

华南陆块陆内成矿作用的一些科学问题

胡瑞忠¹, 毛景文², 范蔚茗³, 华仁民⁴, 毕献武¹, 钟宏¹, 宋谢炎¹, 陶琰¹

1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州贵阳 550002

2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640

4. 南京大学地球科学系, 江苏南京 210093

Hu Ruizhong¹, Mao Jingwen², Fan Weiming³, Hua Renmin⁴, Bi Xianwu¹, Zhong Hong¹,
Song Xieyan¹, Tao Yan¹

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

4. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Hu Ruizhong, Mao Jingwen, Fan Weiming, et al. Some scientific questions on the intra-continental metallogeny in the South China continent. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(2): 013-026

Abstract: The South China continent including the Yangtze Block and the Cathaysia Block is an uncommon world-class polymetallic metallogenic province with great ore-forming potential. The formation and evolution of the South China continent had undergone specific intra-continental dynamic processes, in which the Late Permian plume-related metallogenic system, the Mesozoic huge low-temperature metallogenic system and the metallogenic system of the Mesozoic great granite province are quite distinctive in the world. Thus, the South China continent becomes an ideal international base for studying the intra-continental mineralization. The studies, in various levels, of how the continental dynamic processes over different geological time control the mineralization in the South China continent have been carried out and have had important achievements. On the basis of these studies, this paper presents the major scientific questions for further research on the three metallogenic systems.

Key words: South China continent; intra-continental metallogeny; plume-related metallogenic system; huge low-temperature metallogenic system; great granite province metallogenic system

摘要: 华南陆块由扬子地块和华夏地块组成, 是全球罕见的世界级多金属成矿省, 成矿潜力巨大。华南陆块的形成和演化, 受到了很有特色的陆内大陆动力学过程的影响, 其中的晚古生代地幔柱成矿系统、中生代大面积低温成矿系统、中生代大花岗岩省成矿系统等陆内成矿系统, 在全球背景中很有特色, 是全球研究陆内成矿作用的理想基地。对华南陆块地质历史时期的大陆动力学过程如何制约上述成矿作用的发生, 以往已开展不同程度的研究并取得重要成果。笔者在论述这些研究进展的基础上, 提出了三大成矿系统需要进一步研究的一些科学问题。

收稿日期: 2010-02-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2007CB411400); 国家自然科学基金重点项目(40634020)

作者简介: 胡瑞忠(1958—), 男, 博士, 研究员, 从事矿床学和矿床地球化学研究。E-mail: huruizhong@vip.gyig.ac.cn

关键词:华南陆块;陆内成矿作用;地幔柱成矿系统;大面积低温成矿系统;大花岗岩省成矿系统

中图分类号:P611 文献标志码:A 文章编号:1005-2321(2010)02-0013-14

0 引言

20世纪90年代以来,以发展板块构造理论、深入理解大陆内部成矿作用机制、提高发现大陆内部矿床能力为主要目的的大陆动力学及其与成矿关系的研究,引起了国际上的极大关注。综观十余年来国内外对大陆动力学与成矿关系的研究,可以发现以下主要趋势:在成矿机制上,将成矿作用研究与壳幔相互作用研究密切结合;在成矿时代上,成矿作用与重大地质事件的内在关联受到了高度重视;在成矿区域上,除继续重视板块边缘成矿作用的研究外,大陆板块内部的成矿作用成了新的研究热点^[1]。

大陆板块内部的成矿作用简称陆内成矿作用,指发生在大陆板块内部、主要由大陆板块内部动力学过程(地幔柱活动、岩石圈拆沉、幔源岩浆底侵、陆内岩石圈伸展等)诱导的成矿作用。相对于大陆板块边缘的成矿作用,对陆内成矿作用动力学机制等方面的研究还较薄弱。对这一薄弱领域的积极探索,必将极大地丰富大陆动力学与成矿关系的理论体系。

华南陆块地处欧亚大陆东南部,濒临西太平洋,由扬子地块和华夏地块在新元古代时期碰撞拼贴而形成,其北面和西面分别与秦岭一大别造山带和三江褶皱带接壤(图1)。华南陆块是全球罕见的世界级多金属成矿省,成矿潜力巨大。截至目前,在华南陆块探明的钨、锡、锑、铋储量居世界第一,铜、铀、钒、钛、汞、稀有金属储量居全国第一,铅、锌、金、银、铂族元素等矿种的储量也名列全国前茅。与我国其他成矿区域主要在大陆板块边缘碰撞造山带发生的成矿作用不同,华南陆块的形成和演化,受到了很有特色的陆内大陆动力学过程的影响,大陆板块内部发生了强烈的壳幔相互作用,陆内大规模成矿作用十分明显。西部发育有峨眉山大火成岩省,其成矿作用的多样性在全球的大火成岩省中独一无二;西南部发育有大面积低温成矿域,其面积之大、包含的矿种之多,在全球十分罕见;东部发育有面积高达约100万km²的大花岗岩省,如此大面积的花岗岩省和相应的中生代多金属爆发式成矿,全球少见。在这些区域发生的成矿作用分别构成了在全球背景中

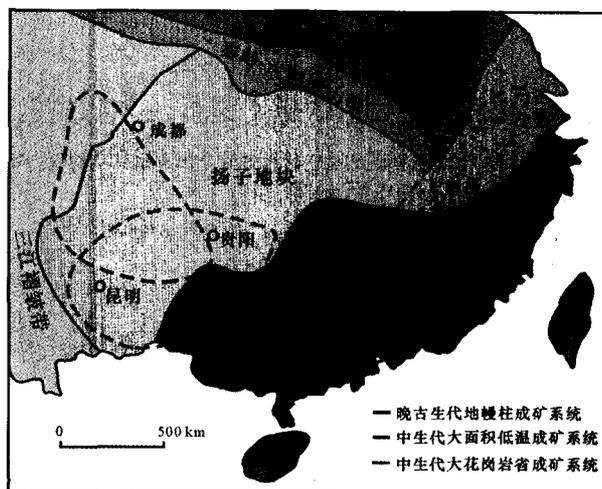


图1 华南陆块及其三大成矿系统空间分布示意图
Fig.1 A sketch map showing locations of the three intra-plate metallogenetic systems in South China continent

很有特色的晚古生代地幔柱成矿系统、中生代大面积低温成矿系统、中生代大花岗岩省成矿系统(图1)。因此,华南陆块是全球研究陆内成矿作用的理想基地。

1 晚古生代峨眉山地幔柱活动与成矿作用的多样性

峨眉山玄武岩及共生的镁铁-超镁铁质侵入岩,以及少量花岗岩和碱性岩广泛分布于华南陆块西部三省(云南、四川和贵州),构成了主要为陆相的峨眉山大火成岩省,面积约50万km²(图2)。近年来,岩石学、地球物理、地球化学、同位素年代学等方面的综合研究证实,这一大火成岩省的形成是晚古生代峨眉山地幔柱活动的产物^[2-6],与地幔柱活动有关的岩浆活动主要发生于距今约260Ma^[7-12]。峨眉山玄武岩主要可分为低钛和高钛两类。一般认为,低钛玄武岩起源于岩石圈地幔,其地幔部分熔融程度较高且经历了较强的地壳混染;而高钛玄武岩则可能起源于软流圈,其地幔部分熔融和地壳混染程度均较低^[2,13]。大型镁铁-超镁铁质层状岩体分布于攀西地区的区域性深大断裂附近,其韵律层理的形成受多次岩浆的注入及岩浆混合、结晶分异作用或液态不混溶作用的控制^[8,14-15]。花岗岩体及碱性

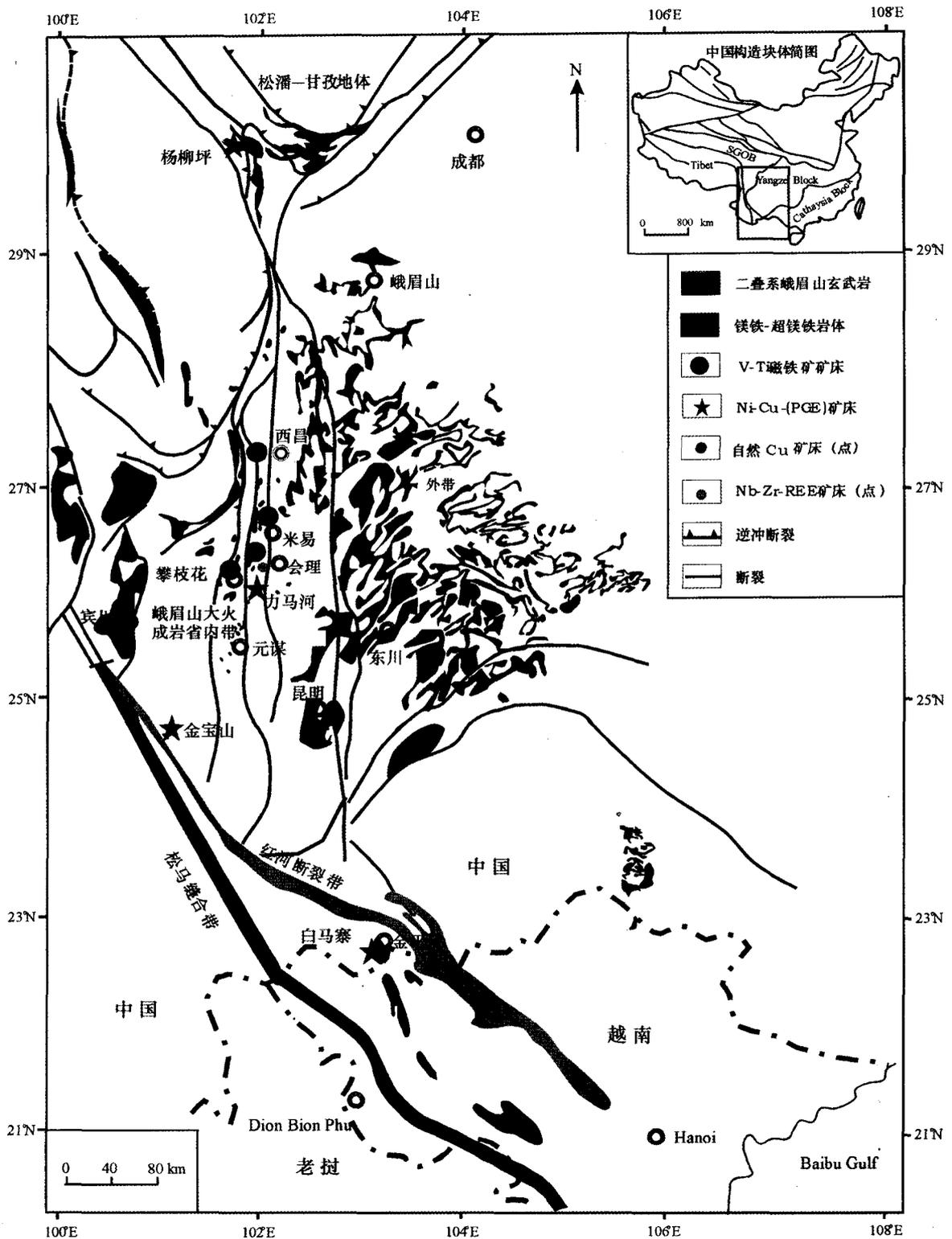


图2 峨眉山大火成岩省主要矿床分布示意图
(据文献[27]修改)

Fig. 2 A sketch map showing locations of main mineral deposits in the Emeishan Large Igneous Province

杂岩的形成,则由玄武质岩浆的高度分异或底侵玄武质岩浆对下地壳的部分熔融作用所致^[12]。

地幔柱上升是地球各圈层进行物质和能量交换的一种重要方式,巨量玄武质岩浆活动可导致大规模成矿作用的发生。已有研究表明,世界上很多超大型矿床都形成于地幔柱背景下,典型范例如俄罗斯西伯利亚的 Noril'sk-Talnakh 超大型 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床^[16]、南非与 Bushveld 杂岩体有关的 PGE-Cu-Ni 硫化物矿床^[17]、美国 Duluth 杂岩体中的超大型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床^[18]、加拿大 Coppermine River 大火成岩省中的大型 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床^[19]、北大西洋火成岩省 Skaergaard 岩体中的 Pd-Au 矿床^[20]以及我国峨眉山大火成岩省中的相关矿床(Cu-Ni-PGE、V-Ti 磁铁矿、Nb-Zr-REE)等。其中, Noril'sk-Talnakh 超大型 Ni-Cu-PGE 矿床的 Ni 储量位居世界第一, PGE 储量位居世界第二(Ni 2 000 万 t, Cu 3 000 万 t, PGE 5 000 t)^[21]。值得关注的是,近年来有研究者提出塔里木板块晚古生代大量玄武岩的形成也可能与地幔柱活动有关^[22-23]。天山—阿尔泰东部地区众多赋存铜镍硫化物矿床(喀拉通克、黄山、黄山东、香山、白石泉等)和钒钛磁铁矿矿床(尾亚、香山西)的早二叠世(298~270 Ma)镁铁-超镁铁质岩体被认为是该地幔柱活动的产物^[23-25]。

从矿床类型上看,全球其他大火成岩省中产出的矿床类型相对较为单一,大多为 Cu-Ni-(PGE)硫化物矿床。而且,巴西 Paraná、美国 Columbia River、印度 Deccan 等大火成岩省中目前尚未见有经济意义的矿床报道。极具意义的是,与世界其他大火成岩省相比,虽然我国峨眉山大火成岩省的面积(约 50 万 km²)较小,但其 V-Ti-磁铁矿的大规模成矿居全球第一,且其成矿作用类型的多样性在世界其他大火成岩省中极为罕见^[26-27]。与峨眉山地幔柱活动相关的典型矿床主要有:与镁铁-超镁铁质层状岩体有关的超大型 V-Ti 磁铁矿矿床(攀枝花、红格、白马、太和)、与镁铁-超镁铁质岩体有关的 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床(力马河、金宝山、杨柳坪、白马寨)、与溢流玄武岩有关的 Cu、Fe 矿床(鲁甸、黑山坡)以及与碱性花岗岩有关的 Nb-Zr-REE 矿床(茨达、红格)。显而易见,由于在全球背景中峨眉山大火成岩省成矿作用类型的多样性,这就为我国学者开展地幔柱与成矿关系这一前沿领域的研究提供了极好的基地。近年来,与上述矿床有关的研究工作已在一些

方面取得了较大进展。目前认为,地壳混染和结晶分离对硫化物熔离及 Cu-Ni-PGE 矿床的形成起到了至关重要的作用^[28-32],而岩浆的多期次注入、岩浆混合作用^[14-15]或铁钛氧化物与硅酸盐熔浆的不混溶作用^[8]对于超大型 V-Ti 磁铁矿矿床的形成有重要影响。

不过,虽然对某些矿床的研究取得了上述重要进展,但总体看来对峨眉山地幔柱及其与成矿关系的整体性认识目前还较为薄弱。主要表现为:(1)未能将地幔柱活动导致的构造-岩浆活动有机地统一起来,从而未能清楚地认识峨眉山大火成岩省中低钛和高钛玄武岩与各类含矿镁铁-超镁铁质岩体和碱性花岗岩体的分异演化关系;(2)对成矿元素在不同岩体或岩相中差异性富集的主要控制因素是什么、不同矿床类型在统一的地幔柱成矿系统中有何本质联系、全球背景中峨眉山大火成岩省成矿作用类型多样性的原因这样一些重要问题还缺乏系统研究;(3)更重要的是根据地幔柱活动及其岩浆分异演化规律来客观判断各类可能的隐伏矿床空间分布的研究则几乎还是空白;(4)世界上很多大火成岩省中都有超大型 Cu-Ni-PGE 矿床产出,峨眉山大火成岩省中这类矿床星罗棋布,但主要为中小型矿床,该区超大型 Cu-Ni-PGE 矿床是否存在?这些问题的存在,制约着对地幔柱成矿理论的深入认识和相应的找矿预测工作。因此,在已有研究的基础上,只有将峨眉山大火成岩省各类岩石的岩浆源区、演化过程、相互关系等方面的研究与地幔柱动力学研究密切结合,并通过系统研究各类矿床的成矿过程及其共性、特殊性、相关性和时空分布规律,才有可能建立科学的地幔柱成矿理论和相应的找矿模型,从而对其成矿潜力做出正确评估。

2 中生代大面积低温成矿的时空分布和动力学

低温成矿域是与低温热液矿床相对应的一个概念,指低温热液矿床密集成群产出的区域。虽然低温热液矿床在世界各地都有分布,但低温成矿域尤其是大面积低温成矿域在世界上的分布则很局限。

华南陆块西南部地区矿产资源非常丰富,在面积约 50 万 km² 的广大范围内,金、汞、锑、砷、铀、银、铅、锌以及萤石、冰洲石和水晶等低温热液矿床广泛发育,且其中的不少矿床是大型-超大型矿床

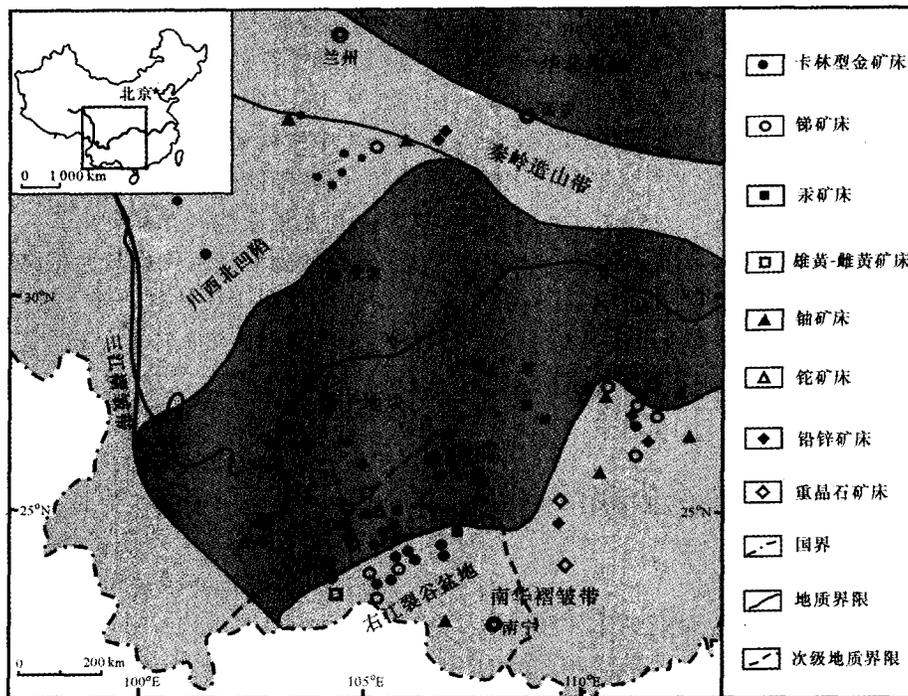


图3 我国西南地区大面积低温成矿域主要矿床分布示意图
(据文献[37])

Fig. 3 A sketch map showing locations of low temperature mineral deposits in southwestern China

(图3);在美国中西部,MVT型铅锌矿床、卡林型金矿和砂岩型铀矿等低温热液矿床也非常发育,不仅分布广,而且大都为超大型矿床,是美国的主要矿产资源基地之一。这种大面积产出不同矿种的低温热液矿床的现象,在国内外目前仅见于上述两个区域。因此,即使就全球而言,在什么条件下才能形成大面积低温成矿域,也是一个很具特色的重要科学问题。

20世纪80年代以来,随着滇黔桂地区卡林型金矿的逐渐发现,华南陆块西南部一个以金、铅、锌、锑、汞为主的大面积低温成矿域的形成背景和过程,已经成为一个突出的科学问题而引起学界的高度重视。基于以往的研究基础,近年来,该方面的研究取得了明显进展^[33-43]。研究表明:(1)大面积低温成矿作用的主成矿期大约发生在150~80 Ma,与区内燕山中晚期岩石圈伸展背景下形成的幔源基性脉岩的时代相当;(2)大面积低温成矿作用的成矿流体为大规模运移的盆地流体;(3)低温矿床中的成矿物质主要来自于基底和周围地层;(4)区内各低温矿种之间在形成机制上具有相似性;(5)该区富成矿元素的新元古代地层和早古生代黑色岩系的广泛发育,以及长时间大面积缺少明显的花岗质岩浆活动,是该区大面积低温成矿的重要前提条件。近年来通过

对该低温成矿域的研究,初步证明其形成过程类似于MVT矿床,从而提出了大规模盆地流体对流循环从围岩中萃取成矿组分,然后在合适的构造部位卸载成矿的成矿模式^[36,39-40]。

值得指出的是,对华南陆块西南部地区大面积低温成矿作用的研究虽已取得重要进展,但仍存在下列重要科学问题亟待解决:(1)大多数矿床缺少精确的成矿年龄资料,妨碍了对成矿作用时空分布规律的全面认识。(2)以往的研究基本上是按矿种进行的,低温成矿域中的各低温矿种为何分区产出以及它们的成矿之间究竟有何联系,目前知道的不多。(3)已有少量研究表明,该区晚中生代大面积低温成矿发生在大陆板块内的伸展背景,主要表现为研究区一些同时期地堑式断陷盆地和幔源基性脉岩的发育等^[36]。近年来有研究认为,美国西部以内华达为中心的新生代(41~32 Ma)大面积低温成矿,也发生在伸展背景下^[44]。但是,华南陆块西南部中生代大面积低温成矿时启动岩石圈伸展的深部动力学过程是什么?岩石圈伸展又是如何控制盆地流体大规模运移而大面积低温成矿的?这些重要问题在以往的研究中基本还未深入涉足。(4)再者,对多矿种的低温热液矿床为什么只大面积地出现在美国中西部

和我国华南陆块的西南部地区,它们的成矿条件有何异同等方面的研究则更欠佳。对这些方面系统研究的缺乏,制约了全面客观地认识大面积低温成矿的过程和规律,制约了对大面积低温成矿动力学模型的合理总结以及对大面积低温成矿域中有利找矿地段的选择,从而也严重地制约了人们对大面积低温成矿作用这一具有全球特色科学问题的深入认识。因此,以我国华南陆块西南部大面积低温成矿域为对象开展上述研究,不仅具有十分重要的意义,同时也反映了国内外低温成矿作用研究的发展趋势。

3 华南中生代大面积花岗岩浆活动及成矿大爆发

印支期是中国东部大地构造演化的重要转折阶段,此时,华南陆块与其西南缘的印支陆块和北缘的华北陆块碰撞拼合^[45-46],形成了华南陆块复杂而独具特色的地质构造,以挤压构造为其主要背景,表现为以湘赣古裂陷带为中心的巨型花状构造^[47-48],其变形时限被初步限定在 245~190 Ma^[48];与此相对应的是,地壳叠置加厚和深熔作用形成了一套面型展布于湘桂粤赣闽诸省的强过铝质-准铝质花岗岩(约 243~220 Ma)^[48-49]。但是这一时期该陆块的成矿作用则相对不明显。

侏罗纪以来,华南陆块经历了构造格局的重大调整、复杂的壳幔相互作用与巨量花岗质岩石的生成,并伴随大爆发成矿,是中国乃至全球极富特色的构造-岩浆与成矿作用分布区。

3.1 构造格局重大调整

已有的资料表明华南陆块协调于中国东部,在中生代时期发生了构造体制的重大调整,即主构造格局由近 EW 向转变为 NE-NNE 向。在华北地块,任纪舜等^[50]发现冀北和内蒙南部 EW 向中晚侏罗世髻髻山组火山岩和土城子组红色地层被 NE-NNE 向分布的白垩纪张家口组火山岩和义县组火山岩覆盖,表明侏罗纪与白垩纪之间为构造体制调整的时间;牛宝贵等^[51]通过张家口组火山岩和义县组火山岩中锆石 SHRIMP 年代学研究认为这一转折时限为 140~120 Ma;翟明国等^[52]的综合研究表明,这一转折时限应为 150~100 Ma。在华南,周新民等^[53]发现三叠纪与侏罗纪之间存在约 10 Ma 的岩浆活动间歇期,这可能代表了华南构造体制的调

整时期;余心起等^[54]认为转换作用发生在早、中侏罗世或中侏罗世;Li^[55]和毛建仁等^[56]则认为转换作用发生在 145 Ma 左右。因此尽管对于中国东部构造格局于中生代时期发生了重大调整已为目前学界所认同,但调整的确切时限和阶段性,仍有待深入探讨,该问题在华南地区尤其突出。

3.2 复杂的壳幔相互作用与大花岗岩省的形成

中国东部中生代的岩石圈大减薄事件在华北地区表现最为显著,华北东部古老岩石圈地幔自古生代以来发生了重大改造,造成了 >120 km 厚的岩石圈地幔的消失。这一重要事件自 20 世纪 90 年代以来即引起了国内外地学界的广泛关注,并开展了大量研究^[57-61],其机制或被认为是机械热侵蚀或置换作用所致^[62-63]、或与岩石圈拆沉^[64]抑或岩石圈去根^[60]有关。其岩石圈减薄可能始于 145 Ma,而快速减薄发生在 130~110 Ma^[65-68],与华北地区大范围的岩浆作用和大规模成矿作用集中在 130~110 Ma 的事实相吻合。不过,亦有研究者认为其岩石圈开始减薄发生在 100 Ma 左右^[69-70]。

自 20 世纪 90 年代以来,不少研究^[71-76]表明,中国东部华南大花岗岩省所在区域晚中生代以来也同样存在分区性的岩石圈减薄事件,但比华北更为复杂^[77]。与华北不同的是,中生代时期在华南自西向东由老变新发育了上千 km 宽的侏罗纪-白垩纪中酸性岩浆岩带,这些岩石的成因及其与壳幔相互作用的关系自 20 世纪 70 年代以来即有广泛研究,较早的研究认为它们的形成可能与太平洋板块的西向俯冲关系密切。但相较于其他汇聚板块边缘,由于华南中生代岩浆作用有着宽得多的活动范围,目前越来越多的研究者认为,除武夷山一线以东靠近华南大陆边缘的燕山期岩浆活动(K₁-K₂)具有陆缘弧岩浆性质,而可能与太平洋板块的西向俯冲有关^[53]外,华南内陆地区的燕山期岩浆活动可能受控于其他大陆动力学过程^[78]。近年对华南内陆燕山期花岗质岩石、富碱侵入岩带、玄武岩和基性脉岩、双峰式火山岩等的研究表明,中侏罗世以来华南花岗质岩石及其他岩石主要形成于大陆板块内部岩石圈伸展的构造背景,中侏罗世以来华南已发生大范围的岩石圈伸展作用并形成很具特色的盆岭系统^[53,55,71,78-86];Gilder 等^[71]、Chen 等^[79]和 Hong 等^[80]的研究表明,华南存在几条低 t_{DM} 和高 ϵ_{Nd} 花岗岩带,这种低 t_{DM} 和高 ϵ_{Nd} 带被认为是岩石圈伸展和壳幔之间强烈相互作用的证据。陆内岩石圈伸展-减薄造

成的减压熔融和玄武质岩浆底侵引起的复杂壳幔相互作用,可能是华南内陆燕山期大规模花岗质岩浆活动的主要机制^[53],这一动力学背景也响应于华南内部晚中生代一系列断陷盆地及星子、武功山、幕阜山等变质核杂岩的形成^[85-92]。Li^[55]总结了华南内陆燕山期花岗岩浆活动与岩石圈伸展的密切联系,并初步划分出164~153 Ma、146~136 Ma、129~122 Ma、109~101 Ma和97~87 Ma等5次岩石圈伸展期的花岗岩侵位事件。

通过对比可以看出,不像华北地区在130~110 Ma出现了一个快速岩石圈减薄的重大事件,多阶段的岩石圈伸展-减薄、玄武质岩浆底侵和大规模花岗质岩浆活动,可能是华南内陆地区侏罗纪以来标志性的大陆动力学事件。这些标志性大陆动力学事件的启动机制也是地学界学术争鸣最为激烈的内容之一。如有的研究者认为华南腹地导致燕山期大规模花岗质岩浆活动的伸展作用和玄武质岩浆底侵作用是地壳拆沉作用的结果^[48],亦有研究者归结为陆内伸展造山的结果^[53],也有研究者相信是陆内加厚地壳造山后垮塌所致^[49],还有研究者认为是太平洋俯冲板片断离的产物^[78]。可见,要确定这些“标志性的”大陆动力学事件及其相互关系还有更多工作要做,对华南大花岗岩省的形成过程和机制还亟待深入研究。

3.3 成矿大爆发

华南以中生代成矿大爆发著称于世。在该区针对矿产资源的大规模科学研究始于新中国成立后的第五个五年计划,尤其是对长江中下游宁芜地区与陆相火山岩有关的铁矿的研究,提出了具有重要影响的宁芜玢岩铁矿成矿模式;与此同时,从事钨矿地质勘查的地质工作者总结出了著名的赣南钨矿矿化蚀变五层楼模式;“六五”期间实施的国家科技攻关计划,对南岭地区的有色和稀有金属矿床进行了全面研究,提出并划分出了5个矿床成矿系列、6个矿床成矿亚系列和21个矿床成矿模式^[93]。常印佛等^[94]和翟裕生等^[95]对长江中下游地区铜铁矿床的长期深入研究,提出了两大成矿系列的概念。由于超大型矿床的巨大经济效益,20世纪80年代末至90年代初以来,超大型矿床的形成过程及其背景一直是重要的科学研究目标,涂光炽、赵振华(1992—2001)和裴荣富(1994—1998)领导的科研集体对华南超大型矿床进行了深入解剖,提出了超大型矿床与深部过程的耦合性、超大型矿床对矿床类型的选

择性和超大型矿床的时空偏在性等重要认识^[96-98]。我们完成的“973”项目“大规模成矿作用与大型矿床区预测”(1999—2004),对与华南花岗岩有关的成矿作用进行了总结^[99],并提出和论述了埃达克岩与斑岩铜矿的关系^[100]。华南陆块与花岗岩类有关的矿床主要包括W、Sn、Nb、Ta、Li、Be、Cu、Fe、Pb、Zn、Au、Ag和U等。华仁民等^[101]的研究指出,要想把如此丰富多彩的矿床非常恰当地归纳到几个界限分明的成矿子系统中几乎不太可能。但是,以下趋势或轮廓是基本明确的:(1)该区中生代成矿大爆发主要与当时广泛而强烈的花岗质岩浆活动有关^[102-103];(2)W、Sn、Nb、Ta、Li、Be和Cu、Fe、Pb、Zn、Au、Ag大致分别与传统意义上的S型花岗岩和I型花岗岩相联系^[101,104-107];(3)成矿作用可能是分期进行的,毛景文等^[108]通过对该区已有成矿年龄数据的综合研究,初步提出了170~150 Ma、140~125 Ma和110~80 Ma三次爆发式成矿作用;(4)这些矿床矿岩时差很小,尽管成矿过程中不可避免有大气降水的参与,但成矿流体与花岗岩浆的分异作用都具有不同程度的关系^[99,104-105,109-118]。

综上所述,华南陆块东部大花岗岩省所在区域,由于中生代构造体制的重大变革、强烈的壳幔相互作用、大范围的花岗岩浆活动和大规模的爆发式成矿作用,奠定了全球背景中该区作为理解陆内动力学过程与多金属成矿关系不可多得的天然实验室的重要地位。以往的研究虽然取得了上述重要进展,但还有较多重要科学问题有待解决,如:(1)华南陆块东部晚中生代以来伸展背景下形成的“盆岭系统”这种独具特色的地质构造现象及其动力学机制,还是地学界学术争鸣最为激烈的问题之一,这直接影响了对与其有关的华南大花岗岩省形成过程和机制的正确认识;(2)反映该区中生代构造体制重大变革、岩石圈伸展减薄及其壳幔相互作用、大花岗岩省形成和成矿大爆发的精确年代学数据还较缺乏,从而还未能很好地揭示这些事件的精确时限、阶段性和相互之间的关联性;(3)大花岗岩省内中生代的大规模成矿具有明显的分区特点,南岭地区主要是钨、锡、铀、稀土、铌、钽、铍、铅、铜和钼的大规模成矿,长江中下游地区主要是铜、铁、金、钨的大规模成矿,控制这种分区的地球化学和深部动力学条件究竟有什么重大差异目前知道的不多;(4)华南陆块亦深受印支运动的影响,形成了较大规模的强过铝质-准铝质花岗岩浆活动,但华南陆块内部的大爆发成矿

只发生在中晚中生代的燕山期,而早中生代的印支期则少有重要矿床的形成,这种巨大差异反映着什么重要信息?(5)不同的壳幔相互作用过程控制着不同类型的花岗岩浆活动,不同类型的花岗岩浆活动则控制了不同类型的成矿作用。但是,对在壳幔相互作用-花岗岩浆活动-成矿作用整个演化过程中,导致成矿元素超常富集大爆发成矿的各种耦合机制尚缺乏完整的理解。对这些问题的解决必将导致对华南大花岗岩省形成演化和成矿作用认识的重大突破。

此文在国家重点基础研究发展计划“973”项目“华南陆块陆内成矿作用:背景与过程”立项报告的基础上补充修改而成。涂光炽先生生前对该项目的立项给予了悉心指导和大力帮助。在纪念涂先生诞辰90周年之际,作者特献上此文,以表达对先生的崇高敬意和无比怀念。

陈毓川院士、李廷栋院士、翟裕生院士、裴荣富院士、周美夫教授、李献华研究员、朱祥坤研究员和王学求研究员对本文初稿的进一步完善曾提出许多宝贵建议,作者表示衷心感谢。

References

- [1] Hu R Z, Mao J W, Bi X W, et al. Several developing directions of relationship between continental geodynamics and mineralization[J]. *Geochimica*, 2008, 37 (4): 344-352 (in Chinese).
- [2] Xu Y G, Chung S L, Jahn B M, et al. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in Southwestern China[J]. *Lithos*, 2001, 58: 145-168.
- [3] Song X Y, Zhou M F, Hou Z Q, et al. Geochemical constraints on the mantle source of the Upper Permian Emeishan continental flood basalts, Southwestern China[J]. *International Geology Review*, 2001, 43: 213-225.
- [4] He B, Xu Y G, Chung S L. Sedimentary evidence for a rapid crustal doming prior to the eruption of the Emeishan flood basalts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 213: 389-405.
- [5] Zhang Z C, Wang F S, Hao Y L, et al. Geochemistry of the picrites and associated basalts from the Emeishan large Igneous basalt province and constraints on their source region[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78: 171-180 (in Chinese).
- [6] Zhang Z C, Mahoney J J, Mao J W, et al. Geochemistry of picritic and associated basalt flows of the Western Emeishan flood basalt province, China[J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47: 1997-2019.
- [7] Zhou M F, Malpas J, Song X Y, et al. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 196: 113-122.
- [8] Zhou M F, Robinson P T, Leshner C M, et al. Geochemistry, petrogenesis and metallogenesis of the Panzhihua gabbroic layered intrusion and associated Fe-Ti-V oxide deposits, Sichuan Province, SW China[J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46: 2253-2280.
- [9] Zhou M F, Zhao J H, Qi L, et al. Zircon U-Pb geochronology and elemental and Sr-Nd isotopic geochemistry of Permian mafic rocks in the Funing area, SW China[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, 151: 1-19.
- [10] Guo F, Fan W M, Wang Y J, et al. When did the Emeishan mantle plume activity start? Geochronological and geochemical evidence from ultramafic-mafic dikes in Southwestern China[J]. *International Geology Review*, 2004, 46: 226-234.
- [11] Zhong H, Zhu W G. Geochronology of layered mafic intrusions from the Pan-Xi area in the Emeishan large igneous province, SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 2006, 41: 599-606.
- [12] Zhong H, Zhu W G, Chu Z Y, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology, geochemistry, and Nd-Sr isotopic study of contrasting granites in the Emeishan large igneous province, SW China[J]. *Chemical Geology*, 2007, 236: 112-133.
- [13] Xiao L, Xu Y G, Mei H J, et al. Distinct mantle sources of low-Ti and high-Ti basalts from the western Emeishan large igneous province, SW China: Implications for plume-lithosphere interaction[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 228: 525-546.
- [14] Zhong H, Zhou X H, Zhou M F, et al. Platinum-group element geochemistry of the Hongge Fe-V-Ti deposit in the Pan-Xi area, Southwestern China [J]. *Mineralium Deposita*, 2002, 37: 226-239.
- [15] Zhong H, Yao Y, Prevec S A, et al. Trace-element and Sr-Nd isotopic geochemistry of the PGE-bearing Xinjie layered intrusion in SW China[J]. *Chemical Geology*, 2004, 203: 237-252.
- [16] Lightfoot P C, Hawkesworth C J. Flood basalts and magmatic Ni, Cu, and PGE sulfide mineralization: Comparative geochemistry of the Noril'sk (Siberian traps) and West Greenland sequences[M]// Mahoney J, Coffin M F. Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism. Washington DC: AGU Geophysical Monograph, 1997, 100: 357-380.
- [17] Ernst R E, Buchan K L. Recognizing mantle plume in the ge-

- ological record[J]. Annual Review of Earth and Planetary Science, 2003, 31: 469-523.
- [18] Ripley E M. Platinum-group element geochemistry of Cu-Ni mineralization in the Basal Zone of the Babbitt deposit, Duluth Complex, Minnesota[J]. Economic Geology, 1990, 85: 830-841.
- [19] Irvine T N. Crystallization sequences in the Muskox intrusion and other layered intrusions; II. Origin of chromitite layers and similar deposits of other magmatic ores[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1975, 39: 991-1020.
- [20] Nielsen T F D, Brooks C K. Precious metals in magmas of East Greenland; Factors important to the mineralization in the Skaergaard intrusion[J]. Economic Geology, 1995, 90: 1911-1917.
- [21] Naldrett A J. World-class Ni-Cu-(PGE) deposits: Key factors in their genesis[J]. Mineralium Deposita, 1999, 34: 227-240.
- [22] Luo Z L, Liu S, Liu S G, et al. The action of "Emei mantle plume" on the separation of the Yangtze plate from the Tarim plate and its significance in exploration[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2004, 25: 515-522(in Chinese).
- [23] Xia L Q, Xia Z C, Xu X Y, et al. Carboniferous Tianshan igneous megaprovince and mantle plume[J]. Regional Geology of China, 2004, 23: 903-910(in Chinese).
- [24] Zhou M F, Leshner C M, Yang Z X, et al. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan District, Eastern Xinjiang, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt[J]. Chemical Geology, 2004, 209: 233-257.
- [25] Mao J W, Pirajno F, Zhang Z H, et al. Late variscan post-collisional Cu-Ni sulfide deposits in East Tianshan and Altay in China: Principal characteristics and possible relationship with mantle plume[J]. Acta Geological Sinica, 2006, 80: 925-942(in Chinese).
- [26] Hu R Z, Tao Y, Zhong H, et al. Mineralization systems of a mantle plume: A case study from the Emeishan igneous province, Southwest China[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12 (1): 42-54(in Chinese).
- [27] Song X Y, Zhang C J, Hu R Z, et al. Genetic links of magmatic deposits in the Emeishan large igneous province with dynamics of mantle plume[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2005, 25(4): 35-44(in Chinese).
- [28] Song X Y, Zhou M F, Cao Z M. Ni-Cu-(PGE) magmatic sulfide deposits in the Yangliuping area, Permian Emeishan igneous province, SW China[J]. Mineralium Deposita, 2003, 38: 831-843.
- [29] Song X Y, Zhou M F, Wang C Y, et al. Role of crustal contamination in formation of the Jinchuan intrusion and its world-class Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, Northwest China[J]. International Geology Review, 2006, 48 (12): 1113-1132.
- [30] Song X Y, Zhou M F, Keays R R, et al. Geochemistry of the Emeishan flood basalts at Yangliuping, Sichuan, SW China: Implications for sulfide segregation[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2006, 152(1): 53-74.
- [31] Wang C Y, Zhou M F. Genesis of the Permian Baimazhai magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, Yunnan, SW China[J]. Mineralium Deposita, 2006, 41: 771-783.
- [32] Tao Y, Li C S, Hu R Z, et al. Petrogenesis of the Pt-Pd mineralized Jinbaoshan ultramafic intrusion in the Permian Emeishan large igneous province, SW China[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2007, 153: 321-337.
- [33] Tu G C. Low-Temperature Geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1998(in Chinese).
- [34] Zhu L M, Hu R Z. Au-Sb association and fractionation in micro-disseminated gold deposits, Southwestern Guizhou: Geochemistry and thermodynamics[J]. Science in China: Series D, 1999, 29(6): 481-488(in Chinese).
- [35] Wang G Z, Hu R Z, Su W C, et al. Fluid flow and mineralization of Youjiang Basin in the Yunnan-Guizhou-Guangxi area, China[J]. Science in China: Series D, 2002, 32(Suppl): 78-86(in Chinese).
- [36] Hu R Z, Ma D S, Peng J T, et al. Large area low-temperature mineralization in the southwest margin of Yangtze block [M]//Mao J W, Hu R Z, Chen Y C, et al. Large-Scale Mineralization and Large Ore-Concentrated Areas. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 597-683(in Chinese).
- [37] Hu R Z, Peng J T, Ma D S, et al. Epoch of large-scale low-temperature mineralizations in Southwestern Yangtze massif [J]. Mineral Deposits, 2007, 26: 583-596(in Chinese).
- [38] Zhu L M, Hu R Z. Au-Sb association and fractionation in micro-disseminated gold deposits, Southwestern Guizhou: Geochemistry and thermodynamics[J]. Science in China: Series D, 2000, 43: 208-216.
- [39] Hu R Z, Su W C, Bi X W, et al. Geology and geochemistry of Carlin-type gold deposits in China[J]. Mineralium Deposita, 2002, 37: 378-392.
- [40] Wang G Z, Hu R Z, Su W C, et al. Fluid flow and mineralization of Youjiang Basin in the Yunnan-Guizhou-Guangxi area, China[J]. Science in China: Series D, 2003, 46(Suppl): 99-109.
- [41] Peng J T, Hu R Z, Burnard P G. Samarium-neodymium isotope systematics of hydrothermal calcites from the Xikuangsh-

- han antimony deposit (Hunan, China): The potential of calcite as a geochronometer[J]. *Chemical Geology*, 2003, 200 (1/2): 129-136.
- [42] Su W C, Hu R Z, Xia B, et al. Calcite Sm-Nd isochron age of the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China [J]. *Chemical Geology*, 2009, 258: 269-274.
- [43] Su W C, Heinrich C A, Pettke T, et al. Sediment-hosted gold deposits in Guizhou, China: Products of wall-rock sulfidation by deep crustal fluids[J]. *Economic Geology*, 2009, 104: 73-93.
- [44] Hofstra A H, Snee L W, Rye R O, et al. Age constraints on Jerritt Canyon and other Carlin-type gold deposits in the Western United States: Relationship to mid-tertiary extension and magmatism[J]. *Economic Geology*, 1999, 94: 769-802.
- [45] Zhang G W, Zhang B R, Yuan X C. Atlas of Orogenic Processes and Three-Dimension Lithosphere Framework of Qinling Orogenic Belt[M]. Beijing: Science Press, 1996 (in Chinese).
- [46] Ren J S, Wang Z X, Chen B W, et al. The Continental Tectonics of China in Global Scale: A Brief Description for the Tectonic Map of China and Adjacent Areas[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999 (in Chinese).
- [47] Chen A. Mirror-image thrusting in the South China orogenic belt: Tectonic evidence from western Fujian, Southeastern China[J]. *Tectonophysics*, 2001, 305: 497-519.
- [48] Wang Y J, Zhang Y H, Fan W M, et al. Structural signatures and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Indosinian Xuefengshan transpressive belt, South China Interior[J]. *Journal of Structural Geology*, 2005, 27: 985-998.
- [49] Wang Y J, Fan W M, Sun M, et al. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block: A case study in the Hunan Province[J]. *Lithos*, 2007, 96: 475-502.
- [50] Ren J S, Niu B G, He Z J, et al. Tectonic framework and geodynamic evolution of Eastern China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1997, 29/30: 43-55 (in Chinese).
- [51] Niu B G, He Z J, Ren J S, et al. SHRIMP age of Zhangjiakou group and Yixian group in Hebei[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78: 751-751 (in Chinese).
- [52] Zhai M G, Meng Q R, Liu J M, et al. Geological features of Mesozoic tectonic regime inversion in Eastern North China and implication for geodynamics[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(3): 285-297 (in Chinese).
- [53] Zhou X M, Sun T, Shen W Z. Spatial-temporal distribution and genetical model of Mesozoic granites-volcanic rocks in South China[M]// *Research Progress in Geology and Geochemistry*. Nanjing: Nanjing University Press, 2006: 25-40 (in Chinese).
- [54] Yu X Q, Wu G G, Zhang D, et al. Progress in the study of Mesozoic tectonic transformation in Southeastern China[J]. *Progress in Nature Science*, 2005, 15(10): 1167-1174 (in Chinese).
- [55] Li X H. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18: 293-305.
- [56] Mao J R, Tao K Y, Yang Z L, et al. Geodynamic background of the mesozoic intracontinental magmatism in Southeast China[J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 1997, 18 (2): 95-104 (in Chinese).
- [57] Fan W M, Menzies M A. Destruction of aged lower lithosphere and accretion of asthenosphere mantle beneath Eastern China[J]. *Geotectonic et Metallogenia*, 1992, 16(3/4): 171-180.
- [58] Menzies M A, Fan W M, Zhang M. Paleozoic and Cenozoic lithosphere and loss of <120 km of Achaean lithosphere, Sino-Korean craton, China[M]// Prichard H M, Alabaster T, Harris N B W, et al. *Magmatic Processes and Plate Tectonics*. Geological Society Special Publication, 1992, 76: 71-81.
- [59] Zhang H F, Sun M, Zhou X H, et al. Mesozoic lithospheric destruction beneath the North China Craton: Evidence from major-, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 144: 241-253.
- [60] Deng J F, Zhai H L, Mo X X, et al. Continental Roots-Plume Tectonics: Key to the Continental Dynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996 (in Chinese).
- [61] Lu F X, Zheng J P, Shao J A, et al. Asthenospheric upwelling and lithospheric thinning in Late Cretaceous-Cenozoic in eastern North China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(2): 86-92 (in Chinese).
- [62] Xu Y G. Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, timing and mechanism[J]. *Physics and Chemistry of the Earth (A)*, 2001, 26: 747-758.
- [63] Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. Relict refractory mantle beneath the eastern North China Block: Significance for lithospheric evolution[J]. *Lithos*, 2001, 57: 43-66.
- [64] Gao S, Luo T C, Zhang B R, et al. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62: 1959-1975.
- [65] Mao J W, Zhang Z H, Yu J J, et al. Geodynamic settings of Mesozoic large-scale mineralization in North China and adjacent areas: Implication from the highly precise and accurate a-

- ges of metal deposits[J]. Science in China: Series D, 2003, 33(4): 289-300(in Chinese).
- [66] Wu F Y, Sun D Y. The Mesozoic magmatism and lithospheric thinning in Eastern China[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 1999, 29(4): 313-318(in Chinese).
- [67] Wu F Y, Sun D Y, Zhang G L, et al. Deep geodynamics of Yanshan movement[J]. Geological Journal of China Universities, 2000, 6: 379-388(in Chinese).
- [68] Wu F Y, Ge W C, Sun D Y, et al. Discussion on the lithospheric thinning in Eastern China[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(3): 51-60(in Chinese).
- [69] Shao J A, Li Z T, Zhang L Q. Symmetric spatiotemporal distribution of the Meso-Cenozoic volcanic rocks in West Liaoning and environs and its implications[J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(1): 98-106(in Chinese).
- [70] Lu F X, Zheng J P, Zhang R S, et al. Phanerozoic mantle secular evolution beneath the eastern North China Craton[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(1): 61-67(in Chinese).
- [71] Gilder S A, Gill J, Coe R S, et al. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of South China[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1996, 101(B7): 16137-16154.
- [72] Chung S L, Cheng H, Jahn B M, et al. Major and trace element, and Sr-Nd isotope constraints on the origin of Paleocene volcanism in South China prior to the South China Sea opening[J]. Lithos, 1997, 40: 203-220.
- [73] Xu X S, Oreilly S Y, Griffin W L, et al. Genesis of young lithospheric mantle in Southeastern China: An LAM-ICP-MS trace element study[J]. Journal of Petrology, 2000, 41: 111-148.
- [74] Zou H P. Continental marginal rifting along the northern South China Sea: The crust response to the lower lithospheric delamination[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(1): 39-44(in Chinese).
- [75] Sun T, Zhou X M. Late Mesozoic extension in Southeast China: Petrologic symbols[J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences, 2002, 38(6): 737-746(in Chinese).
- [76] Jia D C, Hu R Z, Zhao J H, et al. Lithochemical characteristics of the Mesozoic granitic intrusion from the Wangxiang area in Northeastern Hunan Province and its tectonic setting[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(1): 98-103(in Chinese).
- [77] Li T D. Lithospheric tectonic units of China[J]. Geology in China, 2006, 33(4): 700-710(in Chinese).
- [78] Li Z X, Li X H. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China[J]. Geology, 2007, 35(2): 179-182.
- [79] Chen J F, Jahn B M. Crustal evolution of Southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence[J]. Tectonophysics, 1998, 284(1/2): 101-133.
- [80] Hong D W, Xie X L, Zhang J S. Isotope geochemistry of granitoids in South China and their metallogeny[J]. Resource Geology, 1998, 48: 251-263.
- [81] Hu R Z, Bi X W, Zhou M F, et al. Uranium metallogenesis in South China and its relationship to crustal extension during the Cretaceous to Tertiary[J]. Economic Geology, 2008, 103: 583-598.
- [82] Hu R Z, Burnard P G, Bi X W, et al. Mantle-derived gaseous components in ore-forming fluids of the Xiangshan uranium deposit, Jiangxi Province, China: Evidence from He, Ar and C isotopes[J]. Chemical Geology, 2009, 266: 86-95.
- [83] Li X H, Hu R Z, Rao B. Geochronology and geochemistry of Cretaceous mafic dikes from Northern Guangdong, SE China [J]. Geochemica, 1997, 26(2): 14-31(in Chinese).
- [84] Fan W M, Wang Y J, Guo F, et al. Mesozoic mafic magmatism in Hunan-Jiangxi provinces and the lithospheric extension[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(3): 159-179 (in Chinese).
- [85] Hu R Z, Bi X W, Su W C, et al. The relationship between uranium metallogenesis and crustal extension during the Cretaceous-Tertiary in South China[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(1): 153-160(in Chinese).
- [86] Hu R Z, Bi X W, Peng J T, et al. Some problems concerning relationship between Mesozoic-Cenozoic lithospheric extension and uranium metallogenesis in South China[J]. Mineral Deposits, 2007, 26(2): 139-152(in Chinese).
- [87] Faure M, Sun Y, Shu L, et al. Extensional tectonics within a subduction-type orogen, the case study of the Wugongshan dome (Jiangxi Province, southeastern China)[J]. Tectonophysics, 1996, 263: 77-106.
- [88] Faure M, Lin W, Sun Y. Doming in the southern foreland of the Dabieshan (Yangtse block, China) [J]. Terra Nova, 1998, 10: 307-311.
- [89] Shu L S, Sun Y, Wang D Z, et al. Mesozoic doming extensional tectonics of Wugongshan, South China[J]. Science in China: Series D, 1998, 28(5): 431-438(in Chinese).
- [90] Li W X, Zhou X M, Li X H, et al. Zircon U-Pb dating of pegmatite from Xingzi Metamorphic core complex of Lushan Mountain and its geological implication[J]. Earth Science, 2001, 26: 491-495(in Chinese).
- [91] Lin W, Faure M, Monie P, et al. Tectonics of SE China: New insights from the Lushan massif (Jiangxi Province)[J]. Tectonics, 2000, 19(5): 852-871.

- [92] Wang D Z, Shu L S, Faure M, et al. Mesozoic magmatism and granitic dome in the Wugongshan Massif, Jiangxi Province and their genetical relationship to the tectonic events in Southeast China[J]. *Tectonophysics*, 2001, 339: 259-277
- [93] Chen Y C, Pei R F, Zhang H L, et al. The Geology of Non-ferrous and Rare Metal Deposits Related to Mesozoic Granitoids in Nanling Region[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989(in Chinese).
- [94] Chang Y F, Liu X P, Wu Y C. The Copper-Iron Belt of the Middle and Lower Reaches of the Changjiang River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991(in Chinese).
- [95] Zhai Y S, Yao S Z, Lin X D, et al. Ore-Forming Regularity of Iron and Copper Mineral Deposits in Middle and Lower Reaches of Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992(in Chinese).
- [96] Pei R F, Wu L S, Xiong Q Y, et al. Metallogenic Bias and Abnormal Metallo-tectonic Convergent Field of Super-large Deposits in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998(in Chinese).
- [97] Tu G C. Superlarge Ore Deposits in China(I)[M]. Beijing: Science Press, 2000(in Chinese).
- [98] Zhao Z H, Tu G C. Superlarge Ore Deposits in China(II) [M]. Beijing: Science Press, 2003(in Chinese).
- [99] Hua R M, Chen P R, Zhang W L, et al. Metallogenesis and their geodynamic settings related to Mesozoic granitoids in the Nanling range[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2005, 11(3): 291-304(in Chinese).
- [100] Zhang Q, Wang Y, Qian Q, et al. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from Eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(2): 236-244(in Chinese).
- [101] Hua R M, Chen P R, Zhang W L, et al. Metallogenic systems related to Mesozoic and Cenozoic granitoids in South China[J]. *Science in China; Series D*, 2003, 33(4): 335-343 (in Chinese).
- [102] Mao J W, Hua R M, Li X B. A preliminary study of large-scale metallogenesis and large clusters of mineral deposits [J]. 1999, 18(4): 291-299(in Chinese).
- [103] Hua R M, Mao J W. A preliminary discussion on the Mesozoic metallogenic explosion in East China[J]. *Mineral Deposits*, 1999, 18(4): 300-307(in Chinese).
- [104] Institute of Geochemistry, CAS. *Geochemistry of the Granitoids in South China*[M]. Beijing: Science Press, 1979(in Chinese).
- [105] Department of Geology, Nanjing University. *Granitoids of Various Ages and Their Metallogenetic Relations in South China*[M]. Beijing: Science Press, 1981(in Chinese).
- [106] Mo Z S, Ye B D. *Geology of Granites from Nanling Range* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1980(in Chinese).
- [107] Ye Y, Shimazaki H, Shimizu M, et al. Tectono-magmatic evolution and metallogenesis along the Northeast Jiangxi deep fault, China[J]. *Resource Geology*, 1998, 48(1): 43-50.
- [108] Mao J W, Xie G Q, Li X F, et al. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(1): 45-55(in Chinese).
- [109] Mckee E H, Rytuba J J, Xu K. Geochronology of the Xihuashan composite granitic body and tungsten mineralization, Jiangxi Province, South China[J]. *Economic Geology*, 1987, 82: 218-223.
- [110] Giuliani G, Li D Y, Sheng T F. Fluid inclusion study of Xihuashan tungsten deposit in the Southern Jiangxi Province, China[J]. *Mineralium Deposita*, 1988, 23: 24-33.
- [111] Liu C S, Ling H F, Xiong X L, et al. An F-rich, Sn-bearing volcanic-intrusive complex in Yanbei, South China[J]. *Economic Geology*, 1999, 94(3): 325-342.
- [112] Bi X W, Li H L, Shuang Y, et al. Geochemical characteristics of fluid inclusions from Qitianling A-type Granite, Hunan Province, China: Tracing the source of ore forming fluid of the Furong superlarge Tin deposit[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2008, 14: 539-548(in Chinese).
- [113] Pan Y M, Dong P. The lower Changjiang (Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, East Central China: Intrusion- and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 1999, 15(4): 177-241.
- [114] Yin J W, Kim S J, Lee H K, et al. K-Ar ages of plutonism and mineralization at the Shizhuyuan W-Sn-Bi-Mo deposit, Hunan Province, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 20: 151-155.
- [115] Zhang W H, Zhang D H, Liu M. Study on ore-forming fluids and the ore-forming mechanisms of the Yinshan Cu-Pb-Zn-Au-Ag deposits, Jiangxi Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 19(2): 242-250.
- [116] Li Z L, Hu R Z, Yang J S, et al. He, Pb and S isotopic constraints on the relationship between the A-type Qitianling granite and the Furong tin deposit, Hunan Province, China[J]. *Lithos*, 2007, 97: 161-173.
- [117] Lu H Z, Liu Y M, Wang C L, et al. Mineralization and fluid inclusion study of the Shizhuyuan W-Sn-Bi-Mo-F skarn deposit, Hunan Province, China[J]. *Economic Geology*, 2003, 98: 955-974.
- [118] Peng J T, Zhou M F, Hu R Z, et al. Precise molybdenite

Re-Os and mica Ar-Ar dating of the Mesozoic Yaogangxian tungsten deposit, Central Nanling District, South China[J]. Mineralium Deposita, 2006, 41: 661-669.

参考文献

- [1] 胡瑞忠,毛景文,毕献武,等. 浅谈大陆动力学与成矿关系研究的若干发展趋势[J]. 地球化学, 2008, 37(4): 344-352.
- [5] 张招崇,王福生,郝艳丽,等. 峨眉山大火成岩省中苦橄岩与其共生岩石的地球化学特征及其对源区的约束[J]. 地质学报, 2004, 78: 171-180.
- [22] 罗志立,刘顺,刘树根,等. “峨眉山地幔柱”对扬子板块和塔里木板块离散的作用及其找矿意义[J]. 地球学报, 2004, 25: 515-522.
- [23] 夏林圻,夏祖春,徐学义,等. 天山石炭纪大火成岩省与地幔柱[J]. 地质通报, 2004, 23: 903-910.
- [25] 毛景文, Pirajno F, 张作衡, 等. 天山—阿尔泰东部地区海西晚期后碰撞铜镍硫化物矿床: 主要特点及可能与地幔柱的关系[J]. 地质学报, 2006, 80: 925-942.
- [26] 胡瑞忠,陶琰,钟宏,等. 地幔柱成矿系统: 以峨眉山地幔柱为例[J]. 地学前缘, 2005, 12(1): 42-54.
- [27] 宋谢炎,张成江,胡瑞忠,等. 峨眉山成岩省岩浆矿床成矿作用与地幔柱动力学过程的耦合关系[J]. 矿物岩石, 2005, 25(4): 35-44.
- [33] 涂光炽. 低温地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [34] 朱赖民,胡瑞忠. 黔西南微细浸染型金矿床中金和锑共生分异现象及其热力学分析[J]. 中国科学: D辑, 1999, 29(6): 481-488.
- [35] 王国芝,胡瑞忠,苏文超,等. 滇-黔-桂地区右江盆地流体流动与成矿作用[J]. 中国科学: D辑, 2002, 32(增刊): 78-86.
- [36] 胡瑞忠,马东升,彭建堂,等. 扬子地块西南缘大面积低温成矿作用[M]//毛景文,胡瑞忠,陈毓川,等. 大规模成矿作用与大型矿集区. 北京: 地质出版社, 2006: 597-683.
- [37] 胡瑞忠,彭建堂,马东升,等. 扬子地块西南缘大面积低温成矿时代[J]. 矿床地质, 2007, 26: 583-596.
- [45] 张国伟,张本仁,袁学诚. 秦岭造山带造山过程与岩石圈三维结构图丛[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [46] 任纪舜,王作勋,陈炳蔚,等. 从全球构造看中国大地构造: 中国及邻区大地构造图简要说明[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [50] 任纪舜,牛宝贵,和政军,等. 中国东部的构造格局和动力演化[J]. 地学研究, 1997, 29/30: 43-55.
- [51] 牛宝贵,和政军,任纪舜,等. 冀北张家口组、义县组火山岩 SHRIMP 定年[J]. 地质学报, 2004, 78: 751-751.
- [52] 翟明国,孟庆任,刘建明,等. 华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 285-297.
- [53] 周新民,孙涛,沈渭洲. 华南中生代花岗岩-火山岩时空格局与成因模式[M]//地质与地球化学研究进展. 南京: 南京大学出版社, 2006: 25-40.
- [54] 余心起,吴淦国,张达,等. 中国东南部中生代构造体制转换作用研究进展[J]. 自然科学进展, 2005, 15(10): 1167-1174.
- [56] 毛建仁,陶奎元,杨祝良,等. 中国东南部中生代陆内岩浆作用的动力学背景[J]. 火山地质与矿产, 1997, 18(2): 95-104.
- [60] 邓晋福,赵海玲,莫宣学,等. 中国大陆根-柱构造: 大陆动力学的钥匙[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [61] 路凤香,郑建平,邵济安,等. 华北东部中生代晚期—新生代软流圈上涌与岩石圈减薄[J]. 地学前缘, 2006, 13(2): 86-92.
- [65] 毛景文,张作衡,余金杰,等. 华北中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄的精确测定得到启示[J]. 中国科学: D辑, 2003, 33(4): 289-300.
- [66] 吴福元,孙德有. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄[J]. 长春科技大学学报, 1999, 29(4): 313-318.
- [67] 吴福元,孙德有,张广良,等. 论燕山运动的深部地球动力学本质[J]. 高校地质学报, 2000, 6: 379-388.
- [68] 吴福元,葛文春,孙德有,等. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 51-60.
- [69] 邵济安,李之彤,张履桥. 辽西及邻区中—新生代火山岩的时空对称分布及其启示[J]. 地质科学, 2004, 39(1): 98-106.
- [70] 路凤香,郑建平,张瑞生,等. 华北克拉通东部显生宙地幔演化[J]. 地学前缘, 2005, 12(1): 61-67.
- [74] 邹和平. 南海北部陆缘张裂-岩石圈拆沉的地壳响应[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(1): 39-44.
- [75] 孙涛,周新民. 中国东南部晚中生代伸展应力体制的岩石学标志[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2002, 38(6): 737-746.
- [76] 贾大成,胡瑞忠,赵军红,等. 湘东北中生代望湘花岗岩体岩石地球化学特征及其构造环境[J]. 地质学报, 2003, 77(1): 98-103.
- [77] 李廷栋. 中国岩石圈构造单元[J]. 中国地质, 2006, 33(4): 700-710.
- [83] 李献华,胡瑞忠,饶冰. 粤北白垩纪基性脉岩的年代学和地球化学[J]. 地球化学, 1997, 26(2): 14-31.
- [84] 范蔚茗,王岳军,郭锋,等. 湘赣地区中生代镁铁质岩浆作用与岩石圈伸展[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 159-179.
- [85] 胡瑞忠,毕献武,苏文超,等. 华南白垩—第三纪地壳拉张与铀成矿的关系[J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 153-160.
- [86] 胡瑞忠,毕献武,彭建堂,等. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与铀成矿关系研究的若干问题[J]. 矿床地质, 2007, 26(2): 139-152.

- [89] 舒良树,孙岩,王德滋,等. 华南武功山中生代伸展构造[J]. 中国科学: D辑, 1998, 28(5): 431-438.
- [90] 李武显,周新民,李献华,等. 庐山星子变质核杂岩中伟晶岩年龄及其地质意义[J]. 地球科学, 2001, 26: 491-495.
- [93] 陈毓川,裴荣富,张宏良,等. 南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色及稀有金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社, 1989.
- [94] 常印佛,刘湘培,吴迎昌. 长江中下游铜铁矿成矿带[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [95] 翟裕生,姚书振,林新多,等. 长江中下游铁铜(金)成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- [96] 裴荣富,吴良士,熊群尧,等. 中国特大型矿床成矿偏在性与异常成矿构造聚敛场[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [97] 涂光炽. 中国超大型矿床(I)[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [98] 赵振华,涂光炽. 中国超大型矿床(II)[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [99] 华仁民,陈培荣,张文兰,等. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景[J]. 高校地质学报, 2005, 11(3): 291-304.
- [100] 张旗,王焰,钱青,等. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. 岩石学报, 2001, 17(2): 236-244.
- [101] 华仁民,陈培荣,张文兰,等. 华南中、新生代与花岗岩类有关的成矿系统[J]. 中国科学: D辑, 2003, 33(4): 335-343.
- [102] 毛景文,华仁民,李晓波. 浅议大规模成矿作用与大型矿集区[J]. 矿床地质, 1999, 18(4): 291-299.
- [103] 华仁民,毛景文. 试论中国东部中生代成矿大爆发[J]. 矿床地质, 1999, 18(4): 300-307.
- [104] 中国科学院地球化学研究所. 华南花岗岩类地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [105] 南京大学地质系. 华南不同时代花岗岩类及其与成矿关系[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [106] 莫柱荪,叶伯丹. 南岭花岗岩地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1980.
- [108] 毛景文,谢桂青,李晓峰,等. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 45-55.
- [112] 毕献武,李鸿莉,双燕,等. 骑田岭 A 型花岗岩流体包裹体地球化学特征: 对芙蓉超大型锡矿成矿流体来源的指示[J]. 高校地质学报, 2008, 14: 539-548.

投稿预告

欢迎主题专辑投稿 也欢迎非主题投稿

《地学前缘》为双月主题性期刊,欢迎按专辑主题投稿,也欢迎非主题投稿,因本刊设有“非主题来稿选登”。

(1)2010 年第 3,4 期“地球结构、构造与动力学”主题:

具体专辑名为“大陆构造与动力学”。

(2)2010 年第 5,6 期“地球表层科学”主题:

具体专辑名为“地震及相关研究”,“水资源与环境”。

(3)2011 年第 1,2 期“地球物质科学”主题:

具体专辑名为“花岗岩成因”,“变质作用与造山带演化”。

(4)2011 年第 3,4 期“地球结构、构造与动力学”主题:

具体专辑名为“大陆地质与大陆构造”。

(5)2011 年第 5 期专辑名为“中国土壤碳库与全球变化”。

第 6 期专辑名为“成矿流体动力学”。

(6)2012 年第 1,2 期专辑名为“油气沉积地质”。