

doi:10.3799/dqkx.2014.060

# 西准噶尔包古图地区岩体三维电性及深部结构特征

杨龙彬,张胜业,雷胜兰,张玲玲,鲁杏,程怀蒙,杜振华,刘文才

中国地质大学地球物理与空间信息学院,武汉 430074

**摘要:**为探明西准噶尔包古图地区地下电性特征及两块露头岩体深部结构关系,采用音频大地电磁测深对该地区进行了三维性质的地质填图勘探.将二维 OCCAM 反演得到的电性结构结果以三维形式成图,从多角度展示了该地区地下电性特征,并发现两块目标岩体在深部构造上由通道相连.经推断是在石炭系希贝库拉斯组、包古图组、泰勒古拉组等地层组成的背斜形成后,由于岩浆运动上侵在与斑岩体对流时冷却产生热机械能,从而导致破裂裂隙在岩体、围岩之中产生裂隙构造组合,热液通过这些通道而形成包古图岩体.

**关键词:**包古图;音频大地电磁;OCCAM 反演;三维电性结构图;电磁勘探.

**中图分类号:** P319.2

**文章编号:** 1000-2383(2014)05-0629-08

**收稿日期:** 2013-04-22

## Three-Dimensional Electrical and Deep Structure Features in Baogutu Area of Western Junggar

Yang Longbin, Zhang Shengye, Lei Shenglan, Zhang Lingling,  
Lu Xing, Cheng Huaimeng, Du Zhenhua, Liu Wencai*Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*

**Abstract:** Audio magnetotelluric sounding is used in this study for geological mapping exploration of three-dimensional nature to determine the underground electrical characteristics and relationship of deep structure of two outcrops of rock mass in Baogutu area of Western Junggar. The two-dimensional OCCAM inversion electric structure results in the form of three-dimensional mapping, displaying the underground electrical characteristics from various angles. Two pieces of rock mass in the deep structure are found to be connected by channels. It is concluded that the mechanical energy generated in the cooling process of magma intrusion and porphyry convection led to fissures in the rock mass, which in turn led to structural fissures after the formation of anticline in Carboniferous Siebel Kuras Group, Baogutu Group, and Tailegula Group, because of the movement of cooling thermal and, thus causing, rock combination of cracks, Baogutu rock formed eventually when hydrothermal moved through these channels.

**Key words:** Baogutu; audio magnetotelluric; OCCAM inversion; three-dimensional electrical structure diagram; electromagnetic prospecting.

## 0 引言

巴尔喀什—西准噶尔地处中亚造山带的西部,是中亚成矿域的重要组成部分.斑岩型铜(金)矿床、夕卡岩型铜多金属矿床等矿产资源十分丰富,为全球范围内最重要的金属成矿带之一.作为巴尔喀什成矿带的东延部分,西准噶尔成矿带是一条晚古生

代(海西期)褶皱成矿带,同时带内有强烈的晚古生代构造岩浆作用,形成了大型、超大型包古图斑岩型铜矿床和哈图金矿床等,是中亚成矿域内重要的成矿远景区(王志宏,2012).

西准噶尔包古图地区位于达尔布特断裂以南,克拉玛依市以西.包古图地区出露一系列中酸性小岩体,前人按照出露面积大小将这些岩体编号为 I-

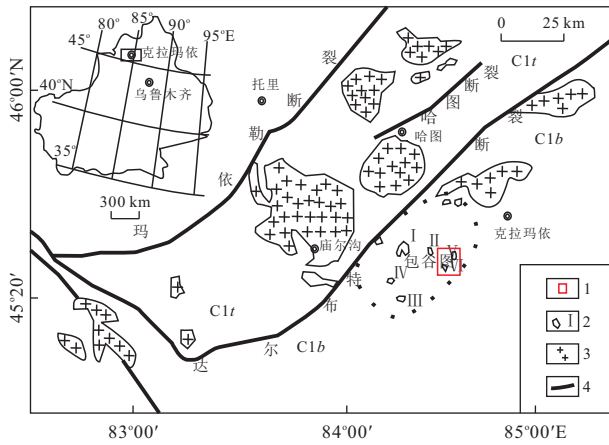


图 1 西准噶尔区域地质

Fig.1 The Western Junggar regional geological sketch

1.研究区域;2.包古图含矿斑岩及编号;3.花岗岩;4.断层

X号,并且做了大量工作与研究;刘玉琳等(2009)、宋会侠等(2009)分别对包古图地区的岩性特征及年代学做了分析与研究;成勇和张锐(2006)、杨富全等(2010)、申萍等(2009)对包古图地区斑岩铜矿的成矿条件及成矿规律做了探讨,并指出下一步的找矿方向;赖月荣等(2009)运用激电和磁法的物探方法对新疆准噶尔斑岩铜矿做了研究,验证了物探方法在该地区勘探的可行性.包古图地区V号岩体中型斑岩铜矿的研究已经取得了大量的成果,本文采用音频大地电磁测深法对V、VI号两块岩体(图1,红框内是研究区域)的地下电性结构及展布做了勘探与研究.

## 1 测区的地质及地球物理概况

### 1.1 区域地质特征

西准噶尔地区是西伯利亚和塔里木板块之间的增生造山带的一部分,古生代为中亚古大洋环境(张锐等,2006;赖月荣等,2009;Shen *et al.*,2009).

包古图位于西准噶尔达尔布特复向斜东段南翼.测区内出露的地层主要为石炭系,具明显的韵律层理,韵律层厚度不一,反复出现,反映出浊流沉积的特点.断裂是该测区的主要构造,且规模较大;南北向褶皱和近东西向断裂在该测区发育程度较高,是储矿的主要构造.测区中的岩体走向大致为南北向.

### 1.2 测区地球物理特征

包古图岩体位于达尔布特断裂以南约30 km,希贝库拉斯复背斜东翼,岩体侵入于包古图下亚组凝灰岩和凝灰质粉砂岩中,岩体主要由闪长玢岩、花岗闪长岩、石英闪长岩和花岗斑岩组成,花岗闪长岩与石英闪长岩呈渐变关系.该岩体呈现典型的全岩矿化特征,外接触带仅见有少量矿化.

测区出露岩石都为石炭统包古图组.从西准噶尔包古图地区实测物性表中可以看出:测区岩石磁化率较大,最小磁化率是硅质岩的27,最大磁化率是闪长玢岩的1298;测区岩石的极化率都偏低,主要分布在0.8%~2.5%范围内,但所测岩石像硅质砂岩、泥质粉砂岩、凝灰质粉砂岩也有极化率值在6.0%~9.0%之间;测区岩石的电阻率值跨度非常大,最小电阻率值是凝灰质粉砂岩的2930  $\Omega \cdot m$ ,最大电阻率值是闪长斑岩的206429  $\Omega \cdot m$ .总之,测区岩石的磁化率和极化率都呈现出一定的矿化特征,岩石电阻率从低阻的凝灰质粉砂岩到高阻的闪长斑岩,体现矿化岩体和围岩之间的过渡特征.

从前人对V号岩体的研究表明,该地区斑岩铜矿具有电阻率低、极化率高等特征.借鉴V号岩体的找矿经验,为本次目标地质体的探测提供了可靠依据.

## 2 AMT 数据采集及处理

音频大地电磁测深(AMT)工作方法与常规大地电磁测深(MT)相同,都是利用天然交变电磁场

表 1 西准噶尔包古图地区实测物性

Table 1 The measured property table of Baogutu area in Western Junggar

岩性	标本块数	磁化率		电阻率( $\Omega \cdot m$ )		极化率(%)	
		常见值	变化范围	常见值	变化范围	常见值	变化范围
硅质岩	21	27	2.9~484.3	2 983	1 236.6~214 482.0	0.78	0.45~2.30
花岗斑岩	6	87.7	82.4~91.4	5 162	4 374.6~8 631.2	1.00	0.90~1.10
泥质砂岩	19	193	59.2~325.2	3 862	819.7~72 097.7	1.60	0.70~8.10
凝灰质泥质砂岩	39	157	102.4~370.5	2 585	326.0~253 070.0	0.97	0.40~7.10
凝灰质砂岩	174	125.6	19.0~918.4	2 930	739.0~801 593.0	1.10	0.48~9.30
闪长玢岩	4	1 298	1 289.0~1 364.0	206 429	166 386.0~283 725.0	2.50	2.30~3.40

注:测试单位:中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院实验中心;测试日期:2013年1月17日;测试者:李永涛.

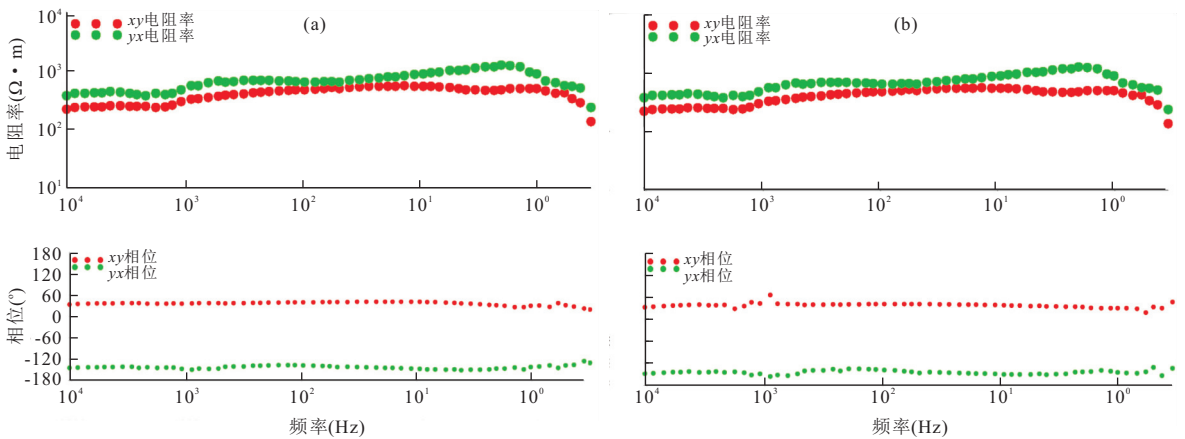


图 2 SN07-05 测点(a)和 SN08-06 测点(b)原始数据

Fig.2 The original data of SN07-05 point(a) and SN08-06 point(b)

辑,利用 Robust 变换与远参考技术相结合,获取每个测点的阻抗估计值,以及视电阻率、相位、电性主轴等信息.同时采用手工筛选的方法,依据特定的加权方法选取合理的子功率谱,提高数据处理质量(图 2).

### 3 反演结果及地质解释

OCCAM 反演方法是由 Constable 等人于 1987 年提出,是一种正则化的反演方法.在寻求模拟数据与原始测量数据达到最大拟合的同时,亦要求模型达到最平滑或最圆滑,具有受初始模型影响较小,能够达到稳定收敛的特征,由此而得到普遍应用(吴小平和徐果明,1998;何梅兴等,2011).本次使用的二维反演方法也是 OCCAM 反演方法,并且从图 4 的反演结果来看,与打钻结果吻合较好(图中粉色区域是打钻控制岩体范围),取得了良好的反演效果.

以往音频大地电磁的成果解释大都采用剖面图件,即深度—测点图件.虽然采用剖面图件也可以准确的定位异常区域及深度范围,但在横向上剖面与剖面之间的联系就很难给出整体的答复.基于此次勘探区域是一面积区域,我们也可以采用单个剖面来一一解释,也可以做成剖面切片图来解释(封崇德和赵虎,2011;秦善强等,2011;谭红艳等,2011;张昆等,2011)(图 5).

这样从 S-N 剖面切片图可以大致反映出两个目标地质体之间的联系:地质体呈近南北向延展,在东西向上也有一定的相连,但是在横向电阻率的过渡关系上还不太明了.为了解决这一问题,本文采用由 Golden Software 公司推出的 Voxler 三维成图软

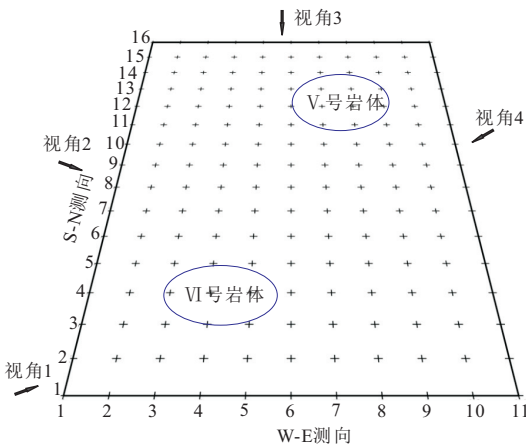


图 3 观测点布置及研究区域

Fig.3 Observation layout and the study area

注:视角 1:从测区的西南角沿 NE 向;视角 2:从测区西侧沿 WE 向;视角 3:从测区北侧沿 SN 向;视角 4:从测区的东侧沿 EW 向

研究地球电性结构的一种地球物理勘探方法(陈乐寿和王光镠,1990;张胜业和潘玉玲,2004).它具有工作效率高、探测深度较大、分辨率高、受地形影响相对较小、抗干扰性能较强、成本较低廉等特点.在 8 km 深度范围内,能查明电阻率差异较大的高、低阻不均匀体,已成功运用在地矿、煤炭、石油、水利、水电系统的找矿、找水等具体工程中,同时在地质构造研究中也发挥着重要的作用,并且都已经取得可观的成果.

为了能够充分地对比图 3 中两个蓝色存在明显露头区域下的地质结构关系进行勘探,共采集了 176 个面积性 AMT 测深点.

在数据处理中采用加拿大凤凰公司提供的配套软件对音频大地电磁测深法采集的原始数据进行编

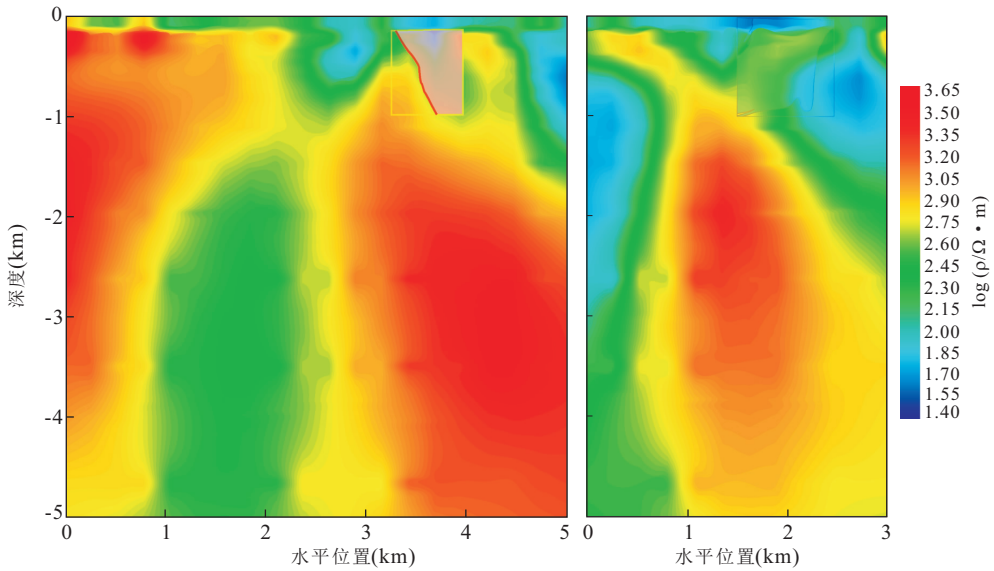


图 4 SN07(a)和 WE13(b)测线打钻匹配

Fig.4 SN07(a) and WE13(b) line drill matching graph

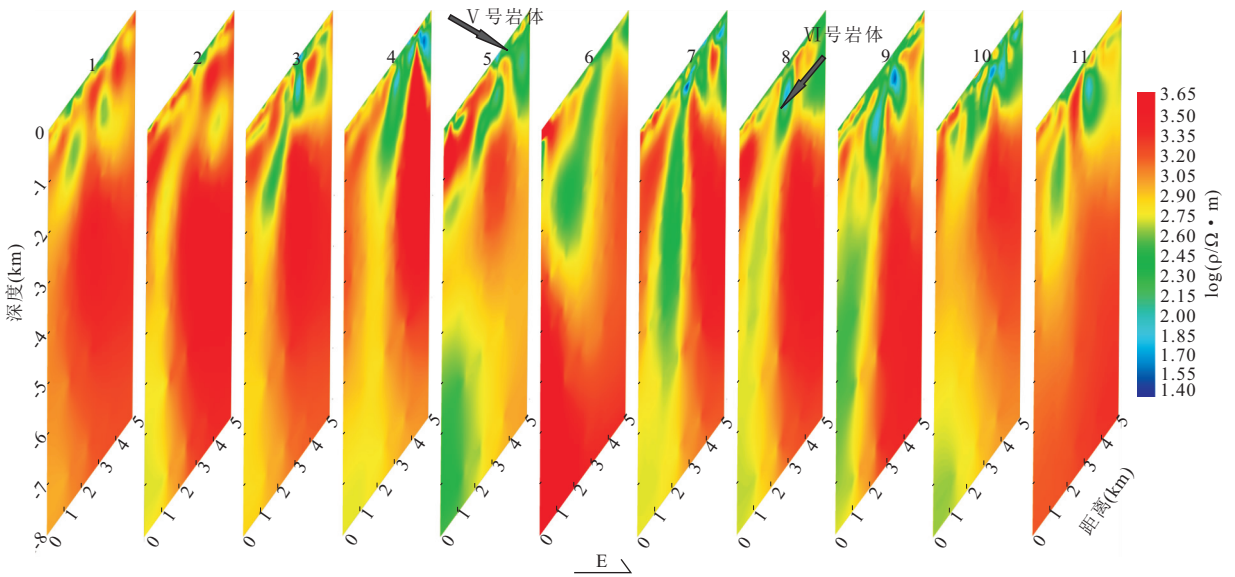


图 5 测区 SN 向剖面切片

Fig.5 Section slices to area SN

件成图来进行解释(陈军等,2009;郭高轩,2011;李明星等,2011;张景华等,2011;王显祥等,2012)。

图 6 为 AMT 资料反演结果的三维电性结构各个方向切片图,从中可以看出目标地质体在测区北部地下 3 km 内有比较规模的延展及分布,并从测区中部沿 45°倾角向测区南部延伸,在延伸至深部 2.5 km 左右后垂直向下延伸至 8 km(岩体形成通道,深部应该还有延伸)。

图 7 为推断目标岩体关系的三维电性结构图,其中黄绿色代表推断的岩体,为了能更清楚地显示

推断岩体,在其表面添加一层蓝色。

从视角 1 看,V 号岩体和 VI 号岩体两个目标地质体是由测区南部沿一通道相连并延伸到地表,而且 V 号岩体比 VI 号岩体在地表出露规模大;从视角 2 看,该通道由下延伸到 2.5 km 处,沿 45°倾角往测区北部延伸,同时看到 VI 号岩体往下延伸只有 400 米左右,而 V 号岩体往下延伸达到 2 km 左右;从视角 3 看,V 号岩体整体往下延伸至 2 km 左右,但中间也存在着空洞,即岩体中还夹杂着其它的岩性物质;从视角 4 看,从测区的另一侧观察到两个目标岩

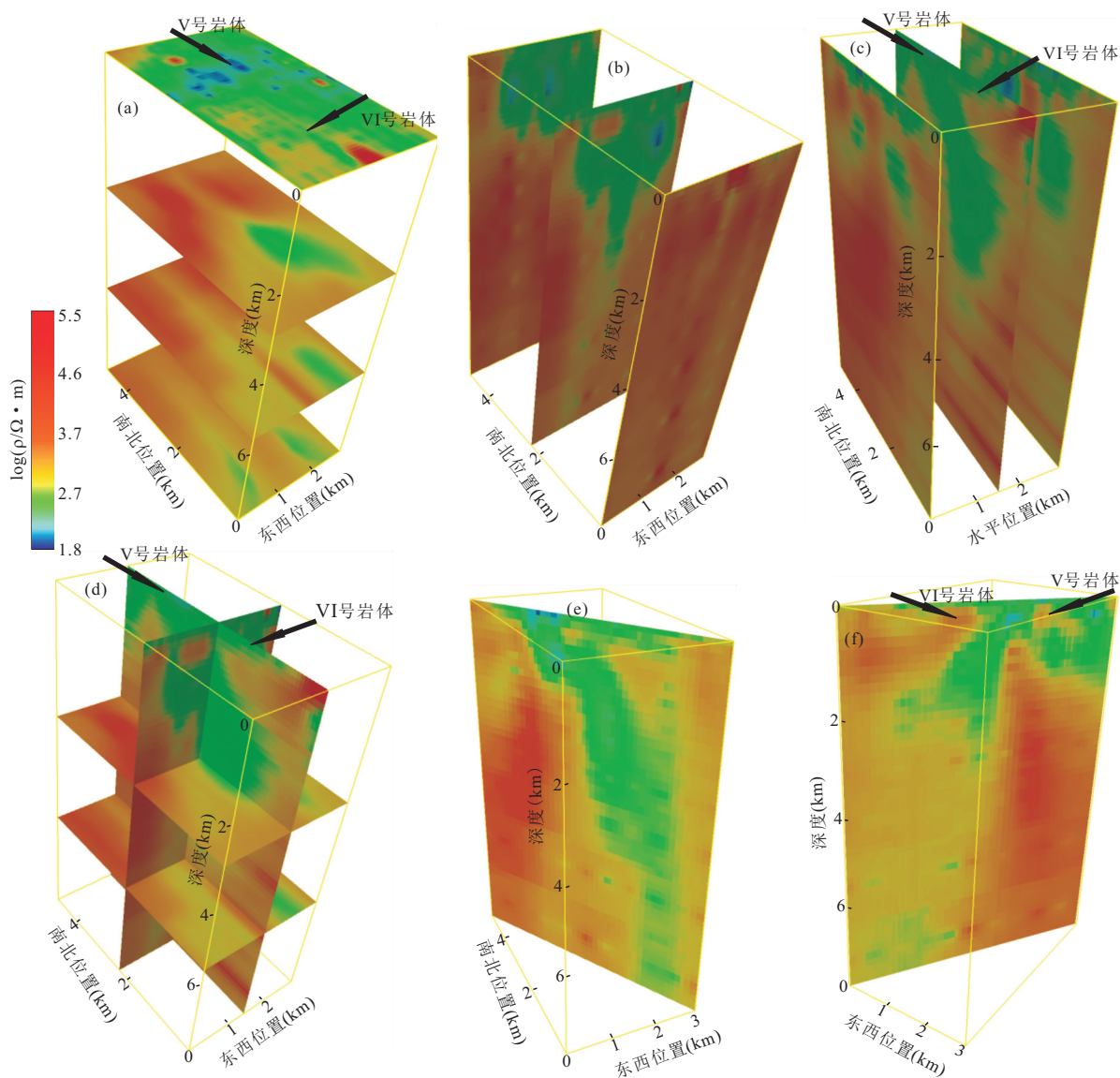


图 6 深度(a)、WE 向(b)、SN 向(c)、三方向(d)、NW 对角(e)和 NE 对角(f)切片

Fig.6 Depth (a), WE (b), SN (c), three direction (d), NW diagonal (e) NE diagonal (f) slices

体之间的关系,并且两个目标地质体中间都存在一定的空洞.D1 在地下 3 km 左右分成两个小的地质体,且这两个小的地质体之间有一小的通道相连,共同构成了向北倾的 D1。

从整个视角来看,两个目标地质体是由测区南部岩体通道向上延伸并在测区北部 V 号岩体下方形成规模聚集,在 VI 号岩体附近也有少量的体现,这与地质上 V 号岩体比 VI 号岩体出露规模较大相对应。V 号岩体和 VI 号岩体共同组成了反向的‘Γ’字状地质体,地质体的岩性大致可分为:低阻体为石炭系的凝灰质砂岩、泥质砂岩(剖面切片图中蓝色、绿色);高阻体主要为闪长玢岩,并夹杂一些花岗斑岩等(剖面切片图中红色、黄色)(图 5)。

宋会侠等(2007)、刘玉琳等(2009)先后对包古图斑岩铜矿床岩石年龄进行了研究,得出岩体形成时间不晚于成矿时间,即石炭系希贝库拉斯组、包古图组、泰勒古拉组等地层的形成是在包古图岩体形成之前。由此可得出结论,在由石炭系希贝库拉斯组、包古图组、泰勒古拉组等地层组成的背斜形成后;由于岩浆运动上侵在与斑岩体对流时冷却产生热机械能,从而导致破裂裂隙在岩体、围岩之中产生裂隙构造组合,热液通过这些通道而形成包古图岩体。

## 4 结论

(1) 本文采用音频大地电磁测深法,将每条剖面

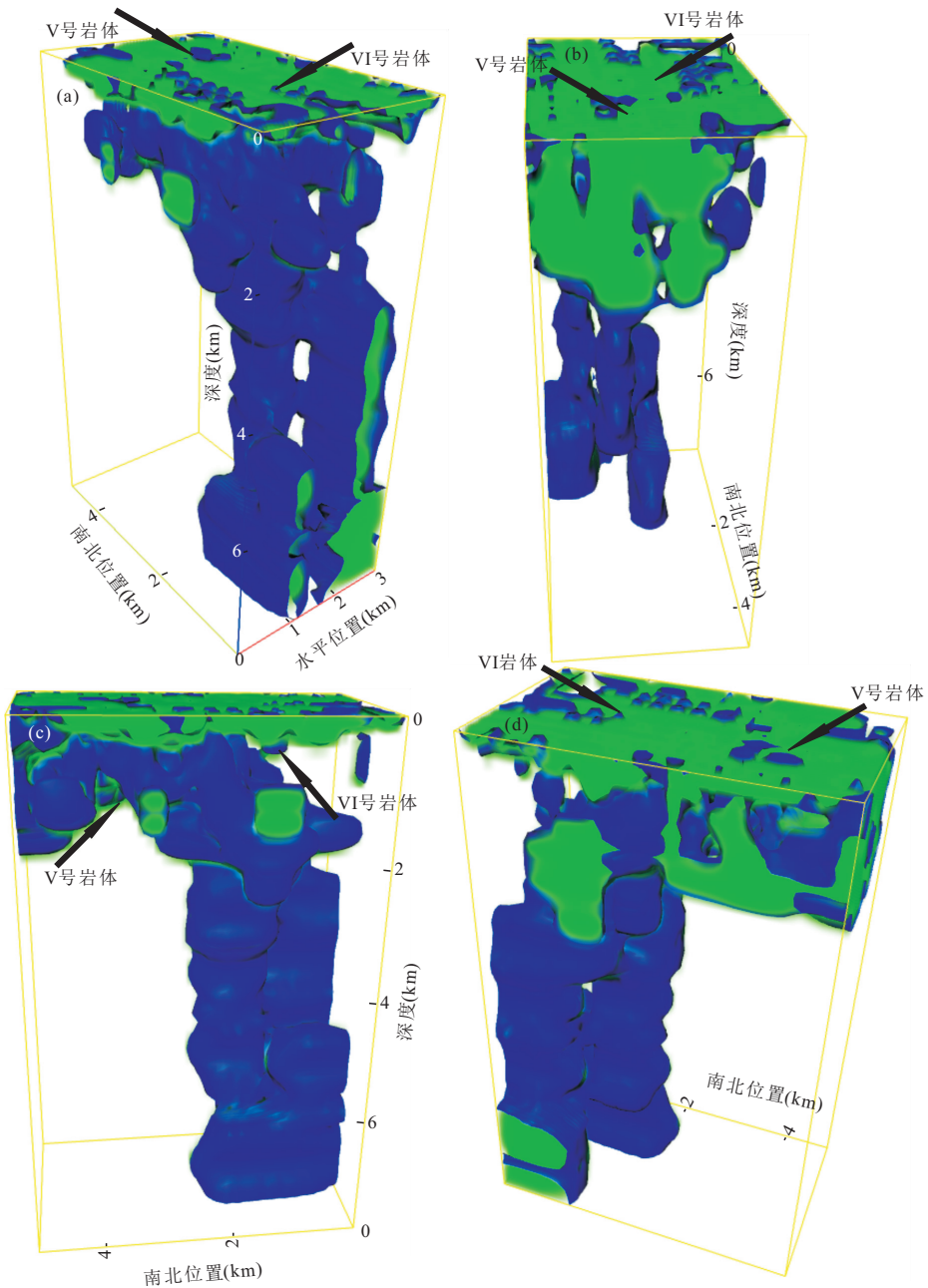


图 7 推测地下岩体的电性结构(视角 1~4)(a~d)

Fig.7 The electrical structure of underground rock mass speculation

的二维 OCCAM 反演得到的电性结构结果以三维形式成图,从多角度展示了该地区地下电性特征及目标地质体的内在联系,揭示了目标地质体深部结构关系及形成机制,也为下一步对该地区铜矿的开发提供了基础的电性资料;(2)从三维显示图中,可以清楚看出 V 号岩体和 VI 号岩体在测区中南部由一通道相连,总体上共同构成一个反向的‘T’字状地质体;(3)三维可视化的应用,更方便地从不同角度、连续的显示电阻率的分布情况,这样更加符合电阻率三维展布的特点,所以,三维反演方法的研究也应

成为电磁法的重要方向。

## References

- Chen, J., Ge, Y. F., Yan, H. J., 2009. Realization of Displaying 3D Visualization for Complicated Strata. *Progress in Geophysics*, 24(1): 321-325 (in Chinese with English abstract).
- Chen, L. S., Wang, G. E., 1990. Magnetotelluric Sounding Method. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Cheng, Y., Zhang, R., 2006. Mineralization Regularity of Cu-

- Au Deposits in the Baogutu Area, Western Junggar, Xinjiang. *Geology and Prospecting*, 42(4): 11—15 (in Chinese with English abstract).
- Feng, C. D., Zhao, H., 2011. Application of the High-Frequency Magnetotelluric Sounding Method in Survey of Micangshan Extra-long Tunnels. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 30(4): 49—53 (in Chinese with English abstract).
- Guo, G. X., 2011. Voxler-Aided 3D-Interpretation of Electric Sounding Data in Pinggu Basin. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 33(3): 318—322 (in Chinese with English abstract).
- He, M. X., Hu, X. Y., Ye, Y. X., et al., 2011. 2.5D Controlled Source Audio-Frequency Magnetotellurics OCCAM Inversion. *Progress in Geophys.*, 26(6): 2163—2170 (in Chinese with English abstract).
- Lai, Y. R., Luo, B., Liu, X. G., et al., 2009. Integrated Geophysical Method to the Evaluation of Porphyry Copper-Gold Deposit and the Direction of Looking for Deposit in Baogutu Area in Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 27(3): 245—250 (in Chinese with English abstract).
- Li, M. X., Cheng, J. L., Wang, Y. H., et al., 2011. Mine Transient Electromagnetic Method in Advanced Detection Abnormal Geological 3D Visualization. *Safety in Coal Mine*, 42(11): 61—64 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. L., Guo, L. S., Song, H. X., et al., 2009. Geochronology of Baogutu Porphyry Copper Deposit in Western Junggar Area, Xinjiang of China. *Sci. D.: Earth Sci.*, 39(10): 1466—1472 (in Chinese with English abstract).
- Qin, S. Q., Hu, Y. P., Zhao, X. P., 2011. Application of AMT Method in the Exploration and Mining of Metal Mine. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 8(8): 39—41 (in Chinese with English abstract).
- Shen, P., Shen, Y. C., Liu, T. B., et al., 2009. Geochemical Signature of Porphyries in the Baogutu Porphyry Copper Belt, Western Junggar, NW China. *Gondwana Research*, 16: 227—242. doi:10.1016/j.gr.2009.04.004
- Shen, P., Shen, Y. C., Liu, T. B., et al., 2009. Host-Rocks and Alteration Characters of the Baogutu Porphyry Copper-Molybdenum in Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 777—792 (in Chinese with English abstract).
- Song, H. X., Liu, Y. L., Qu, W. J., et al., 2007. Geological Characters of Baogutu Porphyry Copper Deposit in Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1981—1988 (in Chinese with English abstract).
- Tan, H. Y., Lü, J. C., Liu, G. X., et al., 2011. Application of the Audio-Frequency Magnetotelluric Method to Search for Concealed Ore Bodies in Southeastern Hubei Province. *Geology and Exploration*, 47(6): 1133—1141 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. X., Wang, G. J., Yan, Y. L., et al., 2012. The Application of 3D Visualization in CSAMT Exploration. *Progress in Geophysics*, 27(1): 296—303 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. H., 2012. Study of Late Paleozoic Mineralizing Tectonic System in West Junggar Area (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 1—2 (in Chinese with English abstract).
- 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, F. Q., Yan, S. H., Liu, G. R., et al., 2010. Geological Characteristics and Metallogenesis of Porphyry Copper Deposits in Junggar, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 29(6): 956—971 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. H., Shao, J. L., Cui, Y. L., et al., 2011. Applications of Three-Dimensional Drawing Software Voxler in the Data Processing of Water Quality Analysis. *Water Science and Engineering Technology*, 3: 32—34 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K., Lü, Q. T., Wei, W. B., et al., 2011. Metallogenic Regularity of Audio-Magnetotelluric Method in the Study of Metallogenic Regularity. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 32(6): 156—161 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R., Zhang, Y. X., Tong, G. S., et al., 2006. Major Breakthrough in Copper Exploration in the Baogutu Porphyry Copper Deposit, Western Junggar, Xinjiang, and Its Significance. *Geology in China*, 33(6): 1354—1360 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. Y., Pan, Y. L., 2004. The Principle of Applying Geophysics of the Earth. China University of Geosciences Press, Wuhan, 268—296 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 陈军, 葛英芳, 闫洪军, 2009. 复杂地层三维可视化显示的实现. *地球物理学进展*, 24(1): 321—325.
- 陈乐寿, 王光镔, 1990. 大地电磁测深法. 北京: 地质出版社.
- 成勇, 张锐, 2006. 新疆西准包古图地区铜金矿成矿规律浅析. *地质与勘探*, 42(4): 11—15.
- 封崇德, 赵虎, 2011. 高频大地电磁测深在米仓山特长隧道勘察中的应用研究. *兰州交通大学学报*, 30(4): 49—53.
- 郭高轩, 2011. 基于 Voxler 辅助条件下的平谷电测深数据三

- 维解译.物探化探计算技术,33(3):318—322.
- 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.
- 赖月荣,罗斌,刘雪刚,等,2009.新疆包古图斑岩铜金矿综合物探方法评价与找矿方向.新疆地质,27(3):245—250.
- 李明星,程久龙,王玉和,等,2011.矿井瞬变电磁超前探测地质异常三维可视化.煤矿安全,42(11):61—64.
- 刘玉琳,郭丽爽,宋会侠,等,2009.新疆西准噶尔包古图斑岩铜矿年代学研究.中国科学(D辑:地球科学),39(10):1466—1472.
- 秦善强,胡玉平,赵学平,2011.AMT 法在矿区金属矿勘查中的应用.长江大学学报(自然科学版),08(8):39—41.
- 申萍,沈远超,刘铁兵,等,2009.西准噶尔与环巴尔喀什斑岩型铜矿床成矿条件及成矿模式对比研究.岩石学报,25(4):777—792.
- 宋会侠,刘玉琳,屈文俊,等,2007.新疆包古图斑岩铜矿矿床地质特征.岩石学报,23(8):1981—1988.
- 谭红艳,吕骏超,刘桂香,等,2011.EH4 音频大地电磁测深方法在鄂东南地区寻找隐伏矿体的应用.地质与勘探,47(6):1133—1141.
- 王显祥,王光杰,闫永利,等,2012.三维可视化在 CSAMT 勘探中的应用.地球物理学进展,27(1):296—303.
- 王志宏,2012.西准噶尔晚古生代成矿构造体系研究(硕士学位论文).北京:中国地质科学院,1—2.
- 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.
- 杨富全,闫升好,刘国仁,等,2010.新疆准噶尔斑岩铜矿地质特征及成矿作用.矿床地质,29(6):956—971.
- 张景华,邵景力,崔亚莉,等,2011.三维绘图软件 Voxler 在水质分析数据处理中的应用.水科学与工程,3:32—34.
- 张昆,吕庆田,魏文博,等,2011.音频大地电磁测深在成矿规律研究中的应用.地震地磁观测与研究,32(6):156—161.
- 张锐,张云孝,佟更生,等,2006.新疆西准包古图地区斑岩铜矿找矿的重大突破及意义.中国地质,33(6):1354—1360.
- 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.