腾冲新生代火山区温泉 CO_2 气体排放通量研究*

成智慧 郭正府** 张茂亮 张丽红

CHENG ZhiHui, GUO ZhengFu**, ZHANG MaoLiang and ZHANG LiHong

中国科学院地质与地球物理研究所,新生代地质与环境重点实验室,北京 100029

Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, *China*

2011-12-11 收稿, 2012-02-01 改回.

Cheng ZH, Guo ZF, Zhang ML and Zhang LH. 2012. CO_2 flux estimations of hot springs in the Tengchong Cenozoic volcanic field, Yunnan Province, SW China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4):1217 – 1224

Abstract Recent research results have indicated that, beside volcanic eruption periods, dormant periods in the intermittent between the volcanic activities can emit a large amount of the greenhouse gases into atmosphere. In the intermittent between volcanic eruptions, greenhouse gases are erupted from the volcanic eruptive fields in the forms of fumaroles, hot springs, soil micro-seepage and so on. Tengchong volcanic and geothermal system is one of the most important Cenozoic volcanic activity fields in China whereas the estimates of the greenhouse gases emitted from Tengchong have been poorly understood. Using a new apparatus named digital bubble flowmeter, we have measured the flux of bubbles in hot springs of the Cenozoic volcanic field in Tengchong. The estimated result shows that the flux of CO_2 from hot springs of Tengchong is up to $3.58 \times 10^3 t \cdot a^{-1}$, which could be compared to the amount of the Bassoleto hydrothermal area in Siena, Italy. Based on the characteristics and distribution of the fluxes of CO_2 estimated, the hot springs in Tengchong can be divided into two areas: south area and north area. The emission of CO_2 in the south area is apparently higher than that in the north one and the largest one is located in Rehai area in the south area. The formation of CO_2 emitted from the hot springs is controlled by several factors, such as magma chamber temperature, fault penetrating, underground water circulation and country rock compositions. The flux of CO_2 is mainly controlled by fault activities in the north area whereas the flux of CO_2 in the south area is dominated by the magma chamber temperatures (e. g. Rehai). The magma chamber is thought to be one of the sources of CO_2, as well as it may contribute the hot springs with large amount of heat. However, fault activities may act as a pathway of the hot springs during their uprise.

Key words Hot spring; Greenhouse gases; CO_2 flux; Tengchong Cenozoic volcanic field (SW China)

摘 要 近期研究表明,不仅火山喷发期会向当时的大气圈输送大量的温室气体,火山间歇期同样会释放大量的温室气体。在火山活动间歇期,火山区主要以喷气孔、温(热)泉以及土壤微渗漏等形式向大气圈释放温室气体。腾冲是我国重要的新生代火山区,同时也是重要的水热活动区,那里出露大量的温泉,然而目前未见腾冲火山区温泉气体排放通量的研究报道。本文利用数字皂膜通量仪测量了腾冲新生代火山区温泉中 CO_2 的排放通量。研究结果表明,腾冲新生代火山区温泉向当今大气圈输送的 CO_2 通量达 $3.58 \times 10^3 t \cdot a^{-1}$,相当于意大利锡耶纳 Bassoleto 地热区温泉中 CO_2 的排放规模。腾冲火山区温泉的 CO_2 释放通量主要受深部岩浆囊、断裂分布、地下水循环、围岩成分等多方面因素的影响。本文根据温泉中 CO_2 的排放特征,将腾冲温泉分为南北两区,南区温泉 CO_2 通量远高于北区的温泉,热海地热区的通量为腾冲 CO_2 通量的最大值。在北温泉区,CO_2 通量主要受控于断裂的分布;而在南温泉区,除受到断裂控制外,热海地热区底部的岩浆囊及其与围岩的相互作用成为 CO_2 气体的重要物质来源,同时高温的岩浆囊为温泉及 CO_2 的形成提供了重要热源。

关键词 温泉;温室气体;CO_2通量;腾冲新生代火山区

中图法分类号 P317

---

* 本文受国家自然科学基金委重大国际合作研究项目(41020124002)和国土资源部深部探测技术与实验研究专项课题(201011060)联合资助.

第一作者简介: 成智慧,女,1987 年生,硕士生,矿物学、岩石学、矿床学专业,E-mail: chengzhihui@mail.iggcas.ac.cn

** **通讯作者**:郭正府,男,1963 年生,研究员,博士生导师,火山学专业,E-mail :zfguo@mail.iggcas.ac.cn

1 引言

火山是地球深部碳排放的重要通道(Hilton *et al.*, 2002; Oppenheimer *et al.*, 2003)。据统计,全球火山每年向大气圈排放的 CO_2 总量约为 3.67×10^8t,其中陆地火山的 CO_2 排放通量约为 2.42×10^8t · a^{-1}(Mörner and Etiope, 2002)。在火山喷发期,火山活动以喷发柱的形式向大气圈排放温室气体;在火山活动的间歇期,火山区温室气体的排放形式包括喷气孔脱气、温泉脱气和土壤微渗漏等(Granieri *et al.*, 2010)。尽管火山活动间歇期的温室气体排放强烈程度较弱,但是间歇期持续时间更长,温室气体排放面积更大。因此,在间歇期火山区对大气圈温室气体含量增加的贡献同样尤为重要(郭正府等,2010; 张茂亮等,2011b)。目前国内火山区温室气体排放的研究程度较低,亟需全面系统地开展相关工作。

腾冲火山区位于青藏高原东南缘的腾冲微板块(上官志冠等,2000),东部以及南部边界为高黎贡剪切带所限,西侧为 NE-SW 向的 Sagaing 走滑断层,北部与青藏高原相接(Wang *et al.*, 2008)。新生代以来,印度板块与欧亚板块发生碰撞,导致本区经历了复杂的构造演化历史。断裂多为南北走向或北东-南西走向,包括梁河断裂、大盈江断裂、固东-腾冲断裂等(皇甫岗和姜朝松, 2000)。腾冲火山区内出露的地层主要为元古界高黎贡山群变质岩、二叠系和三叠系碳酸盐岩、新近系和第四系堆积物等(Zhu *et al.*, 1983; 皇甫岗

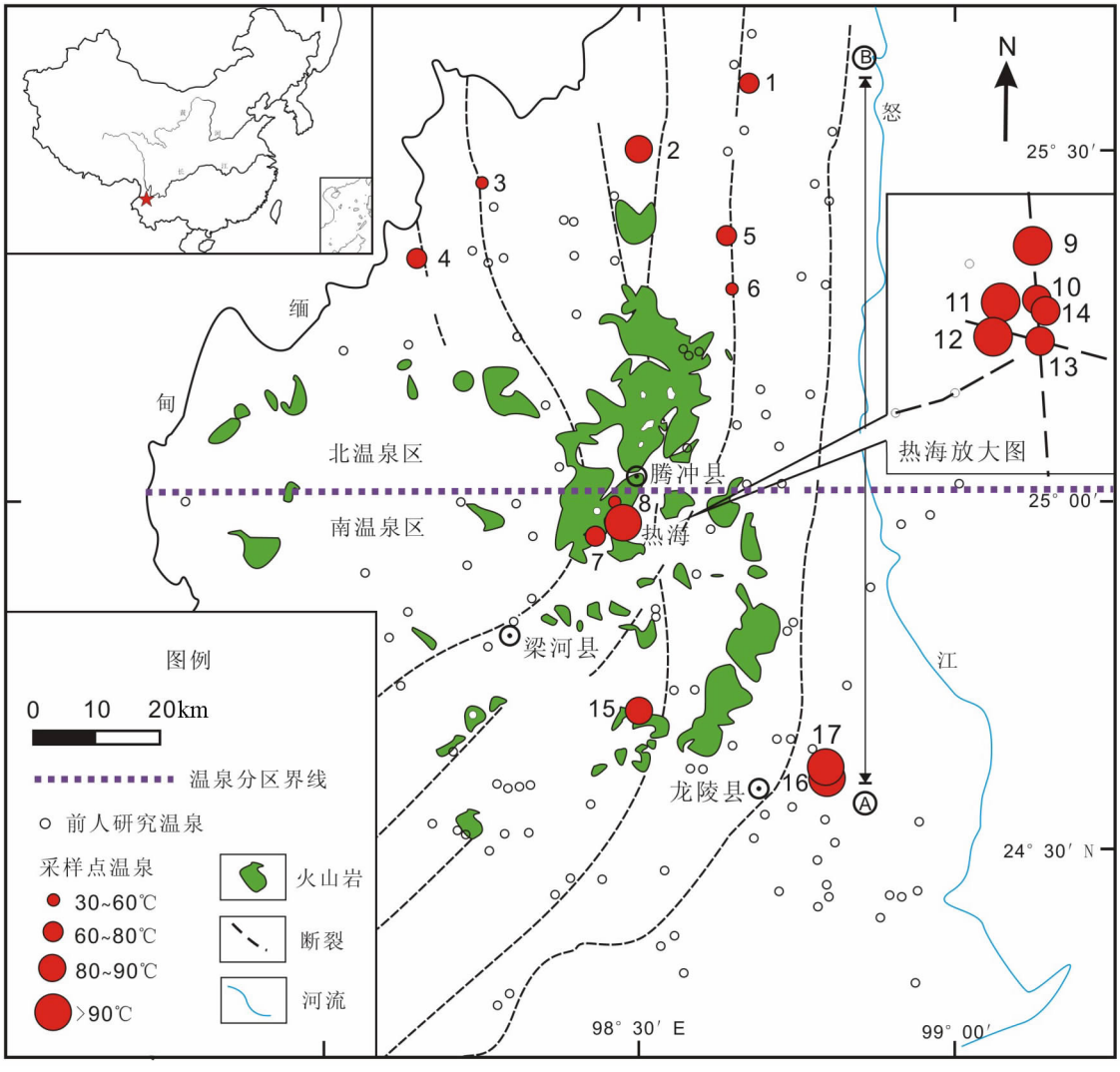


图 1 腾冲新生代火山区温泉及采样点分布图(据皇甫岗和姜朝松,2000;赵慈平,2008)

图中数字 1-17 所指示的温泉名称见表 1 和表 2

Fig. 1 Simplified map showing the distribution of hot springs in Tengchong Cenozoic volcanic area (modified after Huangfu and Jiang, 2000; Zhao, 2008)

Hot springs sampled in this study are marked by Numbers 1 to 17, and their names are shown in Table 1 and Table 2

和姜朝松,2000)。

腾冲新生代火山活动强烈,主要喷发活动可分为四期(皇甫岗和姜朝松,2000)。第一期为上新世玄武岩,在整个腾冲火山区均有分布,是四期喷发活动中分布最广泛的一期火山活动,岩性主要为块状的玄武岩和气孔状玄武岩;第二期为早更新世酸性火山岩,其分布仅次于第一期火山岩,广泛分布于整个腾冲火山区,岩性以安山质英安岩和英安质安山岩为主;第三期为晚更新世基性火山岩,主要分布于腾冲-马站盆地,主要岩性为橄榄玄武岩;第四期为全新世基性火山岩,主要分布于腾冲-马站盆地的黑空山、打莺山和马鞍山三座火山,主要岩性为安山玄武岩和玄武安山岩(樊祺诚等,1999;Wang *et al.*, 2006;郭正府等,2011)。

2 腾冲新生代火山区温泉的分布特征

腾冲火山区南北长 111km, 东西宽 60km, 在约 5690km^2 的空间范围内,总计有 62 个水热活动区(图 1),平均每 100km^2 分布着一个水热活动区(佟伟和章铭陶,1989)。腾冲新生代火山区的温泉具有分布广、数量多、水温范围大和类型多样等特点。温泉的分布北起大河头温泉,南至黑石河温泉,东为窜龙澡塘温泉,西抵黑泥塘温泉,总计 139 处(周真恒等,1996)。区内近南北走向的龙川江断裂、大盈江断裂和槟榔江断裂为地热流体的上升提供了良好的通道(张天乐等,1997)。根据区域构造及地貌研究(Wang and Huangfu, 2004),将温泉分为东、中、西三个南北走向的温泉带。东带温泉群沿龙川江两岸分布,出露于龙川江及其支流的河谷中,以大塘、石墙两泉群规模较大;中带泉群出露于龙川江上游和大盈江及其支流的河谷中,包括北部的瑞滇温泉群、南部的热海地热区、攀枝花硝塘和蒲川黑石河热泉等;西带泉群出露在槟榔江上游古永河谷和大盈江上游缅箐河谷中,包括黑泥潭、胆扎、古永硝水塘等(皇甫岗和姜朝松,2000)。腾冲水热活动区分布范围虽广,但高温区主要集中在南部和西部,且多分布在火山岩流的周边或非火山岩区(图 1)。腾冲既发育大量的温泉(25 ~ 60℃)和热泉(60 ~ 95℃),还分布着大量的沸泉(>95℃),其中沸泉以热海地热区最为发育。本文的采样点覆盖了腾冲东、中、西三条温泉带的主要温泉以及位于龙陵的邦腊掌温泉和大沸泉(图 1)。

3 温泉中排放的温室气体通量的测试方法

本文采用北京捷思达仪分析仪器研发中心生产的 GL-103B 型和 GL-105B 型数字皂膜通量仪测量腾冲火山区温室气体的排放通量,该仪器的量程分别为 50 ~ 2500mL · min^{-1}、50 ~ 30000mL · min^{-1},测量精度 $\Delta Q < \pm 1\%$。仪器装置如图 2 所示。

数字皂膜通量仪测量温室气体排放通量的程序如下:在测量前,将漏斗、塑料管与通量仪依次连接,通量仪中注入预先配制的皂液,将漏斗没入水面以下。测量时,先将通量仪倾斜 15°左右,使漏斗收集到的气体在进气孔形成皂膜,然后将流量计垂直放平,皂膜在不断涌入的气体的压力下上升,依次通过上下两个传感器,完成一次测量,通量仪记录下皂膜通过上下传感器的时间间隔并计算出流量(mL · min^{-1})。通量仪可连续进行五次测量并自动求出平均值。测量结果默认状态为 101.3kPa, 25℃,测量时可根据实际情况调整初始状态。根据温泉气体通量的大小灵活选择不同量程的通量仪。在每次测量前,需清洗通量仪,以保证上下传感器感光灵敏,同时润湿皂膜管,使皂膜光滑地通过传感器。在测量时须确保漏斗一直位于水面以下,并且保持位置不变。若为间歇性温泉,皂膜通过上下传感器应为单次气泡溢出所致。对于温度较高的温泉,测量时可能有较多的水蒸汽进入并在进气口冷凝导致皂液浓度降低,这会干扰皂膜的形成,建议每完成一组测量重新注入新鲜的皂液。

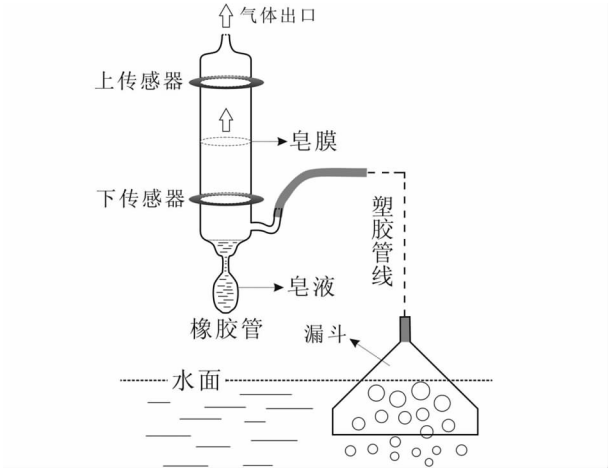


图 2 数字皂膜通量仪工作原理示意图(据张茂亮等,2011a)

Fig. 2 The working principle diagram of GL-103B digital bubble flowmeter(modified after Zhang *et al.*, 2011a)

4 测量结果

对于一个温泉群,由于气体溢出的剧烈程度差异较大,在测量通量时,首先根据气泡溢出的剧烈程度将其分类。每类气泡取其中一些作为代表进行测量,以通量的平均值作为这类气泡的通量。根据气泡的个数以及平均通量计算每类气泡的总通量,将各类气泡总通量求和即可计算该温泉群溢出气体的总通量。在此基础上,结合前人获得的温泉气体成分结果,可以进一步估算出温泉排放的 CO_2 等温室气体的排放通量。

本文分别于 2011 年 8 月中旬(表 1)与 2011 年 10 月下旬(表 2)先后 2 次对腾冲新生代火山区温泉 CO_2 气体排放通量开展实地测量与研究,我们在野外将温泉采样点由北向

表 1 腾冲新生代火山区温泉 CO_2 排放通量的测量结果(测量时间:2011 年 8 月)

Table 1 CO_2 flux of hot springs in Tengchong Cenozoic volcanic area (August, 2011)

编号	位置	温泉名称	水温(℃)	总通量($mL \cdot min^{-1}$)	单个气泡最大通量($mL \cdot min^{-1}$)	备注
1	界头	大塘	70.8	20054.69	305.27	气泡不连续,无泉华
2	瑞滇	竹园	84.3	676.38	676.38	气泡较连续,无泉华
3	古永	胆扎	50.8	18995.03	825.87	气泡不连续,无泉华
4	古永	黑泥潭	63.4	2113.10	769.35	气泡不连续,刺鼻的硫磺味,钙华沉积
5	界头	石墙	66.6	17667.39	2592.47	气泡不连续,钙华沉积
6	界头	石竹坝	46.1	17182.10	749.75	气泡较连续,无泉华,也叫永安澡塘洼
7	荷花	荷花	64.7	31306.45	129.60	气泡较连续,钙华沉积
9	热海	老滚锅	94.5	45464.85	817.93	气泡不连续,硅华沉积
10	热海	大滚锅	86.4	7175.83	1025.12	气泡不连续,硅华沉积
11	热海	怀胎井	93.8	2951.88	140.41	气泡较连续,无泉华
12	热海	珍珠泉	93.0	46418.40	580.23	气泡较连续,硅华沉积
13	热海	狮子头	85.6	87849.13	935.87	气泡较连续,钙华沉积
15	新华	太和	81.3	2710.23	281.11	气泡连续,无泉华
16	龙陵县	邦腊掌	91.8	1362.40	138.54	气泡较连续,钙华沉积

注:表中编号 1-6 为北区温泉,7-16 为南区温泉,单个气泡最大通量是指每个温泉群中气体溢出最剧烈的气泡的通量

表 2 腾冲新生代火山区温泉 CO_2 排放通量的测量结果(测量时间:2011 年 10 月)

Table 2 CO_2 flux of hot springs in Tengchong Cenozoic volcanic area (October, 2011)

编号	位置	温泉名称	水温(℃)	总通量($mL \cdot min^{-1}$)	单个气泡最大通量($mL \cdot min^{-1}$)	备注
1	界头	大塘	70.2	8061.06	58.13	气泡溢出不连续,无泉华
2	瑞滇	竹园	85.0	728.73	364.37	气泡溢出较连续,无泉华
5	界头	石墙	66.1	36789.56	5507.16	气泡不连续,钙华沉积
7	荷花	荷花	76.6	26317.98	1199.96	气泡较连续,钙华沉积
8	马鞍山	迭水河	30.5	19557.85	1285.83	气泡较连续,无泉华
9	热海	老滚锅	66.5	71017.86	3875.65	气泡不连续,硅华沉积
10	热海	大滚锅	86.2	28446.51	3555.81	气泡不连续,硅华沉积
11	热海	怀胎井	93.3	4249.46	165.38	气泡较连续,无泉华
13	热海	狮子头	84.7	85328.76	1479.72	气泡较连续,钙华沉积
14	热海	凉亭泉	84.5	127103.40	2500.82	气泡溢出剧烈且连续,刺鼻的硫磺味,硅华沉积
15	新华	太和	67.7	2447.35	281.80	气泡溢出连续,无泉华
16	龙陵县	邦腊掌	89.7	2091.52	139.44	气泡溢出连续,钙华沉积
17	龙陵县	大沸泉	90.0	12797.78	182.83	气泡溢出连续,钙华沉积

注:表中编号 1-5 为北区温泉,7-17 为南区温泉,单个气泡最大通量是指每个温泉群中气体溢出最剧烈的气泡的通量

南依次编号,总计 17 处(图 1)。在上述温室气体通量的测量过程中,由于地理因素和人文因素,未能将所有温泉完成 2 次测量。腾冲温泉采样点 CO_2 的通量测量结果见表 1 和表 2。

本文在计算腾冲新生代火山区温泉 CO_2 排放通量的过程中,所涉及的温泉释放气体的成分数据(表 3)主要引自下列文献:上官志冠等(1999, 2000)、Shangguan *et al.* (2000)和赵慈平(2008)。本研究所以采用上述文献中的成分数据,主要有以下四方面的依据:(1)上述文献中的成分数据同时测量了 CO_2、N_2、O_2、H_2、CH_4 等主要气体的浓度,可以满足本文的计算需求;(2)由于温泉气体成分是随着时间的变化而变化的,上述气体成分的测试时间与本文采样时间的间隔最近;(3)温泉气体成分分析精度随着采样仪器和方法以及测试技术等的更新而不断提高,上述气体成分是最新的数据,能更好的反映腾冲温泉气体的成分特点;(4)上述数据多为同一批样品的测量结果,这样可有效的降低系统误差。本文的 CO_2 通量计算所采用的是每个温泉点气体成分的平均值。由表 3 可以看出,腾冲温泉气体成分以 CO_2 为主,除大塘温泉 CO_2 仅占 33.41% 外,其余温泉 CO_2 含量可达 81.25% ~ 98.37%。其中,尤其以热海地区温泉 CO_2 含量较高,均达到 90% 以上。每个温泉点近年来(1997 ~ 2006 年)的成分含量均较稳定,这也为 CO_2 通量估算提供了可靠的依据。

随着所测温泉在南北方向上距最南部邦腊掌温泉的距离变化,腾冲温泉气体的 CO_2 排放通量也呈现明显的变化(图 3)。从图 3 可以看出,温泉气体通量的两次测量结果均显示南部温泉 CO_2 通量较大,且变化范围较大(1.73×10^3 ~

表 3 腾冲新生代火山区温泉气体的主要成分(vol%)

Table 3 The main composition of gas from hot springs in Tengchong Cenozoic volcanic area (vol%)

编号	温泉名称	H_2($\times10^{-6}$)	N_2	O_2	CH_4	CO_2	采样时间(a)	采用的 CO_2 含量
1	大塘		61.71	0.65	0.29	33.41	2006	33.41
2	竹园		7.81			90.28	1999	90.57
			7.22			90.85	1999	
3	胆扎	88	4.10	1.72	1.09	94.45	2004	94.45
4	黑泥潭	88	4.10	1.72	1.09	94.45	2004	94.45
5	石墙	10	11.92	5.34	0.02	81.25	2006	86.43
		119	3.03	1.96	0.05	91.61	2006	
6	石竹坝	60	1.91	1.27	0.04	93.51	2006	93.31
		127	1.97	0.93	0.48	93.11	2006	
7	荷花热水塘	100	3.51	1.34	0.09	93.71	2003	93.71
8	迭水河	481	7.03		0.05	92.61	1997	94.74
		10	3.90	0.24	0.79	94.78	2003	
			3.33	0.31		97.05	2004	
9	老滚锅	12	4.34	1.07	0.14	94.52	2006	96.17
		631	3.12		0.64	96.17	1997	
10	大滚锅	2287	2.18	0.03	1.22	94.86	1998	94.98
		1010	1.43	0.24	1.09	94.87	2003	
		984	2.25	0.21	1.69	96.32	2004	
		597	2.02	0.21	0.64	93.87	2006	
11	怀胎井	1555	6.25	0.79	0.01	91.88	1998	95.13
		720	1.79	0.15		98.37	2003	
12	珍珠泉	4999	1.74	0.03	0.03	94.50	1997	94.50
13	狮子头	5813	2.62	0.01	0.02	94.19	1998	94.19
14	凉亭泉	984	2.25	0.21	1.69	96.32	2004	96.32
15	太和	4255	11.51	4.4	0.35	80.51	2006	86.39
		355	5.00	1.07	1.03	92.26	2006	
16	邦腊掌	3917	8.48	0.07	0.51	86.83	2006	85.31
			9.17			83.79	1999	
17	大沸泉		12.21			81.96	1999	81.96

注：表中编号 1-6 为北区温泉，7-17 为南区温泉. 数据源自上官志冠，1999；上官志冠等，1999，2000；Shangguan *et al.*, 2000；赵慈平，2008

1.27×10^5mL·min^{-1})，最大为凉亭泉(位于热海大滚锅东南方向 10m 的山坡上)，CO_2 通量值 1.27×10^5mL·min^{-1}；北部温泉 CO_2 通量值较小，且变化范围较小，多集中于 2.0×10^4mL·min^{-1}，最大为石墙温泉，通量为 3.68×10^4mL·min^{-1}。根据温泉的 CO_2 通量、温度以及温泉的分布特征不同，本文以迭水河井为界将腾冲温泉分为两个区：北区和南区。北区温泉包括：大塘、竹园、胆扎、黑泥潭、石墙和石竹坝 6 处温泉；南区温泉包括：迭水河、荷花温泉、老滚锅、大滚锅、怀胎井、凉亭泉、珍珠泉、狮子头、太和、大沸泉和邦腊掌 11 处温泉(图 3)。

根据腾冲火山区南区与北区温泉群的 CO_2 通量的测量结果，分别计算两区 CO_2 的平均通量(表 4)。由表 4 可知，南区温泉 CO_2 平均通量明显高于北区，约为北区通量值的 2 倍。与 8 月份的数据相比，南区与北区 10 月份 CO_2 通量的平均值均有增大的趋势。单个气泡 CO_2 平均最大通量由 8 月至 10 月也呈现同样的变化。

根据腾冲干季与湿季温泉 CO_2 的平均通量数据(表 4)，计算两区温泉全年 CO_2 平均通量：北区 13987.28mL·min^{-1}；南区 33045.37mL·min^{-1}。腾冲火山区温泉总计 139 处，其中北区 61 处，南区 78 处。已测得 CO_2 通量的温泉北区有 6 处，总通量为 8.03×10^4mL·min^{-1}；北区剩余 55 处温泉的 CO_2 的总通量为 55×13987.28mL·$min^{-1}=7.69\times10^5$mL·min^{-1}，因而北温泉区 CO_2 气体总通量为 8.50×10^5mL·min^{-1}；已测得通量值的温泉南区 11 处，总通量为 4.05×10^5mL·min^{-1}，剩余 67 处温泉 CO_2 的总通量为 67×33045.37mL·$min^{-1}=22.14\times10^5$mL·min^{-1}，因而南区 CO_2 气体总通量为 26.19×10^5mL·min^{-1}。根据上述计算结果，可得出腾冲新生代火山区温泉 CO_2 气体总通量为 3.47×10^6mL·min^{-1}，即 3.58×10^3t·a^{-1}。

表 4 腾冲新生代火山区南北两区温泉 CO_2 平均通量计算结果

Table 4 The average flux of CO_2 from hot springs in the south area and north area of Tengchong Cenozoic volcanic area

测量时间	2011 年 8 月		2011 年 10 月	
温泉分区	CO_2 平均通量 (mL·min^{-1})	单个气泡平均最大通量 (mL·min^{-1})	CO_2 平均通量 (mL·min^{-1})	单个气泡平均最大通量 (mL·min^{-1})
北区	12781.45	986.52	15193.12	1976.55
南区	28154.90	506.10	37935.85	1466.72

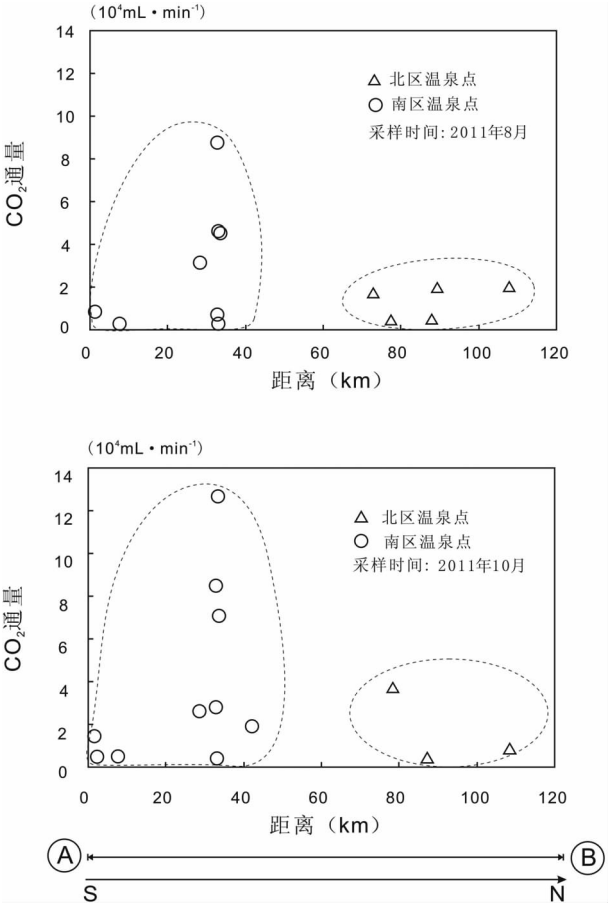


图 3 腾冲新生代火山区温泉 CO_2 通量(mL·min^{-1})和温泉采样点距龙陵县邦腊掌温泉南北向距离(km)关系图

A 为最南端的龙陵县邦腊掌温泉,B 为最北端的大塘温泉

Fig. 3 CO_2 flux (mL·min^{-1}) vs. distance (km) from Banglazhang hot spring in Longling County

A stands for the southernmost hot spring Banglazhang, B is for the northernmost hot spring Datang

5 与其它火山区的比较

腾冲新生代火山区温泉 CO_2 通量为 3.58×10^3t·a^{-1},相当于意大利锡耶纳 Bassoleto 地热区温泉中 CO_2 的排放规模(Etiope *et al.*, 2007)。以往研究表明,在火山喷发间歇期,温室气体排放的形式包括喷气孔脱气、温泉脱气和土壤微渗漏等(Granieri *et al.*, 2010),火山喷发间歇期的温室气体排放形式虽然速度较慢,但持续时间较长,气体排放面积较大,因而输入到大气圈中的温室气体总量会很大(郭正府等, 2010)。另外,火山喷发间歇期不同排放形式 CO_2 的排放通量相差较大。在意大利 Pantelleria 岛上 CO_2 总通量为 0.39Mt·a^{-1},其中以土壤气方式排放的 CO_2 占 82.1%(0.32Mt·a^{-1}),而以温泉排放的 CO_2 仅占到 3.3%(0.013Mt·a^{-1})(Favara *et al.*, 2001; Armannsson *et al.*, 2003);对加利福尼亚 Mammoth 山 CO_2 通量的研究表明,以土壤气排放的 CO_2 可达到 90%(Evans *et al.*, 2002; Gerlach *et al.*, 2001),温泉气体仅占很小的一部分。如果按上述比例推算,腾冲新生代火山区以温泉气体排放的 CO_2 含量为 3581.35t·a^{-1},那么该火山区排放的 CO_2 总通量(包括土壤排气和温泉排气等)可达到每年 10 万吨以上,这相当于意大利 Vulcano 岛 CO_2 的排放通量(0.13Mt·a^{-1})(Chiodini *et al.*, 1998)。

6 腾冲新生代火山区温室气体排放通量的控制因素分析

腾冲新生代火山区温泉主要沿三条南北向的断裂带分布(图 1)。尤其是北区温泉,分布在断裂带上的温泉主要包括:东温泉带的石墙、大塘温泉;中带的瑞滇、石竹坝温泉;西带的黑泥潭、胆扎温泉等。这些温泉温度普遍较低,平均温度 63.7℃,最低温度 46.1℃。北区温泉 CO_2 气体平均排放通量较低,通量变化范围小,并且温泉多沿三条断裂带分布,推断北部温泉 CO_2 气体通量主要受控于断裂,它为 CO_2 气体排放提供了良好的通道。在南温泉区,温泉也基本沿三条断裂带分布,但是它具有显著区别于北温泉区的特征:(1)南温泉区 CO_2 气体平均通量远高于北温泉区,约为北区通量值的 2 倍,其中,热海地热区 CO_2 通量为腾冲最高值;(2)南区温泉具有较高的温度,尤其在热海地区,温泉的平均温度为 91℃,最高温度可达 93.8℃;(3)以热海为代表的南温泉区地热活动类型复杂,包括沸泉、喷沸泉、高温喷气、水热爆炸等,水热活动剧烈;(4)地震、地球物理、地壳形变以及气体同位素地球化学等资料表明,腾冲热海地区存在着一个壳内熔融的岩浆囊(白登海等,1994; Bai *et al.*, 2001; 楼海等,2002; 赵慈平等,2006),它是热海地区强烈的地热活动的重要热源,同时也是 CO_2 气体的重要物质来源。在岩浆囊的烘烤

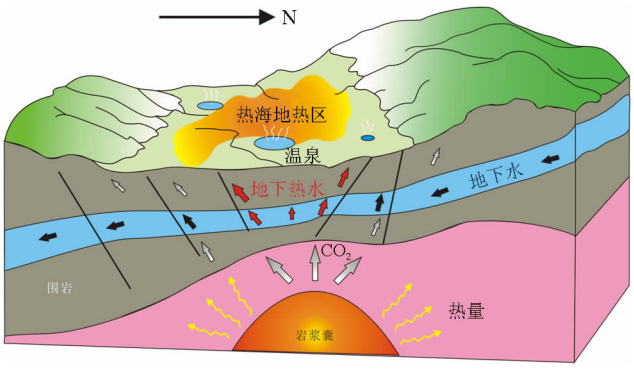


图 4 腾冲新生代火山区温泉 CO_2 成因模式图(本图据地热能网站：www.inforse.dk/europe/dieret/Geothermal/geotermal.html,修改)

Fig. 4 The model diagram of the formation of CO_2 from hot springs in Tengchong Cenozoic volcanic area(modified after the Geothermal Energy website at www.inforse.dk/europe/dieret/Geothermal/geotermal.html)

下,来自于地球深部、地下水以及围岩中的 CO_2 协同高温水沿着断裂溢出地表,形成 CO_2 通量较大的高温温泉(图 4)。因而,我们认为南区温泉 CO_2 通量主要受地下高温岩浆囊的控制。综上所述,本文认为腾冲新生代火山区温泉 CO_2 通量主要受两方面因素的影响:岩浆作用和断裂构造。岩浆活动为腾冲地热活动提供了热源,同时也是 CO_2 重要的物质来源;腾冲火山区分布的南北向为主的断裂为 CO_2 的溢出提供了通道,它们也控制了温泉的空间分布。

徐青等(1997)根据温泉水的氢氧同位素关系图认为,腾冲温泉的地下水均来自大气降水。高清武和李霓(1999)对腾冲地区温泉的泉华进行了碳同位素研究,结果表明,碳的来源主要有两种:一种是幔源碳,$\delta^{13}C$ 值为 -5.7‰ ~ -1.28‰;另一种是来自大气降水的碳,$\delta^{13}C$ 值为 -11.15‰ ~ -7.3‰,而大气降水中的碳经深循环进入地下水。因而,腾冲新生代火山区温泉 CO_2 有多种来源,主要包括深部岩浆和地下水。另外,经烘烤的围岩中碳的释放也有一部分贡献。腾冲地下水是大气降水经深循环形成的,海拔的高低对温泉中 CO_2 的含量也有一定的影响,腾冲南部较低的地势也同其具有较高的 CO_2 通量结果一致(图 4)。

应当指出,由于本研究温泉采样点数量有限,并且实际观测时间较短,本文对于制约腾冲火山区温泉 CO_2 气体排放通量的 2 个主要因素——深部岩浆囊以及断裂的分布——机理分析尚需进一步完善和补充。并且,对温室气体通量大小反映的具体地质含义尚需进一步深入探讨。

7 结论

(1)腾冲新生代火山区温泉 CO_2 的排放通量达 $3.58 \times 10^3 t \cdot a^{-1}$,相当于意大利锡耶纳 Bassoleto 地热区温泉中 CO_2 的排放通量。根据温泉 CO_2 的排放特点、温度以及构造特征将腾冲温泉分为南北两区。腾冲南部地区温泉 CO_2 通量远高于北部的温泉,以热海地热区通量值为最大。

(2)腾冲温泉中 CO_2 的形成受到深部岩浆囊、断裂分布、地下水循环、围岩成分等多方面因素的影响。在北温泉区,CO_2 气体通量主要受控于断裂构造;在南温泉区,CO_2 气体通量除受到断裂影响外,热海地热区地下深部的岩浆囊是 CO_2 气体的重要物质来源,同时高温的岩浆囊为 CO_2 的形成提供了重要的热源,在它的烘烤下,来自地球深部、地下水及围岩中释放的 CO_2 连同高温热水会沿断裂溢出。

致谢 野外采样过程中得到腾冲县防震减灾局杨登部、赵利宾等人的大力帮助,台湾大学温心怡、陈艾荻给予了大量的指导与帮助,作者一并表示感谢。感谢两位审稿人为本文的完善提出的宝贵意见。

References

Armannsson H. 2003. CO_2 emission from geothermal plants. International Geothermal Conference. Reykjack, Iceland, 2003, 56 -62

Bai DH, Liao ZJ, Zhao GZ and Wang XB. 1994. Deductive magma heat resources of Tengchong geothermal field from MT exploration. Chinese Science Bulletin, 39(4): 344 -347(in Chinese)

Bai DH, Meju MA and Liao ZJ. 2001. Magnetotelluric images of deep crustal structure of the Rehai geothermal field near Tengchong, southern China. Geophysical Journal International, 147(3): 677 -687

Chiodini G, Cioni R, Guidi M *et al.* 1998. Soil CO_2 flux measurements in volcanic and geothermal areas. Applied Geochemistry, 13(5): 543 -552

Etiope G, Fridriksson T, Italiano F *et al.* 2007. Natural emissions of methane from geothermal and volcanic sources in Europe. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 165(1 -2): 76 -86

Evans WC, Sorey ML, Cook AC *et al.* 2002. Tracing and quantifying magmatic carbon discharge in cold groundwaters: Lessons learned from Mammoth Mountain, USA. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 114(3 -4): 291 -312

Fan QC, Liu RX, Wei HQ *et al.* 1999. The magmatic evolution of the active volcano in the Tengchong area. Geological Review, 45 (Suppl. 1): 895 -904(in Chinese with English abstract)

Favara R, Giammanco S, Inguaggiato S *et al.* 2001. Preliminary estimate of CO_2 output from Pantelleria Island volcano (Sicily, Italy): Evidence of active mantle degassing. Applied Geochemistry, 16(7 -8): 883 -894

Gao QW and Li N. 1999. A discussion on fluid geochemistry and origin of the Tengchong and Wudalianchi volcanic areas. Geological Review, 45(4): 345 -351(in Chinese with English abstract)

Gerlach TM, Doukas MP, McGee KA *et al.* 2001. Soil efflux and total emission rates of magmatic CO_2 at the Horseshoe Lake tree kill, Mammoth Mountain, California, 1995 -1999. Chemical Geology, 177(1 -2): 101 -116

Granieri D, Avino R and Chiodini G. 2010. Carbon dioxide diffuse emission from the soil: Ten years of observations at Vesuvio and Campi Flegrei (Pozzuoli), and linkages with volcanic activity. Bulletin of Volcanology, 72(1): 103 -118

Guo ZF, Li XH and Zhang ML. 2010. Volcanic activities and deep carbon cycle. Quaternary Sciences, 30(3): 497 -505(in Chinese

with English abstract)
Guo ZF, Zhang ML, Cheng ZH *et al*. 2011. A link of measurements of lava flows to Palaeoelevation estimations and its application in Tengchong volcanic eruptive field in Yunnan Province (SW China). Acta Petrologica Sinica, 27(10): 2863 – 2872 (in Chinese with English abstract)
Hilton DR, Fischer TP and Marty B. 2002. Noble gases and volatile recycling at subduction zones. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 47(1): 319 – 370
Huangfu G and Jiang CS. 2000. Study on Thengchong Volcanic activities. Kunming: Yunnan Scientific and Technology Press, 1 – 418 (in Chinese)
Lou H, Wang CY, Huangfu G and Qin JZ. 2002. 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)
Mörner NA and Etiope G. 2002. Carbon degassing from the lithosphere. Global and Planetary Change, 33(1 – 2): 185 – 203
Oppenheimer C, Pyle DM and Barclay J. 2003. Volcanic Degassing. London: Geological Society Publication, 1 – 347
Shangguan ZG. 1999. Variations of the chemical composition and the origins during the ascent of mantle-derived magmatic gases towards the surface at the Tengchong volcanic area. Geol. Rev., 45(Suppl. 1): 926 – 933 (in Chinese with English abstract)
Shangguan ZG, Sun ML and Li HZ. 1999. Active types of modern geothermal fluids at the Tengchong region, Yunnan Province. Seismology and Geology, 21(4): 436 – 442 (in Chinese with English abstract)
Shangguan ZG, Bai CH and Sun ML. 2000. Mantle-derived magmatic gas releasing features at Rehai area, Tengchong County, Yunnan Province, China. Science in China (Series D), 43(2): 132 – 140
Tong W and Zhang MT. 1989. Geothermics in Tengchong. Beijing: Science Press, 1 – 262 (in Chinese)
Wang CY and Huangfu G. 2004. Crustal structure in Tengchong volcano-geothermal area, western Yunnan, China. Tectonophysics, 380(1 – 2): 69 – 87
Wang F, Peng ZC, Zhu RX *et al*. 2006. Petrogenesis and magma residence time of lavas from Tengchong volcanic field (China): Evidence from U series disequilibria and $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating. Geochem. Geophys. Geosyst., 7: Q01002
Wang G, Wan JL, Wang EQ *et al*. 2008. Late Cenozoic to recent transtensional deformation across the southern part of the Gaoligong shear zone between the Indian plate and SE margin of the Tibetan Plateau and its tectonic origin. Tectonophysics, 460(1 – 4): 1 – 20
Xu Q, Li CH, Wang JA *et al*. 1997. Geothermal resources in Tengchong region, Yunnan Province. Geology Geochemistry, 4: 77 – 84 (in Chinese with English abstract)
Zhang ML, Guo ZF, Cheng ZH *et al*. 2011a. Greenhouse gases flux estimation of hot springs in Changbaishan volcanic field, NE China. Acta Petrologica Sinica, 27(10): 2898 – 2904 (in Chinese with English abstract)
Zhang ML, Guo ZF, Cheng ZH *et al*. 2011b. Advances of research on greenhouse gases degassing from volcanic fields. Advances in Earth Science, 26(12): 1235 – 1247 (in Chinese with English abstract)
Zhang TL, Wang ZL and Hu YZ. 1997. Mineralogy of geyserite from the Tengchong active hot spring system and its geological implications. Acta Petrologica et Mineralogica, 16(2): 170 – 178 (in Chinese with English abstract)
Zhao CP, Ran H and Chen KH. 2006. Present-day magma chamber in Tengchong volcanic area inferred from relative geothermal gradient. Acta Petrologica Sinica, 22(6): 1517 – 1528 (in Chinese with English abstract)
Zhao CP. 2008. Mantle-drived helium release characteristics and deep magma chamber activites of present day in the Tengchong volcanic area. Ph. D. Dissertation. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 1 – 127 (in Chinese with English summary)
Zhou ZH, Han XM and Zhou RQ. 1996. Geothermal structure of lithosphere in Tengchong region, Yunnan Province. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 17(4): 34 – 41 (in Chinese with English abstract)
Zhu BQ, Mao CX, Lugmair GW *et al*. 1983. Isotopic and geochemical evidence for the origin of Plio-Pleistocene volcanic rocks near the Indo-Eurasian collisional margin at Tengchong, China. Earth and Planetary Science Letters, 65(2): 263 – 275

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
樊祺诚, 刘若新, 魏海泉等. 1999. 腾冲活火山的岩浆演化. 地质论评, 45(Z1): 895 – 904
高清武, 李霓. 1999. 腾冲和五大连池火山区流体地球化学特征及成因探讨. 地质论评, 45(4): 345 – 351
郭正府, 李晓惠, 张茂亮. 2010. 火山活动与深部碳循环的关系. 第四纪研究, 30(3): 497 – 505
郭正府, 张茂亮, 成智慧, 刘嘉琪等. 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. 岩石学报, 27(10): 2863 – 2872
皇甫岗, 姜朝松. 2000. 腾冲火山研究. 昆明: 云南科技出版社, 1 – 418
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
上官志冠. 1999. 腾冲火山区幔源岩浆气体上升过程中的变化及原因. 地质论评, 45(Z1): 926 – 933
上官志冠, 孙明良, 李恒忠. 1999. 云南腾冲地区现代地热流体活动类型. 地震地质, 21(4): 436 – 442
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 – 434
佟伟, 章铭陶. 1989. 腾冲地热. 北京: 科学出版社, 1 – 262
徐青, 李翠华, 汪绯安等. 1997. 云南地热资源——以腾冲地区为重点进行解剖. 地质地球化学, 4: 77 – 84
张茂亮, 郭正府, 成智慧等. 2011a. 长白山火山区温泉温室气体排放通量研究. 岩石学报, 27(10): 2898 – 2904
张茂亮, 郭正府, 成智慧等. 2011b. 火山区温室气体排放研究进展. 地球科学进展, 26(12): 1235 – 1247
张天乐, 王宗良, 胡云中. 1997. 腾冲现代热泉系统硅华的矿物学特征及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 16(2): 170 – 178
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. 2008. 腾冲火山区现代幔源氦释放特征及深部岩浆活动研究. 博士学位论文. 北京: 中国地震局地质研究所
周真恒, 韩新民, 周瑞琦. 1996. 云南腾冲地区的岩石圈热结构. 地震地磁观测与研究, 17(4): 34 – 41