www.cagsbulletin.com www.地球学报.com

云南腾冲火山构造区马站—固东岩浆囊的 地球物理模式

姜 枚¹⁾, 谭捍东²⁾, 张聿文²⁾, 彭 淼^{1,2)}, 李庆庆¹⁾, 张立树¹⁾, 许乐红¹⁾, 王 伟^{1,2)}

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)中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院,北京 100083

摘 要: 位于青藏高原东南边缘的云南腾冲火山构造区岩浆活动频繁强烈,火山活动规模宏大。为配合国家 深部探测专项科学钻探选址,在腾冲盆地北部马站到固东、曲石乡一带进行了大地电磁测深、可控源音频大 地电磁测深、反射地震和重磁测量的工作。本文依据电磁法取得的成果划分出了盆地地壳内的 2 个低阻低 速层,其中浅部的低阻层由含水(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 到 1500 m 范围内;深部的低阻体是作为热源的岩浆囊,位于马站—固东 —曲石乡三镇的深 12~30 km,东西宽 25 km 以上,向南可能与腾冲北的岩浆囊相连。小空山、大空山和黑空 山火山口具有典型的火山口重磁场特征,特别是由于喷发造成物质亏损形成的重力负异常与火山地形呈清 晰的镜像对应关系。

关键词:云南腾冲;火山构造;热储层;岩浆囊 中图分类号:P631;P588.14;TK521 文献标志码:A **doi**: 10.3975/cagsb.2012.05.03

Geophysical Mode of Mazhan-Gudong Magma Chamber in Tengchong Volcano-tectonic Area

JIANG Mei¹⁾, TAN Han-dong²⁾, ZHANG Yu-wen²⁾, PENG Miao^{1, 2)}, LI Qing-qing¹⁾, ZHANG Li-shu¹⁾, XU Le-hong¹⁾, WANG Wei^{1, 2)}

 State Key Laboratory for Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;
School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083

Abstract: Tengchong volcano-tectonic area located in southeast Tibetan plateau has experienced frequent magmatism. In order to support selecting site and pilot holes for continental scientific drilling, the authors conducted geophysical investigations in the area from Mazhan in Tengchong basin to Gudong and Qushi by such means as Magnetotelluric Survey (MT), Controlled Source Audio-frequency Magnetotellurics (CSAMT), seismic reflection and gravity and magnetic exploration. Two low-velocity and resistive layers were recognized in the crust within the basin. The resistive layer in the superficial part consists of hydrous (hydrothermal) volcanic rock, granite and glutenite, forming a geothermal reservoir in the basin 300–1500 m in depth. The deep-seated conductive body is a magma pocket (heat reservoir), lying 12–30 km in depth in Mazhan, Gudong and Qushi; its EW-trending width exceeds 25 km and may be linked to magma pockets in northern Tengchong. The craters of Xiaokongshan, Dakongshan and Heikongshan can be identified by typical gravity and magnetic characteristics,

本文由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综合研究项目(编号: SinoProbe-05-07)资助。 收稿日期: 2012-07-25; 改回日期: 2012-09-07。责任编辑:魏乐军。

第一作者简介: 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@gmail.com。

and the negative gravity anomaly resulting from the eruption has especially obvious mirror image relationship with volcanic landform.

Key words: Tengchong; volcanic structure; geothermic reservoir; magma chamber

云南腾冲火山构造区位于青藏高原东南边缘部 位,属于大陆碰撞、走滑逃逸作用和汇聚作用集中 的地质构造结(Tapponnier et al., 1976, 1990; 董树文 等,2011)。该区中、新生代岩浆活动频繁、强烈,规 模较大, 广泛分布着花岗岩和玄武岩, 是国内唯一 第四纪玄武岩-安山岩-英安岩系列完整出露的地区 (陈福坤等, 2005; 吴开兴等, 2004)。该区火山岩年龄 为 2 Ma, 自新近纪以来, 火山活动规模逐步减小, 现地表可见众多近代火山口大小不一,沿近南北向 的大盈江断裂及其它次级断裂有序分布(莫宣学等, 2006; 戚学祥等, 2010; 郭正府等, 2011); 并且地震 活动强烈, 温泉地热发育, 景观优美, 多金属矿产 资源丰富(图 1), 长期以来吸引着国内外各方面专家 的关注。本区进行过大量地质地研究(Dewey et al., 1988; 李兴振等, 1999; 罗照华等, 2011; Nicolas et al., 1996; Collier et al., 1997; Mainprice, 1997; Kapp et al., 2007; Luttter et al., 1990; Schärer et al., 1984)和 地球物理研究(孙洁等, 1989; 白登海等, 1994; 吴乾 蕃等, 1988; 廖志杰等, 1991; 秦嘉政等, 1998; 王椿 镛等, 2002a, b; 林中洋等, 1993; 穆治国等, 1987), 此外,国内外其它火山构造区进行的地震和大地电 磁探测等地球物理工作(Yin et al., 2000; Nercessian et al., 1984; 上官志冠等, 1998; 汤吉等, 1998; 郭履 灿等, 1996), 也都为本研究提供了依据。

20世纪80年代在滇西开展了大地电磁探测,其 中的石坪测点临近本区马站乡附近,给出了上地壳 电性层的电阻率为6~10 Ω·m,推论岩浆囊厚度5 km, 埋深9~10 km(孙洁等,1989;白登海等,1994)。同时 还指出了该区具有低速、低电阻率、高热流值层(吴 乾蕃等,1988;廖志杰等,1991)和低Q值层(秦嘉政 等,1998)。2002年穿越腾冲的多条人工地震探测和 流动台网观测的地震记录所进行的地壳研究指出, 腾冲附近的上地壳和上地幔存在低速异常体,认为 与火山地热活动和岩浆囊有关(王椿镛等,2002b)。

1 地球物理探测的布置

为配合腾冲火山地热构造区的科学钻探选址工 作,项目组于 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。重点地区是马站以北的小空山—黑空山一带, 工作布置示于图 1 中。目的是在以往工作基础上对 科钻选址提供更详细的深部资料。图 1 中 5 线剖面 自西向东始于出露的花岗岩体进入腾冲火山盆地, 穿越黑空山中新世-第四纪火山沉积分布区, 然后越 过怒江继续向东进入高黎贡山西缘的元古代变质岩 地层中, 长约 30 km。9 线位于 5 线南约 5 km, 与 5 线平行, 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 10 km, 在此两 剖面上进行了大地电磁法、重力、磁力探测。图 1



图 1 云南腾冲火山构造区地质及地球物理剖面位置图 Fig. 1 Map of geological and geophysical profile position in the Tengchong volcano-tectonic area

穿越小空山、大空山、黑空山的重磁剖面位置图; 背景地质图据戚学祥等,2011

Line 1, line 2 and line 3 (green) represent CSAMT profile; line 5 and line 9 (blue) represent gravity and magnetic profiles and MT profile; the figure in the upper left is a spatial diagram of gravity and magnetic profiles across Xiaokongshan, Dakongshan and Heikongshan; geomap after QI Xue-xiang et al., 2011

图中1线、2线、3线(绿色)剖面为可控源音频大地电磁剖面;

⁵线、9线(蓝色)剖面为重磁、大地电磁剖面;左上方小图为

北部的4线、3线和2线及南部的1线,先前已进行 过可控源音频大地电磁法探测,且其中的1线与 3线先前还曾进行过反射地震探测,但本文暂不涉 及。

为了研究火山口的构造,围绕小空山进行了放 射状剖面的重力、磁力探测(图 1 左上图)。其中 H1 线是始于小空山火山口至黑空山火山口的南北向剖 面。

在腾冲火山构造区已完成的上述地球物理探测 取得了良好的结果,现在分述如下。

2 电阻率特征

2.1 腾冲火山构造区的地壳电性分层

大地电磁法和可控源音频大地电磁法提供了地 下电阻率特征,图 2a、b、c、d 分别显示了 4 线、3 线、2 线和 1 线 4 条剖面 3 km 以上的电阻率特征。 图 3 为 5 线大地电磁结果与相邻 2 线和 3 线可控源 音频大地电磁结果对比图,它们在 3 km 以上的特征 极为相似。实际上,火山盆地的深部电阻率特征主 要决定于岩石孔隙度、破碎程度和含水与热水的状 况,图 2e 中的钻孔岩性与电阻率的对比说明了这一 点。结合地质和钻孔资料可以将本区地壳分成以下 几个电性层(图 2):

浅部由单个高阻体组成不连续的高阻层,该层 在盆地范围内厚度不大,约几十米到 1 km,以火山 喷出岩为主,包括火山锥体与火山熔岩沉积岩等。 在可控源音频大地电磁法的电阻率图中可更清楚地 看到浅部高阻体的反映。

第二层是电阻率极低的低阻层,依据 1 线附近 观音堂钻孔资料可知此低阻层主要为多孔隙的玄武 岩,也可能包括砂砾化的花岗岩上层,花岗岩体为 该低阻层的下底(图 2e),两者之间为热水储存层。低 阻层厚度从几米到 1.5 km,最深处多与断裂有关, 该层在图 2a、b、c、d 与图 3c 中均有显示。

第三层电阻率较高,电阻率大小一般为 上百Ω·m,从剖面西部近地表延伸到6km以下,为 以花岗岩体为主的反映,并且由火山口向东花岗岩 的厚度增大,可达10km以上,而且可能与地表出 露的花岗岩相连。

第四层高阻层, 电阻率一般为数百、上千 Ω·m, 分布在 12~13 km 以下, 一直延伸到 30~35 km 的深 度。该层在黑空山下部的厚度达 18~20 km, 在小空 山下部变薄, 仅 10 km 上下。该层认为是火山活动 热源的岩浆囊。

最后,在 30~35 km 以下仍然是低阻特征,可能

延伸到 Moho 面以下, 意味着有更深的岩浆源, 向岩 浆囊提供热源。

图 2a、b、c、d 剖面中 3 km 以上可控源音频大 地电磁法的电性分层较清晰,同时在 1 线剖面中标 出了观音庙附近钻孔的岩性特征;大地电磁法浅部 电阻率特征与可控源音频大地电磁法结果相似。电 阻率的特征从 1 线到 3 线有很强的可比性,这些特 点表明在盆地范围内电性分层是稳定的。到 4 线低 电阻率特征的电性分层已很不明显,可能意味着岩 浆源以及有关的热储层已趋向尖灭。

浅部低电阻层是由砂砾岩层、风化壳以及碎裂 的花岗岩火山岩组成,其中花岗岩、玄武岩为含水 层,在电性上没有明显的分界面,由于频繁的火山 地震活动的作用,使深部的低阻岩浆囊热源具有通 向浅部的可能,而最新喷出的火山岩呈高阻体盖层 露出地表,与6km以下的花岗岩体共同构成了接近 地表的含热水的贮存空间(图2、图4)。

2.2 岩浆囊的电性特征

本文在腾冲盆地马站以北地区的大地电磁法探 测结果展示出的深部电阻率特征表明,在黑空山、 大空山、小空山的深部存在着低阻异常体(图 3、 图 4), 如前所述, 地质研究首先提出了腾冲火山盆 地存在着 3 个岩浆囊,本文给出了最北部的岩浆囊 的具体深部特征。在腾冲及周边地区的宽频地震、 反射地震探测和大地电磁探测确定出了低速体和低 阻体的存在, 普遍认为岩浆囊可能是由岩浆体的熔 融或半熔融状态造成的(Collier et al., 1997)。本区存 在高温热源是多方证明的事实,特别是地震 P 波速 度低异常和电阻率极低的异常体的出现是很明显的 标志。Nicolas 等(1996)对玄武岩岩浆的流体机制及 空隙研究后认为, 20%为熔融状态的岩浆就可以流 动而没有塑性形变,因而预示,即使 20%熔融状态 的岩浆也有喷发的可能性,处于半熔融状态,岩浆 囊的速度在 3.5 到 5.6 km/s 的范围内(Collier et al., 1997; Mainprice, 1997)。S 波速度也不为零。我们在 腾冲火山地区 1 线、3 线进行反射地震的结果尚待 研究, 初步给出此低阻体范围的 P 波速度亦是较低 的。尽管腾冲地区为大陆地壳岩浆囊,与海洋地壳 岩浆囊可能不完全相同,其地震特征与电性特征都 可能存在差异,还有待深入研究。但是,应该认为本 区存在岩浆囊是有依据的。这与在长白山地区的地 震探测与大地电磁探测都发现低速体和低阻体的情 况相似(Nercessian et al., 1984; 上官志冠等, 1998; 汤吉等, 1998; 郭履灿等, 1996)。

1)以图4中5线为例,可以确定该岩浆囊的相应



图 2 腾冲盆地可控源大地电磁法剖面电阻率平面图 Fig. 2 Map of CSAMT profile of Tengchong basin a、b、c、d-4 线、3 线、2 线、1 线可控源音频大地电磁法电阻率剖面; e-观音堂钻孔资料

a, b, c, d-CSAMT resistivity profile alone line 4, line 3, line 2 and line 1; e-borehole data from Guanyintang





特征。其上顶最浅处深度大约为 12~13 km, 平均深 度约 15 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 km, 东西方向宽度达 30 km, 整个厚度大约为 15 km。当然, 该深度和厚度是由图 示的低阻体范围估计的, 实际上其上下底均与周边 地质体是渐变关系, 缺少清晰的分界面。

2)由图 4 还可看出,相距 2.2 km 的 5 线与 9 线 MT 电阻率的低阻体厚度有明显差异,9 线较短,其 东西两端的端部未显示出来,但其厚度则减小至 10 km,深度 15 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。向北该低阻体则已 超过 3 线位置,因为,音频大地电磁法在 4 剖面上浅 部低阻层(热储层)已很不明显(图 2),而且,此处已 近火山盆地的北端(图 4)。

3 重磁异常的特征

3.1 火山口的重力特征

图 5 给出了从小空山到黑空山 3 个火山口的重 力平面图。小空山、大空山、黑空山 3 个火山口具 有自南向北的 3 个负重力异常,呈串珠状展布。范 围逐次增大,小空山火山口地表规模就明显小于黑 空山,其局部异常自然也较小,这是由于火山喷发 岩浆物质外溢造成物质亏损而形成的负重力异常。 图 5b、c、d,分别清楚地看到火山口的负重力与地











形成镜像的特征,在小空山火山口负重力异常小, 山体高度亦低,向北大空山、黑空山逐次负重力异 常随地形起伏大小逐个增大。黑空山是最强的重 力负异常,火山体也是最大的,较大的火山口其



图 6 小空山、大空山和黑空山重力布格△g 异常、磁力△T 异常及地形高程剖面图(测线位置见图 1) Fig. 6 Gravity Bouguer anomalies, magnetic anomalies and topographic profiles of Xiaokongshan, Dakongshan and Heikongshan(see section location in Fig. 1) 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 red line-gravity anomaly; brown line-magnetic anomaly; blue line-GPS topography

喷发出的物质较多,物质亏损亦大,负重力异常 亦强。

我们在火山口布设放射状磁法剖面(图 1 左上 图)。为了便于分析,将几处火山口附近的重、磁场 测量结果分别列于图 6。从中可以清楚地看到火山 口的负重力异常及磁异常与地形的对应关系。图 6a 为南北向剖面,其余是东西向剖面。图 6b、c、e 对 小空山的重力异常与火山地形特征的对应关系表现 地更为清楚。它们是在近地表较大范围由岩浆囊引 起的区域重力负异常的背景之上出现的。

3.2 岩浆囊的重力场特征

图 5d 中向上延拓 500 m 的重力异常图中三个局 部负异常已消失,说明火山口本身的负重力异常不 大,是浅部火山口附近低密度明显降低的结果,延 拓后中北部范围较大的负重力异常与深部的高温低 速低阻岩浆囊的对应。虽然重力延拓图的北部没有 封口,但趋势与电阻率特征一致(图 5d)。同时,低重 力、低电阻率异常在小空山以南已变薄,与向东南 部的另一低重力异常可能相连,也可能与腾冲岩浆 囊相连(图 5d),但是马站附近应是岩浆囊变薄的位 置。也是深部北北西向大断裂的地面投影位置。向 北越过黑空山,接近4线达盆地北端(图 2、图 7)。 低电阻和低密度的地质体共同反映出一定程度上物 质亏损,可能还有高温热液、含矿物质的岩浆囊的 存在。

3.3 火山口的磁力场特征

在火山岩分布区磁异常的特征通常是大范围极 无规律的锯齿状磁异常,这是由于喷出的火山岩磁 性极不均匀而且属于多次喷发的结果,其剩余磁化 强度较强且无规则,这也是国内外许多火山地区都 有的特征(Clark, 1997)。但是,仔细分析正如图 6 所 示,可以看到所有火山口的磁异常是有很清晰的一 致性,与重力负异常相对比其特点是:

 1)火山口的磁异常与地形、重力异常对应关系 密切。从图 6 的剖面中可以看出大空山、小空山、 黑空山都具有很典型对应关系,火山活动的频发性



Fig. 7 Schematic profiles of Mazhan, Xiaokongshan and Gudong magma pockets(see section AA' in Fig. 1)

使得火山喷出的火山沉积物的磁性分布极不均匀, 凝结后的多呈锯齿状磁异常,一般情况下难以分辩 清楚喷出岩石各自的磁性特征。但在腾冲地区,唯 独在火山口是有较清晰的火山喷发活动的磁场特征 的,从而与火山地形、重力负异常有着较清楚的对 应关系。

2)火山岩岩石的磁性,主要来源于炽热的岩浆 溢出后在冷却过程中获得的剩余磁性,其磁化强度 和方向主要决定于从喷发到冷却过程当时地球磁场 方向和强度。因此,在同一个喷发期里的无论有多 少次喷发,在火山口附近,特别是火山口边缘的火 山岩的磁性主要决定于最后一次喷发冷凝成岩时获 得的剩余磁性的强度和方向。而此前喷发已凝固成 岩的磁性或被新喷发物冲碎或熔于溢出的岩浆中被 迁移到它处,因而只有火山口的火山岩磁性,在剖 面上一般呈"凹"字形,火山岩磁异常是围绕火山 口的较强磁性体,中心低处是火山通道。而远离火 山口的岩石磁性则难以分辨出磁性与溢出物之间的 复杂关系。

3)黑空山、大空山和小空山属第四纪火山,其喷 发结束时间可能不同,图 6 中黑空山火山口的磁异 常是强的正磁性,它与其它几个火山磁异常有差异, 从火山规模看,黑空山火山喷发的规模相对较大, 又更接近深部岩浆囊的中心位置,可能喷发时间较 长些,而小空山则可能位于岩浆囊的南端,喷发时 间较短,较早结束了火山活动(图 7)。

4 结果与讨论

本文作为腾冲火山盆地综合研究的组成部分, 主要依据大地电磁法、可控源音频大地电磁法及重 磁法资料,对 40 km 以上的地质结构进行研究,为 科学钻探选址与构造划分提供依据。

1)云南腾冲火山地热构造区的地壳的电性特征 具有明显分层性,地表高阻层是最新火山覆盖层, 低阻层是因火山地震引起的碎裂玄武岩为主的热水 储存层,下部高阻层是代表花岗岩,最下部的低阻 层可能属于岩浆囊区。

2)在本区马站镇—固东一带的深部 12~30 km 处 存在岩浆囊,腾冲火山地热构造区的岩浆囊之一, 该岩浆囊在黑空山附近的上顶深度为 12~13 km,下 底深度达 30 km 以上,东西向宽度达 25 km 以上。 岩浆囊向北延展,越过黑空山继续延伸近腾冲盆地 北缘固东镇附近,南端在小空山以南不远处岩浆囊 变薄、变小(图 7)。位于马站—固东下部 12~30 km 范围的岩浆囊受腾冲主断裂带的控制,和本区南部 腾冲一带的岩浆囊可能相连,而且,该岩浆囊更深 部是来自上地幔的岩浆源,在云南西部大构造运动 的背景下发生强烈的岩浆火山活动、地震活动,随 着隆升的上地幔物质通过地壳喷出地表的过程中以 岩浆囊的形式集中在上地壳中,并与地壳物质熔 融。

3)小空山、大空山和黑空山的局部负重力异常 是由于岩浆的喷出、物质亏损造成的,与地形等高 线呈负相关对应关系;火山口边缘具有较强的剩余 磁性,火山通道和远离火山口的火山岩磁异常不规 则,其岩石磁性变化大。

致谢: 作为国家深部探测专项(SinoProbe-05-07)大 陆科学钻探选址及钻探试验项目的组成部分, 该项 工作得到项目和课题负责人中国地质科学院地质研 究所许志琴院士和杨经绥研究员,中国科学院地质研 另地球物理研究所刘嘉麒院士的大力支持和帮助, 在工作过程中得到了中国地质调查局局发展研究中 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、王光锷教授等,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,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:

白登海, 廖志杰, 赵国泽, 王绪本. 1994. 从 MT 探测结果推论腾 冲热海热田的岩浆热源[J]. 科学通报, 39(4): 344-347.

- 陈福坤,李秋立,王秀丽,李向辉.2005.云南特提斯带保山— 腾冲地块早古生代岩浆岩[J].地球学报,26(S1):93.
- 董树文,李廷栋, SinoProbe 团队. 2011. 深部探测技术与实验研 究(SinoProbe)[J]. 地球学报, 32(S1): 3-23.
- 郭履灿,马石庄,张禹慎. 1996. 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, 5(1): 47-52.
- 郭正府,张茂亮,成智慧,刘嘉麒,张丽红,李晓惠. 2011.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,27(10):2863-2872.
- 李兴振,刘文均,王义昭. 1999. 西南三江地区特提斯构造演 化与成矿[M]. 北京:地质出版社:12-276.
- 廖志杰, 沈敏子, 过帼颖. 1991. 云南腾冲热海热田的热储特 性[J]. 地质学报, (1): 73-85.
- 林中洋, 胡鸿翔, 张文彬, 章惠芬, 何正勤, 林真明, 邱陶兴. 1993. 滇西地区地壳上地幔速度结构特征的研究[J]. 地震 学报, 15(4): 427-440.
- 罗照华,刘嘉麒,赵慈平,郭正府,程黎鹿,李晓惠,李大鹏. 2011. 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,27(10):2855-2862.
- 莫宣学, 潘桂棠. 2006. 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, 13(6): 43-51.
- 穆治国, 佟伟, GARNISS H C. 1987. 腾冲火山活动的时代和岩 浆来源问题[J]. 地球物理学报, 30(3): 262-270.
- 戚学祥,王秀华,朱路华,胡兆初,李志群.2010. 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, 26(7):2141-2154.
- 戚学祥,朱路华,胡兆初,李志群. 2011. 青藏高原东南缘腾冲 早白垩世岩浆岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素组 成及其构造意义[J]. 岩石学报, 27(11): 3409-3421.
- 秦嘉政,皇甫岗,张俊伟. 1998. 腾冲火山及其周围地区的地壳 Q值特征[J]. 地震研究, 21(4): 358-361.
- 上官志冠,都古夔,臧伟,王基华,孔令昌,高松升.1998. 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(D 辑),28(1):23-29.
- 孙洁,徐常芳,江钊,史书林,王继军,何明. 1989. 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, 11(1): 35-45.
- 汤吉,赵国泽,王继军,李文军,詹艳.1998.张北—尚义地震前 后电阻率的变化及分析[J].地震地质,20(2):164-171.
- 王椿镛, MOONEY W D, 王溪莉, 吴建平, 楼海, 王飞. 2002b. 川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究[J]. 地震学报, 24(1): 1-16.
- 王椿镛, 楼海, 吴建平, 白志明, 皇甫岗, 秦嘉政. 2002a. 腾冲 火山地热区地壳结构的地震学研究[J]. 地震学报, 24(3): 231-242.
- 吴开兴,胡瑞忠,毕献武,张乾,彭建堂.2004. 滇西上地幔铅同 位素演化模式及滇西富碱斑岩铅同位素组成的诠释[J]. 地 球学报,25(2):263-270.
- 吴乾蕃,祖金华,谢毅真,王都. 1988. 云南地区地热基本 特征[J]. 地震地质,10(4):178-183.

References:

- BAI Deng-hai, LIAO Zhi-jie, ZHAO Guo-ze, WANG Xu-ben. 1994. The inference of magmatic heat source beneath the Rehai (Hot Sea) field of Tengchong from the result of magnetotelluric sounding[J]. Chinese Science Bulletin, 39(4): 344-347(in Chinese).
- CHEN Fu-kun, LI Qiu-li, WANG Xiu-li, LI Xiang-hui. 2005. Early paleozoic magmatism in Baoshan-Tengchong block of the Tethyan belt, Yunnan province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 26(S1): 93(in Chinese with English abstract).
- CLARK D. 1997. Magnetic petrophysics and magnetic petrophy: aids to geological interpretation of magnetic surveys[J]. Journal of Australian Geology and Geophysics, 17(2): 83-103.
- COLLIER J S, SINGH S C. 1997. 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, 102(B9): 20287-20304.
- DEWEY J F, SHACKLETON R M, CHENG F C, SUN Y Y. 1988. The tectonic evolution of the Tibetan plateau[J]. Philosophical transactions of the Royal Society of London (Series A): Mathematical and Physical Sciences, 327: 379-413.
- DONG Shu-wen, LI Ting-dong, SinoProbe Group. 2002. Deep exploration technology and experimentation (SinoProbe)[J]. Acta Geoscientica Sinica, 32(S1): 3-23(in Chinese with English abstract).
- GUO Lü-can, MA Shi-zhuang, ZHANG Yu-shen. 1996. Research on "magma chamber" of Changbai mountain volcanoes by means of seismic tomography[J]. CT Theory and Applications, 5(1): 47-52(in Chinese with English abstract).
- GUO Zheng-fu, ZHANG Mao-liang, GHENG Zhi-hui, LIU Jia-qi, ZHANG Li-hong, LI Xiao-hui. 2011. 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, 27(10): 2863-2872(in Chinese with English abstract).
- KAPP P, DECELLES P G, GEHRELS G E, HEIZLER M, DING L. 2007. Geological records of the Lhasa-Qiangtang and Indo-Asian collisions in the Nima area of central Tibet[J]. Geological Society of America Bulletin, 119(7-8): 917-933.
- LI Xing-zhen, LIU Wen-jun, WANG Yi-zhao. 1999. Tectonic Evolution of Tethys and Mineralization in the Three-River Area, Southwest China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 12-276(in Chinese).
- LIAO Zhi-jie, SHEN Min-zi, GUO Guo-ying. 1991. Characteristics of the geothermal reservoir in the Rehai (hot sea) field in Tengchong county, Yunnan province[J]. Acta Geologica Sinica, (1): 73-85(in Chinese with English abstract).
- LIN Zhong-yang, HU Hong-xiang, ZHANG Wen-bin, ZHANG Hui-fen, HE Zheng-qin, LIN Zhen-ming, QIU Tao-xing. 1993.

Study on velocity structure of crust and uppermantle in the western Yunnan region, China[J]. Acta Seismologica Sinica, 15(4): 427-440(in Chinese).

- LUO Zhao-hua, LIU Jia-qi, ZHAO Ci-ping, CUO Zheng-fu, CHENG Li-lu, LI Xiao-hui, LI Da-peng. 2011. Deep fluids and magmatism: The deep processes beneath the Tengchong volcano group[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(10): 2855-2862(in Chinese with English abstract).
- LUTTTER W J, NOWACK R L, BRAILE L W. 1990. Seismic imaging of upper crustal structure using travel times from the PASSCAL Quachita experiment[J]. Journal of Geophysical Research, 95(B4): 4621-4631.
- MAINPRICE D. 1997. Modelling the anisotropic seismic properties of partially molten rocks found at mid-ocean ridges[J]. Tectonophysics, 279(1-4): 161-179.
- MO Xuan-xue, PAN Gui-tang. 2006. From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet Plateau: constrained by tectono-magmatic events[J]. Earth Science Frontiers, 13(6): 43-51(in Chinese with English abstract).
- MU Zhi-guo, TONG Wei, GARNISS H C. 1987. Times of volcanic activity and origin of magma in Tengchong geothermal area, west Yunnan province[J]. Acta Geophysica Sinica, 30(3): 262-270(in Chinese with English abstract).
- NERCESSIAN A, HIRN A, TARANTOLA A. 1984. Three-dimensional seismic transmission prospecting of the Mont Dore volcano, France[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 76(2): 307-315.
- NICOLAS A, ILDEFONSE B. 1996. Flow mechanism and viscosity in basaltic magma chambers[J]. Geophysical Research Letters, 23(16): 2013-2016.
- QI Xue-xiang, WANG Xiu-hua, ZHU Lu-hua, HU Zhao-chu, LI Zhi-qun. 2010. 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, 26(7): 2141-2154(in Chinese with English abstract).
- QI Xue-xiang, ZHU Lu-hua, HU Zhao-chu, LI Zhi-qun. 2011. Zircon SHRIMP U-Pb dating and Lu-Hf isotopic composition for Early Cretaceous plutonic rocks in Tengchong block, southeastern Tibet, and its tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(11): 3409-3421(in Chinese with English abstract).
- QIN Jia-zheng, HUANGPU Gang, ZHANG Jun-wei. 1998. The Charecteristics of Q values around Tengchong Volcano and Adjacent Areas[J]. Journal of Seismological Research, 21(4): 358-361(in Chinese with English abstract).
- SCHÄRER U, XU R H, ALLÈGRE C J. 1984. U-Pb geochronology of Gangdese (Transhimalaya) plutonism in the Lhasa-Xigaze

region, Tibet[J]. Earth and Planetary Science Letters, 69(2): 311-320.

- SHANGGUAN Zhi-guan, DU Ji-kui, ZANG Wei, WANG Ji-hua, KONG Ling-chang, GAO Song-sheng. 1998. Modern hot spring geochemistry at the Tanlu fault and Jiaoliao block in eastern China[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 28(1): 23-29(in Chinese).
- SUN Jie, XU Chang-fang, JIANG Zhao, SHI Shu-lin, WANG Ji-jun, HE Ming. 1989. 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, 11(1): 35-45(in Chinese with English abstract).
- TANG Ji, ZHAO Guo-ze, WANG Ji-jun, LI Wen-jun, ZHAN Yan. 1998. Variation and analysis of resistivity before and after the Zhangbei-Shangyi earthquake[J]. Seismology and Geology, 20(2): 164-171(in Chinese with English abstract).
- TAPPONNIER P, LACASSIN R, LELOUP R H, SCHÄARER U, ZHONG Da-lai, WU Hai-wei, LIU Xiao-han, JI Shao-cheng, ZHANG Lian-shang, ZHONG Jia-you. 1990. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China[J]. Nature, 343(6257): 431-437.
- TAPPONNIER P, MONLAR P. 1976. Slip-line field theory and large scale continental tectonics[J]. Nature, 264(5584): 319-324.
- WANG Chun-yong, LOU Hai, WU Jian-ping, BAI Zhi-ming, HUANGFU Gang, QIN Jia-zheng. 2002a. Seismological study on the crustal structure of Tengchong volcano-geothermal area[J]. Acta Seismologica Sinica, 24(3): 231-242(in Chinese with English abstract).
- WANG Chun-yong, MOONEY W D, WANG Xi-li, WU Jian-ping, LOU Hai, WANG Fei. 2002b. Study on 3-D velocity structure of crust and upper mantle in Sichuan-Yunnan region, China[J]. Acta Seismologica Sinica, 24(1): 1-16(in Chinese with English abstract).
- WU Kai-xin, HU Rui-zhong, BI Xian-wu, ZHANG Qian, PENG Jian-tang. 2002. The Pb Isotope Evolution Model of the Upper Mantle in Western Yunnan and Interpretation of Lead Isotopic Compositions of Regional Alkali-rich Porphyries[J]. Acta Geoscientica Sinica, 25(2): 263-270(in Chinese with English abstract).
- WU Qian-fan, ZU Jin-hua, XIE Yi-zhen, WANG Du. 1988. Characteristics of geothermal field in Yunnan region[J]. Seismology and Geology, 10(4): 178-183(in Chinese with English abstract).
- YIN A, HARRISON T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. Annual Review of Earth Planetary Sciences, 28: 211-280.