长白山天池火山区幔源稀有气体释放特征*

上官志冠

孙明良

(国家地震局地质研究所, 北京 100029) (中国科学院兰州地质研究所, 兰州 730000)

关键词 长白山天池火山区 幔源稀有气体 $^3\text{He}/^4\text{He}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$, $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$, $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$ 同位素比值

长白山天池火山是我国大陆东部规模最大的一座近代活动火山, 新生代以来曾经历过多次大规模喷发活动, 全新世火山活动再度复活^[1]. 野外调查结果显示, 目前天池火山湖周围地区仍有大规模的水热异常活动, 其中长白、湖滨、锦江温泉群为典型代表. 这些泉群均伴有强烈的深源气体释放. 本次研究主要采集了长白和锦江两个泉群释放的气体. 气样采集采用排水取气法, 用预先抽好真空的不锈钢瓶存放. 采样点位置分布示于图1. 气体样品中稀有气体含量及其稳定同位素比值测试结果见表1.

1 天池火山区稀有气体成分及其稳定同位素组成

天池火山区深源气体释放强度、氢含量以及地热水的氢、氧、碳稳定同位素组成特征揭示, 该区地下水大致可分为: 冷水层、浅层地热水(氢泉)、中层地热水(高温泉点)和深层地热水(无氢泉)^[2]. 表1和图2显示, 长白温泉群所在地区地下各含水层逸出气中 He, Ar 和 Rn 含量从浅层至深层越来越低. 深层地热水逸出气中 He 含量甚至低至 0.2×10^{-6} 以下, 且有水温越高, 逸气中 He 含量越低的趋势(图2(c)). 锦江温泉逸出气中稀有气体含量, 特别是 He 含量远高于长白温泉. 这表明两个泉群的稀有气体释放机制可能有重大差异.

图1 长白山天池火山区稀有气体样品采样位置示意图

表1 天池火山区地下各含水层稀有气体含量及其稳定同位素组成

温泉群	含水层	He/ $\times 10^{-6}$	Ar/%	Rn/Bq·L ⁻¹	$^3\text{He}/^4\text{He} \times 10^{-6}$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$	$^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$
长白	1. 冷水层	60	0.27	150	7.89	291.6	40.62	4.39×10^{-2}
	2. 浅层热水	34	0.12	230	4.53~7.99	284.5~295.7	0.80~14.44	$(1.43\sim16.0) \times 10^{-3}$
	3. 中层热水	0.6~5	0.07	12~15	3.21~7.77	301.4~313.0	0.38~9.01	$(5.99\sim19.9) \times 10^{-4}$
	4. 深层热水	0.2~6	0.06	10	7.92	310.1	7.28	7.89×10^{-3}
锦江	中、深层热水	143~312	0.09~0.35	5~20	7.51~8.24	301.5~347.2	65.67~99.00	$(6.02\sim7.93) \times 10^{-2}$

1995-12-11 收稿, 1996-03-18 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目

图2 长白温泉群各含水层逸气的 He, Ar 含量以及深部热水 He 含量与水温的关系

深源稀有气体中 He 的同位素比值($^3\text{He}/^4\text{He}$)是揭示其物质来源的最可靠的参数之一. 不同来源的 He 其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 明显不同. 一般认为幔源 He、大气 He 和壳源 He 的参考值分别为 $(1.1\sim1.4)\times10^{-5}$ 、 1.4×10^{-6} 和 2×10^{-8} [3]. 天池火山区温泉逸出 He 的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 与温度的关系见图 3(a). 如图 3 所示, 锦江温泉和长白温泉群核心部位(图 1 中圆形区域内)的泉点不

图3 天池火山区逸出气体 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 与温泉水温的关系

1——长白泉群核心泉点, 2——锦江温泉群, 3——长白泉群周边泉点

论其水温高低, 其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值均十分相近, 变化范围为 $(7.51\sim8.24)\times10^{-6}$, 平均值是空气值(R_a)的 5.61 倍, 很显然其中含有大量的幔源 He. 特别值得指出的是, 位于长白温泉核心泉群边缘(图 1)的冷泉逸出 He 的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值与其相邻的各高温泉点的 He 同位素比值几乎完全相同(图 3(a)). 由于该冷泉水的氢、氧同位素组成和水化学组成均具浅层地下水特征[2], 因此其所含的大量幔源 He 不可能从浅层水获得, 而只能源自其下部的幔源物质. 从该区域各含水层逸出 He 的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值均十分接近, 以及含量(这里指气体中 He 的百分含量而不是 He 总量)从深往浅渐增的特征看, 该区域正下方可能有一个高温幔源 He 的发射源在源源不断地提供幔源 He 气体. 调查发现, 在上述核心泉群旁侧的所有泉点, 包括该泉群中的最高温点, 其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值均明显低于核心泉群中的泉点(图 1, 3(a)). 这表明长白泉群核心部位所在地存在一个柱状幔源 He 释放区, 在此区域内, 幔源 He 以场释放形式向上迁移. 在通过岩层上升时由于扩散速率降低, 幔源 He 在地下水中滞留时间逐渐延长, 加上降温因素, He 的溶解度随之升高, 致使出现从深往浅地下水逸出气中 He 的百分含量渐增的现象. 鉴于其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值基本不变, 所以可以认定此区域内幔源 He 释放基本不受浅层物质干扰. 周边泉点可能是由于偏离了上述柱状幔源 He 场释放区, 因而受到了浅源气体的干扰, 水温越高, 气体迁移

速度越快,迁移时产生的抽吸作用就越强烈,浅源气体的干扰也就越大,这可能是这类泉点逸出 He 的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 随水温升高而降低的原因(图 3(a)).

目前对幔源 Ar 的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 尚无统一认识,这主要与不同的地球脱气模式有关. 其值从略高于空气值(295.5)到数倍于此值不等^[3]. 天池火山区逸出气体的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 大多略高于空气值,变化范围(286~347)与环太平洋火山带地表火山岩的相应值(296~333)类似,而明显低于这个带上的海底火山岩(526~4 188)^[3]. 天池火山区逸出 Ar 的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 与温度的关系与 He 一样也分成两组,长白温泉群周边泉点的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 同样低于该泉群核心部位的泉点和锦江泉群(图 3(b)),其原因可能与 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 降低的原因类同.

从表 1 可见,长白温泉群浅层地下水中 Ar 含量较高,且其 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 与大气值接近,因此不能排除浅层地热水的逸出 Ar 含有较多的大气 Ar 成分. 但该区中深层地热水逸出气体最强烈,其 Ar 含量则极低(小于 0.07%),特别是在幔源 He 柱状场释放区内,这些微量 Ar 极可能与 He 一样也来自深部. 从研究区内 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 随水温升高而增大的趋势看(图 3(b)),该区深源 Ar 的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 可能略高于区内最大观测值(347.2).

锦江温泉所有泉点逸出气中 He 和 Ar 含量及 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 均高于长白温泉群,天池火山区测得的最高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ (8.24×10^{-6}) 和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ (347.2) 均出于此处,这表明该泉群与火山区深部幔源气体发射源区之间具有良好的联系通道. 据此认为,该泉群所在的北东向断层带目前活动较强烈,且其深部可能与幔源气体源区直接相连,因此深部幔源气体可沿着这一通道较迅速地迁移至地表释放.

2 讨论与结论

深源稀有气体 He, Ne 和 Ar 在上升过程中由于质量效应迁移能力有显著差异. 构造活动、岩浆活动、岩石热状态等也可对其迁移产生较大影响. 一般认为目前 ^3He 和 ^{20}Ne 在地幔中相对富集; ^4He 和 ^{40}Ar 主要是放射成因,在地壳内较富集; ^{36}Ar 则更多地存在于大气中. 因此地幔、地壳、大气均有其代表性的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 和 $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$ 值^[3]. 天然深源流体中不同来源的稀有气体各占多大比例,在 $^3\text{He}/^4\text{He} - ^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 和 $^3\text{He}/^4\text{He} - ^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$ 关系图上可以较清楚地显示出来. 图 4 显示,天池火山区所有释气点均落在代表地幔和空气两点的连线上方. 这表明该区稀有气体主要来自地幔,有空气影响,壳源物质的混染不明显. 腾冲火山区温泉逸出气体则既有幔源、空气混合成因,也有空气、壳源气体混合成因^[4]. 两火山区相比,当它们的 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 和 $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$ 相同时,天池火山区逸出气体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值更高,更接近原始地幔的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值.

图 4 还显示,大多数构造活动带上释放的稀有气体的同位素比值^[5~7] 均落在空气、地壳两点的连线两侧,因而主要为空气、壳源气体混合成因,只有极少数泉点显示出三元混合特征.

天池火山区锦江泉群和长白泉群核心部位逸出 He 的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 变化范围($(7.51 \sim 8.24) \times 10^{-6}$) 与冰岛和夏威夷群岛“热点”相比显然要低些,但却位于美国的黄石公园逸出 He 的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值变化范围内^[8]. 根据长白泉群核心部位存在柱状幔源 He 场释放区,作者认为,该区正下方地壳内不远处可能存在一个高温幔源岩浆囊. 鉴于其目前幔源稀有气体释放水平极低,因此它很可能是近代幔源岩浆喷发活动后的残留部分,且似未获得现代上地幔流体组分的有效补充.

图4 天池火山区及其他天然流体 $^3\text{He}/^4\text{He}$ - $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 和 $^3\text{He}/^4\text{He}$ - $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$ 的关系

1——天池火山区, 2——腾冲火山区, 3——活动构造带

综上所述, 天池火山区幔源稀有气体在长白泉群核心部位以场释放形式向外扩散, 在锦江泉群则是通过良好的构造通道释放。虽然二者释放机制不同, 但它们都是幔源岩浆余热及其射气在地表的直接出露点, 因此具有“热点”的某些特征。为将其与上地幔岩浆源直接相通的“热点”相区别, 作者将其称之为“亚热点”, 即壳内幔源岩浆残留体余热及其射气在地表的直接出露点。

致谢 孔令昌、孙凤民协助完成部分稀有气体分析, 野外工作得到郑亚琴、李范熙等先生的大力支持, 作者在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 许东满, 郑祥身, 许相希. 长白山天池地区全新世以来火山活动及其特征. 第四纪研究, 1993, (1): 85~94
- 2 上官志冠, 孔令昌, 孙凤民等. 长白山天池火山区深部流体成分及其稳定同位素组成. 地质科学, 1996, 31(1): 54~64
- 3 王先彬. 稀有气体同位素地球化学和宇宙化学. 北京: 科学出版社, 1989. 65~236
- 4 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
- 5 王先彬, 陈践发, 徐 胜等. 地震区温泉气体的地球化学特征. 中国科学, B辑, 1992, (8): 849~854
- 6 戴金星, 裴锡古, 戚厚发主编. 中国天然气地质学(1). 北京: 石油工业出版社, 1992. 56~64
- 7 王 蔚, 张景荣, 胡桂兴等. 湘西北地区现代温泉地球化学. 中国科学, B辑, 1995, 25(4): 427~433
- 8 Craig H, Lupton J E, Marti K *et al.* Helium isotope ratios in Yellowstone and Lassen park volcanic gases. Geophys Res Lett, 1978, 5: 897~900