

# 根据多时相夜间 MODIS LST 推断的腾冲地区新生代火山岩岩浆囊分布与活动特征<sup>\*</sup>

李辉<sup>1,2</sup> 彭松柏<sup>1,2</sup> 乔卫涛<sup>1</sup> 林木森<sup>1</sup> 王振胜<sup>3</sup> 田礼乔<sup>4\*\*</sup>

LI Hui<sup>1,2</sup>, PENG SongBai<sup>1,2</sup>, QIAO WeiTao<sup>1</sup>, LIN MuSen<sup>1</sup>, WANG ZhenSheng<sup>3</sup> and TIAN LiQiao<sup>4\*\*</sup>

1. 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074

2. 中国地质大学教育部长江三峡地质灾害研究中心, 武汉 430074

3. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 武汉 430074

4. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079

1. *Earth Science Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*

2. *Three Gorges Research Center for Geohazards, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*

3. *Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*

4. *State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China*

2011-05-01 收稿, 2011-08-13 改回.

Li H, Peng SB, Qiao WT, Lin MS, Wang ZS and Tian LQ. 2011. The distribution and activity of Cenozoic magma chamber in Tengchong volcano area deduced from the MODIS multi-temporal monthly night LST data. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10):2873–2882

**Abstract** Tengchong volcanic geothermal area is located at the active arc zone of the subduction and collision of the Indian plate and Eurasian plates, and is considered as one of the most potentially active volcanic eruption areas in China. In order to study the spatial distribution and activity of the underground magma chamber, MODIS LST (Land Surface Temperature) data were used to identify the geothermal anomalies that may be created by the heating from the underground magma chamber. The monthly night MODIS LST data from Mar. 2000 to Mar. 2011 of the study area were collected and analyzed. The 132 month average LST map was derived and three geothermal anomalies were identified. In the light of the previous studies in this area, it can be deduced that there are three magma chambers beneath the three thermal anomalies. The first one is located along Wuhe-Xinhua-Puchuan-Tuantian with the most significant geothermal anomaly, and covers 537km<sup>2</sup>. The second one is situated in the Langpu-Rehai-Maanshan area with a significant geothermal anomaly and an area of 226km<sup>2</sup>. The third one is located between Mazhan and Qushi with an obvious geothermal anomaly and a coverage of 28km<sup>2</sup>. It is also found that the patterns of the monthly LST variation of the three thermal anomalies are similar, with 2 temperature peaks occurring in May, June and August, September, which is different from that of the local temperature of the same period. The 10-year annual LST of the geothermal anomaly in Langpu-Rehai-Maanshan area shows the greatest variations among the three, which suggests the active convective exchange of heat between the underground magma chamber and the surface water, and can be inferred that the beneath this magma chamber is the most active among the three. The findings of this study agree well with the results from seismology, GPS-based deformation detection, He isotopic emission and relative geothermal gradient measurements. It demonstrates the effectiveness and potential of thermal infrared remote sensing in geothermal studies.

**Key words** Magma chamber distribution; MODIS LST; Geothermal anomalies; Thermal infrared remote sensing; Tengchong

**摘要** 腾冲火山地热区位于印度板块与欧亚板块俯冲-碰撞带的弧后活动区,是我国新生代火山-地热最为活动的地区之一。本文利用 MODIS 夜间月平均地表温度(Land Surface Temperature, LST)数据,计算了研究区 2001~2011 年 132 个月的月

\* 本文受大陆科学钻探选址与钻探实验项目(SinoProbe-05-03)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CUGL100211)联合资助。

第一作者简介:李辉,1979年生,男,讲师,博士,主要从事基于GIS/RS的新构造与地貌研究,E-mail:giantlee\_fly@yahoo.com.cn

\*\* 通讯作者:田礼乔,1980年生,男,讲师,博士,主要从事定量遥感理论与应用研究,E-mail:tianliqiao@lmars.whu.edu.cn

平均地表温度,圈定了地温异常区;分析了异常区内及年际间的平均地表温度变化趋势,推测了可能的地下岩浆囊分布位置及活动特征。研究表明,腾冲地区现今地下可能存在3个岩浆囊:第1个位于五合-新华-蒲川-团田一带,面积约为537km<sup>2</sup>,地温异常最明显;第2个位于朗蒲-热海-马鞍山地区,面积约为226km<sup>2</sup>,地温异常次之;第3个位于马站-曲石之间,面积约为28km<sup>2</sup>,地温异常较为明显。3个地温异常区在年内的地表温度变化趋势基本一致,而且周期性明显,均在5~6月份和8~9月份出现2个温度峰。其中朗蒲-热海-马鞍山异常区的地温变化波动最大,可能反映地下岩浆囊地热系统与地表地下水系统的对流交换活动性更强。MODIS夜间月平均地表温度数据得出的结果与测震、GPS形变、He同位素比值及最大相对地热梯度等方法推测的地温异常区范围具有很好的一致性,特别是地温异常区内温度周期性变化的发现,表明卫星热红外遥感技术应用于地热异常实时监测与研究的巨大潜力。

**关键词** 岩浆囊分布;MODIS LST;地热异常;热红外遥感;腾冲

**中图分类号** P511

## 1 引言

腾冲火山区处于新生代印度与欧亚两大板块的俯冲-碰撞带上的弧后活动区,自上新世至全新世共有9期火山活动,其中全新世火山就有4座,是中国最具火山喷发危险和地热资源最为丰富的地区之一(姜朝松等,2000)。地热梯度、幔源物质释放、地震及大地形变观测结果,以及前人的地球物理深部探测成果均表明,腾冲火山区现今地下深部可能存在岩浆囊(赵慈平等,2006,2008a)。因此,腾冲地区现今地下深部是否存在可能的岩浆囊及其分布与活动特征成为本区火山-地热-构造研究的重要问题。

白登海等(1994)根据大地电磁测深资料认为,热海至热水塘一带地下深部7~27km存在1个岩浆囊。黎炜等(1998)根据水平形变测量资料研究发现,腾冲县城小西、马鞍山一带呈现的面膨胀现象,推测这一带地下可能有岩浆活动。楼海等(2002)根据上部地壳三维地震速度层析成像则认为,腾冲火山区的五合、勐连、团田一带存在深度5~12km的岩浆囊。叶建庆等(2003)根据观测到的震群分布和S波湮灭现象认为,腾冲打鹰山火山口以南地区的地壳上部深度14km内存在2个岩浆囊体。胡亚轩等(2007)根据水准测量及GPS观测成果,分析了腾冲第四纪以来的火山岩浆活动特征,认为该区深部岩浆体不很规则或有多个岩浆囊存在,岩浆的活动量远小于中等程度火山喷发的质量。赵慈平等(2006)利用温泉温度计算的相对地热梯度,推断该区现今地下深部存在3个岩浆囊,分别位于腾冲县城-清水一带,马站-曲石一带,五合-团田一带;并采用CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>气体分子对碳同位素地质温度计,估算了3个岩浆囊的温度(赵慈平等,2008a)。上述研究均显示腾冲地区现今地下深部可能存在活动的岩浆囊。

在火山活动或喷发的前期,高温岩浆和其它高温热物质沿断裂和火山通道上涌,加热所经过的围岩、土壤层和地下水,因而地下岩浆活动在地表温度变化上具有明显反映(薄立群和华仁葵,2003)。热红外遥感技术由于可以全天候低成本快速获取和捕捉区域地表温度变化这一重要信息,因而被广泛用于火山及岩浆活动引起的地热异常监测。

Rothery *et al.* (2005)利用Internet公开发布的MODIS热警报数据(thermal-alert data)研究了Ambrym, Bagana, Langila, Pago和Lopevi等地的火山活动性。Vaughan *et al.* (2008)等通过ASTER和MODIS影像监测到坦桑尼亚Oldoinyo Lengai火山喷发前的热异常,认为卫星遥感结合历史热活动监测数据可以用来预测未来火山喷发时间,从而减少引起的灾害损失。Miliareisis (2009)利用MODIS热红外影像研究了Afar Depression地区地震火山危机期间的地热异常,揭示了地热活动主要分布在北部和中部地区。季灵运等(2009)利用TM/ETM+和ASTER影像的热红外波段反演的地温,对长白山天池火山活动性进行了研究和监测,其结果与测震、GPS形变以及He同位素比值变化趋势具有较好的一致性。上述研究表明,利用MODIS等热红外遥感影像进行热异常研究和实时监测具有巨大潜力和优势。

目前,我国利用MODIS影像研究地下岩浆活动引起的地热异常的报道和研究还比较少。因此,本研究拟利用MODIS LST数据,以新生代地热活动强烈的腾冲地区为研究对象,对该区地下可能的岩浆囊及其分布与活动性进行探索和研究,为可能的地下深部岩浆活动与地热-构造活动的关系和规律研究提供卫星热红外遥感的依据。

## 2 区域地质背景

腾冲地块大地构造上位于青藏高原东南缘的怒江和密支那缝合带之间,是中特提斯怒江洋、新特提斯密支那洋相继发生俯冲消亡(Yin and Harrison, 2000;莫宣学和潘桂棠,2006),腾冲地块在燕山期与保山地块碰撞拼贴(钟大赉等,1998)、印度板块于喜马拉雅早期与腾冲地块发生碰撞(Searle, 1988;莫宣学等,2003; Chung *et al.*, 2005; Mo *et al.*, 2007),引发块体发生大规模旋转、逃逸、走滑(Tapponnier and Molnar, 1976; Tapponnier *et al.*, 1982)形成青藏高原东南缘大型走滑变形构造的重要组成部分,剪切构造变形强烈,岩浆活动频繁,以及异常高温地热发育一直受到众多地质学家的关注。新生代时腾冲地块,由于喜马拉雅期印度板块向北俯冲-碰撞的强烈挤压导致其东部怒江缝合带(高黎贡带)和西部的那邦韧性剪切带(实皆断裂的北沿部分)向南西旋转、挤

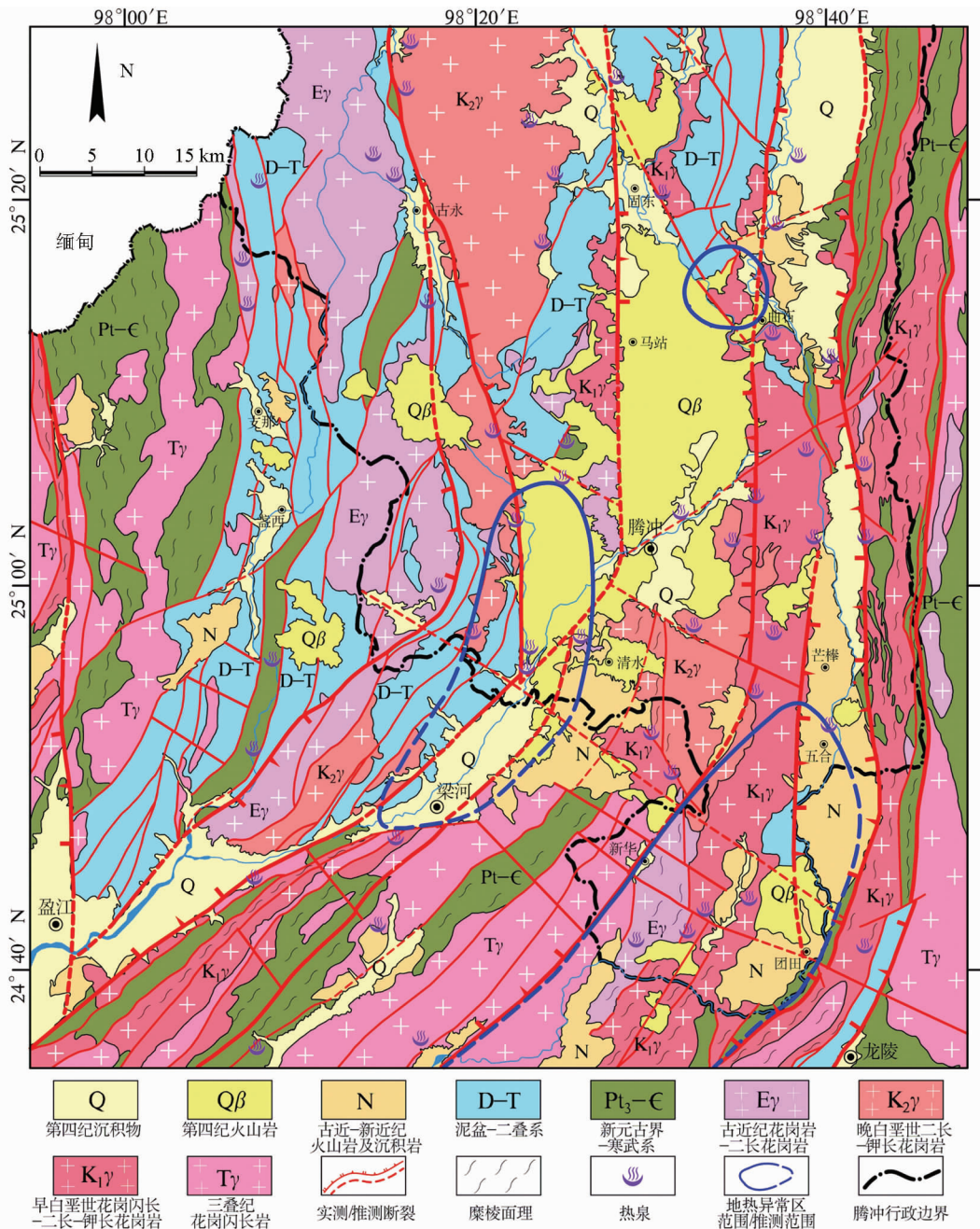


图1 腾冲地区地质及地热构造图

Fig. 1 The geological and geothermal map of Tengchong area

出,形成东部以高黎贡弧形韧性剪切带为界,西部以密支那缝合带东侧的那帮韧性剪切带为界,中部发育新生代断陷盆地为特征的构造格局(图1)。

腾冲地块变质基底主要由新元古代-早中生代绿片岩相-角闪岩相花岗岩片麻岩、角闪岩、混合岩、大理岩和片岩组成,动力变质特征明显,剪切构造变形强烈,特别是在东部的高黎贡右行韧性剪切带和西部那邦韧性剪切带中表现尤为明显(云南省地质局,1982<sup>①</sup>)。新生代地层以沉积角度不整合覆盖在绿片岩相-角闪岩相元古代-早中生代变沉积岩、岩浆

岩之上,沉积地层以砂岩、泥质岩、泥质灰岩夹薄煤层为特征,而侏罗-白垩纪地层的缺失显示这一时期处于隆升阶段,这与腾冲地块与保山-孟连地块的挤压碰撞隆升时期是一致的。由于经历了中特提斯洋、新特提斯洋的俯冲-碰撞造山作用,形成腾冲地块内燕山期和喜山期两次大规模的火山-岩浆活动,出露面积约占全区面积的50%,中、新生代侵入

① 云南省地质局. 1982. 区域地质调查报告(1/20万腾冲幅和盈江幅). 12-217

岩、火山岩及新生代北北东-近南北向陆相火山-沉积断陷盆地相间分布于大盈江、龙川江等主要断裂之间(图1)。

### 3 数据与方法

#### 3.1 MODIS LST 数据

中分辨率成像光谱仪 MODIS(MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer)是美国对地观测系统(EOS)中 TERRA 和 AQUA 卫星搭载的主要传感器之一。2 颗星相互配合每 1~2d 可重复观测整个地球表面,得到 36 个波段的观测数据。MODIS 标准数据产品根据内容的不同分为 0 级、1 级数据产品,在 1B 级数据产品之后,划分 2~4 级数据产品。地表温度/地表发射率全球月平均数据产品 MOD11C3 是 MODIS 的三级数据产品,该数据集是在全球日数据产品 MOD11C1 的基础上,利用晴空条件下获得的数据合成得到的月 LST 平均数据。LST 日数据利用 MODIS 的 31 和 32 波段,采用推广的分裂窗算法反演得到(Wan and Dozier, 1996)。MOD11C3 提供了每个像素点的温度和发射率值,温度单位为 K,精度为 1K,数据资料的时间覆盖为 32d,空间范围为全球,空间分辨率为  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  经纬度 CMG 格点,资料分为日间温度和夜间温度;每个 LST 产品还包括有观测角信息等 16 个科学数据集(USGS, 2011)。LST 是地球表面能量平衡的一个很好指标,它是区域和全球尺度地表过程中的一个关键因子,因此,LST 广泛应用于土壤水分状况、森林火灾监测、地热位置识别,以及石油和矿产资源寻找等领域(Westermann *et al.*, 2010)。

#### 3.2 研究方法

MODIS LST 是平均地表温度指标,主要受太阳辐射、岩浆活动及下垫面属性等因素影响。因此,为了减小白天太阳辐射引起的地表升温对地热异常的掩盖,本研究选取夜间 LST 数据进行地温分析和异常解释。此外,为了消除偶然的地表温度变化引起的误差,本文采用 2001 年 3 月至 2011 年 3 月共 132 个月的长时间序列 MODIS 月平均 LST 为数据源。

利用研究区 11 年 132 个月的 LST 数据计算的月平均地表温度,运用空间分析方法、密度分割方法分别绘制等温线和圈定地温异常范围,进而推断腾冲地热活动区地下可能的岩浆囊空间分布特征。根据地温异常区多年年内及年际间地温变化特征,分析其随时间变化的规律,研究地下不同岩浆囊活动的时间演化特征与活动性。

### 4 结果与讨论

#### 4.1 地温异常的空间分布

腾冲地区 11 年 132 个月(2001.3~2011.3)的 LST 数据计算的月平均地表温度(图 2a),以及运用空间分析方法、密

度分割方法分别绘制的等温线和圈定的地温异常范围(图 2b)的结果显示,研究区地表温度从南至北逐渐降低,其中北部、东北边界区地温最低,这与该地区地势地貌为海拔 3000m 以上高山区,总体以北高南低的箕状地形地貌特征有关。特别是,从图中可以看出,研究区内存在 3 个明显的地温异常区。第 1 个地温异常区位于五合-新华-蒲川-团田一带,面积约为 537km<sup>2</sup>,月平均最高地表温度 14.4℃;第 2 个地温异常区位于朗蒲-热海-马鞍山地区,呈南北向带状分布,面积约为 226km<sup>2</sup>,月平均最高地表温度 12.8℃;第 3 个地温异常区位于马站-曲石之间,面积约为 28km<sup>2</sup>,月平均最高地表温度 10.6℃。从等温线的形态及伸展方向看,第 1、2 个地温异常区似乎相连。其形态大体是北西-南东方向延伸,这可能与局部北西向断裂构造的影响有关,但在更大区域范围第 1、2 个地温异常区则呈北东方向展布,并且与高黎贡近南北向构造转为北东-南西向构造的区域大地构造格局是一致的。根据地温异常推断,腾冲火山区地下现今可能存在 3 个岩浆囊,它们作为额外热源干扰了正常的地表温度,对应于地表所发现的 3 处地温异常区(图 2b)。

#### 4.2 地温异常的时间活动性

腾冲地区 11 年的各个月份平均地表温度(图 3)的研究结果表明,不同月份 3 个地温异常区的分布范围大致相同,但也存在一定的变化。五合-新华-蒲川-团田地温异常区分布范围最广,在年内各月份的温度均高出周围许多,地温异常非常明显,但年内温度变化似乎不太明显,这可能与显示的色彩拉伸度有关。朗蒲-热海-马鞍山地温异常区地温异常也非常明显,年内的温度变化较大,并具有周期性的变化:1~4 月份地温异常明显呈块状分布,温度较低;5 月份开始异常区由块状分布变为条带状分布,异常面积缩小,温度不断升高;7~8 月份异常区温度最高,地温异常也最为明显;9 月开始异常区温度逐渐下降,并由条带状分布转变为向块状分布;11~12 月异常区温度地温异常呈较为明显的块状分布。马站-曲石地温异常区的周期性变化也与之相似,1~4 月份异常区地温与周边温度相近,地温异常并不明显;5 月份开始温度逐渐升高,7~8 月份达到最大,地温异常表现尤为突出;9 月开始下降,11~12 月份异常区温度再次接近周围温度,地温异常变的不明显。值得注意的是,1~2 月份五合-芒棒及其以北地区存在一个较为明显的地温异常区,但之后逐渐变得不明显,从 11 月份开始该异常区又再次开始显现,到 12 月份该区再次呈现为地温异常区。

腾冲地区 3 个地温异常区的地表温度具有随时间周期性的变化特征,从其年内地表温度分析可以看出,3 个异常区在不同月份的地温变化趋势基本一致,均在 5~6 月份和 8~9 月份出现 2 个温度峰;而同期腾冲地区平均气温(中国气象科学数据共享服务网)在不同月份的变化趋势与 3 个地温异常区有明显的差异(图 4),且未出现 2 个明显的峰值,这说明地温异常可能与该区地下岩浆物质的活动有关。此



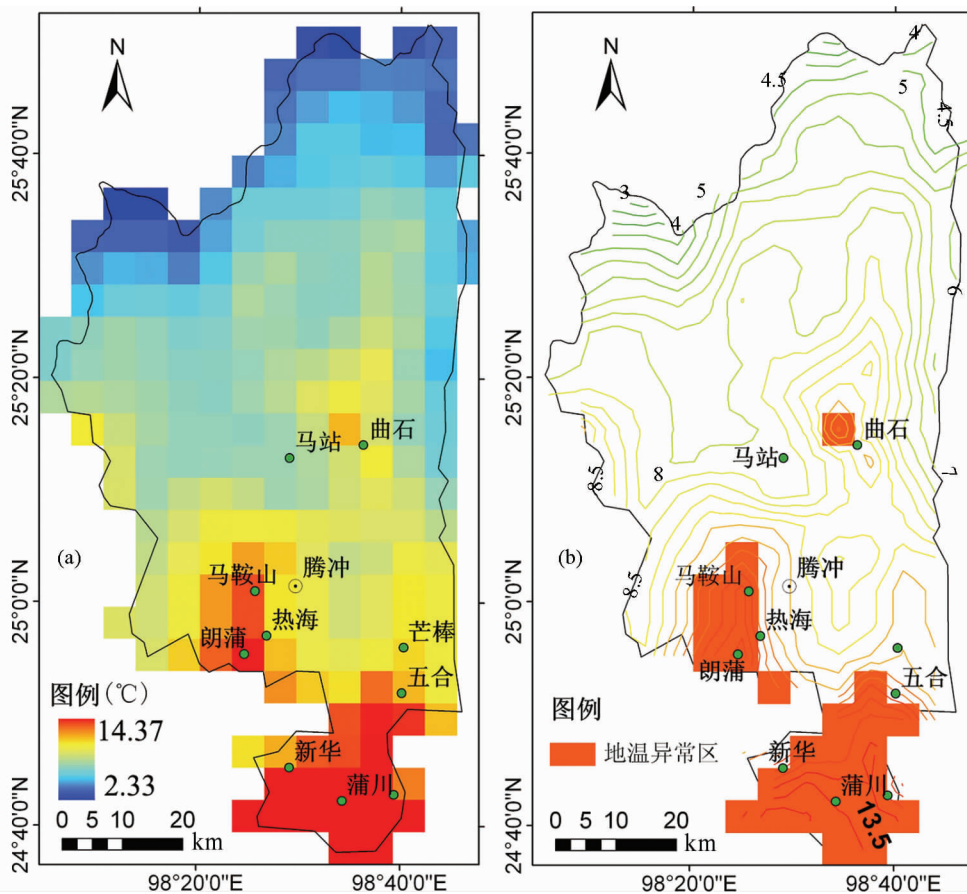


图2 腾冲地区 132 个月月平均地表温度图(a)及等温线与地温异常分布图(b)

Fig. 2 The 132-month average LST map (a) and the isotherm map and geothermal anomalies (b) of Tengchong

外,从区域构造角度分析,朗蒲-热海-马鞍山、五合-新华-蒲川-团田地温异常区均位于近南北向转为北东向弧形构造带的转折部位的次级大盈江断裂、龙川江断裂带的上盘,马站-曲石地温异常区是朗蒲-热海-马鞍山地温异常区的北延,而这 2 个断裂带在新生代晚期均表现为伸展-走滑犁式正断层,属同一构造应力场作用的产物(图 1)。因此,综合 3 个异常区的地温变化趋势及所处构造背景,认为其地下岩浆囊有可能是联通的,但要确认仍需进一步的深入研究。

3 个地温异常区的 10a 平均地表温度统计结果(图 5)显示,五合-新华-蒲川-团田地温异常区、马站-曲石地温异常区的变化趋势基本一致,而朗蒲-热海-马鞍山地温异常区则存在较大的波动,且大于同期气温的变幅。五合-新华-蒲川-团田地温异常区的年平均最高温、最低温分别为 13.20°C (2009)、12.62°C (2007),变幅为 0.58°C;朗蒲-热海-马鞍山地温异常区的年平均最高温、最低温分别为 12.01°C (2009)、11.01°C (2004),变幅为 1°C;马站-曲石地温异常区的年平均最高温、最低温分别为 10.75°C (2002)、10.04°C (2010),变幅为 0.71°C;而腾冲年均最高、最低气温分别为 16.13°C (2009)、15.53°C (2004),变幅为 0.60°C。这说明,异常区多年平均地温的变化不仅受气象因素影响,更受来自地

下岩浆活动的控制。总之,3 个异常区年际及年内的地温变化均表明,五合-新华-蒲川-团田、马站-曲石地温异常区的变化趋势稳定一致,而朗蒲-热海-马鞍山地温异常区的变化波动较大,这可能反映了其地下岩浆地热系统的开放性和活动性更高,地表地下水补给的流量变化更大。

#### 4.3 讨论

腾冲地区的岩浆-地热-火山活动是否存在深部岩浆囊一直是众多研究者关注的重要问题。阚荣举等(1996)认为腾冲地区是在现代板块构造运动强烈挤压及俯冲作用下,上地幔热物质通过深部通道上涌,形成上地壳岩浆囊和地表火山群。胡亚轩等(2003,2007)、胡亚轩和王雄(2009)对腾冲火山岩区垂直变形的研究显示,该区可能存在多个岩浆囊。地球物理探测和地球化学结果也表明,腾冲地区地壳浅部可能存在幔源岩浆侵入活动,它不仅为该区现代地热流体活动提供了强大的热源,而且伴有强烈的幔源气体释放(佟伟和章铭陶,1989; Bai *et al.*, 1994; 上官志冠等, 2000)。腾冲地区中新世至第四纪发生了强烈的中基性岩浆喷发活动,堆积了厚厚的熔岩和火山碎屑岩。虽然火山岩分布较广,但主要集中在曲石-马站-腾冲-清水一带和五合-团田-蒲川一带(皇

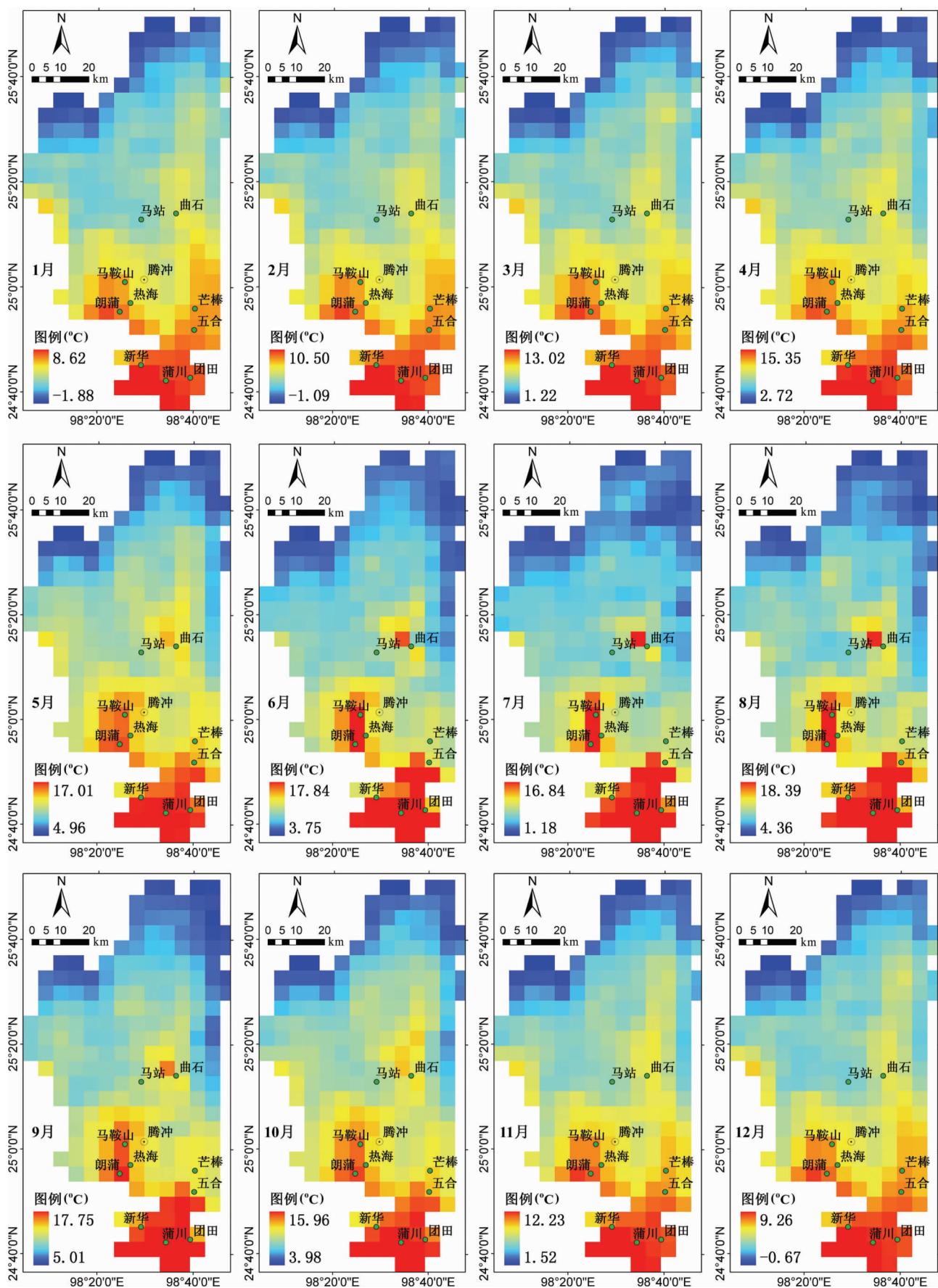


图3 腾冲地区11年内各月平均地表温度图

Fig. 3 The 12-month average LST map in 11 years of Tengchong

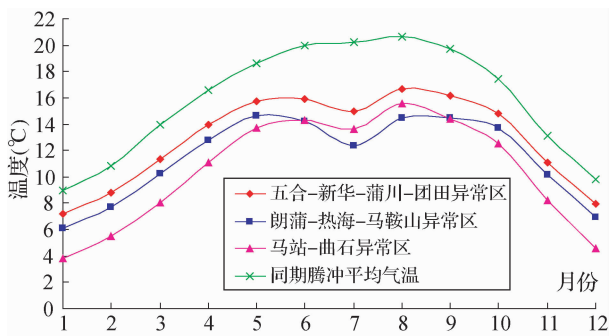


图4 腾冲地温异常区多年月平均地表温度

Fig. 4 The monthly average LST in the three geothermal anomalies of Tengchong

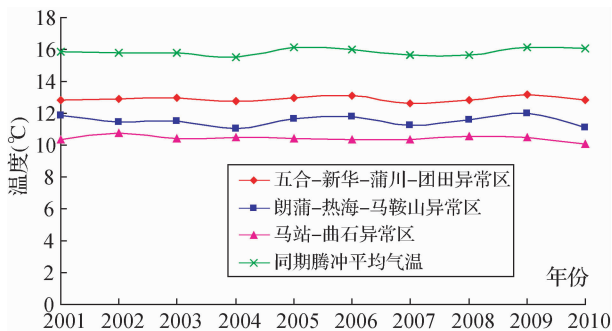


图5 腾冲地温异常区多年年平均地表温度

Fig. 5 The annual average LST in the three geothermal anomalies of Tengchong

甫岗和姜朝松,2000),而3个地温异常区恰位于其中,这表明腾冲地区地温异常主要受新生代岩浆活动的控制,较大规模的喷发活动意味着地下岩浆囊体可能较大,其作为地下热源对地温的影响也较大(赵慈平等,2006)。

地温除了与岩浆活动有关外,还受当地气象、海拔高程及土地利用类型等因素影响。由于缺乏卫星过境时(晚上10:30)的同步气温数据,目前本文还无法定量确定气温对地温异常的贡献,但从已有数据分析结果看,异常区地温变化与气温之间并无明显相关关系,这可能是地温变幅较大而掩盖了气温的影响。地理位置决定了接收的太阳辐射量,在北半球的北回归线(23.5°N)以北,一年内太阳经过同一地点一次,因此太阳辐射只有一次峰值;而以南地区,太阳经过同一地点2次,辐射量也将出现2次峰值(陈顺云等,2009)。腾冲地区位于北回归线以北(图1),而异常区地温却出现了2个峰值(图4),这说明异常区地温受到了太阳辐射以外因素的干扰。自然条件下温度随海拔增加而降低,研究区内马鞍山(~1700m)、热海(~1800m)及朗蒲(~1650m)等地附近的高程均要高于腾冲县城(~1630m),而其地温却高于腾冲县城(图2a),这表明外界因素扰动了正常的垂直气温梯度。不同土地利用类型对地区气温贡献也不同,Chen *et al.*

(2006)研究了植被、水体、建筑用地、城郊开发区及半裸地等5种土地类型对当地气温的贡献,结果显示,建筑用地对气温增温贡献最大,其次为城郊开发区及半裸地。因此,在自然状况下,城区地温应该比周围其他土地利用类型的要高,但从图2a可以看出,腾冲县城的地温并不比周边高,这说明土地利用类型对异常区地温的影响也较小。综上分析,本文发现的3个地温异常区主要是由岩浆活动引起的,因此不难推断其地下深部可能存在3个岩浆囊。

腾冲地区现今岩浆囊的分布也是学者们研究的热点。赵慈平等(2006)根据腾冲地区及周缘温泉温度计算的相对地热梯度,发现该地区有3处相对地热梯度大于100°C的高热异常区,并推断与之对应有3个岩浆囊。其结果与地壳速度结构、地壳电性结构、幔源物质释放、地壳形变及地震活动等6种资料也吻合的较好。李成波等(2007)对腾冲火山地热活动区的GPS形变特征研究,也发现最大面膨胀量和最大剪应变位于马站-曲石,腾冲-热海及五合-团田附近,据此推测其下深部应存在岩浆房。从图6可以看出,本研究推断的岩浆囊位置与赵慈平等(2006)等前人的研究大致相同。本文推断的马站-曲石岩浆囊面积较赵慈平等(2006)圈定的要小,而另外2处即五合-新华-蒲川-团田地区、朗蒲-热海-马鞍山地区则均较赵慈平等(2006)圈定的大。究其原因,是由于研究者采用的数据与方法不同而造成的,赵慈平等(2006)的研究结果是以159个温泉温度及水化学数据为基础,通过空间插值方法生成地热梯度图,进而推断岩浆囊分布。从实际采样来看,无论采用何种采样方法,所采样品仅限于温泉出露地方,而温泉的出露除与地下岩浆活动有关外,还受当地地形地貌、地质构造、岩石地层特征以及地下水运移等因素控制,所以温泉出露并非均匀分布,岩浆囊上方没有温泉出露的区域则无法采样而被忽略。本文的结果是以11年即132个月的夜间MODIS LST数据为基础,采用密度分割方法识别地温异常区,然后结合地形地貌、地质构造等研究基础进行综合分析、推断而得出。热红外遥感技术可以在不同的时间和空间尺度上发现地温异常,具有准确、直观、快速的特点,长时间序列的平均LST数据则可以最大限度地消除系统误差,降低随机及偶然事件引起的地温异常影响,特别是夜间LST数据则尽可能的降低了白天太阳辐射的干扰。由于本文采用的MODIS LST数据的空间分辨率约为5.3km,因此计算出的岩浆囊面积误差相对较大,但3个岩浆囊的位置和相对大小则较为可靠。

腾冲地区岩浆囊的活动性更是学者们关注的焦点。本研究根据3个异常区内及年际间的地温变化幅度(图4、图5)可以推测,朗蒲-热海-马鞍山地下岩浆囊活动性可能最强。其他研究者也用不同方法研究了该地区地下岩浆囊的活动性。叶建庆等(1998, 2003)在腾冲热海及马鞍山一带观测到的微小地震活动,主要集中分布在马鞍山和热海一带,显示这一地区的构造-岩浆-地热活动现今仍比较活跃,而且地震群活动主要围绕在可能的岩浆囊体周围,与岩浆活动







- Tengchong volcano region. *Seismology and Geology*, 31(4):655 – 663 (in Chinese with English abstract)
- Huangfu G and Jiang CS. 2000. Research on Tengchong Volcano. Kunming: Scientific and Technology Publisher of Yunnan, 1 – 477 (in Chinese)
- Ji LY, Xu JD, Lin XD and Luan P. 2009. Application of satellite thermal infrared remote sensing in monitoring changbaishan tianchi volcano activity. *Seismology and Geology*, 31(4):617 – 627 (in Chinese with English abstract)
- Jiang CS, Wang SJ, Zhou RQ, Zhou ZH, Long XF and Wang Y. 2000. Dynamics study of tectonics on Tengchong volcano activity. *Journal of Seismological Research*, 23(2):179 – 187 (in Chinese with English abstract)
- Kan RJ, Zhao JM and Kan D. 1996. The tectonic evolution and volcanic eruption in Tengchong volcanogeothermic region. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 17(4):28 – 33 (in Chinese with English abstract)
- Li CB, Shi XJ, Liu SS, Zhao CP, Shi FQ, Shao DS and Jiang CS. 2007. Research on the character of the GPS deformation in the Tengchong volcano area. *Progress in Geophysics*, 22(3):765 – 770 (in Chinese with English abstract)
- Li HZ and Yang CB. 2000. Underground fluid study in Tengchong hot sea. *Journal of Seismological Research*, 23(2):231 – 238 (in Chinese with English abstract)
- Li W, Liu YQ and Shao DS. 1998. Primary study of horizontal deformation in Tengchong volcano area. *Journal of Seismological Research*, 21(4):362 – 373 (in Chinese with English abstract)
- Lou H, Wang CY, Huangfu G and Qin JZ. 1998. Three-dimensional seismic velocity tomography of the upper crust in Tengchong volcanic area, Yunnan Province. *Acta Seismologica Sinica*, 24(3):243 – 251 (in Chinese with English abstract)
- Miliareis GC. 2009. Regional thermal and terrain modelling of the Afar depression from MODIS multi-temporal monthly night LST data. *International Journal of Remote Sensing*, 30(9):2429 – 2436
- Mo XX, Zhao ZD, Deng JF, Dong GC, Zhou S, Guo TY, Zhang SQ and Wang LL. 2003. Response of volcanism to the India-Asia collision. *Earth Science Frontiers*, 10(3):135 – 148 (in Chinese with English abstract)
- Mo XX and Pan GT. 2006. From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet Plateau: Constrained by tectono-magmatic events. *Earth Science Frontiers*, 13(6):43 – 51 (in Chinese with English abstract)
- Mo XX, Hou ZQ, Niu YL, Dong GC, Qu XM, Zhao ZD and Yang ZM. 2007. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: Evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet. *Lithos*, 96:225 – 242
- Rothery DA, Coppola D and Sanders C. 2005. Analysis of volcanic activity patterns using MODIS thermal alerts. *Bulletin of Volcanology*, 67(6):539 – 556
- Searle MP. 1988. Structural evolution and sequence of thrusting in the High Himalayan, Tibetan-Tethys and Indus Suture zones of Zaskar and Ladakh, Western Himalaya; Reply. *Journal of Structural Geology*, 10:130 – 132
- Shangguan ZG, Bai CH and Sun ML. 2000. The characteristics of the modern released magmatic gas from mantle in Rehai, Tengchong. *Science in China (Series D)*, 30(4):407 – 414 (in Chinese)
- Tapponnier P and Molnar P. 1976. Slip-line field theory and large scale continental tectonics. *Nature*, 264:319 – 324
- Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R, Le Dain AY and Cobbold P. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia; New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10:611 – 616
- Tong W and Zhang MT. 1989. *Geothermal in Tengchong*. Beijing: Science Press, 37 – 100, 248 – 258 (in Chinese)
- US Geological Survey (USGS). 2011. MOD11C3, MODIS/Terra Land Surface Temperature and Emissivity Monthly L3 Global 0.05Deg CMG. Available online at: [https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis\\_products\\_table/land\\_surface\\_temperature\\_emissivity/monthly\\_l3\\_global\\_0\\_05deg\\_cmg/mod11c3](https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products_table/land_surface_temperature_emissivity/monthly_l3_global_0_05deg_cmg/mod11c3) (accessed 5 May 2011)
- Vaughan RG, Kervyn M, Realmuto V, Abrams M and Hook SJ. 2008. Satellite measurements of recent volcanic activity at Oldoinyo Lengai, Tanzania. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 173:196 – 206
- Wan Z and Dozier J. 1996. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(4):892 – 905
- Westermann S, Langer M and Boike J. 2010. Spatial and temporal variations of summer surface temperatures of high-arctic tundra on Svalbard: Implications for MODIS LST based permafrost monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 115(3):908 – 922
- Ye JQ, Cai SP, Liu XJ, Wang SJ and Cai MJ. 2003. Characteristics of earthquake cluster activity in Tengchong volcanic area. *Seismology and Geology*, 25(Suppl.):128 – 137 (in Chinese with English abstract)
- Ye JQ, Chen MG, Liu XJ, Cai SP, Cai MJ, Qin JZ, Huangfu G and Liu ZY. 1998. Observation of micro-shocks in the areas of tengchong volcano (I). *Journal of Seismological Research*, 21(4):343 – 348
- Yin A and Harrison TM. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28:211 – 280
- Zhao CP, Ran H and Chen KH. 2006. Present-day magma chambers in Tengchong volcano area inferred from relative geothermal gradient. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6):1517 – 1528 (in Chinese with English abstract)
- Zhao CP, Jiang CS, Zhao H and Ran H. 2008a. Study of the present-day temperature of magma chamber in Tengchong. *The Proceedings of the Fifth National Conference on Volcanology*, 152 – 153 (in Chinese)
- Zhao CP, Ran H and Zhang YX. 2008b. The mantle uplift of Tengchong volcanic area: The evidence from the characteristics of the release of helium from the mantle source. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(Suppl.1):29 – 30 (in Chinese with English abstract)
- Zhong DL *et al.* 1998. *Paleotethysides in Westem Yunnan and Sichuan, China*. Beijing: Science Press, 9 – 215 (in Chinese)

### 附中文参考文献

- 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. *科学通报*, 39(4):344 – 347
- 薄立群, 华仁葵. 2003. 长白山火山热红外卫星遥感监测原理与框架设计. *地质灾害与环境保护*, 14(1):38 – 43
- 陈顺云, 马瑾, 刘培洵, 刘力强. 2009. 中国大陆地表温度年变基准场研究. *地球物理学报*, 52(9):2273 – 2281
- 胡亚轩, 施行觉, 王庆良, 张永志, 赵慈平, 施发奇, 邵德晟. 2003. 腾冲火山区地表垂直形变分析. *大地测量与地球动力学* 23(2):37 – 41
- 胡亚轩, 王庆良, 崔笃信, 赵慈平, 邵德晟, 施发奇. 2007. 用形变资料分析腾冲火山区岩浆的活动特征. *地震研究*, 30(2):164 – 168
- 胡亚轩, 王雄. 2009. 应用形变和重力资料分析腾冲火山区岩浆的活动特征. *地震地质*, 31(4):655 – 663
- 皇甫岗, 姜朝松. 2000. *腾冲火山研究*. 昆明:云南科技出版社, 1 – 417
- 季灵运, 许建东, 林旭东, 栾鹏. 2009. 利用卫星热红外遥感技术监测长白山天池火山活动性. *地震地质*, 31(4):617 – 627
- 姜朝松, 王绍晋, 周瑞琦, 周真恒, 龙晓帆, 王瑜. 2000. 腾冲火山活动构造动力学研究. *地震研究*, 23(2):179 – 187
- 阙荣举, 赵晋明, 阚丹. 1996. 腾冲火山地热区的构造演化与火山喷发. *地震地磁观测与研究*, 17(4):28 – 33

- 黎炜, 刘玉权, 邵德晟. 1998. 腾冲火山区水平形变初探. 地震研究, 21(4): 362-373
- 李成波, 施行觉, 刘苏苏, 赵慈平, 施发奇, 邵德晟, 姜朝松. 2007. 腾冲火山区的 GPS 形变特征. 地球物理学进展, 22(3): 765-770
- 李恒忠, 杨存宝. 2000. 腾冲热海地下流体观测研究. 地震研究, 23(2): 231-238
- 楼海, 王椿镛, 皇甫岗, 秦嘉政. 2002. 云南腾冲火山区上部地壳三维地震速度层析成像. 地震学报, 24(3): 243-251
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 董国臣, 周肃, 郭铁鹰, 张双全, 王亮亮. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应. 地学前缘, 10(3): 135-148
- 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. 地学前缘, 13(6): 43-51
- 上官志冠, 白春华, 孙明良. 2000. 腾冲热海地区现代幔源岩浆气体释放特征. 中国科学(D辑), 30(4): 407-414
- 佟伟, 章铭陶. 1989. 腾冲地热. 北京: 科学出版社, 37-100, 248-258
- 叶建庆, 蔡绍平, 刘学军, 王绍晋, 蔡明军. 2003. 腾冲火山地震群的活动特征. 地震地质, 25(增刊): 128-137
- 叶建庆, 陈敏恭, 刘学军, 蔡绍平, 蔡明军, 秦加政, 皇甫岗, 刘祖荫. 1998. 腾冲火山地区微震观测(I). 地震研究, 21(4): 343-348
- 赵慈平, 冉华, 陈坤华. 2006. 由相对地热梯度推断的腾冲火山区现存岩浆囊. 岩石学报, 22(6): 1517-1528
- 赵慈平, 姜朝松, 赵恒, 冉华. 2008a. 腾冲火山岩浆囊现今温度研究. 全国第五次火山学术研讨会论文集, 152-153
- 赵慈平, 冉华, 张云新. 2008b. 腾冲火山区的地幔隆升: 来自幔源氦释放特征的证据. 矿物岩石地球化学通报, 27(增1): 29-30
- 钟大赉等. 1998. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社, 9-215