doi:10.3799/dqkx.2015.036

西准噶尔阿克巴斯陶地区三维电性结构和深部地质特征

刘文才,张胜业,杨龙彬,吴祖赐

中国地质大学地球物理与空间信息学院,湖北武汉 430074

摘要: 为探究西准噶尔阿克巴斯陶岩体的三维电性及达尔布特断裂在该区的性质,采用音频大地电磁测深方法进行了三维的地质填图勘探,把奥克姆(Occam)二维反演得到的结果进行三维展示. 结果表明,测区岩浆主要通过东南和西北部两个通道上侵,分布在达尔布特断裂两侧,其中东南上侵岩体规模大,但是被达尔布特断裂切断,与阿克巴斯陶岩体只在少部分区域是相连的,西北部上侵岩体与中部岩体相连,岩体侵入到测区中部呈倒三角锥体型堆积,岩体浅部展布范围大,深部慢慢变小,中间最深部位达7~8 km,岩体正下方是低阻带;得到了达尔布特断裂在该区的部分性质,即北东—南西走向,倾向北西,倾角大并保持陡倾持续到5 km以下,有的地方甚至到10 km,断裂深部与岩体正下方的平缓低阻带相连.

关键词: 阿克巴斯陶;达尔布特断裂;音频大地电磁测深;奥克姆;地球物理.

中图分类号: P31 **文章编号:** 1000-2383(2015)03-0441-07 **收稿日期:** 2014-04-29

Three-Dimensional Electrical and Deep Structure Features of Akebasitao Area in Western Junggar by AMT Data

Liu Wencai, Zhang Shengye, Yang Longbin, Wu Zuci

Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: To investigate three-dimensional electrical features of Akebasitao rock mass and the structure of Darbut fault, we used audio magnetotelluric sounding for geological mapping exploration of three-dimensional nature in the region and display the results of the two-dimensional Occam inversion in three dimensions. The results indicate that there are two magma channels in southeast and northwest parts in two sides of Darbut fault. The southeast intrusive rock mass is large in size and only partly connected to Akebasitao rock mass since it was cut by Darbut fault. The magma channel in northwest is directly connected to rock mass as a reverse cone pyramid which is larger in shadow part and getting smaller in the deep, which resulted from the magma intrusion into the middle of the survey area. The rock mass can be 7-8 km deep in the middle part and there are low resistance materials below the rock mass. It is concluded that Darbut fault in this area strikes northeast-southwest to northwest, with big inclination angle, as steep as 5 to 10 km and the lower part of fault is connected to the low resistance material below the rock mass.

Key words: Akebasitao; Darbut fault; audio magnetotelluric; Occam; geophysics.

西准噶尔作为中亚造山带的一部分,受到大量学者的关注. 蛇绿混杂岩带、花岗岩、中基性岩墙在本地区广泛出现,表明西准噶尔晚古生代构造演化极为复杂(高睿等,2013). 区域性大断裂和岩浆岩体是该区代表性地质构造.

该区岩浆岩极为发育,呈面状分布,按形成时代

基金项目: 中国地质调查局项目"西准噶尔克拉玛依后山地区三维地质调查试点"(No. 1212011220245);新疆1∶25万铁厂沟镇幅(L45C002001)与克拉玛依市幅(L45C003001)区调修测项目(No. 1212011120502).

作者简介: 刘文才(1989-),男,硕士研究生,主要从事电磁法方向研究. E-mail: 1048554147@qq.com

引用格式: 刘文才,张胜业,杨龙彬,等,2015. 西准噶尔阿克巴斯陶地区三维电性结构和深部地质特征. 地球科学——中国地质大学学报,40(3): 441-447.

分为早石炭世(340～320 Ma)和晚石炭至早二叠世(310～290 Ma)两期(童英等,2010),且后一期较强,之后岩浆活动明显减弱.阿克巴斯陶岩体位于达尔布特断裂中部,整体处于达尔布特断裂西北盘,呈椭圆型分布,是该区晚石炭世代表性的出露岩浆岩岩体.对于该岩体的研究将会为其他岩体提供借鉴.

该区达尔布特断裂是一条北东一南西走向的区域性大断裂,对西准噶尔地区地质构造演化起着控制作用.张琴华等(1989)对达尔布特的形成年代做了研究,冯鸿儒等(1990)对达尔布特断裂做了详细的阐述,认为其形成于早石炭世后,达尔布特断裂带为犁状断裂,其走向为北东 50°左右,倾向北西,浅部断面倾角一般在 70°～80°之间,向深部产状迅速变缓.

虽然前人对地表岩体的岩性、出露形态等浅部特征做了研究,但是对岩浆岩体的侵入通道和三维形态还不得而知,并且达尔布特断裂的构造特征没有给出具体的物探证据.本文通过采用音频大地电磁法对阿克巴斯陶岩体的侵入形态、空间布局及达尔布特断裂在该区的构造特性做了研究.

1 测区地质及地球物理概况

1.1 测区地质概况

西准噶尔位于西伯利亚、哈萨克斯坦和塔里木 3 个大陆板块的交接处,是中亚造山带的一个重要组成部分.阿克巴斯陶岩体位于西准噶尔扎伊尔山中段塔城地区,整体位于达尔布特断裂西北盘(图 1,红色为研究区域).岩体平面展布呈椭圆状,出露面积大,该岩体是晚石炭世岩浆活动高峰期出露的代表性岩体,岩体整体侵位于下石炭统包古图组地层,与围岩是侵入接触关系.苏玉平等(2006)、庞振甲(2008)、第鹏飞(2010)、党飞鹏等(2011)对阿克巴斯陶岩体岩性都做了研究,结果一致认为阿克巴斯陶岩体从早到晚由花岗闪长岩、正长花岗岩和二长花岗岩 3 个岩石组合类型组成,阿克巴斯陶岩体具有高硅、高碱及低铝的显著特征,岩石中未见碱性暗色矿物,长石类矿物以碱性长石为主,暗色矿物以角闪石、黑云母为主,具有后碰撞环境 A 型花岗岩的特征(庞振甲,2008).

达尔布特断裂是测区内大型的剪切走滑断裂,其走向为北东 50°左右,倾向北西,浅部断面倾角一般在 70°～80°之间.冯鸿儒等(1990)认为断裂系的形成、发育是由于碰撞后的西伯利亚、哈萨克斯坦和塔里木 3 个大陆板块在早石炭世以后仍在不断地相向运动.其早期是以左行陡倾的走滑断层形式出现,中期受陆内俯冲作用的影响,被强烈的推覆构造改造成上陡下缓的犁状断层;近时期,断裂处于引张状态,表现为正断层性质,形成了明显的断层地貌.

1.2 测区地球物理概况

测区内岩石类型除阿克巴斯陶岩体的花岗岩

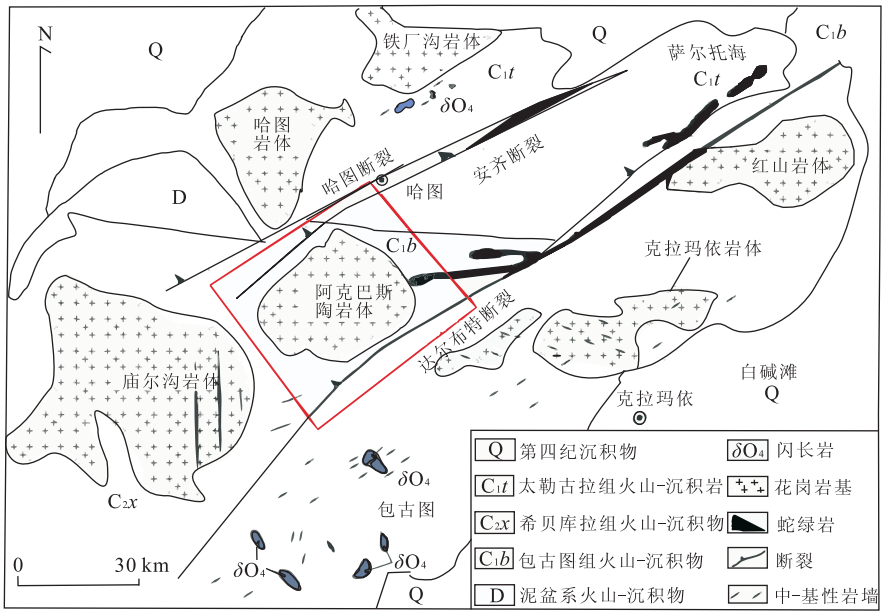

图 1 西准噶尔地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of the western Junggar region

据尹继元等(2011)修改

表 1　西准噶尔阿克巴斯陶岩体实测物性

Table 1　Measured property table of akbasitao areas in western Junggar

岩性	标本数量（块）	磁化率		电阻率（Ω·m）		极化率（%）	
		变化范围	常见值	变化范围	常见值	变化范围	常见值
花岗岩	395	1～1 192	110	442～5 814	2 716	0.570～2.790	1.320
硅质砂岩	19	109～385	250	1 262～9 278	3 369	0.730～2.426	1.370
凝灰质粉砂岩	15	127～376	222	1 503～5 673	2 639	0.870～2.230	1.170
辉长岩	6	143～608	294	1 453～3 015	2 227	0.520～2.000	1.210
蛇纹岩	2	108～312	108	1 056～3 786	1 056	0.880～1.480	0.880
角岩化凝灰质粉砂岩	5	125～318	236	1 066～8 671	6 010	0.710～1.520	0.870

外，围岩包括早石炭世包古图组的凝灰质粉砂岩、角岩化凝质粉砂岩及硅质砂岩，以及蛇绿岩在内的基性、超基性等岩片.

从项目组实际测量得到的西准噶尔阿克巴斯陶地区实测物性（表 1）中可以看出：测区岩石的极化率比较小，最小的是辉长岩的 0.52%，最大的是花岗岩的 2.79%，大部分都集中在 1%～2%之间，可见测区内岩石的矿化程度比较低；测区岩石的磁化率较大，岩体的磁化率值变化范围 1～1 192，其中比较常见的值为 222；测区岩石的电阻率值普遍偏大，最小值是花岗岩的 442 Ω·m，最大值是硅质砂岩的 9 278 Ω·m.

通过物性的测量得知，测区岩石的矿化程度比较低，花岗岩岩体的电阻率值常见值基本都在 1 000 Ω·m以上，为后期花岗岩岩体的探测提供了物性依据，由于物性测量的主要是地表的岩石标本，地表砂岩受风化作用等导致电阻率值变高. 砂岩在深部表现为低阻主要是由于砂岩孔隙度较高，经流体填充后即表现为低阻特征，而花岗岩孔隙度低，在深部表现为高阻特征.

2　音频大地电磁数据采集与处理

音频大地电磁（Audio magnetotelluric，AMT）与大地电磁法原理工作方法相同，都是利用天然交变电磁场研究地球电性结构的一种地球物理勘探方法（陈乐寿和王光锷，1990；张胜业和潘玉玲，2004），唯一的不同是测量的频率值范围不同. 它具有工作效率高、勘探深度大、能穿透高阻层、对低阻层的分辨能力强、横向分辨能力强、等值作用范围小、资料处理解释技术成熟等优点，被广泛地应用于深部构造研究、矿产勘探、油气资源普查、地热资源勘查、地下水资源等领域.

本次观测点采集工作布置了 16 条 NW-SE 的测线（L1～L16），每条测线布置了 31 个测点（P1～P31），点距 1 km，线距 2 km. 由于诸多因素考虑，最后去掉了测区若干点的采集工作. 实测点覆盖了测区主要构造，包括阿克巴斯陶岩体、达尔布特断裂、安齐断裂及工区北部一条近东西走向的次级断裂（图 2）.

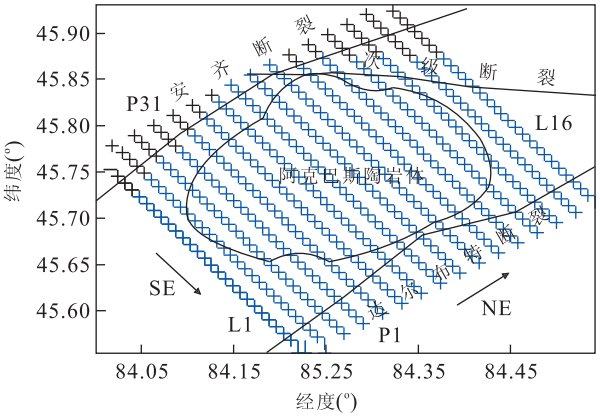

图 2　观测点布置

Fig. 2　Observation points layout

蓝色点代表采集的测点；黑色代表未采集的测点

数据采集应用了德国 GMS-07e 和加拿大凤凰公司的 MTU-NET 仪器进行数据采集，并应用两款配套的软件进行了数据的预处理，得到了视电阻率、相位和电性主轴等信息. 从得到的视电阻率和相位曲线来看，数据质量比较好，图 3 为 3 号测线的 9 号测点的曲线.

3　反演及解释

本次反演使用的是 Occam 二维反演，Occam法是一种带平滑约束的最小二乘法反演，它是一种正则化的反演方法，在寻找模型与原始数据最大拟合时，要求模型最光滑，因此受初始模型影响小，是一种有效的数据反演处理方法（何梅兴等，2011），且反演迭代中基本不会引入数据分辨不出的多余构造

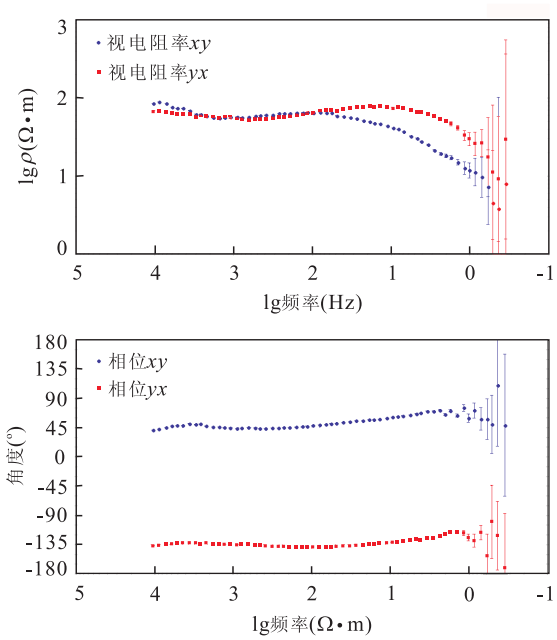

图 3 3-9 测点原始数据视电阻率和数据相位曲线

Fig. 3 The original resistivity curve and phase curve of 3-9 point

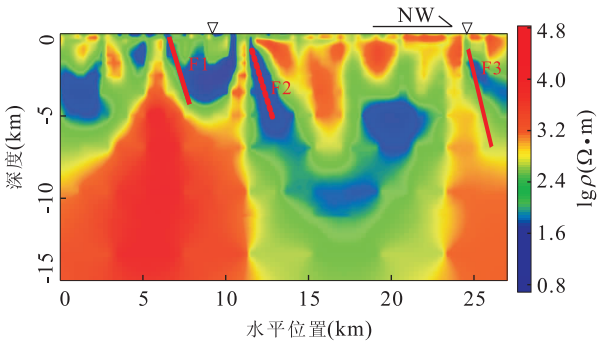

图 4 5 号线反演结果

Fig. 4 Inversion result of line 5

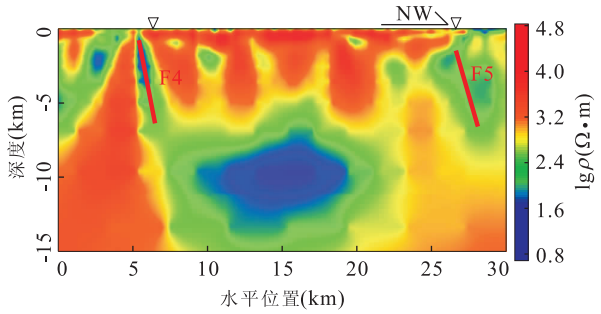

图 5 10 号线反演结果

Fig. 5 Inversion result of line 10

干扰,具有较好的稳定收敛性(吴小平和徐果明,1998).反演试验了 RRI 快速松弛反演,结果很粗糙;杨龙彬等(2014)在该区周边包古图岩体应用

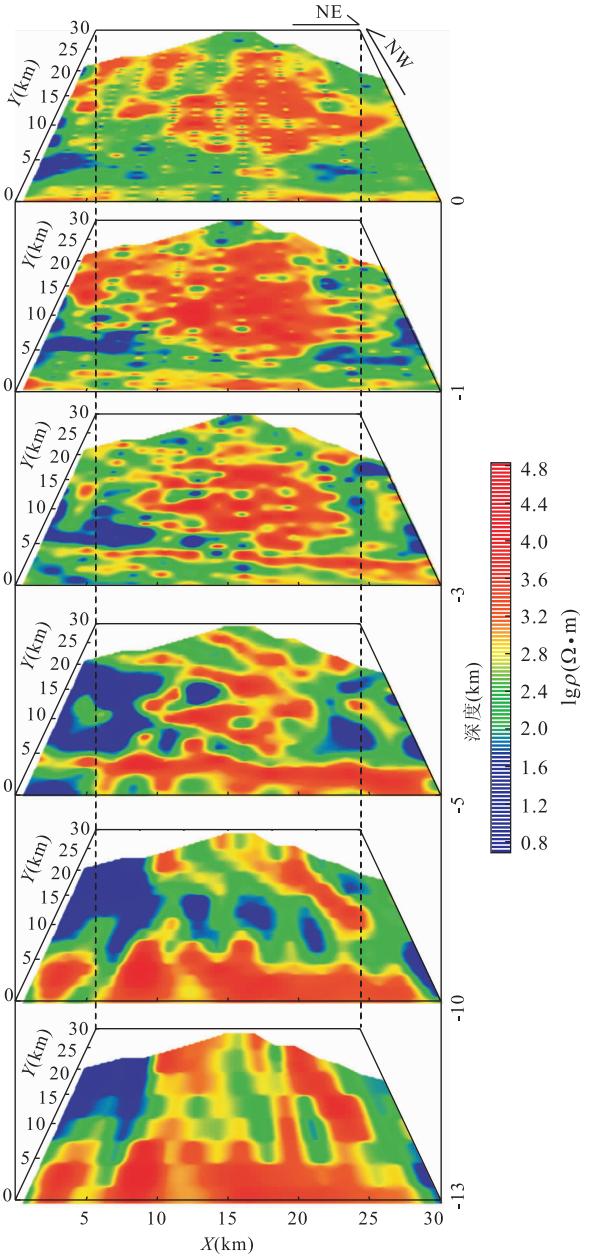

图 6 深度切片

Fig. 6 Depth slices

Occam 得到了比较好的结果,所以最后应用了 Occam二维反演,并取得了满意的结果.在对比了 TE、TM 和 TE+TM 这 3 种模式数据的反演结果后,采用了 TM 模式的数据的反演结果.

笔者对其中代表性的 2 条线的反演结果进行分析.图 4 和图 5 中地表的倒三角代表地表岩体的出露边界,因为达尔布特断裂在本区是隐伏断裂,所以没有标出其地表位置.其中橙色部分为高电阻率物质,主要是花岗岩,这与物性测量结果花岗岩电阻率在 1 000 Ω·m 以上一致,蓝色和绿色部分代表低阻物质,主要是断裂形成的破碎带及原始沉积地层,包

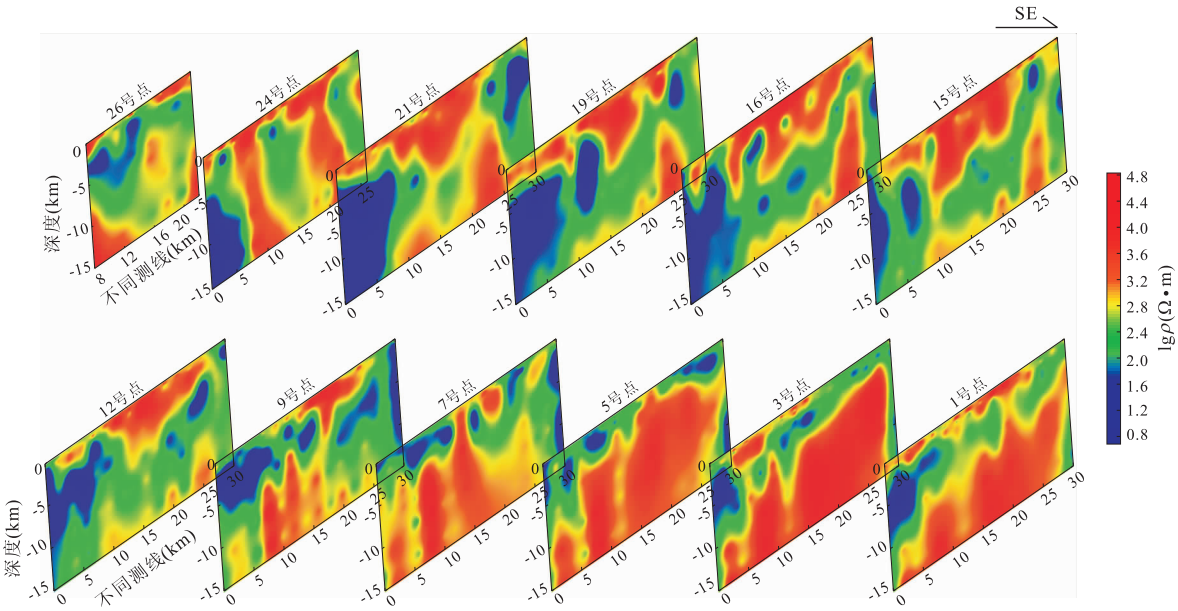

图 7　测区 NE 向剖面垂直于测线的切片

Fig. 7　NE section slices which perpendicular to the line in the survey area

括早石炭世包古图组的凝灰质粉砂岩、角岩化凝质粉砂岩及硅质砂岩等.

从 5 号线(图 4)和 10 号线(图 5)的二维反演结果来看:(1)岩浆在深部是从测线的两端向上侵入的,测线的南边上侵岩体规模大,但未出露地表,被断裂切断,没有与中间堆积岩体相连,两条测线中间堆积的岩体深度大概有 6 km,而且可以看出岩体主要与测线北侧上侵岩体是相连的;(2)达尔布特断裂在 5 号线(即 F1,F2)表现为陡倾,并且切断岩浆岩体,并持续到 5 km 以下,断裂一直延续到与岩体正下方的低阻带相连. 由于测区西北部岩浆上升,导致低阻带向上折叠;在 10 号线断裂(即 F4)表现为陡倾,并持续切割到深部与阿克巴斯陶岩体正下方的低阻带相连,推测低阻带可能为岩浆侵入前的沉积地层;(3)测线小号点附近有倾向南东的低阻带,可能为断裂或者晚石炭系低阻地层;(4)测线大号点附近还有北倾的断裂,5 号线的断裂(即 F3)对应测区内安齐断裂的一小部分,10 号线的断裂(即 F5)对应测区内近东西向的次级断裂与安齐断裂相交的区域.

单从每条线来看,反映不出测区整体构造特征,所以用 Surfer 软件做了横向不同深度的切片和纵向不同测线的切片来解释反演结果.

从图 6 可以看出,岩浆岩体在 10 km 深度的时候主要是从测区的东南部和西北部侵入,其中东南部规模较大;到 5 km 的时候,测区中部的岩体已经出现,并随着深度变浅而逐步变大,到地表变成近椭圆型的出露,与岩浆岩体出露形态相似说明反演结果的可靠性.

从图 7 中可以更明显地看出测区东南部即小号点区域和西北部即大号点区域的 2 个主要上升通道,东南部岩浆规模大. 中部并没有岩浆上升(15 号点,16 号点切片),中间深部是平缓的低阻带. 在测区西北端,岩浆上侵不明显,而次级断裂和安齐断裂在这部分所形成的低阻与切片图也是吻合的(26 号点切片).

从图 8 中可以看出岩浆主要在测区靠中间测线的两侧侵入,岩浆在东南部区域在每条测线都有上侵过程,并且与中间堆积岩体基本没有直接相连,而西北部只在 5～14 号线有明显的上侵过程. 岩浆岩堆积主要在测区的中间部分,而两边测线堆积规模小且深度浅. 测区两边测线显示低阻较多,分析可能为原始低阻地层或者岩体与围岩的低阻接触带;明显看出达尔布特断裂的性质,尤其是在中部区域.

从图 6、图 7 和图 8 综合起来,可以得到如下:

(1)岩浆在测区有东南和西北的 2 个主要上升通道,分布在达尔布特断裂两侧,其中以东南部分靠近达尔布特断裂的一侧岩体侵入最多,但与阿克巴斯陶岩体基本没有直接相连,只有一条测线上是与岩体有连接;三维电性结构显示,阿巴克斯套岩体呈倒三角锥体形态,最深部位超过 5 km,且从图 6 中可以看出岩浆的堆积和西北上侵的岩体是连在一起

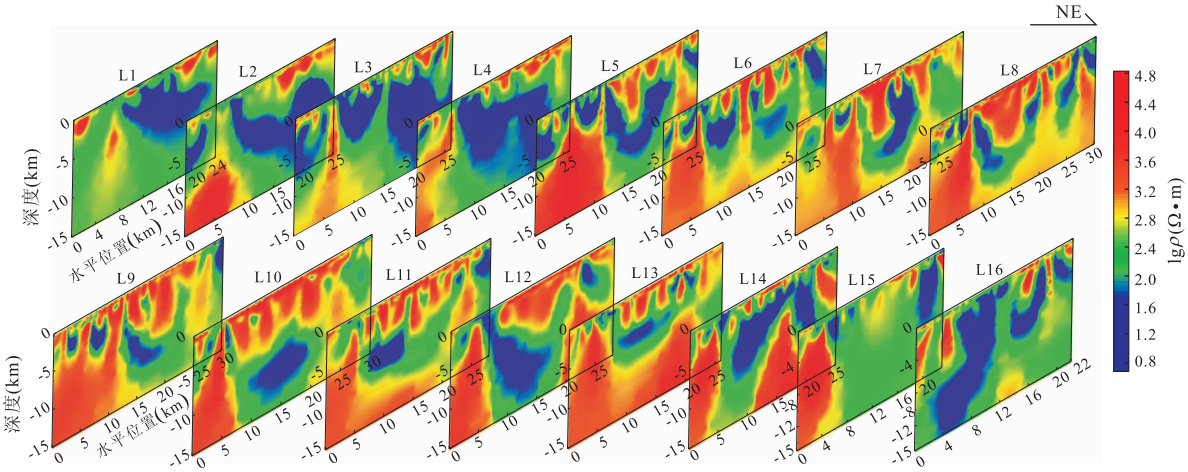

图 8 测区 NW 向剖面不同测线的切片

Fig. 8 NW section slices which are different lines in the survey area

的,说明阿克巴斯陶岩体是与西北通道关系密切;测区中间部位深部岩体很可能是连在一起的. 由于西北部岩浆上升,导致多条测线上,深部低阻带向上折叠.

(2)达尔布特断裂虽然在各个测线具体性质不同,但是总体上符合以前推测的倾向西北,高角度并且向深部延伸到 5 km 以下,甚至达 10 km. 大地电磁探测结果支持达尔布特断裂为高角度向深部延伸,而不支持到深部变成低角度推覆. 断裂下部与岩体正下方的平缓低阻带相连,低阻带推测有可能为原始低阻地层.

(3)从大号点测线(图 8)可以看出一条倾向北方向的断裂,即地质图显示的测区北部近东西走向的一条次级断裂. 在测区 5～10 号测线南端的低阻即安齐断裂,阿巴克斯套岩体的深部通道可能与安齐断层有关.

(4)测区东南部有一条倾向南东的低阻带,横贯所有测线,深部在 5 km 左右,其浅部基本和达尔布特断裂是连接的,推测应该是上侵岩浆改造原始地层导致的.

4 结论

(1)岩浆在测区有东南部和西北部 2 个主要上升通道,分布在达尔布特断裂两侧,其中以东南部分靠近达尔布特断裂的一侧岩体侵入最多,但被达尔布特断裂切断,没有出露地表且只在少部分区域直接与阿克巴斯陶岩体相连;西北上侵岩体出露地表且与阿克巴斯陶岩体相连,阿克巴斯陶岩体在测区的中心部位呈倒三角锥体堆积. 测区西北部是阿克巴斯陶岩体的岩浆通道,这与野外调查得到岩体北西侧与围岩的接触界面陡,其余 3 个方向均为低角度侵位,接触界面低缓且倾向围岩的结论是吻合的. 中间岩体堆积深度最深达 7～8 km. 岩体下部是与达尔布特断裂下部相连的水平低阻带,推测有可能为岩浆侵入前的原始地层低阻沉积物.

(2)达尔布特断裂在该区倾向西北,倾角大并且持续陡倾到 5 km,有的部位达到了 10 km,断裂持续陡倾一直切割到岩体正下方的水平低阻带,大地电磁探测结果支持达尔布特断裂为高角度向深部延伸,而不支持到深部变成低角度推覆,水平低阻带有可能为岩浆侵入前的原始低阻地层. 由于西北部岩浆上升,导致多条测线上深部低阻带向上折叠.

(3)测区东南部有倾向南东的一条低阻带(可能为晚石炭世低阻地层被上升岩浆改造),横贯所有测线,浅部与达尔布特断裂相连,深度 5 km 左右. 同时给出了地质图上测区北部近东西走向的次级断裂及安齐断裂的证据,阿克巴斯陶岩体的深部通道可能与安齐断裂有关.

致谢:感谢李永涛老师提供的实测物性资料和王国灿老师的指导!

References

Chen, L. S., Wang, G. E., 1990. Magnetotelluric Sounding Method. Geological Publishing House, Beijing, 1 (in Chinese).

Dang, F. P., Wang, J. L., Yang, M., et al., 2011. Characteristics and Tectonic Setting of Late Paleozoic Plutons in the South of Western Junggar. *Geology and Resources*, 20(6): 440－451 (in Chinese with English abstract).

doi:1671－1947(2011)06－0440－12

Di, P. F., 2010. The Preliminary Study of the Geochemistry and Tectonic Significance of Late Paleozoic Granitoids in West Junggar (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).

Feng, H. R., Li, X., Liu, J. Q., 1990. The Structural Evolution of the Darabut Fault System in West Junggar. *Journal of Xi'an College of Geology*, 12(2): 46－55 (in Chinese with English abstract).

Gao, R., Xiao, L., Wang, G. C., et al., 2013. Paleozoic Magmatism and Tectonic Setting in West Junggar. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10): 3413－3434 (in Chinese with English abstract). doi:1000－0569/2013/029 (10)－3413－34

He, M. X., Hu, X. Y., Ye, Y. X., et al., 2011. 2. 5D Controlled Source Audio-Frequency Magnetotelluric Occam Inversion. *Progress in Geophysics*, 26(6): 2163－2170 (in Chinese with English abstract).

Pang, Z. J., 2008. The Study of Akebasitao Granite Body in West Junggar, Xinjiang (Dissertation). Chang'an University, Xi'an (in Chinese with English abstract).

Su, Y. P., Tang, H. F., Hou, G. S., et al., 2006. Geochemistry of Aluminous A-Type Granites along Darabut Tectonic Belt in West Junggar, Xinjiang. *Geochimica*, 35(1): 55－67 (in Chinese with English abstract). doi: 0379－1726(2006)01－0055－13

Tong, Y., Wang, T., Hong, D. W., et al., 2010. Spatial and Temporal Distribution of the Carboniferous-Permian Granitoids in Northern Xinjiang and Its Adjacent Areas, and Its Tectonic Significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 618－641 (in Chinese with English abstract). doi:1000－6524(2010)－0619－23

Wu, X. P., Xu, G. M., 1998. Improvement of Occam's Inversion for MT Data. *Acta Geophysica Sinica*, 41(4): 547－554 (in Chinese with English abstract).

Yang, L. B., Zhang, S. Y., Lei, S. L., et al., 2014. Three-Dimensional Electrical and Deep Structure Features in Baogutu Area of Western Junggar. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(5): 629－636 (in Chinese with English abstract). doi: 1000－2383(2014)05－0629－08

Yin, J. Y., Yuan, C., Wang, Y. J., et al., 2011. Magmatic Records on the Late Paleozoic Tectonic Evolution of Western Junggar, Xinjing. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(2): 278－291 (in Chinese with English abstract). doi:1001－1552(2011)02－0278－14

Zhang, Q. H., Wei, Z. L., Sun, S. H., 1989. The Formation Age of Darabut Fault in West Junggar. *Xinjiang Petroleum Geology*, 10(1): 35－38 (in Chinese).

Zhang, S. Y., Pan, Y. L., 2004. Principle of Geophysics. China University of Geosciences Press, Wuhan, 268－296 (in Chinese).

附中文参考文献

陈乐寿，王光锷，1990. 大地电磁测深法. 北京：地质出版社，1.

党飞鹏，王居里，杨猛，等，2011. 西准噶尔南部晚古生代侵入岩特征和构造背景. 地质与资源，20(6)：440－451.

第鹏飞，2010. 西准噶尔晚古生代花岗岩地球化学特征及构造意义初步研究(硕士学位论文). 兰州：兰州大学.

冯鸿儒，李旭，刘继庆，1990. 西准噶尔达尔布特断裂系构造演化特征. 西安地质学院学报，12(2)：46－55.

高睿，肖龙，王国灿，等，2013. 西准噶尔演讲活动和构造背景. 岩石学报，29(10)：3413－3434.

何梅兴，胡祥云，叶益信，等，2011. 2. 5 维可控源音频大地电磁法 Occam 反演理论及应用. 地球物理学进展，26(6)：2163－2170.

庞振甲，2008. 新疆西准噶尔阿克巴斯陶花岗岩研究(硕士学位论文). 西安：长安大学.

苏玉平，唐红峰，侯广顺，等，2006. 新疆西准噶尔达尔布特构造带铝质 A 型花岗岩的地球化学研究. 地球化学，35(1)：55－67.

童英，王涛，洪大卫，等，2010. 北疆及邻区石炭－二叠纪花岗岩时空分布特征及其构造意义. 岩石矿物学杂志，29(6)：619－641.

吴小平，徐果明，1998. 大地电磁数据的 Occam 反演改进. 地球物理学报，41(4)：547－554.

杨龙彬，张胜业，雷胜兰，等，2014. 西准噶尔包古图地区岩体三维电性及深部结构特征. 地球科学——中国地质大学学报，39(5)：629－636.

尹继元，袁超，王毓婧，等，2011. 新疆西准噶尔晚古生代大地构造演化的岩浆活动记录. 大地构造与成矿学，35(2)：278－291.

张琴华，魏洲龄，孙少华，1989. 西准噶尔达尔布特断裂带的形成时代. 新疆石油地质，10(1)：35－38.

张胜业，潘玉玲，2004. 应用地球物理学原理. 武汉：中国地质大学出版社，268－296.