深部构造与地质过程控矿研究*

Deep-seated tectonic and geological process controls on mineralization and mineral resources

杨立强[1,2]，邓 军[1,2]，王庆飞[1,2]，高帮飞[1,2]，徐 浩[1,2]

（1 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室，北京 100083；2 中国地质大学岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室，北京 100083）

YANG LiQiang[1,2], DENG Jun[1,2], WANG QingFei[1,2], GAO BangFei[1,2] and XU Hao[1,2]

（1 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 Key Laboratory of Lithosphere Tectonics and Lithoprobing Technology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083, China）

摘 要 随着大规模全球填图和矿产勘探的发展，在地壳深部寻找新的矿产资源的紧迫性日益增加。大型热液成矿系统和矿集区的时空分布受深部地质过程演化制约，成矿系统明显与岩石圈各个层圈的深部结构和组成的不均一性密切相关，其时空分布本质上受深部构造和过程制约。通过深部热-物质迁移的研究，可以建立岩石圈块体构造模型和非线性成矿作用动力学及源区构造等概念，深入探讨岩石圈及与相邻圈层物质和能量交换过程中造矿组分的分散与富集机制及时空演化规律，可以预测矿床出现的种类和聚集的部位，特别是大型矿集区的位置和矿化形式，从而为大型-超大型矿床及矿集区的探寻与预测提供思路和基础。

关键词 深部构造；地质过程；成矿系统

1 深部构造控矿研究促进了区域成矿地球动力学的发展

为了提高成矿预测的可靠性，20世纪30年代一些学者就开始探索矿床分布与地壳深部结构之间的相互关系（Billingsley, 1935; 1941）。之后，深部构造对金属成矿作用的重要性逐渐被越来越多的研究者所认识（Tomson et al., 1968；Kutina, 1969; 1974）。

20世纪50年代，Моисеенко（1957）通过研究阿尔泰—萨彦区的深部结构与铜、稀有金属、多金属矿床分布之间的关系，发现矿床趋向于分布在地壳各层厚度变窄的地区。

20世纪60年代，Tomson等（1968）引入“转换区域聚矿深部构造”（transregional ore-concentrating deep structures）的概念；几乎同时，Kutina（1969）也提出了类似的概念。研究表明，聚矿的深部构造由多组长期活动的深部线性不连续断裂构成（Kutina，1974a；1974b），这些深部构造可能延伸到上地幔或者岩石圈底部（Kutina，1983a），其形成较早，后期又经过多期活化（Favorskaya等，1991），识别这些被现今大陆浅表构造干扰的深部构造，对于预测新的成矿远景区具有重要意义。

之后，Kutina等（1972）应用块体构造模型研究了加拿大Abitibi地区线性构造与矿床产出的空间联系，指出金、铜矿床的产出与不同方向线性构造的交汇处具有密切的空间联系，而同一组线性构造的间距具有重要控矿意义。Stephenson等（1980）研究加拿大地盾的地壳均衡效应时发现两组长波长的重力异常带，

*本文得到国家自然科学基金项目(No. 40672064 和 40572063)，教育部“跨世纪人才培养计划”和教育部科技研究重点项目(No. 01037)及中国地质地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室基金(No. GPMR0529 和 GPMR0528)的联合资助
第一作者简介 杨立强，男，1971 年生，副教授，矿床学和固体地球物理学专业。E-mail: lqyang@cugb.edu.cn

与上述地块边界方向一致，他们认为该异常由岩石圈底部相似大小的对流单元引起。

20 世纪 80 年代以来，随着深部探测技术的提高和将地球作为整个系统的概念的增强，人们对大陆地壳运动与形变方式及其深部结构与形变过程的认识大为改观。在现代矿产勘查中，对构造控矿作用研究已从局部扩展到全球，从大洋扩展到大陆，从地表浅部扩展到地壳深部乃至地幔（O'Driscoll et al., 1997；Kutina，1999）。地幔不连续面的起伏、地幔对流系统（幔柱构造或拆沉构造）、地幔不均一性对地壳中金属富集的控制作用的研究均取得了重要进展（Sillitoe，1974；Hill，1992），从而大大拓宽了原有的思路，使构造对矿集区的控制作用研究提高到新的高度，极大推进了区域成矿作用地球动力过程研究。

Kutina（1980；1983a）在美国西部定义了4个530×600 km大小的岩石圈块体，这些块体被NS和EW向的构造边界限定，主要矿集区均产于这些块体近垂直边界的交汇部位。最近的地质、地球物理和同位素地球化学综合研究证实了在内华达及其邻区存在一条沿着Battle Mountain-Eureka方向的深地壳断裂带。该断裂带的形成与元古代大陆裂谷形成有关，古生代构造活动使断裂带活化和改造。第三纪，先存的地壳断裂带在张性条件下被活化、分割，汇聚了深源含金流体，这些流体分散于古生界斜坡相沉积岩中，形成层控的卡林型金矿和其他类型矿床，地壳断裂所在位置及其后期活化是控制新生代矿床产出的根本因素（Crafford，2002）。

此外，Н К Булин等（1995）研究了俄罗斯领土按岩石圈厚度的分区，并提出了大型岩石圈块体成矿专属性的新认识。Bekzhanov（1994）通过对哈萨克斯坦深部构造的研究，对该区的地球化学和成矿分带进行了解释。Booder（1996）研究乌克兰地盾Donet盆地Hg-Sb矿床时发现，NNW向深部线性构造控制了该区古生代沉积和晚二叠世Donet盆地的反转。盆地反转阶段，这些线性构造及其伴生的深部构造提供了下地壳和上地幔物质向上运移的通道，形成了Hg-Sb矿化。Shahabpour（1999）则成功应用块体构造理论对伊朗格罗斯山脉东北地区进行了研究。世界其他地区与块体构造理论类似的例子还有马达加斯加（Kutina，1975）、北沃尔特（Kutina，1974b）、摩洛哥（Kutina，1985）、中国 （Kutina，1983b）和喀拉沙漠（Kutina，1988）。

在此期间，中国深部构造控矿研究也取得了长足的进展。对中国莫霍面形态与岩金分布关系的研究，表明我国东、西两条地幔陡坡带明显控制了岩金矿的分布（黄瑞华，1994）。通过对中国大陆特大型矿床地球物理背景研究，反映特大型矿床均匀分布在 3 条主要的区域成矿带内，产在岩石圈地幔减薄部位、软流圈上隆区、地壳上地幔的横向不均匀区的变换带，对应于大陆软流圈不均匀性分区的交界处；而大中小矿床分布在不同构造单元的边界附近（彭聪等，1999）。通过对南岭金属成矿省中生代陆内造山的深部构造过程和地球物理特征的研究，认为本区从深到浅有岩浆流动上升的可能性，超大型钨－锡矿床的超巨量堆积与深部构造过程有密切关系（裴荣富等，1999）。利用胶东矿集区地球物理多学科资料反演计算的现今岩石圈结构图象，根据区域成矿物理化学与地球化学资料，初步恢复矿集区金矿成矿期的岩石圈结构形态与物理状态，探讨其可能的深浅构造耦合成矿效应，为进一步构建精细的岩石圈结构图象与深部过程控矿作用演化模式，进行了有益的尝试（Yang et al.，2006）。

上述大量研究表明（翟裕生等，1981；1993），许多矿床的形成与时空分布均受多元构造时空叠接控制，同一成矿带或矿田内的矿床（无论内生或外生）并不是均匀分布的，而是在构造叠接的某些局部地段富集。在分析超大型矿床和大型矿集区时空分布特征的基础上（Zhai et al., 1996），人们也对其产出的主要深部构造背景进行了总结（Yang et al.，2004）。对全球大型矿床与区域性深部构造关系的研究结果表明（戴自希，1996；翟裕生，1997；Kutina，1998），表面上，矿床的分布受地壳浅层次应力作用所形成的断裂的强烈影响，但实质上，矿床的分布受地幔隆起等深部因素的控制。同一成矿带或矿田内的矿床（无论内生或外生）并不是均匀分布的，而是在构造叠接的某些局部地段富集（Kutina，1970；翟裕生等，1981；1993；Zhai et al.，1996）。地壳构造中金属矿床分布规律研究的重要结论之一是，大型矿床和矿集区明显与岩石圈（包括地幔）各个层圈的深部结构和组成的不均一性密切相关，矿床趋向于赋存在幔隆区和地幔底辟区，这对于幔源的金刚石、铜、镍、金、锡、钨、钼矿床及大型热液铀矿床表现得尤为明显（Булин et al.，1995）。

2　矿集区深部地质过程研究是推动矿床学发展的重要动力

近年来，随着现代地质工作的逐步深入，成矿学研究重点逐渐转向隐伏（或半隐伏）矿床的研究和大型、超大型矿床及矿集区的探寻与预测（Zhai et al.，1999；Zhai，2001）。尤其是，苏联科拉超深钻在所揭穿的古大陆地壳 12 km 范围内全都存在有矿化；并在距现在存在的古地表 15～20 km 左右的较深水平上存在相似矿化等重要事实（Ю·Н·亚科夫列夫等，1999），促使人们更注意把深部地质过程的研究视为推动矿床学发展的重要动力之一。将成矿作用视为地壳演化的一部分，探索地壳深部乃至地幔结构构造演化过程的成矿控制已成为成矿学研究的重要前沿领域和发展趋势之一（Barley et al.，1992；Deng et al.，2000；Zhai et al.，2002；Yang et al.，2004; 2006）。

前苏联、澳大利亚、美国、欧洲科学基金会、日本、加拿大和中国等国纷纷制定了矿床形成与地球动力学演化密切相关的重大研究计划（吕庆田，2001；翟裕生等，2002）。这些研究大多以大陆深部地质演化与成矿物质供给→传输→集聚过程为研究核心，从壳幔相互作用和物质/能量交换传递新视角研究大陆成矿作用过程，试图通过对成矿作用与深部地质和地球动力学演化关系的了解，增强发现矿床的能力。最近澳大利亚新开展了一项雄心勃勃的计划，即“玻璃地球计划”（The Glass Earth），目的是利用当代高新技术集成发展新一代矿产勘探方法，使大陆表层 1 000 m 像玻璃一样透明（Carr et al.，2002）。加拿大也提出类似的想法，拟发起一项玻璃地球项目，使加拿大地壳表层 3 000 m 范围内透明（Jeremy，2002）。目前在玻璃地球计划中正在实施的主要内容包括：新一代探测技术、提高对风化层及下伏基岩中地质过程的认识、能够和增强空间数据管理、综合和解释的地理信息技术、矿床发现的概念和预测地形模型。新世纪初，中国国土资源部设立了“大型矿集区深部精细结构与含矿信息”项目，旨在通过新技术探测大型矿集区地壳精细结构和流体输导系统与迁移路径，以揭示深部地质过程与成矿作用关系。

与此同时，金矿化与下地壳和上地幔的成生联系受到了不少学者的重视。有证据表明（毛景文等，2005），地幔物质在我国及全球众多金矿床成矿过程中有重要作用，或者直接是幔源岩浆成矿，而成矿流体中显示有地幔同位素和微量元素的痕迹，或者间接地为成矿提供热源。例如，小秦岭金矿田（倪师军，1994）、胶东金矿（孙丰月等，1995）、云南“三江”金矿成矿带（胡云中等，1995）、冀西北地区金银矿床（牛树银等，1996）、吉林夹皮沟金矿田（邵军，1999）、黔西南低温卡林型金矿（朱赖民，1997；王登红等，1999）等。此外，热泉型金矿（郭光裕，1993）、与碱性岩有关的金矿（聂凤军等，1997）也是幔源物质成矿作用的极好例证。对澳大利亚的研究表明，虽然很多热液矿床成矿物质主要为壳源（Skinner，1997），但是不断有证据表明地幔物质参与了许多矿床的形成。例如，壳幔相互作用在产生地壳尺度的非造山地壳熔融过程中形成了Olympic Dam矿床（Stewart et al.，1999）；Yilgarn地块太古宙金矿被认为是地幔流体携带成矿物质，同时壳幔混合流体从围岩中淋滤出金而形成的（Groves，1993）；Lachlan造山带Sr和Pb同位素研究（Carr et al.，1995）和Broken Hill矿床微量元素研究（Belousova et al.，2001）也证实了幔源物质参与成矿作用。

对澳大利亚的研究表明（Jaques et al.，2002），不同成矿系统的数量和规模受 3 500 Ma 以来地壳演化的制约，主要成矿系统具有特定的时空边界属性，显示其形成与大陆地球动力学演化密切相关。联系澳大利亚大陆成矿作用与全球构造作用，尤其是超大陆拼合和裂解以及澳大利亚大陆板块构造增长之间关系的众多模型，提供了成矿系统形成及演化过程中壳幔相互作用的框架。澳大利亚造山带型金矿的分布常常与上百到数千 km 的大断裂密切相关，三维地震研究结果表明（Drummond，1998），如此大规模的断裂构造其在垂向延深也应该有几十公里。例如，Kalgoorlie 地区深部地壳地震反射剖面揭示出地壳中存在 5～50 km 长的不连续面，有些还深达地幔。可见，热液成矿系统的形成受深部构造制约，而且可能存在地壳/地幔尺度的热液系统，成矿系统模型研究必须探讨地壳尺度的构造控矿系统及壳/幔相互作用过程。

上述资料表明，虽然所有矿床均可视为常规地质作用的产物，但从地球动力学演化的角度来看，大型-超大型矿床和矿集区的时空分布规律本质上受深部地质过程演化制约，地幔物质和地壳规模的构造是控制

地壳内部大规模流体流动迁移、聚集存储的最主要因素（李晓波，1998；Thompson，1998）。通过深部热-物质迁移的研究，可以建立岩石圈块体构造模型和非线性成矿作用动力学及源区构造等概念（Булин et al., 1995），深入探讨岩石圈及与相邻圈层物质和能量交换过程中造矿组分的分散与富集机制及时空演化规律，可以预测矿床出现的种类和聚集的部位，特别是大型矿集区的位置和矿化形式，从而为大型－超大型矿床及矿集区的探寻与预测提供思路和基础。

参 考 文 献

Ю·Н·亚科夫列夫, В·И·卡赞斯基, 著. 1999. 丁万烈, 译. 科拉半岛超深钻井剖面与地表的矿化对比. 世界地质, 18(4): 36~46.

李晓波. 1998. 地球动力学演化与巨型矿集区的形成. 地学前缘, 5(增刊): 103~108.

毛景文, 李晓峰, 张荣华, 等. 2005. 深部流体成矿系统. 北京: 中国大地出版社.

裴荣富, 翟裕生, 张本仁. 1999. 深部构造作用与成矿. 北京: 地质出版社.

孙丰月, 石准立, 冯本智. 1995. 胶东金矿地质与幔源 C-H-O 流体分异成岩成矿. 长春: 吉林人民出版社, 1~170.

王登红, 林文蔚, 杨建民, 等. 1999. 试论地幔柱对于我国两大金矿集中区的控制意义. 地球学报, 20(2): 157~162.

翟裕生, 林新多, 等. 1993. 矿田构造学. 北京: 地质出版社. 1～214.

翟裕生, 吕古贤. 2002. 构造动力体制转换与成矿作用. 地球学报, 23(2): 97~102.

翟裕生, 张 湖, 宋鸿林, 等. 1997. 大型构造与超大型矿床. 北京: 地质出版社.

翟裕生. 1999. 论成矿系统. 地学前缘, 6(1): 13~28.

Barley M E and Groves D I. 1992. Super-continent cycles and the distribution of metal deposits through time. Geology, 20: 291~294.

Billingsley P and Locke A. 1935. Tectonic position of ore districts in the Rocky Mountain region. Am. Inst. Min. Metall. Engrs. Trans., 115: 59~65.

Groves D I. 1993. The crustal continuum model for late-Archean lode-gold deposits of the Yilgarn Block, Western Australia. Mineral Deposits, 28: 366~374.

Jaques A L, Jaireth S and Walshe J L. 2002. Mineral system of Australia: an overview of resources, setting and processes. Australian Journal of Earth Sciences, 49: 625~660.

Kutina J. 1969. Hydrothermal ore deposits in the western United States: a new concept of structural control of distribution. Science, 1113~1119.

Kutina J. 1999. Ore deposit controls by fracture patterns of the crust and by mantle-rooted structural discontinuities. Earth Science Front, 6(1): 29~35.

Yang L Q, Deng J, Wang J G, et al. 2004. Control of deep tectonics on the superlarge deposits in China. Acta Geologica Sinica, 78(2): 358~367.

Yang L Q, Deng J, Wang Q F, et al. 2006. Coupling Effects on Gold Mineralization of Deep and Shallow Structures in the Northwestern Jiaodong Peninsula, Eastern China. Acta Geologica Sinica, 80(3): 400~411.

Zhai Y S and Deng J. 1996. Outline of the mineral resources of China and their tectonic setting. Australia Journal of Earth Sciences, 43(6): 673~685.

http://www.kcdz.ac.cn/