以能震惊医学界,主要是因为其低毒(微毒或无毒),以及对人体具有的抗癌和免疫等功能。目前,我国和美国基本上垄断了全球的锗资源,我国是全球第二大锗资源国,已探明锗矿产地35处,锗保有储量约3 500 t<sup>[9]</sup>。我国锗出口量占全球的70%以上,大部分是低附加值的初级原材料产品。如不加限制,势必造成我国锗资源匮乏,反而助长其他国家锗工业的发展。我国的锗资源主要分布在广东、云南、内蒙古、吉林、山西、广西、贵州等12个省(区)(合占全国96%)。国内含锗较高的铅锌矿床主要分布在云南会泽、贵州赫章、广东凡口及湖南水口山等地。云南的锗资源丰富,主要分布在铅锌矿和含锗褐煤中,目前居全国第一位。

### 6.3 铟

铟在自然界难以形成独立矿床,工业上主要从赤铁矿、铅锌矿及钨锡矿的冶炼过程中作为副产品回收。铟主要赋存于闪锌矿中,但只有当锡、锌共生且锌也大规模富集时才容易被回收利用。预计铟将成为比稀土还紧缺的战略资源,而且更加难以寻找。铟的富集具有矿床类型的专属性,主要富集在锡石硫化物矿床和富锡铅锌矿床这两种特定类型矿床中,铝土矿中也可能有所富集。近年来,铟以其在高精尖产业技术中表现出的优良性能而越来越受到重视。我国拥有全世界最大的铟地质储量,占世界的50%左右,但实际上已查明铟资源储量不足万吨。我国从1954年开始回收铟,到2006年铟的生产能力达到657 t,成为全球最大的铟生产国。但铟产业链基本上停留在高纯铟以下的基础产品层次,核心技

术一直没有突破。此外,随着广西大厂等核心矿区主矿种资源的枯竭,铟也将成为紧缺资源。

#### 6.4 镉

我国镉资源丰富,但其一直被另眼相看,认为是“污染源”,这是由于采矿活动有可能导致镉元素从尾砂中释放出来,进入下游水环境,从而造成镉污染。在农业生产中,含镉的污水通过灌溉也可能引起土壤的镉污染,进而导致大米等农作物镉含量超标。但从新质生产力的角度看,镉却是不可或缺的新型材料。比如,镉合金在国防工业中有重要用途,镉棒可以在核反应堆中调节连锁反应的速度。美国早已将镉列为战略储备物资,储备目标高达5370 t。我国的镉资源主要集中在云南、四川、广东、广西、湖南、甘肃、内蒙古、青海、江西等省(区)。云南兰坪金顶铅锌矿是中国特大型伴生镉矿床;贵州都匀牛角塘锌矿床是目前已知镉含量最高的矿床,为世界上罕见的大型独立镉矿床;云南都龙锡多金属矿床中镉储量达数千吨,规模为大型;广西大厂矿田最具工业意义的镉主要赋存于铁闪锌矿中,整个矿田镉资源量达到万吨以上。因此,对于镉,首先要从地质背景的角度查明其分布情况,包括在矿床中的赋存状态,也包括在一般岩石中的分布状态,争取在采矿过程中充分回收镉,既保证镉资源的综合利用,又降低对环境的排放污染。也只有充分回收、吃干榨尽,才能降低对环境的排放污染。如果不采矿,在自然过程中,随着风化作用等地质过程的自然进行,镉等金属也是要进入环境的,这是不以人的意志为转移的。那种将重金属污染一股脑归罪于采矿的看法并不符合实际。此外,更重要的是,要加强镉在高科技领域中的创新研究,拓展镉的应用领域,尤其是“液态金属”“信息金属”等新领域。只有镉得以无害利用,才能减少其污染环境的机会。

#### 6.5 铊

铊是地壳中典型的分散元素,主要呈类质同象、胶体吸附状态和独立铊矿物形式存在。铊的独立矿床仅见我国报道,已知有贵州滥木厂汞铊矿床、云南南华神铊矿床和安徽香泉铊矿床。事实上,铊广泛存在于铅锌矿等多金属矿床中,如广东云浮黄铁矿、凡口铅锌矿、云南兰坪铅锌矿等。铅锌矿冶炼厂烟尘中的铊也是回收铊的主要来源。我国铊储量居世界首位,是我国的优势资源,但下游的需求量极少。2009年,全球铊的年消耗量基本保持在15 t或以下。我国铊产业应用技术相对滞后,主要用于高新技术和化工领域,前者每年需求量达225 kg,后者年需求量达24 kg。我国西南低温热液矿床分布区普遍存在

铊的高异常。地质体在风化过程中,铊会进入水体、土壤、植被和空气。因此,要调查清楚铊在自然界的分布情况,有些“毒瘤”必须挖掉才能断根。在矿山环境治理过程中,不能只是在尾砂库种草,还应该长期监测地下水的变化,最好能通过综合回收利用的方式根除污染源;粉尘中铊的迁移活性很强,要注意除尘。对于含铊地质体(包括尾矿砂),在种草复绿的同时要避免掩耳盗铃式的表面文章,以便于从根本上阻止铊在岩石圈、水圈、生物圈中的物质循环。而将铊作为矿产品加以回收,实际上是根除“污染源”的最好办法。

#### 6.6 碲

碲是既稀有又分散的元素,在地壳中的含量极低,但用途却十分广泛而重要,社会需求也日益增加。碲产量一半以上用于高端冶金工业,主要消费增长领域是光电仪器——激光器、光二极管、光接收器。碲主要分散在硫化物矿床及含金石英脉矿床的黄铜矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿等矿物中,工业上的碲主要从电解精炼铜和铅的阳极泥中回收。我国已发现碲矿产地约30处<sup>[8]</sup>,探明碲储量居世界第三位,主要集中于广东、江西和甘肃。我国碲矿资源集中在热液型多金属矿床、矽卡岩型铜矿床和岩浆铜镍硫化物型矿床中。广东大宝山、江西城门山、甘肃白家咀子为我国三个大型-特大型伴生碲矿床,三者占全国伴生碲储量的94%。1991年8月,全球第一例独立碲矿在我国四川石棉县大水沟发现;黑龙江三道湾一带也发现有富含碲的金矿床。我国作为碲资源较为丰富的国家,必须重视碲资源的开发和利用,既要加强对碲资源的保护,以及对碲资源开发利用的管理和监督,也要依靠科技进步,提高碲资源的利用水平,避免低端产品过度、无序出口。

#### 6.7 铼

铼素有“战略金属”“航空金属”之称,应用领域很广,包括喷气发动机零部件、燃气涡轮引擎以及量子计算机等。铼在航空发电机方面的应用,一直是我国高端装备制造业的短板,使得我国不得不长期进口飞机发电机。铼是地球上极为稀少的金属元素,在各种地质过程中均难以富集,只能从斑岩铜(钼)矿和斑岩钼矿、热液成因的铀-钼矿床、含钼钒的含铜页岩及硫质-硅质页岩矿床及其他类型矿床中综合回收。我国是铼的主要资源国,我国的铼几乎全部伴生于钼矿,集中分布在陕西金堆城、河南栾川等钼矿区,合计占全国铼总储量的90%。四川沐川地区发现有独立铼矿,但尚难利用。因此,要深入调查研究铼在自然界的赋存状态,尤其是加强对伴生铼资

源的勘查和评价,提高综合利用水平;查明铼的富集成矿机制,总结成矿规律,争取找矿和高端利用两方面都有所突破。

## 6.8 硒

硒是典型的半金属,性质与硫相似,但金属性更强。硒的最显著特性是其在光照下的导电性比在黑暗中成千倍地增加,因而在玻璃、电子、光学和冶金工业中具有广泛的用途。硒在碳质硅质岩中的含量较高,因而黑色岩系及其分布地区往往出现“富硒土壤”。硒是生态环境中重要的微量元素,环境中硒过量或缺乏均会导致机体产生疾病。高浓度硒危害作物的生长发育,降低产量,导致动物胚胎畸形甚至死亡。硒是人体必需的微量元素,缺硒或过量摄入硒都不利于健康。我国高硒土壤较发育,但分布极不均匀。应根据景观地球化学特点、高硒土壤特征及不同状态硒的分布规律,遵循“因地制宜,综合开发”的原则对各高硒土壤地区进行分片重点研究与开发。自然界中硒的超常富集与成矿仅见于玻利维亚的帕卡佳克(Pacajake)和中国湖北的渔塘坝。我国18个省(区)有硒的资源储量,主要分布在甘肃、广东、黑龙江、湖北、青海(合占全国的79.3%)<sup>[8]</sup>,主要是伴生资源。世界硒矿资源严重短缺,且分布不均匀,供求矛盾比较突出,加强硒矿资源的勘查和开发利用刻不容缓,而我国对硒在战略性新兴产业中的应用研发也明显不足。

## 7 新质生产力对于分散金属的需求分析

新质生产力的核心要义就是通过创新驱动、创新引领来促进社会、经济乃至于人际关系的颠覆性变革和高质量发展。应该指出的是,新质生产力中的“新”,指的是新技术、新模式、新产业、新领域、新动能等,但不局限于此,还可以包括新算力、新需求等,因为需求也是一种动力;新质生产力中的“质”,指的是物质、质量、本质、品质,但也不局限于此,还可以包括性质、潜质、体质、气质等质态。对于矿产资源尤其是分散金属矿产资源,不仅要满足战略性新兴产业和未来产业发展的客观需要,更要创新思维方式,充分挖掘金属物质本身的物理性质、化学性质乃至其他“潜质”(比如镓、汞等在液态金属制造业中的独特性质),取得原创性成果,才能引领未来。发展新质生产力,不是不需要矿产资源(如前所说的风力发电),而是需要的量更大、种类更多。近十年来战略性新兴产业快速发展的事实也证明,不但钢铁、石油、煤炭、铜、铝等传统产业中的代表性矿产资源的用量没有减少,锂、钴、镍、稀土等战略性新兴产业快速发展所必须的稀有稀土金属

的需求量也在成倍增加。可以设想,随着战略性新兴产业的持续发展与未来产业的积极培育,对于分散金属的需求量也必将快速、大量增长。因此,只有保障矿产资源的安全供给,才能促进新质生产力的形成与发展,才能保障社会经济的安全与稳定;同样,只有通过形成新质生产力,才能把矿产资源的使用价值发挥到极致,才能提升竞争力。

强调新质生产力,既是应对国际竞争的战略举措,也是保障国家经济安全的重要抓手。毫无疑问,新质生产力将是赢得国际竞争制高点的关键因素。当前,世界正处于百年未有之大变局,我国的国家安全也面临严峻挑战。习近平总书记2022年10月在给山东省地矿局第六地质大队全体地质工作者的回信中强调,矿产资源是经济社会发展的重要物质基础,矿产资源的勘查开发事关国计民生和国家安全。随着战略性新兴产业和未来产业的发展,关键矿产资源的安全在国家经济安全中的地位愈发重要。关键矿产资源在一个国家或地区内储量有限、不可替代,在经济增长、经济安全中占据支配作用。伴随新能源、新技术的飞速发展,除了稀土、锂、钴、镍等关键矿产的需求激增之外,储量有限、分布又极其不平衡的分散金属更是稀缺资源,已广泛引起各发达经济体的重视。我国是全球最大的工业国,也是矿产资源消耗大国,我国的新一代信息技术产业、高端装备制造产业和新能源汽车产业等新兴产业的发展都离不开关键矿产的安全保障。近年来,全球矿产资源政治化和价格金融化的趋势日益凸显,尤其是欧盟推出《关键原材料法案》,美国在G7框架内推动建立“矿产金属供应网络”和“关键矿产买方集团”等举措,都表明西方发达经济体收紧了在全球关键矿产资源管理体系中的控制力。我国虽然有较丰富的稀缺矿产资源储备,但部分矿种对外依存度较高,自给率明显不高,容易受到资源国及其背后政治集团的制约,因此,维持关键矿产资源的稳定供应面临巨大挑战。学界已经认识到,关键矿产资源自给程度不高这一资源挑战,是我国以战略性新兴产业和未来产业为抓手、加快形成新质生产力的一大掣肘<sup>[15]</sup>。

破解关键矿产资源保障不足的难题,只有在构建人类命运共同体的大前提下,通过充分利用国内国外两个市场两种资源,通过开源节流来健全关键矿产资源的安全保障体系。此外,“优质优用”“取长补短”“互通有无”将是矿产资源领域优质生产力形成与发展的必然途径。从开源角度,围绕能源、稀有矿产等加快布局新一轮找矿突破战略行动,努力打通关键矿产资源勘探的技术堵点,保证分散金属

等关键矿产的稳定供给。从节流角度,把握新质生产力的关键性颠覆性技术,全面提升稀散金属矿产的利用效率,实现绿色、循环、高效利用;抓住数字化、绿色化、高端化的着力点,加强对全国稀散金属矿产资源的储量核查、潜力评价与开发利用的调查工作,利用大数据、人工智能、云计算等技术手段实现其开发利用方面的最优化分配(包括矿业权的最优化配置);立足国内已探明的资源,积极发展新技术、新路径以挖掘新用途、开拓新领域;通过传统产业的转型升级减少对传统矿产资源的依赖,或者以稀散金属制品代替传统金属制品。此外,还需要加快《矿产资源法》及配套法规的修订,加强对稀散金属矿产的重视程度(不要因为其“产业规模小”“市场用量少”而不重视),加大对稀散金属矿产资源勘查开发的监管力度,把握好出口尺度,改变低质、低效、单一的粗放乃至破坏性使用方式。

就稀散金属矿产资源而言,不论是镓、锗、铟、镉,还是铍、碲、硒、铊,我国都具有一定的资源优势,而且以出口为主,但出口的往往是初级品,赢利能力十分有限。因此,国家在2023年发布了限制镓、锗制品出口的规定。既然具有资源优势,就可以从供给侧的角度加大科技研发力度,充分开发稀散金属在战略性新兴产业和未来产业中的应用前景,充分掌握各种新产品的技术专利,充分培育相关的“未来产业”,加强对稀散金属矿产的勘查、开采、加工、提炼和运输的产业链建设,通过建设大型资源基地(主要是在现有的资源基地弥补稀散金属开发利用的缺项)来促进产业集群和技术集群,利用国内稀散金属的资源优势、技术优势及市场优势来提升对外话语权,同时也增强对境外稀散金属矿产资源产业链供应链的整合能力,占领行业制高点(包括技术标准的制高点)。

## 8 我国开发利用稀散金属对于新质生产力的意义

相对于铁、锰、铜等大宗金属矿产来说,锗、镓、铟、铊、铍、镉、硒、碲这8种稀散金属属于小金属,社会关注度不高;相对于稀土和锂等这几年风起云涌的关键金属来说,稀散金属依然处于“后知后觉”的状态,市场投资力度也不大。但是,稀散金属在战略性新兴产业和未来产业中不可或缺,因此,在我国开发利用稀散金属矿产资源对于新质生产力的形成与发展,意义重大。

1)稀散金属矿产资源是我国实现经济转型和产业升级的重要资源保障,对战略性新兴产业和未来产业的发展至关重要。由于稀散金属的许多物理性质、化学性质乃至生物性质尚未被认识到、尚未

被研究透、更没有被开发利用出来,不似铁、铜、锰等传统金属矿产的冶金及其开发利用在全世界已经“固化”,连市场都基本成型,难以找到创新点,这就为稀散金属的创新性开发利用提供了无限的契机。比如,硒与生物产业、碲与光电产业、镓与液态冶金产业、锗、铟与电子产业、铍与飞机发动机等高端装备制造制造业等等,都为新质生产力的形成与发展提供了机遇。因此,稀散金属的勘查、开发可以为战略性新兴产业的稳固发展与未来产业的培育奠定重要的矿产资源物质基础。

2)稀散金属矿产资源是我国利用国内国外两种资源两个市场、互通有无的具体抓手。很少有哪个国家的矿产资源是可以完全自给自足的,而我国作为世界上最大的发展中国家,既需要满足国内市场的需要,也在不断地向国际市场输送矿产品及其制品,当然也需要进口国内急缺而先天不足的矿产品,如石油、铬铁矿。稀散金属也是我国可以出口的重要物项,尽管总量不大,但在国际市场上也具有一定的话语权,在特殊情况下还可以“物物交换”,与稀土一样,镓、锗、铟、镉等稀散金属也可以作为资源储备与国际矿产品价格平准机制的有效手段之一。因此,稀散金属的开发利用,将有助于增强国际竞争力和话语权。大国崛起的历史经验和教训表明,率先在关键性、颠覆性技术方面取得突破的国家,往往能够引领新一轮工业革命,形成具有强大国际竞争力的产业体系,赢得全球新一轮发展的主动权和领导权。加快形成稀散金属领域的新质生产力,有利于我国在全球产业链、价值链中占据优势地位,增强我国的国际影响力和竞争力,提升我国在全球治理中的参与度和引领度<sup>[3,15-16]</sup>。

3)稀散金属的勘查开发,依靠传统的理论、技术乃至思维,都很难取得突破性进展。比如煤中伴生有丰富的锗资源,如何评价、如何利用?是先烧煤再直接利用煤灰来回收锗(如云南的临沧锗煤矿),还是先用煤来发电再从发电厂的烟尘中回收锗?目前既没有国家标准也没有行业规范,因此也就影响到原煤中锗资源的评价,对开发利用方案的编制也就产生了不同的技术路径。因此,加大稀散金属矿产资源的勘查评价,尤其是综合利用的高技术研发,十分紧迫。我国具有稀散金属资源巨大的找矿潜力,但工作基础薄弱,勘探力度不够,综合研究跟不上,产业政策明显滞后,影响到资源的利用,更谈不上形成新质生产力。因此,以新质生产力为切入点,有助于改变我国稀散金属无论是资源评价还是开发利用方面的落后局面,补齐短板,倒逼创新引领能力的提

升,包括分散金属方面的人才、团队及创新平台建设。

4)查明分散金属的资源禀赋特征,调整分散金属的战略定位,既是当务之急,也是现实需要。我国不少分散金属市场价格不高,主要是由于只针对传统产业,如镓、锗、镉等。如果换个角度,限制这些传统产业中用量不大的“小金属”的供给,加大储备的力度,不但可以提高市场价格,而且可以“充实国库”,为即将到来的产业需要作好物资储备工作。因此,从新质生产力的角度来开发利用分散金属,无疑将取得十分显著的经济和社会效益,有助于建设创新型国家和经济转型升级。

5)分散金属将是国家安全体系,尤其是关键矿产产业链安全体系建设的重要组成部分。只有以经济新安全格局为依托,以新质生产力为关键着力点,才能降低我国战略性新兴产业和未来产业供应链、分散金属矿产资源、关键核心技术和贸易被“脱钩”、被“断链”、被“制裁”等等的不良影响,才能营造更稳定安全的发展环境,才能构建新发展格局,才能确保国内经济稳定有序运行。

## 9 结语——用好分散金属的建议

在编制《全国矿产资源规划(2008—2015年)》《全国矿产资源规划(2016—2020年)》时,对于稀土、稀有和分散金属(三稀)矿产资源,笔者曾经提出“稀土管得住,稀有找得到,分散用得好”的看法<sup>[11-12,17-18]</sup>。相对于稀土、稀有金属而言,我国的分散金属无论是资源保障还是技术创新都还存在明显不足,既缺乏白云鄂博那样的资源储量全球第一的世界级稀土矿床,也缺乏南方离子吸附型稀土矿那样的易采而又具高价值的独特优势,但不妨以新能源汽车快速发展为实例,吸取锂矿储备不足与新能源汽车产业发展的经验与教训,瞄准战略性新兴产业尤其是未来产业,锚定“促进新质生产力形成与发展”的目标,充分用好分散金属资源,是完全可能的。建议:一是加强综合评价(分散金属主要是共伴生组分),查明资源家底,摸清优质资源的分布情况,加强资源储量的账面储备;二是加大产品实物的储备力度,在国家储备的同时,鼓励企业乃至民间储备分散金属制品,以免在市场需要不大而产能过剩的情况下影响企业冶炼回收的积极性(如镓锭);三是加强分散金属地质找矿与开发利用,尤其是高端开发利用的人才和技术储备。近期可以通过调整优化产业链布局,加快建设一批世界级先进制造业集群(尤其是以镓为代表的液态金属未来产业的培育),进一步提升分散金属矿产资源供应保障能力,加强产业链关键环节产能储备(必要者还需备份);四是加大产业政策

投放,通过“政府主导,公益先行,商业跟进,创新引领,快速突破”的新机制来取得找矿突破,以促进新质生产力的形成与发展。

新一轮找矿突破战略行动正在紧锣密鼓进行,“十五五”即将到来,全国性及其他相关产业发展规划的编制又将开始。新质生产力的提出,为战略性新兴产业和未来产业的发展规划提供了新的切入点,也为矿产资源的高质量开发利用指明了新方向。我国分散金属矿产资源丰富,可以为产业链供应链的安全提供资源保障,但勘查开发的程度还比较低,正好借编制《全国矿产资源规划(2026—2030年)》之际,进一步提高站位,将分散金属纳入到国家矿产资源安全体系的建设中加以通盘考虑。这既可以改善对分散金属矿产资源的综合管理,也可以为新一轮找矿工作的部署提供科学依据,进而为新质生产力的形成与发展奠定基础。

## 参考文献(References):

- [1] 习近平主持召开新时代推动东北全面振兴座谈会 强调牢牢把握东北的重要使命 奋力谱写东北全面振兴新篇章[N]. 人民日报, 2023-09-10(01).
- [2] 张思远, 吴根平. 加快形成新质生产力 增强未来产业发展新优势[J]. 软件和集成电路, 2023(12): 2-3.  
ZHANG Siyuan, WU Genping. Accelerate the formation of new quality productivity and enhance the new advantages of future industrial development[J]. Software and Integrated Circuit, 2023(12): 2-3.
- [3] 柳学信, 曹成梓, 孔晓旭. 大国竞争背景下新质生产力形成的理论逻辑与实现路径[J/OL]. 重庆大学学报(社会科学版), 1-12[2024-03-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1023.C.20231228.0027.002.html>.  
LIU Xuexin, CAO Chengzi, KONG Xiaoxu. The theoretical logic and practical path of “new qualitative productivity” in the context of great power competition[J/OL]. Journal of Chongqing University (Social Science Edition), 1-12[2024-03-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1023.C.20231228.0027.002.html>.
- [4] 王世泰, 余达淮. 习近平关于新质生产力重要论述的生成渊源、丰富内涵与实践要求[J/OL]. 中共杭州市委党校学报, 1-9[2024-03-01]. <https://doi.org/10.16072/j.cnki.1243d.20240023.001>.
- [5] 谢建邦. 新时代新质生产力的理论逻辑、实践规律与形成路径[J/OL]. 闽江学刊, 1-13[2024-03-01]. <https://doi.org/10.13878/j.cnki.yjxk.20240025.001>.
- [6] 焦方义, 张东超. 发展战略战略性新兴产业与未来产业加快形成新质生产力的机理研究[J]. 湖南科技大学学报(社会科学版), 2024, 27(1): 110-116.  
JIAO Fangyi, ZHANG Dongchao. Mechanism of developing strategic emerging industries and future industries to accelerate the formation of new quality productivity[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology(Social Science Edition), 2024, 27(1): 110-116.
- [7] 毛麒麟. 有毒的金属元素铊[J]. 化工之友, 1996(4): 12-13.

- [ 8 ] 王瑞江,王登红,李建康,等.稀有稀土稀散矿产资源及其开发利用[M].北京:地质出版社,2015.
- [ 9 ] 中国有色金属工业协会.2018年有色金属行业锗行业研究报告[R].2019.
- [ 10 ] 李定海.中国砷化镓太阳能电池的发展研究[J].中国金属通报,2018(2):39.  
LI Dinghai. Development of gallium arsenide solar cells in China[J]. China Metal Bulletin, 2018(2): 39.
- [ 11 ] 王登红,王瑞江,李建康,等.中国三稀矿产资源战略调查研究进展综述[J].中国地质,2013,40(2):361-370.  
WANG Denghong, WANG Ruijiang, LI Jiankang, et al. The progress in the strategic research and survey of rare earth, rare metal and rare-scattered elements mineral resources[J]. Geology in China, 2013, 40(2): 361-370.
- [ 12 ] 王登红,孙艳,代鸿章,等.我国“三稀矿产”的资源特征及开发利用研究[J].中国工程科学,2019,21(1):119-127.  
WANG Denghong, SUN Yan, DAI Hongzhang, et al. Characteristics and exploitation of rare earth, rare metal and rare-scattered element minerals in China[J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(1): 119-127.
- [ 13 ] 单麟天.国内外镓资源、提取、应用及供需状况:攀枝花矿提镓的可行性研究[J].钢铁钒钛,1992,13(8):44-52.  
SHAN Lintian. Demand situation and supply, extraction, application of gallium resources both domestically and internationally: taking the feasibility study of gallium extraction from Panzhihua Mine as an example[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 1992, 13(8): 44-52.
- [ 14 ] 李德先,王登红,等.中国矿产地质志·稀散金属矿卷[M].北京:地质出版社,2024(待出版).
- [ 15 ] 刘瑞,郑霖豪,陈哲昂.新质生产力保障国家经济安全的内在逻辑和战略构想[J].上海经济研究,2024(1):1-40.  
LIU Rui, ZHENG Linhao, CHEN Zheang. The inner logic and strategic concept of ensuring national economic security with new quality productivity[J]. Shanghai Journal of Economics, 2024(1): 1-40.
- [ 16 ] 赵振华.加快形成新质生产力[J].前线,2024(1):20-23.  
ZHAO Zhenhua. Accelerate the formation of new quality productivity[J]. Qian Xian, 2024(1): 20-23.
- [ 17 ] 王登红,王瑞江,孙艳,等.我国三稀(稀有稀土稀散)矿产资源调查研究成果综述[J].地球学报,2016,37(5):587-598.  
WANG Denghong, WANG Ruijiang, SUN Yan, et al. A review of achievements in the three-type rare mineral resources(rare resources, rare earth and rarely scattered resources) survey in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(5): 587-598.
- [ 18 ] 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 Denghong. 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 Geoscientica Sinica, 2019, 93(6): 1189-1209.