

doi: 10.12029/gc20200407

宋才见, 李谭伟, 叶颖颖, 姚伟, 曾芳. 2020. 南岭地区千里山岩体的空间形态及其与成矿的关系[J]. 中国地质, 47(4): 998–1009.
Song Caijian, Li Tanwei, Ye Yingying, Yao Wei, Zeng Fang. 2020. Spatial morphology of Qianlishan rock mass and its relationship with mineralization in Nanling region[J]. Geology in China, 47(4):998–1009(in Chinese with English abstract).

南岭地区千里山岩体的空间形态及其与成矿的关系

宋才见, 李谭伟, 叶颖颖, 姚伟, 曾芳

(湖南省地球物理地球化学勘查院, 湖南长沙 410116)

摘要: 千里山岩体是南岭地区与锡钨等矿产成矿关系密切的重要岩体, 研究其空间特征与控矿作用, 对于深部地质填图以及深部找矿预测具有重要意义。利用中比例尺重力资料, 确定了千里山岩体的隐伏边界; 通过对千里山岩体进行二维、三维模拟反演, 揭示了千里山岩体与王仙岭岩体的连接关系和空间形态特征以及与围岩的接触关系。推断认为: 千里山岩体与王仙岭岩体在深部相连, 呈大岩基产出, 并受到深大断裂控制; 两岩体三维形态整体表现为气球膨胀式轮廓。结合地质资料, 探讨了千里山岩体与成矿的关系, 分析认为深部岩基和构造为矿床提供了成矿物质来源、热源及上升通道。

关键词: 重力低异常; 岩体隐伏边界; 岩体空间形态; 深部岩基; 成矿关系; 地质调查工程; 湖南
中图分类号: P588.12¹ 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2020)04–0998–12

Spatial morphology of Qianlishan rock mass and its relationship with mineralization in Nanling region

SONG Caijian, LI Tanwei, YE Yingying, YAO Wei, ZENG Fang

(Hunan Academy of Geophysical and Geochemical Exploration, Changsha 410116, Hunan, China)

Abstract: Qianlishan rock mass is an important rock mass closely related to tin and tungsten mineralization in Nanling region. Studying its spatial characteristics and ore-controlling role is of great significance for deep geological mapping and deep prospecting and prediction. Using medium-scale gravity data the authors determined the hidden boundary of Qianlishan rock mass. Two-dimensional and three-dimensional simulation inversion revealed the connection relationship between Qianlishan rock mass and Wangxianling rock mass, the spatial morphological characteristics and the contact relationship with surrounding rock masses. It is inferred that the Qianlishan rock mass and the Wangxianling rock mass are connected in depth, and were produced in a large basement and controlled by deep and large faults, with the three-dimensional shape of the two rock masses being balloon expansive contour as a whole. On the basis of geological data, the relationship between Qianlishan rock mass and mineralization was discussed. It is concluded that deep bedrock and structure provided ore-forming material source, heat source and ascending channel for the deposit.

Key words: gravity low anomaly; hidden boundary of rock mass; spatial morphology of rock mass; deep bedrock; metallogenic

收稿日期: 2019–03–29; 改回日期: 2020–02–28

基金项目: 中国地质调查局“湖南千里山—瑶岗仙地区 1:5 万区域地质综合调查”子项目(12120114033401)资助。

作者简介: 宋才见, 男, 1962 年生, 研究员级高级工程师, 主要从事地球物理勘查综合研究; E-mail: scj-wt@163.com。

relationship; geological survey engineering; Hunan Province

About the first author: SONG Caijian, male, born in 1962, senior engineer, mainly engages in comprehensive geophysical exploration research; E-mail: scj-wt@163.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No. 12120114033401).

1 引言

南岭地区是中国重要的钨、锡矿产基地,亦是著名的花岗岩分布区。千里山岩体就是其中的典型代表之一。该岩体位于湖南省郴州市境内,南岭钨锡铅锌成矿带中段。被誉为“世界有色金属博物馆”的柿竹园钨锡钼铋多金属矿就位于千里山岩体东南侧内弯外接触带上(黄革非,2012),矿种140多个。该岩体作为出露面积不大的小岩体,形成了世界罕见的超大型钨锡钼铋多金属矿床,引发了国内外学者对小岩体成大矿机制的广泛关注(刘晓非等,2012)。

关于千里山岩体的地球物理研究,湖南省地质学校、湖南物探队分别做过简要的定性解释:剩余异常特征反映了岩体赋存的空间规律性^①,千里山局部异常是千里山半隐伏岩体的反映^②。

这些认识虽然为进一步研究打下了很好的基础,但也存在不细致、不全面、不深入的问题,至今还没有人利用中比例尺区域重力资料针对千里山岩体开展比较精细的定量反演工作。

通过在千里山—瑶岗仙地区开展1:5万区域地质综合调查,从重力角度研究了引起千里山重力低异常的主要地质因素,定量反演了千里山岩体的二维、三维空间形态,探讨了推断岩体与成矿的关系,提出了一些新的地质认识。这对于该地区的深部地质填图以及深部找矿预测与资源潜力评价具有重要意义。

根据地质资料,千里山岩体出露面积仅11 km²,但它却是世界级矿产博物馆,聚集了郴县柿竹园钨锡钼铋矿床等一批特大型—大中型矿床。这些矿产都与千里山岩体有关(席斌斌等,2006),但岩体出露面积小,这么多成矿物质哪里来?这是一个值得探讨的重要地质问题。

2 地质背景

研究区处于湖南华夏古板块(饶家荣等,2012)

东南部,炎陵—蓝山北东向逆冲深大断裂带与邵阳—郴州北西向基底断裂的交汇部位,以及由香花岭、骑田岭、王仙岭、千里山、宝峰仙、彭公庙、万洋山岩体组成的郴州—炎陵北东向岩浆岩带上(图1)。构造单元属华南褶皱系湘南加里东—印支穿插褶皱带(潘桂棠等,2009),或武夷山隆起区(席斌斌等,2006),或武夷—云开造山系(曾春芳等,2015),或华南造山系(一级构造)之华夏地块(二级构造)之武夷—云开隆起带(三级构造)(熊盛青等,2018)。

千里山岩体位于郴州五盖山背斜北东翼,东坡复式向斜中段仰起部位,东西向构造形迹主要有王仙岭—千里山隆起带,王仙岭、千里山一带有东西向褶皱与南北向褶皱产生的复合叠加。

千里山岩体周边地区主要出露地层有第四系、泥盆系(孟公坳组 D_{3m}、欧家冲组 D_{3o}、锡矿山组 D_{3x}、余田桥组 D_{3s}、跳马涧组 D_{2t}、棋子桥组 D_{2q})、石炭系(测水组 C_{1c}、梓门桥组 C_{1z}、石磴子组 C_{1s})、南华系(泗州山组 N_{h1s})。有研究资料认为千里山地区泥盆纪—石炭纪地层中的灰岩、含泥质灰岩、白云岩等碳酸盐岩是主要的有利赋矿层位(柏道远等,2005),主要产出钨、锡、铅、锌等有色金属矿产。其中泥盆系中统棋梓桥组云灰岩和上统余田桥组泥质条带状灰岩整合接触,是郴州市柿竹园钨、锡、钼、铋多金属矿的赋矿地层(黄革非,2012)。

千里山岩体出露面积约11 km²,大致南北向展布,呈岩株状产出,侵入于中上泥盆统岩层中,为一复式岩体,具有多期次侵入特征,与成矿关系密切(於崇文等,2003),是柿竹园 W、Sn、Mo、Bi 多金属矿床的成矿母岩(席斌斌等,2006)。千里山岩体形成于燕山早期,152~131 Ma(毛景文等,1995)或者(141±20)Ma^③,时代属晚侏罗世(J₃)(中国区域地质志·湖南志,2017),属陆源(陆壳硅铝质成分)改造重熔型(S型)酸性中浅层花岗岩(毛景文等,1995)。

第一次侵入体(γJ_3^a)分为边缘相和中心相。边缘相岩性以细粒、细中粒斑状黑云母花岗岩为主;

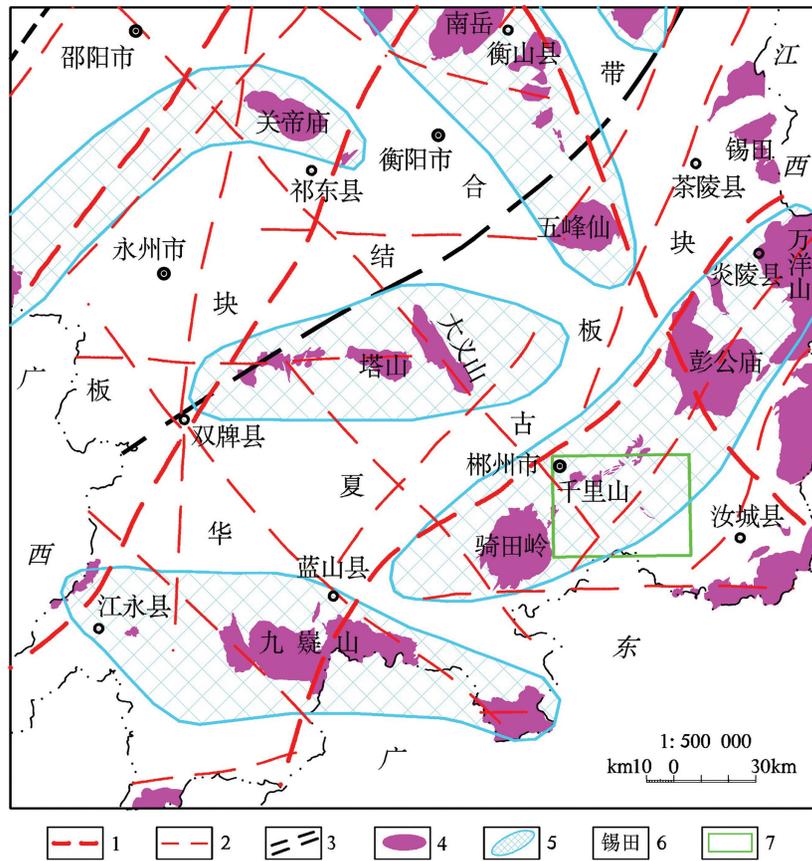


图1 千里山—瑶岗仙地区区域构造格架

(据湖南地质调查院,2017资料改编)

1—地壳断裂;2—基底断裂;3—板块拼接带;4—出露岩体;5—岩浆岩带;6—岩体名;7—研究区

Fig. 1 Regional tectonic framework map of Qianlishan-Yaogangxian area

(modified from Hunan Geological Survey Institute, 2017)

1-Crustal fault;2-Basement fault;3-Plate splicing zone;4-Exposed rock mass;5-Magmatic rock zone;6-Rock mass name;7-Research area

中心相岩性为中粗粒黑云母花岗岩。第二次侵入体(γJ_3^b)主要分布于第一次侵入体内,呈岩株产出,东南部与泥盆系上统余田桥组地层接触。与碳酸盐岩接触处多产生矽卡岩化、大理岩化,蚀变带宽约200 m。岩性为细粒斑状黑云母花岗岩。第三次侵入体(γJ_3^c)为小岩体群零星分布于千里山、水湖里一带,呈小岩株或小岩柱体侵入于第一、二次花岗岩中。岩性主要为细粒花岗岩。

千里山岩体围岩热变质明显,且变质带宽。内蚀变带有云英岩化、钾长石化、钠长石化、绢云母化、绿泥石化等;外蚀变带有矽卡岩化、硅化、大理岩化等。

云英岩化:沿千里山花岗岩体内接触带广泛分布。有钨、锡、钼、铋、铜等矿化,在蚀变强烈的地段云英岩体本身就是矿体。矽卡岩化:发育于千里山

岩体外接触带碳酸盐岩中。早期伴有钨、锡、铋矿化及磁黄铁矿化、黄铜矿化等;后期矽卡岩化复杂,并叠加钨、锡、钼、铋等矿化,复杂矽卡岩往往就是矿体。

有色金属主要有钨、锡、钼、铋、铜、铅、锌等。金属矿产在空间上有明显的分布规律:主要矿床较集中分布于五盖山背斜北缘、千里山岩体周围和王仙岭—千里山两岩体之间(图2)。大、中型矿床主要分布在五盖山背斜北缘东翼、千里山岩体的东南侧等处。矿床空间分布和矿床类型受岩浆活动、构造形迹和岩性的联合控制(黄革非,2012;中国区域地质志·湖南志,2017)。

3 密度特征

根据千里山地区岩石标本实测密度资料,经加

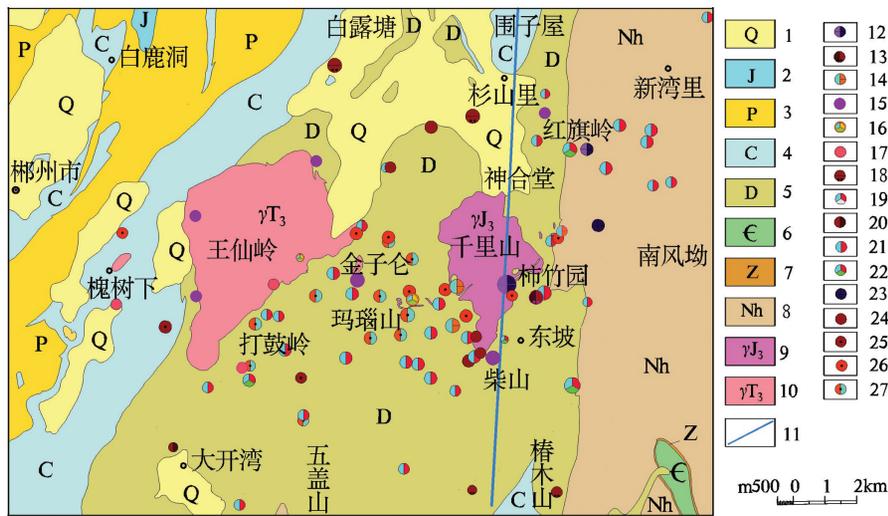


图2 千里山地区地质矿产图

1—第四系;2—侏罗系;3—二叠系;4—石炭系;5—泥盆系;6—寒武系;7—震旦系;8—南华系;9—晚侏罗世花岗岩;10—晚三叠世花岗岩;
11—重力反演剖面;12—钨锡钼铋矿;13—钨钼矿;14—锡铋矿;15—钨矿;16—钨铅锌铋多金属矿;17—锡矿;18—砂锡矿;19—银铅锌矿;
20—银铋矿;21—铅锌矿;22—铅锌铜多金属;23—银铅锌镉多金属矿;24—铜矿;25—锰矿;26—铁矿;27—铁锰矿

Fig. 2 Geological and mineral resources map of Qianli Mountain area

1—Quaternary; 2—Jurassic; 3—Permian; 4—Carboniferous; 5—Devonian; 6—Cambrian; 7—Sinian; 8—Nanhua system; 9—Late Jurassic granite;
10—Late Triassic granite; 11—Gravity inversion profile; 12—W—Sn—Mo—Bi deposit; 13—W—Mmo deposit; 14—Sn—Bi deposit; 15—W deposit; 16—
W—Pb—Zn—Sb polymetallic deposit; 17—Sn deposit; 18—Scheelite; 19—Ag—Pb—Zn deposit; 20—Ag—Bi deposit; 21—Lead—zinc deposit; 22—Lead—
zinc—copper polymetallic deposit; 23—Silver—lead—zinc—cadmium polymetallic deposit; 24—Copper deposit; 25—Manganese deposit; 26—Iron deposit;
27—Ferromanganese

权统计整理,主要岩体及地层密度值统计结果见下表1。

分析表1中各密度特征可知:千里山地区出露的主要地层南华系、寒武系、泥盆系、石炭系之间均存在着明显的密度差异。侏罗系、寒武系密度平均值分别为2.61 g/cm³、2.63 g/cm³,表现为较低密度特征;石炭系密度平均值为2.71 g/cm³,表现为高密度特征;二叠系、泥盆系、南华系密度平均值分别为

2.65 g/cm³、2.68 g/cm³、2.66 g/cm³,表现为中高密度特征。千里山岩体密度值为2.61 g/cm³,王仙岭岩体为2.62 g/cm³,与围岩亦存在着明显的密度差异。

这些地层(岩体)之间的密度差异能引起比较明显的重力异常(曾华霖,2005)。因此,利用重力资料圈定半隐伏岩体、反演推断岩体形态、埋深、产状等具有良好的地球物理前提。

4 千里山半隐伏岩体的解释推断

区域重力资料在研究岩体等方面有独特的作用。所识别的隐伏一半隐伏岩体对于寻找深部隐伏矿床具有极为重要的价值。在岩体顶盖或边部以及岩体外带和内带等通常为金属矿床的赋存空间(曾春芳等,2015),所以隐伏一半隐伏岩体的圈定与深入研究,对于第二找矿空间的潜力评价具有重要意义。

4.1 千里山岩体的定性解释与推断

据有关专家学者研究资料:在晚中生代,华南地区的古太平洋板块向大陆俯冲,岩石圈全面拉张—减薄,大陆边缘弧后地区出现一系列NE向壳幔相互作用强烈的伸展带,地幔上涌——玄武质岩浆

表1 千里山地区主要地层及岩体密度值一览

Table 1 A survey of the main strata and rock mass density values in the Qianli Mountain

时代	地层(岩体)	主要岩性	密度值/(g/cm ³)
中生代	侏罗系J	砂岩	2.61
	二叠系P	砂岩、硅质岩、灰岩	2.65
晚古生代	石炭系C	灰岩、石英砂岩、页岩	2.71
	泥盆系D	灰岩、石英砂岩、砂岩	2.68
早古生代	寒武系E	板岩	2.63
新元古代	南华系Nh	板岩、石英砂岩	2.66
燕山期(J ₃)	千里山岩体 (γJ ₃ ^a 、γJ ₃ ^b 、γJ ₃ ^c)	花岗岩	2.61
印支期(T ₃)	王仙岭岩体 (γT ₃ ^a 、γT ₃ ^b)	花岗岩	2.62

地幔引发大规模的地壳熔融,导致大范围陆壳重熔型花岗岩的产生(宋新华等,1988;华仁民等,2005;毛景文等,2007)。这也就是湖南省大多数花岗岩体“无根”的原因(宋才见,2018)。由于重熔作用,大多数壳源型花岗岩类具有低密度特点(曾春芳等,2015)。因此这类花岗岩侵入体,一般多显示为重力低异常,异常规模较大,异常形态多样,如椭圆、串珠状、等轴状等。而且此类重力异常与多金属矿产成矿关系十分密切(曾春芳等,2015)。

千里山岩体圈定原则:主要依据1:5万区域重力资料提取出来的局部重力异常,结合航磁、地质、地球化学异常、物性、钻探等成果资料来确定(曾春芳等,2015)。

(1)布格异常特征:千里山—王仙岭一带以重力低异常为特征,规模大,整体走向为北东向,异常幅值 $-79.75 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,异常范围大大超出千里山岩体、王仙岭岩体出露范围,主要异常中心偏离了王仙岭花岗岩体、千里山花岗岩体出露中心。另外,王仙岭—千里山岩体对应的布格异常已连成一片,从异常等值线圈闭情况来看, $-76 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 等值线完全封闭, $-74 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 等值线半包围。

(2)剩余异常特征:千里山—王仙岭一带以剩余重力负异常为特征,走向整体为北东,有多个异常中心,异常幅值为 $-2.75 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,且异常范围超出岩体出露范围,主要异常中心偏离了王仙岭岩体、千里山岩体出露中心。另外,从剩余异常等值线圈闭情况来看, $-0.75 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 等值线完全封闭。

(3)磁异常特征:①航磁负异常与王仙岭—千里山—宝峰仙岩浆岩带吻合较好,反映了岩体侵入与围岩磁性蚀变的重要信息。在局部重力异常之间有多个航磁异常,表明该区有多次较强的热液活动^①。航磁局部异常位于金船塘—柿竹园—红旗岭一带,由3个局部航磁异常组成,沿千里山岩体西南部和东部外接触带呈串珠状排列,走向为北西向,且都是浅源产出^②。异常强度较高,异常值在 $-40 \sim 40 \text{ nT}$ 。②地磁异常特征明显,局部正磁异常和负磁异常均有分布,主要分布在王仙岭岩体和千里山岩体之间以及千里山岩体东南侧与北东侧以及杉山里等地段。这些局部地磁异常受岩体和构造控制明显^③。以上航磁异常与地磁异常特征表明:这是规模较大的含矿矽卡岩具有强磁性的反映。

(4)岩体中主要成矿元素W、Sn、Mo、Cu、Pb、As的平均值高出同类岩石平均值(维氏值1962年)。其中W、Sn高出10倍以上,Mo、Cu、Pb、Be一般也高出3倍^④。研究区内W、Sn、Bi、F、Cu、Pb、Zn、Ag、As、Au等异常,以王仙岭、千里山等岩体或花岗斑岩脉群为中心,在岩(脉)体内外接触带或外围一定范围内成群成带分布,且地球化学异常规模大、强度高、元素吻合好、元素组合复杂^⑤。

(5)地表地质特征:从地表出露看,王仙岭—千里山一带出露的岩浆岩有印支期王仙岭花岗岩体、燕山期千里山花岗岩体、成群成带的花岗斑岩脉。出露的地层有第四系、泥盆系(孟公坳组D_{3m}、欧家冲组D_{3o}、锡矿山组D_{3x}、余田桥组D_{3s}、跳马涧组D_{3t}、棋子桥组D_{3q})、石炭系(测水组C_{1c}、梓门桥组C_{1z}、石碇子组C_{1s})、南华系(泗州山组Nh_{1s})。

(6)密度特征:根据物性资料,王仙岭岩体密度值为 2.62 g/cm^3 ,千里山岩体密度值为 2.61 g/cm^3 ,为低密度体,能产生较大幅度的重力低异常。第四系虽然密度低(约 2.22 g/cm^3),但厚度很薄(0~67 m),岩性为黏土、砂、砾石,不可能产生较大幅度的局部重力低异常。

泥盆系岩性主要是孟公坳组灰岩、欧家冲组石英砂岩、锡矿山组灰岩、余田桥组灰岩、棋子桥组灰岩、跳马涧组石英砂岩和砂岩,密度平均值分别为 2.67 g/cm^3 、 2.63 g/cm^3 、 2.69 g/cm^3 、 2.70 g/cm^3 、 2.70 g/cm^3 、 2.65 g/cm^3 ,平均密度值为 2.68 g/cm^3 ,也不会产生重力低异常。石炭系岩性为测水组石英砂岩、梓门桥组灰岩、石碇子组灰岩,密度值分别为 2.63 g/cm^3 、 2.69 g/cm^3 、 2.68 g/cm^3 ,这几组岩性的平均密度值为 2.67 g/cm^3 ,也不会产生重力低异常。南华系岩性为泗州山组板岩和石英砂岩,密度值为 2.66 g/cm^3 ,也不会产生很明显的重力低异常,但有一定的影响。

据有关资料,千里山岩体北东附近的红旗岭锡多金属矿区深部已钻探验证存在隐伏岩体。该地段磁铁矿化、磁黄铁矿化等热液蚀变强烈^⑥。2012年,湖南省湘南地质勘察院在柿竹园矿区柴山矿段(位置见图1)开展钨锡钼铋多金属矿勘探时实施了钻探验证,证实地下不深处存在隐伏花岗岩岩体。如ZK31102孔在标高418 m、ZK30701孔在标高250 m、ZK31502孔在标高71 m处分别都见到了黑

云母花岗岩^⑥。

根据以上综合分析,推断认为:①千里山—王仙岭重力低异常主要是千里山—王仙岭花岗岩体及其隐伏部分的反映;②千里山、王仙岭2个岩体在地下深处是连在一起的,构成了1个花岗岩大岩基,并且往更深处有大规模延伸(图3)。

千里山—王仙岭岩体半隐伏岩体的边界,大致以上延0.5 km布格异常分离的剩余异常 $-1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 等值线为界来确定(图3)。

4.2 千里山岩体剖面重力二维反演推断

重力异常定量反演解释的目的是运用各种定量反演方法求取有关场源(拟探测目标物或目标层)的几何参数和物性参数(曾华霖,2005;张明华等,2011)。剖面定量解释必须在平面研究的基础上,选择有代表性的完整剖面来进行。而重力剖面的选取,则要根据异常形态来确定,剖面两端尽量取至正常场区。

反演模块原理:利用成熟的二度半重磁异常可视化反演技术,对重磁剖面异常进行二维可视化建模以及正、反演计算,所选模型为水平有限长的棱

柱体,截面为任意多边形,其任意组合能够逼近复杂形态的地质体(张明华等,2011)。反演软件:中国地质调查局发展研究中心研发推广的RGIS2016。

利用RGIS2016之“网格数据截取剖面”模块,图切了1条代表性剖面(图4)。

剖面起点坐标(X,Y):19717612 m,2860200 m,终点坐标(X,Y):19716775 m,2843400 m。剖面有效长度:16.5 km,方位:182.85°,点距:0.5 km。

重力剖面反演时,出露地层或者岩体的密度值取本次实测标本统计值,第四系密度值取湖南省密度标本统计结果^①(2.22 g/cm^3),没有出露的“冷家溪群+板溪群(Pt_{2+3})”密度值取湖南省密度标本统计结果^②(2.72 g/cm^3)。中壳层上部(Pt_2)密度值取湖南凤凰—茶陵地学断面深部地震波速度资料换算出的密度成果^③(2.74 g/cm^3)。

重力剖面二维断面反演结果见图4。从图4中可以得到有关千里山岩体的认识:

(1)已出露的千里山岩体在地下存在隐伏部分,深部隐伏岩体部分以规模很大的岩基产出,并且受到深大断裂严格控制,深部岩基两侧产状较陡。千里山

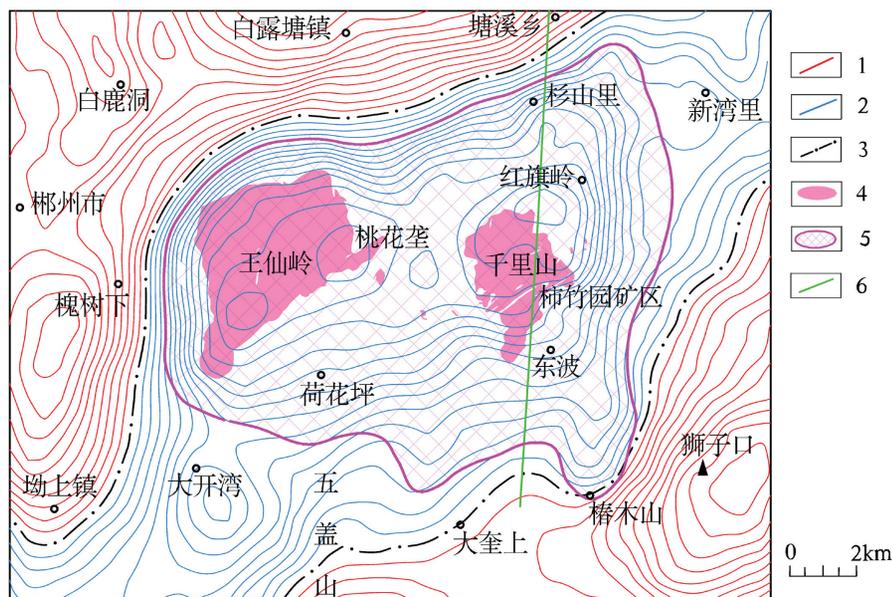


图3 千里山—王仙岭半隐伏岩体推断成果

1—剩余异常正等值线;2—剩余异常负等值线;3—剩余异常零值线;4—出露花岗岩体;5—推断半隐伏岩体;6—重力二维反演剖面。

技术说明:1—剩余异常单位: 10^{-5} m/s^2 ;2—布格异常上延0.5 km;3—异常分离窗口半径7 km

Fig. 3 Inference of semi-concealed rock mass from Qianli Mountain to Wangxianling area

1—Residual abnormal positive isoline;2—Residual abnormal negative isoline;3—Residual abnormal zero value line;4—Exposed granite body;

5—Inferred semi-concealed rock body;6—2-D gravity inversion profile. Technical description: 1—Residual anomaly unit: 10^{-5} m/s^2 ;2—Bouguer anomaly upward extension 0.5 km;3—Anomaly separation window radius 7 km

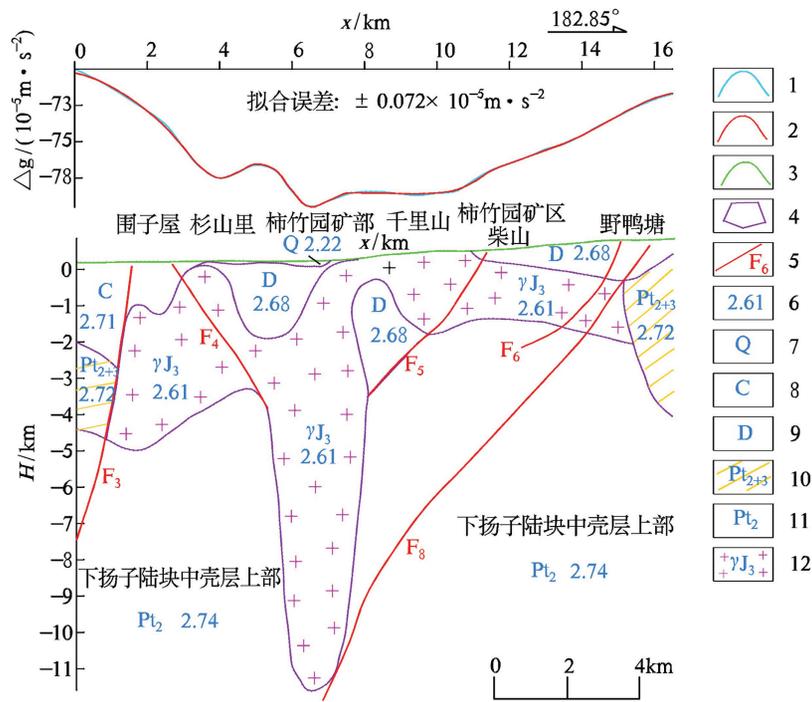


图4 千里山半隐伏岩体剖面重力反演推断成果

1—实测重力异常曲线;2—拟合重力异常曲线;3—地形线;4—反演地质体;5—推断断裂及编号;6—密度值(g/cm³);7—第四系;8—石炭系;9—泥盆系;10—中—新元古界基底构造层;11—中元古界基底构造层;12—晚侏罗世花岗岩

Fig. 4 Gravity inversion inference of semi-concealed rock mass profile in Qianlishan

1— Measured gravity anomaly curve; 2— Fitted gravity anomaly curve; 3— Topographic line; 4— Inversion geological body; 5— Inferred fault and No.; 6— density value (g / cm³); 7— Quaternary; 8— Carboniferous; 9— Devonian; 10— Middle Neoproterozoic basement structural layer; 11— Middle Proterozoic basement structural layer; 12— Late Jurassic granite

岩体往南、往北隐伏延伸都比较大。往南延伸至野鸭塘,产状比较平缓,呈板状产出,平均厚度约为1.4 km,最深处距地表约为1.144 km;往北延伸至围子屋,产状、厚度变化较大,呈“H”形状产出。

(2)千里山半隐伏岩体顶面起伏相对较大,底部起伏变化很大,最浅处距地表约为0.628 km,位于千里山岩体出露中心地下浅部,最深处距地表约为11.846 km,位于柿竹园矿部地下深处,是千里山岩体的“根部”所在,是神合堂局部剩余负异常的反映。千里山岩体在岩体出露中心地段的地下浅部存在超覆现象,这也就是千里山地段出现局部相对重力高异常的原因。杉山里地段地下有一个比较大的隐伏岩突,产状较陡,顶面距地表约为0.125 km,是杉山里局部剩余负异常的反映,对寻找深部隐伏矿床有利。围子屋地段地下有一个隐伏小岩突,顶面距地表约为1.169 km,是围子屋局部剩余负异常的反映。

(3)围子屋北侧、野鸭塘南侧等地段中—新元

古界基底隆起明显,所以,这些地段的布格异常显示为相对重力高,剩余异常显示为正异常。

4.3 千里山岩体三维空间形态反演

三维重力异常形体模拟反演是以场源的几何形态可视化为主的一种反演方法,它通过几何形态可视化人机交互式修改场源形体与物性参数,进行重力异常计算。该方法用于了解地下场源体的空间分布,确定三维密度体的位置和几何形态(张明华等,2011)。

模块原理:采用物性反演模式,即将场源划分成小的物性单元组合,在反演过程中,单元形态不变,物性发生变化,并假设每个模型单元内的物性(密度)均匀分布(张明华等,2011)。重力异常三维模拟反演软件为中国地质大学(武汉)推广的“VOXLER3.0”。

计算方法:用滑动平均法求得的剩余异常当作各岩体引起的重力异常,根据剩余重力异常零值线大致确定的半隐伏岩体的范围,向外推2 km提取三

维反演的剩余重力异常数据,并提取相同范围的地形高程数据作为三维重力反演的基础数据。

为了达到逼近岩体真实形态的目的,将地下3 km、15 km深度空间的物性密度块体划分为 $20 \times 20 \times 10 = 4000$ 个单元栅格,通过对剩余重力异常进行反复迭代计算,获得了密度差小于 -0.02 g/cm^3 的低密度岩体三维反演结果(图5),从而揭示了千里山岩体不同深度的空间形态特征和王仙岭岩体的连接关系。

由图5可知:(1)千里山岩体的顶面有比较明显的起伏,凹凸不平。往南产状相对较缓,东侧上部产状较缓,下部较陡。特别是王仙岭岩体西侧以及两岩体的北侧,由于受到深大断裂 F_3 的严格控制,其深部岩基产状更加陡峻(宋才见等,2019);(2)千里山岩体往四周深部隐伏延伸,并且南、西侧延伸范围较大,南端椿木山一带存在1个隐伏的小岩突。(3)千里山岩体、王仙岭岩体在深部是相连的,呈巨大岩基产出(宋才见等,2019),但往更深处岩基逐渐变小直至尖灭。两岩体整体三维形态轮廓为气球膨胀式,即岩体顶部小、中间岩基大、岩体底部小。

岩体的空间形态分布特征实际上是岩体侵位机制的具体反映,对于成矿更加具有指示作用。特别是岩基上面的岩突、岩株、内凹对于成矿更加有利。

5 推断花岗岩体与成矿的关系

千里山地区岩浆活动强烈,对区内钨、锡、铅、锌等矿产的成矿起着重要的控制作用,它是各种气液-热液型矿床或叠加改造(活化再造)型矿床的主要成矿物质来源。其中中-晚侏罗世(J_2-J_3)花岗

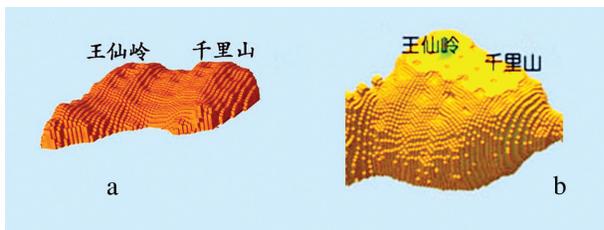


图5 千里山岩体三维空间分布形态
a—3 km深度三维反演西南方向前视图;b—15 km深度三维反演西南方向前视图

Fig.5 Three-dimensional spatial distribution pattern of Qianlishan rock mass

a—3 km depth three-dimensional inversion of southwest front view;
b—15 km depth three-dimensional inversion of southwest front view

岩体(γ)与成矿的关系最为密切,尤其是晚侏罗世(J_3)花岗岩体(γ)为湘南地区重要的成矿岩浆岩体,成矿以Sn为主,包括W、Mo等成矿作用(中国区域地质志·湖南志,2017)。如柿竹园、水湖里、金船塘、红旗岭、野鸡窝等锡(钨)矿床,与千里山花岗岩体都有成生关系(董和金,2001)。千里山岩体是区内最重要的致矿花岗岩(程细音等,2012)。就整个湘南地区来说,绝大多数钨、锡等矿床与岩浆岩也有着密切的关系(庄锦良等,1987;张怡军,2007)。就全国而言,中国的钨、锡、钼、铋矿床均与花岗岩类有密切的成因联系(杨超群,2007)。

5.1 岩体与矿产的成因关系

千里山岩体出露面积仅 11 km^2 ,为什么会聚集郴县柿竹园矿区特大型钨锡钼铋矿床、郴县野鸡尾矿区大型铅锌多金属矿、郴县红旗岭矿区大型锡多金属矿床、郴县玛瑙山矿区中型铁锰铅锌矿床以及郴县野鸡窝矿区锡多金属矿等一批大、中型矿床呢?下面就这个地质问题从重力场角度进行分析探讨。

通过对重力场异常的研究发现,千里山—王仙岭一带重力低异常或者局部剩余负异常规模大、强度高,推断其是由出露岩体及其隐伏部分引起。通过已知出露岩体与推断岩体的比较,发现推断岩体比已知岩体的范围大很多,例如本次圈定的东坡(王仙岭—千里山)岩体的深部岩基有 147.84 km^2 (图6)。这就构成了地表有小岩株存在,深部却有大岩基存在。

另外,位于千里山岩体东南部的瑶岗仙半隐伏岩体的深部岩基有 117.69 km^2 ,而瑶岗仙岩体出露面积近 1.1 km^2 ,却聚集了瑶岗仙大型黑钨矿床、瑶岗仙大型白钨矿床等。界牌岭隐伏花岗岩体的深部岩基也有 23.0 km^2 ,其地表仅出露两个很小的石英斑岩脉,却出产了大型锡铍矿。

在湘南地区,发现还有的重力低异常,地表只有岩脉、小岩株出现,或什么也没有,深部却存在较大岩体或岩株,如界牌岭隐伏岩体、香花岭岩体、大开湾隐伏岩体等。这些岩体有受深部构造控制的特点。

根据上述分析,笔者认为推断的深部岩体为众多矿床的形成提供了丰富的成矿物质来源,而且还提供了热源,再加上深部构造为众多矿床的形成提

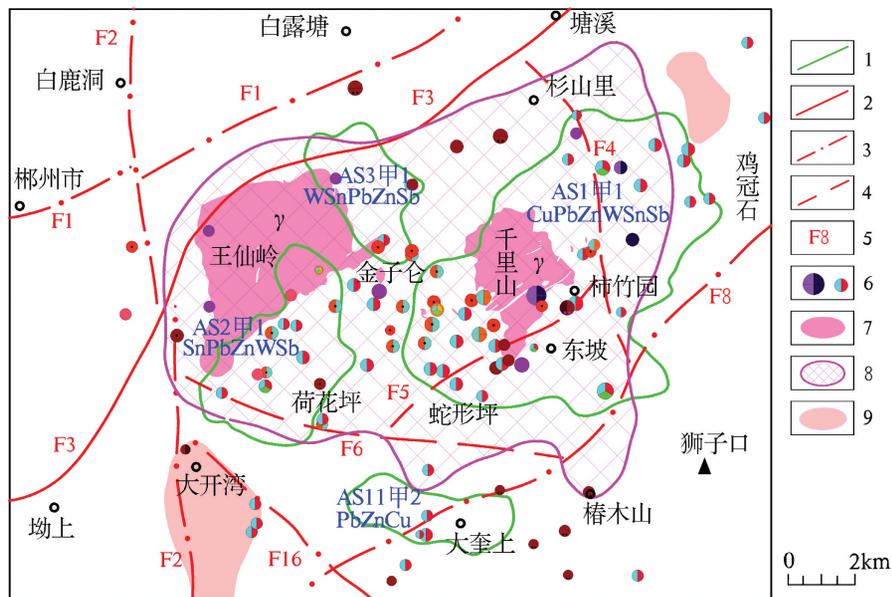


图6 千里山—王仙岭半隐伏岩体与矿产分布关系

1—1:50000水系沉积物测量综合异常;2—重力推断地壳断裂;3—重力推断基底断裂;4—重力推断盖层断裂;5—推断断裂编号;6—已知矿床(点);7—出露花岗岩体;8—推断半隐伏花岗岩体;9—推断隐伏花岗岩体

Fig.6 Relation between Qianlishan Wangxianling semi-concealed rock mass and mineral resources distribution

1—1:50000 comprehensive anomaly of stream sediment survey;2—Gravity inferred crustal fault;3—Gravity inferred basement fault;4—Gravity inferred caprock fault;5—Inferred fault number;6—Known deposit (point);7—Exposed granite body;8—Inferred semi concealed granite body;9—Inferred concealed granite body

供了良好的成矿通道,使得地层中丰度高的元素萃取、活化、转移,然后在构造有利部位成矿。这就形成了隐伏、半隐伏岩体附近的系列矿床或者矿点。

简而言之,千里山地区深部隐伏岩基控制了矿田的分布,其上高侵位的小岩体对矿床的形成具有明显的控制作用,反映了区内岩浆演化和岩体前缘成矿的基本规律(曾昭健,1996)。

另据有关研究成果资料,湘南地区钨矿成矿在空间、时间上多与燕山期花岗岩有关(祝新友,2012),且多位于有成矿小岩体存在的大岩体内(庄锦良等,1987;张怡军,2014)。

5.2 岩体与成矿的时空关系

据地质资料,千里山地区主要内生金属矿床形成于中—晚世(燕山早期),岩浆热液矿床与该期次岩体空间关系密切。有学者研究认为,东坡矿田内主要的钨锡多金属矿床与千里山花岗岩体具有密切的时间关系,均集中形成于149~161 Ma(刘晓菲等,2012)。区内成矿是多期多阶段的,经历了3期5阶段,即岩浆期、矽卡岩期和石英硫化物期,成矿阶段有早矽卡岩阶段、晚矽卡岩阶段、氧化物阶段、早

硫化物阶段和晚硫化物阶段。

一般地说,燕山早期第一次侵入活动在本区形成了较大范围的W、Sn、Mo、Bi、Pb、Zn矿化,但较弱;第二次侵入活动进一步扩大了前次矿化范围和强度,出现较强的W、Sn、Mo、Bi、Pb、Zn矿化;第三次侵入活动挥发分较前两次更加充分,进一步强化了钨锡的矿化,并出现大量的铍矿化。故本区内钨锡铅锌矿化与燕山期第二次、第三次岩浆侵入活动有关,主要成矿期为燕山早期中、晚阶段(张怡军,2014)。

千里山岩体等均经历了多期次活动,这些岩体及边部与褶皱带构造复合的区域,也是岩浆活动和成矿作用持续时间最长,矿种最多、矿化最强的地段。在岩浆活动中心以大、中型矿床为主,向外以中、小型矿床为主,矿床类型和矿物组合由岩浆活动中心向外由复杂到简单;并且各个矿田的产生往往也是以成矿岩体为中心的。其中岩体接触带以高温和高、中温云英岩型、矽卡岩矿床为主,矿种主要为钨、锡、钼、铋;如柿竹园矽卡岩型钨锡钼铋矿、大吉岭云英岩型钨矿等,远离岩体外接触带以中温

和中、低温热液裂隙充填交代型(石英脉型)矿床为主,矿种主要为铜、铅、锌、银等。

5.3 矿产空间分布规律

据地质资料,区内不同类型的有色金属矿床的产出均以花岗岩岩体为中心,在平面上大致呈围绕花岗岩体的同心环带状分布的规律。但是由于花岗岩岩体的侵入方向、产状以及围岩性质、构造环境的因素影响,从而所形成的矿床(点)数目、规模在空间上有一定的差别。

(1)区内矿产以内生金属矿产为主,因此,矿床(点)的分布受岩浆岩分布的制约。已发现的内生金属矿床、矿(化)点90%以上沿千里山岩体及王仙岭岩体的内外接触带分布。千里山—王仙岭一带矿床(点)的分布与炎陵—郴州—蓝山地壳断裂带延伸基本一致,该带分布有柿竹园钨锡钼铋特大型矿田等。

(2)内生金属矿产的空间分布与中—晚侏罗世各侵入期次花岗岩影相相随,矿体都产在岩体边缘的内外接触带,自岩体向外具有明显的由高温到低温的水平分带性。即由岩体内侧向外接触带,矿化由钨、锡、钼、铋→钨锡→铜铅锌银→铋。其中钨锡钼铋矿一般产于花岗岩体内侧或岩体顶界面云英岩内,白钨矿、锡石则形成于花岗岩体外侧的矽卡岩内;铜铅锌银矿化则稍远离岩体,位于钨锡矿化以外的蚀变碳酸盐岩石及碎屑岩的裂隙中。总的来说,不同成因类型的矿床在空间上有着明显的分带性(裴荣富等,2013)。

(3)矽卡岩型矿床(点)的分布不但受岩浆岩的制约,还与地层的岩性有关,集中出现于研究区泥盆纪、石炭纪灰岩层位中,利于岩浆热液充填交代。如柿竹园矽卡岩型白钨矿床等,它们赋存于花岗岩体的顶部或者与云灰岩接触带上(董和金,2001)。

(4)裂隙充填型(石英脉型)钨锡、铅锌金银矿主要分布于千里山岩体北东红旗岭—五马垄一带的南华纪—震旦纪—寒武纪地层中。

(5)云英岩型钨锡钼铋矿、构造蚀变带型锡矿体主要集中于千里山(如大吉岭钨矿、水湖里钨锡矿)等成矿岩体中。

5.4 找矿方向简析

现有资料(图6)表明,目前千里山地区绝大多数大中型矿床都位于重力低异常和重力推断的隐

伏一半隐伏岩体内。也就是说,重力低和隐伏一半隐伏岩体,控制了绝大多数矿床的分布。因而,我们可以围绕重力低和推断的隐伏一半隐伏岩体去找矿。众所周知,矿床就位过程中由于同时伴有地球化学晕的形成,成矿元素及配套元素会形成一个地球化学场,产生地球化学异常。根据以往开展成矿预测和找矿勘查的经验,岩体内、外接触带上好的地球化学异常是能否找到矿产的重要条件之一。另外,根据湘南地区磁异常与成岩、成矿的关系,大矿田内都有局部航磁异常。这种局部航磁异常有的是隐伏一半隐伏的中酸性小岩体引起的^[10]。

自开展地质大调查以来,有地质科研人员总结出一条湘南地区寻找大型有色多金属矿床的规律:凡找到大型—超大型矿床的地方,地表一定出露小岩体或岩株,或者地下隐伏有小岩体或岩株,而深部一定存在大规模的岩基。这些小岩体是内生金属矿产的成矿母岩,或者是层控型矿床的岩浆热源条件。远景区内是否有隐伏岩体或出露有小岩体是最关键的问题之一。

湖南省地质调查院在实施“千里山—骑田岭锡铅锌矿评价”项目后,提出了“一选岩体、二看异常、三找蚀变”的钨锡多金属矿床找矿模式^[9],值得重视。

6 结 论

根据以上对千里山岩体空间形态的研究及其与成矿关系的分析,可以归纳出以下几点结论:

(1)千里山岩体在地下存在隐伏部分,延伸较大,形态、产状复杂,顶面产状相对较缓。其西侧与王仙岭岩体相连,两岩体以规模较大的岩基产出,严格受深断裂控制,深部岩基与围岩接触面产状较陡,往更深处岩基逐渐变小。三维空间形态整体表现为气球膨胀式轮廓。

(2)千里山岩体底部起伏变化很大,最浅处距地表约为0.628 km,最深处距地表约为11.846 km,位于柿竹园矿部地下深处,是千里山岩体的“根部”所在。在岩体出露中心的地下浅部存在超覆现象。杉山里地下有一个比较大的隐伏岩突,对于寻找隐伏矿床有利。

(3)深部岩体和构造为矿床的形成提供了丰富的成矿物质来源与良好的成矿通道,而且深部岩体还提供了热源,使得地层中丰度高的元素萃取、活

化、转移,然后在构造有利部位成矿。

致谢:匿名审稿专家和编辑部老师对文章的修改提出了宝贵的意见,在此表示衷心感谢!

注释

①谢湘雄,吉纪尼,张保康.1989.湖南省区域重磁成果研究报告(1:50万)[R].长沙:湖南省地质学校.

②范景忱,邓河华,阳月宫.1990.湖南省郴县幅区域重力航磁成果报告[R].邵阳:湖南省物探队.

③蒋喜桥,张传忠,吴南川.2013.湖南郴州长城岭—尖峰岭地区锡多金属远景调查报告[R].长沙:湖南省有色地质调查局.

④罗长清,信和培.1981.郴县幅地球化学图说明书(1:20万水系沉积物测量)[R].邵阳:湖南物探队.

⑤湖南省有色地质调查局.1992.湖南省湘南(桂阳—汝城)地区1:5万水系沉积物普查报告[R].

⑥陈荣华,冯海燕.2012.湖南省郴州市柿竹园矿区柴山矿段铋铊锡多金属矿生产勘探地质报告[R].郴州:湖南省湘南地质勘察院.

⑦饶家荣,王纪恒,曹一中.1991.凤凰—茶陵地质断面及湖南深部地质地球物理综合研究[R].邵阳:湖南省物探队.

⑧黄革非,许以明,侯茂松.2006.湖南千里山—骑田岭锡铅锌矿评价报告[R].长沙:湖南省地质调查院.

Reference

Bai Daoyuan, Huang Jianzhong, Liu Yaorong, Wuguangying, Ma Tieqi, WangXianhui. 2005. Determination of the development framework of Mesozoic geological structure in Southeast Hunan and Hunan Guangdong Jiangxi border area[J]. *Geology in China*, 32 (4): 557–570 (in Chinese with English abstract).

Cheng Xiyin, Zhu Xinyou.2012.Discussion on the genus of Qianlishan granite in Shizhuyuan deposit, Hunan Province [J]. *Progress in Geosciences*, 27 (Sup.): 111–113 (in Chinese with English abstract).

Dong Hejin. 2001. On metallogenic steps[J]. *Hunan Geology*, 20 (3): 161–167 (in Chinese with English abstract).

Huang Gefei. 2012. Study on the characteristics and prospecting direction of main nonferrous metals in Hunan Province[J]. *Land and Resources Guide*, (2): 94–96 (in Chinese with English abstract).

Hunan Geological Survey Institute. 2017. *Regional Geology of China (Hunan Records)* [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).

Hua Renmin, Chen Peirong, Zhang Wenlan, Yao Junming, Lin Jinfu. 2005. Minerogenesis and geotectonic setting related to Mesozoic Granitoids in Nanling[J].*Journal of University Geology*, 11 (3): 291–304 (in Chinese with English abstract).

Liu Xiaofei, Yuan Shunda, Wu Shenghua. 2012. Re– Os isotopic dating and its geological significance of molybdenite in Jinchuantang tin bismuth deposit, Hunan Province[J].*Acta petrologica Sinica*, 28 (1): 39– 51 (in Chinese with English abstract).

Mao Jingwen, Li Hongyan, Pei Rongfu. 1995. Nd– Sr isotopes and petrogenesis of the Qianlishan granitic body, Hunan Province[J]. *Deposit Geology*, 14 (3): 235–241 (in Chinese with English abstract).

Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, Chen Yuchuan.2007.Large scale tungsten tin polymetallic mineralization in Nanling area: Metallogenic time limit and geodynamic background[J].*Acta Petrologica Sinica*, 23 (10): 2329–38 (in Chinese with English abstract).

Pei Rongfu, Mei Yanxiong, Qu Hongying, Wang Haolin.2013. Geological structure background, metallogenic environment and ore bearing rock assemblage of deposit type model[J]. *Geology in China*, 40 (1): 31–42 (in Chinese with English abstract).

Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, Deng Jinfu, Fong Yimin, Zhang Kexin, Zhang Zhiyong, Wang Fangguo, Xing Guangfu, Hao Guojie, Fong Yanfang. 2009. Subdivision of tectonic units in China[J]. *Geology in China*, 36(1):1–28 (in Chinese with English abstract).

Rao Jiarong, Xiao Haiyun, Liu Yaorong, Bai Daoyuan, Deng Yanlin. 2012. The location of the convergence zone of Yangtze and Cathaysian ancient plates in Hunan Province[J].*Journal of Geophysics*, 55 (2): 484–502 (in Chinese with English abstract).

Song Xinhua, Zhou Ruo, Wu Guozhong.1988.Experimental study on the melting of Dengfuxian granite[J]. *Geosciences*, (3): 247–258 (in Chinese with English abstract).

Song Caijian. 2018. Study on the two–dimensional morphology of the semi concealed compound granitic body in Dengfuxian, Hunan Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 42 (2): 270–275 (in Chinese with English abstract).

Song Caijian, Li Tanwei, Li Minglu, Ye Yingying. 2019. The intrusive direction and spatial morphological characteristics of the semi concealed rock mass on the eastern slope of Hunan Province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 35 (3): 317–324 (in Chinese with English abstract).

Xi Binbin, Zhang Dehui, Wang Wanggen. 2006. Geochemical characteristics of several granites related to W and Sn mineralization and their relationship with mineralization in Nanling area[J]. *Mineral Deposit*, 25 (Sup.): 383–386 (in Chinese with English abstract).

Xiong Shengqing, Yang Hai, Ding Yanyun, Li Zhankui. 2018. Subdivision of tectonic units in China based on aeromagnetic data[J]. *Geology in China*, 45(4): 658– 680 (in Chinese with English abstract).

Yang Chao Group. 1984. diagenetic and metallogenic series and material source of W– Sn– Mo– Bi deposits in China[J]. *Geology and Exploration*, (5): 12–20 (in Chinese with English abstract).

Yu Chongwen, Cen Kuang, Gong Qingjie, Xu Deyi, Wang Yurong, Shen Yongli, Lu Qi. 2003. Study on metallogenic complexity of Shizhuyuan superlarge tungsten polymetallic deposit in Chenzhou, Hunan Province[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 15– 39 (in Chinese with English abstract).

- Zeng Hualin. 2005. Gravity Field and Gravity Exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Zeng Chunfang, Luo Shixin, Zhao Xiaoming, Liu Hui, Tan Yihe, Zhu Guoqi, Xie Shunsheng, Quan Haoli, Wu Taihe, Pan Zhongfang, Wei Daofang. 2015. Research on the Characteristics of Gravity and Magnetic Field and Its Application in Central South China[M]. Wuhan: Changjiang Publishing Media, Hubei People's Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Zhang Minghua, Qiao Jihua, Jin Ming, Wang Chengxi, Han Geming, Tian Qianning, Liu Ling, Hu Linzhen. 2011. Heavy Magnetoelectric Data Processing and Interpretation Software RGIS[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Zeng Zhaojian. 1996. The method and effect of large scale metallogenic prediction in Chengui area[J]. Hunan Geology, 15 (4): 221-226 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yijun, Huang Guanghua, Shang Lixiao, Chen Xi, Liu Yu, Xiao Yingbin. 2014. Geological characteristics of tungsten mineralization in southern Hunan[J]. Geology in China, 41 (1): 246-255 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yijun. 2007. Discussion on the prospecting direction of tin deposits in southern Hunan[J]. Geology in China, 34 (6): 1073-1081 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xinyou, Wang Jingbin, Wang Yanli, Cheng Xiyin, He Peng, Fu Qibin, Li Shunting. 2012. Determination and significance of alkali feldspar granite in Nanling tin tungsten polymetallic ore area [J]. Geology in China, 39 (2): 359-381 (in Chinese with English abstract).
- Zhuang Jinliang, Liu Zhongwei, Tan Bixiang. 1987. The relationship between small rocks and mineralization and the prediction of concealed deposits in southern Hunan[J]. Hunan Geology, (supp.) (in Chinese with English abstract).
- 柏道远, 黄建中, 刘耀荣, 伍光英, 马铁球, 王先辉. 2005. 湘东南及湘粤赣边区中生代地质构造发展框架的厘定[J]. 中国地质, 32 (4): 557-570.
- 程细音, 祝新友. 2012. 湖南柿竹园矿床千里山花岗岩种属讨论[J]. 地球科学进展, 27(增刊): 111-113.
- 董和金. 2001. 论成矿台阶[J]. 湖南地质, 20(3): 161-167.
- 黄革非. 2012. 湖南主要有色金属矿产特征与找矿方向研究[J]. 国土资源导刊, (2): 94-96.
- 湖南省地质调查院. 2017. 中国区域地质志·湖南志[M]. 北京: 地质出版社.
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 姚军明, 林锦富. 2005. 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, 11 (3): 291-304.
- 刘晓菲, 袁顺达, 吴胜华. 2012. 湖南金船塘锡铋矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义[J]. 岩石学报, 28(1): 39-51.
- 毛景文, 李红艳, 裴荣富. 1995. 湖南千里山花岗岩体的 Nd-Sr 同位素及岩石成因研究[J]. 矿床地质, 14(3): 235-241.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景[J]. 岩石学报, 23(10): 2329-38.
- 裴荣富, 梅燕雄, 瞿泓滢, 王浩琳. 2013. 矿床类型模型的地质构造背景、成矿环境和容矿岩石组合[J]. 中国地质, 40(1): 31-42.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 36(1): 1-28.
- 饶家荣, 肖海云, 刘耀荣, 柏道远, 邓延林. 2012. 扬子、华夏古板块汇聚带在湖南的位置[J]. 地球物理学报, 55(2): 484-502.
- 宋新华, 周珣若, 吴国忠. 1988. 邓阜仙花岗岩熔融实验研究[J]. 地质科学, (3): 247-258.
- 宋才见. 2018. 湖南邓阜仙半隐伏复式花岗岩体的二维形态研究[J]. 物探与化探, 42(2): 270-275.
- 宋才见, 李谭伟, 李明陆, 叶颖颖. 2019. 湖南东坡半隐伏岩体的侵入方向及其空间形态特征[J]. 华南地质与矿产, 35(3): 317-324.
- 席斌斌, 张德会, 王汪根. 2006. 南岭地区几个与 W、Sn 矿化有关的花岗岩地球化学特征及其与矿化关系探讨[J]. 矿床地质, 25(增刊): 383-386.
- 熊盛青, 杨海, 丁燕云, 李占奎. 2018. 中国航磁大地构造单元划分[J]. 中国地质, 45(4): 658-680.
- 杨超群. 1984. 中国钨锡铋矿床的成岩成矿系列和物质来源问题[J]. 地质与勘探, (5): 12-20.
- 於崇文, 岑况, 龚庆杰, 徐德义, 王玉荣, 沈镛立, 陆琦. 2003. 湖南郴州柿竹园超大型钨多金属矿床的成矿复杂性研究[J]. 地学前缘, 10(3): 15-39.
- 曾华霖. 2005. 重力场与重力勘探[M]. 北京: 地质出版社.
- 曾春芳, 罗士新, 赵小明, 刘慧, 谭宜和, 朱国器, 谢顺胜, 全浩理, 伍桌鹤, 潘仲芳, 魏道芳. 2015. 中南地区重磁场特征及其应用研究[M]. 武汉: 长江出版传媒, 湖北人民出版社.
- 张明华, 乔计花, 黄金明, 王成锡, 韩革命, 田黔宁, 刘玲, 胡麟臻. 2011. 重磁电数据处理解释软件 RGIS[M]. 北京: 地质出版社.
- 曾昭健. 1996. 郴桂地区中大比例尺成矿预测的方法与效果[J]. 湖南地质, 15(4): 221-226.
- 张怡军, 黄光华, 尚立晓, 陈曦, 漏鱼, 肖颖斌. 2014. 湘南地区钨矿成矿地质特征[J]. 中国地质, 41(1): 246-255.
- 张怡军. 2007. 湘南锡矿找矿方向探讨[J]. 中国地质, 34(6): 1073-1081.
- 祝新友, 王京彬, 王艳丽, 程细音, 何鹏, 傅其斌, 李顺庭. 2012. 南岭锡钨多金属矿区碱长花岗岩的厘定及其意义[J]. 中国地质, 39(2): 359-381.
- 庄锦良, 刘钟伟, 谭必祥. 1987. 湘南地区小岩体与成矿关系及隐伏矿床预测[J]. 湖南地质, (增刊): 1-199.

附中文参考文献