

doi: 10.12029/gc20160515

姜枚, 杨经绥, 张立树, 等. 沿雅鲁藏布江缝合带东坡、日喀则等蛇绿岩体磁异常特征及其找矿标志[J]. 中国地质, 2016, 43(5): 1666–1678.
Jiang Mei, Yang Jingsui, Zhang Lishu, et al. The magnetic anomaly characteristics of Dongpo, Xigaze and some other ophiolite rock masses along the Yarlung–Zangbo suture zone and their ore–prospecting significance[J]. Geology in China, 2016, 43(5): 1666–1678(in Chinese with English abstract).

沿雅鲁藏布江缝合带东坡、日喀则等蛇绿岩体磁异常特征及其找矿标志

姜 枚¹ 杨经绥¹ 张立树¹ 张聿文² 彭 淼^{1,2} 李庆庆¹

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100087)

摘要: 航空磁测 ΔT 图上清楚显示出沿雅鲁藏布江缝合带具有南北两条航磁异常, 地质研究确认沿雅鲁藏布江缝合带的蛇绿岩体呈带状东西向延续近 2000 km, 但已知主要含铬蛇绿岩体分布于雅鲁藏布江南岸。在罗布莎和泽当地表观测到断续分布着含铬蛇绿岩体, 地质研究程度较高, 岩体规模不大。向西地表有出露日喀则岩体, 再西段有当穷、普兰、东坡等规模巨大的岩体。航空磁测图上显示出日喀则、东坡、普兰、当穷等岩体与清晰的航磁异常对应。对上述岩体进行的地面磁测准确地确定了已知岩体与航磁异常的关系, 位于雅鲁藏布江东段的罗布莎与泽当岩体属于其南部强航磁异常北缘的负异常范围内的小岩体。西部沿江含铬蛇绿岩体是断续分布的, 呈短条带状或较大的三度体; 地面磁测异常突出反映出地表岩体磁铁矿分布的不均匀性, 在岩体边缘(包括近岩体围岩)的蛇纹石化较强, 磁异常亦较强, 并由此较准确地圈定出岩体范围。航磁异常反映出岩体内部有相对富积的磁性矿物和磁性体, 它们可能来自深部含 FeO、Fe₂O₃ 等矿物在岩浆上涌到上地壳由于蛇纹石化而生成 Fe₃O₄, 当温度低于 480°C 时形成较强的磁性。反演计算了磁性体位于 3~5 km 深度上, 虽然蛇绿岩体及其围岩中存在的磁铁矿非直接来源于地幔物质, 但含铬蛇绿岩体的岩浆物质是生成磁铁矿的主要物质贡献者。由此将航磁和地面磁测异常与大地电磁法、反射地震等方法结合可以给出岩体深部结构的地球物理特征, 这有利于圈定找矿的远景地段。

关键词: 雅鲁藏布江缝合带; 航磁异常; 蛇绿岩体; 找矿标志

中图分类号: P631.2; P612 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)05-1666-13

The magnetic anomaly characteristics of Dongpo, Xigaze and some other ophiolite rock masses along the Yarlung–Zangbo suture zone and their ore–prospecting significance

JIANG Mei¹, YANG Jing–sui¹, ZHANG Li–shu¹, ZHANG Yu–wen², PENG Miao^{1,2}, LI Qing–qing¹

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100087, China)

收稿日期: 2016-06-29; 改回日期: 2016-07-27

基金项目: 中国地质调查局项目(12120114061801)资助。

作者简介: 姜枚, 男, 1937 年生, 研究员, 长期从事地球物理学研究; E-mail: mjmeij@163.com。

通讯作者: 杨经绥, 男, 1950 年生, 研究员, 长期从事岩石学研究; E-mail: yangjsui@163.com。

Abstract: Aeromagnetic survey ΔT maps clearly show that there are two SN-trending aeromagnetic anomaly zones along the Yarlung-Zangbo suture zone, and geological researches have confirmed that the ophiolite rock masses along the Yarlung-Zangbo suture zone extend nearly 2000 km in banded distribution and in ES direction; however, it has been known that the main chromium-containing ophiolite rock masses are distributed on the south bank of the Yarlung Zangbo River. There are discontinuously distributed chromium-containing ophiolite rock masses observed on the ground of Luobusha and Zedang, which have small sizes and whose geological study degree is relatively high. There is Xigaze rock mass outcropped westward on the ground, and there are huge rock masses, including Dangqiong, Purang, and Dongpo, further to the west. Aeromagnetic survey maps show that the rock masses, including Xigaze, Dongpo, Purang, and Dangqiong, are obviously consistent with aeromagnetic anomalies. Ground magnetic survey for the above rock masses accurately has determined the relationship between the known rock masses and the aeromagnetic anomalies, and the Luobusha and Zetang rock masses in the eastern section of the Yarlung Zangbo River belong to small rock masses within the negative anomaly range on the northern margin of the strong aeromagnetic anomaly in the south. The chromium-containing ophiolite rock masses along the river in the west are distributed discontinuously, exhibiting short banded or large three-dimensional masses; ground magnetic survey anomalies prominently reflect the unevenness of distribution of the ground magnetite rock masses, with strong serpentinization and strong magnetic anomaly on the margin of the rock masses (including surrounding rocks near rock masses), thus to accurately delimit the range of the rock masses. The aeromagnetic anomalies reflect that there are relatively enriched magnetic minerals in the rock masses; the magnetic minerals might come from the minerals containing such components as FeO, and Fe₂O₃ in the deep part, which upwelled to the upper crust with magma and formed Fe₃O₄ due to serpentinization, thus generating strong magnetism when the temperature was lower than 480 °C. Inversion calculation shows that the magnetic bodies are within the depth range of 3 - 5 km; although the magnetite existing in the ophiolite rock masses and their surrounding rocks was not directly from mantle materials, the magma materials in the chromium-containing ophiolite rock masses were main material contributors to the magnetite. The distribution range of the magnetite roughly corresponds to the ore-containing ophiolite rock masses, thus the aeromagnetic and ground magnetic survey anomalies, together with such methods as magnetotelluric method and reflection seismic method, can yield the geophysical characteristics of the deep structure of the rock masses, in favor of delimiting prospective areas for ore prospecting.

Key words: Yarlung Zangbo suture zone; aeromagnetic anomaly; ophiolite rock mass; ore-prospecting criteria

About the first author: JIANG Mei, male, born in 1937, senior researcher, engages in the study of geophysics; E-mail: mjmeij@163.com.

About the corresponding author: YANG Jing-sui, male, born in 1950, senior researcher, engages in the study of petrology; E-mail: yangjsui@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. 12120114061801).

地质研究表明沿雅鲁藏布江由罗布莎蛇绿岩体向西出露着数以百计的蛇绿岩体,主要沿雅鲁藏布江南岸分布,出露岩体的规模大小相差悬殊,西段还有数个出露面积达400~700 km²的大岩体^[1-3],世界级的俄罗斯乌拉尔山肯皮尔赛铬铁矿^[4-5]和极地乌拉尔铬铁矿^[6]均产生于巨大蛇绿岩体中,而且这些形成大型铬矿的岩体与罗布莎铬铁矿区岩体一样,均含有深部地幔物质,表明岩体可能是通过地幔柱从深部到达上地幔及地壳的^[7-15]。近几年扩大了对蛇绿岩体的研究范围,对分布于雅鲁藏布江缝合带中段、西段的众多规模较大的蛇绿岩体进行了多方面的地质研究,尤其关于该区蛇绿岩体的含矿性和蛇纹石化等方面的研究,为应用地球物理方

法进行深部探测提供了依据。

整体上看,本区的研究程度较低,无论在方法选择和应用效果方面还有许多急待深入研究的问题,本文通过在罗布莎、泽当、日喀则、普兰、东坡等蛇绿岩体范围内进行地球物理探测,着重分析区域性航磁和地面磁探测结果,并探讨磁异常成因及对寻找铬铁矿的意义。

青藏高原沿雅鲁藏布江缝合带的航空磁测于1969—1972年和1998—1999年先后2次完成的探测结果基本上完整地控制了沿江平行延伸的两条近东西延伸的航磁条带状异常^[15-19]。本文针对沿雅鲁藏布江南岸分布的蛇绿岩体航磁异常特征和岩石磁性的成因作具体分析。

2009—2014年在大量地质研究的基础上选择了沿雅鲁藏布江缝合带的罗布莎—泽当岩体、日喀则岩体、东坡岩体、普兰岩体以及当穷岩体进行了地面重力、磁力方法,可控源音频大地电磁法、大地电磁法以及反射地震的探测,该项工作是从已知的罗布莎铬铁矿蛇绿岩开始,随后在工作程度相对较低的其它岩体并以剖面探测为主,逐步增加工作量。这使我们有可能在较短时间里以不太多的投入量获得探测岩体深部结构的新资料^[20-22],为进一步找矿提供了依据。

1 含铬蛇绿岩体与航磁异常的定位

图1的藏南区域构造略图展示了沿雅江分布的蛇绿岩体的大致位置,地质研究确认了沿雅鲁藏布

江从萨迦以西蛇绿岩大致分成了南北两条带。而图1b的航空磁测异常平面图却清楚地显示出沿雅鲁藏布江分布从东到西有两条连续性极好的航磁异常,而且,推断存在两条蛇绿岩带。一条位于雅鲁藏布江北岸,另一条位于雅鲁藏布江南岸。近年在地质研究中确定了位于雅鲁藏布江西段南岸的东坡、普兰、当穷等含矿蛇绿岩体,与北岸的蛇绿岩带有近20 km以上的距离,当前对北岸蛇绿岩体的研究工作不多。中段日喀则蛇绿岩体、东段泽当与罗布莎含铬矿岩体都是在雅鲁藏布江南岸(图2)。在东端泽当到朗县一线的航磁异常宽度变大,著名的罗布莎含铬矿蛇绿岩体位于雅鲁藏布江南岸。为此,进行地面磁测来为罗布莎航磁异常精确定位,并使用较大比例尺详细的航磁图来分析航磁异

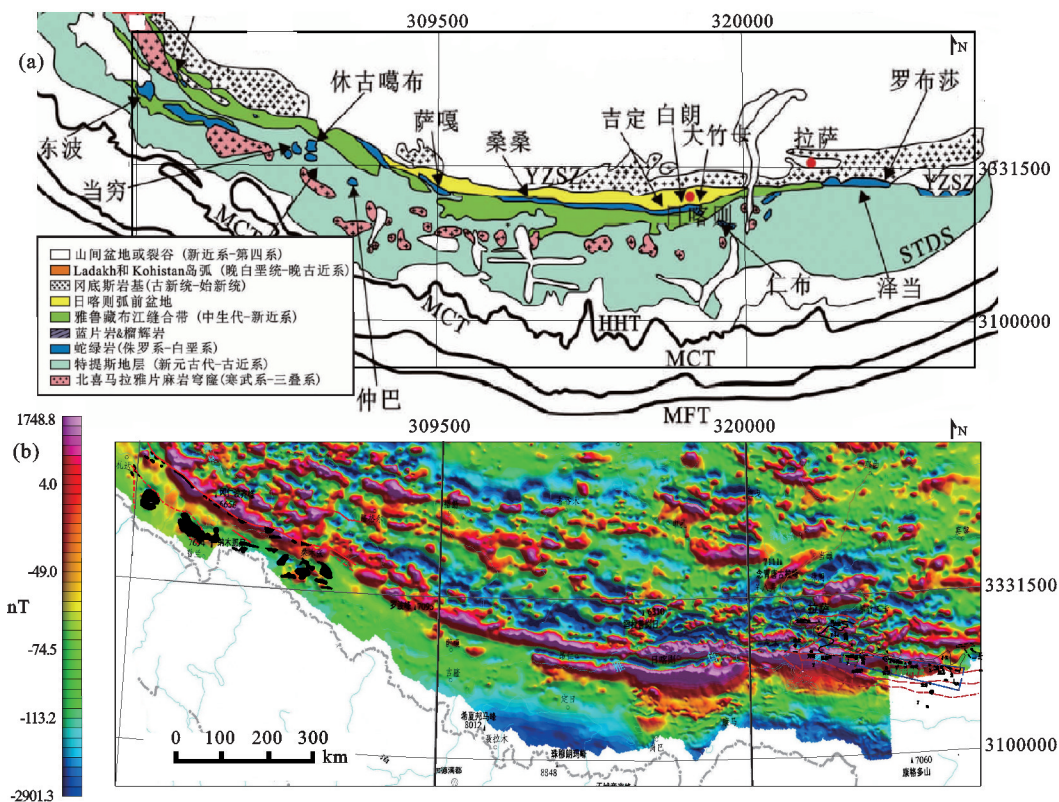


图1 a—西藏南部构造格架和雅鲁藏布江缝合带蛇绿岩的分布简图^[23];
b—航空磁测 ΔT 平面图^[17]

YZSZ—雅鲁藏布江缝合带; MBT—主边缘逆冲断层; MCT—主中央逆冲带;
MFT—主前缘逆冲断裂; HHT—高喜马拉雅逆冲断层; STDS—藏南拆离系

Fig.1 a—Schematic map of structural framework in southern Tibet and distribution of ophiolite in the Yarlung Zangbo suture zone^[23];
b— ΔT plan view from aeromagnetic survey^[17]

YZSZ – The Yarlung Zangbo suture zone; MBT – The main boundary thrust fault; MCT – The main central thrust zone; MFT – The main front thrust fault; HHT – The High Himalayan thrust fault; STDS – The southern Tibetan detachment system

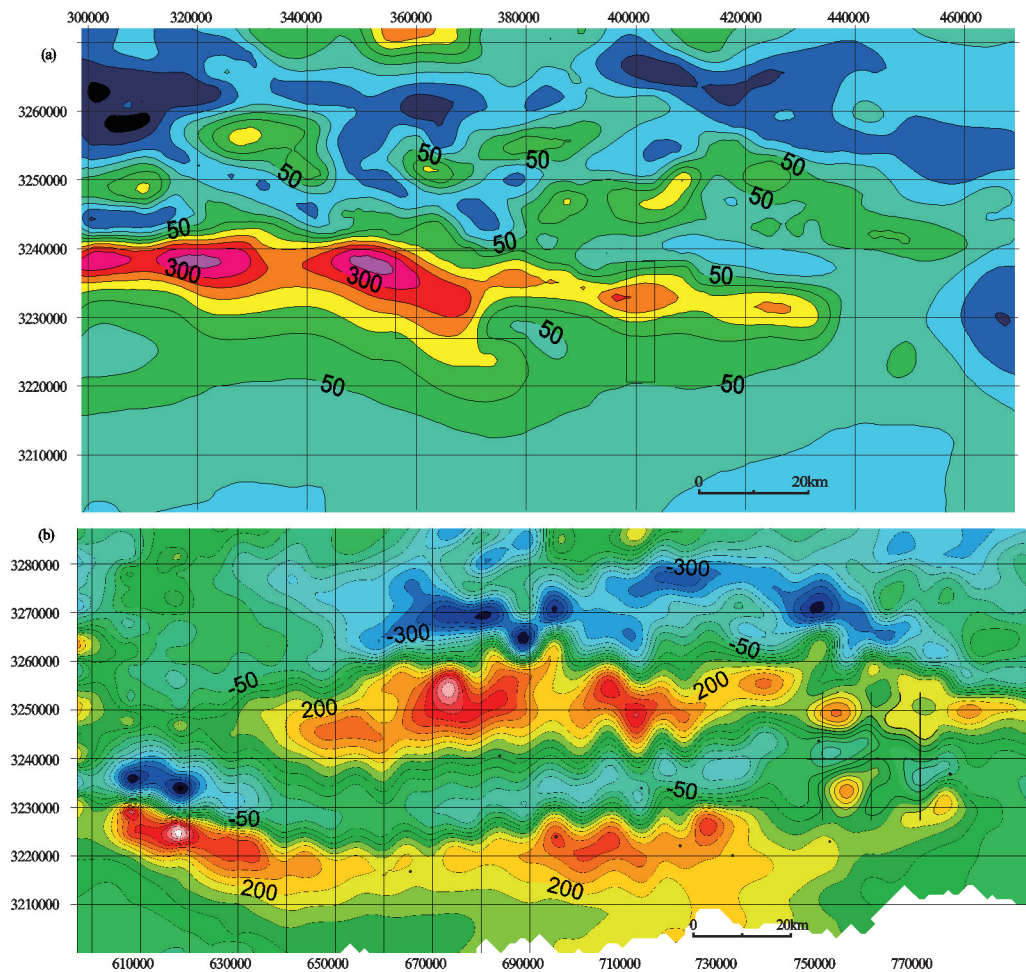


图2 a—泽当—罗布莎岩体航磁异常图;b—日喀则岩体航磁平面异常图(单位:nT)

Fig. 2 a—Aeromagnetic anomaly map of the Zedang—Luobusha rock mass; b—Aeromagnetic anomaly plan view of the Xigaze rock mass (unit: nT)

常的特征。值得注意的是罗布莎矿区仅仅位于一个较小的航磁异常带上,该异常位于南部另一个较大较强的航磁异常的负异常背景内,它与泽当—罗布莎蛇绿岩体相当,属于小岩体。

这种特征在重力场中反映的同样较清楚,在重力图中泽当—罗布莎矿区位于南部高重力场和北部低重力异常之间的梯度带上^[19],南部的高重力异常与航磁高磁异常是一致的,但罗布莎蛇绿岩体的航磁异常仅仅是南部高磁异常北侧负异常区的一个小岩体的异常,而在雅鲁藏布江西段南部的东坡、普兰、当穷和日喀则蛇绿岩体则实实在在有较强的航磁异常,规模较大,近东西向排列(图3、4)。

在上述蛇绿岩体航磁异常范围内布置了重磁

法探测,幸运地是在这些岩体上都呈现出清晰的独立 ΔT 异常。这有利于我们用航磁异常来研究岩体的深部结构。相对较小的罗布莎—泽当岩体东西走向长逾20 km,可南北方向上的宽度不过2 km,航磁 ΔT 异常图上仅仅位于更强异常北缘负异常背景中,但仍然具有本身单独的航磁异常。罗布莎岩体在1969—1972年西藏中部航磁结果中,航高约为2000~3000 m,异常宽约6 km;2000年在矿区上空1000 m高度磁测时,异常宽度仅2 km。可见南带较宽的航磁异常带含有飞行较高的成分,非其真实宽度。南异常带由达机翁向东过达吉岭、昂仁,止于白朗,东段异常昂仁以东异常突出,规模大,连续性好为特点^[16]。

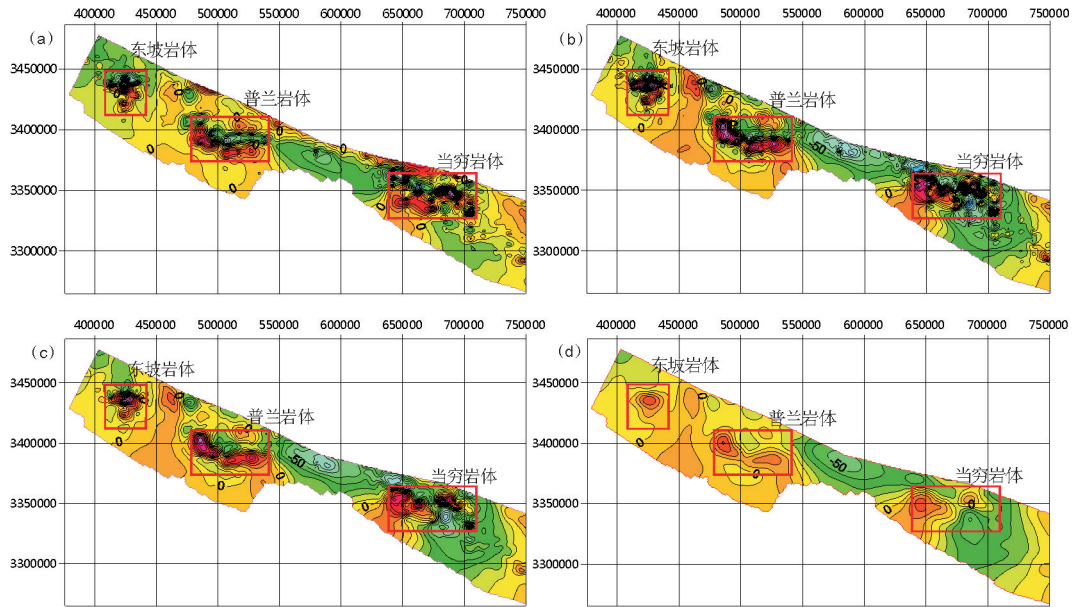


图3 雅鲁藏布江西段东坡、普兰、当穷岩体航磁 ΔT 平面图

a—航磁 ΔT 平面图；b—航磁 ΔT 化极异常平面图；c—航磁化极上延1 km平面图；d—航磁化极上延5 km平面图；图中红框为地面磁测测区范围

Fig.3 Aeromagnetic ΔT plan view of the Dongpo, Purang and Dangqiong rock masses in the western section of the Yarlung Zangbo River

a—Plan view of aeromagnetic ΔT anomaly; b—Plan view of aeromagnetic ΔT reduction-to-the-pole anomaly; c—Plan view after aeromagnetic reduction-to-the-pole upward continuation by 1 km; d—Plan view after aeromagnetic reduction-to-the-pole upward continuation by 5 km; where the red box is the range of ground magnetic survey area

2 含铬蛇绿岩体航磁 ΔT 异常的特征

沿雅鲁藏布江缝合带西段的东坡、普兰、当穷岩体以及中段日喀则岩体均处于雅鲁藏布江南岸，磁测表明这几个岩体周边没有其他磁性体的干扰，且地表出露的较好，规模巨大，与航磁、地面磁测圈定的岩体范围吻合，具有确定的对应关系。故这些岩体的航磁 ΔT 异常无疑可以确认是由与含铬蛇绿岩体有关的磁性体形成的(图3)。东段泽当、罗布莎岩体的航磁异常同样是含铬矿蛇绿岩体引起的单个磁异常，只是规模较小。

图3是利用阿里地区最新的1 km \times 1 km网络数据处理的结果图，位于雅鲁藏布江南岸不足20 km处，呈北西方向排列着3个各自独立的航磁异常。将航磁异常与地质图相对照更一目了然地看出岩体的特征。在原始航磁图(图3-a)中由于斜磁化影响航磁呈正负伴生的异常，位置与地质图上出露的蛇绿岩体分布范围吻合，由于第四纪覆盖岩体出露部分不连接，可是在化极与上延处理后，独立的

航磁异常与岩体范围完全一致，可见岩体是相对完整的向下延伸。日喀则岩体航磁异常是由单个异常相连接的(图4-a)，各个磁异常之间存在明显的南北向狭长状连续的负磁异常或梯度带，可能意味着在岩体生成后向北推进过程中的产生的断裂构造，使岩体发生错位、破裂造成了岩体不连续特征。地表岩体的磁性矿物并不多，与沿雅鲁藏布江的其他岩体相同，航磁异常主要来源于一定深度上的磁性矿物，它反映了岩体深部的磁性特征。

白朗异常与其西段的数个异常呈串珠状，它们在化极延拓到10 km时已呈现为单个异常(图4-b)，其中心部位仍在白朗县偏北处，说明岩体在此位置向下延伸深度最大，可称之为日喀则岩体的主岩体。图4在此岩体东南部仁布县存在一个磁异常，说明在三叠纪砂岩、玄武岩下有蛇绿岩体；在西部有着一个连续性较好的航磁异常，是值得进行测定的范围。

在图5的普兰岩体航磁化极图中5-a仍有多个小的次级正负磁异常，表明岩体的磁性物质分布不

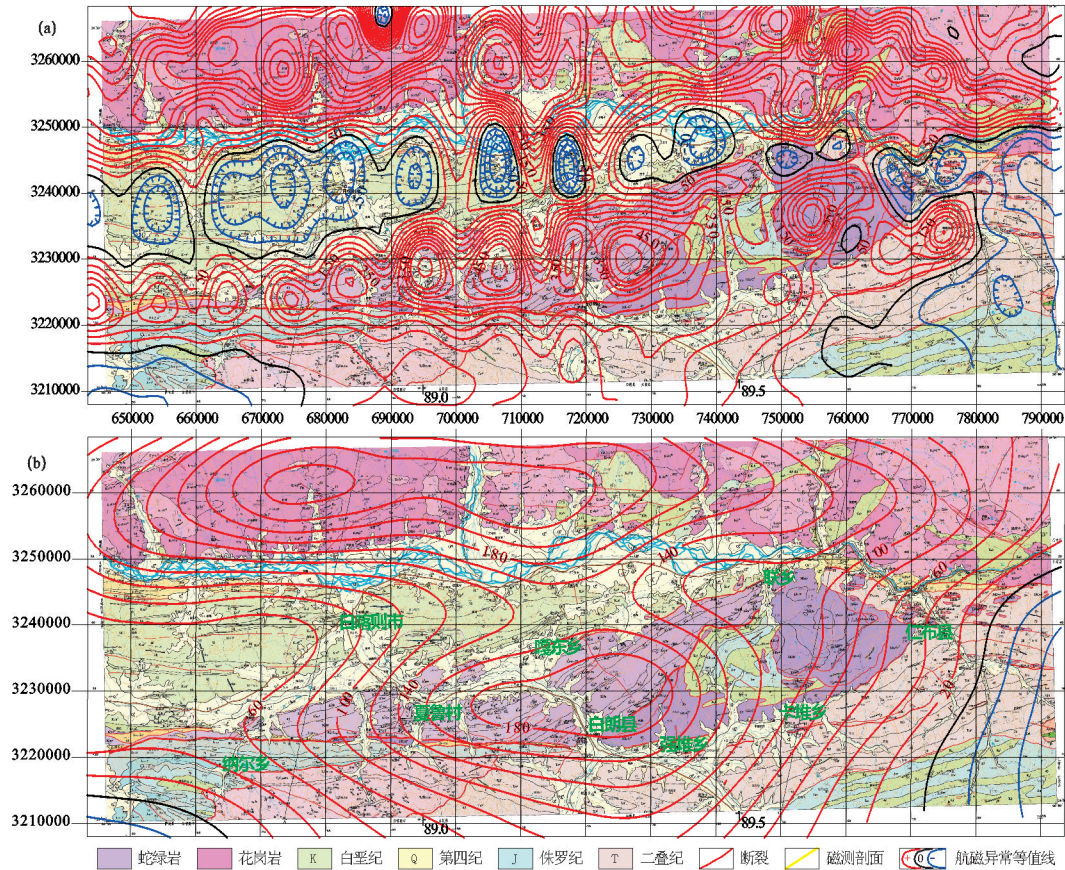


图4日喀则岩体航磁异常与地质叠合图

a—航磁化极后与地质叠合;b—航磁化极上延10 km与地质叠合

Fig. 4 Aeromagnetic anomaly and geological map of the Xigaze rock mass

a—Geological map and aeromagnetic map after reduction-to-the-pole; b—Geological map and aeromagnetic map after reduction-to-the-pole upward continuation by 10 km

均匀,这种状况在地面磁测中表现的尤其突出,但随着上延高度增大到5 km 只剩下岩体本身的航磁异常(图5-b)。普兰岩体的航磁异常将在地表看似连在一起的岩体划分成东西两部分,各自独立又略有联系的两个异常所反映的岩体仅仅地表层是相连的,向深部是分离的两个岩体,西部的岩体厚度延伸大于东部,由于地表有覆盖包括湖区限制,西部岩体地表出露不完整,但深部是一体的,普兰岩体西北端岩体又被称作拉昂错岩体。而东部航磁异常表明岩体范围应延伸到东部湖区范围内。东坡岩体化极后的航磁异常成为单个中心(郎宗村南)的完整航磁异常(图5-c,d),表明地表出露的岩体在一定深度下归于一体,而且北陡南缓^[20]。

泽当、罗布莎岩体的航磁异常规模小,地面磁测重新定位了岩体在最新航磁 ΔT 平面图中的位置,可以清楚地看到,泽当与罗布莎含铬蛇绿岩体

均位于一组东西向分布的强正磁异常边缘,其原始异常化极后的航磁异常图以及化极上延的异常图(图6)中地表出露的蛇绿岩体均在主要航磁异常的边缘或一侧^[19,24]。

根据1969—1972年和1998—1999年两次航磁结果,雅鲁藏布江航磁异常带范围基本上得到了控制。由北、南两条异常带平行构成的规模巨大的航磁异常带。两带之间相距为25~30 km。沿雅鲁藏布江南北较大较强的航磁异常,是来自特提斯洋闭合时期从深部到达地表过程中生成的磁性体,其连续性较好。在航磁图上非常清晰地占据着雅鲁藏布江南北的航磁异常是由含磁性矿物的蛇绿岩引起,已经发现出露的罗布莎、泽当岩体位于南部强磁异常的边缘,而且,泽当岩体主体上处于负异常范围内,由于泽当岩体地表出露的南北宽度不超过2 km,与地表磁测异常及其反演计算所确定的蛇绿

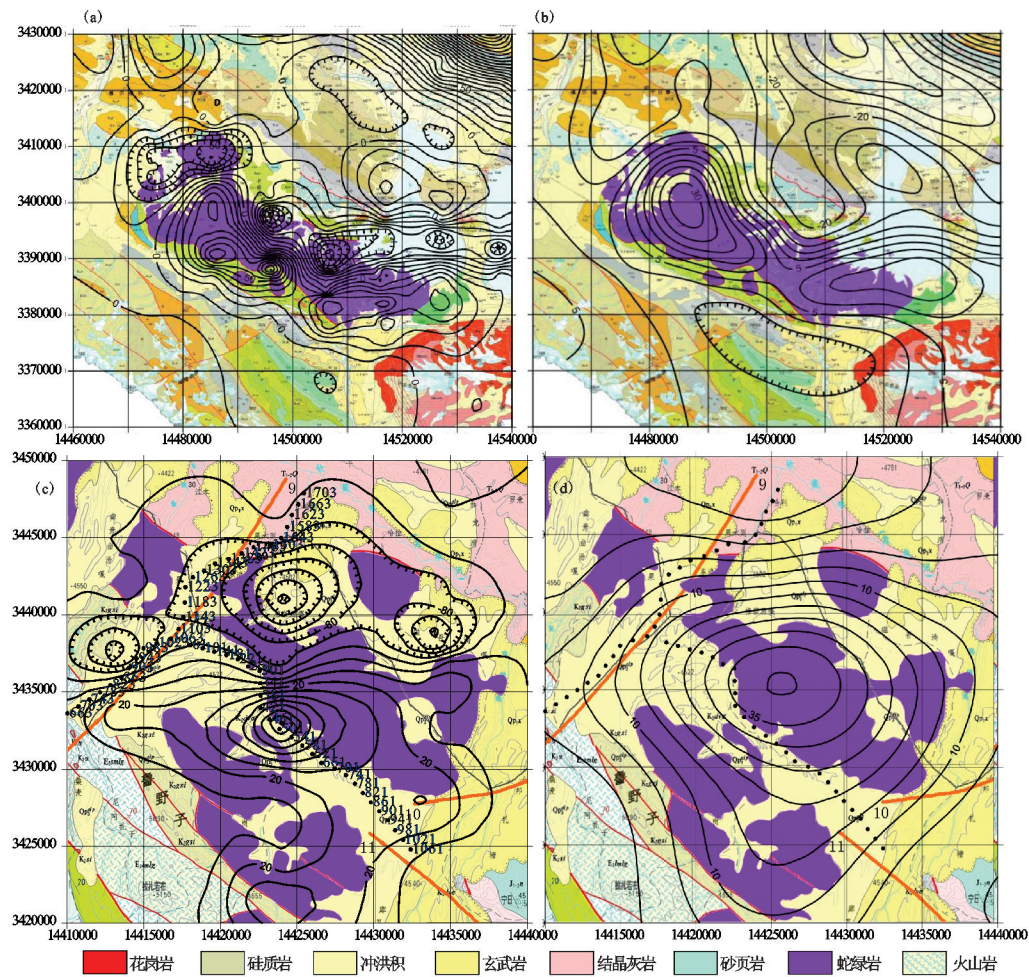


图5 普兰、东坡岩体航磁平面图与岩体地质图叠合图

a—普兰岩体航磁化极异常平面图(等值线距10 nT) b—普兰岩体航磁化极上延5 km异常(等值线距5 nT) c—东坡岩体原始航磁平面图(等值线距20 nT);d—东坡岩体化极上延5 km异常平面图(等值线距5 nT)

Fig. 5 Plan view of aeromagnetic anomaly of the Purang and Dongporock masses and geological map

a—Aeromagnetic anomaly of the Purang rock mass after reduction-to-the-pole (isoline spacing 10 nT); b— Aeromagnetic anomaly of the Purang rock mass after reduction-to-the-pole upward continuation by 5 km (isoline spacing 5 nT); c—Original aeromagnetic anomaly of the Dongpo rock mass (isoline spacing 20 nT); d—Aeromagnetic anomaly plan view of the Dongpo rock mass after reduction-to-the-pole upward continuation by 5 km (isoline spacing 5 nT)

岩体的宽度相同,可确认泽当、罗布莎含矿岩体是较小的岩体,地面磁测表明磁异常是较小较完整的磁异常。已知含铬蛇绿岩体与异常范围内基本吻合,但在罗布莎和泽当之间存在一个东西向异常,地表属被覆盖区,但是具有稳定的航磁异常,这是应注意的地段(图6)。

3 含铬矿蛇绿岩岩体地面磁异常的特征

除罗布莎铬矿区外在其以西沿雅江缝合带的

蛇绿岩体中进行的地面磁测工作不少,但包括罗布莎在内以往正式发表的探测结果却很少。自2009年以来在上述岩体进行了地面磁测剖面探测,剖面并非按统一规格的网格状布设,故剖面长短和方向有差异。为了研究方便作者将剖面按统一比例绘制了相关图件,而剖面的异常强度不同,故其垂直比例仍然是不同的^[25](图6)。

日喀则岩体自西向东是由多个局部磁异常组成的航磁异常串,针对该岩体做了4条地面磁测剖面(图4-a),结合航磁异常与岩体出露情况可见,岩

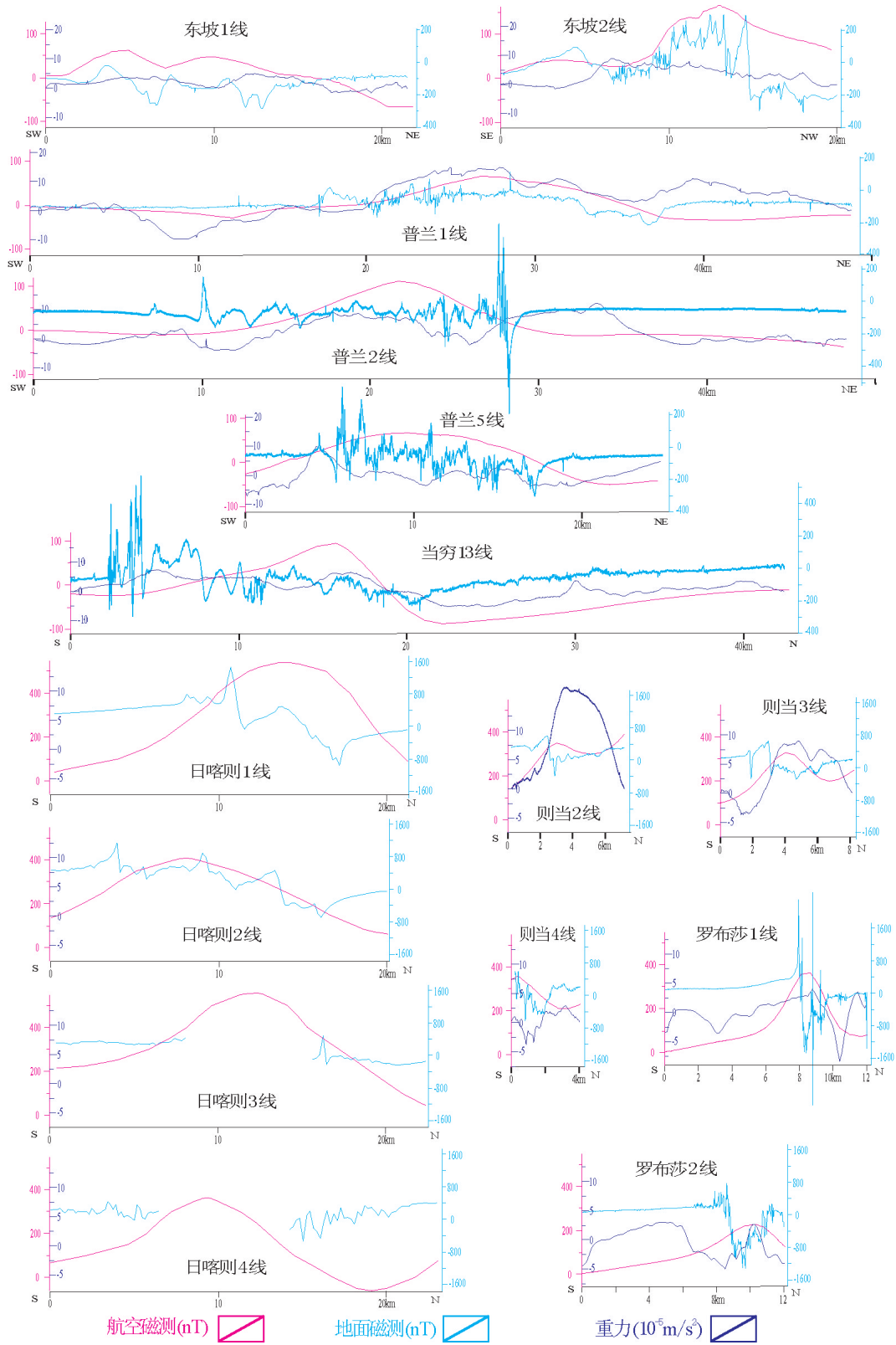


图6 沿雅鲁藏布江东坡、普兰、当穷、日喀则、泽当、罗布莎岩体航磁、地面磁测剖面图(剖面长度按同比例尺绘制)
 Fig. 6 Aeromagnetic and ground magnetic survey profile map of the Dongpo, Purang, Dangqiong, Xigaze, Zedang, Luobusha rock masses along the Yarlung Zangbo River (profile lengths at the same scale)

体处于斜磁化情况下正负相伴的磁异常,且与航磁异常十分吻合。地表出露岩体范围是东宽西窄的形状,从航磁异常看西段出露岩体范围小,但航磁异常范围却大于出露岩体范围,而东段(白朗县以东)的岩体出露范围大大超过了航磁异常范围。在白朗县以西磁异常范围比岩体出露范围大,表明其深部岩体的范围大。白朗县以东段卡堆乡以北的地表出露岩体范围大,但航磁异常范围并不大,表明该岩体东部和北部仅有很薄的地表岩体,而且磁性体较少。

东坡岩体航磁异常化极上延后成为近圆形的异常,意味着东坡岩体应是在不太厚的第四纪覆盖层下的为一个完整的岩体,或说地表出露的岩体在覆盖层下为一个整体,其范围与化极后上延的磁异常范围一致(图5-c,d)。在该岩体范围内已完成了两条地面磁测剖面。图6中航磁化极曲线的主异常范围正好与地面磁测锯齿状、剑锋状突变起伏较大的岩体磁异常范围一致,这进一步证明航磁地磁异常是同源的。航磁异常化极上延剖面的反演计算给出了推断磁性体深部的位置,其延伸向深部超过3 km。而且,此处具有5 mg的重力剩余异常,这是值得重视之处。磁异常与低阻体、弱反射部位等特征给出了东坡岩体进一步找矿的位置^[20]。

在航磁平面图(图5-a,b)中普兰岩体地表相连的岩体实际上已被分割成东西两个岩体,图5中西岩体比东岩体磁异常强度大且宽,穿过岩体航磁异常的1线与6线、9线具有相同的航磁和地磁曲线特征,但东岩体范围变小。锯齿状剧烈抖动的地面磁场是普兰蛇绿岩体的典型特征,东岩体北侧进入湖区仍存在被湖掩盖的岩体与航磁 ΔT 化极磁异常相对应。同时都表现出西部岩体和东部岩体中心部位有重力剩余异常。东西岩体北侧第四系沉积物,中晚二叠世砂岩、石炭世、千枚岩、变质砂岩、泥盆世变质砂岩、板岩的平稳磁场特征。

在泽当—罗布莎岩体上的地面磁测异常与航磁异常对应较好^[5],磁异常宽度不超过2 km,处于一个较突出的负磁异常的背景上(图2)。泽当—罗布莎岩体是较小的含矿岩体。

4 含铬蛇绿岩体磁异常与岩石磁性分析

(1)在不同蛇绿岩岩体上进行的磁测提供了岩

体的许多信息,沿雅鲁藏布江缝合带自西向东近2000 km的蛇绿岩体上都具有明显的航磁异常,自西向东将蛇绿岩体的航磁、地表磁测结果按相同比例尺绘于图6。在航磁图上具有完整的磁异常,与地表上观测的蛇绿岩体十分吻合。地面磁异常与出露或浅覆盖区内岩体的边界更是无例外的一致,使用地表磁测有利于对航磁异常作准确定位和确定蛇绿岩体的分布范围^[19,20,25],对进一步找矿是有益的。

(2)地面磁测异常主要呈锯齿状正负值起伏较大的突变特征,说明岩体的磁性分布不均匀,且岩石具有较强的剩余磁化强度,在地面测的磁异常更清楚地反映出跳跃不均匀的特征(图6)。以罗布莎岩体、普兰岩体等部分地表岩石标本的磁性测定结果可以看到,磁化率和剩余磁化强度较大的样品是蛇纹石化方辉橄榄岩、蛇纹岩、蛇纹石化石英菱镁岩、纯橄榄岩、铬铁矿石等,其共同特征是含矿岩体比其他岩性含有更多的磁铁矿,主要围岩基本上无磁性。

(3)蛇绿岩体的蛇纹石化是磁异常的主要成因。在上述岩石样品中纯橄榄岩、铬铁矿有较强的磁性(表1)^[26],铬铁矿与橄榄岩来自幔源物质,但它们所含的磁铁矿却不可能直接来自幔源,普兰岩体的部分岩体标本电子探针成分分析结果列于表2、表3^[27],可以看出,蛇绿岩体中不同岩石的成分有很大差异,以FeO为例,地幔橄榄岩中单斜辉石的FeO比例仅为1.75%~2.69%,斜方辉石岩的FeO上升到5.54%~6.85%,而镁铬铁矿的FeO含量高达19.55%~24.18%。蛇绿岩的蛇纹石化使其中的FeO与Fe₂O₃进一步形成Fe₃O₄,对此过程贡献最大的应是镁铬铁矿和橄榄岩等岩性。这说明,航磁异常的出现是与镁铬铁矿有着密切关系,而蛇绿岩体的其它岩性含铁较低,生成磁铁矿相对较少。蛇纹石化形成Fe₃O₄时就可以具有较强的磁性。矿物间这种氧化过程许多人早已论证过^[28-29]。

磁铁矿是蛇纹岩中普遍存在的矿物,是橄榄石中含端元蛇纹石化反应的产物^[29-31]。蛇纹石化的初始阶段不形成磁铁矿,磁铁矿是蛇纹石化进一步的过程中通过富铁水镁石而形成的^[32]。蛇纹石化的开始温度在300~500℃的条件下,蛇纹石化使岩石膨胀,密度降低,地震波速度随蛇纹石化程度增强而降低,同时电阻率降低,这些特征是与磁铁矿的生成有一定联系。就是说蛇纹石化的产生是在岩浆

表1 普兰岩体岩石磁性测定结果^[26]Table 1 Magnetism determination results of rocks and minerals in the Purang rock mass^[26]

岩(矿)石名称	标本块数	磁化率 $\kappa/(4\pi \times 10^{-6}\text{SI})$		剩余磁化强度 $J_r/(10^{-3}\text{A/m})$	
		算术平均值	变化范围	算术平均值	变化范围
纯橄榄岩	4	1417	1093~1726	1345	773~2361
含辉纯橄榄岩	4	1011	239~1763	1013	668~1977
方辉纯橄榄岩	2	699	467~931	1062	567~1556
蛇纹石化方辉纯橄榄岩	2	101350	95774~106927	14127	4471~23782
蛇纹岩	2	2321	519~4122	1303	677~1929
铬铁矿石	5	1265	937~1850	1977	882~2975
粗晶辉长岩	2	954	207~1700	312	198~426
粗晶辉石岩	2	1386	1375~1396	1215	1176~1254
蛇纹石化石英菱镁岩	4	25738	113~101083	5573	2231~17632

表2 普兰蛇绿岩地幔橄榄岩中斜方辉石成分(%)^[27]Table 2 Compositions of orthopyroxene in the mantle peridotites of the Purang ophiolite (%)^[27]

Sample	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	NiO	Total	Wo	En	Fs	Mg [#]
Dunites																
09y~632.12	54.35	0.07	1.30	0.60	2.28	0.05	17.31	22.18	0.11	0.00	0.00	98.27	46.1	50.1	3.8	93.2
09y~632.13	54.30	0.01	1.51	0.71	2.08	0.07	17.19	23.38	0.15	0.00	0.00	99.40	47.7	48.8	3.4	93.7
09y~632.14	54.73	0.00	0.90	0.36	1.75	0.09	17.44	23.52	0.12	0.00	0.00	98.99	47.8	49.3	2.9	94.7
09Y637~1.34	54.60	0.06	1.11	0.92	1.85	0.10	17.74	23.98	0.23	0.01	0.00	100.75	47.8	49.2	3.0	94.5
09Y637~1.52	55.29	0.03	1.04	0.70	1.77	0.09	17.68	24.36	0.28	0.00	0.00	101.24	48.3	48.8	2.9	94.7
09Y637~1.53	54.77	0.05	1.07	0.52	2.07	0.05	17.61	24.17	0.18	0.01	0.00	100.50	48.0	48.7	3.3	93.9
Harzburgites																
11Y602P1.5	53.61	0.04	1.77	0.94	1.85	0.08	16.76	24.10	0.28	0.00	0.08	99.55	49.3	47.7	3.1	94.2
11Y602P1.10	54.84	0.02	0.58	0.33	1.90	0.15	17.47	23.79	0.14	0.00	0.06	99.36	47.9	48.9	3.2	94.3
11Y605P4.12	53.90	0.05	1.99	1.10	2.26	0.11	17.56	23.37	0.10	0.00	0.00	100.43	47.1	49.2	3.7	93.3
11Y605P4.19	53.33	0.02	1.71	0.71	2.24	0.06	17.09	23.19	0.07	0.00	0.03	98.48	47.6	48.8	3.7	93.2
11Y~44~1.42	53.15	0.13	2.18	0.75	2.63	0.12	17.10	23.39	0.10	0.01	0.09	99.66	47.4	48.2	4.4	92.1

从深部向上喷涌过程中到达一定深度,其温度降低到500℃以下才会发生,而且磁铁矿的生成还需在低于480℃居里点才可能有磁性^[27],故蛇绿岩体的磁铁不会产生于较大的深度。对航磁异常的反演计算结果磁性体主要分布在3 km的深度附近。蛇纹石化的发展肯定还受其它构造条件的影响,其中水是重要的因素,岩浆在冷却过程中产生裂隙为地表水提供了通道。蛇纹石化不会出现在整个蛇绿岩体中,地面磁测的剖面中可以清楚地看到,地表岩体中部蛇纹石化程度较低,地面磁测异常呈锯齿状却不强烈,只是在岩体边缘和邻近的围岩中才有磁铁矿引起的相对强的磁异常。磁铁矿多呈浸染状、

脉状及块状存在于蛇绿岩裂隙中及其附近。

沿雅鲁藏布江连续分布的航磁异常决定于整个岩体所含的磁铁矿。在含铬铁矿的岩体中含有的磁铁矿可能形成相对密集的脉状、块状及浸染状磁铁矿体,它们是形成航磁异常的主要磁性体。岩体存在深部磁性矿物的事实对磁测资料解释很重要,而且说明整个岩体的磁性体可能位于一定深度位置中。对蛇绿岩体磁性的分析确认了航磁和地磁异常主要决定于磁铁矿的含量,而不是超基性岩、基性岩、酸性等基本矿物的磁性差异。尽管磁铁矿等磁性矿物不可能直接来自幔源物质,可是来自幔源物质是磁铁矿生成的必要条件。磁铁矿物

表3 普兰蛇绿岩地幔橄榄岩中镁铬铁矿成分(%)^[27]Table 3 Compositions of magnesiochromite in the mantle peridotites of the Purang ophiolite (%)^[27]

Sample	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	NiO	Total	Mg#	Cr#	Fe ³⁺	Fe ²⁺
Dunites																
11Y602P3.1	0.04	0.07	18.91	49.36	21.14	0.41	9.96	0.00	0.03	0.00	0.06	99.97	47.57	63.63	0.34	4.19
11Y602P3.3	0.00	0.04	19.62	48.58	20.49	0.34	10.72	0.02	0.04	0.00	0.04	100.01	50.70	62.41	0.41	3.95
11Y602P3.7	0.02	0.04	16.36	51.15	22.22	0.40	8.91	0.00	0.03	0.00	0.06	99.25	43.63	67.70	0.37	4.51
11Y602-p5.12	0.02	0.11	20.55	48.46	19.55	0.42	10.93	0.00	0.00	0.01	0.10	100.15	51.44	61.27	0.25	3.88
11Y602-p5.14	0.00	0.07	20.80	48.23	19.25	0.34	11.29	0.00	0.00	0.00	0.06	100.08	52.85	60.86	0.28	3.77
09y-632.33	0.00	0.04	19.48	47.28	21.56	0.34	10.86	0.00	0.01	0.01	0.09	99.67	51.38	61.95	0.71	3.91
09Y637-1.1	0.03	0.13	16.77	50.45	23.26	0.37	9.70	0.00	0.00	0.01	0.01	100.79	46.22	66.86	0.69	4.34
09Y637-1.45	0.05	0.12	19.22	48.32	24.18	0.33	9.36	0.00	0.05	0.00	0.00	101.63	43.91	62.77	0.62	4.53
09Y637-1.56	0.01	0.05	17.88	49.98	21.07	0.34	10.75	0.00	0.00	0.01	0.01	100.09	50.99	65.21	0.58	3.94
09Y637-1.57	0.03	0.01	17.86	49.23	21.41	0.40	10.74	0.00	0.02	0.00	0.00	99.72	51.22	64.89	0.69	3.92

在居里温度 480° 时具有了较强的磁性。这个过程是伴随着印度板块向北俯冲,特提斯洋的开合,幔源物质通过缝合带上涌,以及青藏高原隆升的漫长的构造运动产生的^[32-35]。在青藏高原雅鲁藏布江板块缝合带上蛇绿岩体的磁铁矿矿物形成了连续的条带状航磁异常。

6 结论与讨论

(1) 沿雅鲁藏布江缝合带的含铬蛇绿岩体具有完整的航磁异常,在化极和向上延拓处理后保持与地磁异常岩体的吻合。东坡、普兰、当穷等巨大岩体沿雅鲁藏布江南岸的分布具有单岩体的航磁异常。由若干沿雅江分布的蛇绿岩体引起的。蛇绿岩体不论地表出露巨大岩体还是较小的岩体均为沿雅江近东西向分布且有限延伸的磁性体,磁性体向下延伸最大可达 3~5 km。在雅鲁藏布江北岸存在着被覆盖的蛇绿岩体。蛇绿岩体的蛇纹石化生成的磁铁矿是航磁与地磁异常的主要成因。

(2) 地面磁测 ΔT 异常主要反映出露地表和近地表浅覆盖岩体的岩体磁性不均匀分布的特征,岩体边缘磁异常大于岩体内部的异常,东部已知罗布莎铬矿区岩体和泽当岩体为规模较小的岩体。所有岩体的地表磁异常均呈现为锯齿状、剑锋状等多变突变为磁异常特征,是由于蛇纹石化和磁铁矿分布不均匀所致,但是,地磁异常的分布范围与岩体范围、航磁异常范围,包括化极和上延磁异常范

围是一致的。由此,航磁地面磁测用于浅覆盖地区圈定岩体范围是可以互相印证的有效方法。在东坡、普兰、当穷岩体建立起蛇绿岩体完整的航磁、地磁异常与磁性特征的模型。

(3) 岩石磁性测定说明蛇绿岩体具有较强的磁化率与剩余磁化深度,岩体整体上是感应磁化为主的磁性体,可岩体磁性又是不均匀的,这与蛇纹石化发育的程度有直接关系。最终生成的磁铁矿呈脉状、块状、浸染状分布于岩体中。

(4) 蛇绿岩体中铬矿体和纯橄榄岩等岩性具有多的磁铁矿含量,从而航磁主磁异常应与铬矿体有一定关系。详细地分析航磁与地面磁异常有助于在研究程度较低的地区快速确定蛇绿岩体的分布范围和大致的产状,航磁异常能够反映出岩体作为磁性体的整体特征,由反演计算确定岩体深部产状特征。结合大地电磁法的低阻体,反射地震的速度资料可给出最有利于进一步找矿的地段。沿雅鲁藏布江缝合带的蛇绿岩体目前寻找铬铁矿的探测研究程度尚不高,研究蛇绿岩体的磁性特征有利于充分利用已有的航磁资料较便捷地选定最有利于找矿的地段,达到较快找矿的目的。

致谢: 本文工作中得到许志琴院士、袁学诚教授、吴良士研究员、余钦范教授、王光镠教授的支持与帮助;参加该项工作的人员还有许乐红、郭帅以及中国地质大学众多研究生同学参与了野外工作。在此向他们一并表示感谢。

参考文献(References):

- [1] 杨经绥, 白文吉, 方青松, 等. 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中的超高压矿物和新矿物(综述)[J]. 地球学报, 2008, 29(3): 263–274.
Yang Jingsui, Bai Wenji, Fang Qingsong, et al. Ultra high-pressure Minerals and New Minerals from the Luobusa ophiolitic chromites in Tibet: A Review[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29(3): 263–274 (in Chinese with English abstract).
- [2] 杨经绥, 张仲明, 李天福, 等. 西藏罗布莎铬铁矿体围岩方辉橄辉岩中的异常矿物[J]. 岩石学报, 2008, 24(7): 1445–1452
Yang Jingsui, Zhang Zhongming, Li Tianfu, et al. Unusual minerals from harzburgite, the host rock of the Luobusa chromite deposit, Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(7): 1445–1452 (in Chinese with English abstract).
- [3] 杨经绥, 徐向珍, 白文吉, 等. 蛇绿岩型金刚石的特征[J]. 岩石学报, 2014, 30(8): 2113–2124.
Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, Bai Wenji, et al. Features of diamond in ophiolite[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(8): 2113–2124 (in Chinese with English abstract).
- [4] Melcher F, Grum W, Simon G. Petrogenesis of the ophiolitic giant chromite deposits of Kempirsai, Kazakhstan: A study of solid and fluid inclusions in chromite[J]. Journal of Petrology, 1997, 38(10): 1419–1458.
- [5] Melcher F, Grum W, Rhalhammer TV, et al. The giant chromite deposits at Kempirsai, Urals: Constraints from trace element (PGE, REE) and isotope data[J]. Mineralium Deposita, 1999, 34: 250–272.
- [6] Makeyev A B. Mineralogy of the Alpine-type Ultrabasic Rocks in Polar Ural[M]. Science Press, St. Petersburg Publication Branch. St. Petersburg, 1992: 1–195.
- [7] 白文吉, 杨经绥, Robinson P, 等. 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中金刚石的成因[J]. 地质学报, 2001, 75(3): 404–409.
Bai Wenji, Yang Jingsui, Robinson P, et al. Study of diamonds from chromitites in the Luobusa ophiolite, Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(3): 404–409 (in Chinese with English abstract).
- [8] http://d.wanfangdata.com.cn/NSTLQK_NSTL_QKJJ029987476.aspx Gasparik T, Hutchison M T. Experimental evidence for the origin of two kinds of inclusions in diamonds from the deep mantle[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 181: 103–114.
- [9] Malpas J, Zhou M F, Robinson P T, et al. Geochemical and geochronological constraints on the origin and emplacement of the Yarlung–Zangbo ophiolites, Southern Tibet. In Ophiolites in Geological History[J]. Geological Society of London Special Publication, 2003, 218: 191–206.
- [10] Helmberger D, Lay T, Ni S, et al. Deep mantle structure and the postperovskite phase transition[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences(USA), 2005, 173: 1–6.
- [11] 杨经绥, 熊发挥, 郭国林, 等. 东波超镁铁岩体: 西藏雅鲁藏布江缝合带西段一个甚具铬铁矿前景的地幔橄辉岩体[J]. 岩石学报, 2011, (11): 3207–3222.
Yang Jingsui, Xiong Fahui, Guo Guolin, et al. The Dongbo ultramafic massif: A mantle peridotite in the western part of the Yarlung Zangbo suture zone, Tibet, with excellent prospects for a major chromite deposit[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, (11): 3207–3222 (in Chinese with English abstract)
- [12] 杨经绥, 徐向珍, 李源, 等. 西藏雅鲁藏布江缝合带的普兰地幔橄辉岩中发现金刚石: 蛇绿岩型金刚石分类的提出[J]. 岩石学报, 2011, (11): 3171–3178.
Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, Li Yuan, et al. Diamonds recovered from peridotite of the Purang ophiolite in the Yarlung–Zangbo suture of Tibet: A proposal for a new type of diamond occurrence[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(11): 3171–3178 (in Chinese with English abstract).
- [13] Xu Xiangzhen, Yang Jingsui, Chen Songyong, et al. An unusual mantle mineral group from chromitite orebody Cr–II in the Luobusa ophiolite of the Yarlung–Zangbo suture zone, Tibet. Journal of Earth Science, 2009, 20(2): 284–302.
- [14] 徐向珍, 杨经绥, 郭国林, 等. 雅鲁藏布江缝合带西段普兰蛇绿岩中地幔橄辉岩的岩石学研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(11): 3179–3196.
Xu Xiangzhen, Yang Jingsui, Guo Guolin, et al. Lithological research on the Purang mantle peridotite in western Yarlung–Zangbo suture zone in Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica. 2011, 27(11): 3179–3196 (in Chinese with English abstract).
- [15] 薛典军, 姜枚, 吴良士, 等. 青藏高原区域重磁异常的东西向分区及其构造地质特征[J]. 中国地质, 2006, 33(4): 912–919
Xue Dianjun, Jiang Mei, Wu Liangshi, et al. East–west division of regional gravity and magnetic anomalies on the Qinghai–Tibet Plateau and its tectonic features[J]. Geology in China, 2006, 33(4): 912–919 (in Chinese with English abstract).
- [16] 熊发挥, 杨经绥, 梁凤华, 等. 西藏雅鲁藏布江缝合带西段东波蛇绿岩中锆石 U–Pb 定年及地质意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(11): 3223–3238.
Xiong Fahui, Yang Jingsui, Liang Fenghua, et al. Zircon U–Pb ages of the Dongbo ophiolite in the western Yarlung Zangbo suture zone and their geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(11): 3223–3238 (in Chinese with English abstract).
- [17] 熊盛青, 周伏洪, 姚正煦, 等. 中国及其毗邻海域航空磁力 ΔT 图[M]. 地质出版社, 2001.
Xiong Shengqing, Zhou Fuhong, Yao Zhengxu, et al. Aeromagnetic Survey in Central and Western Qinghai–Tibet Plateau[M]. Geological Publishing House, 2001 (in Chinese).
- [18] 熊盛青, 周伏洪, 姚正煦, 等. 青藏高原中西部航磁概查[M]. 地质出版社, 2007.
Xiong Shengqing, Zhou Fuhong, Yao Zhengxi, et al. The

- Aeromagnetic Survey in the Central and Western Qinghai-Tibet Plateau. [M]. Geological Publishing House, 2007 (in Chinese).
- [19] 姚正熙, 周伏洪, 薛典军, 等. 雅鲁藏布江航磁异常带性质及其意义[J]. 物探与化探, 2001, 25(4): 241-252.
Yao Zhengxu, Zhou Fuhong, Xue Dianjun, et al. The property of the Yarlung Zangbo River aeromagnetic anomaly zone and its significance[J]. Geophysical & Geochemical exploration, 2001, 25(4): 241-252 (in Chinese with English abstract).
- [20] Jiang Mei, Peng Miao, Yang Jingsui, et al. Seismic reflection and magnetotelluric profiles across the Luobusa ophiolite: evidence for the deep structure of the Yarlung Zangbo suture zone, southern Tibet[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 110: 4-9.
- [21] 姜枚, 杨经绥, 谭捍东, 等. 西藏东坡蛇绿岩体深部结构的地球物理特征及其找矿意义[J]. 中国地质, 2015, 42(5): 1179-1187
Jiang Mei, Yang Jingsui, Tan Handong, et al. Geophysical characteristics of and prospecting significance for deep structures of Dongpo ophiolite body, Tibet[J]. Geology in China, 2015, 42(5): 1179-1187 (in Chinese with English abstract).
- [22] 谭捍东, 姜枚, 林昌洪, 等. 云南腾冲火山构造区的电性结构特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2013, 40(3): 800-806.
Tan Handong, Jiang Mei, Lin Changhong, et al. Characteristics of electrical structure of Tengchong volcano-tectonic belt in Yunnan Province[J]. Geology in China, 2013, 40(3): 800-806 (in Chinese with English abstract).
- [23] 黄圭成, 徐德明, 雷义均, 等. 西藏西南部达巴-休古嘎布绿岩带铬铁矿的找矿前景[J]. 中国地质, 2007, 34(4): 668-674.
Huang Guicheng, Xu Deming, Lei Yijun, et al. Chromite prospects in the Daba-Xiugugabu ophiolite zone southwestern Tibet[J]. Geology in China, 2007, 34(4): 668-674.
- [24] 连东洋, 杨经绥, 熊发挥, 等. 雅鲁藏布江蛇绿岩带西段达机翁地幔橄榄岩组成特征及其形成环境分析[J]. 岩石学报, 2014, 30(8): 2164-2184.
Lian Dongyang, Yang Jingsui, Xiong Fahui, et al. Composition characteristics and tectonic setting of the Dajiweng peridotite in the western Yarlung-Zangbo ophiolitic belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(8): 2164-2184 (in Chinese with English abstract).
- [25] 姜枚, 杨经绥, 张聿文, 等. 西藏泽当岩体含铬超镁铁岩体的深部构造特征与找矿前景探讨[J]. 中国地质, 2013, 40(3): 780-789.
Jiang Mei, Yang Jingsui, Zhang Yuwen, et al. Deep tectonic characteristics and ore-prospecting potential of the Zetang Cr-bearing ultramafic rock mass in Tibet[J]. Geology in China, 2013, 40(3): 780-789 (in Chinese with English abstract).
- [26] 雷义均, 黄圭成, 徐德明, 等. 西藏拉昂措蛇绿岩含矿杂岩带存在的证据及其找矿意义[J]. 地质与勘探, 2008, 44(3): 28-33
Lei Yijun, Huang Guicheng, Xu Deming, et al. Evidence and ore-prospecting significance of existence of ore-bearing complex belt in the La'anguo ophiolite, Tibet[J]. Geology and Prospecting, 2008, 44(3): 28-33 (in Chinese with English abstract).
- [27] Guo Guolin, Yang Jingsui, Liu Xiaodong, et al. Mid-ocean ridge (MOR) and suprasubduction zone (SSZ) geological events in the Yarlung Zangbo suture zone: Evidence from the mineral record of mantle peridotite[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 110: 33-54.
- [28] 永田武. 岩石磁学[M]. 地质出版社(译), 1956.
Takesi Nagata, Rock-Magnetism[M]. Maruzen Co., Ltd., Tokyo, 1956(in Chinese).
- [29] Clark D A. Magnetic petrophysics and magnetic petrography: aids to geological interpretation of magnetic surveys[J]. Journal of Australian Geology and Geophysics, 1997, 17(2): 83-103.
- [30] 汪小妹, 曾志刚, 欧阳荷根, 等. 大洋橄榄岩的蛇纹岩石化研究进展评述[J]. 地球科学进展, 2010, 25(6): 605-616.
Wang Xiaomei, Zeng Zhigang, Ouyang Hegen, et al. Review of progress in Serpentinization Research of oceanic Peridotites[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(6): 605-616 (in Chinese with English abstract).
- [31] 何兰芳, 胡修棉, 查亚兵, 等. 藏南罗布莎蛇绿岩高磁异常分带特征与成因[J]. 科学通报, 2014, 59(11): 960-969.
He Lanfang, Hu Xiumian, Zha Yabing, et al. Distribution and origin of high magnetic anomalies at Luobusa Ophiolite in Southern Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(11): 960-969 (in Chinese).
- [32] Harrison R J, Dunin-Borkowski R E, Putnis A. Direct imaging of nanoscale magnetic interactions in minerals[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2002, 99(26): 16556-16561.
- [33] Bach W, Garrido C J, Paulick H, et al. Seawaer-peridotite interactions: First insights from ODP Leg 209, MAR 15°N[J]. Geophysics Geosystems, 2004, 5(9): Q09F26.
- [34] 许志琴, 杨经绥, 戚学祥, 等. 印度/亚洲碰撞-南北向和东西向拆离构造与现代喜马拉雅造山机制再讨论[J]. 地质通报, 2006, 25(1/2): 1-14.
Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Qi Xuexiang, et al. India-Asia collision: A further discussion of N-S- and E-W-trending detachments and the orogenic mechanism of the modern Himalayas[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(1/2): 1-14 (in Chinese with English abstract).
- [35] Jiang Mei, Xu Zhiqin, Hirn A, et al. Teleseismic anisotropy and corresponding features of the upper mantle in Tibet Plateau and its neighboring areas[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2001, 22(2): 111-116.