

doi: 10.12029/gc20160517

姜枚, 谭捍东, 彭淼, 等. 腾冲火山构造区马站岩浆囊地球物理特征的再探讨[J]. 中国地质, 2016, 43(5): 1688–1696.

Jiang Mei, Tan Handong, Peng Miao, et al. A further discussion on geophysical characteristics of Mazhan magma pocket in Tengchong volcano-tectonic zone[J]. Geology in China, 2016, 43(5): 1688–1696(in Chinese with English abstract).

腾冲火山构造区马站岩浆囊地球物理特征的再探讨

姜 枚^{1,2} 谭捍东³ 彭 淼^{1,3} 钱荣毅³ 张聿文³

李庆庆¹ 张立树¹ 许乐红¹ 郭 帅¹

(1. 中国地质科学院地质研究所, 大陆构造与动力学重点实验室, 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 100037)

摘要: 云南腾冲火山盆地深部存在岩浆囊是人们关注的问题, 多方面进行了大量的研究且存在不同意见。作者此前依据低电阻异常推断出位于小空山、大空山、黑空山等火山口的下部, 深 13~30 km 范围内东西向 25 km, 南北向 30 km 的低电阻率的岩浆囊, 其东侧为大盈江断裂。文章利用反射地震、重力、航空磁测资料进一步探讨了岩浆囊的其他地球物理特征。由于火山喷发, 不仅在火山口附近形成了局部物质亏损, 而且, 岩浆囊本身也亏损了岩浆物质, 在重力上延图中滤去了表层的火山局部负重力异常后, 呈现出大空山北侧的与低阻体相对应的负重力异常, 这与岩浆囊高温熔融状态含水低密度物质有密切关系。整体的重力负异常印证了低阻岩浆囊的存在。腾冲马站岩浆囊的温度为 397~651°C, 平均温度为 524°C, 其主体中心部位不可能存在磁性体。对航磁资料的处理, 消除表层火山岩影响后, 仍然发现有较强磁异常, 其平面投影范围与低阻体相近, 推断磁异常是岩浆囊顶层, 在 15 km 深度以上范围内, 随着岩浆囊体温度逐步下降, 当低于 480°C 以后会形成新的铁磁性矿物, 因此, 在囊体上层出现了范围与囊体相近的较强的磁性体。反射地震仅仅在浅部较清楚地观测到较连续的反射波界面, 是浅部火山岩、含水层、以及花岗岩顶界面的反映。向深部反射界面很不连续推测是由于多次岩浆上涌, 其喷发时间有先后, 成分有差异, 故岩浆囊物质的不均匀性, 虽然由于含水、矿化、熔融体构成了低电阻的共性, 可温度的不均匀, 却又显示了不同期次岩浆成分有变化, 由岩浆囊向地表的通道上, 东部花岗岩下为高速, 相对于较低温度的物质, 在小空山、大空山和黑空山深部沿大盈江断裂带有东西两个大的隐伏花岗岩体之间是最新的火山喷发通道, 具有相对低速的通道。

关键词: 腾冲火山构造; 岩浆囊; 负重力异常; 磁异常; 低阻体; 低波速

中图分类号: P313.1; P631 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)05-1688-09

A further discussion on geophysical characteristics of Mazhan magma pocket in Tengchong volcano-tectonic zone

JIANG Mei^{1,2}, TAN Han-dong³, PENG Miao^{1,3}, QIAN Rong-yi³, ZHANG Yu-wen³,
LI Qing-qing¹, ZHANG Li-shu¹, XU Le-hong¹, GUO Shuai¹

收稿日期: 2016-06-30; 改回日期: 2016-07-15

基金项目: 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项目(SinoProbe-05-07)与中国自然科学基金(41374078)联合资助。

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。

(1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*; 2. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 3. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*)

Abstract: The existence of magma pocket in the depth of Tengchong volcanic basin of Yunnan Province is a topic which has aroused much attention. Extensive studies have been conducted from many aspects but there still exist different opinions. It was previously inferred by the authors based on low-resistivity anomalies that, underneath the craters of Xiaokong Mountain, Dakong Mountain and Heikong Mountain, there is a low-resistivity magma pocket with a depth range of 13 – 30 km and sizes of 25 km (from east to west) by 30 km (from south to north), on the east of which is Dayingjiang Fault. Based on seismic reflection survey, gravity and aeromagnetic survey data, this paper further discusses other geophysical characteristics of the magma pocket. Because of volcanic eruption, not only local material depletion is present near the craters, but the magma pocket itself depletes magma material as well; after the filtering of local negative gravity anomaly of surficial volcano, the gravity upward continuation map shows a negative gravity anomaly corresponding to the low-resistivity body on the north of Dakong Mountain, which is closely related to the depletion of aqueous low-density material from magma pocket in molten state at high temperatures. The entire negative gravity anomaly corroborates the existence of low-resistivity magma pocket. The Tengchong Mazhan magma pocket has temperatures of 397 – 651 °C, with a mean value of 527 °C, so magnetic body is impossibly present at the main central place of the pocket. After processing of the aeromagnetic data to eliminate the influence of surficial volcanic rock, large strong magnetic anomaly was still found, close to low-resistivity body in size, and it is presumed that the magnetic anomaly is at the top of the magma pocket at a depth above 15 km; as magma pocket temperature decreases gradually, new magnetic mineral will be formed below 480 °C; as a result, there appears relatively strong magnetic body at the top of the pocket with a similar range to that of the pocket. Only seismic reflection at shallow depths reveals clearly that the relatively continuous reflected wave interface is a reflection of the interface among shallow volcanic rock, aquifer and granite. The reflected wave velocity map exhibits a number of velocity zones relatively continuous in vertical direction, the reflection interface towards deep formation is very discontinuous, presumably because of multiple times of magma upwelling, variable eruption times and different magma components, so the inhomogeneity of magma pocket material gives a novel geophysical model, indicating that magma pocket components are uneven; although aqueous mineralized melt constitutes a generality of low resistivity, uneven temperature shows variation in components of magma at different periods; in the pathway of magma pocket going towards ground surface, the eastern granite is underlain by high-velocity low-temperature material; and between two large concealed granite plutons in the east and west of the Dayingjiang River fault zone deeply underneath Xiaokong Mountain, Dakong Mountain and Heikong Mountain, is the newest volcanic eruption pathway, which is a low-velocity pathway.

Key words: Tengchong volcano-tectonic zone; magma pocket; negative gravity anomaly; magnetic anomaly low-resistivity body; low wave velocity

About the first author: JIANG Mei, male, born in 1937, senior researcher, long engages in deep and mining geophysical exploration research; E-mail: mjmeij@163.com.

Fund support: Supported by SinoProbe-05-07 and National Natural Science Foundation of China (No. 41374078).

1 引言

云南腾冲地区处于印度板块与欧亚大陆挤压碰撞带的前缘地带,经历了中特提斯洋和新特提斯洋俯冲闭合、地块旋转、走滑逃逸等大规模构造运动及多次多阶段的岩浆活动和成矿作用改造,形成了集大型走滑构造、岩浆活动、地热及大型有色金属成矿作用于一体的构造变形域,这对研究青藏高原物质向东南流动和逃逸力学机制及新生代火山

活动与成矿作用具有重要意义^[1-6]。

该区自20世纪60年代开始逐次完成了1:100万区域地质与矿产调查和1:20万地质填图,以及相应比例尺的重力测量与航空磁力测量。同时,在滇西进行长剖面的大地电磁法和宽频地震的探测,指出了在腾冲火山盆地的中上地壳存在低阻层和低速带的观测结果^[7-12]。本文的目的是针对岩浆囊的特征作进一步探讨。

为配合腾冲火山地热构造区的科学钻探选址

工作,于2010—2011年先后3次在云南腾冲火山岩地区进行了较大比例尺的可控源音频大地电磁法、大地电磁法、重力、磁力以及反射地震的剖面探测^[13]。重点地区是马站以北的小空山—黑空山一带。本文是在以往工作基础上,着重使用反射地震、面积性重力和航磁等方法的资料进一步分析岩浆囊的特征,为科钻选址提供更详细的深部依据。

为配合马站科学钻探的研究,在腾冲火山盆地内进行地球物理探测剖面集中于马站一带。地质研究认为腾冲火山盆地深部自南向北存在着3个岩浆囊,而马站岩浆囊是最北边的一个^[14-16]。依据大地电磁法与可控源音频大地电法的电阻率特征首次给出了马站岩浆囊的形态^[17],其范围位于马站南部小空山火山口向北达固东镇,西侧到达马站西,地表花岗岩体的西边界,向东达曲石乡花岗岩体下部(图1)。地质研究认为位于测区南部的另外两个岩浆囊的规模更大些,但限于科钻选址的需要,本文仅仅讨论马站岩浆囊的特征。

2 马站岩浆囊与航磁异常的关系

关于火山口浅部突变的地面磁异常已经讨论

过,现在讨论与深部磁性体有关的航磁异常。

图2是云南腾冲1:20万航磁异常平面图、航磁化极异常平面图、以及化极上延2000 m和5000 m高度异常平面图。化极采用的磁倾角为38.208°,磁偏角为-0.939°。云南腾冲火山区存在多条近南北向断裂^[18],在重磁平面图中是以南北延伸的梯度带为特征。小空山等火山口的正负伴生的磁异常主要是浅部特征(图2-a),化极后,特别是上延2000 m、5000 m后已消失,呈现出了完整的深部正磁异常(图2-b~d),在上延系列图上强磁异常中心位于黑空山附近,对应沿侵入通道一定深度上的强磁性岩体。黑空山、大空山、小空山近南北向分布,其东侧紧邻航磁 ΔT 的梯度带正是穿越本区的大盈江断裂带^[18]。在地面磁测剖面上仅仅见到突变锯齿状不规则的磁异常,这是由于磁性矿物分布不均,而且受喷发的多期次火山活动影响的结果,图3-a、c中给出了局部地磁异常曲线与局部重力异常都是火山口的浅部特征。

图2-d较大的正磁异常表明深部具有较强的磁性体,但是,不可能是岩浆囊的组成部分,因为,地质研究已确定马站岩浆囊的温度为397~651°C,平

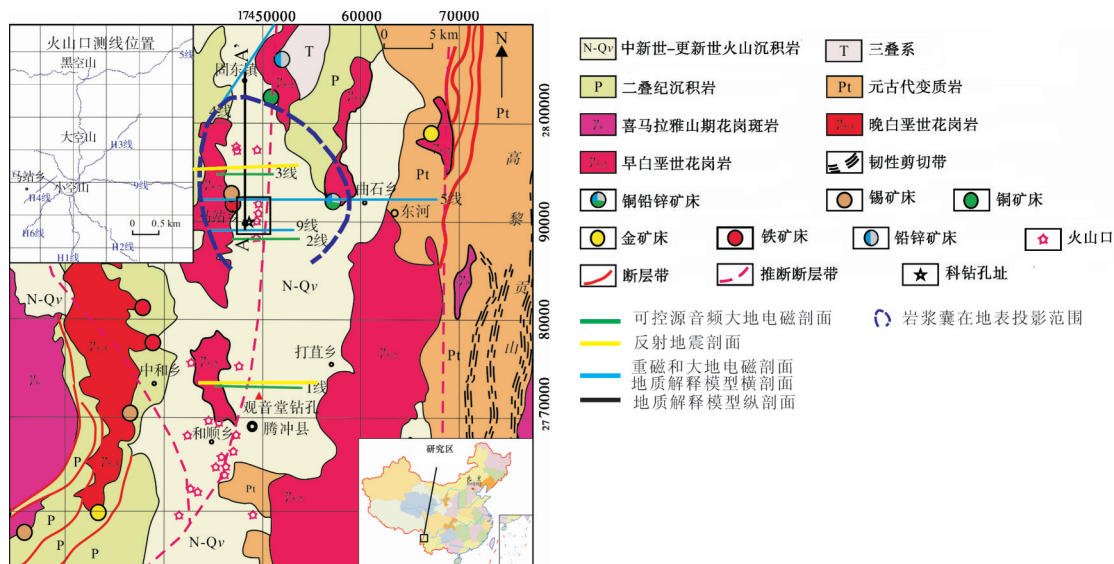


图1 云南腾冲火山构造区地球物理剖面位置图

图中1线、2线、3线(绿色)剖面为可控源音频大地电磁剖面;1线、3线同时为反射地震剖面;5线、9线(蓝色)剖面为重磁、大地电磁剖面,AA'剖面为岩浆囊纵向剖面位置,5线为横向剖面岩浆囊位置;左上方为穿越小空山、大空山、黑空山的重磁剖面位置图;背景地质图来自文献[4]

Fig. 1 Location of geophysics profiles in Tengchong volcano-tectonic zone, Yunnan

where lines 1, 2, and 3 (green) indicate CSAMT profiles; lines 1 and 3 indicate seismic reflection profiles, too; lines 5 and 9 (blue) indicate GM and MT profiles, respectively; profile AA' is the longitudinal profile of magma pocket, and line 5 indicates the transverse profile of magma pocket; the top left inset is the location map of GM profile traversing Xiaokong Mountain, Dakong Mountain, and Heikong Mountain; and the background geological map is after reference [4]

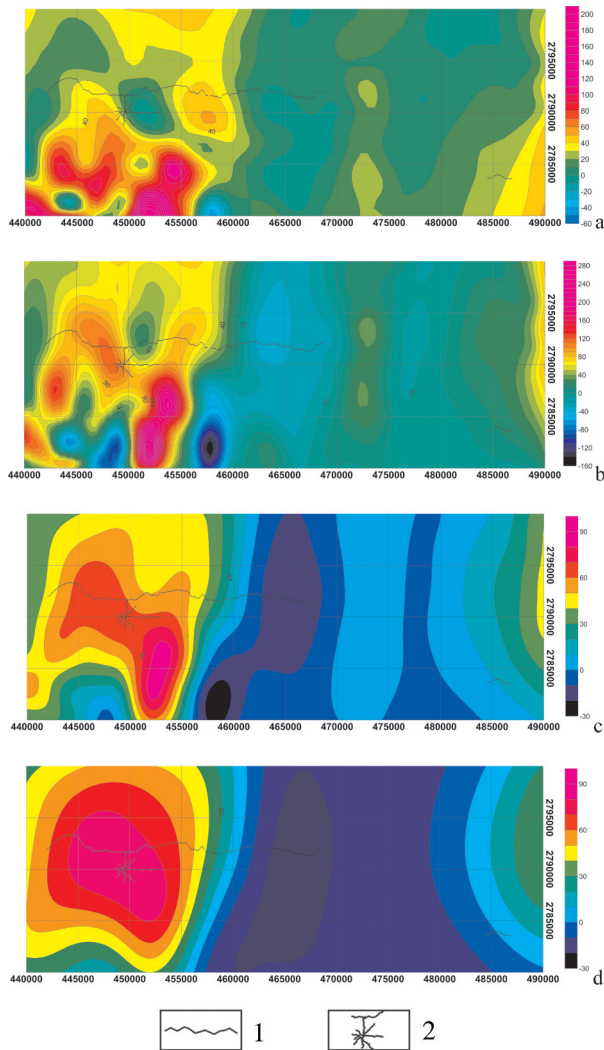


图2 云南腾冲1:20万航磁异常平面图(a), 1:20万航磁化极异常平面图(b), 航磁化极上延2000 m异常平面图(c)和航磁化极上延5000 m异常平面图(d) (等值线距10 nT)

1— ΔT 磁测剖面; 2—小空山火山口磁测剖面

Fig.2 1:200000 aeromagnetic anomaly map (a), 1:200000 RTP aeromagnetic anomaly map (b), RTP and upward continued aeromagnetic anomaly map (to 2000 m) (c), and RTP and upward continued aeromagnetic anomaly map (to 5000 m) (d) (contour interval: 10 nT) of Tengchong, Yunnan
1— ΔT aeromagnetic survey profile; 2— Aeromagnetic survey profile across the crater of Xiaokong Mountain

均温度为 524°C ^[14, 18-19],也就是说岩浆囊的主体大大超过居里温度(480°C),在这种温度下不可能存在磁性物质^[19-21]。航磁反演结果(图3-d)已确认该磁异常源应是位于岩浆囊顶层深2.5~3.5 km处,相当于花岗岩下部的深度。这个深度虽然不属于低电阻

率确定的岩浆囊主体范围,却非常可能是由岩浆囊熔融体上部在冷却过程中岩浆温度低于居里点时生成的与蚀变有关的磁性体,从而形成了航磁异常。在地表已观测到蛇纹石化磁铁矿主要位于岩体边缘部位,在一定程度上表明了这种分布特征。这个磁异常应该表明岩浆囊顶层温度降低、蚀变和磁性物质增加,其地面投影范围与图1虚线所示岩浆囊顶层范围是相近的(图2-d)。

3 岩浆囊的重力特征

从重力异常图上首先看到地面出露的火山口的局部重力布格异常(图3-a),在减去区域场的影响后获得的剩余重力异常是清晰的局部重力负异常,并与地表火山地形等高线吻合(图3-c),火山喷发造成的火山口与近火山口的通道内都有物质亏损,与地形等高线图必定是一致的。然而这仅仅是地表浅部的局部特征,当向上延拓处理后这些火山引起的局部重力异常已消失,而出现了向北延伸的较大的负重力异常(图3-b),这个重力负异常与浅部火山口附近的物质亏损关系很小,其范围与低电阻率异常的范围相当。自然是与来自深部物质通过岩浆囊位置向地表喷发后造成的物质亏损有关,岩浆囊本身无疑是较高温度的熔融体,由于岩浆喷发使密度降低,以及矿化、含水等因素影响,其密度和电阻率都会降低,故马站以北的重力负异常是岩浆囊构造的特征之一。

由图3-a、c可以看出:火山口具有明显的重力异常降低,通常可以根据这一特征查找隐伏的火山口;在重力上延500 m异常图(图3-b)上,小空山和大空山的局部负异常随上延高度的增大逐渐消失,黑空山附近的负异常范围逐渐变大说明黑空山火山口相对小空山和大空山火山口更深、范围更大。总体上看,此负重力异常的中心向北移,与航磁异常和低电阻率异常位置大致相当。对此航磁异常的反演计算表明磁性体深度在2.5~3.5 km,而低阻体的岩浆囊顶部深度在13 km上下。岩浆物质上涌达到浅部3 km附近,冷却过程中生成了磁铁矿物,在达 480°C 时具有了磁性。

4 岩浆囊的反射地震速度特征

腾冲盆地北线反射地震速度剖面示于图4-a,

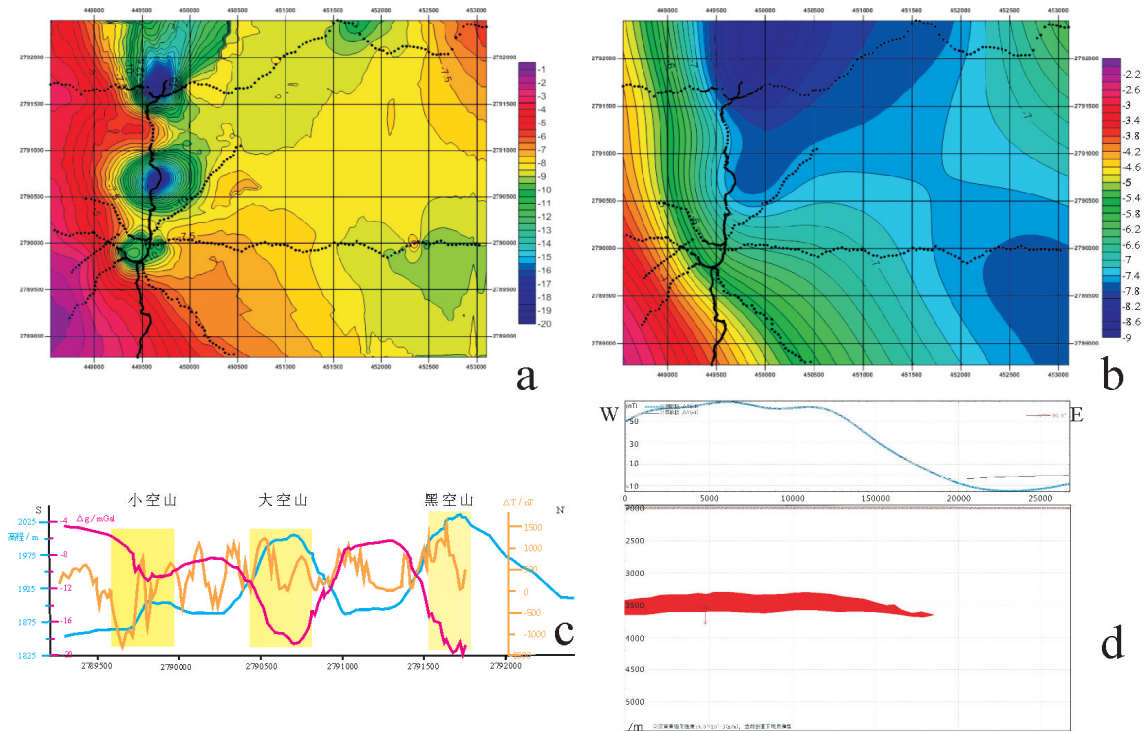


图3 a—腾冲火山构造区小空山—黑空山布格重力异常平面图; b—腾冲重力上延500 m异常平面图; c—小空山、大空山和黑空山地面磁异常、重力布格异常与地形高程剖面图, 红线—重力异常, 棕色线—磁异常, 蓝线—沿测线测点的GPS地形高程; d—向上延拓的航空磁异常及反演结果, 计算磁性体的深度坐标考虑了上延2000 m的高度

Fig.3 a— Xiaokong Mountain—Heikong Mountain Bouguer gravity anomaly map of Tengchong volcano-tectonic area; b—Upward continued gravity anomaly map of Tengchong (to 500 m); c—Ground magnetic anomaly, Bouguer gravity anomaly and terrain elevation profiles of Xiaokong Mountain, Dakong Mountain and Heikong Mountain: Red lines—Gravity anomalies, brown lines—Magnetic anomalies, blue lines—GPS terrain elevations along survey points on survey lines; d—Results of upward continuation and inversion of aeromagnetic anomalies, where upward continuation to 2000 m was considered in calculation of depth coordinates of magnetic objects

从反射地震速度图可见由低电阻率显示的岩浆囊范围内波速是不均匀的, 而且, 主要特征是呈垂直条带状分布^[13, 16]。

从图4-b清楚看出浅部低阻体位于地表玄武岩层之下, 约达到2 km深度内, 地震反射波界面相对较连续, 有几个反射波组, 其与花岗岩的相连, 东段花岗岩有较大深度, 与高黎贡山岩体有密切关系。再向下(13~30 km)是被推断为岩浆囊的低阻体^[24]。

由大地电磁法确定了本区地壳上部的电性分层, 反射地震剖面上也见到较为清晰层状结构, 在2 km以上成层出现的地震低速层与大地电磁法低阻层(热储层)是相吻合的。但是, 向深部地震波形的层状特征逐渐消失。地震剖面图4-a 仅位于大地电磁法剖面图4-b的西段, 地震剖面所对应的位置包括了几座火山口及岩浆囊的大部分, 也包括了岩浆囊与地表火山体的连接通道, 以及本区主要活动断

裂带的大盈江断裂带。图4-a最突出的特征是地震波速度给出的是近垂直方向上波速条带, 与近水平产状的低阻体不同, 地震波划分出的是若干不同速度的近垂直的条带。这可能更合理地反映了深部物质上涌的特征。

目前普遍认为, 引起低速体的原因有2个, 温度的升高可能引起P波速度的降低, 或者岩浆的熔融或半熔融也可能引起P波速度降低^[23, 24]。据Mainprice^[26]对岩浆玄武岩类, 主要包括辉长岩、蛇绿岩及上地幔的方辉橄榄岩进行的地震特征实验模拟结果, P波速度在3.5~4.7 km/s有50%~70%为熔融状态; P波速度在4.8~5.6 km/s有35%~50%为熔融状态。传统上认为, 岩浆体有35%为熔融状态, 即有喷发的可能^[27, 28~29]。

腾冲火山构造区是与近代火山活动有直接关联的, 该区自新生代以来的持续历经的多次强烈地

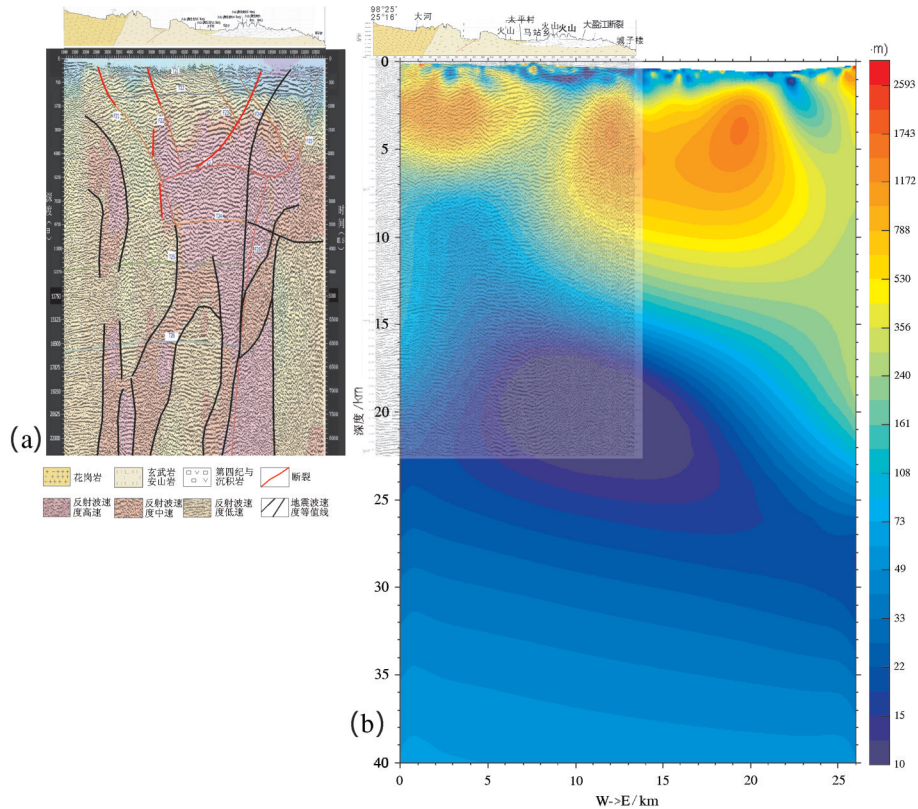


图4 腾冲北线地震波速度与反射地震、大地电磁法剖面图

a—反射地震速度剖面; b—同比例尺的反射地震叠加剖面和大地电磁法电阻率剖面叠合图

Fig. 4 Maps of seismic wave velocity profile, seismic reflection profiles, and MT profile for North Tengchong line
a—Seismic reflection velocity profile; b—Superposed map of stacked seismic reflection profile and MT resistivity profile at the same scale

壳运动和火山活动的构造演化历史^[30, 15, 31], 以及存在地壳岩浆囊均表明, 地幔物质和热流的上涌不仅形成规模宏大的地表水热活动和随处可见的铅化、硅化、硫化等强烈的多次长期的喷发活动, 也会造成岩浆囊及其上下地层岩石结构、温度、密度等方面的差异^[32-35], 在岩浆囊范围内影响电阻率变化的因素可能差异不大, 形成了低电阻率的异常, 可是地震波速度却识别出水平方向上的差异, 可能早期已凝结的岩浆相对要密度大点, 而大部分岩浆熔融体含有较多硫化物等矿物质, 蚀变程度高以及含水则仍然呈低速度的特征。所以, 推断电阻率低、重磁异常推断的岩浆囊不是均匀物质组成的, 从地表推测的岩浆囊温度也有较大变化区间 397~597°C^[13, 36-38], 这说明了岩浆囊的不均匀性, 它是地幔物质上涌通向地表的岩浆积储的过渡体, 由于在孔隙度、含水、矿物蚀变、熔融程度等多方面具有相似的电阻率特征, 而在地震波速度特征上却仍然具有较多不同速度的近垂直的条带, 包括大盈江断裂及其伴生断裂

带, 最低速的上涌物质与含水矿化蚀变熔融程度较高的上涌物质有关。

从大地电磁法电阻率剖面上我们还注意到, 在推断的岩浆囊下方, 直到 Moho 面深度上, 其电阻率仍然相对较低, 与浅部的火山岩、花岗岩等岩性电阻率低得多, 表明地幔热物质的影响在本区是重要的热源和火山活动的主要动力。

由此, 可以给出了腾冲火山构造区马站岩浆囊在平面投影为近似不规则圆形体(图1), 此前给出了沿南北向的剖面图^[16], 这里给出了沿东西向5线为主的剖面(图5), 而且增添了新的地球物理特征。

5 讨论

在腾冲火山盆地大地电磁法提供的上地壳低阻体岩浆囊基础上, 进一步分析了区域重力、航空磁测和反射地震剖面的探测结果, 综合重磁电震的结果确定出岩浆囊地球物理特征:

(1)大地电磁法的低阻体显示了岩浆囊的电阻

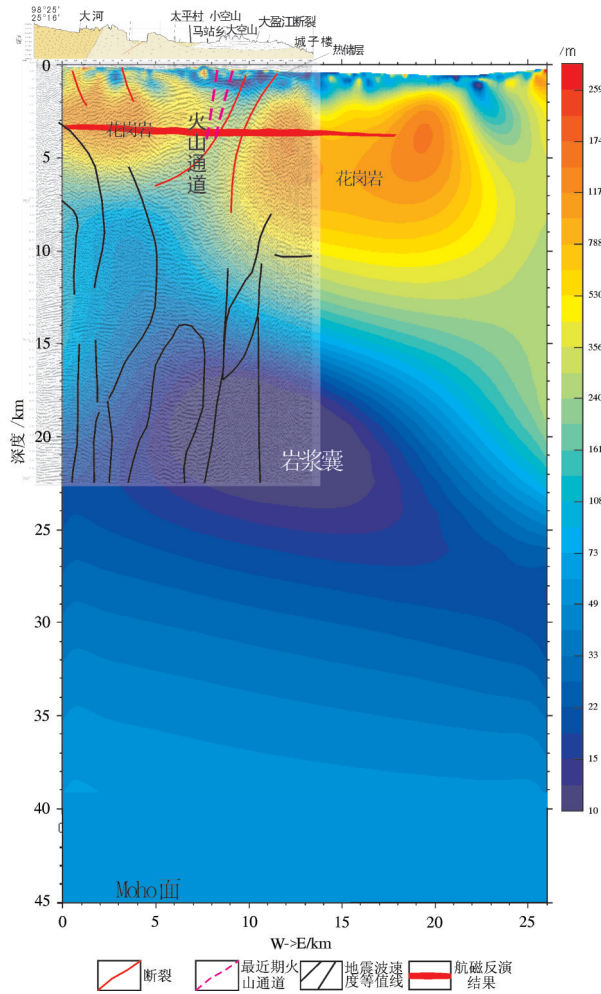


图5 云南腾冲或山区马站岩浆囊横剖面地球物理模式同等比例尺的反射地震速度剖面和大地电磁法电阻率剖面叠合图,航磁反演结果见图3-d

Fig.5 Geophysical model for transverse profile of the magma pocket in Tengchong or mountainous Mazhan, Yunnan See the superposed map of seismic reflection velocity profile and MT resistivity profile at the same scale, and result of aeromagnetic inversion in Fig. 3-d

率特征,反映出15~30 km深度范围内的囊体轮廓,此岩浆囊可能是上地幔物质上涌造成地面火山喷发的最后一个岩浆积储的部位,从这里发生了燕山期和喜马拉雅期两次大规模的岩浆与火山活动。地质研究确认腾冲马站岩浆囊的温度为397~651°C,平均温度为524°C。这就是说该岩浆囊不是温度均匀体,其成分有差异和生成时间有先后。

(2)由于火山喷发,不仅在火山口附近形成了局部物质亏损,而且,岩浆囊本身也亏损了积聚的岩浆物质,位场上延的重力场滤去了表层火山的局部

负重力异常后,显示了大空山、小空山以北与低阻体相对应的负重力异常,这与岩浆囊高温熔融状态含水低密度物质有密切关系。较大重力负异常印证了低阻岩浆囊的存在。

(3)众所周知,超过480°C的居里点一切磁性消失,岩浆囊的主体中心部位不可能存在磁性体。可是对航磁资料的处理,消除表层局部磁异常影响后,呈现出了有一定范围的强磁异常,反演计算了航磁异常源是位于低速体岩浆囊上方2.5~3.5 km深处。推断航磁异常是岩浆囊物质上涌到地壳浅部时温度逐步下降,当低于480°C时会形成磁性矿物,如此,在囊体上方出现了较强磁性体。

(4)反射地震仅仅在浅部较清楚地观测到较连续的反射波界面,这是浅部火山岩、含水层、花岗岩顶界面的反映,向深部(超过3 km)反射界面已不连续。但是,反射波速度特征则显示出垂直方向上相对连续的若干速度带,推测是由于不止一次岩浆活动上涌以致喷发时间有先后,成分有差异,尽管电阻率可以相近,但波速给出的差异表明岩浆囊物质的不均匀性,给出的特征表明岩浆囊成分有差异,一方面由于含水、矿化的熔融体具有低电阻的共性,但其温度不均匀与地震波速度差异又显示了不同期次岩浆成分和温度的差异,由岩浆囊向地表的通道上,东部花岗岩下为高速有较低温度的物质,在小空山、大空山和黑空山深部沿大盈江断裂带,东西两个大的隐伏花岗岩体之间是最新的火山喷发通道,是具有相对低速的通道。这种特征为探测火山盆地的深部结构提供了依据。

致谢: 作为大陆科学钻探选址及钻探试验项目的组成部分,该项工作得到了项目和课题负责人中国地质科学院地质研究所杨经绥研究员和许志琴院士,中国科学院地质与地球物理研究所刘嘉麒院士的大力帮助和支持,在工作过程中得到了中国地质调查局发展研究中心袁学诚教授,中国地质大学(北京)的李金铭教授、余钦范教授、王光镔教授等,中国地质科学院地质研究所戚学祥研究员以及中国科学院地质与地球物理研究所郭正府研究员的指导和帮助,审稿专家对论文提出了宝贵修改意见,在此表示衷心感谢。中国地质大学(北京)的许多同学参加了野外工作和资料处理,同时予以感谢。

参考文献(References):

- [1] 刘嘉麒. 中国火山[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 219.
Liu Jiaqi. Volcanos in China [M]. Beijing: Science Press, 1999: 219 (in Chinese).
- [2] 罗照华, 刘嘉琦, 赵慈平, 等. 深部流体与岩浆活动: 兼论腾冲火山群的深部过程[J]. 岩石学报, 2011, 27(10): 2855–2862.
Luo Zhaohua, Liu Jiaqi, Zhao Ciping, et al. Deep fluids and magmatism: The deep processes beneath the Tengchong volcano group[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(10): 2855–2862(in Chinese with English abstract).
- [3] 罗照华, 莫宣学, 侯增谦, 等. 青藏高原新生代形成演化的整合模型——来自火成岩的约束[J]. 地学前缘, 2006, 13(4): 196–211.
Luo Zhaohua, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, et al. An integrated model for the Cenozoic evolution of the Tibetan plateau: constraints from igneous rocks[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(4): 196–211(in Chinese with English abstract).
- [4] 戚学祥, 赵宇浩, 朱路华, 等. 青藏高原东缘哀牢山构造带泥质高压麻粒岩的发现及其构造意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(6): 1846–1856.
Qi Xuexiang, Zhao Yuhao, Zhu Luhua, et al. Discovery of high-pressure pelitic granulite in Ailaoshan orogenic belt, southeastern Tibet, and its tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(6): 1846–1856(in Chinese with English abstract).
- [5] Nicolasa, Ildefonse B. Flow mechanism and viscosity in basaltic magma chambers[J]. Geophysical Research Letters, 1996, 23(16): 2013–2016.
- [6] 穆治国, 佟伟, Garniss H. Curtis. 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, Garniss H. Curtis. 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).
- [7] 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, 39(4): 344–347.
Bai Denghai, Liao Zhijie, Zhao Guoze, et al. The inference of magmatic heat source beneath the Rehai (Hot Sea) field of Tengchong from the result of magnetotelluric sounding[J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(4): 344–347(in Chinese with English abstract).
- [8] 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).
- [9] 王椿镛, 楼海, 吴建平, 等. 腾冲火山地热点区地壳结构的震学研究[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).
- [10] Nercessian A, Hirn A, Tarantola A. Three-dimensional seismic transmission prospecting of the Mont Dore volcano, France[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1984, 76(2): 307–315.
- [11] 上官志冠, 都吉夔, 臧伟, 等. 郯庐断裂及胶辽断块区现代地热流体地球化学[J]. 中国科学(地球科学), 1998, 28(1): 23–29.
Shang Guan Zhiguan, Du Jikui, Zang Wei, et al. Modern hot spring geochemistry at the Tanlu fault and Jiaoliao block in eastern China[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 1998, 28(1): 23–29(in Chinese with English abstract).
- [12] 楼海, 王椿镛, 皇甫岗, 等. 云南腾冲火山区上部地壳三维地震速度层析成像[J]. 地震学报, 2002, 24(3): 243–251.
Lou Hai, Wang Chunyong, Huang fuhang, et al. Three-Dimensional Seismic Velocity Tomography of the upper crust in Tengchong volcanic area, Yunnan province[J]. Acta Seismologica Sinica, 2002, 24(3): 243–251(in Chinese with English abstract).
- [13] 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): 800–805.
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): 800–805(in Chinese with English abstract).
- [14] 郭正府, 张茂亮, 成智慧, 等. 火山“熔岩流气泡古高度计”及其在云南腾冲火山区的应用[J]. 岩石学报, 2011, 27(10): 2863–2872.
Guo Zhengfu, Zhang Maoliang, Gheng Zhihui, et al. A link of measurements of lava flows to Palaeoelevation estimations and its application in Tengchong volcanic eruptive field in Yunnan Province (SW China)[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(10): 2863–2872(in Chinese with English abstract).
- [15] 姜朝松, 周真恒, 赵慈平. 腾冲火山区地壳及上地幔结构特征[J]. 地震研究, 2004, 27(S1): 1–6.
Jiang Chaosong, Zhou Zhenheng, Zhao Ciping. The structural characteristics of the crust and upper mantle in the area of Tengchong volcano[J]. Journal of Seismological Research, 2004, 27(S1): 1–6(in Chinese with English abstract).
- [16] 李成波, 施行觉, 刘苏苏, 等. 腾冲火山区的GPS形变特征[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(3): 765–770.
Li Chengbo, Shi Xingjue, Liu Susu, et al. Research on the character of the GPS deformation in the Tengchong volcano area[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(3): 765–770(in Chinese with English abstract).
- [17] 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).
- [18] 赵慈平, 冉华, 陈坤华. 由相对地热梯度推断的腾冲火山区现存岩浆囊[J]. 岩石学报, 2006, 22(6): 1517–1528.
Zhao Ciping, Ran Hua, Chen Kunhua. Present-day magma chambers in Tengchong volcano area inferred from relative

- geothermal gradient[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22 (6): 1517 – 1528(in Chinese with English abstract).
- [19] 汪缉安, 徐青, 张文仁. 云南大地热流及地热地质问题[J]. *地震地质*, 1990, 12(4): 367–377.
Wang Jian, Xu Qing, Zhang Wenren. Heat flow data and some geologic– geothermal problems in Yunnan Province[J]. *Seismology and Geology*. 1990, 12(4): 367–377(in Chinese with English abstract).
- [20] Clark D A. Magnetic petrophysics and magnet icpetrophy: aids to geological interpret at ion of magnetic surveys [J]. *Journal of Australian Geology and Geophysics*, 1997, 17(2): 83–103.
- [21] Schmidt P W and Clark D A. The calculaion of magnetic components and moments from TMI: A case study from the Tuckers igneous complex, Queensland [J]. *Exploration Geophysics*, 1998, 29 (4): 609–614.
- [22] 永田武. 岩石磁学[M]. 北京: 地质出版社. 1959.
Takesi Nagata. *Rock– Magnetism*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1959(in Chinese).
- [23] 姜枚, 谭捍东, 等. 沿雅鲁藏布江含铬蛇绿岩体、金川铜镍矿区、腾冲火山盆地深部结构的地球物理研究[M]. 北京: 地质出版社, 2015, 45–60.
Jiang Mei, Tan Handong, et al. Geophysics Study of the Deep Structure of Chromium– Bearing Serpentinite Masses, along the Yarlung Zangbo River Suture Zone, the Jinchuan Cu– Ni Mine Area, and the Tengchong Volcanic Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015, 45–60(in Chinese).
- [24] Hetland E A, Wu F T, Song J L. Crustal structure in the Changbaishan volcanic area, China, determined by modeling receiver functions[J]. *Tectonophysics*, 2004, 386(3/4): 157–175.
- [25] Fountain D M. Composition of the continental crust and upper mantle: A review[J]. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1989, 172: 711–742.
- [26] Mainprice D. Modelling the anisotropic seismic properties of partially molten rocks found at mid– ocean ridges[J]. *Tectonophysics*, 1997, 279(1/4): 161–179.
- [27] Collier J S, Singh S C. Detailed structure of the top of the melt body beneath the East Pacific Rise at 9° 40' N from waveform inversion of seismic reflection data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B9): 20287–20304.
- [28] 刘若新, 魏海泉, 李继泰, 等. 长白山天池火山近代喷发[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 108–122.
Liu Ruoxin, Wei Haiquan, Li Jitai, et al. Modern Eruption of Changbaishan, Tianchi Volcano[M]. Beijing: Sciece Press, 1998: 108–122(in Chinese).
- [29] 郭履灿, 马石庄, 张禹慎. 应用地震CT技术研究长白山火山的岩浆囊[J]. *CT理论与应用研究*, 1996, (1): 47–52.
Guo Lucan, Ma Shizhuang, Zhang Yushen. Research on “Magma Chamber” of Changbai Mountain volcanoes by means of seismic tomography[J]. *CT Theory and Applications*. 1996(1): 47– 52(in Chinese with English abstract).
- [30] 胡亚轩, 王雄. 应用形变和重力资料分析腾冲火山区岩浆的活动特征[J]. *地震地质*, 2009, 31(4): 655–663.
Hu Yaxuan, Wang Xiong. Anaysis of the characteristics of magma activity based on the deformation and gravity measurements in Tengchong volcano region[J]. *Seismology and Geology*, 2009, 31 (4): 655–663(in Chinese with English abstract).
- [31] 樊祺诚, 刘若新, 魏海泉, 等. 腾冲活火山的岩浆演化[J]. *地质论评*, 1999, 45(S1): 895–904.
Fan Qicheng, Liu Ruoxin, Wei Haiquan, et al. The magmatic evolution of the active volcano in the Tengchong area[J]. *Geological Review*, 1999, 45(S1): 895– 904(in Chinese with English abstract).
- [32] 杨经绥, 许志琴, 李天福, 等. 青藏高原拉萨地块中的大洋俯冲型榴辉岩: 古特提斯洋盆的残留?[J]. *地质通报*, 2007, 26(10): 1277–1287.
Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Li Tianfu, et al. Oceanic subduction – type eclogite in the Lhasa block, Tibet, China: Remains of the Paleo– Tethys ocean basin? [J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(10): 1277– 1287(in Chinese with English abstract).
- [33] 徐向珍, 杨经绥, 李天福, 等. 青藏高原拉萨地块松多榴辉岩的锆石 SHRIMP– Pb 年龄及锆石中的包裹体[J]. *地质通报*, 2007, 26(10): 1340–1355.
Xu Xiangzhen, Yang Jingsui, Li Tianfu, et al. SHRIMP U– Pb ages and inclusions of zircons from the Sumdo eclogite in the Lhasa block, Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(10) : 1340–1355(in Chinese with English abstract).
- [34] 陈松永, 杨经绥, 徐向珍, 等. 西藏拉萨地块松多榴辉岩的锆石 Lu/Hf 同位素研究及 La– Icpms U– Pb 定年[J]. *岩石学报*, 2008, 24(7): 1528–1538.
Chen Songyong, Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, et al. Study of Lu– Hf geochemical tracing and LA– ICPMS U– Pb isotopic dating of the Sumdo eclogite from the Lhasa block, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(7): 1528– 1538(in Chinese with English abstract).
- [35] 李恒忠, 杨存宝. 腾冲热海地下流体观测研究[J]. *地震研究*, 2000, 23(2): 231–238.
Li Hengzhong, Yang Cunbao. Underground fluid study in Tengchong hot sea[J]. *Journal of Seismological Research*, 2000, 1–193(in Chinese with English abstract).
- [36] 徐青, 李翠华, 汪缉安, 等. 云南地热资源——以腾冲地区为重点进行解剖[J]. *地质地球化学*, 1997, 4: 77–84.
Xu Qing, Li Cuihua, Wang Jian, et al. Geothermal resources in Tengchong region[J]. *Geology Geochemistry*. 1997, 4: 77– 84(in Chinese with English abstract).
- [37] 上官志冠. 腾冲热海地热田热储结构与岩浆热源的温度[J]. *岩石学报*, 2000, 16(1): 83–90.
Shangguan Zhiguan. Structure of geothermal reservoirs and temperature of mantle– derived magma hot source in the Rehai area, Tengchong[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16(1): 83– 90 (in Chinese with English abstract).
- [38] 佟伟, 章铭陶. 腾冲地热. 北京: 科学出版社, 1989, 1–262.
Tong Wei, Zhang Mingtao. *Geothermics in Tengchong*[M]. Beijing: Science Press, 1989, 1– 262(in Chinese with English abstract).