

doi: 10.12029/gc20190402

严加永, 吕庆田, 罗凡, 陈安国, 叶高峰, 张永谦, 张昆, 赵金花, 张冲, 刘振东, 刘彦. 2019. 钦杭何在? 来自综合地球物理探测的认识[J]. 中国地质, 46(4): 690–703.

Yan Jiayong, Lü Qintian, Luo Fan, Chen Anguo, Ye Gaofeng, Zhang Yongqian, Zhang Kun, Zhao Jinhua, ZhangChong, Liu Zhendong, Liu Yan. 2019. Where is Qinzhou–Hangzhou juncture belt? Evidence from integrated geophysical exploration[J]. Geology in China, 46(4): 690–703(in Chinese with English abstract).

钦杭何在? 来自综合地球物理探测的认识

严加永^{1,2}, 吕庆田^{1,2,3}, 罗凡^{3,1}, 陈安国⁴, 叶高峰⁵, 张永谦^{1,2}, 张昆^{1,2}, 赵金花^{1,2},
张冲^{1,2}, 刘振东^{1,2}, 刘彦^{1,2}

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 中国地质调查局-中国地质科学院地球深部探测中心, 北京 100037; 3. 东华理工大学, 江西南昌 330013; 4. 安徽省地质调查院, 安徽合肥 230001; 5. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 扬子古板块与华夏古板块的结合带(简称钦杭结合带)是中国东南部一条最重要的构造岩浆成矿带,其西段的位置和边界的划分方法,尚存在较大的争议。本文以大尺度卫星重磁资料为主,结合区域电性和地震资料的综合处理和分析,对钦杭结合带的边界进行了识别和厘定。研究认为,钦杭结合带是江南造山带的南部边界,结合带南界为宁波—金华—上饶南—赣州北—郴州—北海东,北界为上海—湖州—鹰潭—临川—萍乡—衡阳—永州—桂林—梧州—钦州。在结合带两侧,无论是重力场还是磁力场都具有明显不同的特征,反映了扬子和华夏板块不同的物质组成和基底特征。钦杭结合带内地球物理场也存在局部差异,揭示了结合带经过多期次岩浆活动,在不同地段形成了不同组合的金属矿床和别具特色的钦杭成矿带。

关键词: 钦杭结合带; 卫星重磁; 多尺度边缘检测; 大地电磁; 宽频地震; 深部地质调查; 深部资源工程

中图分类号: P622[·]2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–3657(2019)04–0690–14

Where is Qinzhou–Hangzhou juncture belt? Evidence from integrated geophysical exploration

YAN Jiayong^{1,2}, LÜ Qintian^{1,2,3}, LUO Fan^{3,1}, CHEN Anguo⁴, YE Gaofeng⁵, ZHANG Yongqian^{1,2},
ZHANG Kun^{1,2}, ZHAO Jinhua^{1,2}, ZHANG Chong^{1,2}, LIU Zhendong^{1,2}, LIU Yan^{1,2}

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China; 2. China Deep Exploration Center, China Geological Survey & Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China; 3. School of Geophysics and Measurement–control Technology, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 4. Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, Anhui, China; 5. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The suture zone between the Yangtze Paleoplate and the Cathaysia Paleoplate (called Qin–Hang junction belt) is one of the most important tectonic–magmatic–metallogenic belts in southeastern China. There is still considerable controversy over the

收稿日期: 2019–03–05; 改回日期: 2019–07–30

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160082, DD20190012), 国家重点研发计划专项课题(2016YFC0600201)和自然科学基金项目(41574133, 41630320)联合资助。

作者简介: 严加永, 男, 1977年生, 博士, 教授级高级工程师, 从事矿产资源勘查和地球深部探测研究; E-mail: yanjy@163.com。

通讯作者: 吕庆田, 男, 1964年生, 博士, 研究员, 从事地球深部探测研究; E-mail: lqt@cags.ac.cn。

method of dividing the location and boundary of the western section of the Qin–Hang junction belt. In order to identify and determine the boundaries of the Qin–Hang junction belt, the authors employed the large–scale satellite gravity and magnetic data in combination with the integrated processing and analysis of regional magnetotelluric and broadband seismic data. The comprehensive evaluation shows that the Qin–Hang junction belt is the southern boundary of the Jiangnan orogenic belt. The authors hold that the border is Ningbo–Jinhua–Shangrao–Ganzhou–Chenzhou–Beihai in the south and Shanghai–Huzhou–Yingtian–Linchuan–Pingxiang–Hengyang–Yongzhou–Guilin–Wuzhou–Qinzhou in the north. On both sides of the joint belt, both the gravity field and the magnetic field have distinct characteristics, indicating the different material compositions and basements between the Yangtze and Cathaysia plates. There are also local differences in the geophysical fields of the Qin–Hang junction belt, suggesting that the tectonic belt has undergone multiple stage magmatism and formed different combinations of metal deposits in different sections, forming a unique metallogenic belt, i.e., the Qin–Hang metallogenic belt.

Key words: Qinzhou–Hangzhou junction belt; satellite gravity and magnetism; multiscale edge detection; magnetotelluric sounding; seismic tomography; deep geological survey; deep resources engineering

About the first author: YAN Jiayong, male, born in 1977, doctor, senior engineer, majors in mineral detecting and deep earth exploration; E-mail: yanjy@163.com.

About the corresponding author: LÜ Qingtian, male, born in 1964, doctor, professor, majors in deep earth exploration; E-mail: lqt@cags.ac.cn.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. DD20160082, DD20190012), National Key R&D Program of China (No. 2016YFC0600201) and National Natural Science Foundation (No. 41574133, No. 41630320).

1 引言

自20世纪90年代,水涛(1986,1987)、史明魁(1993)、杨明桂等(1997)提出钦州湾至杭州湾绵延近2000 km,宽80~100 km的S型区域为扬子古板块与华夏古板块的结合带(简称钦杭结合带)以来,经过近30年的研究,大部分学者认为该结合带不但是块体拼合边界,也是中国东南部一条最重要的构造、岩浆和成矿带,并命之为“钦杭成矿带”(徐德明等,2012)。

但是对“钦杭结合带”是不是板块结合带的问题上,国内外学者观点尖锐对立。争论的焦点是否存在洋盆?华夏陆块(残余)在哪里?由于扬子与华夏之间多为晚古生代以来地层所覆盖,直接接触关系少见(胡肇荣,2010),虽历经长期研究,迄今仍存争议,焦点在于古华南洋和华夏古陆是否存在。水涛等(1988)认为,华夏地块与扬子地块之间的赣湘桂粤海盆属于残洋盆性质。金文山等(1997)认为,华南(华夏)与扬子地块之间可能不存在洋盆;华南自古元古代以来,构造格架总体上以陆内裂谷作用或弧后盆地构造背景为主。近年地学界趋向于公认江山—绍兴—萍乡断裂带作为扬子与华夏的碰撞结合带,但江山—绍兴—萍乡断裂的西南延

伸—湘桂段成带状分布,至少有3条规模相近的断裂,且缺少蛇绿岩标志,作为块体对接带的特征也不典型。关于华夏古陆,有的学者认为从未存在过(潘桂棠等,2009),有的学者承认有老基底,但不认为有古陆块。杨明桂等(2009)则认为存在华夏古板块,至于很长时期未发现其残体,缘于其形成不久即遭到裂解,经近年调查研究,杨明桂等提出信江—钱塘地块与广丰微陆块是晋宁期华夏板块的核心—华夏陆块的大型残留体(杨明桂等,2009,2012)。

上述关于板块构造格局的认识在很大程度上依赖于地表地质观测和20世纪80—90年代的深地震测深剖面 and 大地电磁剖面资料的解释。但是由于当时仪器设备、技术方法和成本的限制,这些老的深部资料分辨率相对较低,其本身也存在较大的不确定性,有待高分辨地球物理观测结果的检验。钦杭结合带也是作为2010年被列入中国19个重要成矿区带之一,其范围根据钦杭结合带对成矿作用的影响地域,包括钦杭结合带及在构造上与其有密切联系的邻侧部分,是华南最重要的铜锡钨铀钼钽金银锑内生金属成矿带,也是一条重要的煤、铁、非金属成矿带,拥有百余处特大型和大中型金属矿床(毛景文等,2011,徐德明等,2012,徐磊等,2012)。但由

于深部结构不清,成矿机理难以厘定,深部动力学过程和成矿背景研究欠深入,在一定程度上制约了深部找矿进一步突破。

近年来,随着越来越多观测数据的积累,对华夏和扬子结合带的边界及成矿关系等提出了新的认识(舒良树,2012;周永章等,2015,2017;Guo et al,2018),但对钦杭结合带的边界仍然存在比较大的争议(周永章等,2012;张国伟等,2013;毛建仁等,2014)。为厘定钦杭结合带边界、范围及结构,在中国地质调查局深部地质调查工程的支持下,笔者在钦杭结合带及邻区开展了系统的深部探测工作,本文通过区域大尺度卫星重磁资料的处理,结合区域电性和宽频地震资料的综合处理和分析,试图对钦杭结合带的边界进行研究和厘定。

2 卫星重磁场与边界信息提取

2.1 卫星重力数据解算

由于陆地重力在水域、高海拔等艰苦区域难于开展,故中国大陆目前地面重力还没有完全覆盖,无法为大尺度研究提供完备数据。卫星重力虽然精度较低,但覆盖面积广,数据获取方便。卫星重力为自由空气异常,通过加上地形改正和减去中间层改正值,即可解算出地面布格重力异常,黄宗理等(2016)通过试验,认为其精度相当于地面观测1:50万比例尺的布格重力异常。通过卫星重力的解算,获取华南大部布格重力异常,弥补地面重力测量的空白区(水域、海域和其他难于进入地区),可为钦杭结合带及邻区大区域大尺度的重力场研究提供完备的数据支持。

国内外的各大研究机构(如德国地学中心:GFZ,国际重力场模型:ICGEM,欧洲航空局:ESA等)以三大专业重力卫星CHAMP、GRACE及GOCE获取的海量卫星重力数据为基础,结合常规测量方式的重力数据,建立了EIGEN、GGM及EGM等不同系列的地球重力场模型。不同的地球重力场模型采用的数据来源不同,产生的重力数据的异常精度和空间分辨率不一样。根据球谐理论,球谐展开次数越高,产生的数据异常精度和分辨率越高。为选取重力异常精度和空间分辨率高的地球重力场模型的重力数据,对GFZ公开发布的超高阶(>1000阶)地球重力场模型的重力异常精度和空间

分辨率进行对比(万晓云等,2017)。综合重力异常精度、空间分辨率、研究区范围及计算效率问题,本文选取高阶重力场模型EIGEN-6C4中重力观测数据和全球地形起伏模型ETOPO1的地形高程数据解算布格重力异常。

地面布格重力异常校正一般基于平面直角坐标系下进行,最远地改半径一般选取为167 km,未考虑地球曲率的影响。对于大尺度布格重力计算,江丽(2015)通过实验对比,发现在大于30 km区域使用球面重力校正方法进行校正,能显著提高重力地形校正精度。钦杭结合带及邻区覆盖华南板块大部,东西长逾1600 km,南北宽逾1300 km,对于如此大范围的布格重力异常求取更需要基于球坐标的解算方法。本文利用罗凡等(2018)根据Uieda et al.(2015)提出的Tesseroid模型基础上完善的球坐标计算方法解算了华南东部的卫星布格重力异常(图1)。

2.2 卫星磁异常

磁异常可以用来深入了解地下结构和地壳组成,在大陆地区,磁异常反映地壳岩石圈的地质、构造和地热演化(熊盛青等,2018);在海洋地区,磁异常走向平行于等时线(等年龄线),反映洋壳的时间演化,因此,磁异常被广泛应用于地质科学和资源勘探领域。全球磁EMAG2(global Earth Magnetic Anomaly Grid)是由卫星、船和航空磁测综合编制而成,它是全球第一个卫星磁异常网格EMAG3的升级版,网格间距从3弧分(约5.5 km)加密至2弧分(约3.7 km),高度从5 km降低至4 km,拼合时间为2009年(Maus et al.,2009)。无论在海洋还是陆域,附加网格和追踪线都包含在内。基于海洋地壳年龄模型,稀疏的追踪线之间的方向插值方法提高了数据精度。最长的波长(>330 km)已经替代了最新的CHAMP卫星的岩石圈磁场模型MF6。在大陆和北极,利用已有的磁异常网格,而在海洋的其他部分,则采用轮船和航空磁测航线原始数据进行融合(郑晖等,2012)。

由于地球磁场是偶极子场,局部感应磁异常中心位置与磁性体位置往往不一致,北半球偏北,南半球偏南,且随着纬度变化而变化,这种偏差给磁异常边界识别、磁性体位置的平面投影带来很大不便(张翔等,2019)。因此,一般采用化极的方法来

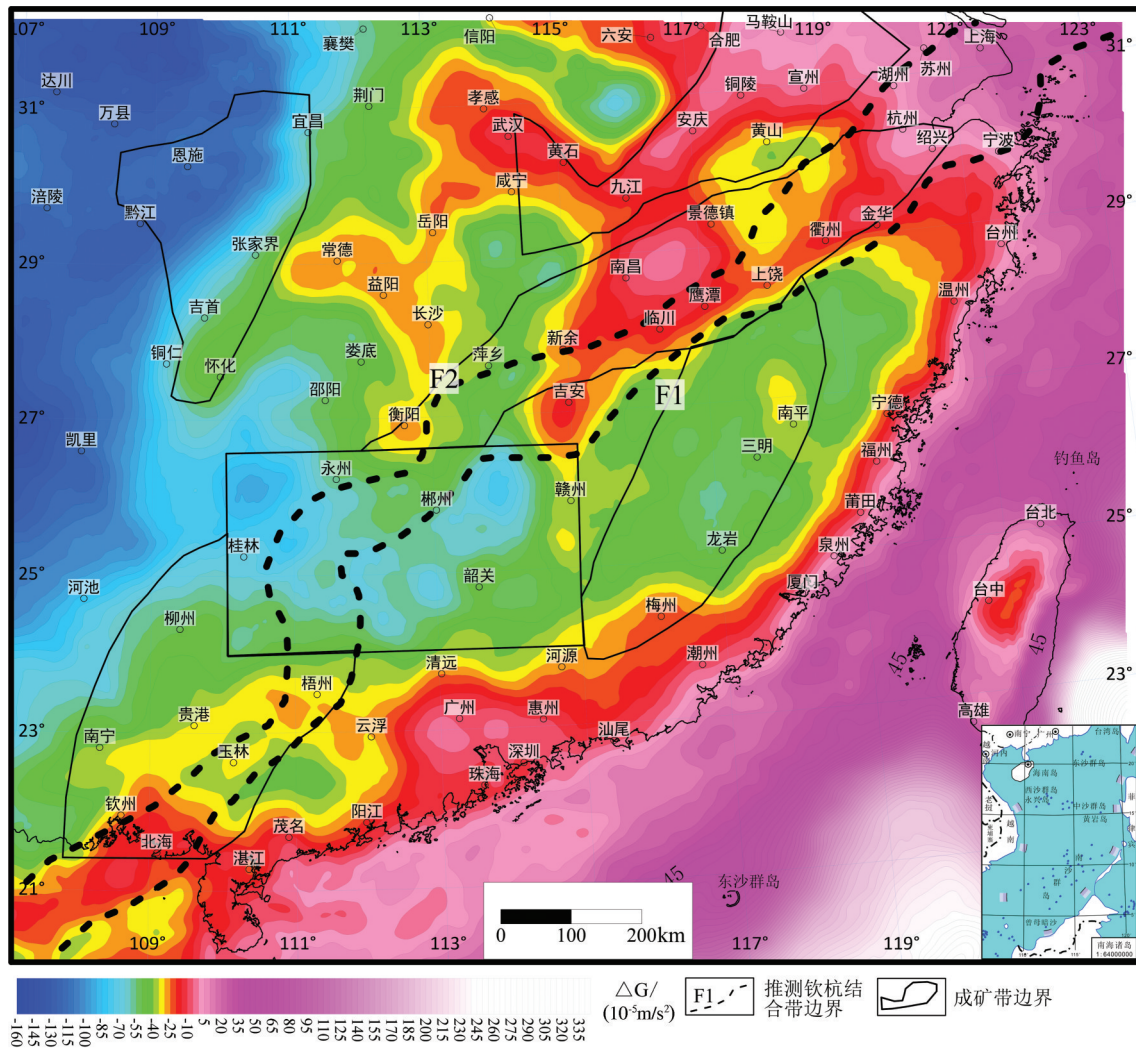


图1 根据卫星重力球坐标解算的钦杭结合带邻区及邻海布格重力异常

Fig.1 Bouguer gravity anomalies in adjacent areas and adjacent seas of the Qinhang junction belt calculated by satellite gravity based on spherical coordinates

将磁异常中心位置归位到磁性体正上方。化极需要磁倾角、磁偏角等地磁参数,这些参数随经纬度、随时间变化,在相对小范围内,可以采用中心点的磁参数进行化极,当范围很大时,磁参数的变化也很大,此时就不能再用中心点的磁参数来对整个区域化极(Guo et al., 2013)。为减少磁参数变化对化极的影响,笔者采用了变窗口化极方法,通过试验对比,采用300 km×300 km的窗口划分,对每个窗口取不同的磁倾角、磁偏角等地磁参数,逐块化极后,再融合到一起,获得了覆盖华南EMAG2化极磁异常(图2)。

2.3 重磁多尺度边缘检测

由于地质体边界两侧一般存在密度或磁化率

等物理属性差异,重磁异常在地质构造边界附近表现为梯度变化带,这些梯度带的实质就是场源的边界,因此,重磁场构造信息提取的主要方法是从重磁异常图中提取场源边界(张壹等,2015)。通常的做法是对重磁异常中的场源边界信息进行增强,然后利用某种边缘检测的手段确定边界位置(Guo et al., 2015)。重磁异常边缘增强检测的方法有很多种,如:斜导数法、斜导数水平梯度法、Theta图法等。每种方法的原理和应用的前提条件不尽一致,相同的一组重磁数据,用不同方法处理后的结果也有所不同。因此,有必要对不同方法的检测效果进行对比分析,优选出效果较好的方法。通常,在不同地区或不同地质背景的重磁异常解释过程中,也

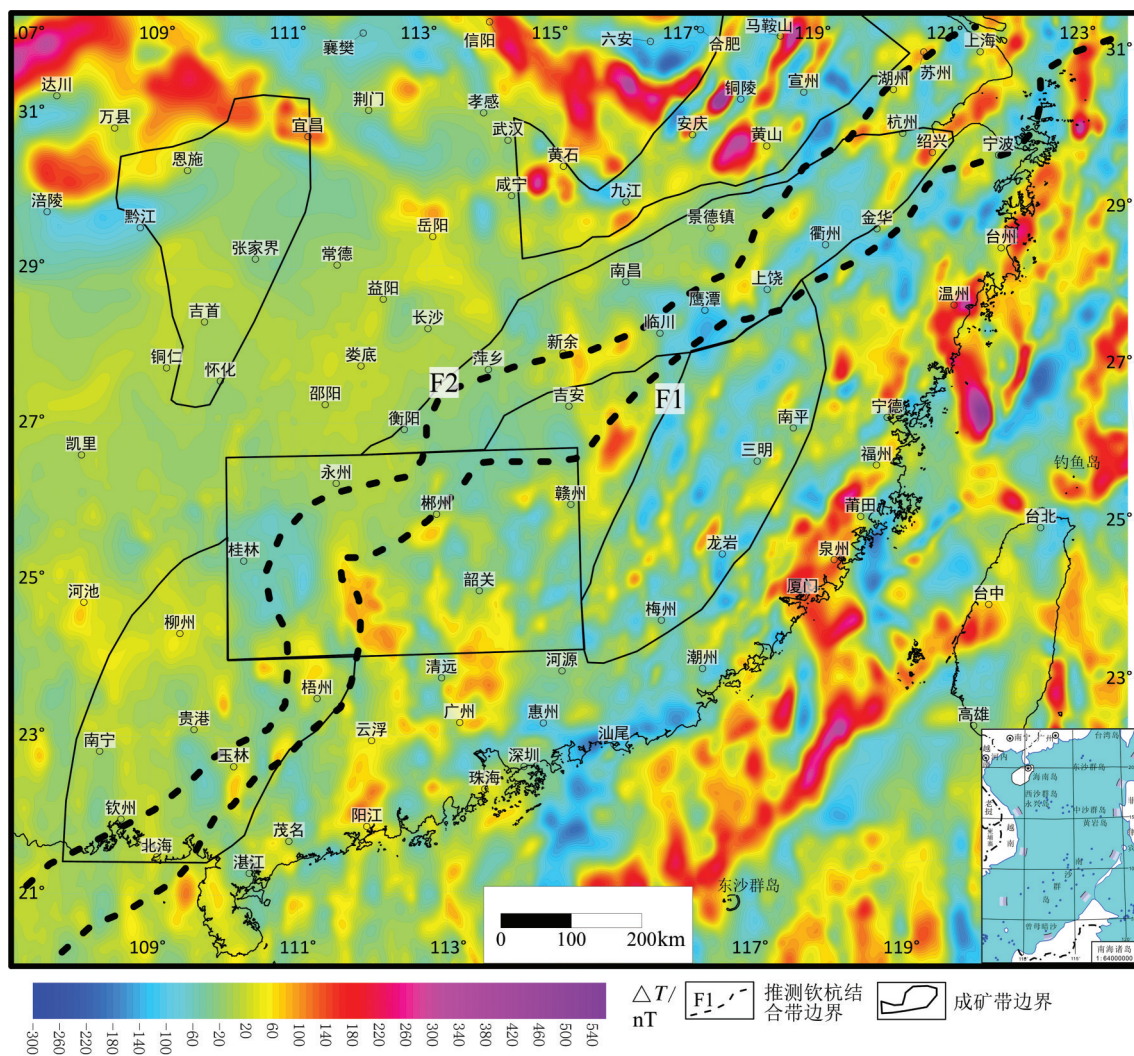


图2 钦杭结合带及邻区EMAG2卫星磁测数据化极磁异常

Fig.2 Reduction to the pole magnetic anomalies derived from EMAG2 satellite magnetic data in adjacent areas and adjacent seas of the Qinhang junction belt

需要对各种检测增强方法获取的结果进行对比分析,筛选出某一种与实际地质情况吻合较好的方法,结合已有资料综合分析,再给出合理的地质解释。严加永等(2015)通过模型试验对比了应用较多的总水平梯度法、斜导数法、Theta图法和多尺度边缘检测法(WORMS),发现多尺度边缘检测法比较适合大尺度重磁数据的边缘提取,并在长江中下游成矿带构造信息提取中发挥了作用。多尺度边缘检测地质解释的一般规则是:在同一图幅内将不同延拓高度检测结果叠加到一起,采用不同颜色、大小的线型表示不同深度尺度的信号边界形迹,不同深度边界信号形迹在分布位置上所体现的

相似性即可获知该构造形迹的发育深度及倾向特征。线束越密集表示边界构造切割深度越大,线束稀疏则表示其切割发育的深度较浅;线束组合越宽表示该构造倾向越缓,反之则表示该边界构造发育产状较陡、倾角较小。每组线束组合均能反映边界构造的走向及摆动、倾向、切割深度等特征(严加永等,2011)。

对卫星重力解算的布格重力异常和卫星化极磁异常进行了多尺度边缘检测,获得了华南东部边缘检测结果。华南东部卫星重力异常多尺度边缘检测如图3所示,从图中可以看出,检测线束主体呈线状分布,局部呈环状、半环状分布。线状线束反

映了断裂、块体边界。代表深部的构造线方向多呈北北东向分布,西部则以北西向为主,在广西局部为北北东向。部分代表浅部的构造线方向变化较大,反映了地壳浅部构造的复杂性。环状、半环状线束主要反映了侵入岩体、盆地的边界。结合重力异常边缘检测振幅信号强度(图3),通过振幅强弱可以判断WORMS边界线的可信度,振幅强的地段说明密度体边界存在的可能性较高。从振幅强度来看,钦杭结合带及周边地区强振幅也以北东向为主导,说明深部结构方向主体为北东向展布。

华南东部卫星磁化极异常边缘检测结果如图4所示,边缘检测线束反映的是不同磁性体的边界,线状线束反映了磁性地质体的边界或断裂,环形线束主要反映了岩体(隐伏岩体)和火山岩盆地的边界。华夏、扬子和大别边缘检测线束特征形状迥异,扬子地块以线状为主,方向多以北东东向为主,主要反映块体内部地层的边界;华夏地块除了线状构造外,环状构造分布广泛,特别是在华夏东部,从深到浅不同尺度的环形线束均有分布,这些环状构造大多反映了岩体及隐伏岩体的分布。大别造山

带两侧的北东向线束为郟庐断裂,北西向的两条边界分别为襄樊—广济断裂和晓天—磨子潭断裂。结合卫星化极异常边缘检测振幅信号强度(图4),通过强度可以判断WORMS边界线的可信度,振幅强的地段说明磁性体边界存在的可能性更高。

3 钦杭结合带边界厘定与成矿背景探讨

3.1 钦杭结合带边界识别与厘定

重磁多尺度边缘检测结果提供了华南地区构造、块体和岩体边界等丰富的信息,线性检测线多为断裂、块体边界的反映,环状检测线多为岩体、盆地边界。重力多尺度边缘检测更多地反映了断裂位置的分布,而卫磁多尺度边缘检测更多的反映磁性体的边界,当断裂中有岩浆活动时可检测出边缘检测线束,而没有岩浆活动时则没有相应的磁性边界线束。因此,本文以重力资料为主、卫磁资料为辅,结合大地电磁阵列和天然地震固定台站近震层析成像开展钦杭结合带边界的厘定。

为便于分析,将重力多尺度边缘检测结果叠加

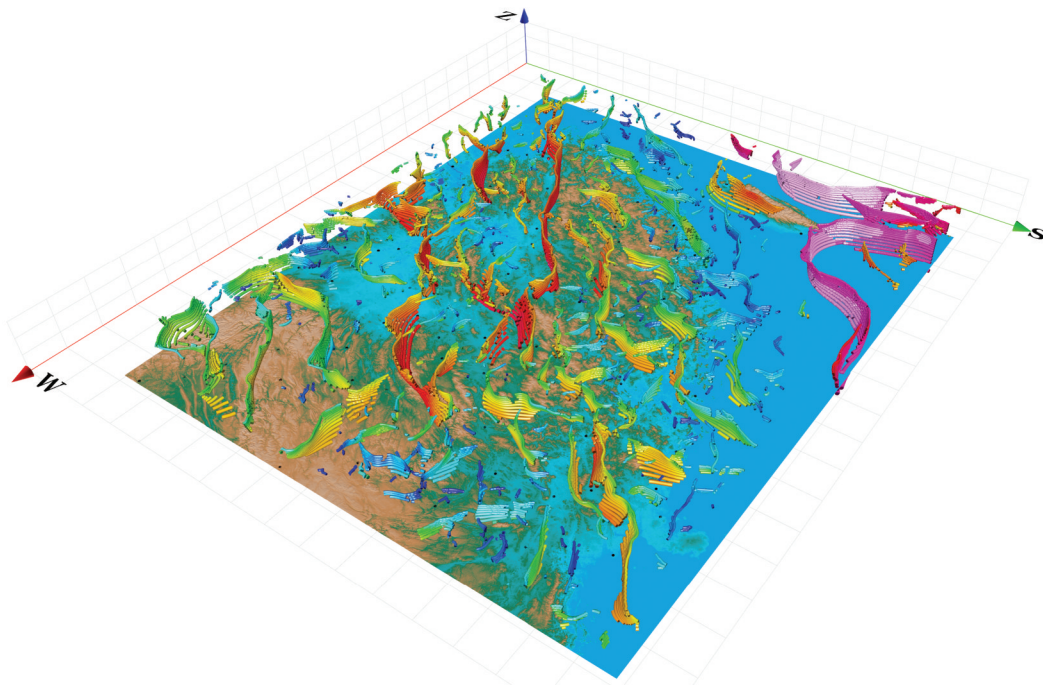


图3 华南东部卫星布格重力多尺度边缘检测结果

(线束颜色从蓝色到紫色表示检测线振幅强度从弱到强,底图为ETOPO1数字高程图)

Fig.3 Multi-scale edge detection results of Bouguer gravity in eastern South China

(The color of lines from blue to purple indicates the amplitude intensity of detection line from weak to strong; the bottom image is ETOPO1 digital elevation map)

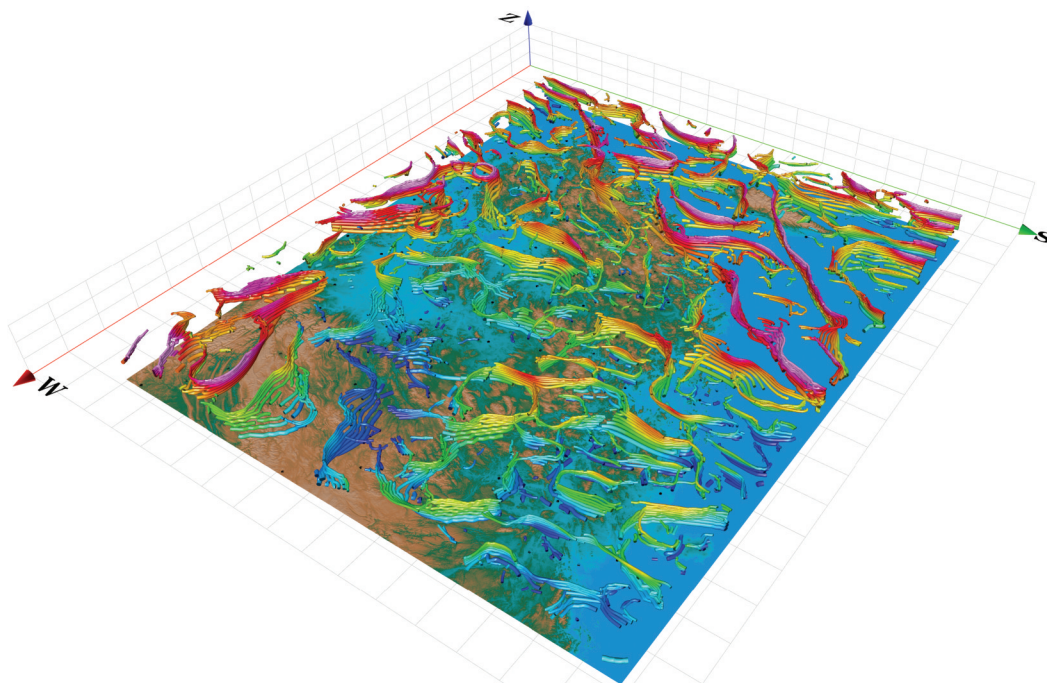


图4 华南东部EMAG2化极磁异常多尺度边缘检测结果
(线束颜色从蓝色到紫色表示检测线振幅强度从弱到强,底图为ETOPO1数字高程图)

Fig.4 Multi-scale edge detection results of EMAG2 reduction to the pole magnetic anomalies in eastern South China
(The color of lines from blue to purple indicates the amplitude intensity of detection line from weak to strong; the bottom image is ETOPO1 digital elevation map)

到地质图上(图5),多尺度边缘检测结果信息丰富,本文主要聚焦于钦杭结合带边界识别和厘定,海域和其他地区包括江南造山带的北界的边缘检测信息将在另文探讨。从图5可以看出,沿宁波—金华—上饶南—赣州北—郴州—临武—梧州—玉林东—北海东存在一条连续的明显的线束,其北东段与江绍断裂,中段与郴州—临武断裂吻合,笔者认为该追踪断裂F1应该是钦杭结合带的南界(图6)。沿苏州—湖州—杭州北—景德镇南—鹰潭—临川—新余—萍乡—衡阳—耒阳—永州—桂林—梧州西—玉林—钦州一线存在一条连续的线束,笔者认为沿该线束可断续追踪形成一条断裂F2,也即钦杭结合带的北界(图6)。从线束幅值强度来看(图4),F1切割深度较F2大,形态也更完整。从天然地震层析成像获得泊松比分布也发现扬子块体和华夏块体的波速比相对均较高(He et al.,2013;张永谦等,2019;陈安国等,2019),而结合带部位则呈现出显著的低波速比特征,且异常高波速比南界与本文推测的F1基本重合。上述结果都说明F1可能是华夏板块向扬子俯冲的主边界。F1和F2限定了钦杭结合带范围,笔者认为本文识别的钦杭结合带对应江南造山带的南部

边界。从图5还可以看出,自宣州,过九江、益阳,到怀化还存在一条明显的边界,推测为江南造山带的北界,其性质和具体位置将在另文讨论。

在“钦杭结合带及邻区深部地质调查”项目的支持下,完成了华南东部 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ (约50 km点距)的大地电磁阵列探测,获得了钦杭结合带及邻区地下电性结构。本文截取了30 km深度的视电阻率水平切片(图7),从图中可以看出,华南电性结构具有明显的分带性,不同块体或地质单元对应的电阻率特征各具特色。总体来看,研究区东部华夏地块的电阻率相对较高,异常多为离散团块状,西部扬子地块电阻率相对较低,异常形态规整连续。以重磁多尺度边缘检测划分的F1为界,两侧电阻率也存在明显差异:南东侧电阻率整体较高,局部存在团块状的低阻异常;北西侧电阻率普遍较低,局部有团块状、条带状高阻异常。这种电性差异边界与重磁多尺度的识别的钦杭结合带南界基本吻合,说明F1是一条区域上的块体边界。

为从地震学角度研究钦杭结合带位置和边界,在钦杭结合带及邻区深部地质调查项目的支持下,收集了华南地区天然地震Pg、Sg、Pn和Sn波震相大

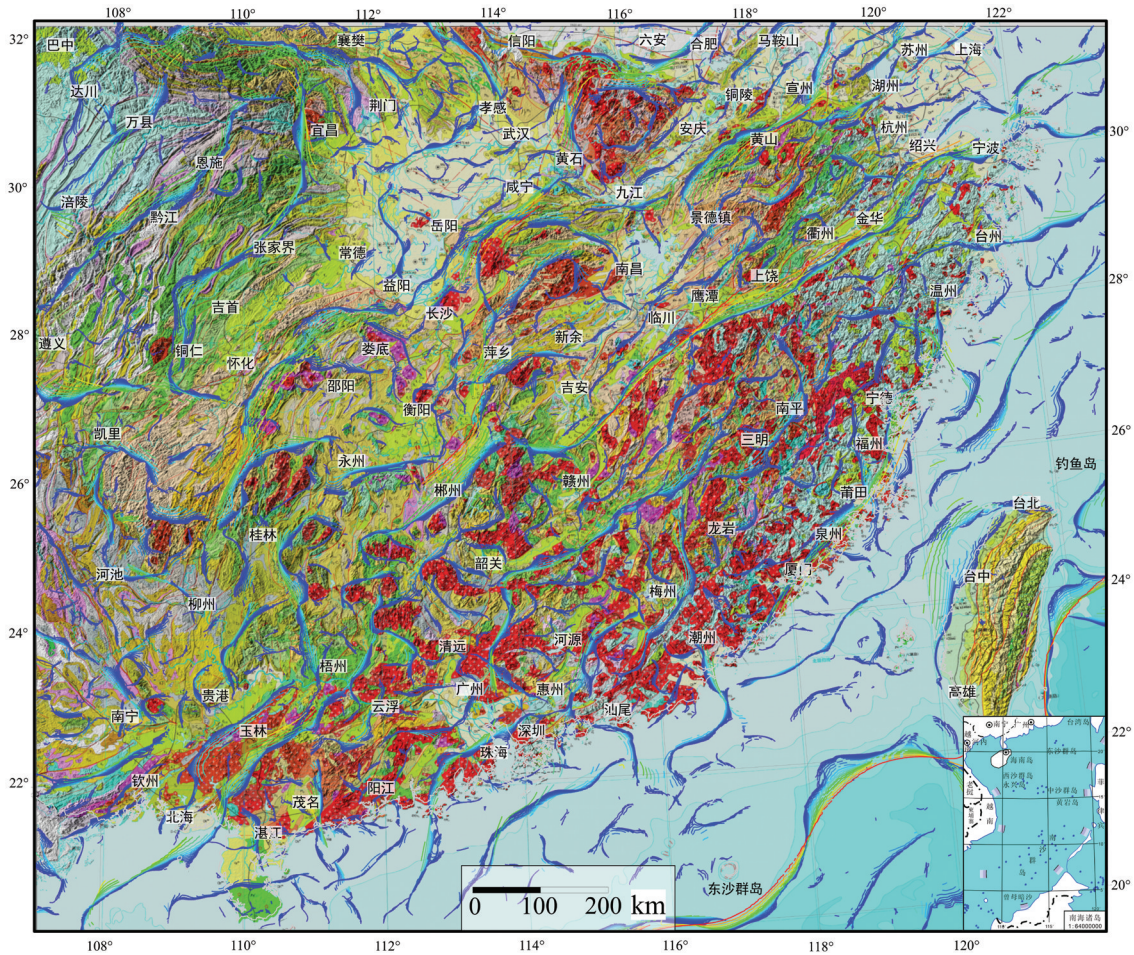


图5 华南卫星重力解算布格异常多尺度边缘检测与区域地质图

(底图为1:2.5万中国地质图, 线束为多尺度边缘检测结果: 从蓝色到红色, 反映边界深度从浅到深)

Fig. 5 Multiscale edge detection results of Bouguer anomaly by Southern China satellite gravity and regional geological map (Bottom image is 1:2.5 million geological map, wire harness is multi-scale edge detection results: from blue to red, reflecting the boundary depth from shallow to deep)

数据, 分析、提取出走时数据。参考华南人工地震剖面结果(徐涛等, 2014; Dong et al., 2015)建立地壳初始速度一维模型, 在 Simulps 软件(Thurber and Atré, 1993)中使用Pg波走时和Pg、Sg波的走时差来反演地壳速度结构和波速比, 获得了研究区三维P波速度结构模型。遵循从已知到未知的原则, 从钦杭结合带边界位置基本形成共识的东段, 到争议渐多的中段和南段, 按图6和图7中所示的AA'、BB'和CC'剖面位置, 从三维P波速度结构反演结果中截取3条垂向切片。

图8是钦杭东段AA'剖面P波速度切片, 从图中可以看出重力多尺度边缘检测识别的南边界F1和F2均位于高低速接触带附近, 速度的变化反映的是

不同地质体的边界, 因此, 无论从重磁、大地电磁和速度结构分析, 对钦杭东段边界位置的识别基本一致, 与地质观测划分的边界大致吻合。

图9是钦杭结合带中段从信阳东到河源的BB'剖面P波速度垂向切片, 剖面长度约900 km。前人认为钦杭在中段的边界为鹰潭—新余—萍乡一线, 但重力多尺度边缘检测和大地电磁结果(图6, 图7)显示钦杭结合带南界在该段的走向更偏南, 即沿吉安南—郴州一线展布。从速度切片来看, 推测的F1和F2边界分别位于高速体南北两侧, 符合地质体边界的电性特征。因此, 从重磁、大地电磁和速度结果来看, 钦杭结合带中段的南边界应该从吉安—郴州一线分布, 而北边界则沿抚州—新余—萍乡—衡

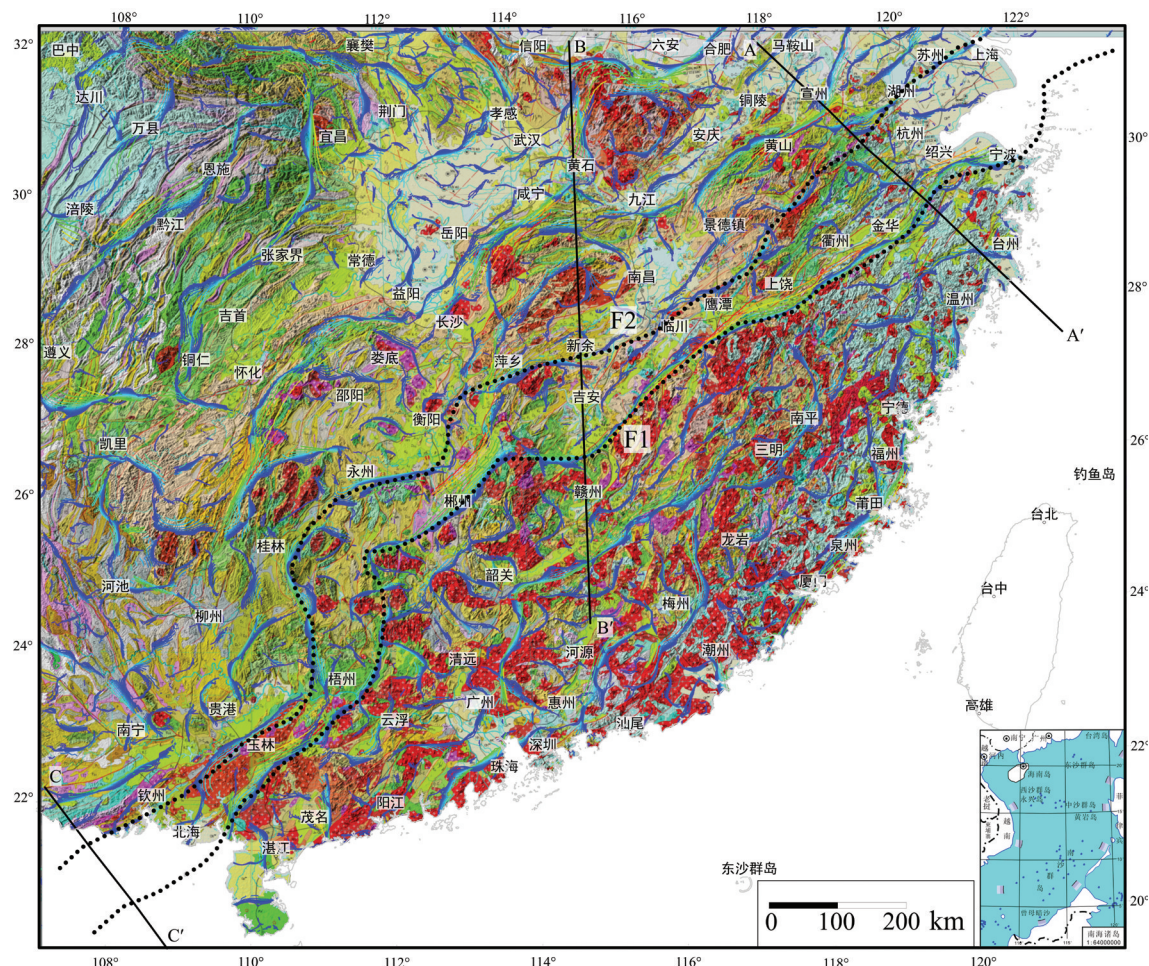


图6 根据区域重磁厘定的钦杭结合带边界

(F1-南界,F2-北界;底图为1:250万中国地质图,线束为多尺度边缘检测结果:从蓝色到红色,反映边界深度从浅到深)

Fig. 6 The Qinshui-Hangzhou juncture belt boundary determined by regional gravity and magnetism, (F1-South boundary and F2-North boundary, bottom map 1:2.5 million geological map, multi-scale edge detection result of wire harness: from blue to red, reflecting the boundary depth from shallow to deep)

阳一线展布。

钦杭南段由于覆盖较厚,缺少典型缝合带标志,复杂的地质情况使得钦杭结合带南段的边界存在诸多争议。从重力多尺度边缘检测和大地电磁结果(图6,图7)分析,钦杭结合带南段边界沿着梧州东—玉林东—北海东延伸入海,北界沿桂林—梧州西—玉林西—钦州—一线西南延伸入海。从CC'剖面P波速度切片(图10)来看,推测的边界F1和F2下方对应高速体东西两侧,说明不同地球物理方法推测的边界基本吻合,进一步证明F1和F2是钦杭结合带南段的边界。

3.2 钦杭成矿带深部背景探讨

钦杭结合带是一个古板块缝合带,同时也是华

南地区一条重要且独具特色的铜金和钨锡多金属成矿带(徐德明等,2012)。从地球物理场来看,钦杭结合带内重力场也存在局部变化(图1),北段和南段为带状高重力异常区,中段南岭地区为低重力异常中的局部弱重力异常,反映了各段在沉积历史、构造特征和岩浆活动等方面存在的差异,深部结构的差异使得钦杭成矿带具有分段性。北段和南段的高重力异常指示地壳减薄、地幔隆起,在此类深部背景下形成了深源性的壳幔同熔型中酸性岩浆岩带和以铜金为特色的矿集区和矿床,如世界著名的德兴铜金矿集区,上海金山、浙江建德岭后,铅山永平,上饶船坑,广丰铜山,东乡枫林、虎圩,宜丰村前、萍乡志木山等铜矿床。钦杭结合带中段整

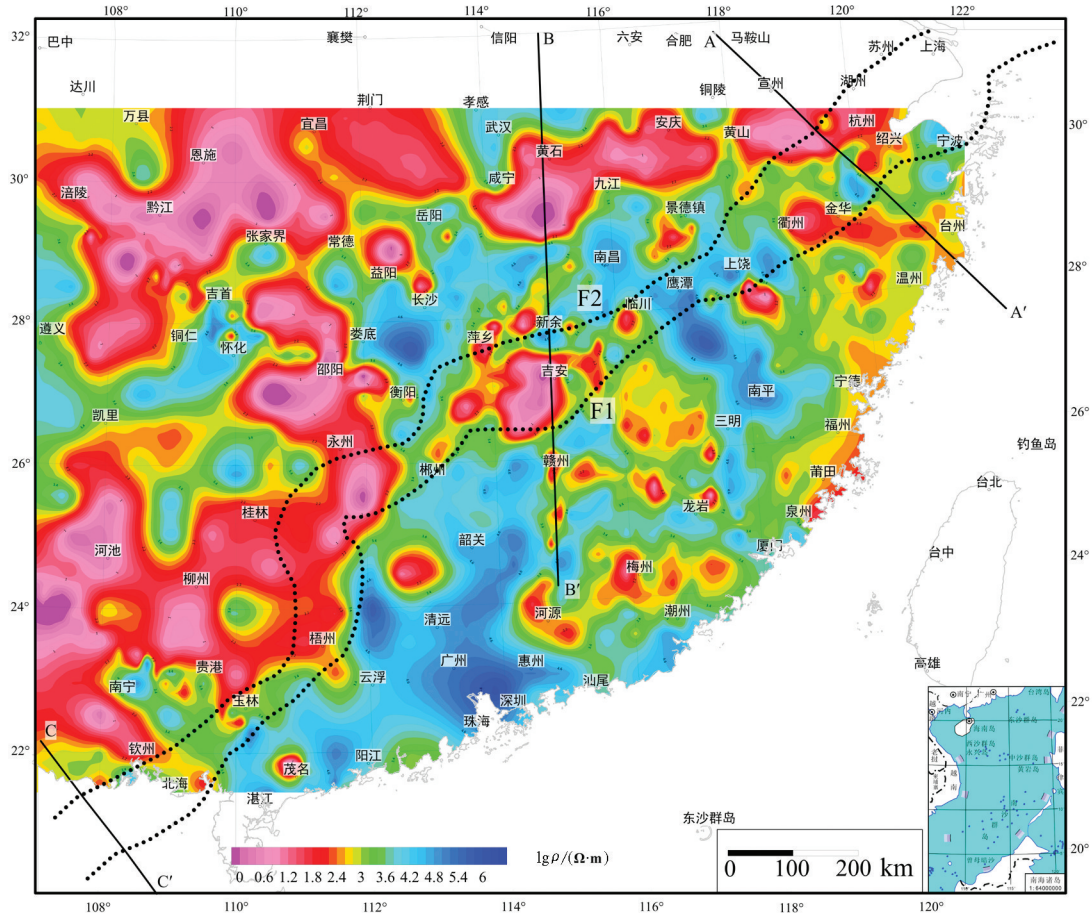


图7 华南大地电磁阵列探测 30 km 深视电阻率水平切片

Fig. 7 30 km deep apparent resistivity horizontal slice from South China magnetotelluric array exploration

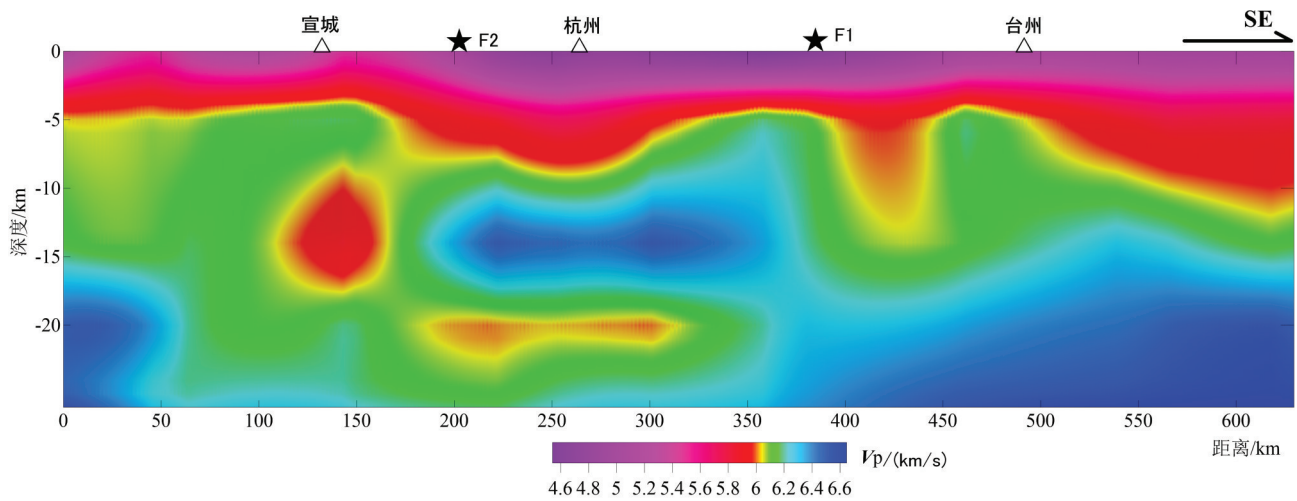


图8 A-A'线天然地震近震层析成像速度垂向切片

(F1, F2-重力多尺度边缘检测识别的钦杭结合带南界和北界)

Fig.8 Vertical slices of near-seismic tomographic velocity along A-A line

(F1, F2-Southern and northern boundaries of Qinzhou-Hangzhou juncture belt determined by gravity multi-scale edge detection)

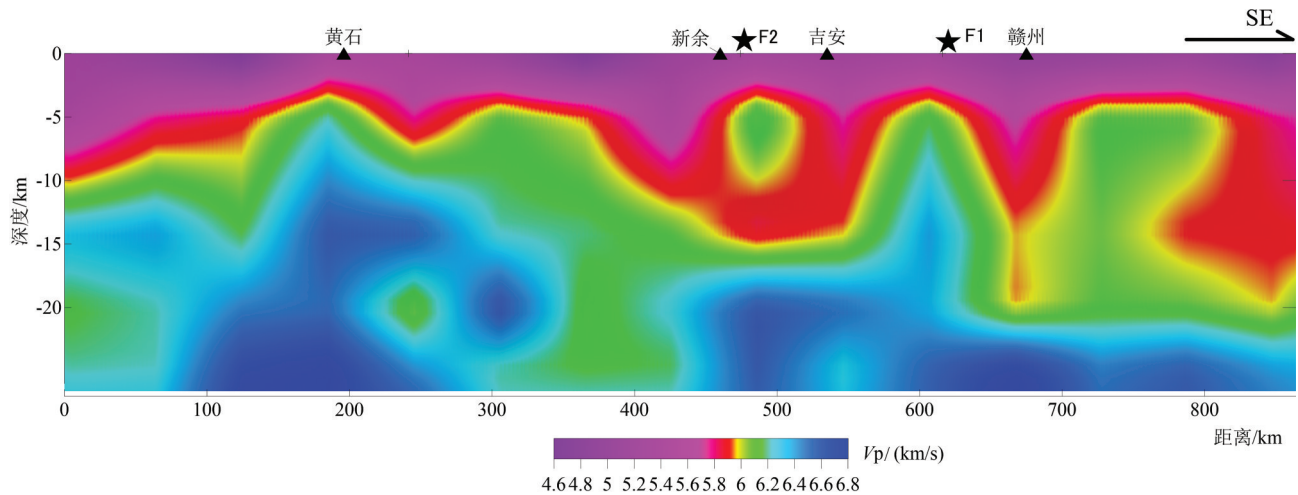


图9 B-B'线天然地震近震层析成像速度垂向切片
(F1,F2—重力多尺度边缘检测识别的钦杭结合带南界和北界)

Fig. 9 Vertical slices of near-seismic tomographic velocity along B-B' line
(F1, F2—Southern and northern boundaries of Qinzhong-Hangzhou juncture belt determined by gravity multi-scale edge detection)

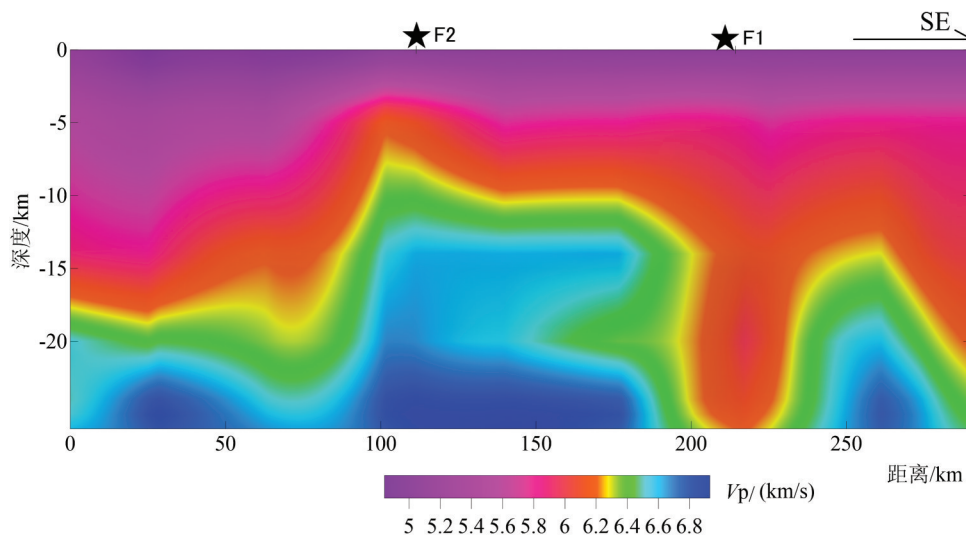


图10 C-C'线天然地震近震层析成像速度垂向切片
(F1,F2—重力多尺度边缘检测识别的钦杭结合带南界和北界)

Fig. 10 Vertical slices of near-seismic tomographic velocity along C-C'line
(F1, F2—Southern and northern boundaries of Qinzhong-Hangzhou juncture belt determined by gravity multi-scale edge detection)

体为低重力异常,指示地壳较厚,壳幔相互作用相对较弱,形成了地壳重熔型为主的侵入岩,并形成了世界上最重要的南岭钨锡多金属矿集区。区域化极磁异常(图2)显示了钦杭结合带内高磁异常多呈团块状分布于低背景中,异常形态和幅值变化较大,钦杭东段磁异常北东向分布且强度较高,南段则多为北北西向,强度相对较弱,反映岩浆活动的复杂性。区域电阻率(图7)也显示钦杭结合带内电阻率东段较高,

南段较低,存在局部变化和差异。这些地球物理特征揭示了钦杭结合带经受了多期次的构造岩浆活动。因此,除了上述的普遍规律,也存在多源成矿现象,出现W中有Cu,Cu中W,上铜下钨和Cu、W叠生,此类矿床有朱溪、永平、枫林等矿区。

4 结论

(1) 钦杭结合带是扬子板块和华夏板块结合带

的南界,也即是江南造山带的南边界。在钦杭结合带两侧,无论是重力场、磁力场、速度结构、还是电性结构都具有明显不同的特征,异常形态、走向和强度均有明显差异,反映了扬子地块和华夏地块不同的物质组成和基底特征。

(2)综合重磁电震资料分析给出了钦杭结合带具体边界,笔者认为钦杭结合带南界为宁波—金华—上饶南—赣州北—郴州—临武—梧州—玉林东—北海东,北界为上海—苏州—湖州—杭州北—景德镇南—鹰潭—临川—新余—萍乡—衡阳—耒阳—永州—桂林—梧州西—玉林—钦州。

(3)钦杭结合带内地球物理场存在局部变化,在不同地段形态、强度均有所差异,揭示了结合带经过多期次岩浆活动,在不同地段形成了不同组合的金属矿床,形成了分段性、多源性多位一体,别具特色的钦杭成矿带。

References

- Chen Anguo, Lü Qintian, Du Jianguo, Yan Jiayong. 2019. The Poisson's ratio of the crust-mantle of South China and its geological significance[J]. *Geology in China*, 46(4):750-758(in Chinese with English abstract).
- Dong S, Zhang Y, Gao R, Su J, Liu M, Li J. 2015. A possible buried paleoproterozoic collisional orogen beneath central South China: Evidence from seismic-reflection profiling[J]. *Precambrian Research*, 264: 1-10.
- Guo L, Shi L, Meng X. 2013. The antisymmetric factor method for magnetic reduction to the pole at low latitudes[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 92: 103-109.
- Guo L, Gao R, Meng X, Zhang G. 2015. A hybrid positive-and-negative curvature approach for detection of the edges of magnetic anomalies, and its application in the South China sea[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 172(10): 2701-2710.
- Guo L, Gao R. 2018. Potential-field evidence for the tectonic boundaries of the central and western Jiangnan belt in South China[J]. *Precambrian Research*, 309: 45-55.
- He C, Dong S, Santosh M, Chen X. 2013. Seismic Evidence for a geosuture between the Yangtze and Cathaysia Blocks, South China[J]. *Scientific Reports*, 3: 2200.
- Hu Zhaorong. 2010. Study on Yangtze and Cathaysian block connect age[J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 33(2): 139-142 (in Chinese with English abstract).
- Huang Zongli, Wang dian, Yan Jiayong, Zhang Huai. 2016. A huge deep fault system at the east edge of Eurasia: The new tectonic interpretation based on satellite gravity[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(1): 25-34 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Li. 2014. Research and implementation of Terrain Correction Using Sector Cylinder Models in Spherical Coordinate[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Jin Wenshan, Zhao Fengqing, Wang Zuwei, Gan Xiaochun. 1997. Geochemical characteristics of rocks of the Xuefengqi stratigraphic units, in the Xiangqiangui area[J]. *Hunan Geology*, 16(2): 10-16 (in Chinese with English abstract).
- Luo Fan. 2018. Study on Large Scale Satellite Gravity Data Processing Method: As Exemplified by South China[D]. Nanchang: East China of University Technology (in Chinese with English abstract).
- Mao Jianren, Li Zilong, Ye Haiming. 2014. Mesozoic tectono-magmatic activities in South China: Retrospect and prospect[J]. *Science China: Earth Sciences*, 44(12): 2853-2877 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Chen Maohong, Yuan Shunda, Guo Chunli. 2011. Geological characteristics of the Qinhang(or Shihang) metallogenic belt in South China and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 636-658 (in Chinese with English abstract).
- Maus S, Barckhausen U, Berkenbosch H, Bournas N, Brozena J, Childers V, Dostaler F, Fairhead J, Finn C, Vonfresne R. 2009. EMAG2: A 2-arc min resolution earth magnetic anomaly grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(8): 1-12.
- Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, Deng Jinfu, Feng Yiming, Zhang Kexing, Zhang Zhiyong, Wang Fangguo, Xing Guangfu, Hao Guojie, Feng Yanfang. 2009. Subdivision of tectonic units in China[J]. *Geology in China*, 36(1): 1-16 (in Chinese with English abstract).
- Shi Mingkui, Xiong Chenyun, Jia Deyu. 1993. Comprehensive Prediction of Non-ferrous Metal Concealed Deposits in Xianggui-Guangxi Area[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Shu Liangshu. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China block[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1035-1053 (in Chinese with English abstract).
- Shui Tao, Xu Butai, Liang Ruhua. 1986. Shaoxing-Jiangshan ancient land docking belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 31(6): 444-448 (in Chinese).
- Shui Tao. 1987. The basement structure of the southeastern continent of China[J]. *Science in China (Ser B)*, 15(4): 414-422 (in Chinese).
- Shui Tao. 1988. Tectonic framework of the continental basement of southeast china[J]. *Science in China (Ser B)*, 7: 885-896.
- Thurber C H, Ater S R. 1993. Three-dimensional Vp/Vs variations along the Loma Prieta rupture zone[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(3): 717-736.
- Uieda L, Barbosa V C, Braitenberg C. 2016. Tesseroids: Forward-

- modeling gravitational fields in spherical coordinates[J]. *Geophysics*, 81(5): F41–F48.
- Wan Xiaoyun, Zhang Running, Sui Xiaohong, Chen Liang. 2017. Analysis of earth gravity field detection based on satellite Data[J]. *Spacecraft Engineering*, 26(2): 121–129 (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).
- Xu Lei, Li Sanzhong, Liu Xing, Suo Yanhui, Wu Qi, Wang Pengchen. 2012. Tectonic Settings and metallogenism of the eastern segment of the Qin–Hang belt, South China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 32(5): 57–66 (in Chinese with English abstract).
- Xu Tao, Zhang Zhongjie, Tian Xiaobo, Liu Baofeng, Bai Zhiming, Lü Qingtian, Teng Jiwen. 2014. Crustal structure beneath the Middle–Lower Yangtze metallogenic belt and its surrounding areas: Constraints from active source seismic experiment along the Lixin to Yixing profile in East China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 918–930 (in Chinese with English abstract).
- Xu Deming, Ling Zhiyong, Long Wenguo, Zhang Kun, Wang Lei, Zhou Dai, Huang Hao. 2012. Research history and current situation of Qinzhou–Hangzhou metallogenic belt, South China[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 28(4): 277–289 (in Chinese with English abstract).
- Yan Jiayong, Lü Qingtian, Meng Guixiang, Zhao Jinhua, Deng Zheng, Liu Yan. 2011. Tectonic framework research of the Lower and Middle Yangtze metallogenic belt based on gravity and magnetic multi–scale edge detection[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 900–914 (in Chinese with English abstract).
- Yan Jiayong, Lü Qingtian, Chen Mingchun, Deng Zheng, Qi Guang, Zhang Kun, Liu Zhengdong, Wang Jie, Liu Yan. 2015. Identification and extraction of geological structure information based on multi–scale edge detection of gravity and magnetic fields: An example of the Tongling ore concentration area[J]. *Chinese J. Geophys.*, 58(12): 4450–4464 (in Chinese with English abstract).
- Yang Minggui, Mei Yongwen. 1997. Characteristics of geology and metallogenesis in the Qinzhou–Hangzhou paleoplate juncture[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 3(1): 52–59 (in Chinese with English abstract).
- Yang Minggui, Huang Shuibao, Lou Fashen, Tang Weixin, Mao Subing. 2009. Lithospheric structure and large–scale metallogenetic process in Southeast China continental area[J]. *Geology in China*, 36(3): 528–543 (in Chinese with English abstract).
- Yang Minggui, Zhu Pingjun, Xiong Qinghua, Mao Subing. 2012. Framework and evolution of the Neoproterozoic–Early Paleozoic South–China rift system[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(9): 1367–1375 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Guo Anling, Wang Yuejun, Li Sanzhong, Dong Yunpeng, Liu Shaofeng, He Dengfa, Chen Shunyou, Lu Rukui, Yao Anping. 2013. Tectonics of South China continent and its implications[J]. *Science China: Earth Sciences*, 43(10): 1553–1582 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiang, Shi Liancheng, Cheng Shasha, Duan Chenyu, Wei Yongqiang, Deng Dewei, Lu Yayun. 2019. Aeromagnetic characteristics and fracture structure framework of the eastern part of the western Qinling orogen[J]. *Geology in China*, 46(3): 587–600 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yi, Zhang Shuangxi, Liang Qin, Chen Chao. 2015. Application of boundary identifying technologies using gravity and magnetic maps in three–dimensional geological mapping of western Junggar area[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(3): 431–440 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongqian, Xu Yao, Yan Jiayong, Xu Zhiwu, Zhao Jinhua. 2019. Crustal thickness, and its relations to mineralization in the southeastern part of South China: Constraint from the teleseismic receiver functions[J]. *Geology in China*, 46(4): 723–736 (in Chinese with English abstract).
- Zhen Hui, Wang Yong, Wang Hubiao. 2012. Simulation of geomagnetic aided submarine navigation based on EMAG2[J]. *Progress in Geophys.*, 27(4): 1795–1803 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yongzhang, Zhen Yi, Zeng Changyu, Liang Jin. 2015. On the understanding of Qinzhou Bay–Hangzhou Bay metallogenic belt, South China[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(2): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yongzhang, Li Xinyuan, Zhen Yi, Shen Wenjie, He Junguo, Yu Pengpeng, Niu Jia, Zeng Changyu. 2017. Geological settings and metallogenesis of Qinzhou Bay–Hangzhou Bay orogenic juncture belt, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(3): 667–681 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈安国, 吕庆田, 杜建国, 严加永. 2019. 华南地壳及壳幔过渡带泊松比及其地质意义[J]. *中国地质*, 46(4): 750–758.
- 胡肇荣. 2010. 扬子与华夏地块拼接时代的再研究[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 33(2): 139–142.
- 黄宗理, 王典, 严加永, 张怀. 2016. 欧亚大陆东缘存在一个巨型深断裂系统—基于卫星重力的新发现[J]. *地球学报*, 37(1): 25–34.
- 江丽. 2014. 球坐标系下基于扇形柱体的地形改正研究与实现[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 金文山, 赵凤清, 王祖伟, 甘晓春. 1997. 湘黔桂雪峰期地层单元岩石地球化学特征[J]. *湖南地质*, 16(2): 10–16.
- 罗凡. 2018. 大尺度卫星重力数据处理方法研究——以华南地区为例[D]. 南昌: 东华理工大学.
- 毛建仁, 房子龙, 叶海敏. 2014. 华南中生代构造–岩浆活动研究: 现

- 状与前景[J]. 中国科学:地球科学, 44(12): 2593-2617.
- 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 郭春丽. 2011. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. 地质学报, 85(5): 636-658.
- 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): 1-16.
- 史明魁, 熊成云, 贾德裕. 1993. 湘桂粤赣地区有色金属隐伏矿床综合预测[M]. 北京: 地质出版社, 3-38.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 31(7): 1035-1053.
- 水涛, 徐步台, 梁如华. 1986. 绍兴—江山古陆对接带[J]. 科学通报, 31(6): 444-448.
- 水涛. 1987. 中国东南大陆基底构造格局[J]. 中国科学 (B辑), 15(4): 414-422.
- 万晓云, 张润宁, 睦晓虹, 陈良. 2017. 基于卫星观测数据的地球重力场探测技术发展趋势分析[J]. 航天器工程, 26(2): 121-129.
- 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.
- 徐磊, 李三忠, 刘鑫, 索艳慧, 吴奇, 王鹏程. 2012. 华南钦杭结合带东段成矿特征与构造背景[J]. 海洋地质与第四纪地质, 32(5): 57-66.
- 徐涛, 张忠杰, 田小波, 刘宝峰, 白志明, 吕庆田, 滕吉文. 2014. 长江中下游成矿带及邻区地壳速度结构: 来自利辛—宜兴宽角地震资料的约束[J]. 岩石学报, 30(4): 918-930.
- 徐德明, 蒯志永, 龙文国, 张鲲鹏, 王磊, 周岱, 黄皓. 2012. 钦杭成矿带的研究历史和现状[J]. 华南地质与矿产, 28(4): 277-289.
- 严加永, 吕庆田, 孟贵祥, 赵金花, 邓震, 刘彦. 2011. 基于重磁多尺度边缘检测的长江中下游成矿带构造格架研究[J]. 地质学报, 85(5): 900-914.
- 严加永, 吕庆田, 陈明春, 邓震, 祁光, 张昆, 刘振东, 汪杰, 刘彦. 2015. 基于重磁场多尺度边缘检测的地质构造信息识别与提取——以铜陵矿集区为例[J]. 地球物理学报, 58(12): 4450-4464.
- 杨明桂, 梅勇文. 1997. 钦—杭古板块结合带与成矿带的主要特征[J]. 华南地质与矿产, 3(1): 52-59.
- 杨明桂, 黄水保, 楼法生, 唐维新, 毛素斌. 2009. 中国东南陆区岩石圈结构与大规模成矿作用[J]. 中国地质, 36(3): 528-543.
- 杨明桂, 祝平俊, 熊清华, 毛素斌. 2012. 新元古代—早古生代华南裂谷系的格局及其演化[J]. 地质学报, 86(9): 1367-1375.
- 张国伟, 郭安林, 王岳军, 李三忠, 董小鹏, 刘少峰, 何登发, 程顺有, 鲁如魁, 姚安平. 2013. 中国华南大陆构造与问题[J]. 中国科学: 地球科学, 43(10): 1553-1582.
- 张翔, 石连成, 程莎莎, 段晨宇, 魏永强, 邓德伟, 卢亚运. 2019. 西秦岭造山带东段航磁特征及断裂构造格架[J]. 中国地质, 46(3): 587-600.
- 张壹, 张双喜, 梁青, 陈超. 2015. 重磁边界识别方法在西准噶尔地区三维地质填图中的应用[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 40(3): 431-440.
- 张永谦, 徐晓, 严加永, 徐志伍, 赵金花. 2019. 华南东南部地壳厚度、属性及其与成矿的关系: 基于地震接收函数的约束[J]. 中国地质, 46(4): 723-736.
- 郑晖, 王勇, 王虎彪. 2012. 地球磁场异常格网(EMAG2)辅助潜艇导航仿真研究[J]. 地球物理学进展, 27(4): 1795-1803.
- 周永章, 郑义, 曾长育, 梁锦. 2015. 关于钦—杭成矿带的若干认识[J]. 地学前缘, 22(2): 1-6.
- 周永章, 李兴远, 郑义, 沈文杰, 何俊国, 虞鹏鹏, 牛佳, 曾长育. 2017. 钦杭结合带成矿地质背景及成矿规律[J]. 岩石学报, 33(3): 667-681.