

腾冲热海火山地热区近期水热爆炸的阶段性演化特征

上官志冠¹, 赵慈平², 李恒忠³, 高清武¹, 孙明良⁴

1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029; 2. 云南省地震局, 昆明 650041;
3. 云南腾冲县地震局, 云南 腾冲 679100; 4. 中国科学院兰州地质研究所, 兰州 730000

摘要:水热爆炸是活动性地热田的典型显示。腾冲热海火山地热区历史上曾发生过强烈的水热爆炸活动, 但前期一度沉寂。1993 年以来水热爆炸活动再度活跃。在过去十年间, 研究区内发生过较大的爆炸喷发事件 20 余次, 且规模越来越大。本文根据对爆炸形成泉点的逸出气体化学和氦同位素组成的测试结果, 研究了区内近期水热爆炸活动的演化特征。逸出气体化学和氦同位素组成特征指示, 区内近期引发水热爆炸活动的气体源区有从浅层、中层向深层发展的趋势; 作者认为, 区内未来可能发生更大规模的爆炸活动, 其危险性应引起高度关注。

关键词:腾冲热海火山地热区; 水热爆炸; 阶段性演化

中图分类号: P314.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2004)02-0124-05

新生代以来, 由于印度板块持续向北东挤压、缅甸板块向东俯冲于腾冲地块之下, 造成持续不断的火山喷发活动, 在腾冲火山区留下了近 70 座火山口, 最新的马鞍山火山喷发距今约 3 ka^[1,2]。目前火山期后热流体活动仍十分强烈, 热海火山地热区内高温喷气孔、喷沸泉、间隙喷泉、沸泉坑、冒气地面等随处可见, 水热爆炸也时有发生。佟伟等^[3]认为 1639 年徐霞客所见澡塘河旁四五亩大的沸泉湖可能是多次水热爆炸的产物。该湖已于 1790 年前消逝。热海地区较近的一期水热爆炸活动发生于 1964~1978 年, 规模不大。自 1978 年 7 月至 1993 年 1 月, 区内未记录到水热爆炸事件。

国外称水热爆炸为水热喷发。美国黄石公园、新西兰、日本等国火山地热区水热爆炸活动十分常见, 对水热爆炸的成因及其引发灾害的预测预防研究较为重视, 新西兰、日本等国还采取了一定的减灾措施^[4~6]。

1 热海地区近期水热爆炸活动的阶段性演化

热海地区近期水热爆炸活动始于 1993 年, 至今

已发生较大规模的爆炸喷发活动 20 余次。按爆炸时间和地点分布大致可分为三个阶段: 第一阶段从 1993 年 1 月 26 日澡塘河南岸地区两泉口喷水喷气开始至 1995 年 9 月, 共记录到 8 次, 其中最大的一次发生在 1994 年 5 月 13 日, 地点在蛤蟆嘴下澡塘河河沿, 爆炸喷出的水柱、泥浆及沙石冲起 20 多米高, 破坏了部分旅游道路与设施。1996 年 11 月起, 水热爆炸活动突然转移至澡塘河北岸、北西向断裂西北端的怀胎井旁侧(图 1)。自那时起至 1999 年 9 月大爆炸发生前为第二阶段。该阶段记录有较大规模的水热爆炸 7 次, 著名的怀胎井在爆炸后移位, 修建新井后出现双怀胎井景观。1999 年 6 月 7 日在西坡下(图 1)发生了一次巨大的脉冲式间隙喷发, 喷发间隙时间为 3~60 s 不等, 高温泥水喷柱高 5 米多, 粗约 1.5 m, 最长连续喷发时间超过 5 min, 整个喷发活动持续约 6 h(照片 1)。第三阶段起自 1999 年 9 月 20 日澡塘河南岸坡顶泉点附近(图 1)的大爆炸。这是本活动期内迄今为止最大的一次爆炸, 爆炸穴直径约 5.5 m, 直接导致约 4000 m³ 山体滑坡。2003 年元旦凌晨, 该爆炸穴中心再次发生较大爆炸, 形成了最新的水爆泉点。1999 年 12 月的

收稿日期: 2003-04-09 收到, 12-11 改回

基金项目: 科技部社会公益研究专项基金资助项目(2001DIA10003)

第一作者简介: 上官志冠(1945—), 男, 研究员, 主要从事地震、火山流体地球化学和稳定同位素地球化学研究。

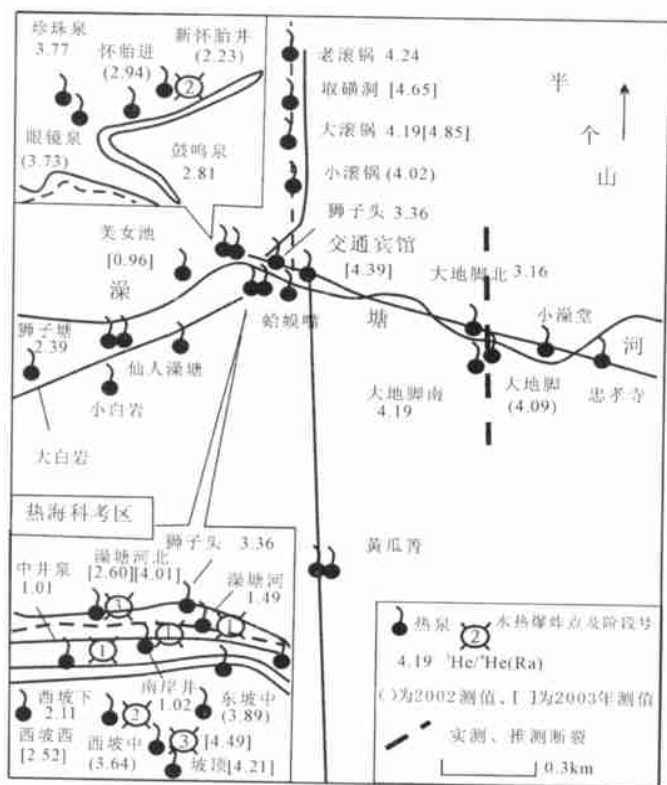


图1 热海地区水热爆炸及泉点位置示意图

Fig.1 Sketch map showing location of hydrothermal explosions and hot springs in the Rehai geothermal area



照片1 1999年6月7日水热喷发实景
Photo 1 Hydrothermal erupting sight on June 7, 1999

另一次较大爆炸发生在旅游通道上(照片2),其危险性不言而喻。其后在2001年12月10日狮子头下游30余米澡塘河北岸悬崖上再次发生大规模水热爆炸,爆炸产生的高温水气斜向喷射出30余米(照片3),目前该爆炸区出现了一系列超高温温泉,

最高温度近100℃。腾冲县地震局曾对其作过较准确的预报,并采取了一定的安全措施,避免了游人的意外伤害。从区内近期连续发生较大爆炸活动的情况看,热海地区本期水热爆炸活动已进入大爆炸、大喷发阶段。大型水热爆炸威力巨大,有较大的危险性和破坏性,提请有关部门予以高度重视。

2 热海地区近期水热爆炸阶段性演化的氦同位素证据

近年来,我们对区内爆炸生成泉点的逸出气体化学和氦碳同位素组成进行了跟踪监测,逸出气体化学和氦碳同位素样品采集及分析方法已有报道^[7,8],测试结果示于表1。逸出气体氦含量与 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值的关系示于图2。



照片2 1999年12月发生在旅游通道上的一次爆炸
Photo 2 Hydrothermal explosion occurred on the tourist road in December, 1999



照片3 2001年12月10日大爆炸后的高温水气喷发
Photo 3 Hydrothermal erupting sight after a great explosion on December 10, 2001

表1和图2显示,研究区内水热爆炸活动第一阶段形成的泉点和爆炸区内目前所见的泉点逸出气体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值都很低,平均值约为大气值的1.17倍(1.17 Ra),表明爆炸发生在浅层地热储中,爆炸气体源区离地表很近。第二阶段爆炸形成的新怀胎

井初期逸出气体的³He/⁴He 值为 2.94 Ra,明显高于第一阶段形成的泉点。随之,³He/⁴He 值有降低的趋势。目前两个典型泉点逸出 He 的³He/⁴He 平均值为 2.22 Ra。2002 年我们采集到了 1999 年第三阶段爆炸后涌出的东坡中和西坡中泉点的气体样品;2003 年又采集了坡顶、2003 年元旦大爆炸穴中心再次爆炸的再爆泉点和 2001 年 12 月大喷发后出现的澡塘河北泉点等的逸出气体。分析测试结果显示(表 1),第三爆炸阶段新生泉点的逸出气体明显来自深部。五个泉点逸出气体的³He/⁴He 平均值高

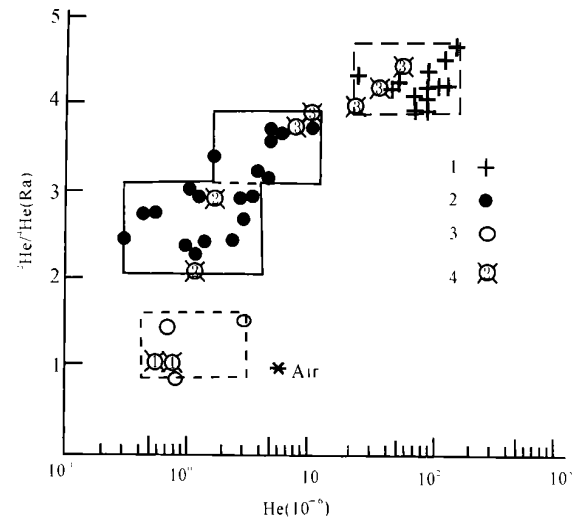
达 4.05 Ra,接近区内沿南北向深断裂分布泉点逸出 He 的³He/⁴He 含量平均值 4.24 Ra^[7](复测的平均值为 4.01 Ra)。第一、二、三期爆炸泉点逸出 He 中幔源 He 的比例逐渐升高,按 Y. Sano 等^[8]给出的公式计算,平均值分别为 3.0 %、22.4 %和 51.1 % (表 1)。在³He/⁴He-He 关系图上(图 2),研究区内引起水热爆炸活动的气体源区明显有从浅部、中浅部向中深部、深部演变的趋势。据此我们认为,未来区内发生更大规模水热爆炸活动的可能性是存在的。

表 1 热海地区水热爆炸泉点部分气体的化学和氦同位素组成

Table 1 Chemical and He, C isotopic composition of selected gas samples from the hydrothermal explosion springs of the Rehai geothermal area

阶段	典型泉点	采样日期	温度 / °C	气体化学组成(%)								³ He/ ⁴ He ×10 ⁻⁶ (Ra)	He/ ²⁰ Ne	He 来源(%)		
				He *	H ₂	Ar	N ₂	O ₂	CH ₄	CO ₂				地幔	空气	地壳
第一阶段	南岸井	970822	91.5	0.8	0.33	0.11	7.12				96.29	1.43(1.02)	0.35	1.5	90.9	7.6
	中井泉	980912	95.4	0.8	0.52	0.25	7.85	0.18	20 *	88.99		1.42(1.01)	0.47	4.4	67.7	27.9
	澡塘河	021025	91.0	3.7	0.39	0.16	9.12	1.93	0.10	85.76		2.08(1.49)	3.3	17.7	9.6	72.7
第二阶段	新怀胎井	970821	91.1	1.5	0.16	0.13	6.25				91.88	4.11(2.94)	1.4	34.6	22.7	42.7
		980909	92.2	1.5	0.26	0.10	6.98	0.79	52 *	92.97		3.55(2.54)	0.9	27.9	35.3	36.8
		021026	92.5	0.9	0.11	0.03	1.23	0.19		97.30		3.24(2.32)	0.6	22.8	53.0	24.2
第三阶段	西坡下	980912	95.0	1.2	0.53	0.01	2.11	0.71	0.01	93.25		2.96(2.11)	0.8	21.9	39.8	38.3
	东坡中	021025	88.0	7.7	128 *	0.04	0.58	0.21	0.10	97.30		5.45(3.89)	3.4	48.4	9.4	42.2
	西坡中	021026	84.5	6.8	72 *	0.03	1.07	0.48	0.06	96.38		5.09(3.64)	4.5	45.4	7.1	47.5
	三 坡顶	030715	71.2	40	0.09	0.05	1.29	0.26	0.47	97.66		5.89(4.21)	99	53.6	0.3	46.1
	再爆泉点	030711	82.5	50	0.04	0.05	1.29	0.19	0.43	98.31		6.29(4.49)	58	57.2	0.6	42.3
	澡塘河北	030711	96.2	20	0.75	0.03	1.86	0.10	0.21	96.16		5.61(4.01)	78	51.0	0.4	48.6

注:第一阶段澡塘河泉点是该爆炸区内目前的泉点,位置靠近 1994 年 5 月 13 日爆炸点; *单位为 ×10⁻⁶



1、2、3 分别为深、中、浅层地热储逸出气,4 爆炸泉点及阶段号

图 2 热海地区逸出气体³He/⁴He-He 含量关系图

Fig.2 ³He/⁴He-He relationship in escaped gases from geothermal springs of the Rehai area

3 爆炸泉点逸出气体的化学组成及其动态变化

热海地区深、中、浅层地热储逸出气体的化学组成,特别是微量气体的含量有明显的差异;最主要的特征是深层气体富含 He、CH₄ 等微量气体,而中、浅层气体则富含 H₂,贫 He 和 CH₄^[9]。

表 1 显示,热海地区三个阶段爆炸泉点逸出气体化学组成也呈现出明显的变化,其中第三阶段爆炸泉点逸出气体的化学组成与其³He/⁴He 值一样,也有向深层气体的化学组成特征方向演变的趋势;其主要特征是气体成分中微量气体 He 和 CH₄ 的含量明显增加,⁴He/²⁰Ne 值明显升高,而浅层气中富含的标志性气体 N₂、O₂、Ar 等组分的含量则明显减少;除最新出现的澡塘河北泉点以外,其他四个泉点逸出气体中 H₂ 含量都有较大幅度的降低。这表明,引起 1999 年与 2001 年大爆炸的气体的化学组

成与区内典型深层气体趋于一致,而明显区别于第一、二阶段的中、浅层气体。

另一个有意义的证据是,2001年12月10日大爆炸后,距大爆炸点较近的南北向断裂上的小滚锅泉点曾一度断流,之后随着爆炸泉点水热喷发活动的减弱又逐渐恢复。2003年度的观测中发现,小滚锅泉点逸出气体的 H_2 含量高达15%以上。这些事实表明,该次大爆炸释放的流体很可能直接源于深部热储层。

值得指出的是,我们在“9.20”大爆炸发生前一年测试地热泉点逸出气体化学组成时会发现,绝大多数中、浅层泉点逸出气体的 H_2 含量都非常高,其体积百分含量为0.38%~5.15%,平均值高达1.18%,这在国内地热区极为罕见。 H_2 的 δD 值测定结果显示,热海地区中浅层地热储中过量 H_2 的形成可能与近期北西向断裂的强烈活动有关^[10], H_2 在水热爆炸中的作用非常值得重视。作者认为,鉴于2003年度再次发现区内泉点逸出气体中 H_2 含量普遍增加,因此热海地区未来可能再次发生大规模水热爆炸活动,其危险性值得高度关注。

致谢:气体色谱和碳同位素质谱分析得到中国地震局地质研究所范树全、中国科学院地质与地球物理研究所霍卫国的帮助,谨表谢忱。

参考文献(Reference):

- [1] 皇甫岗,姜朝松.腾冲火山研究[M].昆明:云南科技出版社,2000.365-377.
Huangpu Gang, Jiang Chaosong. Study on Tengchong volcanic activity[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2000. 129-130. (in Chinese)
- [2] 姜朝松.腾冲地区新生代火山活动分期[J].地震研究,1998,21(4):320-329.
Jiang Chaosong. Period division of volcanic activity in the Cenozoic Era in the Tengchong region[J]. Seismology Research, 1998, 21(4): 320-329. (in Chinese with English abstract)
- [3] 佟伟,章铭陶.腾冲地热[M].北京:科学出版社,1989.65-75.
Tong Wei, Zhang Mingtao. Geothermics in Tengchong[M]. Beijing: Science Press, 1989. 65-75. (in Chinese)
- [4] Brown P R L, Lawless J V. Characteristics of hydrothermal eruptions, with examples from New Zealand and elsewhere[J]. Earth Science Reviews, 2001, 52(4): 299-331.
- [5] Miyake Y, Ohsaka J. Steam explosion of February 11th, 1995 at Nakanoyu hot spring, Nakano prefecture, central Japan[J]. Bull. Volcanol. Japan, 1998, 43(3): 113-122. (in Japanese)
- [6] Muffler L J P, White D E, Truesdell A H. Hydrothermal explosion craters in Yellowstone National Park[J]. Geol. Soc. Am. Bull., 1971, 82: 723-740.
- [7] Shangguan Zhiguan, Bai Chunhua, Sun Mingliang. Mantle-derived magmatic gas releasing features at the Rehai area, Tengchong County, Yunnan Province, China[J]. Science in China (Series D), 2000, 43(2): 132-140.
- [8] Sano Y, Wakita H. Geographical distribution of $^3He/^4He$ ratios in Japan: Implications for arc tectonics and incipient magmatism[J]. J. Geophys. Res., 1985, 90: 8729-8741.
- [9] 上官志冠.腾冲火山区幔源岩浆气体上升过程中的变化及原因[J].地质论评,1999,45(增刊):926-933.
Shangguan Zhiguan. Variations of chemical compositions of mantle-derived magmatic gases and the origins during their ascent towards the surface[J]. Geological Review, 1999, 45(supp.): 926-933. (in Chinese with English abstract)
- [10] Shangguan Zhiguan, Huo Weiguo. δD values of escaped H_2 from hot springs at the Tengchong Rehai geothermal area and its origin[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(2): 146-149.

Evolutionary Characteristics of Recent Hydrothermal Explosions in the Tengchong Rehai Volcanic Geothermal Region

SHANGGUAN Zhi-guan¹, ZHAO Ci-ping², LI Heng-zhong³, GAO Qing-wu¹, SUN Ming-liang⁴

1. Institute of Geology, Seismological Bureau of China, Beijing 100029, China; 2. Seismological Bureau of Yunnan Province, Kunming 650041, China; 3. Seismological Bureau of Tengchong County, Yunnan 679100, China; 4. Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China

Abstract: Hydrothermal explosions are a typical manifestation of active geothermal fields. Violent hydrothermal explosions had occurred in the Tengchong Rehai volcanic geothermal region in history. After quietness for a period of time, the hydrothermal explosions in the Tengchong Rehai geothermal field have acted again since 1993. During the last decade, the hydrothermal explosions and erupting events have occurred over 20 times, and the explosion activity is growing with an increasing strength. Based on the monitoring results of the chemical and isotopic compositions of escaped gases from new hot springs produced by the explosions in the Rehai region, this paper documents the evolutionary characteristics of the explosion activity during the last decade. Evidence from gas chemistry and Helium isotopes indicates that the sources of explosion activities show a developing tendency from the shallow to the deep. We consider, thus, the hydrothermal explosions in the future would be more violent and a serious attention should be paid to its dangerousness.

Key words: Tengchong Rehai volcanic geothermal region; hydrothermal explosions; evolutionary characteristics

学会之声 ·

固体地球系统复杂性与地质过程动力学学术讨论会纪要

2004年3月6~7日,由中国矿物岩石地球化学学会和中国地质大学(武汉)联合主办的“全国固体地球系统复杂性与地质过程动力学”研讨会在武汉召开,来自美国加州大学San Diego分校、瑞典Upsala大学、中山大学、中南大学、西北矿业公司、中石化、中石油、地质科学院、中国地质大学(北京、武汉)的50余位代表及中国地质大学的众多研究生参加了讨论会。中国地质大学张锦高校长到会并致开幕词。

会上31位代表作了学术报告。於崇文院士作了“地质系统复杂性”的主题报告。於院士归纳总结了自然科学研究程度由浅入深的4个层次,从地质科学发展的现状出发,指出地学界当前所面临的迫切任务就是要实现从唯象科学向精确科学的跨越、从必然王国到自由王国的飞跃。他论述了地质现象的本质与核心,即“地质作用与时-空结构”,据此将地质科学划分为四大基本范畴,即地球物质的成分与结构、地质作用、地质学场与地质系统的演化;讨论了各基本范畴相应的重大基础地质问题与基础理论问题,提出了地质科学的基本任务和发展方向。这些基本学术思想反映在他最近出版的专著《地质系统复杂性》中,对于我国的地质科学的发展将起一定的指导作用。

张本仁院士作了“壳幔相互作用深部过程的地球化学论证:以古洋壳和陆壳俯冲-再循环为例”的报告。他分析了目前已提出的3个壳幔再循环类型:板块会聚带与B型俯冲有关的壳幔再循环、岩石圈的底侵与拆沉及陆壳俯冲有关的超高压变质岩的形成与折返,指出壳幔相互作用是推动大陆发展的直接动力,是整个地球动力学系统的重要组成部分;

壳幔物质再循环是壳幔相互作用的重要表现,揭示壳幔物质再循环是探讨壳幔作用及其动力学的必由途径。张院士还论证了秦岭商丹古会聚带洋壳俯冲与壳幔再循环和秦岭大别造山带陆壳深俯冲的地球化学过程。

高山教授介绍了“华北克拉通地幔交代作用的时间与机制:LA-ICPMS研究”的最新成果,详细介绍了激光剥蚀等离子质谱(LA-ICPMS)设备与技术现状,引起与会者极大的兴趣。美国加州大学段振豪博士的报告“分子动力学和蒙特卡罗模拟-预测地质流体的物理化学性质”和瑞典Upsala大学石平方博士对矿产、地热、天然气和气体水合物的成因和开发、环境地球化学的研究引起热烈的讨论。邓吉牛研究员从“动力学思维与矿业经济”角度交流了他应用地质过程动力学于矿产评估和矿业经济决策的经验。周永章教授讨论了“非平衡体系地球化学问题”;中国石化石油勘探开发研究院西部分院介绍了有关“塔里木盆地的旋回性与响应的初步分析”的研究成果;刘亮明教授介绍了“动力学数值模拟及其在矿床预测性勘查中的应用”成果。其他大会报告内容涉及固体地球系统复杂性与地质过程动力学的基础理论、深部地质作用、水岩作用、地球化学动力学与热力学模型、模拟及软件系统、金属成矿作用、油气系统复杂性与演化、环境系统、古生物演化等,报告内容十分丰富,学科覆盖面广,学科交叉相互启示、讨论热烈。

会议期间与会代表参加了於崇文院士80华诞庆典,代表们对于於崇文院士的学识、人品和不断探索精神深表敬意,并深受教育。祝愿於崇文院士幸福康健,科学青春常驻。