

大陆成矿学的研究前沿与关键科学问题*

翟明国^{1,2}

(1 中国科学院大学地球与行星学院,北京 100049; 2 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029)

摘要 把大陆成矿学作为一门学科提出是基于近年大陆动力学和矿床学取得一系列进展的基础上的,从这个角度而言,大陆成矿学是矿床学研究的新阶段,是大陆动力学与矿床学的交叉学科。在新一轮找矿战略行动中,成矿理论和勘探理论研究仍然是亟待突破的瓶颈。人类开发和利用的矿产资源绝大多数是大陆资源。大陆成矿学从成矿地域和地质背景上,主要可分为陆内成矿和陆缘成矿作用。陆内成矿作用包括大陆裂谷成矿、克拉通成矿、陆内造山成矿、地幔柱成矿等;陆缘成矿作用包括大陆边缘成矿、大陆增生成矿和大陆碰撞成矿等。相关的科学前沿与关键科学问题有很多,这里强调:① 元素行为以及圈层间相互作用;② 流体与成矿作用的精细过程;③ 分散和稀有元素的巨量富集;④ 重大地质事件与元素的重新配置;⑤ 大陆演化与成矿演化的同步性及不可重复性。这些科学问题都会聚焦到成矿作用的时-空不均一性,以及成矿过程的复杂性和成矿类型的非单一性上,大陆成矿作用利用已有的成矿模式和传统的板块成矿理论还不能完满解释上述问题。深入的地质调查与实验研究和典型实例的解剖与对比研究是必要的。中国的大陆演化记录全面和复杂,克拉通与造山带都很有特色,其中华北克拉通元古宙暴贫暴富成矿(包括白云鄂博 REE 矿)、中生代华北克拉通破坏与华南大花岗岩省成矿(包括低温成矿域)、中亚增生型-青藏碰撞型造山带成矿与特提斯构造域叠合成矿、峨眉山地幔柱成矿以及高分异花岗岩-伟晶岩成矿等。近些年来对它们的研究已经有重大突破,提出了不少新的见解。希望地质与矿产界的科学、技术和工程人员更加关注大陆成矿理论的发展,为找矿勘查实践和大陆动力学的推动作出更大贡献。

关键词 大陆成矿学;研究前沿;关键科学问题;中国研究进展

中图分类号:P541;P612

文献标志码:A

Research frontiers and key scientific issues of continental metallogeny

ZHAI MingGuo^{1,2}

(1 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract

The continental metallogeny as an academic discipline is based on the advancements in continental dynamics and economic geology in recent years. The continental metallogeny represents a new stage of ore deposits studies and evolved into a new discipline, intersecting between continental dynamics and economic geology. The theoretical breakthrough on metallogenic and exploration research remains a critical bottleneck in the new round of strategic actions for mineral exploration. Continental minerals are still the dominant source of human exploitation and use. Continental metallogeny can be divided into two categories based on metallogenic region and geological background, i.e., intra-continental and continental margin metallogenesis. The intracontinental metallogenesis mainly includes four types, which are continental rift, cratonization, intracontinental orogeny, and mantle

* 本文得到国家自然科学基金(编号:92162323)的资助

第一作者简介 翟明国,男,1947年生,研究员,中国科学院大学资深讲座教授,主要研究领域是前寒武纪地质学、变质地质学和岩石学,主要研究方向是大陆形成演化和成矿演化,克拉通和造山带变质作用。

收稿日期 2024-11-13;改回日期 2025-01-13。赵海杰编辑。

plume. The continental margin metallogenesis includes continental margin, continental accretion and continental collision types. There are many academic frontiers and key issues, among which the following are emphasized: ① the geochemical behavior and mobility of the ore-forming elements in process between Earth's spheres; ② The properties of ore-forming fluids, and the fine metallogenic processes that they indicate; ③ Extraordinary enrichment of dispersed and trace elements; ④ The controlling mechanism of major geological events on mineralization; and ⑤ Synchronization and irreversibility of continental evolution and metallogenic evolution. These scientific issues converge on the spatiotemporal heterogeneity of metallogenic complexity. Existing metallogenic models and traditional plate tectonic theories are still insufficient to fully explain continental metallogeny. The record of continental evolution is comprehensive and complex in China, with distinctive characteristics in both cratons and orogenic belts, so there is a rich diversity of ore deposits. In recent years, significant breakthroughs have been made in ore deposit research, leading to numerous new insights. It is hoped that researchers and engineers of related fields will pay greater attention to the development of continental metallogenic theory, contributing more significantly to practice of mineral exploration and the development of continental dynamics.

Key words: continental metallogeny, research frontiers, key scientific issues, progress of Chinese research

在新一轮找矿战略行动中,成矿理论和勘探理论研究仍然是亟待突破的瓶颈。把大陆成矿学作为一门学科提出是基于近年来大陆动力学和矿床学取得系列进展的基础上(国家自然科学基金委,2020)。从这个角度而言,大陆成矿学是矿床学研究的新阶段,是大陆动力学与矿床学的交叉学科。

大陆成矿学将成矿作用纳入大陆形成演变的整体框架中,主要研究成矿的大陆动力学背景、物质演化、成矿作用过程和矿床时空分布规律,目标是建立大陆成矿理论,为找矿预测提供新的科学基础。因此,大陆成矿作用的科学内涵可描述为:①人们所探明、了解和研究、开发的矿床,绝大多数都在陆地之上,大陆矿产资源是支撑人类社会生存和发展的主要支柱。当然,这并不排除,随着科学认知和勘察开采技术的提高,海洋矿产会为人类社会做出重大贡献;②地球上现存的大陆可以被证实是在46亿年开始形成并演化到现在的,而现存的大洋只有约2.5亿年的年龄。大陆矿床的研究无疑在时间和空间尺度上,特别是对于人们的认知能力范围都是极为重要的。大陆成矿的研究将会对物质的存在、状态、分布、配置、迁移、富集与贫化、保存和破坏、平衡与再平衡等一系列科学问题包括能量和动力学机制提供依据;③板块构造理论在解释大陆地质时遇到了困难,在20余年的时间里,美欧等国有了大陆动力学、地球系统科学等新提法,但在地球动力学的进展上成果有限。矿床作为独特的地质演化某个阶段和过程的物质记录,是难得的解开大陆形成之谜的金钥匙。

因此,大陆成矿学是大陆动力学的姊妹学科。

1 大陆成矿学的背景与发展过程

1.1 板块构造前的大陆成矿研究

在板块构造理论于20世纪60年代末期出现以前,全球大陆矿床的研究呈现多种学派争鸣的局面,影响力最大的是西方学者提出的槽台分布成矿(Turneure, 1955),基本内容是大陆主要分为地槽和地台2个基本单元。地台以稳定的外生成矿为主(主要是前寒武纪);地槽以构造活动中形成的内生矿产为主(多为显生宙)。而后,中国学者提出一些学说,如地洼(地台活化)说有重要影响(陈国达, 1956)。地洼说提出槽台说有不足,地壳除了地槽和地台2大构造单元外,还存在第三构造单元,即地台活动带-地洼,以基底的再造活化为特征,建立了活化构造与成矿理论体系。

20世纪70~90年代,随着海底扩张和大陆漂移研究的逐步发展,1968年英美学者正式提出板块构造,论述了板块运动和洋陆板块的相互作用以及壳幔相互作用,提出威尔逊旋回,强调成矿研究的“将近论古”为核心原则,对板块成矿作用进行了系统总结(Mitchell et al., 1981; Sawkins, 1984),建立了相对完整的板块边缘成矿模型和板块成矿体系,至今仍然是重要的矿床理论和研究前沿。

自20世纪90年代至今,对于地球发展历史上的地质重大事件与成矿响应的研究越来越受到国内外学者的重视。例如大氧化事件(Great Oxidation

Event, GOE)和早前寒武纪成铁事件(banded iron formation, BIF),条带状铁矿不仅是矿床,而且作为重要的地球阶段性的代表性物质,指示了地球发展演化历史中重要的阶段。研究也更重视地球深部与浅层矿床形成的对应、耦合与控制作用,促使矿床学的研究与地球演化及其动力学的结合越来越紧密。成矿作用的深部过程与末端效应、矿床的分布和勘查规律、成矿的专属性与元素行为诸方面的研究,标志着成矿理论的研究进入到更高的科学层次。

1.2 21世纪20年代前的中国大陆成矿研究

中国的地质先驱在矿床地质和找矿勘探方面作出巨大贡献,他们提出的找矿方向至今在一些领域还有指导作用。总体而言,在20世纪前半叶,中国的矿床学研究以单一矿种、单个类型的矿床研究为主,以就矿找矿为总体特色,主要通过解剖典型矿床的地质控制因素,对地(岩)层、岩石、构造、矿物组合、围岩及其蚀变和地球化学特征等进行描述和总结,探讨矿床成因,划分成矿类型,同时开展一定的区域研究,寻求找矿标志等。例如翁文灏(Wong, 1927)和谢家荣(1941)等都对中国的矿产及其矿区等做了划分,甚至对成矿时代和地质成因提出了有见地的认识。

20世纪50~70年代,槽台理论以及地洼学、地质力学、断块说和镶嵌波浪等学说在中国出现百花齐放的局面,推动了中国矿床学研究的深入进展。研究关注到矿产多样性和综合性,促进了矿床成因与大地构造性质的关系,从早期以单一矿床或单一成矿类型为重点,发展到重视将区域成矿分析与成矿地质背景的紧密结合,将构造-岩石组合-矿物建造-成矿作用作为一个整体进行考虑,加强矿床类型和种类的对比研究。例如,中国华南花岗岩与成矿的研究以及长江中下游区域成矿规律的研究具有很高的显示度和指导意义(徐克勤等,1963;涂光炽等,1984;郭文魁等,1982;叶连俊等,1989)。

自20世纪90年代以来,国际上地球科学不断向系统化、综合化和全球化的方向发展,中国也不失时机地开展了“大陆动力学”的战略研究和学科布局,这是对在地球科学起引领作用的板块构造学说而言,是重要的推动、完善和发展的举措。在研讨大陆动力学理论体系下,理解大陆成矿作用和提高发现大陆内部成矿能力,引起地质界的广泛关注。中国学者做了很多系统性的创新工作(裴荣富

等,1999;刘宝珺等,2001;滕吉文,2004)。例如,陈毓川(1997)指出成矿过程有四维空间,特别是时间轴的考虑,把成矿作为一个事件,刻画了它的演化过程。翟裕生(1999)指出,成矿系统是指在一定地质时空领域,控制矿床形成和保存的全部地质要素和成矿过程,以及所形成的矿床系列和异常系列构成的整体,它是具有成矿功能的一个自然系统,体现了物质、运动、时间、空间、形成和演变的整体观与历史观。这个时期,一些重要的成矿研究领域,如低温成矿、分散元素成矿、稀土成矿的研究也有重要进展。在此研究中,中国的成矿研究队伍和技术平台得到了前所未有的发展和壮大。

1.3 板块构造的理论挑战与大陆成矿学的科学意义

板块构造理论的诞生引发了地球科学包括成矿学的革命,促进了成矿理论和找矿理论及勘查技术的快速发展。板块构造对于大洋以及现代洋陆边界的模型成为地质、构造、岩石以及矿床的理论范式。然而,一些研究发现该理论在对大陆的研究中以及在中生代之前存在不足。因此,板块构造何时启动以及是否可以“登陆”的疑问不断被提出。例如,中国,学者赵宗溥(1996)在分析了蛇绿岩的产出特征和国内外实例之后提出,在全球尚不能确定在大陆上是否存在过“大洋”。在沉积学领域为板块构造做出重大贡献的瑞士籍华人学者许靖华(Kenneth J.Hsü)在20世纪90年代末CCTV的有关节目中表示,他在新疆工作中提出的蛇绿岩和板块缝合线都是错误的,用板块构造解释大陆的一些地质问题是有缺陷的。钱祥麟(2004)指出,地质构造演化史的表达主要通过编制各类大地构造图件来实现,这对中国拼贴地块区特征性的板内造山作用及叠加演化的认识是一种重要总结,深入开展板内造山过程的研究并进行系统性综合总结是现代大陆地质学研究中刻不容缓的工作。这个时期中国相继成立了以大陆地质构造和大陆动力学为核心研究方向的国家和省部级实验室,中国科学院和国家自然科学基金委也设立了一批研究项目和学科发展战略项目(国家自然科学基金委,2017),促进了大陆地质及动力学的研究。应该指出,尽管存在争议,板块构造成矿依然是大陆成矿学的核心内容。随着矿床类型的不断完善和成矿背景的深入研究,完整的成矿理论体系基本建立。从20世纪七八十年代以板块边缘成矿模型(如形成于岛弧环境的斑岩铜矿和弧后盆地的火山成因的块状硫化物矿

床实体解剖,建立了经典的成矿模型(Sillitone, 2010)到不断构建板内成矿理论和模型,推动了成矿理论和勘查实践。当然,仍存在尚需要解决的问题。例如,现代板块构造启动前后的构造成矿过程与机制的差别、增生造山和碰撞造山过程与成矿机制的差别、陆内造山的机制与圈层作用以及大陆基底活化-再造与壳幔过程及大规模成矿作用等。因此,大陆成矿的研究有巨大的发展空间和前景,还为推动、发展和完善板块构造提供了地质实例。

矿床是特殊的岩石,或者说是现阶段的认识、技术水平下,满足人类社会发展需求的具有经济价值的石头(或液、气态),是地球演化过程中具有代表性的典型地质体。在大陆形成以来40多年的历史中,在不同演化阶段和不同构造体制转换的重大地质事件中,物质的变化会以不同的方式记录下来,矿床无疑是不可替代的典型研究对象。因此,发展大陆成矿学的科学意义至少可以归纳为3个方面:一是提高矿床学的研究水平,建立系统的成矿理论,推动找矿和勘查实践;二是把大陆成矿研究与大陆动力学结合起来,正视板块构造在大陆地质上遇到的难题,发展和完善大陆动力学;三是把大陆成矿研究放到地球系统的框架内,从深部到浅部,从元素性质到物质循环,从成矿规律到成矿事件演化,从固体圈层到外部圈层,从元素行为到动力驱动机制,努力在地球圈层的相互作用与演化规律上取得突破。图1所示的是地球演化的3个一级科学问题:大陆的形成演化、构造机制的变化和地球环境的变化。它们是相互关联和相互制约并互成因果。地球早期无迹可查或少迹可查的时期主要是圈层分异阶段。而当温度降低到岩石可以固态存在起,陆壳岩石的形成就成为黑匣子和记录仪。陆壳的形成和存在方式由相应的构造机制控制,而陆壳的规模和演化又控制着构造机制的演变。这里还有一个最近备受关注的问题,就是地球环境的变化,它不仅与矿床形成密切相关,还是生命演化的基础。

从某个角度而言,现在的构造地质学、岩石学和矿床学遇到发展的瓶颈,但也面临取得重大突破的机遇。地球化学和地球物理以及分析测试和勘探技术、大数据与人工智能的快速发展,极大地推动了传统地质研究。同时,中国经济发展的需求也为成矿理论研究提出了新的要求(陈华勇等,2020),传统地质无疑遇到了最好的发展期。

2 大陆成矿学的主要科学问题

中国开展的大陆成矿学研究,主要包括陆内及其陆块边缘的成矿作用。陆内成矿作用主要有大陆裂谷成矿、克拉通成矿、陆内造山成矿、地幔柱成矿等;陆块边缘成矿作用主要有大陆边缘成矿、大陆增生成矿、大陆碰撞成矿等。

2.1 陆内成矿作用

(1) 大陆裂谷成矿作用

大陆裂谷是发育于某一大陆地块或克拉通大陆地壳之上的裂谷,以深大断裂为边界,两侧往往被一系列正断层所限且构成复杂的断陷带,表现出:①一般为高角度的正断层,垂直端距可达几千米,有时可切割岩石圈达软流圈;②大陆裂谷剖面上的组合形式并非简单的地堑构造,而是由一系列的地堑和地垒组成的裂谷系,且大致呈一个总体延伸方向;③形成机制以拉张为主。大陆裂谷是地幔物质上涌导致地壳拉伸减薄的结果,也是板块演化的威尔逊旋回的一个重要环节。但目前全球的研究,除了红海型的小洋盆之外,尚未确定或公认有大陆裂谷演化成大洋的实例。

地幔物质和能量上涌使裂谷构造形式发展,并产生一系列裂谷盆地,但面积通常较小。裂谷构造沉降形成封闭式良好的盆地或洼陷,同时伴有大量的火山活动,带来丰富的深源物质,其中可能以火山期后的温泉热水补给为主。一些裂谷还与大洋沟通,可能受到海水补给等。因此,大陆裂谷中有丰富的成矿物质、有高的地热流促进成矿物质的溶解运移、有多种来源和多种性质的流体(包括热卤水)、有火山喷出物和蒸发岩层壳提供硫、氟等矿化剂,有利于在还原环境下的金属硫化物堆积、有同生断层等构造作用为流体运移提供通道、有封闭好的局部凹陷可保持矿质的持续堆积和不被流失。大陆裂谷的后期沉积层壳覆盖已成的矿层,起到屏蔽和保护作用。以上因素有源、运、堆、存的地质条件,组合而成集约化的成矿系统,矿产丰富、类型多样。大陆裂谷成矿的关键科学问题有:①大陆裂谷的深部结构模型、成因类型及其与板块构造过程的关系;②大陆裂谷演化过程的热流作用、沉积作用和岩浆活动以及各类矿床形成的动力学背景。

(2) 克拉通成矿作用

克拉通是地球表面长期稳定的早前寒武纪陆

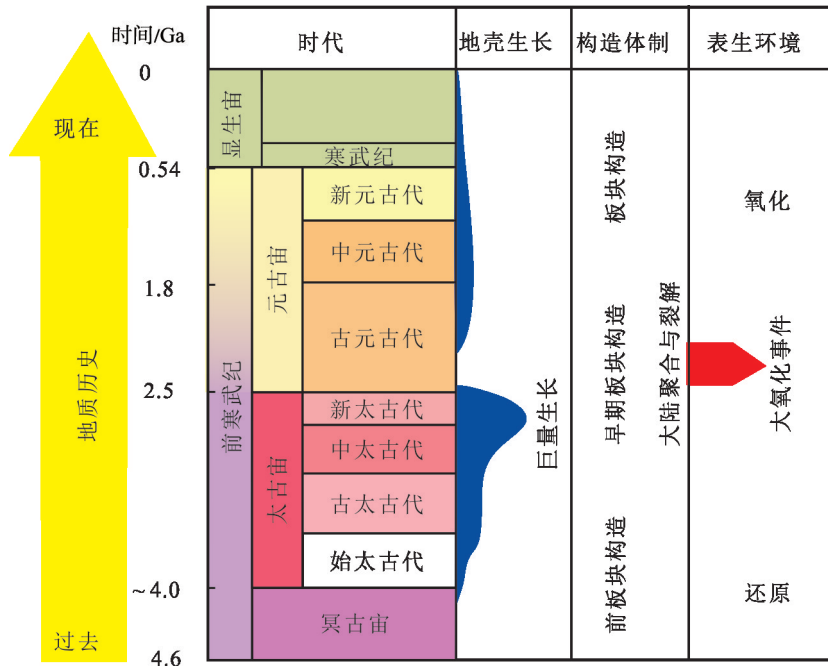


图 1 地球演化的 3 个基本问题

Fig. 1 The three major issues on Earth evolution

块,通常由巨厚的大陆岩石圈地幔和稳定的陆块构成,大陆岩石圈一般厚度>120~150 km。大陆的形成(早期硅铝质陆壳,奥长花岗岩-英云闪长岩-花岗闪长岩组分,简称TTG质组分)和成熟化(钾质增高,钙碱质花岗岩组分)过程,是推测的初始镁质地壳(juvenile crust)部分熔融形成陆壳以及陆壳多次活化(重熔)的结果,也是克拉通岩石圈强烈亏损亲岩浆元素和某些金属元素的原因。克拉通化过程是原有的混沌陆壳稳定分层(高级变质的“干”下地壳富集难熔元素和高场强元素;低级-未变质的“湿”上地壳、富集生热元素和大半径离子元素)。因此,克拉通成矿作用主要发生在陆壳的生长过程、克拉通化过程和克拉通形成后的长期风化-沉积过程。

在新太古代末的全球克拉通化之前,在贫氧和缺氧的环境下,巨量的条带状铁建造的形成是全球最重要的铁矿来源。此外,还有太古宙绿岩带中的金矿,以及镍、铜、锌等矿产等都很重要。超级克拉通在约2.5~2.45 Ga形成之后,有一个著名的“构造静寂期(tectonic unconformity)”,那是长约2~3亿年的相对稳定的大陆,发生了至今仍然呈现“谜团”一般的地质过程。如果此前的太古代末期被形象地称为成铁纪(Siderian),此后的地质时期称为铁锈纪(Skourian),那么构造静寂期除了长期稳定的克拉通

风化沉积外,还出现了地球历史上宏伟的地质事件,即大氧化事件(GOE)和地幔柱事件(层侵纪, Rhyacian),以及此后的活动带造山事件(成山纪, Orosirian),可以解释为可能的第一个超级大陆(克拉通)的裂解与聚合,即第一个超大陆旋回。在这个时期内,出现了各种地质历史上未见的巨大矿床,即克拉通成矿作用,除了铁、锰矿和金沉积成矿外,南非罕见的铜-镍、铬-铂族元素以及金的岩浆成矿,还有和大氧化事件有关的各种沉积或火成岩有关的矿床,包括石墨、硼、镁、磷(以及铀)等非金属/金属成矿作用。虽然近些年来地质学家习惯用超大陆旋回来解释此后的地质事件和成矿作用,但是中-新元古代(寂寞的十亿年)似乎并不明确指示超大陆的循环往复。在大陆出现了氧化的震荡以及深部暗涌的壳幔相互作用后,又出现了新元古代雪球事件和氧化事件(NOE),此后的南华裂谷可能为现代式的板块构造和超大陆旋回奠定了基础。克拉通成矿作用所内含的重大地质问题,以及物质在内生和表生双重构造环境变化夹击下的重组与成矿,无疑是地球演化史上的重头戏(Zhai et al., 2013)。

克拉通成矿的关键科学问题有:①陆壳巨量生长与壳幔间的元素分配;②地球的增氧事件与表生矿床;③前寒武纪时期的成矿演化不可重复性。

(3) 陆内造山成矿

陆内造山作用至今仍是一个有争议的科学问题。虽然1993年美国科学基金会就牵头了大陆动力学计划,而中国随后也在不同部委和国家基金委的资助下开展了类似的研究,但至今收效甚微。钱祥麟(2004)指出,“板块本质的刚性定义不能设想在板块内部发生(与边缘程度相当的)变形,即板块内部不会也不可能发生与板缘相当的造山带”,因此才会有不发生在板缘的“板内的造山作用,如走滑构造的造山成因,甚至拉张构造成因的造山带”的概念,在中国它们经常表现为“在显生宙,与西太平洋运动有因果关系的不同时代地质构造单元拼贴而成的中国地体拼贴新板块”。其特征是板内造山带多发生重熔壳源花岗岩带而不是前陆盆地沉积;其规模是由作为拼贴单元的先存地质构成单元的规模所决定。

在中国,符合类似定义的陆内造山带很多,例如华北和华南的“燕山”运动,或者较小尺度的如太行山造山带。陈国达(1956)定义的地洼,是将陆内出现的地质体单独划出并归属到第三地质单元中。在国外的研究中,也有很多认为板块内部或地台内的海相、陆相沉积盆地形成以后转化为造山带的例子。陆内造山带构造变形最显著的特征之一就是基底卷入的厚皮构造特征,在变形过程中整个岩石圈作为应力导层。陆内变形主要取决于岩石圈的不均一性。即使在板块构造中,相邻的陆块拼合成统一板块之后,区域演化也会进入陆内阶段。陆内造山既然与板缘造山不同,由构造引起的物质不平衡,就会导致在新的平衡中形成新的地质体包括矿床。其中原有地质体的部分熔融是重要的成矿机制。无疑,原有岩石的部分熔融,以及在该过程中的壳幔作用带来的能量与物质循环,是成矿的关键过程。

中国的陆内造山研究潜力巨大,有利于出理论和出成果。华南的中生代花岗岩省和大规模成矿作用,华北的岩石圈减薄或克拉通破坏与巨量金矿,都是很好的实例(毛景文等,2011,2023;胡瑞忠等,2014;杨进辉等,2021;朱日祥,2021;邓军等,2023;)。

陆内造山成矿的关键科学问题有:① 岩石圈深部过程,壳幔过程与结构;② 陆内成矿流体来源与性质;③ 陆内矿床的改造、叠加过程。

(4) 地幔柱成矿

地幔柱是自核幔边界上升,在地幔演化,到近地

表与地壳发生壳幔相互作用的圆柱状地质体,具有高热流、低速带的特点,它沟通了地核、地幔和地壳各圈层之间的物质与能量交换,提供了板内岩浆活动与成矿作用的一种重要地质活动。

地幔柱除自身的物质分异之外,重要的成矿方式是地幔柱在上侵过程中从核幔边界、地幔、地壳中萃取的大量成矿物质,携带到地表,而且这些物质在不同的深度、压力、温度以及介质条件下,其价态和活性都发生急剧变化,这对成矿尤为重要。此外,地幔流体对于成矿的关键作用是成矿、成大矿、成特色矿床组合的必要条件。地幔流体的成因研究很前沿,它们形成于地核及下地幔的脱气作用,或者与洋壳深俯冲的再循环,使得地幔流体的成分和性质非常复杂,也可能形成地幔和地壳的混合流体。

中国的峨眉山大火山岩省和塔里木大火山岩省都很有特色。研究表明,除了岩浆系统的深部成矿之外,地幔柱岩浆活动还可以通过地幔热液的上升,诱发地壳的重熔以及各种地壳浅部的地质响应,形成热液或其他矿床。

地幔柱成矿作用的关键科学问题有:① 地幔柱深部过程与动力学;② 地幔柱岩浆在中、上地壳的过程、通道和成矿多样化;③ 地幔柱的热液和流体系统。

2.2 陆缘成矿作用

大陆边缘成矿是一个较为广泛的名词,即指处于不同板块的交接部位。可以分为离散型、汇聚型、对接型和转换型(裴荣富,1999)。离散型一般指大陆裂谷,前面已经提及;汇聚型一般指与大洋俯冲带有关的矿床,成矿专属性是与洋壳俯冲熔融的钙碱性岩有关的铜、钼以及铅、锌、钨、锡等成矿;对接型及其成矿作用主要是与蛇绿岩有关的铬、铂等成矿;转换型陆缘及其成矿类型多指汇聚型成矿类型的改造与发展。

由于古大陆边缘经历了漫长的地质作用,壳幔作用强烈,构造活动复杂,圈层间物质能量交换频繁,岩浆活动强烈,流体多样和活性强,很多大型超大型矿床分布在大陆边缘,最受矿床界关注。

(1) 板块俯冲造山成矿

活动大陆边缘是指洋陆边缘俯冲带,在这里大洋岩石圈地幔向大陆岩石圈俯冲,各类弧杂岩、海山、洋岛等以增生楔方式拼贴在大陆边缘,同时俯冲板块的脱水熔融以及被交代的上覆地幔部分熔融的岩浆可以以火山岩和侵入岩的方式加入到大陆边

缘,使得大陆侧向增生。在岛弧根部的俯冲大洋地幔的部分熔融以及诱发的大陆岩石圈地幔和下地壳部分熔融产生的岩浆能够以底侵、侵入和喷发的形式在大陆岛弧或弧后盆地部位加入陆壳,从而实现大陆垂向增生。这种地幔变为地壳、大洋变为大陆的过程,物质交换非常活跃,有极其丰富的多种流体,有足够的能量活动,被称为地球俯冲工厂,是成矿作用的最佳选择部位。中国中亚造山带和喜马拉雅造山带是中国斑岩型矿床的典型区域。绝大多数斑岩铜矿床分布在汇聚板块边缘,研究表明高氧逸度和洋壳部分熔融是控制斑岩铜矿床形成的2个关键(Sun et al., 2013)。作为亲硫元素,铜主要受还原态的硫(S^{2-})的控制,而硫的价态、性质则受氧逸度的控制。在部分熔融过程中,高氧逸度可以大幅度提高硫在岩浆中的溶解度,有利于源区硫化物被破坏,以硫酸根的形式被熔出,从而大幅度提高初始岩浆铜含量,与此同时,硫化物在岩浆演化过程中可以保持不饱和状态,有利于作为中度不相容元素的铜通过岩浆演化进一步富集。在磁铁矿结晶等过程中,岩浆体系的氧逸度降低,硫酸根被还原,还原态的硫(S^{2-})将岩浆中的铜萃取、富集到流体相,从而形成斑岩铜矿床。这种高氧逸度通常出现在汇聚板块边缘。由于洋壳铜和硫含量远高于陆壳和地幔,而且俯冲带氧逸度高出地幔和陆壳2个数量级左右,因此,俯冲洋壳部分熔融形成岩浆的初始铜、硫含量远高于陆内岩浆,有利于成矿。

中亚造山带是巨大的造山带之一,特别是由于其形态和其造山过程的特殊性被称为增生型造山(肖文交等, 2019)。增生型造山作用是具有多种性质(汇聚、转换和离散)的板块边缘,是沿一个核心大陆边缘最终发生复杂相互作用动力学过程的总和。弧前发育增生杂岩和各种混杂岩或者构造岩片,上叠有以弧前盆地为代表的各类沉积盆地,共同制约增生过程的时空演化特征。增生型造山带多发育多岛海复杂古地理格局,增生造山作用具有多组分、多岛海、多盆地类型、多种性质的岩浆活动、宽阔的增生杂岩、多俯冲极性、多地体拼贴、长期演化与面状增生等特性。由于增生型造山带的物质与构造演化的复杂性,中亚造山带在中国境内出现西铜东钼以及成矿时代跨度大、多矿种的复合叠加成矿。

郑永飞等(2022)强调俯冲带是汇聚板块边缘物质和能量传输的关键带,在俯冲带演化的不同阶段具有不同的性质。俯冲地壳在弧下深度的脱水熔融

是突出的,所析出的流体可以溶解不同浓度的不相容元素. 这些流体在弧下深度与地幔楔橄榄岩发生化学反应形成交代岩,成为大洋弧和大陆弧镁铁质岩浆的地幔源区。俯冲带成矿作用的地球动力学过程,可以为理解不同类型的俯冲、不同的俯冲阶段的成矿特征和成矿机理提供更多的帮助。

板块俯冲成矿的关键科学问题有:①俯冲洋壳在变质-部分熔融过程中的物理化学条件变化;②俯冲带流体的成因和行为;③陆壳在横向和垂向增生中的成矿过程与特殊性。

(2) 大陆碰撞成矿

大陆碰撞在威尔逊旋回中是6个阶段中的最后2个阶段。近30多年来,由于超高压变质作用研究的推动,人们提出大陆深俯冲的概念,对陆陆碰撞给予了样式、形态、结构和动力学机制诸方面的新的解释。在新的认识中,包括了大陆岩石圈板片可以俯冲到大于120~300 km的深度、俯冲的板片在深部折裂后甚至可以“整体”折返抬升至地表。在这个从浅部到深部再到浅部的过程,俯冲板片可以穿越不同的地球圈层,它们经历了不同深度、不同成分、不同物理化学条件的围岩相互作用,而自身也经历不同物理化学条件的历练,发生了变质、交代和部分熔融,其中一部分可以拆沉到地幔中,一部分被折返到地表,还有一部分被熔融成其他组分的岩石。

从造山带的研究角度而言,碰撞造山带以它独特的壳幔结构和构造单元的明显区别于俯冲造山带,包括增生型造山带(侯增谦, 2010),具有陆陆对接和大陆岩石圈俯冲的特征。它发育前陆盆地、前陆折冲带、碰撞岩浆带、陆内折断带、后陆盆地等单元。大陆碰撞造山带的构造过程通常是复杂和漫长的。2个大陆对接碰撞后,岩石的汇聚和陆内块体的相对水平运动可以持续进行,这里经常发生许多地质过程或称为事件,例如斜向碰撞、块体间的运动(逆冲、走滑)、岩石圈拆沉和裂谷作用等,因此碰撞造山也可以分为主碰撞、晚碰撞和后碰撞,它们分别以高压-超高压变质、巨型剪切与大规模走滑、幕式多期次的钾质-超钾质岩浆活动为标志。

由此可见,碰撞造山过程往往伴随发育大型-超大型金属矿床。例如青藏高原产出世界级的斑岩型铜矿带、逆冲推覆构造控制的贱金属成矿带、碳酸岩-碱性岩型稀土矿带、大型拆离系控制的铋-金矿带,又如秦岭大陆碰撞带发育巨型斑岩型钼矿和造山型金矿。这说明,由于造山引起的地壳加厚,以及

岩石圈剪切和地幔减薄等引起的高热流和流体,能够导致大规模成矿作用。中国学者在大陆碰撞成矿的研究中有重大贡献,例如陈衍景(2006)的流体成矿模式和侯增谦(2010)的3阶段碰撞造山成矿模式等。

大陆碰撞成矿研究的前沿科学问题有:①大陆碰撞造山带的基本结构和构造单元的划分与机理;②大陆碰撞的基本过程和动力学;③大陆碰撞中的应力机制与深部制约;④大陆碰撞过程的流体系统与演变规律;⑤大陆碰撞成矿系统。

3 大陆成矿学的研究前沿

3.1 元素行为以及圈层间相互作用

矿床的形成过程是(某种或几种)成矿元素富集的过程,因此元素行为最为基础。矿床学历来把元素的地球化学行为作为成矿和找矿的重要内容和标志。这些年来,随着一些同位素和微量元素地球化学的分析测试和理论的提高,对成矿元素的行为提供了更多的制约,而对成矿(金属)元素本身在不同系统和不同条件下的元素行为的差异及原因研究相对薄弱,或者重视程度还需加强。目前研究多认为,星云凝聚是地球上各种元素第一次发生大规模分异的过程,元素的挥发性是主要控制因素。对于熔点高的难熔元素,其地球丰度与球粒陨石成正比,而挥发性元素则随其半凝聚稳定的不同有不同程度的丢失(McDonough et al., 1995)。水的加入使地球与其他类地行星有了本质的差别,它大幅度降低了地幔的固相线,促进了岩浆的演化。板块运动对应着2种主要的熔融过程,在扩张环境,如洋中脊软流圈上涌,发生部分熔融,形成大洋玄武岩,而在大陆裂谷环境下,在地幔柱或上涌地幔作用下,形成大陆玄武岩和层状岩体。在挤压环境下,如俯冲带,俯冲板片脱水引起地幔部分熔融,形成以演化程度更高的安山岩为主的岛弧岩浆岩,并形成相关的浅成低温热液矿床等。水的作用使地球成为目前唯一的以花岗岩为主的陆壳的行星,硅铝质陆壳形成造成的元素分异是大陆成矿中元素循环的关键环节。此外,大陆风化的元素分异是急需给予高度关切的领域,这个过程对于洋陆相互作用和壳幔相互作用的重要性都无法忽视。

大陆岩石圈或陆壳中的物质演化受到地球各圈层相互作用尤其是壳幔相互作用的控制,壳幔相互

作用始终是大陆动力学的核心之一。壳幔之间的相互作用有能量的交换和物质交换。物质交换中至少有四大类:一是成矿物质的交换,即在壳幔作用中原来在地壳中的成矿元素,由于地幔上涌、岩浆底侵和侵入、拆沉等过程,引起成矿元素丰度的变化(加入和流失),直接导致某种元素的富集并沉淀成矿;另一种是壳幔流体成分的交换,流体成分的改变以及物理化学条件的变化,会对成矿元素的赋存状态发生改变,并在流体过程中被搬运、富集或卸载,对元素行为方式、状态、迁移等等起到重要的制约作用;三是在壳幔交换过程中的变质作用,导致形成新的变质矿物组合,并致使成矿元素以及相关元素在矿物之间和固、液态之间重新分配,同时也改变赋存状态。变质过程及其元素迁移的研究一直被严重忽视;四是部分熔融作用,它常与变质作用密切相关,在部分熔融的研究中,由于变质这个中间环节的记录不足甚至缺失,导致研究程度不足。地壳或地幔部分熔融是壳幔交换的重要内容,能量交换相当强烈。热量往往是地幔上涌或者地幔部分熔融形成的岩浆底侵或侵入带来和传递的,而与此同时,地幔所能提供的液、气态物质即流体,也是部分熔融可以实现的关键因素,对由地幔和地壳在该过程产生的流体的成分、方式、浓度以及对不同元素的亲和力等研究明显不足。中国有关地幔的金属气和金属流的提法在20年前就被提出和讨论(谢学锦等,2003;杜乐天,2009),至今尚存争议,但其中不乏尚未认知的知识。

壳幔间的相互作用,所发生的物质和能量的交换是双向的。一般认为地幔部分熔融通过底侵和地幔柱活动等方式加入地壳,地壳物质通过俯冲和拆沉等方式进入地幔,从而引起大陆增生/减薄和地幔的不均一性(Rudnick et al., 1995),并导致不同圈层的物质和能量发生跨圈层的迁移和再分配。近年来,国内外学者对壳幔作用与成矿的关系进行了有益的探讨,特别是发现和识别壳幔相互作用在大型-超大型矿床的形成中起到关键作用,认为壳幔相互作用是决定成矿物质的组成、种类、组合的主要原因(赵振华等,2003;Ernst et al., 2003;Naldrett, 2004)。

圈层间相互作用的驱动力源于重大地质事件,也就是说地球构造变动的动力驱动的。大的构造变动造成圈层间原有的稳定和亚稳定状态被打破,能量和物质的重组就以圈层间的相互作用方式来实现新的物质平衡,在某些特殊构造部位造成一些元素

的富集,这就形成了新的矿床,或改变改造原有的矿床,使其富化或贫化,或叠加形成新的种类不同的矿床。

3.2 流体与成矿作用的精细过程

流体广泛发育在地球的各圈层和各种地质环境中,水质流体是区别地球和其他星球的一个重要特征,它关系到地球的物质组成、结构构造以及演化。在地壳中,流体的流动是质量和能量传输的主导过程(Yardley et al., 2014),直接形成和定位各种矿床,同时影响地幔以及外部圈层的物理及化学性质,并极大地影响着岩石变形与破裂的方式(Bodnar, 2005),对构造方式和样式产生影响。

成矿作用包括成矿物质来源、搬运、富集和沉淀,每一步都离不开流体,从这个角度而言,没有流体就没有矿床。当某种流体成为成矿流体,它包括流体的来源与性质、热(能量)的来源、迁移动力、对成矿元素的亲和力和携带方式、运移通道、流体与围岩相互作用等(卢焕章, 1997; Ni et al., 2017)。当成矿流体中的成矿元素沉淀成矿时,需要成矿的温压条件、元素卸载的化学条件、沉淀的空间和所需的时间等。矿床形成即成矿元素析出(卸载)与在流体中富集过程有关联,相物理化学条件发生了本质改变。

近年来在成矿流体的性质和来源、形成途径和运移途径、搬运和卸载成矿元素方式等方面的研究进展很大。在这些研究中,对于成矿流体的代表性,

成矿流体的演化与成矿元素的差异性富集与卸载,流体混合-混溶的机理以及特征和分离机制是有望深化的方向。成矿流体的演化过程是研究精细成矿过程的核心内容,这对于深入理解成矿机制、建立成矿和找矿标志,最后创立成矿模型和理论必不可少。目前对于很多典型矿床,尚缺乏成矿流体过程的精细解剖,因此对精细成矿过程的细节了解不够,迫切需要展开典型矿床的精细研究获得更多的可信的流体资料,了解成矿流体的演化全过程,这对于建立成矿模式和典型成矿系统会有很大帮助。

举例来说,锂元素就是亲岩浆的相容元素(图2)。在地球的演化中,锂可能是随岩浆和热液演化最后分离出来的一个或其中之一金属元素。花岗质的岩浆呈规模形成,在地球历史上需要多个阶段:首先是地幔的部分熔融形成玄武质岩浆;此后在某种地质过程中,玄武质岩石再经过部分熔融,形成以TTG质为主的高钠花岗岩类;高钠的花岗岩或者是沉积岩再经过部分熔融,形成富钾的花岗岩。以上的多次岩浆活动虽然在某些构造域和条件下可以出现,但总体的演化折射了大陆的形成、生长、克拉通化和成熟化的过程。直至钾质花岗岩阶段,锂仍然是作为亲岩浆元素存在于岩浆中,在花岗岩浆的进一步分异演化或活化中,锂始终选择在岩浆中,到了高分异花岗岩阶段和伟晶岩阶段,锂以及其他亲岩浆元素如铍、铌、钽等丰度不断增加,最后阶段或许才是锂元素堆积成矿的时机(与毕献武讨论, 2022, 昆

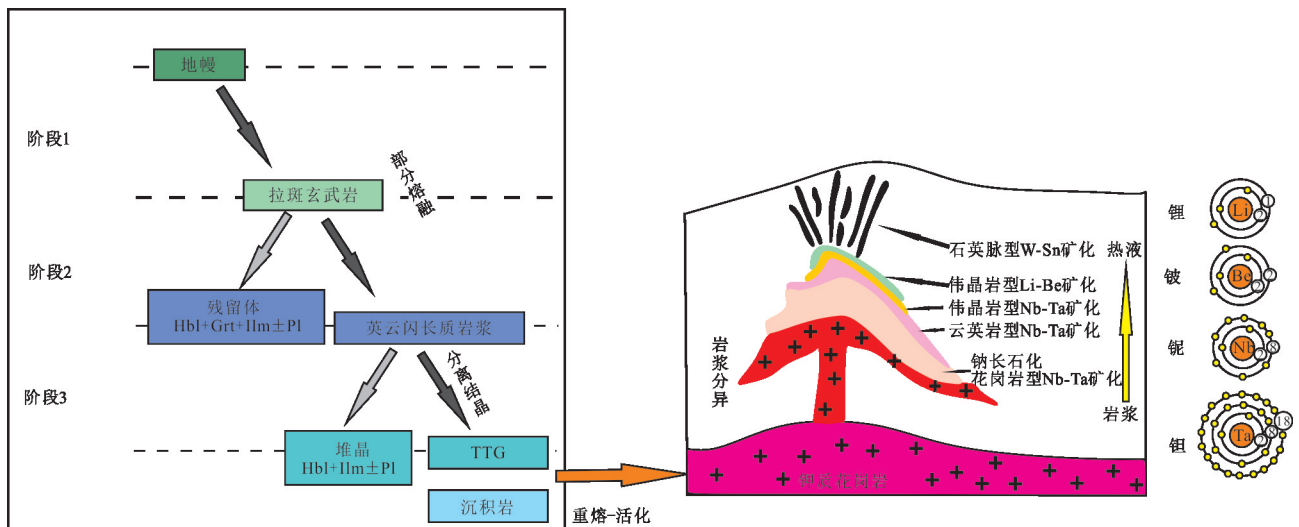


图2 锂的元素富集过程

Fig. 2 Schematic diagram of the lithium enrichment process

明)。在这个过程中,流体的性质、流体与围岩的相互作用以及表生环境等造成元素行为的变化并导致它从含锂的络合物或以其他形式卸载,其中有许多需要进一步查明的细节。

当前成矿流体研究中的亮点和关注点主要是流体的年代学和流体的多元同位素示踪体系,这对流体研究的推动是革命性的。当然,这里强调流体的研究是一个综合性的工作,包括岩石组合、矿物组合与转变、蚀变特征,特别是不同尺度的区域和矿区、矿田构造是必不可少的基础工作,地球物理和地球化学的基础图件用途很大,这是流体的成分测试、年代测试和实验岩石学研究的必要一环,而不仅仅是“补充”。

3.3 分散和稀少元素的巨量富集

最近十几年来,战略性关键矿产资源(critical mineral resources)或战略性危机性原材料(strategic and critical materials)一词在美国及欧洲一些国家和地区的政府和智库报告中高频出现,并上升为国家基本战略。在中国,除了铁、铜、铝等大宗战略性矿产外,战略性关键金属矿产的元素绝大部分都属于稀有金属(如Li、Be、Rb、Cs、Nb、Ta、Zr、Hf、W、Sn等)、稀土金属(La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Sc、Y)、分散金属(Ga、Ge、Se、Cd、In、Te、Re、Tl)以及部分稀少稀贵金属(PEG、Cr、Co等)或称为四稀资源(侯增谦等,2020a;李文昌等,2022;翟明国,2024;李文渊等,2024)。

确定成矿元素赋存状态及其源-运-聚的过程是建立关键矿产成矿理论及分离理论的核心。然而,与铁、铜等传统大宗金属相比,关键金属元素在矿床中常具有“稀、细、伴”的特征,通常含量极低,独立矿物小而少,不易被直接观察到。同时,关键金属元素地球化学行为较为复杂,矿化类型繁多,成矿机制多样,认知难度大。另一方面,关键矿产是国际上最近提出的资源概念,针对此类矿床的专门研究刚刚起步,且目前的研究多聚焦赋存状态、资源潜力等方面,针对成矿机理的研究较少,认知程度较低。因此,相对于传统大宗金属矿产来说,关键矿产成矿及分离理论的研究面临着更大的科学挑战。传统大宗金属元素,其地壳丰度较高,正常富集几倍到几十倍即可成矿。然而,大多数关键金属元素的地壳丰度很低(一般 $<10^{-6}$),需要百倍甚至万倍的富集才能形成可供开采的矿床。显而易见,关键金属元素的成矿经历了“超常富集”,因此,低丰度金属元素超常

富集成矿过程与驱动机制即低丰度金属元素超常富集成矿动力学,则成为关键矿产成矿学研究的核心科学问题。

那么到底是什么地质过程驱动和地球化学机制导致这些关键金属元素的超常富集?主要有以下几方面:地球多圈层相互作用与关键金属元素富集过程,主要包括关键金属元素的地球化学行为、壳幔及表生循环过程及机制;关键金属元素成矿机制与成矿规律,主要包括关键金属矿床形成及时空分布规律的地质及构造、影响矿化特征及矿化式样(元素组合、矿物类型、赋存状态、矿床类型、定位空间、成矿专属性等)等主控因素;关键金属元素赋存状态与强化分离机理,主要包括关键金属元素共生分异规律、共伴生富集成矿的主控因素、关键金属元素界面性质差异性放大与强化分离新方法。

因此需聚焦以下科学前沿:

(1) 关键金属源区特征及金属转移机制:主要包括矿床的形成是否需要源区金属富集?如需要源区金属富集,富集的机制为何?部分熔融或水岩交互过程中金属从源区转移的机制如何?

(2) 关键金属的运移富集机制:主要包括迁移关键金属的介质组成、迁移过程中的物理化学条件、迁移形式及富集情况等。

(3) 关键金属的沉淀机制:主要包括不同介质中关键金属的溶解度及其随物理化学条件的变化情况、不同体系中控制关键金属溶解度变化的主要因素、不同类型关键金属矿床的成因模式等。

除此之外,稀有、分散、稀土和稀贵金属元素还具有很大的不同(蒋少涌等,2019),根据它们在元素周期表的位置和地球化学性质,可以分为难熔元素和挥发性元素或大半径离子元素和高场强元素,它们的成矿作用有较大区别。因此,研究的方向和主要关注的科学问题应有差别。例如,稀有金属元素锂、铍、铷、铯、锆、钨、钼以及钨、锡均为亲石元素,它们与花岗岩的岩浆分异关系密切。但在一些极端条件下,这些元素却可以活化迁移,甚至成矿。温度、压力、酸碱度、氧逸度、熔体或流体成分均有可能控制这些元素的地球化学行为,但其控制机理尚不明确(王登红等,2024)。又如,稀土元素属于高场强元素,通常也被认为是“不活泼”的惰性元素,传统观点认为它们在热液流体中不易发生迁移。稀土元素以简单离子在热水溶液中的含量极低,难以达到成矿所需的浓度。但在一些特定的条件下,如强酸

($\text{pH}<0.6$)、高硫(SO_4^{2-})热水体系中中和表层流体中,稀土含量可迅速增高以络合物(如氟、氯、硫酸盐、碳酸盐、磷酸盐、羟基及有机络合物)的形式存在,它们在什么样的物理化学条件下在热液中保持稳定、以何种方式迁移、在什么条件下稳定并沉淀成矿都是科学难题(周美夫等,2020)。

最近,范宏瑞等(2020;2022)提出白云鄂博的稀土矿是高分异的碳酸岩矿化的产物,这对传统认识是一个挑战,对其岩浆演化的细节亟待进一步阐明。稀贵金属如铂族元素(PGE)在地幔中的丰度相对较高,但有关它们地球化学行为的一些关键科学问题仍悬而未决。例如,最原始的地幔熔体的PGE含量变化范围以及来源、受硫化物熔体控制的程度、地幔残留体和地幔熔体的PGE收支互补性、地幔交代的意义等(王焰等,2023)。稀散元素具有在地核中强烈富集的特点,相对的,在地幔和地壳中则显示强烈亏损的特点,因此,要形成稀散元素的超常富集往往需要十分苛刻的条件和特殊的地球化学过程(温汉捷等,2019;代世峰等,2024)。基于已有认识,除壳幔相互作用和热液过程之外,浅层作用和表生风化沉积的研究需要加强。如扬子地块西缘形成了世界级的稀散元素超常富集区,并产出众多大型-超大型的独立矿床或共伴生稀散金属矿床。为什么该区具

有稀散金属高的地质背景,并且多种稀散元素在同一地区均超常富集,目前的认识还很薄弱。胡瑞忠等(2024b)等研究在华南出现的东部以钨锡以及铌钽等稀有元素的高温成矿以及在西部出现的包括金锑和一些分散元素在内的低温成矿的关联时,认为它们形成在相似的构造背景下,即西部低温成矿与东部高温成矿时代一致(230~200 Ma、160~130 Ma 2个成矿期)并显示类似的地球化学指纹,印支期陆内造山和燕山期软流圈上涌是其共有成矿驱动机制,2个成矿省是具有成因联系的整体,共同构成呈面状展布的巨型多金属陆内成矿区;成矿后华南从西向东剥蚀程度的增强控制了目前近地表矿西部低温、东部高温的空间分布格局,低温成矿省东部区域的深部可能存在高温钨锡多金属矿床。在此基础上,建立了定位于陆内岩石圈先存薄弱区、陆壳供给矿源、高低温矿并重、成矿面状展布从而明显区别于板块边缘成矿机制的华南陆内成矿理论(图3)。

3.4 重大地质事件与元素的重新配置

从地形图上可以看到,地表形态的山峰与洼地的高差起伏在陆地和海洋分别达近9000 m和上万公里,也可以看到北半球的大陆面积大大多于南半球,这样的不平衡状态必然会引起地球寻求新的平衡的构造运动,而实际的地球系统要复杂的多。从地球

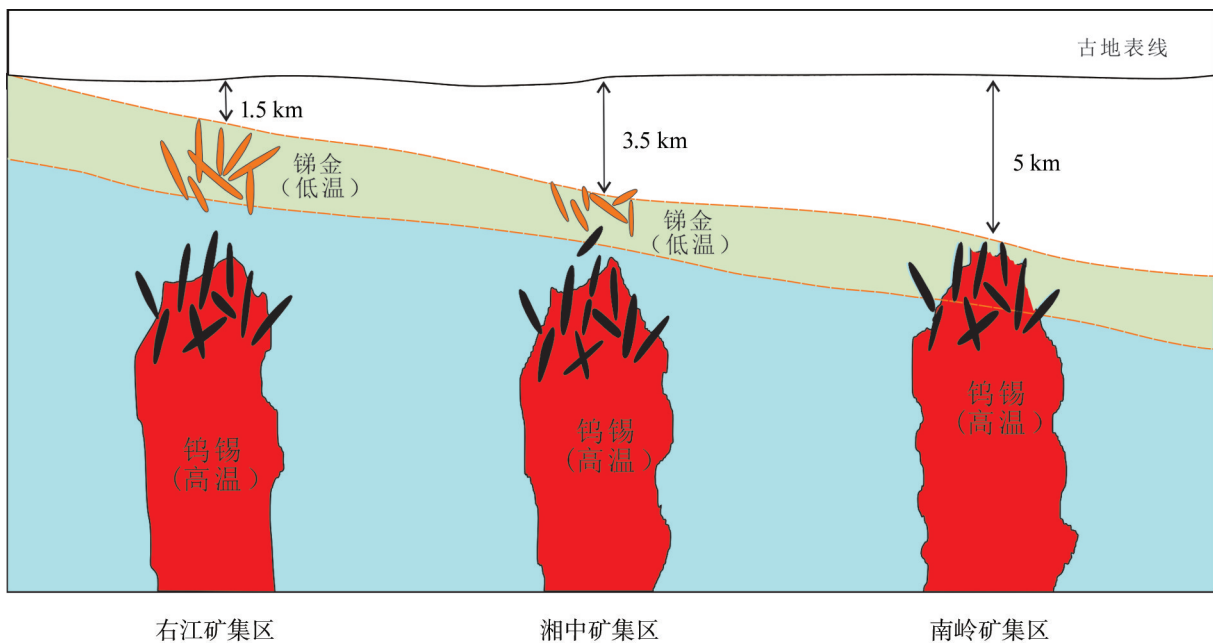


图3 华南低温与高温成矿省的相互关系及其深部找矿预测图(胡瑞忠等,2024)

Fig.3 Genetic relationship between the low- and high- temperature metallogenic provinces in South China and deep prospecting prediction (Hu et al., 2024)

诞生之日起,这样的不平衡到平衡,原有的平衡被打破和再平衡的构造活动从未停止。这与地球本身的能量消耗与散失、深部与浅部的物质和能量交换、大陆与海洋的相互运动,以及与太阳系中星球的相互运动等更多我们尚不了解的事情相关。所有上述构造运动,从相对静止、缓慢到集中爆发,最后的表现就是重大地质事件造就的构造格局重塑,并同步引起和地球环境-生命系统的变化。

在地球演化的历史上,最大的构造旋回是以与物质(岩石-矿物-地层)和生命的记录为基础,以此划分了冥古宙、太古宙、元古宙和显生宙。对于记录最完整的显生宙,还从时代与地层表述上再划为代、纪、世、期、时和界、系、统、阶、带。板块构造学家强调以造山作用来描述地质事件。造山运动是在地球深部动力学背景下,岩石圈和地壳发生的剧烈构造变动,表现为复杂的物理和化学的漫长连续地质作用过程,物质表现为成分的“快速”循环,原有的平衡被打破和建立新的平衡,这种物质的重组,在某些有利的构造位置,形成了新的、特殊的、有经济价值的岩石,就是矿床。

造山作用过程可以分为板块碰撞前的俯冲期、主碰撞期、后碰撞期和与此相关的陆内造山和区域变形,特别是变质、重熔和花岗岩化。广义的造山作用不限于汇聚边缘,理论上还可出现在洋中脊,其表现为洋脊(岭)、俯冲型山链、碰撞型山链及陆内型山链,它们可以在后期演化中进入复合造山带。复合造山带指不同时期、不同形成机制的造山作用持续发生在某构造单元,并在构造域(构造单元)复合。相比于稳定克拉通和刚性洋壳,复合造山带壳幔结构更加复杂,壳幔物质在多次造山过程中继承与改造。其复杂的深部过程和浅部构造变形,导致物质重新分配和调整,形成独特的壳幔结构。复合造山带也是壳幔物质循环的关键通道。增生造山洋壳俯冲将大洋沉积物带入地幔,洋壳脱水交代岩石圈地幔,形成富挥发分岩浆上升侵位,形成岛弧火山岩;俯冲板片断裂引发软流圈上涌,形成弧岩浆岩。碰撞造山陆壳俯冲,陆壳重返深部熔融;陆陆碰撞导致加厚岩石圈拆沉,软流圈上涌,发育独特的碰撞造山钾质岩浆岩。同时,剧烈碰撞发育一系列深大断裂,为深部岩浆、变质流体向上运移提供了通道。复杂多样的壳幔作用过程从根本上主导了成矿元素的富集、运移和沉淀成矿,表现为复合造山带成矿时代多期、矿床类型多样、赋矿空间多层、矿化分带多变以及大型超大型矿床集中等特征(邓军等,2020)。三

江特提斯构造域就是一个成矿特色的复合造山带。秦克章等(2017)强调中国大陆具有小陆块、多缝合带、软碰撞、多旋回缝合的特点,并受到古亚洲、特提斯、环太平洋三大动力学体系的作用。朱日祥等(2021)则强调华北中生代受西太平洋俯冲影响导致克拉通减薄和爆发式金的成矿事件。Li等(2019)强调地幔柱事件的重要性,认为大火成岩省对于物质重组和超大型矿床的形成意义重大,而且在超大陆旋回中,是板块裂解的关键因素,此外,地幔柱构造还是板块构造包括汇聚过程的关键驱动因素。

重大地质事件的研究已经引起广泛的关注,喜马拉雅-特提斯造山与成矿、中亚造山与成矿、华南陆内成矿、长江中下游成矿带等研究,已经初步完成成矿系列的构建(毛景文等,2011;周涛发等,2017;宋谢炎等,2018;唐菊兴,2019;肖文交等,2019;侯增谦等,2020b;吴福元等,2021;王登红等,2024)。板块汇聚边缘的俯冲-碰撞作用是板块构造中最核心的地质事件,目前有些研究者将板块构造改称为俯冲构造,将这里的物质循环和变化称为俯冲工厂,尽管上述描述不够准确的,但俯冲带确实是物质和能量交换最活跃的部位。因此,造山成矿模型是最为广泛关注的成矿模型(Groves et al., 1998; 2007; 陈衍景,2006)。当然,也有些研究者发现这个模式不是放之四海而皆准。有些相似的矿床可以出现在不同的构造背景,也有些相似的构造背景并不一定发育同样的矿床。

可见,重大地质事件的研究,要聚焦重大地质事件的时代特征,不同地质体在相互作用之前的物质组成和发展历史、要研究重大地质事件发生的原因以及过程、要关注在地质变动过程中持续的时间和地幔参与的程度、要关注地质事件的序列和期次,以及前期构造(继承性)和后期构造(叠加改造)等等。以下几点可能是区域成矿作用时空分布不均匀的控制因素:①大陆块体(基底)组成与演化的不均一性;②地壳/地幔化学组成的不均一性;③成矿构造背景的差异性;④区域构造历史的差异性(构造转换、转折和叠加);⑤成矿地质时代与古气候古地表环境的差异性;⑥矿床就位条件与保存能力的差异性。

通过重大地质事件的研究,结合成矿作用,重点是要把物质的研究与构造和动力学的研究深入结合,是把区域的甚至全球的矿产资源发育特征、时空配置与形成机制相结合,这是非常重要的思维突破,是系统地球科学研究和多学科深度融合的聚焦点和切入点。目前研究中存在几多几少,它们是局部

(点)的研究多,区域和全球的对比少;浅部的地质工作多,深部的和表层(以至气候)的研究少;单个矿种和矿床类型研究多,多矿种多类型的组合或演化研究少;简单对比多,创新思维少。看图识字式的地质事件与成矿作用的研究现在还比较普遍,是必须打破的怪相。相比世界许多地区,中国大陆地质历史复杂,多期和多类型的地质事件频繁,是出理论、出矿床的好地方,这个研究方向有良好的远景。

3.5 大陆演化与成矿演化的同步性和不可重复性

大陆演化是一个复杂的过程。随着地球内能的消耗和热的散失,地球的构造体制、物质循环状态、圈层的相互作用方式、洋陆与地壳,以及内部圈层与外部圈层的状态,以及耦合与脱耦都有多阶段不等距和跳跃式的变化。至少可以分为太古宙及之前、元古宙和显生宙几个阶段。

多数研究支持地球在形成初期的炽热和混沌状态之后,曾经有一个岩浆岩阶段的假说。岩浆岩的分异形成最初的镁铁质初始地壳(juvenile crust, Condie et al., 2008)。大陆是初始镁铁质地壳在某种地质活动下引起的部分熔融的产物,从而形成硅铝质大陆核。早期的大陆增生可能经历了陆核的环状增生和加大、微陆块聚合成小陆块,最后在太古宙结束期,经过全球的克拉通化事件,在2.5~2.45 Ga前后,形成了超级克拉通或克拉通群(Zhai et al., 2011; Zhai, 2014)。新太古代的超级克拉通推测与盘古(Pangaea)超大陆面积大致相当(Rogers et al., 2003)。克拉通化是地球发展史上的最伟大的事件,实现了陆壳的分层,即高级变质的、富集难熔元素的“干”的下地壳,以及低级变质-未变质的富生热岩石的“湿”的上地壳,洋-陆和壳-幔结构的耦合都达到一个里程碑式的阶段。此时的海洋和大气总体处在贫氧和低氧的阶段。此前的成矿作用以条带状铁建造为主(Zhai, 2022),其次是与绿岩带有关的金矿床。

元古宙是目前所知地球演化历史上最为多彩的时代。古、中、新元古代总共长达约20亿年,和前20亿年(冥古宙、太古宙)相比,可查的地质记录丰富的多。新太古代克拉通化给古元古代留下的最重要的遗产就是类似现代大小规模的大陆,虽然洋陆格局样式和现代相比有很大或截然不同。那时稳定的洋陆之间的相互运动,会出现类似现今板块构造的俯冲和碰撞(初始板块构造),其差别不仅是在规模上,有可能机制也不同(Zhai et al., 2020)。特别要强调的是,全球克拉通化之后,推测有相当面积的陆壳是

暴露在海平面之上的。这样会在本质上改变洋-陆、地壳-大气的环境与构造样式。在经历的2.45~2.2 Ga的构造静寂期(unconformity of tectonic unconformity),风化陆源物质对海洋的影响、光电作用和其他因素对海陆空的影响,以及在此时出现的裂谷(解)活动和伴随的岩浆活动(Zhou et al., 2022),共同驱使地球增氧(大氧化,GOE事件)。它的主要表现是:全球的大气和水体的氧逸度增高;水圈中离子的价态、种类、活度发生变化,从而引起沉积物的类型与性质的变化,如海水中的二价铁离子部分变成三价,形成大量的苏必利尔型硅铁建造沉积,以及沉积物中稀土元素形式的改变等。氧逸度的改变导致温度的变化,进而促进生命的形成演化和生物圈的变化等。该期除了地层中出现黑色页岩(石墨)、红层和磷块岩之外,其特色成矿是:金-砾岩型金-铀矿床、沉积锰矿床、沉积岩为容矿岩石的层状铅-锌矿床、与层状岩体相关的铜-镍-铬矿床和与泻湖-浅水相有关的菱镁矿等。

古元古代的陆内岩浆在裂谷发育中扮演着拗拉槽中心的角色,演化成地幔柱并可能促使了超级克拉通的裂解,形成全球范围的小型裂谷型洋盆地,此后环超级克拉通周边的挤压,导致诸多裂谷-洋盆的俯冲-碰撞(早期板块构造,Zhai et al., 2020),形成了地球演化历史上可观的高级麻粒岩相(高压麻粒岩或高压麻粒岩-榴辉岩转换相,局部叠加超高温麻粒岩相变质)变质带。因为变质温度以及温压梯度偏高(总体中压相系),表现出变质带宽、俯冲岩片滞留时间长、抬升速率慢的特征(Zhou et al., 2017),变质时代大致从2.0~1.9 Ga开始,在1.85~1.8 Ga结束,被称为成山纪(Orosirian)。该期有变质沉积容矿型铜钴矿、变质火山型铁铜矿等矿床以及与基性-超基性岩有关的镍钴矿、沉积变质型菱镁矿和硼矿等(刘福来等,2024)。

元古宙演化到中元古代,进入到一个长时期的调整期,这个时期内不发育造山带以及被动大陆边缘,不发育造山型岩浆组合和矿床,相反则发育非造山岩浆组合(斜长岩-辉长岩-奥长环斑花岗岩-碱性花岗岩),被称为地球中年期或寂寞10亿年(翟明国等,2014; Cawood et al., 2014)。表面沉寂的10亿年,壳幔交换作用是频繁的,或者说是暗潮汹涌。以华北克拉通为例,此时期是多期裂谷发育期,代表的沉积地层有:(熊耳群-)长城系,蓟县系,待建系(下马岭系)和青白口系。相对于四期沉积岩系的四期岩浆组合分别是熊耳大火山岩省,包括了熊耳火山岩以及紧密相关的~1.78 Ga的基性岩墙群,1.72~

1.62 Ga 的双峰式火山岩和非造山岩浆组合, 1.35~1.32 Ga 基性岩席-岩墙群(包括白云鄂博火成碳酸岩), 以及~0.9 Ga 的基性岩墙群和双峰式火山岩。岩浆的性质都是大陆板内型, 并被研究假设为地幔柱或者认为在~1.6 Ga 和~1.3 Ga 引起了陆块裂解(Peng et al., 2011; Zhang et al., 2023), 或者表明在中元古代依旧有较强的增氧事件(MOE, Zhang et al., 2016)。此时的黑色页岩除了形成石墨矿, 还有成油气的潜力。代表性的金属矿床有裂谷型铅锌矿、粒状赤铁矿等, 白云鄂博型稀土矿举世瞩目。新元古代的冰期-雪球事件的结果是新元古代氧化事件(NOE), 并随后发生寒武纪生命大爆发。与NOE有关的矿产是条带状铁矿的再次出现, 以及沉积磷矿和与黑色页岩有关的金属矿甚至油气矿藏。

显生宙全球进入板块构造体制。中国大陆记录了几个大的造山旋回, 可能与超大陆的聚合与裂解有关。中国学者对蛇绿岩带、岛弧带、碰撞带、弧后带和裂谷带的矿床研究比较多, 例如喜马拉雅带、三江特提斯带、中亚造山带、长江中下游成矿带、东南沿海成矿带等, 它们与世界上典型的成矿带有相似的规律性, 同时也表现出成矿特色。对中生代有特色的成矿域和成矿类型, 如华南多金属成矿域与扬子西缘低温成矿域、华北金成矿域也有突出的理论进展。

中国的大陆成矿演化, 显示了与大陆同步演化的特点, 并且与大陆演化的不可逆性相似, 表现出明确的不可重复性(图4)

总之, 在强调重大地质事件对成矿作用的控制作用时, 我们可以把大陆生长当做一个持续了约45亿年的重大地质事件。大陆约45亿年的地质演化历史记录在大陆的岩石中。大陆从小到大, 构造体

制与热体制同步在发生阶段式的变革, 地球的环境也在改变, 地球环境变化的内涵就是大气和水圈的变化。这不仅影响的生命起源和演化, 而且也极大地影响着地球的物质循环, 影响着元素的价态、络合方式和化学反应。大陆的演化是不可逆的, 那么成矿演化作为一种特殊的岩石和岩石组合, 它们的形成于并保存在大陆演化的过程中, 表现出鲜明的时代性和不可重复性(图4)。

4 中国若干典型大陆成矿实例与进展

中国在典型大陆的成矿研究方面做了许多工作, 为推动大陆成矿研究做出了实质性贡献, 主要的研究包括: ① 古元古代暴贫暴富成矿; ② 华北克拉通破坏与金爆发式成矿; ③ 华南陆壳活化与大花岗岩-稀有金属省; ④ 中亚造山带多陆块拼合与陆壳增生成矿; ⑤ 塔里木陆块周缘造山成矿; ⑥ 三江特提斯构造域复合造山成矿; ⑦ 扬子西缘低温成矿; ⑧ 峨眉山幔柱成矿; ⑨ 喜马拉雅碰撞造山成矿; ⑩ 青藏高原隆升与表生成矿; ⑪ 中国北方中、新生代沉积砂岩铀成矿; ⑫ 煤铀共盆和稀散元素成矿等。

这里仅就古元古代华北暴贫暴富成矿作用、白云鄂博火成碳酸岩巨量成矿, 以及青藏高原隆升与表生成矿的进展做简要介绍。

4.1 古元古代暴贫暴富成矿

华北克拉通古元古代的大氧化事件表现很强烈, 也表现鲜明的成矿特色, 即与世界其他典型克拉通相比, 具有暴富暴贫的特色。苏必利尔型条带状铁建造在华北很少, 而镁、硼矿巨富。华北克拉通在辽东、胶东和皖北都有大型、超大型菱镁矿床, 仅辽

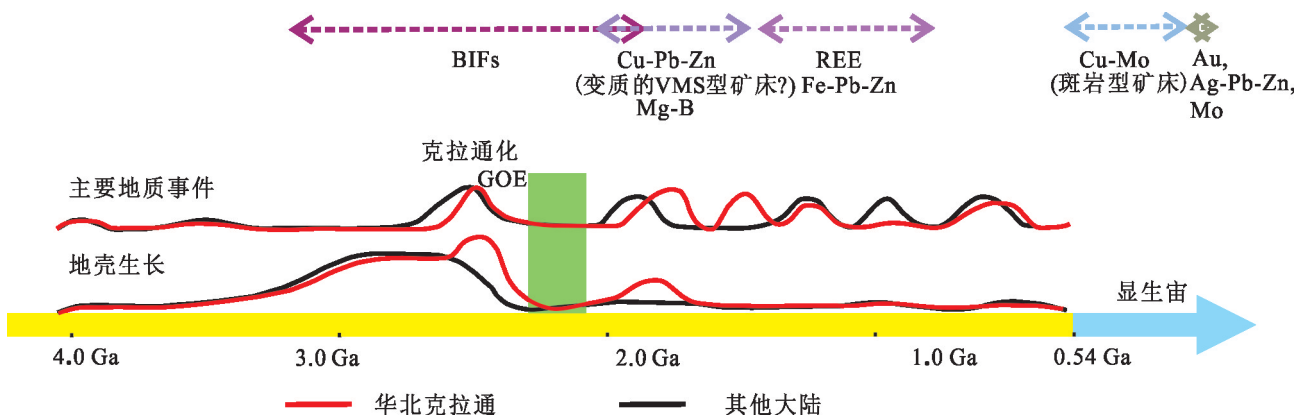


图4 成矿作用随地质时代的演变规律

Fig.4 The evolution of metallogeny with geological time

东大石桥地区菱镁矿储量就达30多亿吨,是世界最大的此类矿床。此外辽东的滑石矿和硼矿床世界著名。翁泉沟超大型硼-铁矿的 B_2O_3 储量占全国总储量>45%。华北克拉通古元古代有两套代表性(火山)-沉积建造。第一套代表性沉积岩石有吉林-辽宁的蒸发岩,发育巨厚的菱镁矿沉积,伴有大理岩和其他沉积岩;第二套代表性沉积岩石是在华北克拉通有普遍分布的石墨片麻岩及相关的巨厚大理岩和蒸发岩。这些岩石有明显的C同位素正漂移,REE和其他微量元素的特征反映了高氧逸度的沉积环境(Tang et al., 2012)。大石桥菱镁矿下伏白云岩地层样品的 $w(CaO)/w(MgO)$ 为0.87~0.94, $\delta^{13}C_{carb}$ 和 $\delta^{18}O_{carb}$ 值分别为0.6‰~1.4‰(平均1.2‰, V-PDB标准)和16.4‰~19.5‰(平均18.2‰, SMOW标准)。它们与世界正常海相碳酸盐岩地层相比, $\delta^{13}C_{carb}$ 较高,而 $\delta^{18}O_{carb}$ 较低,表明原始沉积物具有类似于大氧化事件事件的 $\delta^{13}C_{carb}$ 正异常,可能高达4.2‰,但均在沉积之后的成岩或/和变质过程中明显降低。白云岩样品 ΣREE 均为正异常,HREE富集。所有上述特征与现代海水REY(REE+Y)的配分模式相似,记录了大氧化事件的海水特征。辽宁省关门山地区辽河群关门山组白云岩样品的 $\delta^{13}C$ 介于3.5‰~5.9‰之间,具有明显的正异常特征, $\delta^{18}O$ 值为15.4‰~24.8‰。其中未遭受后期流体作用影响的样品明显高于受到流体影响的样品,表明流体作用使碳酸盐岩的C和O同位素降低。在地质历史中,全球在2.33~2.06 Ga时期的C同位素正漂移最强烈,辽河群强烈的 $\delta^{13}C_{carb}$ 正漂移现象与全球一致。

辽东吉南硼成矿带经历了复杂的演化过程,前人提出了多种硼矿床成因演化模型,主要包括混合岩化热液交代型、蒸发沉积变质型和热水喷流沉积型等。尽管存在上述众多观点,但研究者普遍强调构造背景、火山作用和沉积环境对巨量硼元素的来源及沉淀预富集过程的贡献。由于硼矿及其含矿围岩普遍经历了区域变质作用和后期混合岩化作用的强烈影响,导致与硼沉淀预富集存在密切成因关系的蒸发岩成因机制的认识出现较大分歧,对硼来源及预富集的构造背景和沉积环境的认识存在2种截然不同的观点:①火山热泉供硼,非海相蒸发沉积;②海底火山喷发,海相蒸发沉积形成了富硼的矿源层。

值得指出的是,华北克拉通目前没有明确的重要的苏必利尔型湖的BIF沉积矿床被厘定。大

多数BIF都是形成在太古宙,以新太古代为主,属于阿尔戈玛型,与绿岩带-高级区演化有关。铁多来自太古宙风化的科马提岩或玄武岩,海水因为火山活动引起的温度和氧化条件变化,特别是在细菌的参与下,导致铁的价态变化并沉积形成了条带状硅铁建造(Zhai, 2022)。据研究,中国鞍山的新太古代BIF的共生岩石主要是变质泥质岩和基性岩,后者具拉斑玄武岩的地化特征。弓长岭磁铁矿的 $\delta^{18}O$ 介于-5.04‰~+6.16‰,变化幅度为11.56‰,石英 $\delta^{18}O$ 介于+5.22‰~+16.13‰之间,变化幅度达10.91‰,且含量偏低,用氧同位素温度计获得的变质温度与变质矿物计算的相当,可以说明变质作用改变了磁铁矿和石英中原有的氧同位素值。根据条带状铁矿稳定的石英与磁铁矿条带,可以推测变质作用对氧同位素的影响,仅限于磁铁矿和石英之间,没有和围岩发生交换。以此计算不含磁铁矿的石英的 $\delta^{18}O$ 值大概在16.7‰~22‰之间,与西格陵兰Isua地区相当(最大值20.4‰)。鞍山-本溪地区BIF可能的沉积条件是6~8的中等pH值, E_h 值为0~0.3的弱氧化环境,沉积深度为240~540 m,深入海岸线可达~37 km浅-深海过渡的陆坡(Zhai et al., 1990)。华北没有成规模的早元古代苏必利尔湖型的BIF,目前研究提出的可能的古元古代BIF是山西袁家村、河南铁古坑和安徽霍邱铁矿的上部层位。苏必利尔型BIF的基本特征是含矿地层没有或罕见火山岩夹层。一是说明在克拉通化后地质构造稳定,二是大氧化时期海水中的氧化程度增高,为铁矿沉积提供了合适的条件,不需要由火山作用来改变海水瞬间的温度和氧逸度。海水中部分 Fe^{2+} 转变为 Fe^{3+} ,形成赤铁矿和磁铁矿共存的铁带。原因与随着足够丰富的 Fe^{2+} 转变为 Fe^{3+} 的过程,多余的游离氧在大气中积累,促使了大气的氧化程度提高。需要强调的是,不管是阿尔戈玛型还是苏必利尔型的BIF,其形成的海水深度都在200~400 km的较深海区。而华北此时的沉积相的研究表明华北盆地此时比较浅,整体处于浅海-泻湖相,海水深度低于200~250 m,因此沉积了更多的蒸发盐类,而没有形成BIF(翟明国等, 2013)。华北克拉通古元古代沉积矿床与世界典型地区的对比研究,是对古元古代地质和大氧化事件研究的重要补充和提高。

4.2 白云鄂博火成碳酸岩巨量成矿

白云鄂博矿床含矿白云岩顶部“覆盖”的是H9板岩,它最初被归为白云鄂博群哈拉霍疙特组第三

岩段,被命名为H8白云岩。现在的研究大多认为它是火成碳酸岩型REE-铁矿床(范宏瑞等,2020),含矿岩石是一套成因独特的来源于地幔的碳酸岩。碳酸岩是指含碳酸盐矿物(如白云石、方解石、菱铁矿等)体积占比 $> 50\%$, $w(\text{SiO}_2) < 20\%$ 的火成岩。依据岩石结构特征,白云鄂博碳酸岩可以分为粗粒碳酸岩和细粒碳酸岩。细粒碳酸岩构成了白云鄂博主矿、东矿和西矿等铁矿体以及直接围岩,围岩本身也具有非常高的稀土与铁含量。粗粒碳酸岩则主要分布在细粒碳酸岩的边缘,稀土含量也超过工业边界品位。粗细粒碳酸岩的矿物组合也略有差别,由粗粒白云石矿物,含有少量的方解石、磷灰石、磁铁矿、烧绿石等,而细粒碳酸岩主要由细粒白云石组成,含有磁铁矿、赤铁矿、磷灰石、独居石和氟碳铈矿等。矿区还发育大量碳酸岩脉,又可以分为白云石型、白云石-方解石共存型和方解石型。对碳酸岩体以及钙质碳酸岩脉详细的锆石和其他副矿物年代学测试,获得岩浆年龄约为1320 Ma。对稀土矿物进行定年得到两组年龄,分别是4.5~4.0亿年和2.8~2.6亿年,可以代表两期热液活动,造成新生REE矿物形成以及原有REE矿物被改造。这反映了白云鄂博矿床有复杂的成矿演化历史,巨量金属堆积发生在13亿年左右,矿床形成后分别在早古生代(4.5~4.0亿年)和晚古生代(2.8~2.6亿年)经历了3次改造。古生代改造过程导致了稀土等活化及部分新生矿物生成,但没有外源稀土明显加入的证据(李晓春等,2022)。

矿区不同类型碳酸岩脉的稀土元素组成存在着很大的差异。铁质碳酸岩脉的稀土总量较低, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 显示轻、重稀土元素没有发生分异,在球粒陨石标准化配分图解中呈平坦型;镁质碳酸岩脉中稀土元素总量较高, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 显示轻、重稀土元素发生明显分异,表明该阶段岩浆成分已有所分化;钙质碳酸岩脉中的稀土总量异常富集, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 显示轻、重稀土元素发生了强烈分异。碳酸岩脉在由铁质→镁质→钙质演化中,随铁含量逐渐降低,钙镁含量的逐渐升高,稀土元素,尤其是轻稀土元素,呈明显的富集趋势,即存在铁含量与稀土元素含量的负相关现象(Yang et al, 2019)。碳酸岩浆演化过程中的分离结晶作用可以造成不相容元素在晚期岩浆中富集。在白云鄂博西矿区的白云岩中发现有大量的自形菱铁矿斑晶,这些菱铁矿矿物应是早期从碳酸岩浆中分离结晶出的堆晶矿物,具有非常低的稀土元素含量。菱铁矿和铁白云石分离结晶不仅

造成碳酸岩浆向富集钙、镁的方向演化,而且会促进稀土元素在晚期岩浆中富集。演化的碳酸岩浆在上升过程中由于压力降低,还发生了强烈的熔/流体不混溶作用。富流体的铁质碳酸岩与上覆围岩(H9等)发生强烈的霓长岩化作用,造成铁、稀土的进一步富集,形成白云鄂博主、东和西矿富铁与富稀土矿体。碳酸岩与围岩的霓长岩化作用可以消耗碳酸岩中的铁、镁,并加入硅,其主要新生矿物为富铁、镁的钠闪石和钠辉石,通常都具有较低的稀土元素含量。因此,霓长岩化作用不仅消耗了碳酸岩中的铁、镁,还使晚期残余钙质碳酸岩浆中更加富集稀土元素。图5是内生稀土矿床的成矿模式,白云鄂博碳酸岩的同位素特征指示它们来自富集的陆下岩石圈地幔(SCLM),富集的地幔很可能之前被俯冲沉积物交代过,这是富集稀土元素的可能原因。此外,尽管富集地幔低程度部分熔融可以导致稀土元素优先进入碳酸盐或富 CO_2 的硅酸盐熔体,但实验岩石学研究表明,初始熔体中稀土元素的富集程度远低于自然界大多数碳酸岩或碱性岩中稀土元素的富集程度,因此,初始碳酸岩浆中的稀土元素富集成矿还需要经历长期的岩浆演化过程。碳酸盐-硅酸盐不混溶作用经常出现在碳酸岩-碱性岩演化的过程中,熔体富含水会促进稀土元素分配进入碳酸盐熔体相。在不混溶过程中轻稀土元素大量分配进入碳酸岩相,这可能是促使该区域稀土富集成矿的重要原因。

高磁与低阻地球物理异常揭示出了白云鄂博碳酸岩体的三维形态,碳酸岩的侵位中心位于主、东矿之间,侵位后沿构造置换陡立面理,往东西两侧推进。地质、地球化学和地球物理的综合研究在白云鄂博开展的比较深入,因此在矿石储量、深部和外围的勘探诸方面不断有新进展。白云鄂博矿床通常被认为是独生子,矿床成因和成矿过程研究的重要性更加凸显。最近几年提出的碳酸岩浆高分异的REE成矿理论是重要的创新,有望取得突破。但是岩浆分异的细节还不够明朗,甚至在碳酸岩浆是由铁向钙还是由钙向铁方向演化还存在不同认识。另外,白云鄂博矿体的铁、铌、钽、钷等元素的赋存状态以及与REE元素迁移、富集、脱耦和解耦以及沉淀的物理化学条件也急需查明。

4.3 青藏高原隆升与表生成矿

青藏高原碰撞过程对造山型成矿起着很大控制作用。同时青藏高原隆升使得高原内部及周边形成许多构造盆地,为青藏高原的表生成矿带来丰富

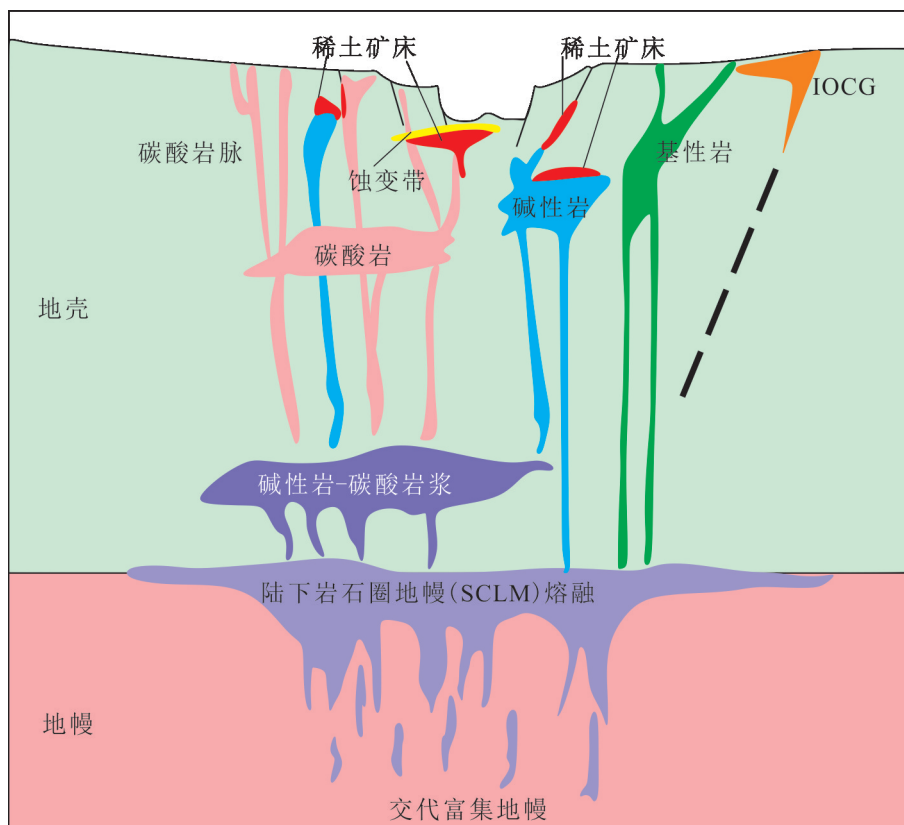


图5 内生稀土矿床成矿模式图(据范宏瑞等,2020)

Fig. 5 Metallogenic pattern diagram of endogenic REE deposits (after Fan et al., 2020)

的深部成矿物质;而隆升产生巨大的地貌与气候环境效应也为表生成矿提供了物理化学条件。这种构造气候-物源成矿要素与表生环境发生耦合作用,在高原及邻区形成丰富的盐湖型钾、锂、铯、硼、锶等矿床(郑绵平等,1989;王弭力,2001;刘成林等,2010)。

(1)盐类矿产资源主要分布在青藏高原中南部、北部及北缘地区,形成3个成矿带:①钾盐成矿区主要分布于青藏高原北部和边缘成矿带,主要的矿床是柴达木钾(锂)、察尔汗和罗布泊矿床,都属于陆相钾盐矿床;②锂资源主要分布在青藏高原的盐湖卤水中,为碳酸盐型和硫酸盐型。碳酸盐型主要集中于藏北西部的和东部的盐湖,硫酸盐型锂资源主要分布在柴达木-里坪及东台和西台等地;③硼成矿区主要分布在西藏现代盐湖和柴达木盐湖。此外,青藏高原还有锶矿(主要分布在柴达木盆地西北部)和硝酸盐矿(主要分布在新疆),后者储量占世界第二。

(2)青藏高原隆升是地球新生代最重要的地质事件,起因于约50~60 Ma的印度板块与亚洲板块的碰撞。青藏高原的隆升具有差异性和阶段性,可分

为60~40 Ma、30~10 Ma和10~0 Ma三个阶段,实现了青藏高原以及周边的隆升达到现有高度(王成善等,2009)。青藏高原的阶段性隆升对其内部和北部邻区的表生成矿作用形成了重要的约束。其中,第三阶段的隆升,尤其是第四纪以来,是最为重要的陆相钾镁锂盐成矿期。

(3)青藏高原尤其是南侧的喜马拉雅山脉,能阻挡南来的湿润印度洋气流和西风环流的气流,对青藏高原地貌发育具有巨大的影响,对亚洲内陆的干旱及季风的形成具有决定性作用。没有青藏高原地形就没有亚洲季风,也就没有现在的西伯利亚高原和大片可达中高纬的内陆干旱区。亚洲大部分中低纬地区被东西向的干旱带占据,亚洲大陆与印度洋之间的热力对比是驱动印度季风环流形成的关键因素。同时青藏高原地形对西方阻挡导致西风产生定长波动和绕流,致使这些地区普遍干旱化,而夏季高原加热作用引起的气流升降机地形屏障作用,加深了地区的干旱化过程。

(4)青藏高原隆升和干旱化气候与演化与表生成矿研究具有关联性和因果关系,表生成矿理论的

进一步提升具有理论意义和应用前景。

今后进一步研究的方向包括:大陆表生成矿卤水流体的起源、循环机制、周期性及控制因素;青藏高原盐湖钾、锂、硼、铷、铯、钽的深部源区特征与迁移机理;大陆表生环境中大气二氧化碳循环及温室效应对成矿过程的约束;表生复合型矿床成因与评价理论;华南陆块表生环境下构造-气候-岩浆-海侵的耦合成矿机制研究。

5 结 语

(1) 把大陆成矿学作为一门学科提出是基于近年来大陆动力学和矿床学取得系列进展的基础上,是矿床学研究的新阶段,是大陆动力学与矿床学的交叉学科。人类开发和利用的矿产资源绝大多数是大陆资源。在新一轮找矿战略行动中,大陆成矿理论和勘探理论研究仍然是亟待突破的瓶颈。

(2) 大陆成矿学从成矿地域和地质背景上,主要可分为陆内成矿和陆缘成矿作用。陆内成矿作用可以包括大陆裂谷成矿、克拉通成矿、陆内造山成矿、地幔柱成矿等;陆缘成矿作用包括大陆边缘成矿、大陆增生矿和大陆碰撞成矿等。

(3) 大陆成矿学的科学前沿与关键科学问题有很多,这里强调:① 元素行为以及圈层间相互作用;② 流体与成矿作用的精细过程;③ 分散和稀少元素的巨量富集;④ 重大地质事件与元素的重新配置;⑤ 大陆演化与成矿演化的同步性及不可重复性。这些科学问题都会聚焦到成矿作用的时空不均一性,以及成矿过程的复杂性和成矿类型的非单一性上。利用已有的成矿模式和传统的板块成矿理论还不能完满解释大陆成矿作用。深入的地质调查与实验研究和典型实例的解剖是必要的。

(4) 中国的大陆演化记录全面和复杂,克拉通与造山带都很有特色。其中,华北克拉通元古宙暴贫暴富成矿(包括白云鄂博REE矿)、中生代华北克拉通破坏与华南大花岗岩省成矿(包括低温成矿域)、中亚增生型-青藏碰撞型造山带成矿与特提斯构造域叠合成矿、峨眉山幔柱成矿以及高分异花岗岩-伟晶岩成矿等。对它们的研究在近些年来已经有重大突破,提出了不少新的见解。

最后,希望地质与矿产界的科学、技术和工程人员,更加关注大陆成矿理论的发展,为找矿勘查实践和大陆动力学的推动做出更大贡献。

致 谢 在文章尚未刊出时,我国地质界和矿床界的杰出领军者裴荣富院士不幸与世长辞,这是我国的重大损失。谨以此文表达对他的敬仰与怀念。

本文研究得到国家基金项目(92162323)资助。还需说明的是,其中大部分内容是作者在2014~2019年作为负责人的中国科学院学部与基金委联合资助的“大陆成矿作用战略研究”项目的成果,项目成员有来自中国科学院的研究所、高等院校、中国地质调查局与中国地质科学院,以及其他行业部门。几乎重要的矿床学和岩石学的学科领军人物都参与了,所以本篇文章是集体成果。相关的研究内容还在科学出版社的国家科学思想库丛书“矿产资源形成之谜”和“大陆成矿学”中得以体现。

References

- Bodnar R J. 2005. Fluids in planetary systems[J]. *Elements*, 1: 9-12.
- Cawood P A and Hawkesworth C J. 2014. Earth's middle age[J]. *Geology*, 42(6), 503-506.
- Chen G D. 1956. The reworking regions in China with an example of the Cathysia old land[J]. *Acta Geologica Sinica*, 3: 239-271(in Chinese).
- Chen H Y. 2020. Meditations on the future development of ore deposit[J]. *Erath Science Frontiers*, 27(2): 99-105 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y C. 1997. Present situation and trend of research on metallogenic series of ore deposits[J]. *Geology and Prospecting*, 33(1): 21-25 (in Chinese).
- Chen Y J. 2006. Orogenic deposits, their metallogenic models and exploration potential[J]. *Geology in China*, 33(6): 1181-1196(in Chinese with English abstract).
- Condie K C and Krönor A. 2008. When did plate tectonics begin? evidence from the geologic record[J]. *Geological Society of America, Special Paper*, 440: 281-294.
- Dai S F, Zhao L, Wang N, Wei Q and Liu J J. 2024. Advance and prospect of researches on the mineralization of critical elements in coal-bearing sequences[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 43: 49-63(in Chinese with English abstract).
- Deng J, Wang Q F, Chen F C, Li G J, Yang L Q, Wang C M, Zhang J, Sun X, Shu Q H, He W Y, Gao X, Gao L, Liu X F, Zheng Y C, Qiu K F, Xue S C and Xu G H. 2020. Further discussion on the Sanjiang Tethyan composite metallogenic system[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 106-136.
- Deng J, Wang Q F, Zhang L, Xue S C, Liu X L, Yang L, Yang L Q, Qiu K F and Liang Y Y. 2023. Genetic model of Jiaodong type gold deposit[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 53(10):232-2347(in Chinese).

- Du L T. 2009. Mantle ichor (HACONS fluids): The interior crucial factor of geodynamics[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(6): 739-748 (in Chinese with English abstract).
- Ernst R E and Buchan, K L. 2003. Recognizing mantle plume in the geological record[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Science Letters*, 31: 469-523.
- Fan H R, Niu H C, Li X C, Yang K F, Yang Z F and Wang Q W. 2020. Types, metallogenic regularity and resource prospects of endogenous REE deposits in China[J]. *Scientific Bulletin*, 65(33): 3778 - 3793(in Chinese).
- Fan H R, Xu Y, Yang K F, Zhang J E, Li X C, Zhang L L, She H D, Liu S L, Xu X W, Huang S, Li Q L, Zhao L, Li X H, Wu F Y, Zhai M G, Zhao Y G, Wang Q W, Yang Z F, Liu Y, Yan G Y, Liu Z Q, Cui F and Liu F. 2022. Intrusive style, three-dimensional morphology of carbonatite and REE potential resources in the Bayan Obo giant deposit, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(10): 2901-2919(in Chinese with English abstract).
- Groves D I and Bierlein F P. 2007. Geodynamic settings of mineral deposit systems[J]. *Journal of the Geological Society of London*. 164: 19-30.
- Groves D I, Goldfarb R J and Gebre-Martin M. 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types[J]. *Ore Geology Review*. 13(1-5):7-27.
- Guo W K, Liu L S, Yu Z J. 1982. Basic characteristics of metallogenic domains and metallogenic periods in eastern China[J]. *Mineral Deposits*, 1(1): 1-14(in Chinese).
- Hou Z Q. 2010. Metallogensis of continental collision[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(1): 30-58(in Chinese with English Abstract).
- Hou Z Q, Chen J and Zhai M G. 2020a. Research status and scientific frontier of strategic critical metal deposits[J]. *Science Bulletin*, 65 (33): 3651-3652.
- Hou Z Q, Yang Z M, Wang R and Zheng Y C. 2020b. Further discussion on porphyry Cu-Mo-Au deposit formation in Chinese mainland[J]. *Erath Science Frontiers*, 27(2): 20-44 (in Chinese with English abstract).
- Hu R Z, Wen H J, Su W C, Peng J T, Bi X W and Chen Y W. 2014. Some advances in ore deposit geochemistry in the last decade[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2: 1-15(in Chinese with English abstract).
- Hu R Z, Gao W, Fu S L, Su W C, Peng J T and Bi X W. 2024. Mesozoic intraplate metallogenesis in South China[J]. *Earth Science Frontiers*, 31(1): 226-238(in Chinese with English abstract).
- Jiang S Y, Wen H J, Xu C, Wang Y, Su H M and Sun W D. 2019. Earth sphere cycling and enrichment mechanism of critical metals: Major scientific issues for future research[J]. *Science Foundation of China*, 2: 112-118.
- LI W C, Li J W, Xie G Q, Zhang X F and Liu H. 2022. Critical minerals in China: Current status, research focus and resource strategic analysis[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(1): 1-13(in Chinese with English abstract).
- Li W Y, Gao Y B, Ren G L, Liu C, Li Kan and Kong H L. 2024. Deep structure and interpretation of regional metallogenic model of the Dahongliutan pegmatite lithium ore deposit in Xinjing, western China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 98(5): 1440-1451(in Chinese with English abstract).
- Li X C, Zhan Y X, Fan H and Yang K F. 2022. The REE mineralization and remobilization history of the giant Bayan Obo deposit, Inner Mongolia, China: Constraint from in-situ Sm-Nd isotopes of REE minerals[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38 (10): 2920-2932(in Chinese with English abstract).
- Li Z X, Mitchell R N, C J, Spencer R, Ernst S, Pisarevskaya U, Kirschner J B and Murphy. 2019. Decoding Earth's rhythms: Modulation of supercontinent cycles by longer superocean episodes[J]. *Precambrian Research*, 323:1-5.
- Liu B J and Li T D. 2002. Several advances in geology[J]. *Advances in Earth Science*, 5: 607-616(in Chinese).
- Liu C L, Wang M L, Jiao P C and Chen Y Z. 2020. The Probing of Regularity and controlling factors of potash deposits[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(6):796-802(in Chinese with English Abstract).
- Liu F L, Wang F, Wang H N and Tin Z H. 2024. Progress of mineralization in the Paleoproterozoic orogenic belts from the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 40(10): 2936-2970(in Chinese with English abstract).
- Lu H Z. 1997. *Ore Forming fluids*[M]. Beijing: Scientific Press.
- Mao J W, Chen M H, Yuan S D and Guo C L. 2011. Geological characteristics of the Qinhang (or Shihang) metallogenic Belt in South China and spatio-temporal distribution regularity of mineral deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 636-658 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Song S W, Liu P, Liu M, Zhao P L and Yuan S D. 2023. Current progress and development trend of the research on tin deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(5): 1233-1240(in Chinese with English abstract).
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the earth[J]. *Economic Geology*, 120:223-253.
- Mitchell A H G and Garson M S. 1981. *Mineral deposits and global tectonic settings*[M]. London-New York: Academic Press.
- Naldrett A J. 2004. *Magmatic sulfur deposits: Geology, geochemistry and exploration*[M]. New York: Springer.
- National Natural Science Foundation of China and Chinese Academy of Sciences. 2017. *China's scientific development strategy: Plate tectonics and continental geodynamics*[M]. Beijing: Science Press, 1-396(in Chinese).
- National Natural Science Foundation of China and Chinese Academy of Sciences. 2020. *China's scientific development strategy: Continental Metallogeny*[M]. Beijing: Science Press, 1-439(in Chinese).
- Ni P, Wang G G, Chi Z, Qin H, Ding J Y and Chen H. 2017. A CO₂-rich porphyry ore-forming fluid system constrained from a combined cathodoluminescence imaging and fluid inclusion studies of quartz veins from the Tongcun Mo deposit, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 81: 856-870.

- Pei R F and Xiong Q Y. 1999. Metallogenic directivity and metallogenic tectonic accumulation of super-large metals in China[M]. *Mineral Deposits*, 18(1): 37-46.
- Peng P, Zhai M G, Li Q L, Wu F Y, Hou Q L, Li Z, Li T S and Zhang Y B. 2011. Neoproterozoic (~900 Ma) Sariwon sills in North Korea: Geochronology, geochemistry and implications for the evolution of the south-eastern margin of the North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 20(1): 243-254.
- Qian X L. 2002. On the basic features of the regional geological tectonics of China: The key to understanding of the Cenozoic intraplate orogeny[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 221-225 (in Chinese with English abstract).
- Qin K Z, Zhai M G, Li G M, Zhao J X, Zeng Q D, Gao J, Xiao W J, Li J L and Sun S. 2017. Links of collage orogenesis of multiblocks and crust evolution to characteristic metallogenesis in China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(2) : 305-325(in Chinese with English abstract).
- Rogers J J W and Santosh M. 2003. Supercontinents in Earth history[J]. *Gondwana Research*, 6(3) : 357-368.
- Rudnick R L and Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective[J]. *Review of Geophysics*, 33: 267-309.
- Sawkins F J. 1984. *Metal deposits in relation to plate tectonics*[M]. Berlin-New York: Springer-Verlag.
- Sillitone R H. Porphyre copper system[J]. *Economic Geology*, 105:3-41.
- Song X Y, Hu R Z and Chen L M. 2018. Characteristics and inspirations of the Cu-Ni sulfid deposits in China[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 54(2): 221-235(in Chinese with English Abstract).
- Sun W D, Liang H Y, Ling M X, Zhang M Z, Ding X, Zhang H, Yang X Y, Li Y L, Ireland T R, Wei Q R and Fan W M. 2013. The link between reduced porphyry copper deposits and oxidized magmas [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 103: 263-275.
- Tang H S, Chen Y J, Santosh M, Zhong H and Yang T. 2012. REE geochemistry of carbonates from the Guanmenshan Formation, Liaohai Group, NE Sino-Korea Craton: Implication for seawater compositional change during the Great Oxidation Event[J]. *Precambrian Research*, 227: 316-336.
- Tang J X. 2019. Mineral resources base investigation and research status of the Tibet Plateau and its adjacent major metallogenic belts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(3): 617-624(in Chinese with English Abstract).
- Teng J W. 2004. Opportunity challenge and developing frontiers: Geophysics in 21st century[J]. *Progress in Geophysics*, 19(2):208-215 (in Chinese with English Abstract).
- Tu G C. 1984. *Geochemistry of stratigraphic deposits in China*[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Turneure F S. 1955. Metallogenic provinces and epochs[J]. *Economic Geology*, 50:38-98.
- Wang C S, Dai J G, Liu Z F, Zhu L D, Li Y L and Jia G D. 2009. The uplift history of the Tibetan Plateau and Himalaya and its study approaches and techniques: A review[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(3):1-30(in Chinese with English Abstract).
- Wang D H, Dai H Z, Liu B S, Wang C H, Li J K, Li P, Cheng Z H, Yu Y, Qin J H, Sun Y, Lou D B and Yao F J. 2024. The multi-cycle, deep circulation, integration of internal and external theory of lithium deposits and its prospecting applications in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 98(3): 889-897(in Chinese with English abstract).
- Wang M L. 2001. *Potash resources in Lop Nur*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Wang Y Christina, Wei B, Chen C and Bai Y Y. 2023. Enrichment mechanism of platinum-group elements in mafic-ultramafic magmas: Review and case study[J]. *Acta Geologica Sinica*, 97(11): 3622-3636(in Chinese with English abstract).
- Wen H J, Zhou Z B, Zhu C W, Luo C G, Wang D Z, Du S J, Li X F, Chen M H and Li H Y. 2019. Critical scientific issues of super-enrichment of dispersed metals[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(11): 3271-3291(in Chinese with English abstract).
- Wong W H. 1927. Crustal movement and igneous activities in eastern China since Mesozoic time[J]. *Bulletin of Geological Society of China*, 6(1): 12-21.
- Wu F Y, Wang R C, Liu X C and Xie L. 2021. New breakthroughs in the studies of Himalayan rare-metal mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11) : 3261-3276 (in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Li J L, Song D F, Han C M, Wan B, Zhang J E, Ao S J and Zhang Z Y. 2019. Structural analyses and spatio-temporal constraints of accretionary orogens[J]. *Earth Science*, 44(5): 1661-1687(in Chinese with English Abstract).
- Xie J R. 1941. *Introduction to mineral resources of Yunnan Province*[J]. *Georeview*, 1: 1-40(in Chinese).
- Xie X J and Wang X Q. 2023. Deep-penetrating geochemistry[J]. *Earth Science Frontiers*, 2:235-237(in Chinese with English abstract).
- Xu K Q, Sun N, Wang D Z and Hu S X. 1963. Study on intrusive time, petrological properties, distribution and specificity of multi-cycle granites in South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*(in Chinese), 43(1): 1-26.
- Yang J H, Xu L, Sun J F, Zeng Q D, Zhao Y N, Wang H and Zhu Y S. 2021. Deep dynamics of magma and mineralization and destruction of the North China Craton[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 51(9) : 1401-1419(in Chinese).
- Yang K F, Fan H R, Pirajno F and Li X C. 2019. The Bayan Obo (China) giant REE accumulation conundrum elucidated by intense magmatic differentiation of carbonatite[J]. *Geology*, 47(12): 1198-1202.
- Yardley B W D and Bodnar R J. 2014. Fluid in the continental crust[J]. *Geochemical Perspectives*, 3(1): 1-27.
- Ye L J and Chen Q Y. 1989. Multi-factor and multi-stage metallogenic theory of sedimentary deposit[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2: 109-127(in Chinese with English abstract).
- Zhai M G and Windley B F. 1990. The Archean and Early Proterozoic

- iron formation of North China: Their characteristics, geotectonic relations, chemistry and implications for crustal growth[J]. *Precambrian Research*, 48: 267-286.
- Zhai M G and Santosh M. 2011. The Early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview[J]. *Gondwana Research*, 20 (1) : 6-25.
- Zhai M G and Santosh M. 2013. Metallogeny of the North China Craton: Link with secular changes in the evolving Earth[J]. *Gondwana Research*, 24(1): 275-297.
- Zhai M G. 2013. Secular changes of metallogenic systems link with continental evolving of the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5) : 1759-1773(in Chinese with English abstract).
- Zhai M G, Hu B, Peng P and Zhao T P. 2014. Meso-Neoproterozoic magmatic events and multi-stage rifting in the NCC[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(1):100-119(in Chinese with English abstract).
- Zhai M G. 2014. Multi-stage crustal growth and cratonization of the North China Craton[J]. *Geoscience Frontiers*, 5: 457-469.
- Zhai M G and Peng P. 2020. Origin of early continents and beginning of plate tectonics[J]. *Science Bulletin*, 65: 970-973.
- Zhai M G. 2022. Radical change in tectonic regime and paleo-environment at the end of Neoproterozoic evidenced by a unique metal co-existing deposit[J]. *Science Bulletin*, 67(23): 2438-2448.
- Zhai M G. 2024. Grasp the pattern of global mineral resources and improve our ability to secure strategic critical mineral resources[J]. *Science and Technology Review*, 42(5): 1-2(in Chinese).
- Zhai Y S. 1999. Study on metallogenic system[J]. *Geoscience Frontier*, 6(1):21-27(in Chinese).
- Zhang S C, Wang X M, Wang H J, Bjerrumb, Christian J, Hammarlund E U, Costaf M M, Connelly, J N, Zhang B M, Sun J and Canfield D E. 2016. Sufficient oxygen for animal respiration 1,400 million years ago[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113: 1731-1736.
- Zhang S H, Wang H Y, Tang H S, Cai Y-H, Kong L H, Pei J L, Zhang Q Q, Hu G H and Zhao Y. 2024. High positive carbonate carbon isotope excursion identified in the North China Craton: Implications for the Lomagundi - Jatuli Event[J]. *Terra Nova*, 36(1):25-36.
- Zhao Z H and Tu G C. 2003. Super large deposits in China[M]. Beijing: Scientific Press(in Chinese).
- Zhao Z P. 1996. Reexamination on the intracontinental type orogeny[J]. *Chinese Journal of Geology*, 31(4): 353-364 (In Chinese with English Abstract).
- Zheng M P, Xiang J and Wan J L. 1989. Salt lakes on the Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing Science and Technology Press(in Chinese).
- Zheng Y F, Chen Y X, Chen R X and Di L Q. 2022. Tectonic evolution of convergent plate margin and its geological effect[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 52(7): 1212-1242(in Chinese).
- Zhou L G, Zhai M G, Lu J S, Zhao L, Wang H Z, Wu J L, Liu B, Zou Y, Shan H X and Cui X H. 2017. Paleoproterozoic metamorphism of high-grade granulite facies rocks in the North China Craton: Study advances, questions and new issues[J]. *Precambrian Research*, 303: 520-547.
- Zhou M F, Li X X, Wang Z C, Li X C and Liu J C. 2020. Research progress and prospect of metallogenic process of rare-earth elements and scandium deposits in weathered shell type[J]. *Science Bulletin*, 65(33): 3809 -3824(in Chinese).
- Zhou T F, Fan Y, Wang S W, White N C, Zhou T F, Fan Y, Wang S W and White N C. 2017. Metallogenic regularity and metallogenic model of the Middle-Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(11): 3353-3372(in Chinese with English Abstract).
- Zhou Y Y and Zhai M G. 2022. Mantle plume-triggered rifting closely following Neoproterozoic cratonization revealed by 2.50-2.20 Ga magmatism across North China Craton[J]. *Earth-Science Reviews*, 230:104060.
- Zhu R X and Sun W D. 2021. Large mantle wedge and cratonic destructive gold deposits[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 51(9): 1444-1456(in Chinese).

附中文参考文献

- 陈国达. 1956. 中国地台活化区的实例并着重讨论华夏古陆问题[J]. *地质学报*, 3: 239-271.
- 陈华勇. 2020. 对我国矿床学未来发展方向的思考[J]. *地学前缘*, 27 (2): 99-105.
- 陈衍景. 2006. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力[J]. *中国地质*, 33 (6): 1181-1196.
- 陈毓川. 1997. 矿床的成矿系列研究现状与趋势[J]. *地质与勘探*, 33 (1): 21-25.
- 代世峰, 赵蕾, 王宁, 魏强, 刘晶晶. 2024. 煤系中关键金属元素的成矿作用研究进展与展望[J]. *岩石地球化学通报*, 43(1): 49-63.
- 邓军, 王庆飞, 陈福川, 李龚健, 杨立强, 王长明, 张静, 孙祥, 舒启海, 和文言, 高雪, 高亮, 刘学飞, 郑远川, 邱昆峰, 薛胜超, 徐佳豪. 2020. 再论三江特提斯复合成矿系统[J]. *地学前缘*, 27 (2): 102-136.
- 邓军, 王庆飞, 张良, 薛胜超, 刘学飞, 杨林, 杨立强, 邱昆峰, 梁亚运. 2023. 胶东型金矿成因模型[J]. *中国科学: 地球科学*, 53(10): 232-2347.
- 杜乐天. 2009. 幔汁(HACONS流体)地球内动因探索[J]. *地球学报*, 30(6): 739-748.
- 范宏瑞, 牛贺才, 李晓春, 杨奎锋, 杨占峰, 王其伟. 2020. 中国内生稀土矿床类型、成矿规律与资源展望[J]. *科学通报*, 65(33): 3778 - 3793.
- 范宏瑞, 徐亚, 杨奎锋, 张继恩, 李晓春, 张丽莉, 余海东, 刘双良, 徐兴旺, 黄松, 李秋立, 赵亮, 李献华, 吴福元, 翟明国, 赵永岗, 王其伟, 杨占峰, 刘云, 闫国英, 刘占全, 崔峰, 刘峰. 2022. 内蒙古白云鄂博矿床碳酸岩侵位方式与三维形态及稀土潜在资源[J]. *岩石学报*, 38(10): 2901-2909.
- 郭文魁, 刘兰笙, 俞志杰. 1982. 中国东部成矿域与成矿期的基本特征[J]. *矿床地质*, 1(1): 1-14.
- 国家自然科学基金委员会. 2017. 中国科学发展战略·板块构造与大

- 陆动力学[M].北京:科学出版社.1-439.
- 国家自然科学基金委员会.2020.中国科学发展战略·大陆成矿学[M].北京:科学出版社.1-439.
- 侯增谦.2010.大陆碰撞成矿论[J].地质学报,84(1):30-58.
- 侯增谦,陈骏,翟明国.2020a.战略性关键矿产研究现状与科学前沿[J].科学通报,65(33):3651-3652.
- 侯增谦,杨志明,王瑞,郑远川.2020b.再论中国大陆斑岩 Cu-Mo-Au 矿床成矿作用[J].地学前缘,27(2):20-44.
- 胡瑞忠,温汉捷,苏文超,彭建堂,毕献武,陈佑纬.2014.矿床地球化学近十年若干研究进展[J].矿物岩石地球化学通报,33(2):1-15.
- 胡瑞忠,高伟,付山岭,苏文超,彭建堂,毕献武.2024.华南中生代陆内成矿作用[J].地学前缘,31(1),226-238.
- 蒋少涌,温汉捷,许成,王焰,苏慧敏,孙卫东.2019.关键金属元素的多圈层循环与富集机理:主要科学问题及未来研究方向[J].中国科学基金,33(2):112-118.
- 李文昌,李建威,谢桂青,张向飞,刘洪.2022.中国关键矿产现状、研究内容与资源战略分析[J].地学前缘,29(1):1-13.
- 李文渊,高永宝,任广利,刘诚,李侃,孔会磊.2024.新疆大红柳滩伟晶岩型锂矿深部结构与区域成矿模型解释[J].地质学报,98(5):1440-1451.
- 李晓春,展云翔,范宏瑞,杨奎峰.2022.内蒙古白云鄂博矿床巨量稀土的堆积及再活化历史:来自矿物微区 Sm-Nd 同位素的制约[J].岩石学报,38(10):2920-2932.
- 刘宝珺,李廷栋.2001.地质学的若干问题[J].地球科学进展,5:607-616.
- 刘成林,王弼力,焦鹏程,陈永志.2010.罗布泊盐湖钾盐矿床分布规律及控制因素分析[J].地球学报,30(6):796-802.
- 刘福来,王舫,王慧宁,田忠华.2024.华北克拉通古元古代造山带关键金属-非金属成矿规律研究进展[J].岩石学报,40(10):2936-2970.
- 卢焕章.1997.成矿流体[M].北京:科学出版社.
- 毛景文,陈懋弘,袁顺达,郭春丽.2011.华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J].地质学报,85(5):636-658.
- 毛景文,宋世伟,刘鹏,刘敏,赵盼盼,袁顺达.2023.锡矿床研究现状及发展趋势[J].岩石学报,39(5):1233-1240.
- 裴荣富,熊群尧.1999.中国特大型金属成矿偏在性与成矿构造聚敛[J].矿床地质,18(1):37-46.
- 钱祥麟.2004.新生代板内造山作用研究-认识中国区域地质构造基本特征的关键[J].地学前缘,11(3):221-225.
- 秦克章,翟明国,李光明,赵俊兴,曾庆栋,高俊,肖文交,李继亮,孙枢.2017.中国陆壳演化、多块体拼合造山与特色成矿的关系[J].岩石学报,33(2):305-325.
- 宋谢炎,胡瑞忠,陈列猛.2018.中国岩浆铜镍硫化物矿床地质特点及其启示[J].南京大学学报(自然科学版),54(2):221-235.
- 唐菊兴.2019.青藏高原及邻区重要成矿带矿产资源基地调查与研究进展[J].岩石学报,35(3):617-624.
- 滕吉文.2004.21世纪地球物理学的机遇与挑战[J].地球物理学进展,19(2):208-215.
- 涂光炽.1984.中国层控矿床地球化学[M].北京:科学出版社.
- 王成善,戴紫根,刘志飞,朱利东,李亚林,贾国东.2009.青藏高原与喜马拉雅的隆升历史和研究方法:回顾与进展[J].地学前缘,16(3):1-30.
- 王登红,代鸿章,刘善宝,王成辉,李建康,李鹏,陈郑辉,于扬,秦锦华,孙艳,娄德波,姚佛军.2024.中国锂矿的多旋回深循环内外生一体化成矿理论及其找矿应用[J].地质学报,98(3):889-897.
- 王弼力.2001.罗布泊盐湖钾盐资源[M].北京:地质出版社.
- 王焰,魏博,陈晨,白玉颖.2023.镁铁-超镁铁质岩浆中铂族元素的富集机理:综述与实例[J].地质学报,97(11):3622-3636.
- 温汉捷,周正兵,朱传威,罗重光,王大钊,杜胜江,李晓峰,陈懋弘,李红谊.2019.稀散金属超常富集的主要科学问题[J].岩石学报,35(11):3271-3291.
- 吴福元,王汝成,刘小驰,谢磊.2023.喜马拉雅稀有金属成矿作用研究的新突破[J].岩石学报,37(11):3261-3276.
- 肖文交,李继亮,宋东方,韩春明,万博,张继恩,敖松坚,张志勇.2019.增生型造山带结构解析与时空制约[J].地球科学,44(5):1661-1687.
- 谢家荣.1941.云南矿产概论[J].地质论评,1:1-40.
- 谢学锦,王学求.2023.深穿透地球化学新进展[J].地学前缘,30(2):235-237.
- 徐克勤,孙鼎,王德资,胡受奚.1963.华南多旋回的花岗岩类的侵入时代、岩性特征、分布规律及其专属性探讨[J].地质学报,43(1):1-26.
- 杨进辉,许蕾,孙金凤,曾庆栋,赵亚楠,王浩,朱昱升.2021.华北克拉通破坏与岩浆-成矿的深部动力学过程[J].中国科学·地球科学,51(9):1401-1419.
- 叶连俊,陈其英.1989.沉积矿床多因素多阶段成矿论[J].地质科学,2:109-127.
- 翟裕生.1999.论成矿系统[J].地学前缘,6(1):12-27.
- 翟明国.2013.华北前寒武纪成矿系统与重大地质事件的联系[J].岩石学报,29(5):1759-1773.
- 翟明国,胡波,彭澎,赵太平.2014.华北中-新元古代的岩浆作用与多期裂谷事件[J].地学前缘,21:100-119.
- 翟明国.2024.把握全球矿产资源格局.提升战略性关键矿产资源保障能力[J].科技导报,42(5):1-2.
- 赵振华,涂光炽.2003.中国超大型矿产(II)[M].北京:科学出版社.
- 赵宗溥.1996.再论陆内造山作用[J].地质科学,31(4):353-364.
- 郑绵平,向军,万景林.1989.青藏高原盐湖[M].北京:北京科罗布泊盐湖钾盐矿床分布规律.
- 郑永飞,陈伊翔,陈仁旭,戴立群.2022.汇聚板块边缘构造演化及其地质效应[J].中国科学·地球科学,52(7):1212-1242.
- 周美夫,李欣禧,王振朝,李晓春,刘嘉成.2020.风化壳型稀土和铀矿床成矿过程的研究进展和展望[J].科学通报,65(33):3809-3824.
- 周涛发,范裕,王世伟,White N C.2017.长江中下游成矿带成矿规律和成矿模式[J].岩石学报,133(11):3353-3372.
- 朱日祥,孙卫东.2021.大地幔楔与克拉通破坏型金矿[J].中国科学·地球科学,51(9):1444-1456.