

湘南燕山期区域三叉断裂构造型式及成矿作用

全铁军^{1,2}, 奚小双¹, 孔 华¹, 吴甄虹¹, 陈泽锋¹

- (1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 湖南有色金属地质勘探局, 长沙 410007)

摘 要: 在对湘南中生代区域成矿构造进行研究的过程中发现了热柱三叉断裂构造, 认为这种构造是燕山早期地幔对流活动在岩石圈形成的一种构造型式。其主要证据包括: 湘南有色金属矿床呈3个不同方向的线状分布; 其交汇中心与湘南穹窿构造中心吻合; 构造系统中矿床和成矿岩体具有同时性。已有花岗岩和火山岩的地质、地球化学研究表明, 燕山期华南深部存在地幔活动, 这为湘南发育热柱三叉断裂构造提供了深部构造背景支持。三叉断裂构造型式的发现和认识为湘南成矿作用和成矿规律研究提供了新的构造模型。

关键词: 三叉断裂; 地幔柱; 华南地区; 花岗岩; 成矿作用

中图分类号: P611.2; TD11

文献标志码: A

Yanshanian triple junction tectonic pattern and metallogenesis in southern Hunan, China

QUAN Tie-jun^{1,2}, XI Xiao-shuang¹, KONG Hua¹, WU Qian-hong¹, CHEN Ze-feng¹

- (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Hunan Nonferrous Metal Geo-exploration Bureau, Changsha 410007, China)

Abstract: The mesozoic metallogenesis and tectonics in southern Hunan, China, were studied, and a triple junction was found. It is a tectonic pattern in lithosphere and its forming mechanism may be attributed to mantle convection in early Yanshanian. The main evidences for triple junction are shown as follows: the nonferrous metal deposits in southern Hunan distribute in line style in three directions; convergence center of distribution lines of nonferrous metal deposits coincide with the centre of southern Hunan dome; these deposits and their hosting granites in the triple junction system are isochronic. Geological and geochemical studies on the granite and volcanics indicate that there exist mantle activities in deep crust of southern China, which is a deep tectonic background support to the triple junction developed in southern Hunan. The finding and viewpoint of triple junction tectonic pattern in southern Hunan bring out a new tectonic model to discuss metallogenesis and its rules in this area.

Key words: triple junction; mantle plume; southern China; granite; metallogenesis

湘南是我国著名的有色金属集中成矿区域, 长期以来一直是成矿地质研究的重点地区, 研究成果十分丰富。但是关于湘南区域成矿构造特征的研究却是一个薄弱环节, 缺乏明确的构造成因模型认识, 明显滞后于区域花岗岩成因及其成矿作用研究, 使得湘南成

矿地质研究不完整, 阻碍了对此区域成矿规律的认识。在对湘南矿床进行研究后提出了热柱三叉断裂的区域构造型式, 这是湘南地壳燕山期构造型式的新发现, 为中国东部燕山期板块内部构造研究的背景下, 在湘南找矿研究工作提供了一种新的构造模型。这种

基金项目: 中国地质调查局地质矿产调查评价专项(1212011121116, 1212011085372); 湖南省重点学科建设项目

收稿日期: 2013-05-16; **修订日期:** 2013-06-30

通信作者: 奚小双, 教授, 博士; 电话: 13667351951; E-mail: xiyiyun@sina.com

构造型式可能揭示了湘南区域构造基本性质,展现了湘南区域矿床的分布规律,且可反映深部地幔柱活动的构造特征。湘南是华南的组成部分之一,湘南区域构造型式是华南区域构造型式的缩影,新的构造型式将可能为华南区域成矿地质研究提供新方向。

湘南以及邻近的桂粤地区处于扬子与华夏板块夹持的南华洋盆中,主要分布古生代地层,早古生代地层与晚古生代地层之间为不整合接触关系。区域构造具有横跨叠加褶皱型式,穹隆核部为早古生代地层,盆地分布晚古生代地层。区域中花岗岩分布普遍,但成矿岩体的规模比较小。区域中矿床集中分布,主要有宝山、黄沙坪、香花岭、千里山、铜山岭和珊瑚等多金属矿床,主要分布在晚古生代地层中,与花岗岩关系密切,主要为夕卡岩型和脉型矿床。宝山、黄沙坪和香花岭等矿床是本文作者重点研究的代表性矿床。

1 湘南区域构造研究进展

湘南作为华南的一部分,其区域构造研究经过长期发展,曾经提出了多种构造模型,至今仍然是研究热点地区。早期依据地质力学理论,按照不同的走向划分区域构造型式,在湖南划分出纬向构造系、径向构造系和华夏构造系等,从几何形态上表现区域构造型式。虽然当时这种构造系的划分没有考虑华南板块单元的影响,但是表现了存在不同方向的构造系。陈国达^[1]提出华南地洼区构造单元,包括现在华夏板块地区,发现自中生代以后发生大陆内部强烈构造运动和岩浆岩及成矿活动。这是最早提出的华南大陆内部构造运动的理论,虽然当时没有讨论地台活化的深部构造机制。

通过多年来板块构造理论全方位的研究,获得了华南区域构造运动脉络清楚的认识。在中生代之前完成了华南并入中国大陆的板块拼合运动,包括华夏与扬子板块间的拼合,形成了华南盖层广泛的构造变形。从中生代开始华南大陆面对东部大洋的俯冲带构造运动,形成广泛的挤压区域构造型式^[2]。从华南燕山期逆冲推覆构造的分布区域看^[2-3],起源于大陆东部边缘俯冲带的挤压构造可以深入大陆内部很远,属于板块构造性质。

近年来开展的中国东部中-新生代岩石圈减薄构造运动的研究开启了中国大陆内部地幔构造研究的时代。关于华南燕山期板内构造运动的特征,主要是通过华南大规模的花岗岩活动进行研究。在中国东部燕

山期构造研究中,存在争论的问题主要有:是板块边缘俯冲带活动还是板块内部构造活动;是软流圈构造活动还是地幔柱活动;深部活动机制是拆沉作用还是热侵蚀作用等。湘南区域构造型式是中国东部大区域构造运动研究的一部分,面临同样的问题。在华南通过对花岗岩年龄分带的变化规律研究,认为可能是俯冲板片倾角变化的原因^[4],在华北则强调板块俯冲造成大陆内部的构造运动是岩浆岩发育的原因^[5]。相对于岩石学和地球化学研究强调板块运动中软流圈活动的性质^[6],地震层析资料倾向于认为是深部地幔上升流运动性质^[7]。关于深部地幔活动的构造机制,拆沉作用和热侵蚀作用两种方式可能代表不同的构造环境,拆沉作用需要大陆造山使地壳增厚的运动,热侵蚀作用需要的是深部地幔的上升运动。

这些板内区域构造运动研究主要关注深部发生的构造运动情况,如果同时研究深部构造活动在岩石圈中形成的构造型式,则不但能获取完整的构造面貌,而且有利于确定深部构造机制。华南大范围分布的花岗岩是研究华南区域构造成因的重要因素,随着研究的持续,将华南花岗岩的成因完全归为东部大洋俯冲运动的结果不断受到质疑^[8-9],而推测华南花岗岩的形成与某种地幔活动作用有关是新思路。如果地幔构造运动造成华南大规模的花岗岩活动,那么也应该形成岩石圈中对应的构造型式。实际上,板块运动与地幔柱运动的叠加可能才是华南完整的区域构造运动,因此,只有识别了各自的构造型式才有可能通过不同性质构造的合成来解释华南构造运动特点,建立区域构造模型。对比华北地幔柱活动形成了广泛分布的盆地构造研究结果,华南岩石圈浅部构造型式的研究却是薄弱环节。华南的成矿与花岗岩关系密切,因此成矿构造与花岗岩构造具有成因关系,也是区域构造研究的一部分。

2 湘南区域热柱三叉断裂系构造特征

提出湘南三叉断裂系构造的主要区域地质证据是湘南矿床的线状分布特征,以及湘南地层表现的穹窿构造特征。根据热柱三叉断裂构造成因模型,一个三叉断裂系统应表现为区域穹窿构造及三叉断裂汇聚于穹窿中心的组合型式,三叉断裂构造系中的岩体和矿床具有同时性成因关系,岩体和矿床有可能表现出反映地幔活动的地球化学特征。

湘南矿床在区域上的线状分布形态比较清楚,宝山、黄沙坪和香花岭矿床呈近南北向的线状排列。此

外, 湘南西部的铜山岭矿床及自江永开始, 往东经江华、道县、蓝山县一线的系列矿床矿点, 呈近东西向的线状排列。湘南另一矿床线状分布带是从湘南姑婆山到广西珊瑚锡矿, 整体呈北东走向。因为湘南矿床的成矿构造都以断裂构造为主, 因此, 矿床的线状排列可能指示区域成矿断裂带的方位。区域地质图显示上述 3 条矿床线状分布带大致交汇到同一个中心点, 呈现从中心点向外发射的断裂分叉形态, 与三叉断裂系的线状矿床分布型式(图 1)相符。

在扬子与华夏板块之间的南华洋盆中广泛分布叠加褶皱, 具有 I 型叠加褶皱型式, 应该指示南华洋盆在闭合过程中地层发生的构造变形^[10]。湘南到湘中一带的叠加褶皱表现了规则的分布形态, 从北到南间隔展布 5 列穹窿构造, 各列穹窿排列的走向为近东西向。但是从区域构造形态比较, 最南部的穹窿构造列形态不规则, 呈现一个近于等轴状的大型穹窿构造, 其规模明显大于其他穹窿列的单个穹窿构造的规模。因此, 设想它们是属于两种穹窿构造, 在穹窿构造的成因上可能是完全不同的。

南部大型穹窿构造分布在湘桂粤边界一带, 称为湘南穹窿构造(图 1), 穹窿核部地层为早古生代, 翼部地层为晚古生代。穹窿核部分布区域在宁远以南, 江华以东, 连州以西, 贺州以北, 中心位置在九嶷山与萌渚岭交汇处。穹窿核部地层以寒武系为主, 中心出露震旦系, 表明穹窿隆起幅度比较大。翼部晚古生代地层基本上是围绕核部地层分布的, 仅在南部没有完全封闭, 应该是毗邻华夏古陆边缘。湘南穹窿构造与南华洋盆中的叠加褶皱性质的穹窿具有不同的成因, 作为叠加褶皱的穹窿构造是形成于板块运动的水平力的作用, 属于纵弯褶皱性质, 而湘南穹窿构造则可能

是形成于地幔柱上升的隆起力的作用, 属于横弯褶皱性质。因此, 湘南区域上两种穹窿构造的形态和分布并不协调, 初步认为应该是叠加褶皱先形成, 湘南热柱穹窿后形成, 改造了所在区域的叠加褶皱的形态。

对分布在湘南三叉断裂中的主要矿床和成矿岩体的形成年龄资料的统计表明, 其年龄集中在 150~170 Ma 之间, 差距很小, 均为燕山早期, 因此, 三叉断

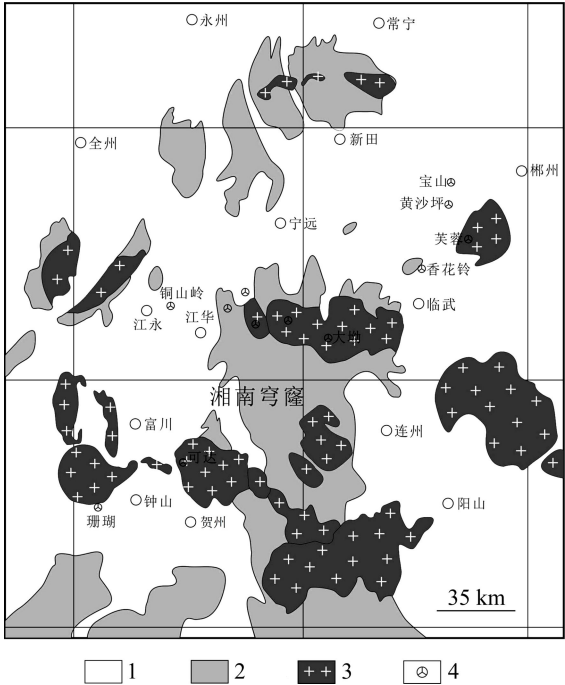


图 1 湘南区域穹窿与矿床分布略图: 1—晚古生代; 2—早古生代; 3—花岗岩; 4—矿床点

Fig. 1 Sketch map of regional dome and ores distribution in southern Hunan, China: 1—Late Paleozoic strata; 2—Early Paleozoic strata; 3—Granite; 4—Ore deposit

表 1 湘南三叉断裂中矿床和岩浆岩形成年龄

Table 1 Age data of ore depositions and magmatic rocks in southern Hunan triple junction, China

矿床	矿种	相关岩体	成矿岩体年龄	成矿年龄	来源
宝山	Cu, Mo, Pb, Zn	英安质隐爆角砾岩	锆石 U-Pb(162.2±1.6) Ma		文献[11]
		花岗闪长斑岩	锆石 U-Pb(158±2) Ma	辉钼矿 Re-Os(160±2) Ma	文献[12]
				黄铁矿 Rb-Sr(174±7) Ma	文献[13]
黄沙坪	Cu, Sn, Mo, Pb, Zn	花岗岩	锆石 U-Pb(161.6±1.6) Ma	辉钼矿 Re-Os(153.8±4.8) Ma	文献[14]
					文献 [15]
铜山岭	Cu, Mo, Pb, Zn	花岗闪长斑岩	锆石 U-Pb(149±4) Ma		文献 [16]
香花岭	Sn, W	癞子岭花岗岩	锆石 U-Pb(154–155) Ma		文献[17]
大坳	Sn, W	金鸡岭岩体	锆石 U-Pb(151–156) Ma	辉钼矿 Re-Os(151.3±2.4) Ma	文献 [18]
可达	W, Sn	黑云母花岗岩	锆石 U-Pb(146.8±2.3) Ma	辉钼矿 Re-Os(162.5±1.2) Ma	文献 [19]
珊瑚	W, Sn		锆石 U-Pb162 Ma		转自文献[20]

裂系中的成岩成矿具有同时性关系(表1)。如果岩体和矿床受三叉断裂控制,则岩体和矿床的年龄也指示断裂的活动时间,说明三叉断裂是同时形成的构造系统。

湘南矿床分布所示三叉断裂交汇中心与湘南穹窿构造的核部区基本上吻合,说明三叉断裂系与热柱穹窿构造可能是具有内在成因联系的构造型式(图2)。湘南热柱三叉断裂系构造型式可以作为湘南燕山期区域成矿构造的基本构造型式,也是表示湘南矿床分布规律的重要指导构造型式。湘南热柱三叉断裂系构造的展布范围,大致以三叉断裂外端矿床为界,北延至宝山矿床,南延至珊瑚矿床,西延至铜山岭矿床,表明三叉断裂发育程度大致对称。目前,在构造系中发现的矿床多分布在湘南穹窿构造的翼部,核部成矿作用不发育。

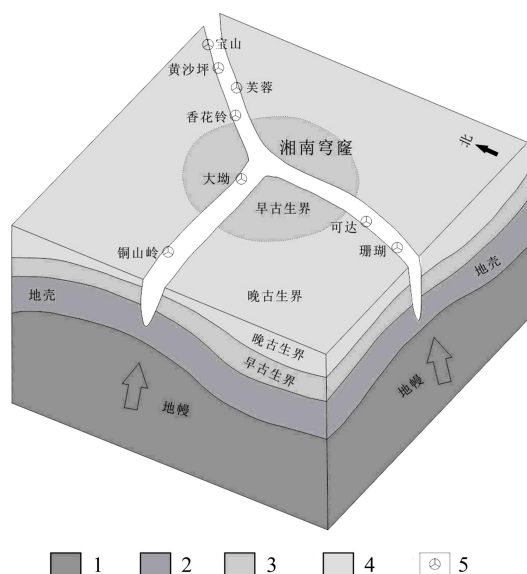


图2 湘南穹窿与三叉断裂构造模型: 1—地幔; 2—地壳; 3—下古生界; 4—上古生界; 5—矿床点

Fig. 2 Model of regional dome and triple junction in southern Hunan, China: 1—Mantle; 2—Crust; 3—Lower Paleozoic; 4—Upper Paleozoic; 5—Ore deposit

3 热柱三叉断裂系构造成因分析

区域三叉断裂组合是板块构造的经典构造型式之一,在大陆裂谷的离散运动中,首先形成三叉断裂系构造,是威尔逊旋回早期阶段的构造特征,这已由东非裂谷和大西洋早期的裂谷构造所证明。从构造力学上分析认为是因为这种断裂结构耗费较少的能量^[21]。此外,三叉断裂的深部构造成因,是地幔柱构造的上升运动撞击岩石圈底部,造成岩石圈的隆起,当隆起

发展到一定程度时在隆起顶部形成三叉断裂^[22]。三叉断裂的形成是隆起构造变形的结果,而隆起构造是地幔柱上升运动的动力作用的结果。在被动大陆边缘和大陆内部也发育完整的三叉断裂构造,在地表为裂谷断裂系,岩浆岩沿断裂带活动^[23],在深部是地幔活动形成的地壳三叉断裂构造型式^[22-24]。

研究表明,地幔柱有多种形成方式,除产生在核幔边界的全球巨型地幔柱活动外^[25],也可以形成与俯冲带直接对应的小型地幔柱构造,产生于下地幔内部,或者在上、下地幔边界处^[26-27]。华南燕山期如果发生地幔活动应该是与俯冲构造对应的小型地幔柱上升运动^[3,7],或者是与之相当的地幔活动。能在地壳中形成放射状断裂系意味着符合一定的构造条件,说明在湘南发生了深部地幔对流运动,具有适合的地幔运动的流变学性质^[26,28]。因此,即使现在还不能确定华南燕山期深部地幔构造的性质,至少表明存在深部低黏度的地幔上升流运动,由此形成地壳中的三叉断裂构造型式。三叉断裂作为地幔上升流运动早期的构造型式,与湘南三叉断裂形成时间为燕山早期,它们之间是吻合的对应关系。湘南三叉断裂型式指示了深部地幔上升流的位置,实际上华南还有赣南和赣东北等地的三叉断裂构造系,它们组成的线状延伸可能反映深部地幔活动的整体形态,成为判别地幔活动性质的新标志。

在南岭,主要通过花岗岩和火山岩的研究表明深部存在地幔活动,发生了壳幔作用^[29],俯冲带的软流圈活动^[30],地幔底侵作用^[31],地幔柱活动^[32],发育具有洋岛岩浆岩(OIB)性质岩系^[33-34]。这些观点都表明,华南燕山期发生地幔活动是花岗岩形成的主要原因,因此,支持华南形成三叉断裂型式的深部构造基础。

湘南形成三叉断裂,但是并没有发育成为裂谷带,三叉断裂夹角呈不规则变化,可能是因为华南地区处于板块汇聚运动中。大陆裂谷的形成不仅表现为发生地幔柱活动,而且具有形成板块离散型活动边界的条件。而华南处在东部大洋的俯冲运动环境,发生板块挤压构造运动,与地幔活动的伸展构造叠加,形成湘南特殊的热柱三叉断裂系构造型式。关于华南燕山期伸展构造现象是非常明显的^[35],以往多作为弧后伸展作用看待,实际上可能主要源于地幔柱运动的结果。

4 区域成矿规律

湘南热柱三叉断裂构造型式的发现,为湘南区域成矿规律的认识提供了重要基础,对指导区域找矿方向会有直接的效果,因为三叉断裂不仅是区域构造型

式,而且是主要区域成矿构造系统。热柱三叉断裂表示了湘南基本区域成矿构造单元形态,划分了华南板内成矿区带次级成矿构造单元,在华南大地构造与矿床构造之间建立了中间构造型式,形成华南区域成矿构造的完整系统。三叉断裂构造的特殊性是区域成矿断裂具有不同的走向,它们却是属于同一个构造系统。三叉断裂构造系统的形态决定了矿床分布的空间范围,矿床沿三叉断裂产出,揭示了区域矿床分布的规律性。

湘南热柱三叉断裂型式说明,区域成矿断裂构造的性质应该是正断层伸展构造,具有类似于大陆裂谷构造的组合特征。推测断裂带的横剖面可能表现为对称的相向内倾正断层的组合,矿床在断裂带两侧的正断层中产出,形成具有一定宽度断裂组合的成矿带。湘南三叉断裂北支断裂带中矿床分布显示较大的宽度(图3),这些矿床都是受同一条分支断裂带控制,指明了每个矿床的区域构造位置和可能的发展方向。湘南的矿床大部分具有断裂成矿的构造特征,但是实际上在矿床内部并没有显示连续、清晰的断裂构造形态,导致无法判断成矿断裂的整体产状和组合关系,对于找矿方向的认识一直存在困惑,而三叉断裂型式的提出有可能填补长期以来湘南区域构造型式研究的不足。在三叉断裂区域构造型式基础上,将矿床构造的研究纳入明确的构造成因类型中,通过构造分析的方法掌握矿床构造的形态特征和力学关系,为认识矿床构造规律开辟重要通道。

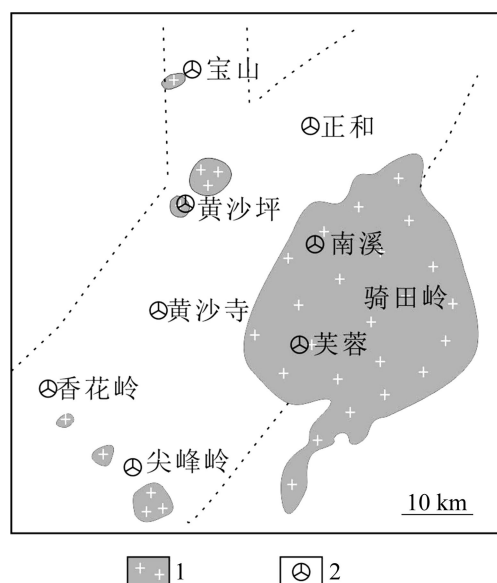


图3 湘南三叉断裂北支成矿带简图: 1—花岗岩; 2—矿床
Fig. 3 Geological sketch map of northern branch metallogenic zone of southern Hunan triple junction, China: 1—Granite; 2—Ore deposit

湘南区域构造型式的建立为区域花岗岩研究也提供了新的发展机遇,华南花岗岩的研究成果丰富,但是争议也多。原因之一是花岗岩形成地质因素复杂,局限于花岗岩岩石学研究未必能够完全区分这些复杂因素的影响。三叉断裂也是控制花岗岩侵位的构造型式,特别是控制成矿花岗岩的侵位。三叉断裂的伸展构造性质说明花岗岩的非造山环境的特点,二者是吻合的,但这只是华南花岗岩中一种构造环境,并不能随意套用。热柱三叉断裂表示的成矿花岗岩的成因环境,无论是花岗岩还是花岗岩成矿都与热柱构造密切相关,说明了花岗岩和矿床可能的近源物质特征,是直接来源于深部热柱的活动,成为分析花岗岩与矿床成分的指导思路。此外湘南区域花岗岩的侵位构造的特征也有了明确的认识,成矿花岗岩的侵位方式与岩体形态的关系,都可能得到说明。

因为三叉断裂具有从系统中心到边缘的变化特征,湘南三叉断裂构造指示区域上属于同一个系统中的矿床将表现出相应的变化趋势。湘南矿床具有多元元素成矿的特征,矿床成矿元素的变化可能与三叉断裂系统中心到边缘的变化有关,这种关系同样可能出现在花岗岩成分的变化上。根据新的区域构造型式,可以结合矿床各种地质条件,如矿床类型、岩浆岩和矿床的地幔成分、矿床分带形态、矿体构造性质、矿床范围和规模等,寻找认识三叉断裂扩展深度和长度控制的矿床三维特征,探讨判断矿床发育深度和规模的标志性因素。在华南成矿大区域背景中三叉断裂系统只表现出小区域成矿变化,对其成因解释明确,细化了研究范围,深化了湘南成矿规律研究。

5 结论

1) 发现了湘南燕山期特征清楚、形态简洁的三叉断裂区域构造型式,为华南区域构造型式研究程度的提高提供了新思路。

2) 指明了湘南燕山期穹窿构造与三叉断裂吻合的关系和位置,明确了中心式三叉断裂构造性质,确定了其岩石圈隆起伸展的成因及区域断裂带组合型式和构造类型。

3) 虽然由三叉断裂构造模型目前暂还不能确定深部地幔运动的构造性质,但它为反映华南板内地幔深部构造运动型式提供了新信息及岩石圈构造背景依据。

4) 三叉断裂是湘南燕山期成岩成矿的构造型式,资料证明在系统内岩体和矿床具有相近的形成年龄,

对研究湘南成矿花岗岩和对应矿床构造的成因和分布规律奠定了基础。

致谢: 野外工作得到湖南省有色金属地质勘探局一总队钟江临总工程师、宝山铅锌矿地质部周孟祥部长、黄沙坪铅锌矿地质部汪林峰副部长、刘凤平工程师及香花岭铅锌矿总工程师彭麒麟的大力支持与协助, 审稿人对此文提出了宝贵意见, 谨此一并表示诚挚谢意!

REFERENCES

- [1] 陈国达. 地台活化说及其找矿意义[M]. 北京: 地质出版社, 1960: 1-408.
CHEN Guo-da. Activation of platform and its prospecting significance[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1960: 1-408.
- [2] 万天丰. 中国大地构造学[M]. 北京: 地质出版社, 2011: 1-497.
WAN Tian-feng. The tectonics of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 1-387.
- [3] 李三忠, 张国伟, 周立宏, 赵国春, 刘鑫, 索艳慧, 刘博, 金宠, 戴黎明. 中、新生代超级汇聚背景下的陆内差异变形: 华北伸展裂解和华南挤压逆冲[J]. 地学前缘, 2011, 18(3): 79-107.
LI San-zhong, ZHANG Guo-wei, ZHOU Li-hong, ZHAO Guo-chun, LIU Xin, SUO Yan-hui, LIU Bo, JIN Chong, DAI Li-ming. The opposite Meso-Cenozoic intracontinental deformations under the super-convergence: Rifting and extension in the North China Craton and shortening and thrusting in the South China Craton[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(3): 79-107.
- [4] 李武显, 周新民. 中国东南部晚中生代俯冲带探索[J]. 高校地质学报, 1999, 5(2): 164-169.
LI Wu-xian, ZHOU Xin-min. Late mesozoic subduction zone of southeastern China[J]. Geological Journal of China Universities, 1999, 5(2): 164-169.
- [5] 邓晋福, 罗照华, 苏尚国. 岩石成因、构造环境与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 1-381.
DENG Jin-fu, LUO Zhao-hua, SU Shang-guo. Petrogenesis, tectonic environment and metallogenesis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 1-381.
- [6] 吴福元, 徐义刚, 高山, 郑建平. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[J]. 岩石学报, 2008, 24(6): 1145-1174.
WU Fu-yan, XU Yi-gang, GAO Shan, ZHENG Jian-ping. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(6): 1145-1174.
- [7] 袁学诚. 再论岩石圈地幔蘑菇云构造及其深部成因[J]. 中国地质, 2007, 34(5): 737-758.
YUAN Xue-cheng. Mushroom structure of the lithospheric mantle and its genesis at depth: Revisited[J]. Geology in China, 2007, 34(5): 737-758.
- [8] 周新民. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1-691.
ZHOU Xin-min. Evolution of the late Mesozoic granite in the Nanling region and lithosphere dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2007: 1-691.
- [9] 张旗. 中国东部中生代岩浆活动与太平洋板块向西俯冲有关吗?[J]. 岩石矿物学杂志, 2013, 32(1): 113-128.
ZHANG Qi. Is the Mesozoic magmatism in Eastern China related to the westward subduction of the Pacific plate?[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2013, 32(1): 113-128.
- [10] 张岳桥, 徐先兵, 贾东, 舒良树. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录[J]. 地学前缘, 2009, 16(1): 234-247.
ZHANG Yue-qiao, XU Xian-bing, JIA Dong, SHU Liang-shu. Deformation record of the change from Indosinian collision-related tectonic system to Yanshanian subduction-related tectonic system in South China during the Early Mesozoic[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(1): 234-247.
- [11] 伍光英, 马铁球, 柏道远, 李金冬, 车勤建, 王先辉. 湖南宝山花岗岩闪长质隐爆角砾岩的岩石学、地球化学特征及锆石 SHRIMP 定年[J]. 现代地质, 2005, 19(2): 118-204.
WU Guang-ying, MA Tie-qiu, BAI Dao-yuan, LI Jin-dong, CHE Qin-jian, WANG Xian-hui. Petrological and geochemical characteristics of granodioritic cryptoexplosion breccia and zircon SHRIMP dating in the Baoshan Area, Hunan province[J]. Geoscience, 2005, 19(2): 118-204.
- [12] 路远发, 马丽艳, 屈文俊, 梅玉萍, 陈希清. 湖南宝山铜-钼多金属矿床成岩成矿的 U-Pb 和 Re-Os 同位素定年[J]. 岩石学报, 2006, 22(10): 2483-2492.
LU Yuan-fa, MA Li-yan, QU Wen-jun, MEI Yu-ping, CHEN Xi-qing. U-Pb and Re-Os isotope geochronology of Baoshan Cu-Mo polymetallic ore deposit in Hunan province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(10): 2486-2492.
- [13] 姚军明, 华仁民, 林锦富. 湘南宝山矿床 REE-Pb-Sr 同位素地球化学及黄铁矿 Rb-Sr 同位素定年[J]. 地质学报, 2006, 80(7): 1045-1054.
YAO Jun-ming, HUA Ren-min, LIN Jin-fu. REE, Pb-Sr isotope geochemistry, and Rb-Sr isochron age of pyrites in the Baoshan deposit, south Hunan province, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(7): 1045-1054.
- [14] 马丽艳, 路远发, 屈文俊, 付建明. 湖南黄沙坪铅锌多金属矿床的 Re-Os 同位素等时线年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 2007, 26(4): 426-431.

- MA Li-yan, LU Yuan-fa, QU Wen-jun, FU Jian-ming. Re-Os isotopic chronology of molybdenites in Huangshaping lead-zinc deposit, southeast Hunan, and its geological implications[J]. Mineral Deposits, 2007, 26(4): 426-431.
- [15] 姚军明, 华仁民, 林锦富. 湘东南黄沙坪花岗岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年及岩石地球化学特征[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 688-696.
- YAO Jun-ming, HUA Ren-ming, LIN Jin-fu. Zircon LA-ICPMS U-Pb dating and geochemical characteristics of Huangshaping granite in southeast Hunan province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(3): 688-696.
- [16] 魏道芳, 鲍征宇, 付建明. 湖南铜山岭花岗岩体的地球化学特征及锆石 SHRIMP 定年[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(4): 482-489.
- WEI Dao-fang, BAO Zheng-yu, FU Jian-ming. Geochemical characteristics and zircon SHRIMP U-Pb dating of the Tongshanling granite in Hunan province, South China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31(4): 482-489.
- [17] 朱金初, 王汝成, 陆建军, 张 辉, 张文兰, 谢 磊, 章荣清. 湘南癞子岭花岗岩体分异演化和成岩成矿[J]. 高校地质学报, 2011, 17(3): 381-392.
- ZHU Jin-chu, WANG Ru-cheng, LU Jian-jun, ZHANG Hui, ZHANG Wen-lan, XIE Lei, ZHANG Rong-qing. Fractionation, evolution, petrogenesis and mineralization of Laiziling granite pluton, southern Hunan province[J]. Geological Journal of China Universities, 2011, 17(3): 381-392.
- [18] 付建明, 李华芹, 屈文俊, 杨晓君, 魏君奇, 刘国庆, 马丽艳. 湘南九嶷山大坳钨锡矿的 Re-Os 同位素定年研究[J]. 中国地质, 2007, 34(4): 651-656.
- FU Jian-ming, LI Hua-qin, QU Wen-jun, YANG Xiao-jun, WEI Jun-qi, LIU Guo-qing, MA Li-yan. Re-Os isotope dating of the Da'ao tungsten-tin deposit in the Jiuyi mountains, southern Hunan province[J]. Geology in China, 2007, 34(4): 651-656.
- [19] 李晓峰, 冯佐海, 肖 荣, 宋慈安, 杨 锋, 王翠云, 康志强, 毛 伟. 桂东北钨锡稀有金属矿床的成矿类型、成矿时代及其地质背景[J]. 地质学报, 2012, 86(11): 1713-1725.
- LI Xiao-feng, FENG Zuo-hai, XIAO Rong, SONG Ci-an, YANG Feng, WANG Cui-yun, KANG Zhi-qiang, MAO Wei. Spatial and temporal distributions and the geological setting of the W-Sn-Mo-Nb-Ta deposits at the northeast Guangxi, south China[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(11): 1713-1725.
- [20] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 袁顺达, 程彦博, 陈毓川. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境[J]. 高校地质学报, 2008, 14(4): 510-526.
- MAO Jing-wen, XIE Gui-qing, GUO Chun-li, YUAN Shun-da, CHENG Yan-bo, CHEN Yu-chuan. Spatial-temporal distribution of mesozoic ore deposits in south China and their metallogenic settings[J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(4): 510-526.
- [21] BURKE K, DEWEY J F. Plume-generated triple junctions: Key indicators in applying plate tectonics to old rocks[J]. The Journal of Geology, 1973, 81(4): 406-433.
- [22] GEYER A, MARTÍ J. The distribution of basaltic volcanism on Tenerife, Canary Islands: Implications on the origin and dynamics of the rift systems[J]. Tectonophysics, 2010, 483(3/4): 310-326.
- [23] WALTER T R, TROLL V R, CAILLEAU B, BELOUSOV A, SCHMINCKE H U, AMELUNG F, BOGAARD P. Rift zone reorganization through flank instability in ocean island volcanoes: An example from Tenerife, Canary Islands[J]. Bull Volcanol, 2005, 67: 281-291.
- [24] KISELEV A I, ERNST R E, YARMOLYUK V V, EGOROV K N. Radiating rifts and dyke swarms of the middle Paleozoic Yakutsk plume of eastern Siberian craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 45: 1-16.
- [25] 马宗晋, 杜品仁, 洪汉净. 地球构造与动力学[M]. 广州: 广东科技出版社, 2003: 1-564.
- MA Zong-jin, DU Pin-ren, HONG Han-jing. Tectonics and geodynamics[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2003: 1-564.
- [26] TACKLEY P J. Mantle convection and plate tectonics toward an integrated physical and chemical theory[J]. Science, 2000, 288: 2002-2007.
- [27] 傅容珊, 冷 伟, 常筱华. 地幔对流与深部物质运移研究的新进展[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(1): 170-179.
- FU Rong-shan, LENG Wei, CHANG Xiao-hua. Advancements in the study of mantle convection and the material movements in the deep earth interior[J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(1): 170-179.
- [28] DAVIES G F, RICHARDS M A. Mantle convection[J]. J Geol, 1992, 100: 151-206.
- [29] 王德滋, 沈渭洲. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 209-220.
- WANG De-zi, SHEN Wei-zhou. Genesis of granitoids and crustal evolution in southeast China[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(3): 209-220.
- [30] 周新民. 对华南花岗岩研究的若干思考[J]. 高校地质学报, 2003, 9(4): 556-565.
- ZHOU Xin-min. My thinking about granite geneses of south China[J]. Geological Journal of China Universities, 2003, 9(4): 556-565.
- [31] 徐鸣洁, 舒良树. 中国东南部晚中生代岩浆作用的深部条件制约[J]. 高校地质学报, 2001, 7(1): 21-33.
- XU Ming-jie, SHU Liang-shu. Deep geological conditions constraining the late mesozoic magmatism in SE China[J]. Geological Journal of China Universities, 2001, 7(1): 21-23.

- [32] 谢舜克, 姜月华. 华南地壳演化过程及其构造格架[J]. 成都理工学院学报, 1998, 25(2): 153-161.
- XIE Dou-ke, JIANG Yue-hua. Evolutionary process and structural framework of the crust of south China[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1998, 25(2): 153-161.
- [33] 王岳军, 廖超林, 范蔚茗, 彭头平. 赣中地区早中生代 OIB 碱性玄武岩的厘定及构造意义[J]. 地球化学, 2004, 33(2): 110-117.
- WANG Yue-jun, LIAO Chao-lin, FAN Wei-ming, PENG Tou-ping. Early Mesozoic OIB-type alkaline basalt in central Jiangxi Province and its tectonic implications[J]. Geochimica, 2004, 33(2): 110-117.
- [34] 谢 昕, 徐夕生, 邹海波, 蒋少涌, 张 明, 邱检生. 中国东南部晚中生代大规模岩浆作用序幕: J2 早期玄武岩[J]. 中国科学 D 辑, 2005, 35(7): 587-605.
- XIE Xin, XU Xi-sheng, ZOU Hai-bo, JIAN Shao-yong, ZHANG Ming, QIU Qian-sheng. The prologue to the late Mesozoic magmatism: the middle Jurassic basalt, Southeast China[J]. Science in China (Series D), 2005, 35(7): 587-605.
- [35] 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.
- SUN Tao, ZHOU Xin-min. Late mesozoic extension in southeast China: Petrologic symbols[J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences Edition, 2002, 38(6): 737-746.

(编辑 陈卫萍)