

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).

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

姜 枚^{1,2} 杨经绥¹ 谭捍东³ 钱荣毅³ 张聿文³ 彭 淼¹ 许乐红¹
张立树¹ 李庆庆¹ 郭 帅¹ 宋昊翔³

(1. 中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学国家重点实验室, 北京 100037; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 3. 中国地质大学(北京), 地球物理与信息技术学院, 北京 100083)

摘要:在西藏西部雅鲁藏布江南岸的东坡岩体进行了多种方法的地球物理探测, 由地面磁测精确定位的航空磁测异常反演了东坡岩体深部磁性体范围; 反射地震探测划分出了与地表出露蛇绿岩体反射波特征不同的岩体下部弱反射部位; 同时, 由大地电磁法确定了岩体下部的低阻体也都处于大致相同的部位。地面出露的蛇绿岩体向下延伸, 整体呈锅底状, 其中部具有较低电阻和弱反射波特征, 同时, 在 1.5~3.0 km 范围的磁性矿物相对较发育, 可能正是含铬岩体矿化蚀变作用较强的地段, 在罗布莎矿区有类似的特征, 这对找矿是有利的部位。

关键词:东坡蛇绿岩体; 反射地震; 航磁异常; 电阻率异常; 找矿模型

中图分类号: P542.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)05-1179-09

Geophysical characteristics and prospecting significance of deep structures in Dongpo ophiolite body, Tibet

JIANG Mei^{1,2}, YANG Jing-sui¹, TAN Han-dong³, QIAN Rong-yi³, ZHANG Yu-wen³, PENG Miao¹, XU Le-hong¹, ZHANG Li-shu¹, LI Qing-qing¹, GUO Shuai¹, SONG Hao-xiang³

(1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, State Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Beijing 100037, China*; 2. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*; 3. *School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: Geophysical survey of Dongpo rock mass on the south bank of Yarlung Zangbo River in western Tibet was carried out using multiple methods, and the inversion of aeromagnetic survey anomaly precisely positioned by ground magnetic survey revealed the range of the deep magnetic body in Dongpo rock mass; seismic reflection survey delineated the weak reflection places under

收稿日期: 2015-03-24; 改回日期: 2015-06-01

基金项目: 大陆科学钻探选址与钻探实验项目(SinoProbo-05-07)资助。

作者简介: 姜枚, 男, 1937年生, 研究员, 长期从事深部和矿区地球物理探测研究; E-mail: mjmeij@163.com。

通讯作者: 杨经绥, 男, 1950年生, 研究员, 岩石学专业, 从事岩石学结合大地构造学的研究; E-mail: yangjsui@163.com。

the rock mass with reflected wave characteristics different from those of outcropping ophiolite body; meanwhile, as confirmed by MT method, the low-resistivity bodies under the rock mass are at the roughly identical places. The outcropping ophiolite body extends downward, resembling a pot bottom as a whole, and its middle part is characterized by low resistivity and weak reflected wave. In addition, magnetic minerals are relatively developed at the depths of 1.5 km–3.0 km, which might be the very section of chromium-bearing rock mass having strong mineralization and alteration; the similar characteristics were observed in the Luobusha mining area, and hence these places are favorable for ore prospecting.

Key words: Dongpo ophiolite body; seismic reflection; aeromagnetic and resistivity anomaly; prospecting model; geophysical characteristics

About the first author: JIANG Mei, male, born in 1937, senior researcher, mainly engages in the study of geophysics in the depth and the mining area; E-mail: mjmej@163.com.

About the Corresponding author: YANG Jing-sui, male, born in 1950, Senior researcher, engages in the study of ophiolite of the orogenic zone and ultrahigh-pressure metamorphic rock; E-mail: yangjsui@163.com.

随着对西藏罗布莎等含铬铁矿蛇绿岩体的深入研究,沿雅鲁藏布江缝合带出露的众多含铬蛇绿岩体的地质研究也取得了重大进展,其中雅鲁藏布江西段的超大型蛇绿岩体如东坡、普兰等岩体的研究引起了对铬铁矿研究的新关注。研究成果表明这些较大的岩体是构成大型铬铁矿的基本要素,且含有金刚石、锆石英等深部地幔物质,说明含铬蛇绿岩体是来自深部地幔的^[1-3]。因此,探测蛇绿岩体的深部结构成为地球物理探测不可推卸的任务。

针对青藏高原的构造运动、雅鲁藏布江缝合带的开合以及沿缝合带蛇绿岩体的形成运移与铬铁矿关系已有众多的成果^[4-10],这为地球物理的探测和资料解释奠定了基础。本区已经进行过区域性航空磁测、区域重力及大地电磁法的大量剖面工作^[11-16]。2009—2013年期间,笔者沿江缝合带的众多岩体进行了反射地震、大地电磁、重力和磁力探测,本文是在准确进行航磁异常定位后综合研究了岩体深部电阻率、地震波速度和磁性等特征,提出了东坡含铬蛇绿岩体深部结构地球物理找矿模式。沿缝合带的深部地球物理探测结果只是反映了蛇绿岩体当前的赋存状态和地球物理结构的特征,并未探讨蛇绿岩体漫长的地质历史和复杂的成因,仅仅是从矿体赋存空间上提出的找矿模式。

1 雅鲁藏布江缝合带的航磁异常特征

东坡、普兰、当穷等含铬蛇绿岩体处于雅鲁藏布江西段南岸,沿江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。可以确认此处航磁 ΔT 异常是由含铬蛇绿岩体形成(图1)。

具有代表性的东坡等岩体的航磁异常位于雅鲁藏布江西段南岸的20 km处,与普兰、当穷岩体呈北西方向排列着,3个航磁异常又各自独立^[11]。图2给出了东坡岩体经数据处理后的航磁异常图以及与地质图对比的相关图件。其中东坡岩体(图2-a)由于斜磁化影响航磁是正负伴生的异常,其位置与地质图上出露的蛇绿岩体分布范围基本吻合,由于第四系覆盖致使蛇绿岩体露头不是相连接的,可是在化极与上延处理后,岩体航磁异常与岩体范围成为单一的正磁异常(图2-b),随着上延高度的增大到5 km(图2-b)时东坡航磁异常成为单个中心(郎宗村南)的完整航磁异常(图2-c),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。可见,航空磁测资料能够较好地反映出整个岩体的特征。

东坡岩体的航磁异常与地表出露岩体的关系实际上也代表了沿雅鲁藏布江南岸普兰、当穷等几个超大型蛇绿岩体的航磁异常产状特征。相对范围小的罗布莎—泽当岩体亦有同样类似的航磁异常特征^[17-18]。

东坡蛇绿岩体以含镁高的方辉橄榄岩和纯橄岩为主体,二辉橄榄岩较少。在地表岩体出露规模大,其中方辉橄榄岩占岩体总面积的70%~80%,铬铁矿含量不大。块状铬铁矿石多产于纯橄岩与方辉橄榄岩接触带处,而浸染状矿石多在纯橄岩中。近岩体的岩石多被构造破坏或被强烈蛇纹石化,岩体北带蛇纹石化宽度达数百米。纯橄岩散布在岩体中心或边部方辉橄榄岩中。据研究东坡岩体属于亏损地幔橄橄榄岩,是具有铬铁矿找矿前景的岩体^[7]。强蛇纹石化通常是形成磁性矿物和较强磁异常的成因。

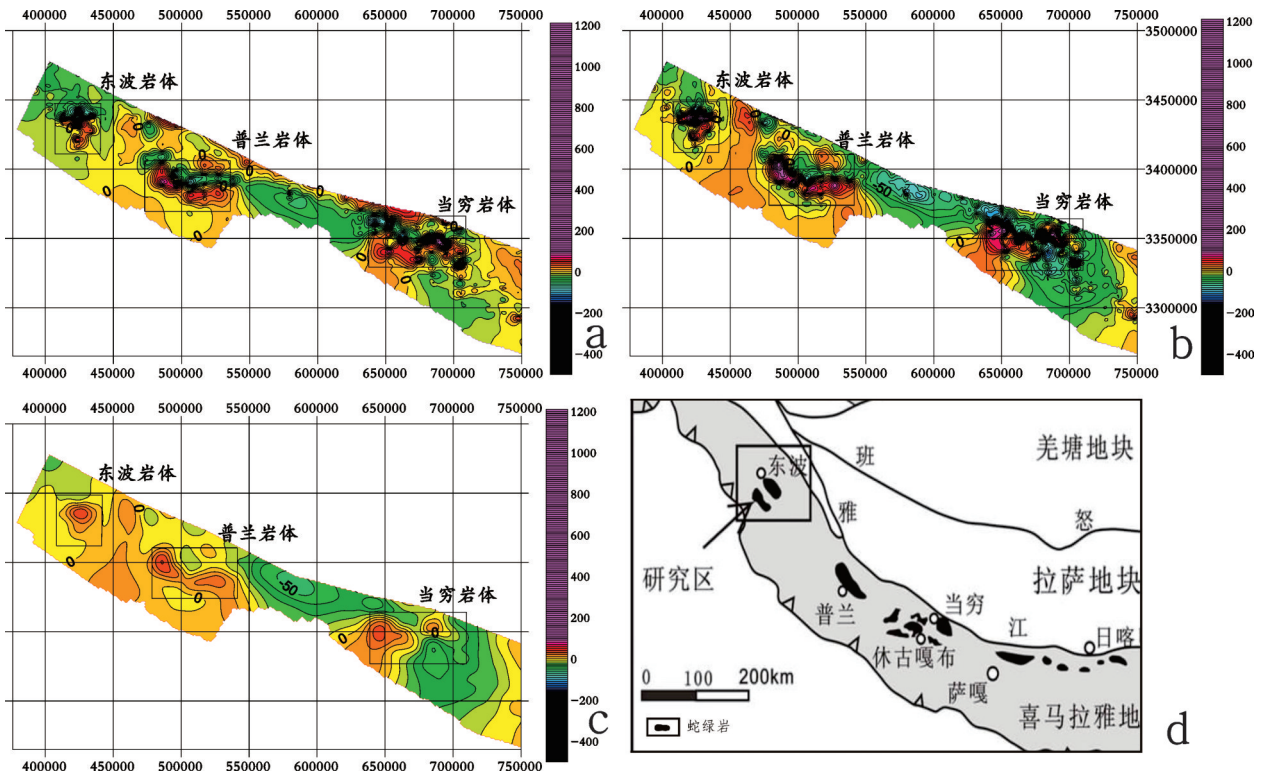


图1 雅鲁藏布江西段东坡、普兰、当穷岩体航磁 ΔT 平面图(原图来自航遥中心)

a—沿缝合带西段原始航磁平面图;b—航磁 ΔT 化极异常平面图;c—缝合带航磁化极上延5 km平面图;d—蛇绿岩体分布位置图;图中方框为本文地面磁测测区范围

Fig.1 Aeromagnetic ΔT plan view of Dongpo, Pulan and Dangqiong rock mass in the west of the Yarlung Zangbo River (original map after AGRS)

a—Original aeromagnetic ΔT plain view in the west of the Yarlung Zangbo River;b—Aeromagnetic ΔT plan of reduction-to-the-pole;c—Aeromagnetic ΔT plan of reduction-to-the-pole upward continuation of 5 km in suture zone;d—The distribution of ophiolite rock mass; The figure showing the range of ground magnetic measurement in the box

2 东坡岩体航磁与地磁异常特征

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深部完整的岩体,也就是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航磁异常范围一致(图2-c)。在该岩体范围内已完成了2条地面磁测剖面(图2),其中1线位于东坡航磁异常的西侧,2线剖面穿越了航磁异常的中心部位。现将航磁异常与1线、2线的地面磁测及重力剩余异常绘于图3上。

由图3可见,航磁化极后主异常范围正好与地面磁测呈锯齿状、剑锋状突变而起伏较大的岩体地磁异常范围一致,这进一步证明航磁和地磁异常都与东坡蛇绿岩体有关。图3中部变化较大的地面磁

异常反映出岩体上部的磁性体分布不均匀,从而形成锯齿状、剑锋状的磁异常。

3 含铬蛇绿岩体磁异常与岩石磁性分析

1)沿雅鲁藏布江缝合带自西向东近2 km内,几乎所有的蛇绿岩体都具有明显的航磁异常^[11,17,18]。东坡蛇绿岩体不仅是其中规模较大,而且是其周边磁性干扰少的岩体之一,因而可作为典型实例。该岩体在航磁图上呈现的磁异常完整,且与地表观测到的岩体分布范围吻合,而其地面磁测获得的磁异常与出露或浅覆盖区内岩体的边界也无例外的一致,说明二者具有一致性,故可以依据航磁与地面磁测的磁异常确定蛇绿岩体浅部的分布范围。

2)地面磁测异常主要呈锯齿状、正负磁异常值

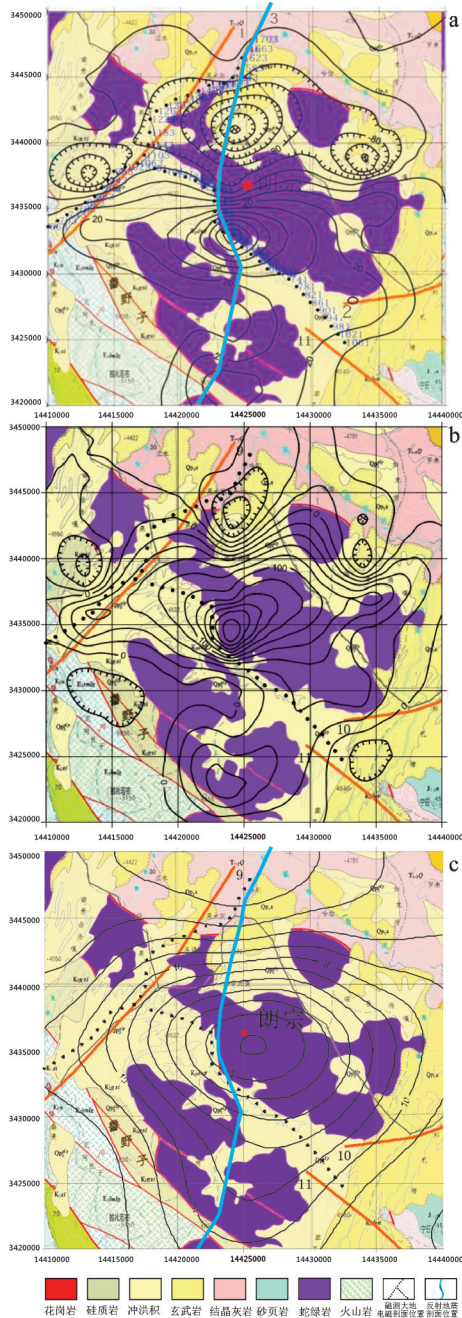


图2 东坡岩体原始航磁平面图与地质图叠合(等值线间距20 nT)(a)、东坡岩体航磁化极异常平面图与地质图叠合(b)及东坡岩体航磁化极上延5 km平面图与地质图叠合(c)(图中1线为重磁剖面,2线为重磁、大地电磁法剖面,3线为反射地震剖面)

Fig. 2 Original aeromagnetic plan view of the Dongpo rock mass overlying the geological map (a); Aeromagnetic ΔT plan view of reduction-to-the-pole of the Dongpo rock mass overlying the geological map (b); Aeromagnetic ΔT plan view of reduction-to-the-pole upward continuation of 5 km of the Dongpo rock mass overlying the geological map (c) In the figure, line 1 represents gravity and magnetic profile, line 2 represents gravity and magnetic profile and magnetotelluric profile, line 3 represents seismic reflection profile

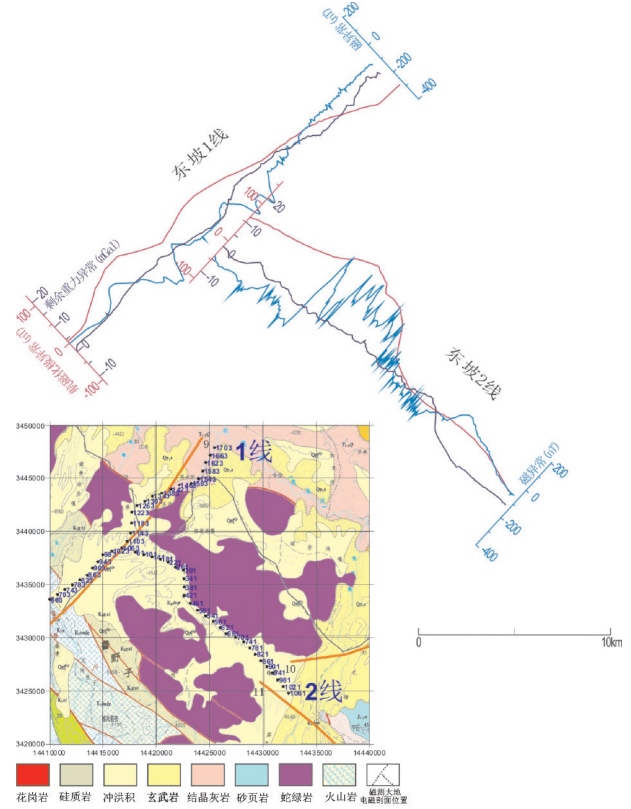


图3 东坡岩体重磁剖面图

蓝线—地面磁测 ΔT 剖面;红线—航磁化极曲线;棕线—航磁化极上延5km曲线;黑线—剩余重力异常曲线

Fig.3 Gravity and magnetic profile on the Dongpo rock mass The blue line - ΔT curve from ground magnetic survey; the red line - Aeromagnetic reduction-to-the-pole curve; the brown line - Aeromagnetic reduction-to-the-pole curve upward continuation of 5km; the black line - Gravitational residual anomaly curve

变化较大的特征,说明岩体的磁性分布不均匀,且具有较强的剩余磁性。在航磁图上磁异常是呈正负相伴、北负南正的异常特征,化极处理后可以得到与岩体分布范围非常吻合的正磁异常,整体上形成以感应磁化强度为主的磁异常。

3)航磁与地面磁测的磁异常形态差异较大的原因是地表岩石的蛇纹石化在岩体中分布不均匀的。地质研究表明,蛇纹石化是在一定温度、含水等条件下形成的,并使磁铁矿在局部地方富集。在蛇绿岩带中蛇纹石化是较普遍的,但在岩体内部较弱,主要在边缘部分,甚至围岩中也存在蛇纹石化,所以在岩体边部常有变化剧烈的磁异常。而出现地表出露岩体的锯齿状的地面磁异常与同一位置的航磁异常在磁异常的形态和强度上都有很大差

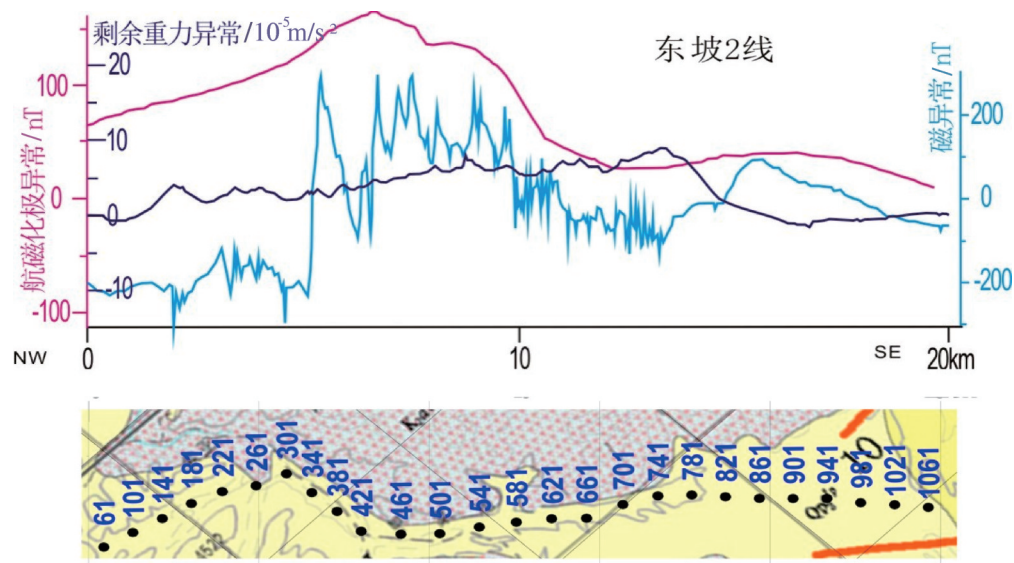


图4 东坡岩体航磁、地磁剖面图与地质条带图

蓝线—地面磁测 ΔT 剖面;红线—航磁化极曲线;棕线—航磁化极上延5 km曲线;黑线—地面剩余重力 Δg 曲线

Fig. 4 The curve of aeromagnetic, magnetic profile and geological stripe figure on the Dongpo rock mass

The blue line — ΔT curve from ground magnetic survey; the red line — Aeromagnetic reduction-to-the-pole curve; the brown line — Aeromagnetic reduction-to-the-pole curve upward continuation of 5 km; the black line — Gravitational residual anomaly Δg curve

异(图3~4),这说明:(1)地表磁测的资料主要是反映地表和浅部磁性矿物分布,而航磁异常是深部整个岩体的磁性体的反映。因而,不可能依据地面磁异常推算出整个岩体的特征,也不可能用地面浅部的剖面磁性资料去延拓出类似航磁异常整体形态及特征;(2)岩体存在深部磁性矿物的事实对航磁资料解释很重要,在探讨岩体深部结构时应重视深部蛇纹石化或其他深部原因可能使岩石深部产生相对富集的磁铁矿,从而造成了蛇绿岩体的航磁异常。

4)蛇绿岩体的磁性主要决定于岩体磁铁矿含量,对东坡、普兰、罗布莎岩体部分岩石标本的磁性测定结果表明,磁化率和剩余磁化强度较大的岩性是: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^[17,18]。蛇绿岩体的岩石中主要矿物中铁的氧化物含量是较高的,但是蛇绿岩体中磁性高低不决定于其铁和铁氧化物含量,通常,蛇绿岩体在蛇纹石化或其他热液活动条件下,当FeO和Fe₂O₃被氧化形成Fe₃O₄时才具有了较强的磁性,才能对磁异常形态与强度发生影响,有学者已论证过这种氧化过程中矿物生成与磁异常间的关系^[19-21]。

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,它在化极和向上延拓处理后保持与

地磁异常及岩体范围的吻合。东坡等岩体沿雅鲁藏布江南岸的分布都具有单岩体的航磁异常。其中不论是巨大岩体还是较小的地表出露岩体,均为近东西和北西方向有限延伸的,并且向下延伸最大可达10 km。本区岩体整体上是以感应磁化为主的磁性体,只有蛇绿岩体才具有较强的磁化率,而岩体地面磁性又是不均匀的,且都是由蛇绿岩体中蛇纹石化引起的,使整个岩体存在相对富集的磁性体部位,可能正是蚀变矿化作用最发育部位也是有利于成矿的部位。因而,在对该区航磁与地面磁测的磁异常对比分析基础上,应重视并合理解释局部磁异常的变化,这些部位是蚀变作用强烈的部位,也是成矿潜力较大的地方。

4 反射地震剖面的解释

图5给出了东坡岩体上南北剖面的反射地震叠前偏移剖面,图上与地表出露的蛇绿岩体相对应的部分(T1)是以多相位、低频、强振幅为特征,同向轴不连续,它占据剖面上部的主要位置;其下部T2范围内反射能量明显低于T1的区域;剖面北部为明显不同于T1的地表出露三叠纪地层的特征(T3),呈多组平行的南南西向倾斜的同向轴反射特征。依

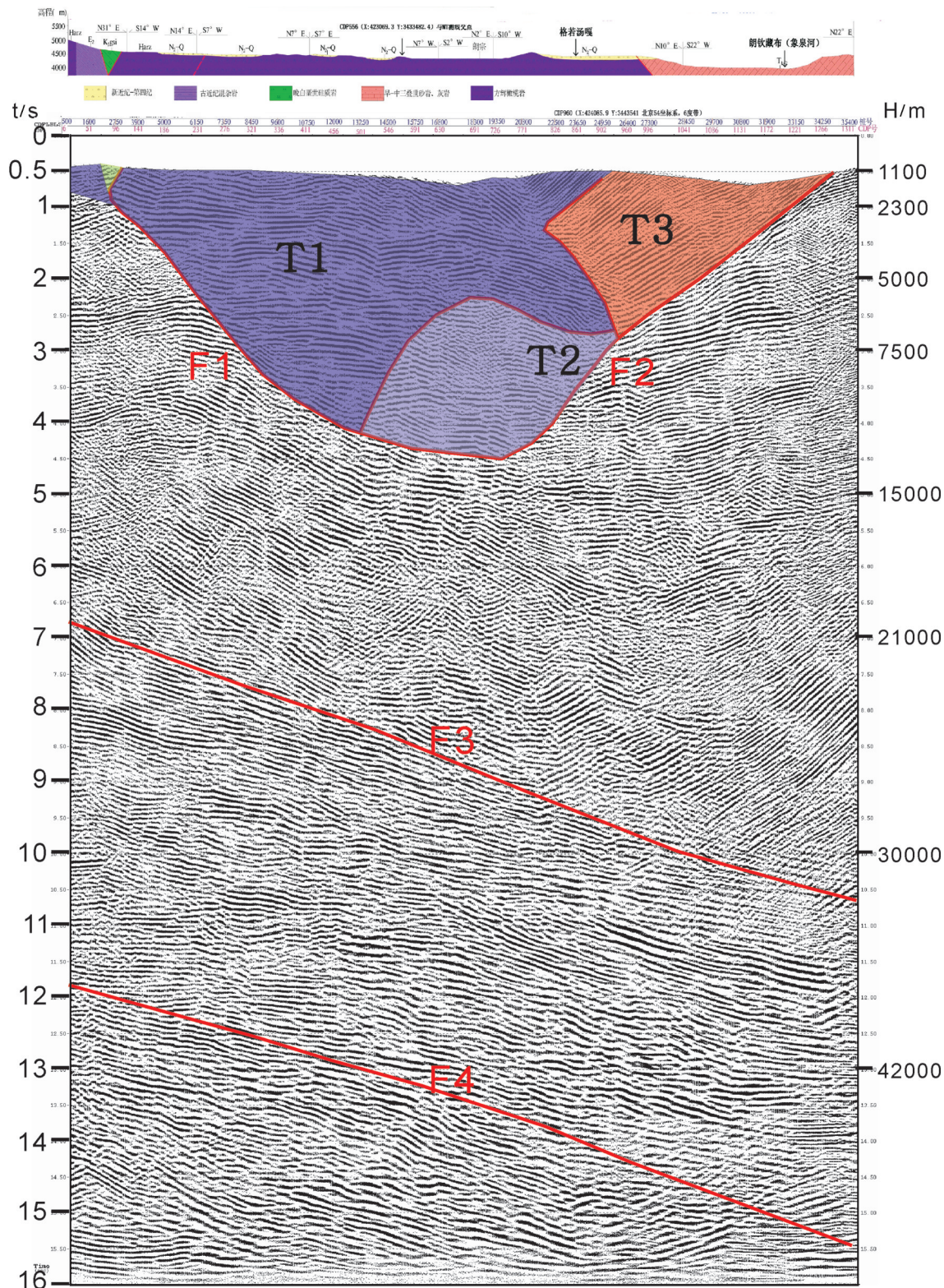


图5 东坡岩体反射地震叠前偏移剖面

T1—蛇绿岩体强反射区;T2—蛇绿岩体弱反射区;T3—与沉积砂岩、灰岩对应的较强反射区;F1、F2—断裂;F3、F4—滑脱面

Fig.5 Seismic reflection prestack migration section of the Dongpo rock mass

T1— Strong reflection area of ophiolite rock mass;T2—Weak reflection area of ophiolite rock mass;T3—Fairly strong reflection area related to sedimentary sandstone and limestone;F1, F2—Faults;F3, F4—Slip plane

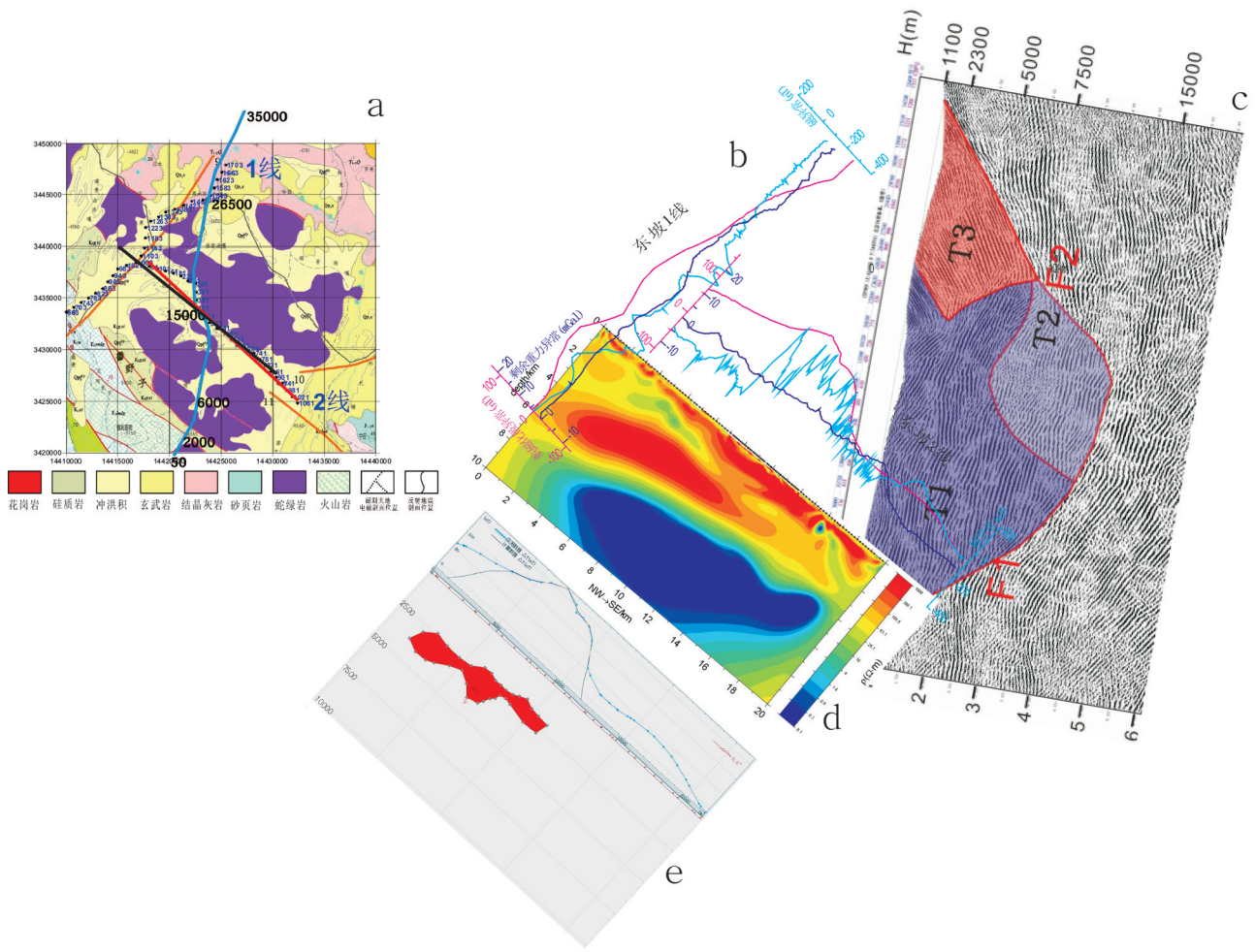


图6 西藏东坡岩体地球物理综合解释图

a—东坡岩体重力、磁法、大地电磁、人工地震方法测线位置图;b—地面剩余重力(Δg)、磁力(ΔT)及地形剖面图;c—反射地震剖面图;d—大地电磁法电阻率剖面;e—航磁反演磁性体与拟合曲线图

Fig. 6 Integrated geophysical interpretation image of the Dongpo rock mass in Tibet

a—Line position of gravity and magnetic, magnetotelluric and seismic reflection profile on the Dongpo rock mass; b— Gravitational residual anomaly Δg , magnetic ΔT , and terrain profile; c—The result of seismic reflection cross-section; d—The result of magnetotelluric cross section; e—Aeromagnetic inversion of magnetic body and fitting curve

据图5的特征结合大地电磁法和航磁异常特征,我们可以对东坡岩体深部构造作出综合解释,从而给出新的找矿模式。

(1)规模巨大的东坡蛇绿岩体以图5中F1、F2两断裂带限定了深部呈锅底状,向下延伸近10 km,由航磁异常换算的磁性体上顶深度达1.5 km,岩体蛇纹石化生成的磁铁矿是磁异常的主要原因,地面磁测证明地表岩体磁性矿物主要分布在岩体周缘,岩体内部仅有星零的分布,故地面磁异常能够较好地圈定出岩体范围。

(2)航磁异常的反演结果说明该岩体深0.5~3.0 km处存在磁性体,在反映地震剖面中给出了蛇绿岩体下方的反射强度变小的T2可能正是蛇纹石化较深的部位;因含水体积膨胀而密度降低、电阻率降低,磁性增大(图5),这是东坡岩体深部与地表出露的蛇绿岩体不同之处,也是在找矿中值得重视之处。可近地表的岩体低阻体与航磁异常的深度相当(1.5~3.0 km)。

(3)东坡岩体与普兰岩体罗布莎—泽当岩体深部均有较大范围的低阻体存在,且紧伴着岩体下部,由

于多方面的原因,东坡岩体的大地电磁法与地震剖面不在同一线上,但图6已表明岩体下部有较大的(深4.5~15.0 km)低阻体,与岩体上部有差异的,反射地震剖面中T3范围可能是经蚀变矿化的部位,又可能是直接来自地幔源的残留物质。推测规模巨大的岩体中应该考虑反射地震特征划出的T2区是有希望找到深部矿的部位,这里同时具有由航磁异常、低阻体异常、相对低速特征,为找矿提供了依据(图6)。

(4)在东坡岩体的F3、F4强反射界面表明印度板块中上地壳向北推进的滑动面。可能与印度板块地壳向北的滑脱界面MHT^[22]有关。这与罗布莎等岩体深部结构相似^[17]。

5 结 论

利用地面磁测和航磁资料反演深部磁性体的位置,结合大地电磁法浅部1.5~3.0 km的低阻体范围,以及岩体弱反射部位(T2)圈定出了可能是矿化蚀变较强的部位,是找矿的有利地段。该岩体下方5.0~20.0 km深度上的低阻体可能来自深部幔源物质的熔融体,在经历多期上涌、推覆、位移,经受了长期特提斯洋开合的过程到达此位置。

致谢:在西藏东坡岩体的地球物理探测研究中得到许志琴院士和大陆构造和动力学国家重点实验室的地质专家们的大力支持和帮助;袁学诚、李金铭、刘国栋、吴良士、余钦范、王光锷等教授为本课题的研究提供了多方的指导帮助;中国地质大学(北京)的师生们为野外工作付出了艰辛的劳动,在此表示衷心的感谢。

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. Ultrahigh-pressure minerals and new minerals from the Luobusa ophiolitic chromitites in Tibet: A review[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2008, 29(3): 263-274(in Chinese with English abstract).
- [2] 杨经绥, 熊发挥, 郭国林, 等. 东坡超镁铁岩体: 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榄岩体[J]. 岩石学报, 2011, 27(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, 27(11): 3207-3222(in Chinese with English abstract).
- [3] 熊发挥, 杨经绥, 梁风华, 等. 西藏雅鲁藏布江缝合带西段东坡蛇绿岩中锆石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).
- [4] 许志琴, 王勤, 曾令森, 等. 高喜马拉雅的三维挤出模式[J]. 中国地质, 2013, 40(3): 671-680.
Xu Zhiqin, Wang Qin, Zeng Lingsen, et al. Three-dimensional extrusion model of the Great Himalaya slice[J]. Geology in China, 2013, 40(3): 671-680 (in Chinese with English abstract).
- [5] 王希斌, 鲍佩声, 邓万明, 等. 西藏蛇绿岩[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 1-336.
Wang Xibin, Bao Peisheng, Deng Wannming, et al. Tibet Ophiolite [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 1-336 (in Chinese with English abstract).
- [6] 吴新国, 贾建称, 崔邢涛. 雅鲁藏布江缝合带开合演化模式的探讨[J]. 现代地质, 2006, 19(4): 488-494.
Wu Xinguo, Jia Jianchen, Cui Xingtao. Discussion on the model of evolution of open close structure of the Yalu Zangbu suture zone[J]. Geoscience, 2006, 19(4): 488-494 (in Chinese with English abstract).
- [7] 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榄岩中发现金刚石: 蛇绿岩型金刚石分类的提出[J]. 岩石学报, 2011, 27(11): 3171-3178.
Yang Jingsui, Xu Xiangzheng, 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).
- [8] Xavier Q. Thermal evolution and slip history of the Renbu Zedong Thrust, southeastern Tibet[J]. Journal of Geophysical research, 1997, 102(2): 2659-2679.
- [9] Le Fort P. Geologic evolution of the Himalaya[C]// Yin A, M Harrison(edits). The Tectonic Evolution of Asia. Cambridge Univ. Press, Palo Alto. 1996: 95-109.
- [10] Z Meifu. Podiform Chromitites in the Luobusa Ophiolite (Southern Tibet): Implications for Melt-Rock Interaction and Chromite Segregation in the Upper Mantle[J]. Journal of Petrology, 1996, 37(1): 3-21.
- [11] 熊盛青, 周伏洪, 姚正煦, 等. 青藏高原中西部航磁概查[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
Xiong Shengqing, Zhou Fuhong, Yao Zhengxu, et al. The Aeromagnetic Survey Conducted in Central and Western

- Qinghai-Tibet Plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002(in Chinese).
- [12] 刘美, 白登海, 肖鹏飞. 青藏高原东部岩石圈电性结构特征及其构造意义[J]. 地震地质, 2010, 32(1): 51-58.
- Liu Mei, Bai Denghai, Xiao Pengfei. The electrical conductivity structure of the eastern Tibetan Plateau and its tectonic implications[J]. Seismology and Geology, 2010, 32(1): 51-58(in Chinese with English abstract).
- [13] 谭捍东, 魏文博, Martyn Unsworth, 等. 青藏高原南部雅鲁藏布江缝合带地区地壳电性结构研究[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4):685-690.
- Tan Handong, Wei Wenbo, Martyn Unsworth, et al. Crustal electrical conductivity structure beneath the Yarlung Zangbo Jiang suture in the southern Xizang plateau [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(4): 685-690(in Chinese with English abstract).
- [14] 马晓冰, 孔祥儒, 于晟. 青藏高原西部大地电磁深探测结果[J]. 科学通报, 1997, 42(11): 1185-1187.
- Ma Xiaobing, Kong Xiangru, Yu Cheng. Magnetotelluric sounding in western Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(11):1185-1187(in Chinese).
- [15] 谭捍东, 姜枚, 吴良士, 等. 青藏高原电性结构及其对岩石圈研究的意义[J]. 中国地质, 2006, 33(4): 906-911.
- Tan Handong, Jiang Mei, Wu Liangshi, et al. Electrical conductivity structure of the Qinghai-Tibet Plateau and its significance for the study of the lithosphere[J]. Geology in China, 2006, 33(4): 906-911(in Chinese with English abstract).
- [16] 孙洁, 晋光文, 白登海, 等. 青藏高原东缘地壳、上地幔电性结构探测及其构造意义[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(增刊): 173-180.
- Sun Jie, Jin Guangwen, Bai Denghai, et al. Electrical structure of the crust and upper mantle and tectonics sense on the edge of the East Tibet[J]. Science in China(Series D), 2003, 33 (suppl):173-180(in Chinese).
- [17] Jiang Mei, Peng M, Yang J, 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.
- [18] 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).
- [19] Schmidt P W, Clark D A. The calculation of magnetic components and moments from TMI: A case study from the Tuckers igneous complex, Queensland [J]. Exploration Geophysics, 1998, 29 (4): 609-614.
- [20] Clark D A. Magnetic petrophysics and magnetometry: aids to geological interpretation of magnetic surveys [J]. Journal of Australian Geology and Geophysics, 1997. 17(2): 83-103.
- [21] 永田武. 岩石磁学[M]. 北京: 地质出版社, 1956.
- Takesi Nagata. Rock-Magnetism[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1956(in Chinese).
- [22] Hauck M L, Nelson K D, Brown L D, et al. Crustal structure of the Himalayan orogen at ~90° east longitude from Project INDEPTH deep reflection profiles[J]. Tectonics, 1998, 17: 481-500.