

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

腾冲和五大连池火山区流体地球化学特征及成因探讨

高清武 李霓

(中国地震局地质研究所, 北京, 100029)

内容提要 本文论述了腾冲和五大连池火山流体的物理状态、分布及地球化学特征。腾冲火山区分布的是高温地热流体, 分布面积较大, 水热活动强烈, 气体喷逸作用强。而五大连池火山区分布的是低温流体, 温度一般为 $2\sim 5^{\circ}\text{C}$, 流体出露也较少。两个火山区的气体化学组成均以高 CO_2 为特点, 但腾冲火山区地热流体中 H_2 和 CH_4 含量较高, 而且气体化学组成具有分区性特点。两个火山区流体状态、化学组成的差异与两个火山群的成因及所处大地构造环境有关。

关键词 火山 流体 地球化学 水热活动 腾冲 五大连池

腾冲和五大连池火山群是我国最重要的两个现代活动的火山区, 腾冲火山群位于我国西南边界, 五大连池火山群处于我国东北的北部边陲, 两个火山群东北—西南遥遥相对, 在我国及世界上都有一定影响。其中五大连池的老黑山和火烧山于 1719 年和 1721 年先后喷发过, 至今在五大连池保留着十分完好的火山地貌和火山景观。腾冲也是我国大陆少数几个晚第四纪火山地区之一, 还是我国少有的地热带, 自南至北、由东到西分布着很多温泉、热泉。笔者曾先后对这两个火山群进行了流体地球化学研究, 初步查明两个火山区地下流体的物理状态、地球化学特征及其分布规律, 并且对其异同性进行了解析。此外, 还探讨了地下流体的成因。

1 火山地质概况

五大连池火山为典型的板内平原火山, 火山群位于吉黑海西地槽系中。其南边是松辽拗陷, 东与小兴安岭隆起接壤, 西边是大兴

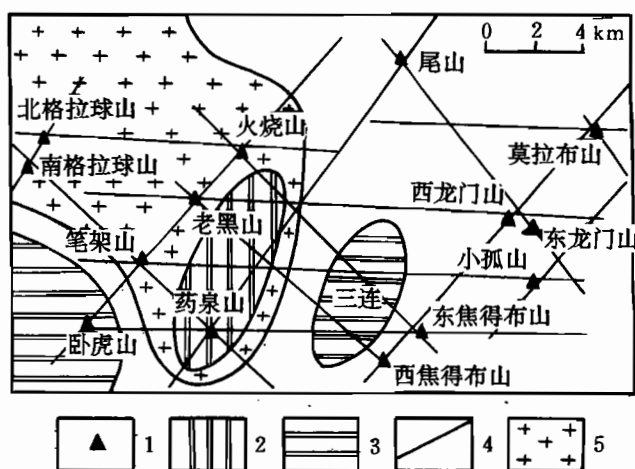


图 1 五大连池火山区基底构造与火山分布图

(据吕宗文, 1995^[1])

Fig. 1 Map shown the basement structures and distribution of volcanoes in the Wudalianchi volcanic area, Heilongjiang (after Lu Zongwen, 1995^[1])

1—火山锥; 2—隆起构造; 3—拗陷构造; 4—断裂构造;

5—海西期—燕山期花岗岩

1—Volcanic cone; 2—uplift structure; 3—depression structure;

4—fault structure; 5—Hercynian—Yanshanian granites

安岭,处于地壳上升与下降的接触部位^[1]。区内发育NE、NW和EW向三组断层,这三组断裂相交构成了网状断裂构造,14座火山锥则分布于网状断裂的交汇部位(图1)。腾冲火山区位于印度板块和欧亚板块碰撞边界的东侧,由于印度板块向北与欧亚板块强烈挤压、碰撞,形成一系列近SN、NNE向的断裂。腾冲火山分布于此断裂区内,东西宽约40 km,南北长约90 km。火山群有明显火山口的火山锥有20个。火山活动共分五期,始于中新世,上新世以后活动增强,晚更新世达到高潮。

2 火山流体分布特征

五大连池火山区火山喷发年代较新,但是,火山流体分布相对并不广泛。其中泉的出露仅限于老黑山、笔架山和药泉山。二龙眼泉在药泉山东侧山前,南泉和北泉在老黑山南下熔岩流附近。这些泉为低温冷泉,泉水温度2~5℃。火山流体中的气体主要沿火山锥体的裂隙、喷气孔、断裂逸出。其中具有特殊意义的是老黑山北东方向火山口底部的喷气洞,逸出气体中含He和H₂^[2]。此外,温泊附近冬季有热气烟雾,水中生长绿草,大气温度在-30℃的情况下,温泊的水温却在14℃左右^[1],这是五大连池火山区唯一一个温度较高的火山流体出露点。

腾冲火山区地下流体出露广泛,水热活动强烈,特别是腾冲西南热海一带,高温热泉随处可见。这些地热流体常呈条带状展布(图2),气体活动强烈,热海、瑞滇、攀枝花硝塘等温、热泉出露区,气泉、喷气孔十分发育。地下高温热气或从泉水中呈气泡串珠状逸出,或者直接喷出地表,形成烟雾。腾冲火山区地下流体的主要特点是温度高、规模大、分布广、活动强烈。

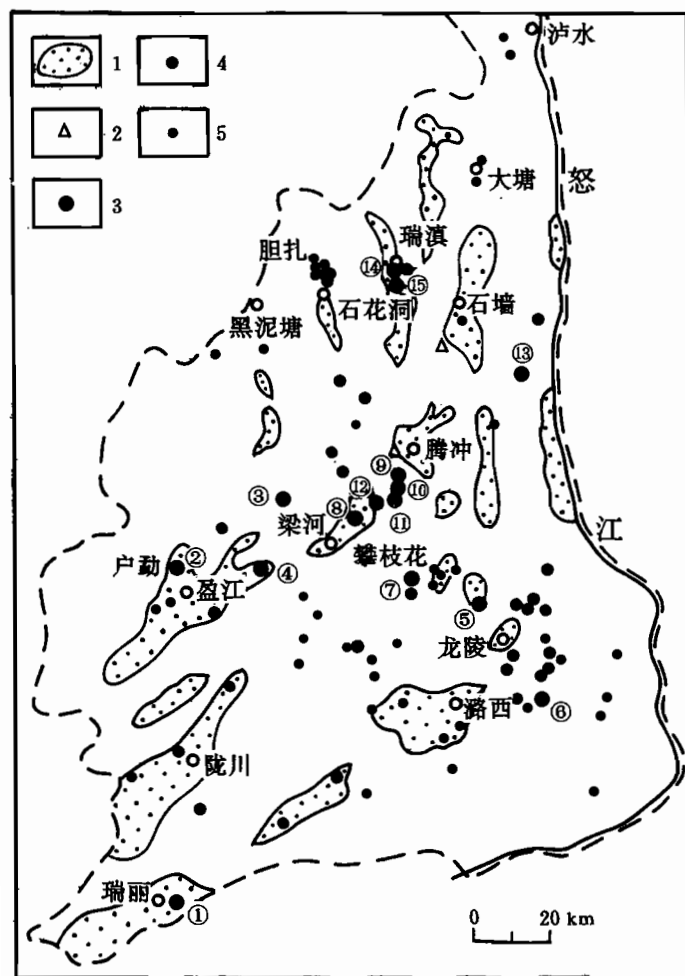


图2 腾冲火山区温泉分布图(据汪辑安,1994)

Fig.2 Distribution of hot springs in the Tengchong volcanic area (after Wang Ji'an, 1994)

1—新生代沉积盆地;2—晚新生代火山群;3—水温>80℃的温泉;

4—水温在60~80℃的温泉;5—水温在40~60℃的温泉

1—Cenozoic sedimentary basin; 2—Late Cenozoic volcanic group; 3—hot spring with temperatures >80℃; 4—hot spring with temperatures of 60~80℃; 5—hot spring with temperatures of 40~60℃

3 气体化学组成特征

(1) 氢(H_2) 两个火山区的火山气体中氢的分布与含量各不相同,五大连池火山气体中氢分布范围小,含量也低。离药泉山和老黑山火山口最近的二龙眼泉和火烧山脚下的火烧山泉水气体中均检测不到氢,只有南泉、北泉和翻花泉气体中含有氢,氢含量为 $0.0024\% \sim 0.0031\%$ 。而腾冲火山区流体中氢的分布范围大,密度亦大,火山气体中氢含量也高,比五大连池火山气氢含量高出一个数量级,一般为 $0.1\% \sim 0.3\%$ 。含有氢的泉集中分布在腾冲火山区周围,向南扩展到攀枝花硝塘,向北扩展到瑞滇。就其平面分布特征看,和腾冲中部火山区的分布有关。说明火山的岩浆活动是火山气体氢的主要来源,因为在东大塘、西大塘、石墙和胆扎的泉水气体中均不含氢,可见火山群的火山活动控制了氢的分布。

(2) 氦(He) 两个火山区火山气体中氦的含量、强度和分布上没有很大区别。虽然腾冲火山区水热活动强烈,气体喷逸作用相当强,但气体中氦的浓度并没有显出较强的优势。两个火山区气体氦含量大多数为 $0.001\% \sim 0.03\%$ (表1),说明两个火山区气体来源及来源深度相近。

(3) 二氧化碳(CO_2) 两个火山区流体中 CO_2 含量都相当高,一些主要火山流体出露点, CO_2 含量都在90%以上。从 CO_2 出露点的平面分布看,五大连池火山区,其最高含量在药泉山西南、东北区域内,向外围逐渐降低(图3)。腾冲火山区 CO_2 高值区主要分布在中部,北自瑞滇经中部硫磺塘,向南至攀枝花硝塘呈SN向条带状展布。而东、西部石墙、胆扎一带流体中 CO_2 含量低,甚至不含。

五大连池火山区 CO_2 的垂向变化较明显。在约300 m以上地段,随着深度的增加,地下水中 CO_2 含量也逐渐增大。到地下花岗岩闪长岩侵入接触面附近,地下水中 CO_2 含量最高。当深度继续增加,大约超过花岗岩闪长岩和围岩接触带以后,地下水中 CO_2 含量随深度的增加反而降低(图4)。

(4) 甲烷(CH_4) 五大连池火山区流体中,未检出甲烷气体;而腾冲火山区流体中却普遍含有甲烷气体,含量一般为 $0.03\% \sim 1.1\%$ 。有的气体出露点甲烷含量相当高,硫磺塘大滚锅热泉一带,甲烷含量最高可达 1.43% (表1)。从水文地质环境

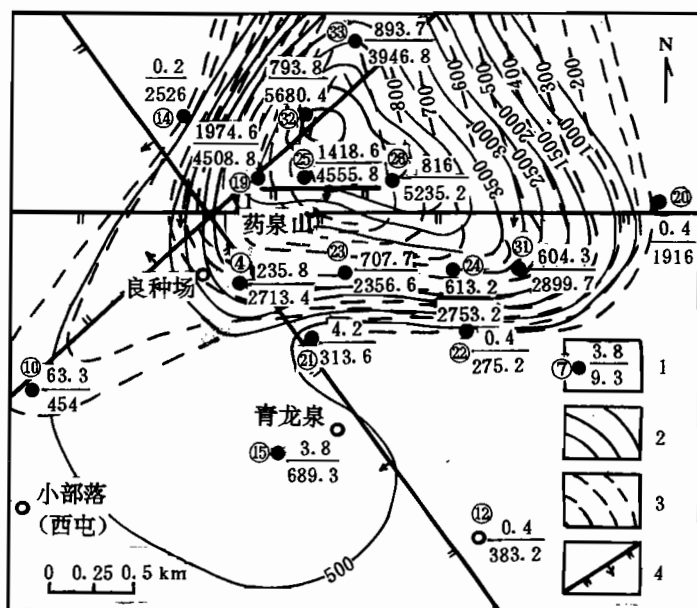


图3 五大连池药泉山地区 HCO_3^- 、 CO_2 等值线图

Fig. 3 Isoleth map of HCO_3^- and CO_2 in the Mount Yaoquan area, Wudalianchi

1—钻孔编号,分子为 CO_2 (mg/L),分母为 HCO_3^- (mg/L);2—重碳酸等值线(mg/L);3—碳酸气等值线(mg/L);4—正断层

1—Hole No., the numerator is CO_2 (mg/L) and the denominator is HCO_3^- (mg/L); 2—isopleth of HCO_3^- (mg/L); 3—isopleth of CO_2 (mg/L); 4—normal fault

看,这些地区都是高温水热活动区,生物成因生成甲烷气体是不可能的。因此,可以断定腾冲火山区地下流体中的甲烷是岩浆成因的气体和火山作用及岩浆活动有关^[3]。

表 1 腾冲和五大连池火山区地下气体分析结果(%)

Table 1 Analysing results of ground gas in Tengchong and Wudalianchi volcanic areas(%)

火山区	采样点	水温(℃)	He	H ₂	Ar	O ₂	N ₂	CH ₄	CO ₂	气体总量(mL/L 水)
腾冲火山区	酸水沟温泉	23.5	0.0105	—	0.09	—	4.78	—	99.6	
	大塘转山温泉	46.0	0.036	—	1.11	5.03	92.1	—	0.78	
	董家寨温泉	48.0	0.037	—	1.41	0.39	97.6	0.04	5.4	
	大塘中寨温泉	71.5	0.034	—	1.21	—	70.8	0.35	25.0	
	石墙温泉	65.0	—	—	0.06	1.45	2.7	—	100.0	
	石墙 2 号泉水溶气	26.0	—	—	0.29	—	11.9	—	75.8	
	硫磺塘大滚锅	92.0	0.038	0.252	0.18	—	7.8	1.43	95.2	
	半个山裂隙泉	70.0	0.01	0.071	0.08	—	4.1	1.07	102.4	
	硫磺塘眼镜泉	92	0.001	0.313	0.96	—	45.4	0.31	38.8	
	硫磺塘怀胎井	91.5	—	0.05	0.19	—	7.9	0.07	94.2	
	小滚锅热泉	—	0.014	0.11	0.13	4.88	6.1	0.97	95.1	
	澡塘河热泉	93.5	—	0.08	1.59	—	67.2	0.03	12.1	
	黄瓜箐小泉	71.0	0.023	0.16	0.11	4.9	5.5	1.11	101.4	
	瑞滇腊辛街女澡堂	81.0	—	—	0.27	—	15.2	—	82.5	
	腊辛街东山裂隙泉	64.0	0.004	0.001	0.18	—	5.9	0.04	92.6	
	瑞滇郑家园温泉	63.0	—	0.019	0.10	—	4.2	0.083	100.3	
	攀枝花硝塘 1 号泉	98.1	—	0.274	0.15	—	6.3	0.31	90.5	
	攀枝花 2 号泉	95.0	—	0.285	0.14	—	5.27	0.38	93.7	
	攀枝花 3 号泉	90.0	—	0.129	0.15	—	6.4	0.53	93.8	
	胆札部队澡堂	47.0	0.019	—	1.52	—	97.5	—	—	
	胆札部队澡堂水溶气	—	0.011	—	2.3	4.5	93.5	0.038	—	
五大连池火山区	胆札乡澡塘	52.0	0.026	—	1.31	1.98	98.5	0.27	—	
	石花洞杨岔河泉	68.0	0.08	—	1.52	—	92.3	1.69	—	
	二龙眼泉水溶气	3.5	—	—	1.21	22.4	55.5	—	22.4	30.8
	永远村泉水溶气	2.5	—	—	—	21.6	61.9	—	13.5	31.3
	地震台北泉水溶气	3.5	—	—	1.07	25.7	65.7	—	5.8	28.5
	南泉	—	0.017	0.025	—	2.3	11.1	—	88.0	
	南泉水溶气	3.3	—	0.002	0.026	0.16	0.63	—	99.4	840.7
	北泉	—	—	0.031	0.087	0.72	2.03	—	97.6	
	北泉水溶气	3.9	—	痕	0.043	0.41	0.98	—	97.8	1083.0
	翻花泉	—	0.033	0.015	—	0.98	2.9	—	96.8	
	火烧山泉	—	0.02	—	0.035	0.29	0.93	—	97.9	
	火烧山泉水溶气	4.5	—	—	—	0.13	0.28	—	97.7	565.1
	W-32 号孔	—	0.005	0.004	0.016	—	0.3	—	99.5	

注:未注明水溶气的均为逸出气;样品由中国地震局地质研究所高潜武,范树全测试;分析仪器:SP-2305 气相色谱仪;分析误差平均±5%;—:仪器未检测出。

4 水的同位素及成因

4.1 水的氢氧同位素

在五大连池火山区,对南泉、二龙眼泉、火烧山泉、三池、地震台北泉和 W-32 号孔取水样进行水氢氧同位素分析。分析结果表明, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-12.22\text{‰} \sim -9.87\text{‰}$; δD 为 $-80.4\text{‰} \sim -99.1\text{‰}$ (表 2),三池的地表水氢、氧同位素值略大于地下水中的。腾冲火山区热海和朗蒲寨

水的 δD 为 $-61.1\text{‰} \sim -59.4\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-9.3\text{‰} \sim -8.4\text{‰}$ 。按其氢、氧同位素关系作图 5, 从图中可以看出, 各水点 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 关系值均落在大气降水线附近。说明不管是五大连池火山区, 还是腾冲火山区, 无论是低温冷泉、还是高温热泉, 其地下水均来自大气降水^[4]。即或是腾冲和火山岩浆活动关系密切的高温热水, 其温泉、热泉的成因仍是大气降水经深循环而形成的。

4.2 水中氚分析

氚是氢的放射性同位素, 半衰期为 12.26 a, 在人工核试验以前, 主要来源于宇宙射线, 氚的天然丰度约为 10 TU^[5]。测定地下水氚含量, 可以评价地下水年龄, 分析其成因与来源。五大连池火山区有 6 个水点进行了水中氚的测试, 测试结果表明, 各水点的氚值为 4.2~106.8 TU, 其中只有 W-32 号孔氚值最低, 仅为 4.2 TU, 其他几个水点氚值均 >50 TU (表 3)。

经验估算法认为, 水中氚含量在 40 TU 以上, 则表明地下水以新近渗入水为主。五大连池火山区, 水中氚值大多在 50 TU 以上, 说明该区地下水年龄比较新, 以新近渗入水为主, 基本上为近期大气降水渗入溶滤而成的溶滤型水。只有 W-32 号孔井水年龄较老, 可能是补给此孔的地下水径流条件较差, 水交替缓慢。事实上, 该井孔水流量很小, 每昼夜只有 6.48 t。

表 2 五大连池和腾冲火山区水氢、氧同位素分析结果
Table 2 Analysing results of water hydrogen and oxygen isotope in Wudalianchi and Tengchong volcanic areas

火山区	采样点	$\delta D(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	备注
五大连池	南泉	-99.1	-11.54	泉水
	二龙眼泉	-88.2	-11.94	泉水
	火烧山泉	-87.2	-11.36	泉水
	三池	-80.4	-9.87	地表水
	W-32 号孔	-86.5	-12.22	地下水
	地震台北泉	-87.8	-11.74	泉水
腾冲	热海	-61.0	-9.3	泉水
	朗蒲寨	-59.4	-8.4	泉水

注: 样品由中国地震局地质研究所张仲禄测试; 分析仪器: MAT 251 气体同位素质谱仪。

表 3 五大连池火山区水中氚分析结果
Table 3 Analysing results of tritium of water in Wudalianchi volcanic area

采样点	氚值(TU)	备注
南泉	73.4	泉水
二龙眼泉	84.8	泉水
火烧山泉	95.4	泉水
三池	106.8	河水
W-32 号孔	4.2	地下水
地震台北泉	59.9	泉水

注: 样品由中国科学院地质研究所石慧馨测试; 分析仪器: 1220 Quantulus 低本底液体闪烁计数仪。

5 讨论

前已述及, 两个火山区同是第四纪活动火山区, 但一个是低温流体(五大连池), 一个是高温流体(腾冲), 流体化学组成也有差异。特别是五大连池火山区的老黑山和火烧山刚刚喷发过二百多年, 然而竟无一个温泉, 这使很多学者产生疑问。笔者对此进行了探讨, 初步认为五大连池火山区没有温泉的原因, 主要有: ① 五大连池地处寒带, 气候寒冷, 这里有常年冻土层, 根据当地气象资料, 地下 320 cm 处, 从 1 月到 12 月, 其温度变化为 $0.3 \sim 5.3^\circ\text{C}$, 常年平均温度为 $1.8 \sim 2.6^\circ\text{C}$, 所以, 区域地下潜水温度一般都在 $2 \sim 4^\circ\text{C}$ 左右。② 该区地下水循环较浅, 都是些水交替条件较好的渗滤型地下水, 由于地下水循环深度浅, 在地下径流时间短, 地下水在地下得不到加热。③ 根据钻孔测温资料, 五大连池的地热增温率一般小于正常增温率, 增温率最低者约 $1.1^\circ\text{C}/100\text{ m}$ 左右。④ 与火山喷发的岩浆性质有关。五大连池火山喷发的为富钾碱性岩浆, 粘度小, 冷凝较快, 在地壳浅部未能形成地热异常区, 使地下水失去了热源。加之地质构造、地壳结构等原因, 致使五大连池火山区没有温泉出露, 形成了地下低温流体。

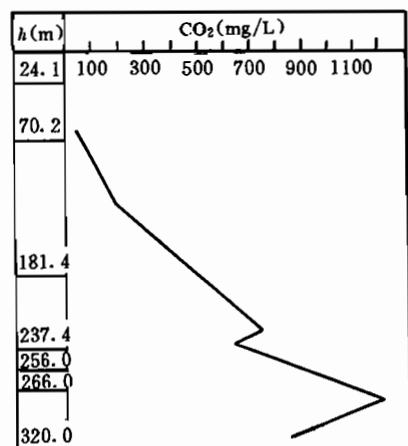


图4 五大连池 W-23 号孔 CO_2 垂直变化曲线图

Fig. 4 Curve shown the vertical change of CO_2 in hole No. W-23 of Wudalinachi

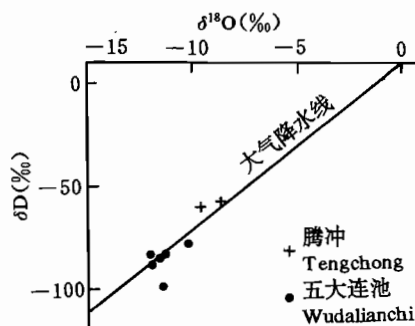


图5 腾冲和五大连池火山区水 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 关系图

Fig. 5 Relationship of $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ of water in Tengchong and Wudalianchi volcanic areas

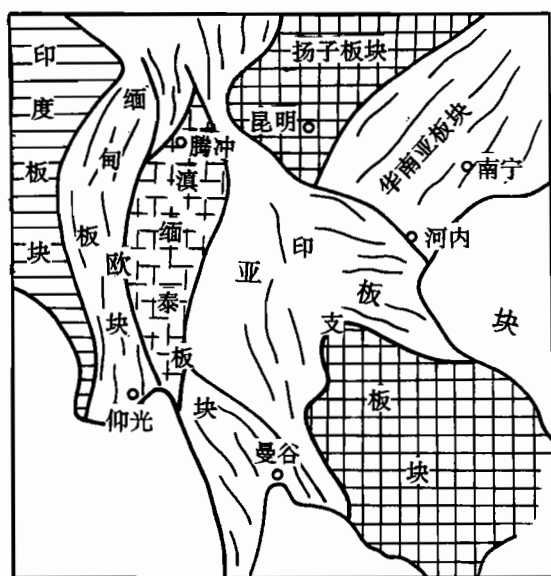


图6 腾冲火山区构造环境示意图(据刘祖荫,1996)

Fig. 6 Sketch map of structural environment of Tengchong volcanic area (after Liu Zuyin, 1996)

腾冲火山区所以水热活动强烈,和火山岩浆性质及其所处大地构造环境有关。腾冲火山喷发的为钙碱性岩浆,火山区处于欧亚板块的边缘,约在印度板块和欧亚板块碰撞接合带的缝合带上。它邻近缅甸板块东界缝合线,在滇缅泰古板块内部,处于腾冲现代板内块体边界。外围还分布有扬子板块、印支板块等,腾冲火山区就在这些大小地壳块体的交汇处(图6)。正因其所处特殊的构造位置,使其地下流体具有独特的特征。

世界高温地热带,有的出现于扩张型板块的边界,有的沿聚敛型板块边缘分布,有的则出露于大陆碰撞带内^[6]。腾冲火山区高温地热流体基本出露于大陆碰撞带上。据阚荣举等^[7]的地球物理资料,腾冲地区大地热流值极高,达 $88.8 \sim 118.0 \text{ mW/m}^2$; 地温梯度也很高,达 $4.61^\circ\text{C}/100 \text{ m}$; 幔壳热流比达 1.53。这表明腾冲地区热流来自上地幔的量

远大于来自地壳热源的量,莫霍面温度估算值达 1000°C 或更高些。根据腾冲火山区的地震测深资料分析,存在壳内低速层($16 \sim 19 \text{ km}$)和深断裂,腾冲火山区处于岩石圈底部急剧拗折部位。总之,由于有深断裂的存在,它们为上地幔高热物质上涌提供了通道,在地壳中上部局部地区储留成低阻低速的壳内岩浆囊,并且至今岩浆仍在活动。因此,在腾冲火山区形成了高温地热流体,致使水热活动和气、液活动都十分强烈。

参 考 文 献

- 1 吕宗文. 老黑山、火烧山(1919~1921年)火山地质. 见:刘若新主编. 火山作用与人类环境. 北京:地震出版, 1995. 44~45.
- 2 高清武. 黑龙江五大连池火山区气体地球化学特征. 地震地质, 1992, 14(3): 251~258.
- 3 高清武, 范树全. 腾冲现代火山活动区地热流体的地球化学特征. 西安地质学院学报, 1992, 14(3): 40~44.
- 4 黄尚瑶, 冯江华, 郑克桢, 谢长芳, 马大乐. 北京地热田及其外围地区天然水氢氧同位素组成特征. 地热专辑第2辑. 北京:地质出版社, 1989. 155~162.
- 5 郑克桢, 马大乐, 谢长芳, 黄尚瑶, 冯江华, 吴静淑. 北京地热田地下热水同位素研究的初步分析. 地热专辑第2辑. 北京:地质出版社, 1989. 163~170.
- 6 廖志杰, 朱梅湘. 大陆碰撞带的地热活动. 地热专辑第2辑. 北京:地质出版社, 1989. 1~8.
- 7 阙荣举, 赵晋明. 腾冲火山地区的深部构造与地球物理场. 见:刘若新主编. 火山作用与人类环境. 北京:地震出版社, 1995. 88.

A Discussion on Fluid Geochemistry and Origin of the Tengchong and Wudalianchi Volcanic Areas

Gao Qingwu and Li Ni

(Institute of Geology, State Seismological Bureau, Beijing, 100029)

Abstract

Tengchong volcano and Wudalianchi volcano are both Quaternary active volcanoes in China. The compositional characteristics and their distributions of their volcanic fluids are different because they have different structural environments and volcanic origins. Wudalianchi volcano belongs to the continental rift type. The erupted magma is alkaline and rich in potassium. Tengchong volcano is located in a plate-margin subduction zone. The erupted magma is calc-alkaline. The fluids distributed in the Wudalianchi volcanic area are low in temperature and less active; whereas in the Tengchong volcanic area there are high-temperature geothermal fluids, which are very active. CO_2 is the major component of the gases in the two volcanic areas. The CO_2 content is more than 90% mostly. The H_2 and CH_4 contents are higher in the Tengchong volcanic area. In general, the H_2 content is about 0.1%~0.3%, the CH_4 content is 0.03%~1.1%. Hydrogen and oxygen isotope analyses of the water in the two volcanic areas have revealed the following: in the Wudalianchi volcanic area the $\delta^{18}\text{O}$ values of the water are within the range of -12.22‰ to -9.87‰ and δD is -80.4‰ to -99.1‰; in the Tengchong volcanic area the $\delta^{18}\text{O}$ values are -9.3‰ to -8.4‰ and δD is -61.0‰ to -59.4‰. Although the hydrogen and oxygen isotope values of the water in the two volcanic areas are different, the relation values between δD and $\delta^{18}\text{O}$ at various water stations in the two volcanic areas all fall near the Krig meteoric water line, indicating that the groundwater of the both volcanic areas were meteoric water.

Key words: volcano; fluid; geochemistry; hydrothermal activity; Tengchong; Wudalianchi

作 者 简 介

高清武,男,1943年生。1967年毕业于长春地质学院水文工程地质系。现为中国地震局地质研究所副研究员,主要从事水文工程地质和流体地球化学方面研究。通讯地址:100029,北京市德胜门外祁家豁子9803信箱。