

# 云南腾冲火山构造区的电性 结构特征及其地质意义

谭捍东<sup>1</sup> 姜 枚<sup>2,3</sup> 林昌洪<sup>1</sup> 彭 淼<sup>2</sup>  
吴良士<sup>3</sup> 马 欢<sup>1</sup> 王忠凯<sup>1</sup> 李晋津<sup>1</sup> 谭嘉言<sup>1</sup>

(1.中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院,北京 100083;2.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;3.中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037)

**摘要:**为配合科学钻探选址,在云南腾冲县城以北至固东镇之间沿东西向布设了 4 条可控源音频大地电磁测深剖面  
和 2 条大地电磁测深剖面,对 6 条剖面的电磁测深资料进行了预处理和二维反演,获得了 6 条剖面的电阻率模型。这  
些剖面具有的主要电性结构特征为:盆地地壳内存在 2 套低阻,其中浅部的低阻层沿南北向稳定存在,由含水(热水)  
的火山岩下部、花岗岩上部与花岗砂砾岩组成,构成了腾冲盆地的地热资源的热储层,其主要层位在 300~1500 m 范  
围内;深部的低阻体是作为热源的岩浆囊,位于马站一曲石乡之间的部分深 12~30 km,东西宽 25 km 以上。以上电性  
特征为研究云南腾冲火山构造区岩浆和火山活动提供了地球物理依据。

**关键词:**云南腾冲;电磁法;火山构造;电性结构;热储层;岩浆囊

**中图分类号:**P631.3\*25 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2013)03-0800-07

腾冲火山群位于云南怒江以西,是中国著名的  
年轻火山岩群之一,也是喜马拉雅地热带内最著名  
的火山地热区。该区处于中国南部陆缘区波密—腾  
冲褶皱带。属于班公湖—怒江对接带南段范围内,在  
晚古生代和中、新生代曾经历了复杂的构造变动。腾  
冲火山群主要分布在腾冲—梁河断陷的北部,以腾  
冲盆地为中心展布,以玄武岩为主的火山岩出露范  
围南北长约 100 km、东西宽约 90 km。

云南腾冲火山构造区长期以来吸引着国内外各  
方面专家的关注,并在本区进行过大量地质地球物  
理等研究工作<sup>[1-12]</sup>。但是工作主要是在滇西或穿越腾  
冲火山—地热构造区的较大范围里进行区域性工  
作。20 世纪 80 年代中期曾在滇西进行了大地电磁  
探测,其中的石坪测点临近本次工区马站乡附近,给  
出了上地壳电性层的电阻率为 6~10  $\Omega \cdot m$ ,厚度 5  
km,埋深 9~10 km,推论为岩浆囊<sup>[13-15]</sup>。

为配合腾冲火山地热构造区科学钻探的选址工  
作,笔者于 2010 年和 2011 年先后在云南腾冲火山地  
热构造区进行了大比例尺的可控源音频大地电磁法、  
大地电磁法剖面探测。电磁剖面位置见图 1,图中 1  
线、2 线、3 线和 4 线为可控源音频大地电磁剖面,用  
于了解 3 km 以浅腾冲县城北至固东镇间电性结构沿  
南北向的变化;5 线和 9 线为大地电磁剖面,用于了  
解马站乡附近地壳电性结构沿东西向的变化。

## 1 可控源音频大地电磁测深工作及其 揭示的电性结构特征

可控源音频大地电磁法(CSAMT)是一种人工场  
源频率测深法,具有工作效率高、探测深度大、抗干  
扰能力强、空间分辨率高、高层屏蔽作用小等特点。

### 1.1 可控源音频大地电磁测深法资料采集

本次工作沿近东西向布设可控源音频大地电磁

收稿日期:2013-01-27;改回日期:2013-04-02

基金项目:国家深部探测技术与实验研究专项大陆科学钻探选址与钻探实验(SinoProbe-05-07)资助。

作者简介:谭捍东,男,1966 年生,教授,博士生导师,主要从事电磁法的研究与教学工作;E-mail:thd@cugb.edu.cn。

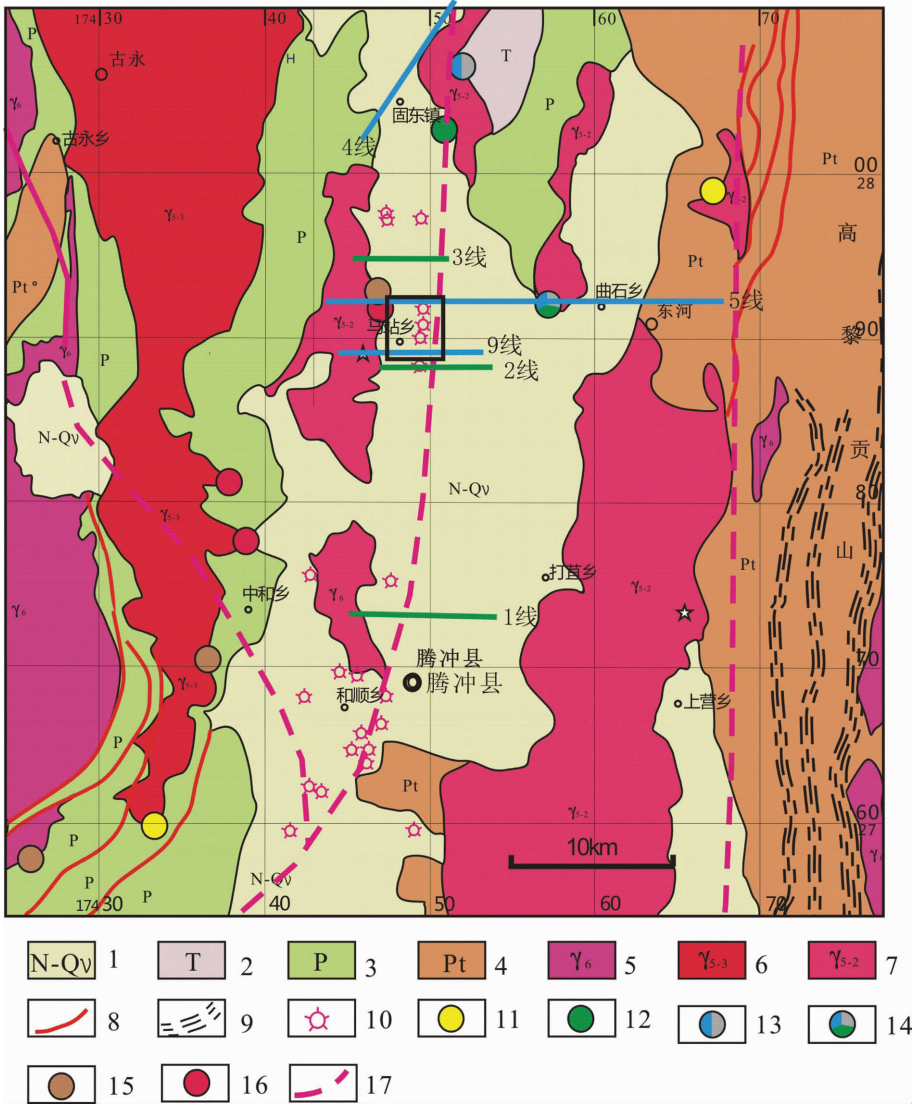


图 1 云南腾冲火山构造区地质及电磁剖面位置图(背景地质图来自戚学祥,2011)  
 1—中新世-第四纪火山沉积岩;2—三叠系;3—二叠系;4—元古宙变质岩;5—喜马拉雅花岗岩;6—白垩纪花岗岩;  
 7—侏罗纪花岗岩;8—断层带;9—韧性剪切带;10—火山口;11—金矿床;12—铜矿床;13—铅锌矿床;14—铜铅锌矿  
 床;15—锡矿床;16—铁矿床;17—推测断层

Fig.1 Location of geological and electromagnetic profile along Tengchong volcano-tectonic zone  
 (base map after Qi Xuexiang, 2011)

- 1—Miocene -Quaternary volcanic sedimentary rock;2—Triassic sedimentary rock;3—Permian sedimentary rock;
- 4—Proterozoic metamorphic rock;5— Himalayan granitic porphyry;6—Late Cretaceous granite;7—Jurassic granites;
- 8—Fault zone;9—Ductile shear zone; 10—Crater; 11—Gold deposit;12—Copper deposit;13— Lead-zinc deposit;
- 14—Copper-lead-zinc deposit;15—Tin deposit; 16—Iron deposit;17—inferred fault

测线 4 条,剖面总长度 30 km,测深点点距为 40 m,物理点 750 个。

野外数据采集使用美国 Zonge 公司生产的 GDP-32II 多功能电法仪,采用赤道偶极装置进行标量测量,也就是使用发送机通过接地电极 A、B 向地下供不同频率交变电流,在距离 AB 足够远的地方测量沿测线方向的水平电场分量和垂直测线方向的磁场分量。供电偶极距取为 1 km,收发距大于 6 km,观

测电磁信号的频段范围为 8192 Hz~0.125 Hz。

### 1.2 CSAMT 数据处理和反演

由于测线跨越村庄、河流和公路,观测数据受到了不同程度的电磁干扰,因此室内对 CSAMT 野外原始测量数据进行了必要的编辑处理。

在数据预处理的基础上,采用可控源音频大地电磁法带地形二维反演方法,对每条测线的视电阻率和阻抗相位数据进行了二维反演,经过反复修改

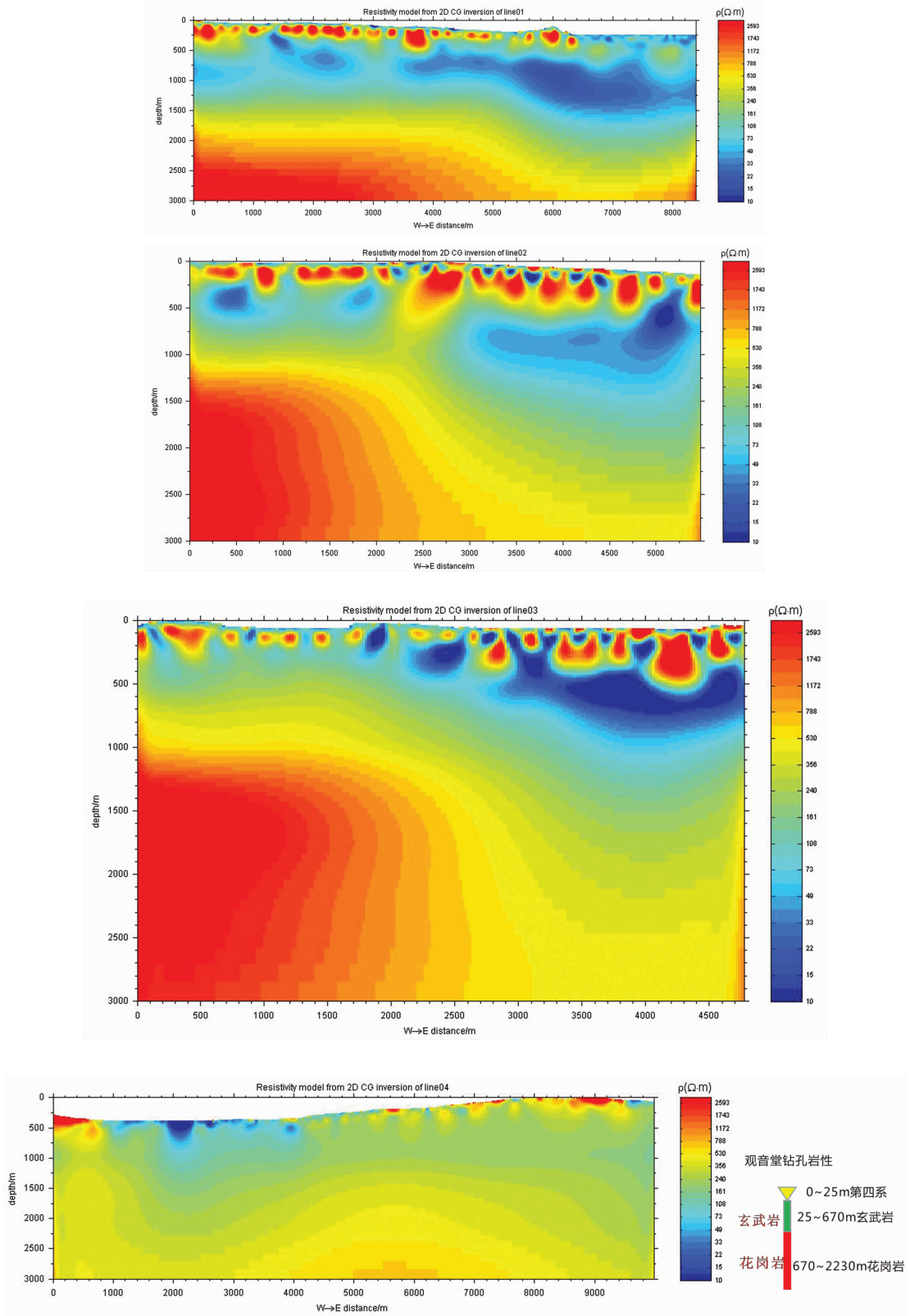


图 2 4 条 CSAMT 剖面二维反演获得的电阻率模型  
 Fig.2 Resistivity models from two-dimensional inversion of 4 CSAMT profiles

反演控制参数和初始模型,达到了数据的最佳拟合,获得了4条测线的电阻率模型(图2)。

### 1.3 浅部(3 km 以内)电性结构特征

可控源音频大地电磁测深4条剖面揭示的浅部电性特征(图2)为:

总体上,1线、2线和3线电性特征比较类似,各测线电性均反映出大致相似分布特征,纵向上电阻率呈“高-低-高”变化的电性分布规律,层状信息明显。

浅部由单个高阻体组成不连续的高阻层为火山喷出岩的反映,其中包括火山锥体与火山熔岩等,该层在盆地范围内厚度不大。3条测线浅部规模较大的高阻体与地表出露的火山口有很好的对应关系,沿南北向可连续追踪,对比性强,是南北向分布火山群的反映(图2)。

中间的低阻电性层是含水层,依据1线南边附近观音堂钻孔资料(图2)可知此含水层低阻体上部为玄武岩等,下部是花岗岩体。考虑到腾冲地区地热普遍发育,剖面右端的大规模低阻体也可能是热水的反映,为地热资源有利部位。与1、2线相比,3线第二电性层低阻体规模变小了,且主要集中在东部。

深部的高阻层为花岗岩的反映,在剖面的中部可能有一大规模断裂。与1、2线相比,3线深部花岗岩埋深变浅了。由于可控源音频大地电磁法勘探深度有限,花岗岩的纵向延伸情况没法控制。

北部的4线其电性特征与1、2、3线有较大差异,低电阻率特征的电性层已不明显。此处已近火山盆地的北端,可能意味着与热源有关的热储层已趋向尖灭。

3 km 以上可控源音频大地电磁法的电性分层较清晰,电阻率的特征从1线到3线有很强的可比性,表明在盆地范围内浅部电性分层是稳定的。

## 2 大地电磁测深工作及其揭示的电性结构特征

大地电磁法是一种天然源的频率域电磁法。它以天然的平面电磁波为场源,通过在地表观测相互正交的电磁场分量来获取地下地电构造信息。由于天然场中含有从高频到低频丰富的频率成分,而不同频率成分的电磁波具有不同的穿透(趋肤)深度,因而大地电磁法能达到测深的目的。

### 2.1 大地电磁法野外数据采集

在可控源音频大地电磁法成果基础上,为了解更深部的电性结构特征,在黑空山和小空山附近沿东西向布置了2条大地电磁测深剖面。5线剖面自西向东,始于花岗岩体进入腾冲盆地,穿越黑空山在盆地向东经过中新世—第四纪火山沉积岩和燕山期花岗岩分布区,越过怒江继续向东进入高黎贡山西缘的元古宙变质岩地层中,长约26 km。9线位于5线之南,西端亦起始于花岗岩体中,穿越小空山火山口,向东进入火山岩沉积层,长度6 km。2条测线的大地电磁测深点基本点距为500 m,重点构造和关键地段作加密观测。

野外数据采集采用加拿大凤凰公司生产的大地电磁系统V5-2000,其工作频率范围在250 Hz~0.0005 Hz。为确保数据质量,每个测点的记录时间不少于20 h。

### 2.2 大地电磁法资料处理与反演

为获取可靠的地电模型,在资料处理和反演中系统应用了现代大地电磁数据处理和反演技术<sup>[6]</sup>。具体体现在:

(1)时间序列资料的处理。对所有测点的时间序列资料进行了筛选,采用了ROBUST估计处理时间序列资料,最大程度地保证了大地电磁响应的质量。

(2)个别频点畸变资料的校正。在采集的大地电磁资料,对于个别频点值的分布不正常,或者几个连续的频点不正常的情况,运用RHOPLUS理论对其进行了严格的校正。

(3)二维反演。每条剖面地势起伏较大,在野外数据采集过程中利用差分GPS获得了每个测点的可靠高程值,采用带地形的二维共轭梯度反演方法对每条测线均选取两种极化模式的视电阻率和阻抗相位数据进行了联合反演,获得了2条剖面电阻率模型(图3)。

### 2.3 地壳电性结构特征

对比5线大地电磁结果与相邻2线和3线可控源音频大地电磁结果表明,在3 km以上的特征极为相似。相对可控源音频大地电磁而言,由于缺少高频资料,大地电磁反演结果对浅地表电性反映不明显。电阻率由浅到深总体表现为低阻-高阻-低阻的分层电性特征(图3):

在浅地表1.5 km以上广泛发育低阻层,厚度不

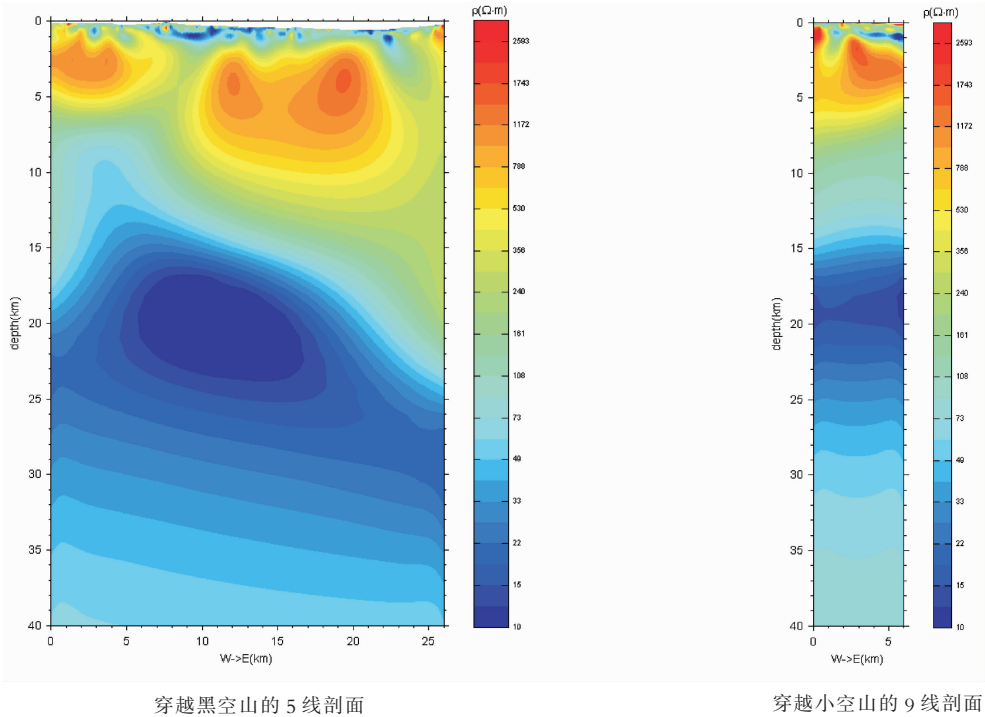


图3 2条MT剖面二维反演获得的电阻率模型  
Fig.3 Resistivity models from two-dimensional inversion of 2 MT profiles

一,电阻率值普遍低于  $50 \Omega \cdot m$ ,尤其是黑空山附近低阻体的电阻率值更低,最低达到  $10 \Omega \cdot m$ 。

中间高阻层的电阻率值普遍高于  $500 \Omega \cdot m$ ,分布较为连续,但在黑空山之下被一产状较陡的中低阻带分割;西侧高阻体的中心埋深在  $3 \text{ km}$  左右,延伸至  $6 \text{ km}$  深处,且部分与地表相连,而东侧高阻体的主体位于横向  $10 \sim 24 \text{ km}$  范围内,与地表的连通性不好,但向下可延伸至  $11 \text{ km}$ 。该高阻层主体由花岗岩组成。

深部低阻区的分布范围大,电阻率值普遍低于  $50 \Omega \cdot m$ ,其中部分地方(埋深  $17 \sim 23 \text{ km}$  处)的电阻率值甚至低至  $10 \Omega \cdot m$ ;该低阻体具有上部窄下部宽的形态特征,似囊状结构,推断为作为火山活动热源的岩浆囊。

如前所述,在腾冲及周边地区的地质、地震和大地电磁探测已提出了岩浆囊存在的可能以及由于高温、含水和一定矿物质而呈现出低电阻率的特征<sup>[17-22]</sup>。可以确定5线的岩浆囊也具有相应的特征,其上顶界最浅处深度为  $12 \sim 13 \text{ km}$ ,平均深度约  $15 \text{ km}$ ,从西向东,深度逐渐加大,下底界的深度自西向东大致为  $27 \text{ km}$ ,东西方向沿整条测线展布,整个厚度大约

为  $15 \text{ km}$ 。

9线深部的低阻体大小与5线有一定差异,9线较短,不能完全反映低阻体沿东西方向的分布范围,但其厚度则减小至  $10 \text{ km}$ ,深度  $15 \text{ km}$ 。这可能意味着该岩浆囊向南,在小空山以南不远处趋向变薄。

### 3 结论

在云南腾冲县城以北至固东镇之间沿东西向布设了4条可控源音频大地电磁测深剖面 and 2条大地电磁测深剖面,对6条剖面的电磁测深资料进行了预处理和二维反演,获得了腾冲县城以北至固东镇之间沿南北向浅部的电性结构特征以及马站乡附近沿东西向地壳电性结构特征。地壳电性分层表明,在近地表为火山机构及火山沉积物高阻体,其下面的低电阻层为地热的储热层,其主要储热层于花岗岩的上部,而火山岩为其盖层。

在马站镇附近深部  $12 \sim 30 \text{ km}$  处存在岩浆囊,该岩浆囊在黑空山附近的上顶界深度为  $12 \sim 13 \text{ km}$ ,下底界深度达  $30 \text{ km}$  以上,东西向宽度达  $25 \text{ km}$  以上。

云南腾冲火山地热构造区大比例尺大地电磁测深工作,为全面了解火山地热构造区壳内电性结构

和深部岩浆囊的分布特征及研究腾冲地区地热资源分布和防震减灾等工作提供了基础资料。目前该项工作还在进行中。

### 参考文献(References):

- [1] Dewey J F, Shackleton R M, Chang C F, et al. The tectonic evolution of the Tibetan plateau. *Philosophical transactions of the Royal Society of London (Series A): Mathematical and physical Sciences*, 1988, 327:379-413.
- [2] Kapp P, DeCelles P G, Gehrels G E, et al. Geological records of the Lhasa-Qiangtang and Indo-Asian collisions in the Nima area of central Tibet[J]. *GSA Bulletin*, 2007, 119:917-932.
- [3] Metcalfe I. Permian tectonic framework and palaeogeography of SE Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 20:551-566.
- [4] Scharer U, Xu R H, Allegre C J. Geochronology of Gangdese (Transhimalaya) plutonism in the Lhasa-Xigaze region, Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, 69:311-320.
- [5] Tapponnier P, Monlar P. Slip-line field theory and large scale continental tectonics[J]. *Nature*, 1976, 264:319-324.
- [6] Tapponnier P, Lacassin R, Leloup R H. The Ailao Shan/Ted River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China [J]. *Nature*, 1990, 343.
- [7] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2000, 28:211-280.
- [8] Al.Nercessian, Al. Hirn, Al. Tarantola. Three-dimensional seismic transmission prospecting of the Mont Dore volcano, France [J]. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 1984:76, 307-315.
- [9] 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福等. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. *地学前缘*, 2003, 10(3):135-148.  
Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, et al. Response of volcanism to the India-Asia collision [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(3): 135-148(in Chinese with English abstract).
- [10] 莫宣学, 潘桂棠. 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的约束[J]. *地学前缘*, 2006,13(6):43-51.  
Mo Xuanxue, Pan Guitang. From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet Plateau: constrained by tectono-magmatic events [J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(6):43-51(in Chinese with English abstract).
- [11] 戚学祥, 王秀华, 朱路华, 等. 滇西印支地块东北缘新远古代侵入岩形成时代的厘定及其构造意义: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及地球化学证据[J]. *岩石学报*, 2010, 26(7):2141-2154.  
Qi Xuexiang, Wang Xiuhua, Zhu Luhua, et al. Validation on age of Neoproterozoic intrusions from northeastern margin of Indochina block, western Yunnan and its tectonic implication: Evidence from zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(7): 2141-2154 (in Chinese with English abstract).
- [12] 李兴振, 刘文均, 王义昭等. 西南三江地区特提斯构造演化与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1999:12-276.

- Li Xingzhen, Liu Wenjun, Wang Yizhao, et al. Tethyan tectonic evolution and mineralization in southwest Sanjiang [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999:12-276(in Chinese).
- [13] 孙洁, 徐常芳, 江钊, 等. 滇西地区地壳上地幔电性结构与地壳构造活动的关系[J]. *地震地质*, 1989, 11(1):35-45.  
Sun Jie, Xu Changfang, Jiang Zhao, et al. The electrical structure of the crust and upper mantle in the west part of Yunnan Province and its relation to crustal tectonics [J]. *Seismology and Geology*, 1989, 11(1):35-45 (in Chinese with English abstract).
- [14] 廖志杰, 沈敏子, 过帼颖. 云南腾冲热海热田的热储特性[J]. *地质学报*, 1991, 65(1):72-85.  
Liao Zhijie, Shen Minzi, Guo Guoying. Characteristics of the geothermal reservoir in the rehal (hot sea) field in Tengchong County. Yunnan Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1991, 65(1): 72-85 (in Chinese with English abstract).
- [15] 白登海, 廖志杰, 赵国泽, 等. 从 MT 探测结果推论腾冲热海热田的岩浆热源[J]. *科学通报*, 1994, (4):344-347.  
Bai Denghai, Liao Zhijie, Zhao Guoze, et al. Inferences from the results of the MT survey the magma heat source of Atami Atsuta in Tengchong [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1994, (4):344-347(in Chinese).
- [16] 谭捍东, 齐伟威, 郎静. 大地电磁法中的 RHOPUS 理论及其应用研究[J]. *物探与化探*, 2004, 28(6):532-535.  
Tan Handong, Qi Weiwei, Lang Jing. The RHOPUS theory in magnetotelluric method and its application [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2004, 28 (6):532-535 (in Chinese with English abstract).
- [17] 穆治国, 佟伟. 腾冲火山活动的时代和岩浆来源问题[J]. *地球物理学报*, 1987, 30(3):261-270.  
Mu Zhiguo, Tong Wei. Times of volcanic activity and origin of magma in Tengchong geothermal area, west Yunnan Province [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1987, 30 (3):261-270 (in Chinese with English abstract).
- [18] 吴乾蕃, 祖金华, 谢毅真, 王都. 云南地区地热基本特征[J]. *地震地质*, 1988, 10(4):177-183.  
Wu Qianfan, Zu Jinhua, Xie Yizhen, Wang Du. Characteristics of geothermal field in Yunnan region [J]. *Seismology and Geology*, 1988, 10(4):177-183(in Chinese with English abstract).
- [19] 林中洋, 胡鸿翔, 张文玢, 等. 滇西地区地壳上地幔速度结构特征的研究[J]. *地震学报*, 1993, 15(4):32-45.  
Lin Zhongxiang, Hu Hongxiang, Zhang Wenfen, et al. Study on characteristics of velocity structure of crust and upper mantle in western Yunnan region, China [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1993, 15(4):32-45 (in Chinese with English abstract).
- [20] 王椿镛, 楼海, 吴建平, 等. 腾冲火山热区地壳结构的地震学研究[J]. *地震学报*, 2002, 24(3):231-242.  
Wang Chunyong, Lou Hai, Wu Jianping, et al. Seismological study on the crustal structure of Tengchong volcano-geothermal area [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2002, 24 (3):231-242 (in Chinese with English abstract).

[21] 王椿镛, W.D.Mooney, 王溪莉, 等. 川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究[J]. 地震学报, 2002, 24(1):1-16.  
Wang Chunyong, Mooney W D, Wang Xili, et al. Study on 3-D velocity structure of crust and upper mantle in Sichuan-Yunnan region, China [J]. Acta Seismologica Sinica, 2002, 24(1):1-16 (in Chinese with English abstract).

[22] 姜枚, 谭捍东, 张聿文等. 云南腾冲火山构造区马站—固东岩浆囊的地球物理模式[J]. 地球学报, 2012, 33(5):731-739.  
Jiang Mei, Tan Handong, Zhang Yuwen, et al. Geophysical mode of Mazhan-Gudong magma chamber in Tengchong Volcano-tectonic area [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2012, 33(5):731-739(in Chinese with English abstract).

## Characteristics of electrical structure of Tengchong volcano-tectonic belt in Yunnan Province

TAN Han-dong<sup>1</sup>, JIANG Mei<sup>2,3</sup>, LIN Chang-hong<sup>1</sup>,

PENG Miao<sup>2</sup>, WU Liang-shi<sup>3</sup>, MA Huan<sup>1</sup>, WANG Zhong-kai<sup>1</sup>, LI Jin-jin<sup>1</sup>, TAN Jia-yan<sup>1</sup>

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

**Abstract:** In order to choose the scientific drilling location, the survey collected Controlled-source Audio frequency Magnetotelluric (CSAMT) data along four E-W orientation profiles and Magnetotelluric (MT) data along two E-W orientation profiles between Tengchong County and Gudong Town in Yunnan Province. The resistivity model for the six profiles were obtained by data preprocessing and 2D inversion. The electrical structure of these profiles is characterized by the existence of two low resistivity layers in the crust of the basin. The shallow layer is stably existent in NS direction with the main part distributed from 300m to 1500m in depth. It consists of the bottom of water-bearing volcanic rocks and the top of granites and granite gravel rocks that form the heat reservoir of the Tengchong basin geothermal resource. The deep layer is a magma pocket serving as heat source, with 12~30 km depth and over 25 km E-W width between Mazhan Town and Qushi Town. The above electrical characteristics provide geophysical basis for the study of magma and volcanic activity in Tengchong volcanic-tectonic belt of Yunnan Province.

**Key words:** Tengchong in Yunnan; electromagnetic method; volcano-tectonic; electrical structure; heat reservoir; magma pocket

---

**About the first author:** TAN Han-dong, male, born in 1966, professor, mainly engages in the theoretical study and application of the electrical method; E-mail: thd@cugb.edu.cn.