

# 腾冲热海地区现代幔源岩浆 气体释放特征\*

上官志冠 白春华

(中国地震局地质研究所, 北京 100029)

孙明良

(中国科学院兰州地质研究所, 兰州 730000)

**摘要** 详细讨论了腾冲热海地区逸出气体的化学和氢、碳同位素组成及其在地表的分布特征。结果表明, 该区地壳浅部存在幔源岩浆侵入活动; 现代幔源岩浆挥发组分通过活动断裂带源源不断地向外释放, 其主要成分是  $\text{CO}_2$ , 还有少量的  $\text{He}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{CO}$  等。研究区内南北向断裂最深, 它可能与得到幔源岩浆挥发组分直接补充的深部热储直接相通。逸出气体的氢、碳同位素组成特征指示, 现今在热海地区壳内活动的幔源岩浆与导致区内最新火山喷发的幔源岩浆之间可能存在着渊源和继承关系。

**关键词** 腾冲热海 现代幔源岩浆气体 氢碳同位素组成

腾冲火山区所在的腾冲微板块位于印度板块与欧亚板块之间, 其西部以密支那-曼德勒缝合线与缅甸板块分界, 东部以怒江缝合线与保山块体分界<sup>[1, 2]</sup>。新生代以来, 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, 这是该区火山活动的基本背景。该区火山岩属于消减带附近压力环境条件下的产物。区内第四纪活动断裂主要为南北向或近南北向展布, 其次是北东向断裂, 分别是南北向的怒江断裂、龙川江断裂、瑞滇-腾冲断裂和古永断裂以及北东向的盈江-梁河断裂, 后者在朗蒲寨附近与瑞滇-腾冲断裂和古永断裂复合构成朗蒲-梁河弧形断裂。区内火山岩及火山口的分布与新构造活动关系密切, 其中有最新喷发活动历史的火山口基本上都沿南北向的瑞滇-腾冲断裂展布(图 1)。

热海地热区是腾冲地区现代地热流体活动最强烈的地区, 总面积约  $10 \text{ km}^2$ 。区内沸泉、喷沸泉、间歇喷泉、水热爆炸、高温喷气孔和冒气地面等最强烈的水热活动形式均有出露, 各泉点的一般概况前人已有详述<sup>[3]</sup>。人们习惯上所说的腾冲火山地热区主要是指这个地区。一些学者提出, 腾冲火山不是死火山, 而是可能再次活动的休眠火山<sup>[4]</sup>, 引起了普遍关注。从地理位置看, 这一地热区并未出现在有最新喷发活动的火山口附近, 而是出露在区内大片第四纪火山岩分布区的南部边缘, 距有最新喷发活动历史的马鞍山火山口约  $10 \text{ km}$ (图 1)。

野外调查结果显示, 腾冲地区有最新喷发活动的火山黑空山、打鹰山、马鞍山和老龟坡等火山目前仅马鞍山-老龟坡附近地区尚有低温地热流体活动。从其逸出  $\text{He}$  具有区内最高的

1999-08-24 收稿

\*中国地震局“九五”重点项目(批准号: 95-11-02-04)

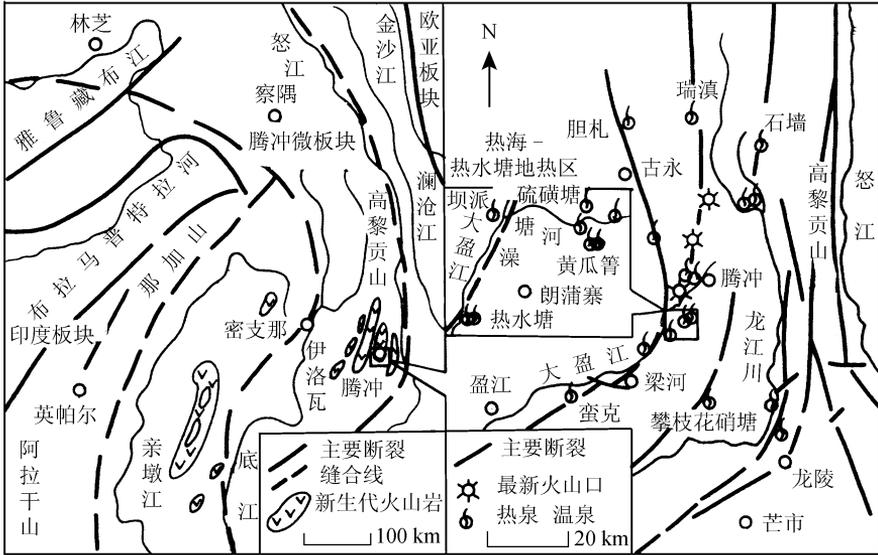


图 1 腾冲热海地区大地构造和地热地质背景示意图

<sup>3</sup>He/ <sup>4</sup>He 比值来看, 这些气体应为上一期火山喷发活动的残余气体<sup>[5]</sup>. 而目前热海地区强烈的现代水热流体活动与上述火山残余气体的释放二者没有直接的关系, 在空间上也难以将它们联系在一起.

### 1 气体样品的采集、化学和同位素分析及结果

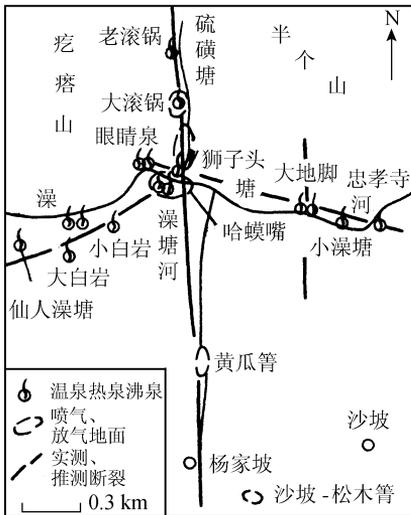


图 2 热海地区采样泉点的分布

本研究较完整地采集了该区 18 个主要泉点的逸出气体(图 2), 并进行了详细的气体化学和同位素组成的测试分析. 为了对比, 我们还采集了马鞍山火山口附近泉点以及若干较老火山岩分布区出露泉点的逸出气体. 气体采集采用排水取气法, 存放在预先抽好真空的不锈钢瓶或硬质铝合金瓶中. 气体分析采用色谱法, 常规组分由 SP-2305 型色谱仪测试, 气体总量测定误差 ≤ 5%; 微量硫化物由岛津 GC14A-FPD 检测器测试, 其他微量组分分别由 HP5890IA(GC)ECD 和 FID 检测器测试; He 同位素分析由 VG-5400 完成, 分析误差 ≤ 0.3 × 10<sup>-6</sup>; 逸出 CO<sub>2</sub> 的碳同位素分析由 MAT-252 质谱测试, 误差 ≤ 0.1 ‰(PDB). 气体相对分析精度: 常规气体为 1%~2%, 微量气体为 2%~5%. 测试结果列于表 1.

表1 腾冲热海及邻近地区地热流体逸出气体的化学和氦、碳同位素组成<sup>a)</sup>

采样泉点	温度 /°C	常规气体/%					微量气体(10 <sup>-6</sup> )					<sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He ×10 <sup>-6</sup> /Ra	d <sup>13</sup> C <sub>CO<sub>2</sub></sub> /‰PDB
		CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Ar	CH <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	H <sub>2</sub>	He	SO <sub>2</sub>	CO		
1 大滚锅	90.1	94.86	2.18	0.052	1.22	0.03	2140	2 287	133	10.1	0.5	5.87(4.19)	-2.9
黄瓜箐(1)	48.9	93.89	3.91	0.033	1.00		2 840	3 907	108	4.9	1.1	5.90(4.21)	-3.2
黄瓜箐(2)	48.6	94.05	3.41	0.036	0.99			3 610	97			6.12(4.37)	-3.6
老滚锅	57.6	96.17	3.12	0.065	0.64		2 320	631	47	79.5	0.5	5.93(4.24)	-3.5
大地脚南	68.2	96.64	2.18	0.010	0.44			1 258	44	51.1	18.3	5.87(4.19)	-2.6
2 珍珠泉	95.1	94.50	1.74	0.004	0.03	0.03	1 099	4 999	4.9	51.0	0.5	5.28(3.77)	-5.3
眼镜泉	94.1	94.50	2.62	0.004	0.04	0.13	1 616	2 870	5.2	73.4	3.2	5.13(3.66)	-4.3
狮子头	95.2	94.19	2.62	0.042	0.02	0.01	1 078	5 813	1.0	~	17.7	4.70(3.36)	-4.3
大地脚北	95.6	95.82	2.77	0.004	0.03	0.01	1 898	11 701	4.0	~	14.4	4.43(3.16)	-5.5
鼓鸣泉	95.6	95.41	2.62	0.004	< 0.01	0.02	229	4 260	0.6	69.1	8.7	3.92(2.80)	-4.8
怀胎井	57.9	93.58	3.05	0.042	0.02	< 0.01	773	629	3.0	92.3	7.7	4.14(2.96)	-3.9
新怀胎井	91.1	91.88	6.25	0.104	0.01	0.79	360	1 555	1.5	56.9	23.7	4.11(2.94)	-4.3
3 西坡上	94.6	88.75	1.98	0.006	< 0.01	< 0.01	203	51 459	2.0	67.6	10.1	3.24(2.31)	-5.8
中坡下	91.0	90.35	1.65	0.056	0.01	0.30		467					
西坡下	95.0	93.25	2.11	0.008	0.01	0.71	282	5 279	1.2	256.2	18.3	2.96(2.11)	-4.7
狮子塘	78.0	57.49	32.75	0.416	< 0.01	7.70	670	1 258	1.5	68.5	31.8	3.35(2.39)	-4.6
南岸井	92.0	70.00	28.12	0.455	< 0.01			3 296	0.7	68.0		1.43(1.02)	-5.8
中井泉	95.4	88.99	7.85	0.250	< 0.01	0.18	232	5241	0.8	10.4	8.4	1.42(1.01)	-5.0
4 和顺	26.0	90.00	2.34	0.033	0.01		500	56	86.6	15.7	17.4	7.54(5.38)	-3.8
迭水河	23.6	92.61	7.03	0.130	0.05		1 600	481	65.0	471.4	33.7	6.73(4.81)	-4.7
5 硝塘坝	28.5	92.78	0.80	0.020	0.22		1 960	28	3.6	238.8	0.1	4.58(3.27)	-4.0
扯雀塘	25.8	89.94	4.69	0.065	0.05		1 090	~	23.8	20.9	13.0	3.96(2.83)	-2.4
革家寨	74.0	76.67	21.87	0.390	2.73		2 830	56	411.3	113.7	22.8	2.58(1.84)	-0.5

a) 表中未给出氧气值的泉点样品为 1997 年 8 月采集, 其余为 1998 年 9 月采集. 采样点分组: 1 为热海地区南北向断裂沿线泉点, 2 为北西向断裂沿线泉点, 3 为澡塘河南蛤蟆嘴西侧泉群, 4 为马鞍山火山口附近泉点, 5 为区内较老火山岩中出露的泉点

## 2 逸出气体的化学组成

### 2.1 主要逸出气体

热海地区地热流体逸出气体的最主要成分是 CO<sub>2</sub>, 其次是 N<sub>2</sub>, Ar 和 O<sub>2</sub>. 所调查的 18 个泉点 CO<sub>2</sub> 百分含量(体积)为 57.49%~96.64%, 平均约为 90.24%. 众所周知, 不管是现代火山喷出气体、还是火山岩加热脱气, 或者大洋中脊新洋壳形成处的水热流体中, 气体成分都主要是 CO<sub>2</sub><sup>[6-8]</sup>. 据我们初步统计, 研究区内每天通过地热水释放的溶解 CO<sub>2</sub> 约有 26.8 t; 通过逸出气体方式释放的 CO<sub>2</sub> 难以精确测算, 据戴金星等统计<sup>[9]</sup>, 仅澡塘河瀑布下游 150 m 河水中不间断出气点每天逸出的 CO<sub>2</sub> 就达 910 m<sup>3</sup>. 如此强大的深源 CO<sub>2</sub> 流经不息地向外释放指示, 该区地壳相对浅部可能存在岩浆活动.

表 1 显示, 热海地区第 1~3 组泉点逸出气体中 CO<sub>2</sub> 的平均含量依次呈降低趋势. 第 1 组泉点, 即区内南北向断裂沿线泉点逸出气中 CO<sub>2</sub> 的平均含量最高, 为 95.12%, 第 2 和 3 组泉点分别为 94.27%和 81.47%(图 3(a)). 而浅源气体和空气中较为富集的 N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> 以及 Ar 含量的变化与 CO<sub>2</sub> 相反, 有逐渐增加的趋势. 这表明, 上述变化可能与深源气体向上迁移时浅部气体的逐渐混入有关.

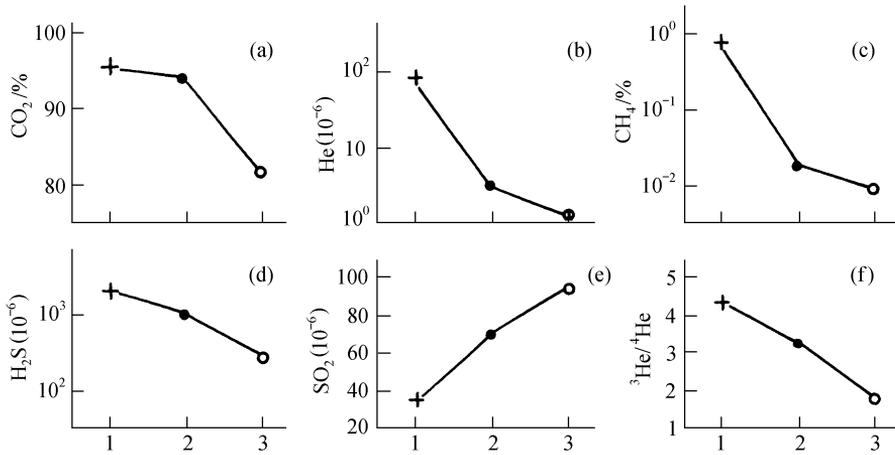


图 3 热海地区第 1~3 组泉点逸出气体化学和氦同位素组成的变化

+, ●, ○ 分别代表第 1 组、第 2 组和第 3 组泉点的值

## 2.2 微量气体的化学组成及其变化

本项研究测定的微量气体主要有 H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>, He, SO<sub>2</sub> 和 CO. 表 1 和图 3 显示, 热海地区第 1~3 组泉点逸出气中各微量组分的含量差异甚大, 但呈现出有规律的变化(只有少数泉点例外). 如 He 含量为  $0.6 \times 10^{-6} \sim 133 \times 10^{-6}$ , 变化范围超过两个数量级. 其中第 1 组泉点逸出气中 He 含量最高, 平均为  $85.8 \times 10^{-6}$ ; 第 2 和 3 组泉点逸出气中 He 的平均含量依次降低, 分别为  $2.9 \times 10^{-6}$  和  $1.2 \times 10^{-6}$  (图 3(b)). 另外, CH<sub>4</sub> 和 H<sub>2</sub>S 的含量也有依次降低的变化趋势(图 3(c), (d)). 上述变化趋势与主要气体 CO<sub>2</sub> 的变化规律是一致的. 但 SO<sub>2</sub> 大致呈反向变化, 第 1~3 组泉点依次升高(图 3(e)).

研究区内逸出气体中 CO 含量的变化规律不明显, 但第 1 组泉点中位于南北向主断裂上的泉点以及第 2 组泉点中的珍珠泉 CO 含量明显低于其他泉点(表 1, 图 2). 我们注意到, 这些泉点大都是一些高温气泉, 像现今的黄瓜箐、老滚锅等温泉池均为高温气泉加热地表水; 珍珠泉也可能是一组高温气泉, 其薄薄一层地热水中经多次测定均不含溶解 CO<sub>2</sub>, 表明这些水可能是高温蒸气冷凝水. 地热流体逸出气体中 CO 含量低通常意味着控制这些泉点的断裂活动呈张性, 由于与地表的连通性较好, 致使碳氧化物更多地以 CO<sub>2</sub> 的形式存在.

作者认为, 热海地区第 1~3 组泉点逸出气体化学及其同位素组成的相似性和有规律的变化表明, 这些气体可能有共同的初始源区; 另一方面, 它们之间存在着稳定的差异则表明, 各组泉点所释放的气体在到达地表前的最后源区保持着相对的独立性. 这意味着, 该区地壳内从深至浅可能存在若干个彼此相对独立、且均含有大量气体挥发组分的地热储. 赵平等人<sup>[10]</sup> 根据对蒸汽相化学组成特征的研究认为, 该区可能存在深浅两个地热储. 我们的资料显示, 该区这样深浅不同的地热储至少有 3 个, 甚至更多.

## 3 逸出气体的氦、碳同位素组成

### 3.1 逸出气体的 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比值及其分布特征

热海地区逸出 He 的 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比值变化范围为  $1.42 \times 10^{-6} \sim 6.12 \times 10^{-6}$  (1.01~4.37 Ra). 我们知

道, 幔源、壳源和空气 He 各自具有特征的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值, 分别为  $(1.1\sim 1.4)\times 10^{-5}$ ,  $2\times 10^{-8}$  和  $1.4\times 10^{-6}\text{Ra}^{[11]}$ . 因此, 任何  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值大于空气值(Ra)的 He 释放中均可视为含有幔源 He. 表 1 显示, 研究区内除了第 3 组泉点中最后两个泉点外, 其余泉点的逸出 He 中均含有大量的幔源 He. 如前所述, 由于热海地区没有大片的新生代玄武岩分布, 离区内有最新喷发活动的马鞍山火山口也有约 10 km(图 1), 因此这些幔源 He 不可能是区内幔源火山岩中的残余气体, 而极有可能指示本区地壳相对浅部存在幔源岩浆侵入活动.

我们的资料显示, 研究区内地热泉点的现代幔源 He 释放强度及其  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值的分布明显受活动断裂带控制. 图 2 和表 1 显示, 沿南北向主断裂及东侧南北向分支断裂分布的泉点逸出气体中 He 的含量最高, 其  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值也最高, 而且彼此间十分接近, 平均值约为 4.24 Ra. 该组泉点逸出 He 的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值相当稳定, 相同泉点的测试结果多年来相当稳定<sup>[12]</sup>. 本次研究发现, 热海地区以珍珠泉、眼镜泉、狮子头和大地脚北等泉点为代表的一组沿北西向展布的沸泉的 He 释放特征极为相似. 其逸出气体中 He 的含量及其  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值彼此之间都十分接近,  $^3\text{He}/^4\text{He}$  的平均值约为 3.24 Ra(表 1 第 2 组), 但明显低于第 1 组泉点. 这表明, 研究区内可能存在一条北西向断裂(图 2), 其切割深度较南北向断裂要浅. 图 2 显示, 表 1 中的第 3 组泉点大致沿北东向展布, 其逸出气中 He 的含量及其  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值较第 2 组泉点更低,  $^3\text{He}/^4\text{He}$  的平均值约为 1.77 Ra(图 3(f)). 在 He- $^3\text{He}/^4\text{He}$  关系图上(图 4), 这 3 组泉点各自占据着不同位置, 清楚地表明其气体源区是相对独立的.

我们知道, 腾冲地区像硝塘坝、扯雀塘、革家寨等出露在较老火山岩中的泉点(表 1), 其逸出 He 的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值是随 He 含量的增加而降低的. 这是因为, 这些泉点释放的幔源 He 来自已经固结的火山岩. 火山岩年龄越大, 逸出气中 He 的含量就越高, 其  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值则越低<sup>[5]</sup>. 与此相反, 热海地区逸出 He 的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值明显随 He 含量的降低而降低. 这表明, 这两类幔源 He 的释放机制上是完全不同的. 热海地区的幔源 He 释放可能直接来自深部幔源岩浆, 第 1~3 组泉点逸出 He 含量及其  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值有规律地依次降低是深部岩浆来源 He 在向上迁移时的强烈扩散作用造成的, 因为 He 在上升过程中并不与其他物质发生化学反应. 其含量和同位素比值的变化主要反映物理过程. 与其他岩浆来源气体相比, He 的迁移扩散能力最强, 而  $^3\text{He}$  的扩散能力又较  $^4\text{He}$  更强些, 因此在上升迁移过程中, 其 He 含量及  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值有规律地逐渐降低是理所当然的. 虽然我们不能排除深源气体在上升过程中会有少量浅部气体的混入, 但考虑到该区深源气体上升时压力很大, 最浅一组(第 3 组)逸出气体中 He 含量又远低于空气, 因此浅源气体混入的影响应该说是很小的. 这从意大利埃特纳火山区地下流体逸出 He 的最高  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值与埃特纳玄武岩中富 He 橄榄石晶体脱出 He 的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值十分接近的事实也

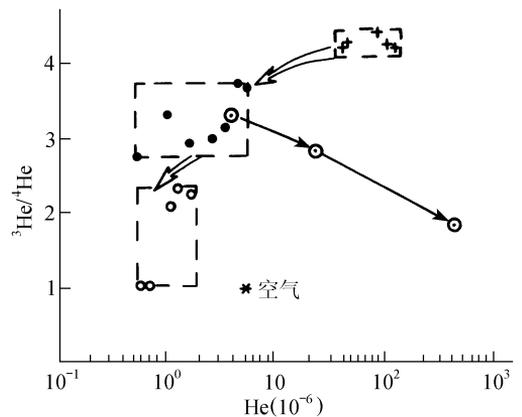


图 4 热海地区地热流体逸出 He 含量与其  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值的关系

+示南北向断裂沿线泉点, ●示北西向断裂沿线泉点,  
○示北东向断裂沿线泉点, ⊙示区内较老火山岩中出露的泉点

与埃特纳玄武岩中富 He 橄榄石晶体脱出 He 的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值十分接近的事实也

可以得到证明<sup>[8]</sup>.

仔细分析我们的氦同位素资料,第 2 和 3 组泉点似又可以细分成两组,特别是第 3 组中的后两个泉点,即南岸井和中井泉,其逸出 He 的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值已与空气的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值基本一致,但其 He 含量几乎比空气低一个数量级.这表明,热海地热区深部地热储结构相当复杂,多层地热储的数量可能不止前面所说的 3 个,至少在南岸井和中井泉所在地区,即澡塘河南岸仙人桥东侧地下还可以划分出另一个埋深较浅的地热储.从该热储中的 He 已可以与空气中的 He 自由进行氦同位素交换来看,其深度可能不会超过数百米.

与长白山天池火山地热区逸出气体中壳源气体混染不明显的特征<sup>[13]</sup>同理,按幔源气体和空气二元混合模式计算,热海地区南北向深断裂沿线泉点逸出 He 中平均约含 47.5% 幔源 He.但这并不意味着该幔源气体在向上迁移时有 50% 以上的空气混染,因为决定其中幔源 He 比例的另一重要因素是目前岩浆源本身的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值.我们的资料显示,目前热海地区第 1 组泉点逸出 He 的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值彼此十分接近,而这些泉点又多以释放高温喷气为主.据此分析,控制这些泉点幔源气体释放的南北向深断裂可能直接切割至深部以气相为主的高温热储,而这一高温热储极有可能获得深部幔源岩浆挥发组分的直接补充;区内南北向深断裂相对张性的活动特征可使深部幔源岩浆气体迅速向地表迁移.因此,目前热海地区第 1 组泉点逸出 He 的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  最高值(4.37Ra)可能非常接近区内深部岩浆源本身的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值.岩浆源具有相对较低的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值表明,该幔源岩浆已被地壳物质严重混染.

### 3.2 逸出 $\text{CO}_2$ 的碳同位素组成

表 1 显示,热海地区第 1 组泉点逸出  $\text{CO}_2$  的  $d^{13}\text{C}$  值明显高于其他泉点,平均值约为  $-3.2\text{‰}$ ,第 2 和 3 组泉点逸出  $\text{CO}_2$  的  $d^{13}\text{C}$  值大致也是依次降低,平均值分别为  $-4.6\text{‰}$  和  $-4.8\text{‰}$ .相对来说,研究区内逸出  $\text{CO}_2$  的碳同位素组成的变化不如  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值的变化那么有规律.作者认为,这与它们化学性质上的差异有关.He 是惰性气体,其上升迁移过程中同位素组成的变化主要决定于物理过程;而  $\text{CO}_2$  是活性气体,其上升迁移过程中还可能参与一系列化学反应,其  $d^{13}\text{C}$  值的变化不仅决定于物理过程,而且还与这些化学变化有关.从研究区内各泉点逸出  $\text{CO}_2$  的百分含量及其  $d^{13}\text{C}$  值的多变性可以看出,各地热储内部及它们相互之间气液流体组分之间可能存在多种涉及  $\text{CO}_2$  的化学反应.所有这些化学反应以及气体迁移过程中的渗透、扩散等物理过程均可影响  $\text{CO}_2$  的  $d^{13}\text{C}$  值.因此,对各泉点逸出  $\text{CO}_2$  的  $d^{13}\text{C}$  值的变化应具体问题具体分析.

### 3.3 逸出气体氦、碳同位素组成的关系

图 5 显示,各类幔源气体的氦、碳同位素组成通常有其特定的变化范围.在  $^3\text{He}/^4\text{He}$  和  $d^{13}\text{C}$  值关系图上,热海地区第 1 组泉点的位置位于西太平洋消减带和长白山天池火山区的右下方.与腾冲地区最新的火山喷发活动有关的泉点(表 1 第 4 组)则介于它们二者之间.这表明,腾冲地区无论是过去还是现在,其深部幔源岩浆都不是典型的上地幔岩浆,它已受到大量的地壳物质的混染.这从该区火山岩的 Sr 同位素组成特征也可以得到证明<sup>[3]</sup>.这类幔源岩浆可能是腾冲这个特定构造环境条件下的产物.如果假定与区内最新火山喷发活动有关的泉点逸出的火山残余气体的氦、碳同位素组成大致与当时的活动岩浆类似,那么目前热海地区深部幔源岩浆的氦、碳同位素组成与当时的活动性幔源岩浆相比已有所不同;其  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值有一定幅度的降低,而  $\text{CO}_2$  的  $d^{13}\text{C}$  值则略有升高.实际上,幔源岩浆氦、碳同位素组成的上述变化

完全可以由其在地壳内的滞留而自然发生. 因为如果没有大量的新的幔源岩浆的不断补充, 随着时间的推移, 由于岩浆挥发组分在不断释放过程中的同位素分馏, 再加上放射成因  $^4\text{He}$  的自然增加以及可能的壳源物质的混染作用, 岩浆体的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值的降低和  $d^{13}\text{C}$  值的逐渐升高是必然趋势.

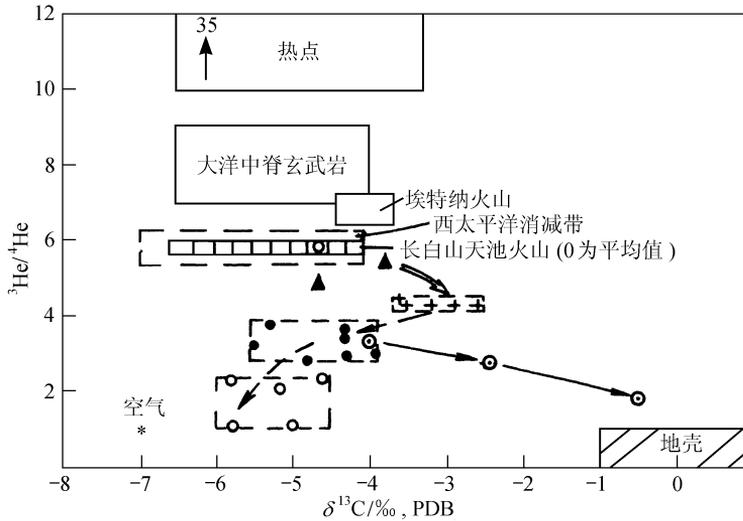


图 5 不同地区幔源气体的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值与  $d^{13}\text{C}$  值的关系  
 +示南北向断裂沿线泉点, ●示北西向断裂沿线泉点, ○示北东向断裂沿线泉点,  
 ▲示马鞍山火山口附近泉点, ○示区内较老火山岩中出露的泉

热海地区逸出气体的氢、碳同位素地球化学证据显示, 目前在热海地区壳内活动的幔源岩浆与导致区内最新火山喷发活动的幔源岩浆之间可能存在着渊源和继承关系. 这意味着, 自区内火山喷发活动结束以来, 最新的构造运动可能已使本区壳内幔源岩浆活动中心从马鞍山附近迁移到了热海地区.

### 4 结论

(1) 腾冲热海地区地热流体逸出气体中含有大量的幔源岩浆挥发组分, 表明该区地壳浅部存在幔源岩浆侵入活动. 研究区内目前强烈的地热流体活动和大量的幔源岩浆挥发组分的释放与该岩浆的侵入活动直接有关.

(2) 热海地区现代幔源岩浆挥发组分的释放受区内深浅不同的多组活动断裂控制. 研究区内南北向断裂最深, 它可能直接切割至深部以气相为主的高温热储, 其相对张性的活动特征导致深部幔源岩浆气体可迅速向地表迁移. 地球化学证据显示, 研究区内可能还存在北西向和北东向断裂, 其切割深度依次变浅. 这 3 组断裂可能分别控制着区内深浅不同的 3~4 个相对独立的地热储.

(3) 地热流体逸出气体的氢、碳同位素证据表明, 目前在热海地区壳内活动的幔源岩浆与导致区内最新火山喷发活动的幔源岩浆之间可能存在着渊源和继承关系. 这意味着, 区内最新的构造运动已使腾冲地区壳内幔源岩浆活动中心从马鞍山附近迁移到了热海地区.

致谢 气体化学及同位素分析得到中国地震局地质研究所王基华、范书全、高松升, 中国科学院地质与地球物理研究所霍卫国, 中国科学院大气物理研究所王学思等先生的帮助和支持, 特此致谢。

### 参 考 文 献

- 1 阚荣举, 赵晋明, 阚 丹. 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, 1996, 17(4): 28~33
- 2 韩新民, 周瑞琦, 周真恒. 腾冲火山地质研究述评. 地震地磁观测与研究, 1996, 17(6): 20~29
- 3 佟 伟, 章铭陶. 腾冲地热. 北京: 科学出版社, 1989. 3~80
- 4 Wang Xianbin, Xu Sheng, Li Yuefang, et al. The isotopic characters of mantle derived primary gases and volcanic activity in Tengchong area. Abstracts of 29th International Geological Congress, Kyoto, Japan, Vol 3, 1992. 609
- 5 上官志冠, 孙明良, 李恒忠. 云南腾冲地区现代地热流体活动类型. 地震地质, 1999, 21(4): 436~442
- 6 Lupton J E. Terrestrial inert gases: Isotope tracer studies and clues to primordial components in the mantle. Annu Rev Earth Planet Sci, 1983, 11: 371~414
- 7 Welhan J A, Poreda R, Rison W, et al. He isotopes in geothermal and volcanic gases of the Western United States: II. Long Valley caldera. J Volc Geotherm Res, 1988, 34: 201~209
- 8 Allard P, Jean-Baptiste P, D' Alessandro W, et al. Mantle-derived helium and carbon in groundwater and gases of Mount Etna, Italy. Earth Planet Sci Lett, 1997, 148(3-4): 501~516
- 9 戴金星. 云南省腾冲县硫磺塘天然气碳同位素组成特征和成因. 科学通报, 1988, 33 (15): 1 168~1 170
- 10 赵 平, 廖志杰, 过国颖, 等. 腾冲热海热田气相组分的定量分析及其意义. 科学通报, 1995, 40(24): 2 257~2 260
- 11 王先彬, 编著. 稀有气体同位素地球化学和宇宙化学. 北京: 科学出版社, 1989. 153~220
- 12 王先彬, 徐 胜, 陈践发, 等. 腾冲火山区温泉气体组分和氦同位素组成特征. 科学通报, 1993, 38(9): 814~817
- 13 上官志冠, 郑雅琴, 董继川. 长白山天池火山地热区逸出气体的物质来源. 中国科学. D 辑, 1997, 27(4): 318~324