试论湖南衡阳盆地与地幔柱的关系及其对关键矿产深部探测的意义

秦锦华[1)]，王登红[1)]，陈毓川[2)]，赵如意[1,3)]，王成辉[1)]，江彪[1)]

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

2）中国地质科学院，北京，100037；

3）东华理工大学地球科学学院，南昌，330013

内容提要：衡阳盆地是华南地区独具特色的中—新生代陆相沉积盆地，其形成机制与丰富的矿产资源都十分引人注目。衡阳盆地近等轴形态，地形上表现为典型的“盆山体系”，重力资料显示出地幔隆起的特征，构造形式上发育“棋盘状”和“环形（弧形）”格局，火成岩与成矿元素组合以及同位素特征均具有幔源特征，这表明衡阳盆地的形成与华南地区中生代地幔柱活动之间具有密切的成因联系。盆地及其周缘矿产资源具有长时期、多矿种、强富集的特征。不同时代和不同矿种组合的成矿作用与区域岩浆作用和盆地沉积作用具有明显的专属性。衡阳盆地及周边不但出现了丰富的有色金属和非金属矿产，也出现了钨锡铌钽铋碲铀等关键矿产，但后者的工作程度最低。因此，在深部矿产探测过程中应做到“四注意四加强”。

关键词：衡阳盆地；地幔柱；中—新生代；关键矿产；深部找矿

衡阳盆地大地构造上位于扬子板块与华夏板块钦州-杭州结合带的中段，区域上为耒阳-临武N-S向构造带、塔山-阳明山W-E构造带和祁阳“山”字形构造所挟持形成的构造复合部位并经历多期次的幔源岩浆活动，可能与地幔柱有关（Long Guozhong and Wang Jilian，1994；Wang Denghong，1995，1996；Li Ziying et al.，1999，2006；Tong Hangshou，2010；丁汉铎等，2013）。盆地内部及其周缘出现大量与地幔组分具有直接或间接关系的岩浆岩组合，且出现类型多样的元素富集成矿现象，特别是盆地内部铀矿化的普遍存在以及多处具有幔源成矿物质来源的铜、铅锌、锑等多金属矿床。盆地内部及周边已经出现了钨锡铌钽铋碲等关键金属的富集，但能不能通过深部探测取得关键矿产更大的找矿突破？本文根据前人工作和野外调查，从地幔柱的角度对衡阳盆地的成岩成矿作用以及深部找矿勘查加以探讨。

1 衡阳盆地基本地质概况

衡阳盆地大致地理位置为26°20′N～27°30′N和112°00′E～113°00′E。大地构造位置处于华南板块与扬子板块相结合的钦-杭带西段（图1a）。盆地的变质基底包括中元古界冷家系群黄浒洞组条带状砂质板岩和新元古界板溪群五强溪组板岩和马底驿组钙质-碳质板岩，基底出露于盆地东侧川口地区、衡山东侧以及衡阳县以北金溪镇地区（Hunan Institute of Geological Survey，1973）。沉积盖层为形成于白垩纪早期—古近纪晚期的一套红色的陆相碎屑岩，中生代地层包括下白垩统东井组、神皇山组，上白垩统戴家坪组和车江组。新生代地层包括下始新统栗木坪组和古新统流霞市组（Liu Xun and Fu Derong，1986）。该区域自晚古生代以来发生自西南向东北方向海侵，形成了不断向北东方向超覆的海西凹陷沉积。早中生代早期，特提斯洋南枝首

注：本文为中央级公益性科研院所基本科研业务费项目（编号JYYWF20183701、JYYWF20183704）和中国地质调查局中国矿产地质志项目（编号DD20160346、DD20190379）资助成果。

收稿日期：2019-05-14；改回日期：2019-06-02；网络发表日期：2019-06-05；责任编辑：周健。

作者简介：秦锦华，男，1992年生。博士研究生，矿物学、岩石学、矿床学专业。Email：qjh1992@qq.com。通讯作者：王登红，男，1967年生。研究员，博士生导师，主要从事矿产资源研究。Email：wangdenghong@vip.sina.com。

引用本文：秦锦华，王登红，陈毓川，赵如意，王成辉，江彪. 2019. 试论湖南衡阳盆地与地幔柱的关系及其对关键矿产深部探测的意义. 地质学报，93(6)：1501～1513，doi：10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019185.

Qin Jinhua，Wang Denghong，Chen Yuchuan，Zhao Ruyi，Wang Chenghui，Jiang Biao. 2019. Discussion on the relationship between Hengyang basin and mantle plume and its implication for the deep prospecting of key minerals. Acta Geologica Sinica，93(6)：1501～1513.

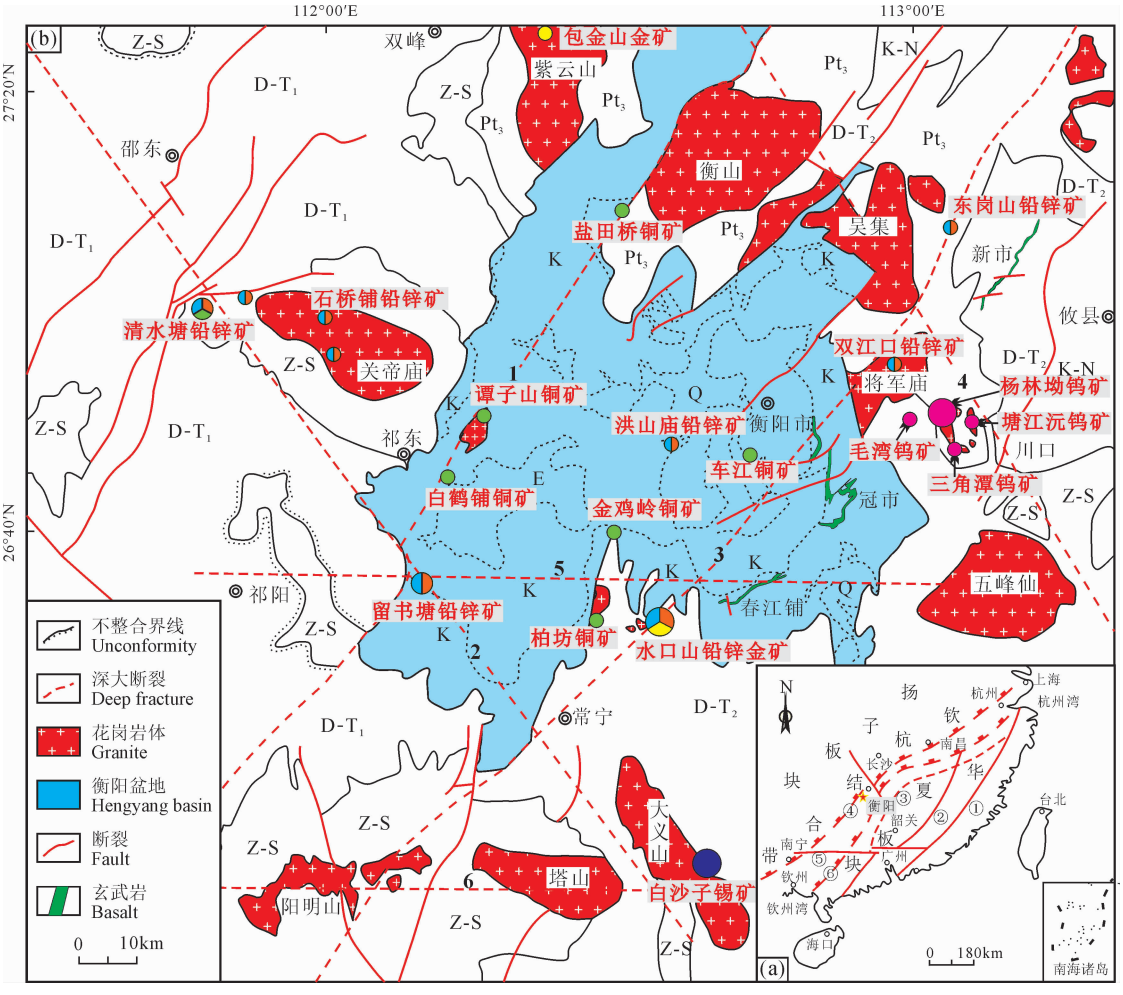


图 1 华南构造简图(a, 据 Chen Yuchuan et al.,2013)及衡阳盆地地质图(b, 据 Meng Lifeng,2012;Li Fushun,2012)

Fig. 1 The geological structure map of South China (a, after Chen Yuchuan et al., 2013) and geological map of Hengyang basin (b, after Meng Lifeng, 2012; Li Fushun, 2012)

(a):①—东南沿海火山断裂带;②—武夷褶皱带;③—罗霄褶皱带;④—罗霄-仙霞前缘褶皱带;⑤—云开褶皱带;⑥—粤东褶皱带;(b):1—株洲-双牌深大断裂带;2—邵阳-郴州基底断裂带;3—醴陵-宁远深大断裂带;4—常德-安仁基底断裂带;5—羊角塘-五峰仙基底断裂带;6—阳明山-大义山基底断裂带

(a): ①—Southeast coastal volcanic fault zone; ②—Wuyi fold belt; ③—Luoxiao fold belt; ④—Luoxiao-Xianxia frontal fold belt; ⑤—Yunkai fold belt; ⑥—Eastern Guangdong fold belt; (b): 1—Zhuzhou-Shuangpai deep fault zone; 2—Shaoyang-Chenzhou basement fault zone; 3—Liling-Ninyuan deep fault zone; 4—Changde-Anren basement fault zone; 5—Yangjiaotang-Wufengxian basement fault zone; 6—Yangmingshan-Dayishan basement fault zone

先闭合,自西南向东北发生了一期强烈的构造-岩浆作用(Mao Jingwen et al.,2005)。早中生代晚期,古特提斯构造域向滨太平洋构造域的构造体制转换,构造线方向由 EW 向转为 NE 向(Shu Liangshu,2012;Zhang Yueqiao et al.,2012)。多期次造山挤压和伸展拉张形成了广泛、多期的火山-侵入杂岩和华南盆岭构造(Gilder et al.,1991;Li et al,2000;2004),并在中生代晚期形成了以衡阳盆地为代表的大中型的断陷红色沉积盆地(Cheng Yuqi,1994;Xia Wenchen, 1991)。

2 衡阳盆地岩浆活动及对成矿作用的影响

海西期花岗岩在衡阳盆地出露面积较小,分布范围很有限,仅在 1∶20 万区调报告中将吴集花岗闪长岩体厘定为海西期岩浆作用的产物,地质特征、年代学、地球化学方面的资料相对匮乏。印支期是衡阳盆地最主要的岩浆活动时期(表 1),产出了关帝庙岩体、塔山岩体、五峰仙岩体、丫江桥岩体、紫云山岩体、歇马岩体、川口岩体群等侵入体。按照岩性

特征可分为:花岗闪长岩、黑云母二长花岗岩、二云母花岗岩-白云母(电气石)花岗岩等。①花岗闪长岩:主要分布于关帝庙岩体边缘相、紫云山岩体和五峰仙岩体,主要产出矿床包括包金山-金坑冲金矿;②黑云母二长花岗岩出露点较多,衡阳盆地周缘复式山岩体中绝大部分出现该岩相,部分矿区发育钾化现象,且黑云母普遍发生绿泥石化蚀变,产出矿床包括清水塘铅锌矿、石桥铺铅锌矿;③二云母花岗岩-白云母花岗岩出露最为广泛,白云母(电气石)花岗岩主要出露于阳明山以及川口地区,相关矿床包括三角谭、屋背冲钨矿。燕山期是衡阳盆地另一个重要的岩浆活动期(表 1),大部分岩体为复式岩体的中央相,少量以独立岩体产出,虽然出露面积较印支期小,但产出了该区域最主要的矿

表 1　衡阳盆地及其周缘岩浆岩时代及其主要相关矿床

Table 1　Geochronology and main related deposit magmatic rocks from Hengyang basin and its surrounding

岩体名称	岩性	成岩时代(Ma)	主要相关矿床	资料来源
紫云山岩体	斑状石英二长岩	225.2±1.7;225.6±1.4		Liu Kai et al.,2014; Ju Peijiao et al.,2015; Lu Yulong et al.,2017
	花岗闪长岩	222.5±1	包金山-金坑冲金矿	
	二云母花岗岩	227.0±2.2,222.3±1.8	大坪铷铌钽矿	
阳明山复式岩体	黑云母二长花岗岩	228.6±1.4,205±1.8; 213.7±1.0		Chen Weifeng et al.,2006; Liu Wei et al.,2014; Ma Liyan et al.,2016
	二云母二长花岗岩	229.0±2.0,221.8±1.3; 218.0±10.0		
	电气石白云母二长花岗岩	218.2±2.0;218.9±3.4		
	黑云母正长花岗岩	217.8±1.6		
塔山岩体	粗粒斑状电气石二长花岗岩	218±3		Guo Aimin et al.,2017; Li Yong et al.,2015
	中细粒电气石黑云母二长花岗岩	215±3;247±5.9		
水口山-铜鼓塘岩体	花岗闪长(斑)岩、英安斑岩	153.0±0.9～158±1; 163±2	水口山铅锌银金矿 柏枋铜(铀)矿	Ma Liyan et al.,2016; Zuo Changhu et al.,2014; Huang Jinchuan,2016
关帝庙岩体	黑云母花岗岩	220～240	石桥铺铅锌(铀)矿	Chen Weifeng et al.,2006; Dai Fangyuan et al.,2008; Shi Guowei et al.,2015; Zhao Zengxia et al.,2015
	二云母花岗岩	约 200		
	花岗斑岩,煌斑岩,细粒花岗岩	153		
五峰仙岩体	黑云母二长花岗岩	233.5±2.5		Wang Kaixing, et al.,2012; Chen Di et al.,2017
	二云母花岗岩	221.6±1.5		
川口岩体	二云母二长花岗岩	210～220	三角谭钨矿	Peng Nengli et al.,2017
		176、164	杨林坳、塘江沅钨矿	Ouyang Yufei et al.,2008; Jiang Guoqing et al.,2014
衡山岩体	角闪石黑云母二长花岗岩	215.5±1.5		Ma Tieqiu et al.,2013
	二云母二长花岗岩	140.6±0.8	马迹长石矿(铌钽矿点)	
丫江桥岩体	黑云母二长花岗岩	217.7～225		Wang Kaixing et al.,2012
	二云母二长花岗岩	207.3～210.5		
歇马岩体	花岗岩	214±5.9		Peng Binxia et al.,2006
大义山岩体	黑云母正长花岗岩	210～278		Liu Yaorong et al.,2005; Wu Guangying et al.,2005; Zhang Xiaojun et al.,2014; Zhao Zengxia et al.,2017
	二云母二长花岗岩、 二云母正长花岗岩	156～185	大义山锡矿	
	斑状二云母二长花岗岩, (电气石)正长花岗岩	128～148		
将军庙岩体	黑云母二长花岗岩	210～260	双江口萤石(铅锌)矿	Wang Binhai et al.,2017
周家岭岩体	黑云母花岗岩	203±1.4	清水塘铅锌矿	Miao Baihu et al.,2014
鸡笼街岩体	黑云母二长花岗岩	燕山期	谭子山重晶石(铜)矿	Hunan Institute of Geological Survey,1973
羊角塘岩体(隐伏)	花岗闪长岩	印支期	留书塘铅锌矿	Wu Zhihua et al.,2009; Cheng Shunbo et al.,2017
冠市	玄武岩	76～81	石材	Meng et al.,2012
攸县新市	玄武岩	132.7	石材	Ma Tieqiu et al.,2012
春江铺	玄武岩	92	石材	Zhao Zhenhua et al.,1998
关帝庙	煌斑岩	153		Dai Fangyuan et al.,2008

产。此外,复杂成分脉岩(石英脉、伟晶岩脉、基性岩脉(辉绿玢岩)、次英安斑岩脉、二长花岗岩脉、花岗细晶岩脉)在各大岩体内部和边部均产出,晚期出现玄武岩。①花岗闪长岩(斑岩)出露于水口山—铜鼓塘一带,与水口山 Pb-Zn 床密切相关;②二云母(白云母)花岗岩主要出露于川口岩体、大义山岩体和衡山岩体,相关矿产包括川口钨矿、大义山锡矿以及马迹-界牌长石、铌钽矿点;③脉岩组:关帝庙岩体内部呈脉状产出的花岗斑岩形成时代约为 153Ma;④玄武岩是衡阳盆地晚中生代一次重要的岩浆活动,但分布范围不大。包括冠市街-江口镇玄武岩、瓦园春江铺玄武岩,在衡阳盆地东侧攸县新市地区也出露有玄武安山岩。

3 成矿特征和成矿规律

3.1 内外生矿产资源富集

衡阳盆地矿产包括钨(锡)、铜、铅、锌、金、铌、钽、铀、银、镉、重晶石、萤石、盐类(石膏、芒硝、石盐)、长石、高岭土等多种矿产资源,重要矿产地数十个,除少数几个矿床规模达到中—大型外,其余均为中—小型。铅锌矿是该区最主要的矿种,其次为铜、钨、锡、金、铀等。衡阳盆地金属矿产大多与岩浆作用有关,沉积-沉积改造型矿床虽有分布,但规模一般较小。矿床产出矿种多以组合形式存在,共伴生类型多样。如石桥铺铅锌矿中伴生的铀、镉、银等矿产也达到了工业综合利用品位,水口山铅锌矿田分布有水口山铅锌矿床、康家湾铅锌金矿床、石坳岭铅锌矿床、龙王山金矿床和仙人岩金矿床等多个类型矿床。内生矿床包括:①中—高温岩浆热液型 W、Sn、长石矿床,主要分布于衡阳盆地东部和东南部,主要有杨梅冲石英脉型-斑岩型白钨矿床,与大义山岩体有关的岩体型-石英脉型 Sn 矿床,与川口岩群有关的屋背冲、毛湾云英岩型 W 矿床和三角潭石英脉型 W 矿床型;②与岩浆作用相关中—低温热液型 Pb、Zn、Ag、Au(萤石、重晶石)矿床主要分布于衡阳盆地边缘,该类型矿床在衡阳盆地分布最为广泛,如水口山、留书塘、谭子山、盐田桥、包金山-金坑冲等矿床。外生矿床主要包括:①风化壳型 Fe、Au 矿床、高岭土矿(瓷土矿),分布于各原生矿床的外带及风化壳内,例如龙王山风化壳型金矿产于水口山花岗闪长岩的顶部,界牌高岭土矿产于衡山岩体的顶部;②与盆地沉积作用相关的盐类矿床主要分布于盆地内部;③砂岩型、沉积改造型铜(铀)矿分布于盆地中部,代表矿床为车江铜矿和柏坊铜(铀)矿。

3.2 存在显著的成矿专属性

衡阳盆地及其周缘金属、非金属、盐类成矿作用十分发育,成矿时代从印支期一直持续到喜马拉雅期(220Ma 至新生代)。盆地周缘的成矿作用集中于中生代中早期,矿点较多,但规模均较小,以铅锌钨铜为主。盆地内部的成矿作用则集中于晚中生代—新生代,为衡阳盆地最主要的成矿期,成矿类型十分丰富,且规模较大。

(1)印支期的 W、Sn 成矿作用与二云母、黑云母、电气石花岗岩有关。主要矿床为川口岩群附近的三角潭钨矿、毛湾钨矿。三角潭钨矿与川口岩群中黑(二)云母-白云母电气石花岗岩密切相关,据 Peng Nengli et al.(2017)对矿区辉钼矿 Re-Os 年龄测定,其成矿时代为 202~223Ma。

(2)印支期 Pb、Zn、Au、Ag、U、Cd、萤石、重晶石矿的成矿作用与花岗闪长岩、黑云母花岗岩、二长花岗岩有关。铅锌矿床与中酸性岩浆岩活动有关,特别是黑云母二长花岗岩以及花岗闪长岩。例如,清水塘铅锌矿床与周家岭黑云母二长花岗岩紧密共生,石桥铺铅锌铀矿产出于关帝庙岩体内黑云母、二云母二长花岗岩中。紫云山花岗闪长岩岩体内部出露包金山-金坑冲金矿。将军庙岩体内部分布有双江口萤石矿以及一些小型铅锌矿床。

(3)燕山早—中期 W、Sn、Nb、Ta 矿与二云母、电气石花岗岩有关。大义山矿田白沙子锡矿与大义山二云母二长花岗岩及二云母正长花岗岩密切相关,杨林坳白钨矿矿床与川口岩体内部黑云母、二云母二长花岗岩有关。衡山二云母花岗岩与内部和周边的 Nb、Ta 矿点关系密切。此外衡阳盆地以南耒阳地区的上堡细粒黑云母二长花岗岩岩体中发育有岩体型的钨锡矿床,且在其风化壳中还发现了 Nb、Ta 的矿化。

(4)燕山期的 Pb、Zn、Ag、Au(Te)矿成矿作用与英安斑岩、花岗闪长(斑)岩、花岗(斑)岩相关。水口山矿田整体分布于水口山-铜鼓塘花岗闪长岩岩体的边部。分布受岩体及其接触带控制明显。东岗山铅锌银矿床规模较小,产出于白莲寺岩体的花岗岩、花岗斑岩中。

(5)喜马拉雅期褐铁矿、高岭土、铜、铀、盐类矿床主要与陆内风化作用与盆地沉积作用相关。在水口山铅锌金多金属矿床内花岗闪长岩的顶部出现大量的褐铁矿化,界牌地区出现高岭土矿,此外还出现像车江铜矿这一类型的沉积型矿床。

4　衡阳盆地成岩成矿作用与地幔柱构造关系的探讨

4.1　衡阳盆地深部存在地幔隆起的地球物理证据

地球物理资料显示衡阳盆地的莫霍面深度只有28.6km,属于地壳减薄区,也即地幔隆起区(Zhang Jinye,1994a)。衡阳盆地为一个具有良好圈闭的重力高异常区域,等深线介于31～32km,衡阳盆地内部的重力异常值大于－5mGal,由中心向外,其重力异常值呈现明显降低趋势,最大差值为－55mGal(图2)。暗示在盆地中新生代陆相沉积层下部可能发育有一定规模密度相对较高的地质体。与之相反,盆地周缘出露的关帝庙岩体、大义山岩体、衡山岩体、阳明山岩体等花岗岩体与很低的重力低异常圈闭具有较好的对应关系(Wang Min et al.,2015)。Zhang Yongxia.(1985)厘定出早中中生代时期从衡阳—厦门方向的地幔柱热源活动轨迹的古地磁证据和环形构造形迹。湘东南地区中生代时期存在地幔柱的活动(Jia Dacheng et al.,2002,2004),而衡阳盆地位于湘东南地幔柱的边缘。因此,盆地之下很可能为一个小型的地幔亚柱,与盆地周缘低密度的侵入体一起,构成了典型的"亚幔柱-幔枝体系"。

4.2　幔源岩石组合特征

衡阳盆地可见到的幔源岩石包括各种类型的煌斑岩和玄武岩,时代主要是燕山晚期(71～80Ma;Meng et al.,2012)。其中,在衡阳盆地东部的大王庙、油田、冠市镇、春江村一带的上白垩统戴家坪组中段出现玄武岩层。出露岩性包括碱性橄榄玄武岩、粗玄岩、玄武安山岩等。盆地西部关帝庙花岗质杂岩体内部和围岩中出现大量的煌斑岩,煌斑岩既侵入到变质岩基底中,也侵入到印支期的岩体之中。水口山花岗闪长岩内部,衡山岩体内部,清水塘矿区等地也有煌斑岩出露的相关报道,另外,衡阳盆地西侧外缘部位的锡矿山矿区也发育有煌斑脉。从花岗岩类的分布特征看,与南岭成矿带相比,衡阳盆地内部及周边分布的花岗岩类中花岗闪长岩的占比明显偏多,而二云母花岗岩、二长花岗岩的产出比例要少一些。

4.3　区域多向深大断裂交汇

衡阳盆地内部及周缘发育多组断裂,它们受制于多期次的构造作用,以印支运动和燕山运动在该区域的作用表现最为强烈。区域断裂以NE、NW、EW向为主,其中NW向断裂包括邵阳-郴州基底断裂、常德-安仁转换断裂带;NE向断裂主要有株洲-双牌深大断裂、醴陵-宁远深大断裂,其次还包括衡

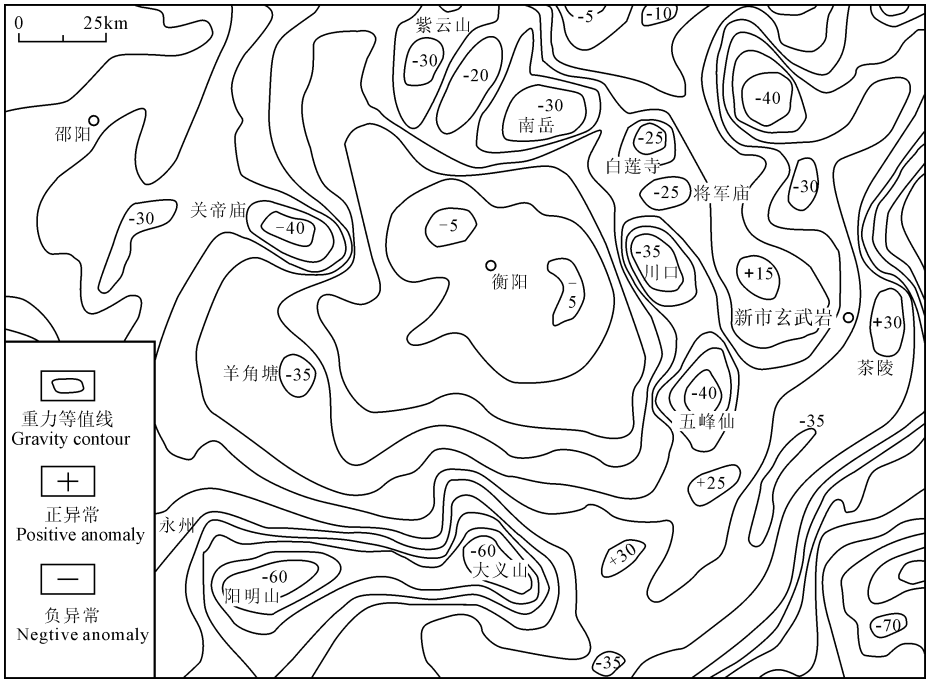


图2　衡阳盆地及其周缘重力等值线图(据Rao Jiarong and Wang Jiheng,1993;Wang Min et al.,2015)

Fig.2　Gravity contour map of Hengyang basin and its surroundings (after Rao Jiarong and Wang Jiheng,1993;Wang Min et al.,2015)

东-新田断裂、祁东-湘潭断裂、城步-新化断裂、通道-江口断裂等;EW 向断裂有羊角塘-五峰仙断裂和茶陵-广昌隐伏断裂。羊角塘-五峰仙断裂为壳断裂,茶陵-广昌隐伏断裂为超壳断裂。NE 向与 NW 向断裂互相交切,形成典型的棋盘状构造格局,使得衡阳盆地深部地幔坳陷和地幔隆起呈现出串列分布的特征(Liang Xinquan and Guo Dingliang,2002)。衡阳盆地西侧,以衡阳和祁阳为中心,各时代地层发生褶皱向西尖凸,并与周围断裂和推覆体形成西侧"山"字形(半圆形),东侧冠市-江口镇玄武岩,东南侧春江铺玄武岩产状构成典型的弧形构造——"衡阳环"(Zhang Yongxia,1984)。这种环形构造格局与 Tong Hangshou (2010)厘定的我国华南地区的套环和 10~11 号幔枝(热点)构造相契合,表明衡阳盆地极有可能存在地幔柱活动。

4.4 衡阳盆地独特的"盆山体系"

衡阳盆地所处的钦-杭结合带是自新元古代造山带之后一直处于陆内演化阶段,晚中生代—新生代期间,该区域处于多阶段的伸展环境中。盆地四周分布着大量的伸展山岭,例如大义山、紫云山、阳明山、塔山等,甚至在衡山附近还分布有伸展-拆离作用相关的"变质核杂岩"(Zhang Jinye,1994b)。衡阳盆地的形态近于等轴状,与华南地区其他中—新生代盆地形态有明显差异,并未出现沿 NE 向构造行迹展布的长条状特征。这种伸展盆岭和断陷盆地共存现象构成典型的"盆山构造"格局。Wang Wuli and Guo Shengzhe (2012)认为,"盆山体系"的形成与板块构造或者冷板片俯冲而激发的地幔柱和地幔超柱活动关系密切。所以,在晚白垩世,区域伸展进一步加强,引张裂谷的发育很可能诱发了深源岩浆的底侵作用(Shu Liangshu,2004),并且在盆地内冠市-江口和春江铺等地的神皇山组和戴家坪组中出现了呈层状的偏碱性橄榄玄武岩和粗玄岩等基性深源岩浆的喷溢现象。在此过程中,大量的热量对气候进行改造,进而加强了地表的氧化作用,使得衡阳盆地的沉积物主要是一套红色的陆相碎屑沉积。这一类红色的沉积建造与北美苏必利尔湖区基韦厄和拉布拉多锡尔湖地区的沉积建造类似,它们的形成极有可能与地幔柱上侵有关。

4.5 同一岩体往往多期次形成

衡阳盆地内部及其周边的花岗岩体虽然规模不大,但成因并不简单,大多具有多期侵位的特征。如国内著名的南岳衡山,从形成时代上看,其东侧的南岳岩体是燕山早期形成的,西侧的白石峰岩体则是燕山晚期的,同位素年龄相差约 20M.y.,这与李子颖等提出的华南地幔柱活动频率相同。从岩性上看,东侧是花岗闪长岩,西侧是二长花岗岩;从成矿作用看,东侧矿化不发育,但西侧发育钠长石、稀有金属及铅锌、铀矿等。这与盆地外缘、南岭成矿带北部的大义山岩体类似。大义山岩体主体形成于燕山期,但其南侧的泥板田—观音阁岩体则形成于 278Ma。在一个不大范围(约 5200km^2)内,从海西到燕山晚期,岩浆活动长期存在,而且最后产出的是玄武岩和煌斑岩。这可能意味着深部存在一个位置相对固定并长期活动的岩浆和能量源区。这样的岩浆和能量源区可能与地幔柱跟地壳之间的"铆合"作用及成岩成矿物质的长期交换密切相关,但这样成岩成矿作用呈"点式"分布而不是类似于环太平洋成矿带或者安第斯成矿带那样的"线型"分布。这种点式岩浆作用实际上也是地幔柱"热点"作用的一个记录。

4.6 成矿时代以中、新生代为主

衡山变质核杂岩西侧 3011 铀矿中沥青铀矿形成于 42.7~47.5Ma,属于新生代中期成矿(Zhang Jinye,1994a)。罗渡铀矿区围岩黑云母片岩的 K-Ar 年龄为 80Ma (Zhang Jinye,1994a),表明其成矿至早为晚白垩世,极有可能为新生代成矿。丫江桥岩体周边严仙岭和金管冲铀矿形成于 47~75Ma (Xiong Zuosheng et al.,2015)。衡阳市车江铜矿赋存于"车江组"地层中,为典型的沉积型矿床,形成时代应与沉积时代近于一致,为第三纪—晚白垩世(Hu Jimin and Zeng Deming,1980;Zhong Jianhua and Li Zian,1997)。衡阳盆地内部发育多处盐类矿矿床,包括硬石膏-钙芒硝-石盐-石膏等,矿体呈层状、透镜状赋存于下第三系流霞市组的茶山坳段,面积达 800km^2,也代表了新生代早—中期的成矿事件(Long Guozhong and Wang Jilian,1994)。衡阳盆地内部及其周缘分布矿床从时空上均归属于华南(以南岭为主)的中、新生代成矿带内,暗示其可能与地幔柱(热点构造)作用关系密切(Wang Denghong,1998)。

4.7 成矿物质可能来自于地幔

前人对水口山铅锌矿、柏坊铜矿等的研究表明成矿物质具有多来源特点,深部来源的证据也是显著的。如,柏坊铜矿中总硫的同位素组成为 0‰(Wan Keyong,2008),这是幔源硫的典型特征。老鸦巢和康家湾矿石的 $\delta^{34}S$ 值变化范围为 -2.5‰~+2.8‰,均值为 0.62‰,也指示了深源硫的特征

(Li Yongsheng et al.,2012)。祁东清水塘与黑云母花岗岩相关铅锌矿、留书塘与花岗闪长岩相关的铅锌矿的硫、碳、氢、氧同位素也均显示以幔源为主(Cheng Shunbo et al.,2017;Lu Rui et al.,2017)。衡阳盆地西侧关帝庙岩体内部的煌斑岩具有明显的金矿化的证据,Xiao Wenzhou et al.(2016)获得关帝庙岩体周边及其内部的云斜煌斑岩和云煌岩均具有较高的 Ag、Au 丰度(Au:$0.09\times10^{-6}\sim0.19\times10^{-6}$;Ag:$5\times10^{-6}\sim9\times10^{-6}$),为地壳丰度的数十倍,暗示着地幔很有可能是该区域金、银矿化的来源。衡阳盆地西北侧锡矿山锑矿区的石英包裹体中的 H_2,围岩蚀变中的重晶石化和萤石化,煌斑岩中高的 Sb 含量($19.3\times10^{-6}\sim380\times10^{-6}$),以及矿石中 $\delta^{34}S$ 值集中于$-5‰\sim+5‰$的特征也显示了成矿物质的幔源信息(Li Shengsi,1996)。

5　对衡阳盆地关键矿产深部探测的启示

衡阳盆地目前已经发现矿产 68 种,矿床、矿点 876 处,其中铁、锡、金、铜、重晶石、盐岩、芒硝、高岭土和钠长石名列湖南省前茅。以铀、钨、锡、铌、钽、铋、碲、萤石等为代表的战略性矿产在盆地内部也大量分布。这些矿产主要分布于衡阳盆地及周边山区,但探明储量的矿产地还不到 1/6,具有较大的找矿前景。近年来,衡阳盆地又探明了 3 个特大型矿床,其中,被誉为"第二个水口山"的留书塘铅锌矿,已探明储量 130 万 t,潜在经济价值 130 多亿元;石鼓区七里井钙芒硝矿,已探明储量超过 2.6 亿 t,潜在经济价值 300 亿元;衡南县塘家冲铅锌多金属矿,其中已探明黄金资源储量 1.2 t,是湖南发现的第一个红土型金矿。

5.1　多种类型的矿产资源

多种类型的矿产资源、同一矿种的不同类型、同一类型的不同矿种在同一空间内均出现,这是衡阳盆地成矿的一个显著的特点。衡阳盆地内部既有砂岩型的铜矿,也有砂岩型的铀矿;既有热液型的锡矿也有砂矿型的锡矿;铅锌矿既有矽卡岩型块状、似层状矿体,也有脉状矿体的存在;钨矿有高品位的石英脉型,也有低品位大吨位的岩体型(斑岩型)。特别有意义的是,铜铅锌等硫化物矿床中出现氧化物型的铀矿。如水口山铅锌矿和柏坊铜矿中均共伴生有铀(柏坊也是我国第一个采用细菌浸出法从选矿尾砂中提取铜和铀的矿山),水口山铅锌矿中碲和镉也达到工业品位,虽然其成矿机制还有待于研究,但事实启发我们要避免单一的就矿找矿,需要从成矿系列的角度拓展找矿思路。即便是铀矿,王冲矿区的铀矿产于元古宇浅变质岩中,而位于王冲矿点以南的伴塘矿点则产于断层附近的浅色砂岩中(Zhang Jinye,1994a)。另外,在谭子山探山岭矿段大型重晶石矿床(2778 万 t)中伴生铜达 7.58 万 t(品位达 0.665%),不但具有开采价值,也给出了传统的非金属矿产与金属矿产、传统的内生矿产与外生矿产之间的界线需要打破的实例,尽管重晶石是属于内生还是外生还有待于研究。显然,以往不同工业部门分别部署不同矿种(核工业地质队伍只找铀矿,化工地质队只找化工矿产等)的找矿工作的常规需要打破了。

5.2　内生外成的成矿格局

衡阳盆地内部以发育丰富的外生矿床为特征,"内生外成"是该区域外生矿床主要的成矿机制。传统对"内生外成"作用的理解为成矿物质来源于内生作用,而成矿过程为外生作用。例如,卤水锂矿成矿作用过程中,锂的来源可能是深部卤水的补给,也可以是富锂花岗岩在风化过程中,锂被黏土矿物吸附而发生迁移,进而富集成矿(Wang Denghong et al.,2017)。然而,衡阳盆地的外生矿床的类型复杂多样,且与内生矿床之间的空间和成因联系十分紧密。内生作用过程不仅仅为外生提供成矿物质,其本身也是资源量可观的矿体。以龙王山金矿为例,金矿类型主要为铁帽型(风化壳型),为典型的外生矿床,金的来源被认为是原处于顶部的岩体/矿体在风化过程中迁移富集于褐铁矿层内。实际上,龙王山矿区深部发育有多个隐爆角砾岩型金矿体。大义山岩体周边发育有砂矿型锡矿体,但在大义山岩体内部,也是有多个内生锡矿床(点)。此外,内生作用对外生矿床的叠加也是该区成矿作用的重要特征。Feng Yuzhou et al.(2017)认为柏坊铜(铀)矿为沉积改造型矿床,深部岩浆热液对白垩系 Cu 的沉积富集层进行了叠加和改造,最终形成工业矿体。

值得注意的是,关帝庙隆起边部出露的寒武纪地层具有较高的 Cu、Pb、Zn、U 含量,不应该排除外生内成作用的存在,即在后期的热事件中,原始富集层发生重熔,或者岩浆侵位过程中萃取了原始富集层中的矿质,进而形成富含矿质的熔流体。因而,对衡阳盆地的内外生矿床的勘查工作需综合开展,避免单一关注外生矿床,而忽略了深部、周边的内生矿床。也要避免在对内生矿床勘探时忽略可能存在的外生矿床。

5.3 复杂的构造格局

衡阳盆地构造包括盆地基底断裂,盖层断裂,以及盆地周缘大规模的褶皱、穹隆构造等,表现出多期次多级别叠加改造的格局。构造作用对成矿的控制十分显著,例如关帝庙岩体内部的石桥铺铅锌矿受控于 NNE 向的 F1、F4、F9 断裂控制,水口山铅锌矿体受老鸦巢倒转背斜和康家湾倒转背斜之间的复合部位控制,杨林坳钨矿产于莱阳-临武 NS 向构造体系的 NNW 向断裂中。控矿构造(成矿有利构造)往往不是局部的,范围往往跨度很大,矿种类型也是十分丰富。①沿着 NE 向的株洲-双牌深大断裂带自 NE 向 SW 边缘依次分布有罗渡铀矿、马迹铅锌矿点、国庆矿点、黑石坨矿床、盐田桥矿床、谭子山重晶石(铜)矿床、白鹤铺铜(钴)矿床、留书塘铅锌矿床,形成沿深大断裂两侧分布的多金属成矿带。依此来看,断裂与盆地沉积盖层复合区域深部有很大的找矿前景。又如,NW 向的邵阳-郴州深大断裂带内分布有锡矿山锑矿、清水塘铅锌矿、石桥铺铅锌(铀)矿等一系列规模不等的矿床,且在与株洲-双牌深大断裂带、羊角塘-五峰仙断裂带交汇处,出现了留书塘大型铅锌多金属矿床。②穹隆构造与成矿的关系也不可忽视,盆地周边发育多个穹隆-关帝庙穹隆、川口隆起、紫云山穹隆等。川口隆起西侧与常德-安仁断裂的多组次级断裂相交,为成矿热液的运移和卸载提供了极其有利的空间。而板溪群的浅变质板岩又为其形成良好的盖层,在川口隆起周边形成了多个规模不等的钨、铜、铁、铅锌、萤石矿床。③复杂褶皱与断裂,不整合面等叠加控矿,如水口山铅锌多金属矿床,杨林坳钨矿床等。

因此,深大断裂周围,多向断裂交汇部位,断裂与穹隆、褶皱接合部位均是成矿有利地带。在找矿勘查中,对看似复杂的构造组合需跳出单一矿床(种)和单一构造,从宏观构造入手,结合微观构造,并对其进行解体和分组考虑,找准成矿有利构造组合。

6 衡阳盆地关键矿产深部探测的建议

衡阳盆地有很多跟矿有关的地名,如锡平、锡皮岭、铜钱崖、金盆、金溪庙等,还有些跟蚀变、构造等成矿地质现象有关的地名如紫云山岩体,都可以作为找矿标志,但此处主要探讨深部找矿的一些问题。

6.1 盆地型钨矿横向对比

近年来在江西连续探明了大湖塘和朱溪两个世界级的超过百万吨的超大型钨矿床,其类型与衡阳盆地探明的钨矿床不同,成矿条件和成矿环境也不一样,但对衡阳盆地的找矿具有一定的启示意义。如位于同一Ⅲ级成矿带东段(即全国统一编号的Ⅲ71 成矿带——武功山-杭州湾 Cu-Pb-Zn-Ag-Au-W-Sn-Nb-Ta-Mn-海泡石-萤石-硅灰石成矿带; Xu Zhigang et al., 2008)的朱溪钨矿在地表并没有发育南岭那样的大面积花岗岩,位于同一成矿带西端衡阳盆地的毛湾等取得新进展的钨矿区在地表也只是出露小岩体;但是,朱溪主要的超大型矿体一方面受到深部隐伏岩体的控制,另一方面也受到元古宇变质基底与古生代沉积建造之间不整合面及其衍生出来的构造界面、岩性界面及地球化学界面等多种因素的控制,而衡阳盆地东南部也普遍存在类似的构造界面,元古宙板溪群被白垩系陆相碎屑岩不整合覆盖,碳质、钙质板岩与硅质碎屑岩之间的岩性和地球化学界面也与朱溪矿区十分相似,因此在深部找矿的过程中是值得横向对比的。此外,垂向矿化分带也是完全可以进行对比的,例如衡阳盆地盐田桥矿区在铜矿体的深部发现了钨矿化,这个特征刚好与发育小型铜矿(地表)和大型钨矿(深部)格局的朱溪矿区十分类似。从这个角度看,衡阳盆地地表的铜矿与深部的矽卡岩型钨矿之间存在关联性的可能性并不能排除(图 3)。因而,加强不同位置,不同类型矿床与衡阳盆地进行横向对比,对该区域深部找矿和新矿床的发现意义重大。

6.2 盆地热液型矿床常见逆向分带

盆地中的矿床往往被认为是“沉积型”或层控型,但衡阳盆地内部及周边的铜、铅锌、铀、钨、锡、钠长石等矿床均以热液型为主,而且可以出现逆向分带,即高温矿物组合在浅部、低温矿物组合在深部。尽管逆向分带在华南成矿省是常见现象,如广西的大厂锡多金属矿床也出现晚期的逆向分带,但中新生代盆地中热液矿床的逆向分带是与成矿构造环境的相对开放密切相关的,成矿流体存在多次脉动上侵而反复成矿的可能性。如在盆地东部川口矿田中的石英脉型钨矿区,岩体内部是 W-Mo-Bi 的高温组合,下部则是 Zn-Cu-Pb-S 的低温组合,与赣南粤北的石英脉型钨矿恰好相反。这种现象对于找矿的意义是很大的,即出现高温组合并不意味着矿体、矿脉被剥蚀得差不多了,而是意味着深部可能还有其他类型的矿石。

此外,衡阳盆地多个矿区出现的低温矿物组合也均意味着深部具有找矿潜力。如,柏坊铜矿的自然铜、汞银矿、自然银、沥青铀矿等(Gong Fanying et al.,2013),而水口山坑道常见的蚀变也是方解石

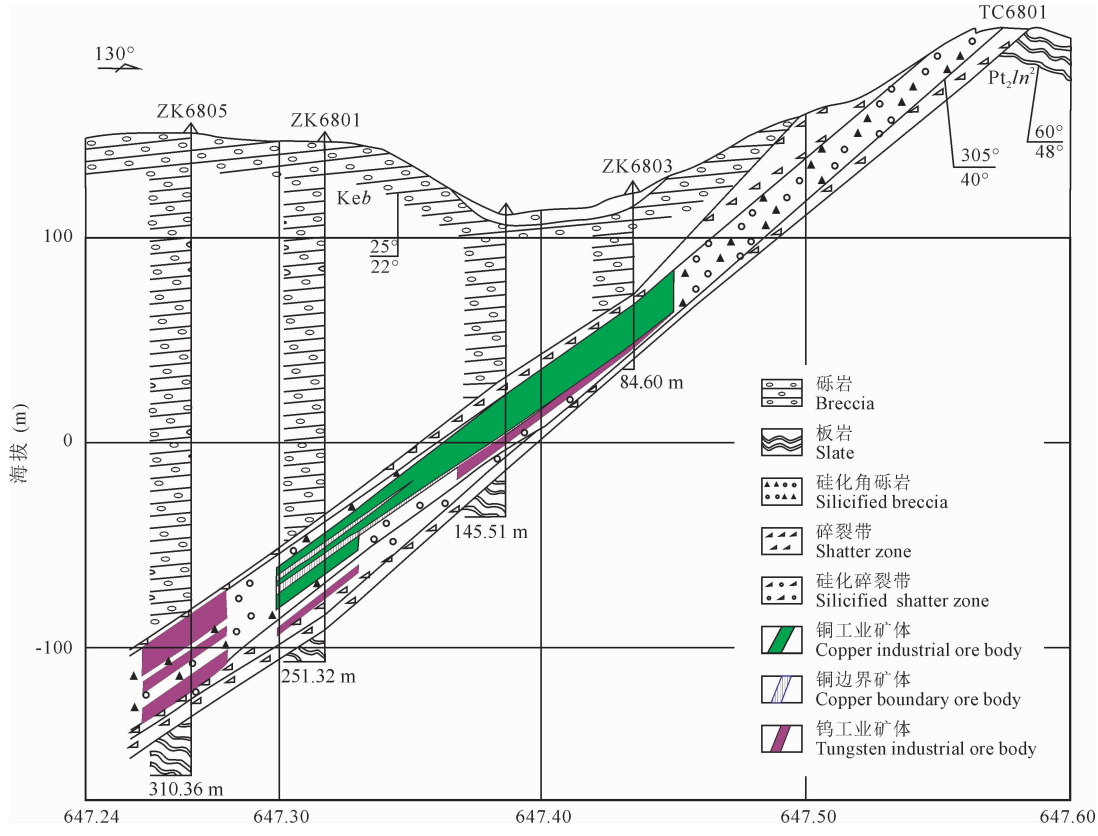


图 3　盐田桥矿区 68 号勘探线剖面图(据 Wang Binhai et al.,2017)

Fig. 3　Geological section along No. 67 exploratory line (after Wang Binhai et al.,2017)

化等低温蚀变,方解石脉充填于多种方向不同性质的断裂中,其深部值得继续找矿。

值得探讨的是,Zhong Jianhua et al. (1995)利用矿石中有机岩石学均质镜质组反射率测定的办法反演古地温,得到车江铜矿的成矿温度不超过 95℃的结论,进而认为车江铜矿的成因"仅与生物和有机质有关,是一种纯粹的广义沉积型铜矿"。鉴于该文还指出存在"桔红色斑铜矿交代镜质组碎片",并不能排除成矿与岩浆作用有关。因为,既然是"交代"那就不是同生,镜质组的温度不能代表成矿温度,而成矿温度低于 95℃也并不能作为成矿与岩浆作用无关的依据,更不能排除深部找矿的前景。

7　结论

(1)衡阳盆地及其周缘矿产资源类型和矿床成因类型均十分丰富。非金属-多金属成矿作用集中于中—新生代,并与区域岩浆活动之间具有明显的专属性。

(2)衡阳盆地形态特征、重力异常、岩浆岩和成矿元素组合及成矿作用均与地幔柱活动具有显著的相关性,表明在衡阳盆地形成和发展演化过程中,很可能受到地幔柱作用的影响;

(3)在衡阳盆地找矿勘查中:①注意多矿种共伴生现象,加强矿产资源的综合评价和利用;②注意对衡阳盆地内外生成矿作用的综合考量,打破传统的单一寻找内生矿床或单一寻找外生矿床思路,加强内外生一体化勘查工作;③注意"宏观+微观"构造格局与成矿关系(深大断裂两侧及其交汇部位,断裂与穹隆边部的接触带是成矿的有利地带),加强对有利成矿构造的识别和分组工作;④ 注意矿床成矿元素组合分带现象,加强成矿元素正向-逆向分带的研究工作。

致谢:感谢审稿专家提出宝贵的意见和建议!谨致谢忱!

References

Chen Weifeng, Chen Peirong, Zhou Xinmin, Huang Hongye, Ding Xing, Sun Tao. 2006. Single-zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of the Yangmingshan granitic plution in Hunan, South China and its petrogenetic study. Acta Geologica Sinica, 80 (7): 1065～1077 (in Chinese with English abstract).

Chen Yuchuan, Chen Zhenhui, Zeng Zailin, Zhao Zheng, Zhao Bin, Wang Denghong, Zhang Yongzhong, Li Jianguo, Zhou Xinpeng, Li Jiangdong. 2013. Research on the site selection of Nanling Scientific Drilling-1. Geology in China, 40(3): 659～

670 (in Chinese without English abstract).

Chen Yuchuan, Wang Denghong, Xu Zhigang, Huang Fan. 2014. Outline of regional metallogeny of ore deposits associated with the Mesozoic magmatism in south China, Geotectonicaet Metallogenia, 38(2): 219～229 (in Chinese with English abstract).

Cheng Shunbo, Wu Zhihua, Liu Zhongpeng, Liu Ahui, Ma Liyan, Lu Youyue. 2017. Sulfur and lead isotope geochemistry of the Liushutang lead-zinc deposit in Hunan Province and its significance. Geological Bulletin of China, 36(5): 846～856 (in Chinese with English abstract).

Cheng Yuqi. 1994. Concise Regional Geology of China. Beijing: Geological Publishing House, 1～539 (in Chinese without English abstract).

Dai Fangyuan, Chen Bihe, Liu Fuguo. 2008. Characteristics and geological significance of vein rocks in Guandimiao area, Hunan. Land & Resources Herald, 5(1): 33～36 (in Chinese without English abstract).

Feng Yuzhou, Shao Yongjun, Ge Chao, Jiang Mengtong, Song Zeyou. 2017. Geological characteristics and genetic analysis of Bofang deposit in Hengyang, Hunan Province. Southern Metals, (2): 29～31 (in Chinese with English abstract).

Gilder S A, Keller G R, Luo M, Goodell P C. 1991. Timing and spatial distribution of rifting in China. Tectonophysics, 197: 225～243.

Gong Fanying, Li Yongsheng, Zhen Shimin, Qi Fanyu, Gong Xiaodong. 2013. Preliminary study on the genesis ofthe deposit and geological characteristics of the Baifang copper deposit, Hunan. Acta Mineralogica Sinica, (S2): 152～153 (in Chinese).

Guo Aimin, Chen Bihe, Chen Jianfeng, Du Yun, Zheng Zhengfu, Zhou Chao, Tian Lei, Fan Hui. 2017. SHRIMP zircon U-Pb age of Tashangranitic pluton from Hunan Province and its geological significance. Geological Bulletin of China, 36 (2～3): 459～465 (in Chinese with English abstract).

Hu Jimin, Zeng Demin. 1980. On the geological age of the Chejiang formation in the Hengyang basin. Oil & Gas Geology, 1(2): 159～165 (in Chinese with English abstract).

Huang Jinchuan. 2016. Isotope Chronology and diagenesis and mineralization mechanism of Shuikoushan lead-zinc-gold deposit, Hunan Province. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).

Jia Dacheng, Hu Ruizhong, Xie Guiqing. 2002. Trace element geochemical characteristics and gensis of Mesozoic mafic dikes in Northeast Hunan Province. Geology-Geochemistry, 30(3): 33～39 (in Chinese with English abstract).

Jia Dacheng, Hu Ruizhong, Li Dongyang, Lu Yan. 2004. Ore-controlling activity of the mantle plume for the large metallogenic centralized region in southeastern Hunan Province, China. GeologyAnd Prospecting, 40(2): 32～35 (in Chinese with English abstract).

Jiang Guoqing, Qin Jinning, Cai Fucheng, Zhou Xiping, Fei Tianwei, Ye Guofu. 2014. Tungsten mineralization characteristics and genesis investigation of the Wubeichong deposit in Chuankou field. Journal of University of South China (Science and Technology), 28(3): 33～39 (in Chinese with English abstract).

Ju Peijiao, Lai Jianqing, Mo Qingyun, Tao Shilong. 2015. Characteristics offluid inclusions in Baojinshan gold deposit, Hunan Province. Acta Mineralogica Sinica, (s1): 586 (in Chinese without English abstract).

Li Fushun. 2012. Analysis onprospecting direction and potential of Hengyang basin in Qinzhou-Hangcheng metallogenic belt. Geology and Mineral Resources of South China, 28(4): 360～368 (in Chinese with English abstract).

Li Shengsi. 1996. Evolution of antimony mineralization by the mantle plume of deep fluid incentral Hunan. Hunan Geology, (3): 137～142 (in Chinese with English abstract).

Li X H. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China. Journal of Asian Earth Sciences, 18: 293～305.

Li Yong, Zhang Yueqiao, Su Jinbao, Li Jianhua, Dong Shuwen. 2015. Zircon U-Pbdating of Dayishan and Tashan plutons in Hunan Province and its tectonic implications. Acta Geoscientica Sinica, 36(3): 303～312 (in Chinese with English abstract).

Li Yongsheng, Zhen Shimin, Gong Fanying, Gong Xiaodong, Du Zezhong, Jia Delong. 2012. Discussion on sources of ore-forming materials in Shuikoushan Pb-Zn-Au-Ag ore field, Hunan Province. Mineral Deposits (S1): 571～572 (in Chinese).

Li Z X, Evans D A D, Zhang S. 2004. A 90° Spin on Rodinia: Possible causal links between the Neoproterozoic supercontinent, superplume, true polar wander and low-latitude glaciation. Earth and Planetary Science Letters, 220: 409～421.

Li Ziying, Li Xiuzhen, Lin Jinrong. 1999. On the Meso-Cenozoic mantle plume tectonics, its relationship to uranium metallogenesis and prospecting directions in South China. Uranium Geology, (1): 9～17 (in Chinese with English abstract).

Liang Xinquan, Guo Dingliang. 2002. Deep tectonic activatin and its shallow response in Hunan Province. Chinese Journal of Geology, 37(3): 332～34 (in Chinese with English abstract).

Liu Kai, Mao Jianren, Zhao Xilin, Ye Haimin, Hu Qing. 2014. Geological andgeochemical characteristics and genetic significance of the Ziyunshan pluton in Hunan Province. Acta Geologica Sinica, 88(2): 208～227 (in Chinese with English abstract).

Liu Wei, Zeng Zuoxun, Chen Deli, He Chicheng, Mo Haoran, Zeng Zhifang, Wei Yunxu, Xu Daliang. 2014. Petrogenesis of the Yangmingshancomposite granites in South Hunan Province: Constraints from geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotope. Acta Petrologica Sinica, 30(5): 1485～1504 (in Chinese with English abstract).

Liu Xun, Fu Derong. 1986. Some feature of the sedimentary facies and the tectonic development of the Hengyang Basin, HunanProvince. Acta Geoscientica Sinica, 8(2): 13～36 (in Chinese with English abstract).

Liu Yaorong, Kuang Jun, Ma Tieqiu, Bai Daoyuan. 2005. ^{40}Ar-^{39}Ar dating of biotitie in south Dayishan granite and its geological significance. Resources Survey & Environment, 26(4): 244～249 (in Chinese with English abstract).

Long Guozhong, Wang Jilian. 1994. Geologic properties and origin of salt deposits in Henyang Basin. Hunan Geology, (1): 22～24 (in Chinese with English abstract).

Lu Rui, Miao Baihu, Xu Zhaowen, Lu Jianjun, Wang Rucheng, Zuo Changhu, Qu Jinbao, Zhao Zengxia. 2017. Isotopic tracer of ore-forming material source from the Qingshuitang lead-zinc deposit, Qidong County, Hunan Province. Acta Geologica Sinica, 91(6): 1285～1298 (in Chinese with English abstract).

Lu Yulong, Peng Jiantang, Yang Jiehua, Hu A'xiang, Li Yukun, Tan Huiyue, Xiao Qiuyue. 2017. Petrogenesis of the Ziyunshanpluton in central Hunan, South China: constraints from zircon U-Pb dating, element geochemistry and Hf-O isotopes. Acta Petrologica Sinica, 33(6): 1705～1728 (in Chinese with English abstract).

Ma Liyan, Liu Shusheng, Fu Jianming, Cheng Shunbo, Lu Youyue, Mei Yuping. 2016. Petrogenesis of the Tashan-Yangmingshangrantic batholiths: Constranit from zircon U-Pb age, geochemistry and Sr-Nd isotopes. Acta Geologica Sinica, 90(2): 284～303 (in Chinese with English abstract).

Ma Tieqiu, Yan Quanren, Chen Huiming, Xiang Zhongjin, Zhou Kejun, Li Bin. 2012. Thezircon LA-ICP-MS U-Pb ages and geochemistry features of basalt at Xinshi, Youxian, Hunan Province. Geology and Mineral Resources of South China, 28(4): 340～349 (in Chinese with English abstract).

Ma Tieqiu, Li Bin, Chen Yanming, Zhou Kejun, Cha Jianzhang. 2013. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemical characteristics of Nanyue granites in Hunan Province. Geology of China, 40(6): 1712～1724 (in Chinese with English abstract).

Mao Jingwen, Xie Guiqing, Li Xiaofeng, Zhang Zuoheng, Wang Yitian, Wang Zhiliang, Zhao Caisheng, Yang Fuquan, Li Houmin. 2005. Geodynamicprocess and metallogeny: History and present research trend, with a special discussion on continental accretion and related metallogeny throughout geological history in South China. Mineral Deposits, 24(3): 193～205 (in Chinese with English abstract).

Meng L, Li Z X, Chen H, Li X H, Wang X C. 2012. Geochronological and geochemical results from Mesozoic basalts in southern South China block support the flat-lab subduction model. Lithos, 132～133 (none): 127～140.

Meng Lifeng. 2012. Mesozoic tectonic evolution of the Southeast China Block-A study from the Mesozoic basins. Zhejiang University, 1～145 (in Chinese with English abstract).

Ouyang Yufei, Huang Manxiang, Zheng Ping. 2008. Research on the ore-controlling factors and ore-forming rules of the Yanglin'ao W deposit in Chuankou, Hunan. Mineral Resources and Geology, 22(4): 285～288 (in Chinese with English abstract).

Peng Bingxia, Wang Yuejun, Fan Weiming, Peng Touping. 2006. LA-ICP MS zircon U-Pb dating of three typical granitic rocks in central Hunan and western Guangdong and its diagenetic significance. (10): 1597 (in Chinese without English abstract).

Peng Nengli, Wang Xianhui, Yang Junjun, Chen Di, Luo Lai, Luo Peng, Liu Tianyi. 2017. Re-Os dating of molybdenite from Sanjiaotan tungsten deposit in Chuankou area Hunan Province, and its geological implications. Mineral Deposits, 36(6): 1402～1414 (in Chinese with English abstract).

Rao Jiarong, Wang Jiheng. 1993. Deep structure in Hunan. Hunan Geology, (S1): 1～103(in Chinese).

Shi Guowei, Ouyang Zhiqiang, Li Xiancan. 2015. Geological characteristics and exploration prospect of the lead-zinc deposit in the Shiqiaopu, Shaodong County, Hunan. Land & Resources Herald, 12(3): 9～14 (in Chinese with English abstract).

Shu Liangshu, Zhou Xinmin, Deng Ping, Yu Xinqi, Wang bin, Zhu Fuping. 2004. Geological features and tectonic evolution of Meso-Cenozoic basins in southeastern China. Geological Bulletin of China, 23(Z2): 876～884 (in Chinese with English abstract).

Tong Hangshou. 2010. Mantle plumestructure and metallogenesis in South China. Uranium Geology, 26(2): 65～72 (in Chinese with English abstract).

Wan Keyong. 2008. Primary research on geochemistry of stable isotopes in the Bofang copper deposit, Hunan. Mineral Resources and Geology, 22(6): 541～542 (in Chinese with English abstract).

Wang Binhai, Wang Shichao, Zhou Qian, Zhu Bing, Qin Jinning, Liu Hongbin. 2017. Geological and geochemical characteristics of ore controlling structure of the Yantianqiao copper deposit in the northern margin of Hengyang Basin. Geological Science and Technology Information, 36(6): 232～238 (in Chinese with English abstract).

Wang Denghong. 1995. Current topics about hotspot. Geological Science and Technology Information, 14(1): 9～16 (in Chinese with English abstract).

Wang Denghong. 1996. Mineralizationsrelated to mantle plume and hotspot. Acta Geoscientica Sinica, 15(4): 393～400 (in Chinese with English abstract).

Wang Denghong. 1998. Mantle Plume and Mineralization. Beijing: Seismological Press, 1～160 (in Chinese).

Wang Denghong, Wang Chenghui, Sun Yan, Liu Shanbao, Rao Kuiyuan. 2017. New prograss and discussion on the survey and research of Li, Be, Ta ore deposits in China. Geology Survey of China, 4(5): 1～8 (in Chinese with English abstract).

Wang Min, Wang Yuhao, Zhao Yajuan, Xia Shuai, Xu Hongtao, Niu Shuyin, Sun Aiqun. 2015. Analysis of gravity anomalies in Hengyang Basin and its surroundings. Land & Resources Herald, 12(4):30～34 (in Chinese).

Wang Wuli, Guo Shengzhe. 2012. The evolution and transformation of Paleo-Asian and Paleo-Pacific tectonic domain of Northeast China. Geology and Resources, 21(1): 27～34 (in Chinese with English abstract).

Wu Guangyin, Pan Zhongfang, Hou Zengqian, Li Jindong, Che Qinjian, Chen Huiming. 2005. Ore body distribution pattern, ore-controlling factors and prospecting potentiality in the Dayishan tin deposit, Hunan Province. Geology and Prospecting, 41(2): 6～11 (in Chinese with English abstract).

Wu Zhihua, Wei Shaoliu, 2009. Metallogenic characteristics and pospecting direction of Liushutang lead-zinc deposit. Geology and Mineral Resources of South China, (4): 17～21 (in Chinese with English abstract).

Xia Wenchen. 1991. Geneticstratigraphic framework and its genetic relationship to oil and gas in Mesozoic and Cenozoic fault-controlled basins of eastern China. Geological Seience and Technology Information, 10(1): 41～48 (in Chinese with English abstract).

Xiao Wenzhou, Kuang Wenlong, Li Xueyu, Tan Yuyang, He Hongwei. 2016. Ore-control characteristics of the fault structure in the Qingshuitang ore district of Hengyang, Hunan Province. Journal of Geology, 40(1): 97～106 (in Chinese with English abstract).

Xiong Zuosheng, Liu Xu, He Chunming, Huang Zhongyuan, Huang Shaoqiong. 2015. Metallogenic Xiangdong Ya Jiangqiao rock uranium polymetallic ore and discussion on the geological conditions and prospecting potential. Journal of Hunan Institute of Science and Technology (Natural Sciences), 28(2): 74～80 (in Chinese with English abstract).

Xu Zhigang, Chen Yuchuan, Wang Denghong, Chen Zhenghui, Li Houmin. 2008. The Scheme of the Classification of the Minerogenetic Units in China. Beijing: Geological Publishing House, 1～128 (in Chinese with English abstract).

Zhang Jinye. 1994a. Stripping faults of the western edge of the Hengshan metamorphic core complex and their control on uranium mineralization. Uranium Geology, (3): 44～149 (in Chinese with English abstract).

Zhang Jinye. 1994b. Tectonic feature of the western edge in the metamorphic nucleus complex of Hengshan. Journal of East China Geological Institute, 17(1): 18～22 (in Chinese with English abstract).

Zhang Xiaojun, Luo Hua, Wu Zhihua, Fan Xianwang, Xiong Jun, Yang Jie, Mu Jinyi. 2014. Rb-Srisochron age and its geological significance of Baishaziling tin deposit in Dayishan ore field, Hunan Province. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 39(10): 1422～1432 (in Chinese with English abstract).

Zhang Yongxia. 1984. Ring structure and their genetic mechanism in the South China region. Geological Review, 30(5): 437～445 (in Chinese with English abstract).

Zhang Yongxia. 1985. The activities of mantle heat source and landmass drift in the South China area. Petroleum Geology & Experiment, 7(2): 124～131 (in Chinese with English abstract).

Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Li Jianhua, Cui Jianjun, Shi Wei, Su Jinbao, Li Yong. 2012. Thenew progress in the study of Mesozoic tectonics of South China. Acta Geoscientica Sinica, 33(3): 257～279 (in Chinese with English abstract).

Zhao Zengxia, Xu Zhaowen, Miao Baihu, Zuo Changhu, Lu Jianjun, Lu Rui, Chen Jinquan. 2015. Diageneticage and material source of the Guandimiao granitic batholith, Hengyang City, Hunan Province. Acta Geologica Sinica, 89

(7): 1219～1230 (in Chinese with English abstract).
Zhao Zengxia, Xu Zhaowen, Zuo Changhu, Lu Jianjun, Wang Rucheng, Miao Baihu, Lu Rui. 2017. Emplacementtime and material source of the southern Dayishan granitic batholith (Taipingshan body), Guiyang City, Hunan Province. Geological Review, 63(2): 395～412 (in Chinese with English abstract).
Zhao Zhenhua, Bao Zhiwei, Zhang Boyou. 1998. Geochemical characteristics of Mesozoic basalts in southern Hunan. Science in China (Series D), 28: 7～14 (in Chinese without English abstract).
Zheng Ping, Xu Haizhen, Huang Manxiang. 2007. Studies on thegenesis and metallogenic model of Yanglin'ao tungsten deposit, Hengnan, Hunan Province. Mineral Resources and Geology, 21(2): 126～130 (in Chinese with English abstract).
Zhong Jianhua, Luo Shuan, Wang Jingcheng. 1995. The highest temperature of the Mayang and Chejiang sandstone copper deposits in Hunan. Mineral Resources and Geology, 9(3): 191～194 (in Chinese with English abstract).
Zhong Jianhua, Li Zian. 1997. Genesis and metallogenic model of Chejiang Cu deposit in Hunan Province. Mineral Deposits, (3): 243～253 (in Chinese).
Zuo Changhu, Lu Rui, Zhao Zengxia, Xu Zhaowen, Lu Jianjun, Wang Rucheng, Chen Jinquan. 2014. Characterization of element geochemistry, LA-ICP-MS zircon U-Pb age, and Hf isotope of granodiorite in the Shuikoushan deposit, Changning, Hunan Province. Geological Review, 60(4): 811～823.

参 考 文 献

陈卫锋,陈培荣,周新民,黄宏业,丁兴,孙涛. 2006. 湖南阳明山岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成因研究. 地质学报,80(7):1065～1077.
陈毓川,陈郑辉,曾载淋,赵正,赵斌,王登红,张永忠,李建国,周新鹏,李江东. 2013. 南岭科学钻探第一孔选址研究. 中国地质,40(3):659～670.
陈毓川,王登红,徐志刚,黄凡. 2014. 华南区域成矿和中生代岩浆成矿规律概要. 大地构造与成矿,38(2):219～229.
程顺波,吴志华,刘重芃,刘阿睢,马丽艳,卢友月. 2017. 湖南省留 2 书塘铅锌矿床 S、Pb 同位素特征及意义. 地质通报,36(5):846～856.
程裕淇. 1994. 中国区域地质概论. 北京:地质出版社,1～539.
戴方元,陈必河,刘富国. 2008. 湖南关帝庙地区脉岩特征及其地质意义. 国土资源导刊,5(1):33～36.
丁汉铎,姚文生,唐志中,等. 2013. 扬子地幔柱存在及其演化的地球化学证据. 中国地质学会 2013 年学术年会摘要集,451～457.
冯雨周,邵拥军,葛超,蒋梦同,宋泽友. 2017. 湖南衡阳柏坊铜矿床地质特征及成因分析. 南方金属,(2):29～31.
公凡影,李永胜,甄世民,齐钒宇,巩小栋. 2013. 湖南柏坊铜矿矿床地质特征及矿床成因初探. 矿物学报,(S2):152～153.
郭爱民,陈必河,陈剑锋,杜云,郑正福,周超, 田磊,樊晖 . 2017. 湖南塔山花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质通报,36(2-3):459～465.
胡济民,曾德敏. 1980. 试论衡阳盆地"车江组"的地质时代. 石油与天然气地质,1(2):159～165.
黄金川. 2016. 湖南水口山铅锌金矿床同位素年代学及成岩成矿机理研究. 中国科学院大学博士学位论文,1～145.
贾大成,胡瑞忠,谢桂青. 2002. 湘东北中生代基性岩脉微量元素地球化学特征及岩石成因. 地球与环境, 30(3):33～39.
贾大成,胡瑞忠,李东阳, 卢焘. 2004. 湘东南地幔柱对大规模成矿的控矿作用. 地质与勘探, 40(2):32～35.
蒋国清,覃金宁,蔡富成,周锡平,费天伟,叶国阜. 2014. 川口矿田屋背冲矿区钨矿地质特征及成因探讨. 南华大学学报(自然科学版),28(3):33～39.
鞠培姣,赖健清,莫青云,陶诗龙. 2015. 湖南省包金山金矿流体包裹体特征. 矿物学报,(s1):586.
黎盛斯. 1996. 湘中锑矿深源流体的地幔柱成矿演化. 国土资源导刊,(3):137～142.
李福顺. 2012. 钦杭成矿带衡阳盆地找矿方向及前景分析. 华南地质与矿产,28(4):360～368.
李永胜,甄世民,公凡影,巩小栋,杜泽忠,贾德龙. 2012. 湖南水口山铅锌金银矿田成矿物质来源探讨. 矿床地质(S1):571～572.
李勇,张岳桥,苏金宝,李建华,董树文. 2015. 湖南大义山、塔山岩体锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. 地球学报,36(3):303～312.
李子颖,李秀珍,林锦荣. 1999. 试论华南中新生代地幔柱构造铀成矿作用及其找矿方向. 铀矿地质,(1):9～17.
梁新权,郭定良. 2002. 湖南深部构造活化及其浅部响应. 地质科学,37(3):332～342.
刘凯,毛建仁,赵希林,叶海敏,胡青. 2014. 湖南紫云山岩体的地质地球化学特征及其成因意义. 地质学报,88(2):208～227.
刘伟,曾佐勋,陈德立,贺赤诚,莫皓然,曾志方,魏运许,徐大良. 2014. 湖南阳明山复式花岗岩的岩石成因:锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素约束. 岩石学报,30(5):1485～1504.
刘训,付德荣. 1986. 湖南衡阳盆地沉积相及构造发展的若干问题. 地球学报,8(2):13～36.
刘耀荣,邝军,马铁球,柏道远. 2005. 湖南大义山花岗岩南体黑云母^{40}Ar-^{39}Ar 定年及地质意义. 华东地质,26(4):244～249.
龙国中,王积廉. 1994. 衡阳盆地盐类矿床地质特征与矿床成因. 国土资源导刊,(1):22～24.
鲁玉龙,彭建堂,阳杰华,胡阿香,李玉坤,谭辉跃,肖秋越. 2017. 湘中紫云山岩体的成因:锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学及 Hf-O 同位素制约. 岩石学报,33(6):1705～1728.
路睿,缪柏虎,徐兆文,陆建军,王汝成,左昌虎,屈金宝,赵增霞. 2017. 湖南祁东清水塘铅锌矿床成矿物质来源同位素示踪. 地质学报,91(6):1285～1298.
马丽艳,刘树生,付建明,程顺波,卢友月,梅玉萍. 2016. 湖南塔山、阳明山花岗岩的岩石成因:来自锆石 U-Pb 年龄、地球化学及 Sr-Nd 同位素证据. 地质学报,90(2):284～303.
马铁球,闫全人,陈辉明,向忠金,周柯军,李彬. 2012. 湖南攸县新市玄武岩锆石 LA-ICP-MSU-Pb 定年及其地球化学特征. 华南地质与矿产,28(4):340～349.
马铁球,李彬,陈焰明,周柯军,查建章. 2013. 湖南南岳岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地球化学特征. 中国地质,40(6):1712～1724.
毛景文,谢桂青,李晓峰,张作衡,王义天,王志良,赵财胜,杨富全,李厚民. 2005. 大陆动力学演化与成矿研究:历史与现状——兼论华南地区在地质历史演化期间大陆增生与成矿作用. 矿床地质,24(3):193～205.
孟立丰. 2012. 华南中生代构造深化特征——来自沉积盆地的研究证据. 浙江大学博士学位论文,1～145.
欧阳玉飞,黄满湘,郑平. 2008. 湖南川口杨林坳钨矿床控矿因素与成矿规律研究. 矿产与地质,22(4):285～288.
彭冰霞,王岳军,范蔚茗,彭头平. 2006. 湖南中部和广东西部 3 个典型花岗质岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其成岩意义. 地质学报,(10):1597.
彭能立,王先辉,杨俊,陈迪,罗来,罗鹏,刘天一. 2017. 湖南川口三角潭钨矿床中辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其地质意义. 矿床地质,36(6):1402～1414.
饶家荣,王纪恒. 1993. 湖南深部构造. 湖南地质,(S1):1～103.
史国伟,欧阳志强,李先灿. 2015. 湖南邵东县石桥铺矿区铅锌矿地质特征及找矿前景探讨. 国土资源导刊,12(3):9～14.
舒良树,周新民,邓平,余心起,王彬,祖辅平. 2004. 中国东南部中、新生代盆地特征与构造演化. 地质通报,23(Z2):876～884.
宛克勇. 2008. 湖南柏坊铜矿床稳定同位素地球化学初步研究. 矿产与地质,22(6):541～542.
王宾海,王诗潮,周倩,祝兵,覃金宁,刘红兵. 2017. 衡阳盆地北缘盐田桥铜矿床成矿构造地质地球化学特征. 地质科技情报,36(6):232～238.
王登红. 1995. 热点研究述评. 地质科技情报,14(1):9～16.
王登红. 1996. 地慢柱与热点的成矿作用. 地球学报,15(4):393～400.
王登红. 1998. 地幔柱及其成矿作用. 北京:地震出版社,1～160.

王登红,王成辉,孙艳,刘善宝,饶魁元. 2017. 我国锂铍钽矿床调查研究进展及相关问题简述. 中国地质调查,4(5):1～8.
王敏,王雨豪,赵亚娟,夏帅,许宏涛,牛树银, 孙爱群. 2015. 衡阳盆地与周边重力异常的分析. 国土资源导刊,12(4):30～34.
王五力,郭胜哲. 2012. 中国东北古亚洲与古太平洋构造域演化与转换. 地质与资源,21(1):27～34.
吴志华,魏绍六. 2009. 留书塘铅锌矿床成矿特征与找矿方向. 华南地质与矿产,(4):17～21.
伍光英,潘仲芳,侯增谦,李金冬,车勤建,陈辉明. 2005. 湖南大义山锡多金属矿田矿体分布规律、控矿因素及找矿方向. 地质与勘探,41(2):6～11.
夏文臣. 1991. 中国东部中、新生代断陷盆地的成因地层格架及其与油气的关系. 地质科技情报,10(1):41～48.
肖文舟,匡文龙,李雪宇,谭玉阳,贺伟红. 2016. 湖南衡阳清水塘矿区断裂构造控矿特征. 地质学刊,40(1):97～106.
熊作胜,刘旭,何春明,黄中元,黄绍琼. 2015. 湘东丫江桥岩体西接触带铀多金属矿成矿地质条件及找矿前景探讨? 湖南理工学院学报(自然科学版),28(2): 74～80.
徐志刚,陈毓川,王登红,陈振辉,李厚民. 2008. 中国成矿区带划分方案. 北京:地质出版社,1～128.
张进业. 1994a. 衡山变质核杂岩体西缘剥离断层及其对铀成矿的控制作用. 铀矿地质,(3):44～149.
张进业. 1994b. 衡山变质核杂岩体西缘构造特征. 东华理工大学学报(自然科学版),17(1):18～22.
张晓军,罗华,吴志华,范先旺,熊俊,杨杰,牟金燚. 2014. 湖南大义山矿田白沙子岭锡矿床 Rb-Sr 同位素等时线年龄及其地质意义. 地球科学—中国地质大学学报,39(10):1422～1432.
张用夏. 1984. 华南地区环形构造及其成因. 地质论评,30(5):437～445.
张用夏. 1985. 华南地区地幔热源活动与陆块漂移. 石油实验地质,7(2):124～131.
张岳桥,董树文,李建华,崔建军,施炜,苏金宝,李勇. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展. 地球学报,33(3):257～279.
赵增霞,徐兆文,缪柏虎,左昌虎,陆建军,路睿,陈进全. 2015. 湖南衡阳关帝庙花岗岩岩基形成时代及物质来源探讨. 地质学报,89(7):1219～1230.
赵增霞,徐兆文,左昌虎,陆建军,王汝成,缪柏虎,路睿. 2017. 湖南桂阳大义山南体太坪山单元花岗岩形成时代及物质来源探讨. 地质论评,63(2):395～412.
赵振华,包志伟,张伯友. 1998. 湘南中生代玄武岩类地球化学特征. 中国科学,28:7～14.
郑平,徐海珍,黄满湘. 2007. 湖南衡南杨林坳钨矿床成因与成矿模式研究. 矿产与地质,21(2):126～130.
钟建华,罗书安,王竞成. 1995. 湖南麻阳、车江砂岩铜矿的最高成矿温度. 矿产与地质,9(3):191～194.
钟建华,李自安. 1997. 湖南车江铜矿的成因及成矿模式. 矿床地质,(3):243～253.
左昌虎,路睿,赵增霞,徐兆文,陆建军,王汝成. 2014. 湖南常宁水口山 Pb-Zn 矿区花岗闪长岩元素地球化学,LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征. 地质论评,60(4):811～823.

Discussion on the relationship between Hengyang basin and mantle plume and its implication for the deep prospecting of key minerals

QIN Jinhua[1)], WANG Denghong[*1)], CHEN Yuchuan[2)], ZHAO Ruyi[1,3)], WANG Chenghui[1)], JIANG Biao[1)]

1) *MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Naturals resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing*, 100037;

2) *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing*, 100037;

3) *School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang*, 330013

* *Corresponding author: wangdenghong@vip.sina.com*

Abstract

Hengyang Basin, one of the unique Mesozoic-Cenozoic continental sedimentary basin in south China, has drawn a lot of attention on the aspect of the special formation mechanism and highly concentrated mineral resources. The terrain of Hengyang Basin is characterized by typical "Mountain-Basin System". The regional gravity data show the characteristics of mantle uplift in Hengyang Basin. There are several deep faults intersect each other in EW, NW and NE direction, and a typical "arc structure" pattern. Moreover, the characteristics of igneous rocks and metallogenic element assemblage and isotope composition suggest a mantle origin. The properties show that the formation of the Hengyang Basin is genetically related to Mesozoic mantle plume of south China. The mineral resources in the Hengyang Basin and its surroundings are characterized by multiple minerals and intense enrichment. We found that the metallogenic age of Hengyang Basin span a long period of time dominated by the Meso-Cenozoic. The different ages mineralization and mineral assemblages have obvious specificity with regional magmatism and basin sedimentation. Hengyang basin and the surrounding areas are not only rich in non-ferrous metals and non-metallic minerals, but also key minerals such as W, Sn, Nb Ta, Bi, Te, U, etc. However, the least studied have been carried out in Hengyang Basin. Therefore, in the process of deep prospecting exploration, there are "four points of attention, four points of strengthening" should be paid more attention.

Key words: Hengyang basin; mantle plume; Mesozoic-Cenozoic; key minerals; deep prospecting