

硼同位素在矿床学中的应用研究

程家龙^{1,2}, 赵永鑫¹, 柳丰华¹

(1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074;

2. 云南省地质矿产勘查院大理地质矿产所, 云南 大理 671000)

摘要: 硼在自然界有两种稳定同位素¹¹B 和¹⁰B, 常采用 $\delta(^{11}\text{B})/10^{-3}$ 来表示不同地质体的同位素组成。由于硼同位素在不同地质体中的分馏作用大, 在较大温度范围内岩浆-热液流体中的高活动性和化学性质稳定等方面的优势, 使硼同位素在地球科学研究中的作用越来越广泛。控制硼同位素分馏的主要因素是硼源。一般情况下, 非海相的硼酸盐矿物和与之相关的电气石的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值为负值, 而在某些盐湖卤水和与海相环境有关的硼酸盐矿物的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值则为正值。目前, 硼同位素示踪主要应用于块状硫化物矿床、与花岗岩有关的热液矿床以及盐湖矿床的研究。随着硼同位素分馏机制及其在不同环境地质样品中分布特征的深入研究, 硼同位素在解决矿床的成矿物质来源、矿床成因和成矿作用等方面将发挥更大的作用。

关键词: 硼同位素; 块状硫化物矿床; 热液矿床; 盐湖矿床

中图分类号: P597; P611 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2010)01-0063-07

0 引言

近年来, 随着同位素测试技术的不断进步, 稳定同位素分析已经演化为一种强有力的地球化学工具, 应用在地质领域的各个研究方向^[1]。硼同位素的三个特点使其在地质领域得到了广泛地应用: ①自然界中, ¹¹B 和¹⁰B 之间的同位素分馏非常大, 不同成因地质体的 $\delta(^{11}\text{B})/10^{-3}$ 相差较大^[2,3]; ②在较大的温度区间内, 硼同位素在岩浆和流体演化过程中保持着高活性^[4-6]; ③自然界中, 硼主要呈 $\text{B}(\text{OH})_4^-$ 或 $\text{B}(\text{OH})_3$ 形式存在, 硼在演化过程中不参加氧化-还原反应, 硼同位素的分馏主要由样品中硼所处的结构比例所决定^[2]。这些特征让硼同位素具有比其他稳定的和放射性的同位素更具有优越性, 并且可以作为唯一的、灵敏的示踪剂用于研究热液过程^[7-13]、蒸发岩与卤水的起源^[14,15]、古海洋和古气候研究^[16-19]、壳幔循环和重建过程^[20-26]、星云形成过程和宇宙事件^[16]、环境监测^[27-29] 等诸多方面。

硼同位素在矿床中的应用是近年来才发展起来

的。目前研究较多的是块状硫化物矿床(VMS 和 SEDEX)^[5,6,20,24,30-32]、盐湖矿床^[33-37] 和硼酸盐型硼矿床^[38-42]; 此外, 与花岗岩有关的 W-Sn 等矿床中也有少量的应用^[5,33]。本文旨在介绍硼同位素在上述矿床中的分布特征以及在矿床学中的应用研究。

1 各种储库中硼同位素组成

硼在自然界中有 2 种稳定同位素¹⁰B 和¹¹B。硼是易溶的轻元素, 主要存在于水圈和上地壳沉积岩系、海相沉积岩、大洋热液蚀变玄武岩及海水中^[30]。在地球化学研究中, 常采用 $\delta(^{11}\text{B})/10^{-3}$ 来表示:

$$\delta(^{11}\text{B})/10^{-3} = [(^{11}\text{B}/^{10}\text{B})_{\text{样品}} / (^{11}\text{B}/^{10}\text{B})_{\text{标准}} - 1] \times 1000$$

其¹¹B/¹⁰B 标准采用美国国家标准局(NIST)的 SRM 951 硼酸样品的¹¹B/¹⁰B 值, 其比值为 4.043 62 ± 0.001 37^[44]。

自然界的硼同位素分馏较大(图 1)。在非海相蒸发岩型矿物以及部分热液电气石中, $\delta(^{11}\text{B})$ 常常表现为负值; 而在一些与海相环境有关的地质体中,

收稿日期: 2009-01-08

作者简介: 程家龙(1983-), 男, 湖北襄樊人, 硕士, 专业为矿物学、岩石学、矿床学。通信地址: 云南省大理市下关镇兴盛 16 号云南省地质矿产勘查院大理地质矿产所; 邮政编码: 671000; 电子邮箱: chjl1984@163.com

$\delta(^{11}\text{B})$ 则常常表现为正值^[30]。例如:海水中的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值较大,并且比较稳定,其范围为 $38.678 \times 10^{-3} \sim 40.076 \times 10^{-3}$, 平均 39.5×10^{-3} , 而陆源水中的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值变化较大,为 $-15.9 \times 10^{-3} \sim 17 \times 10^{-3}$, 虽不同地域的同位素组成明显不同,但总是低于海水的同位素组成^[41,45]; 据不完全统计,海相蒸发沉积硼酸盐 $\delta(^{11}\text{B}) = 18 \times 10^{-3} \sim 32 \times 10^{-3}$, 平均 25×10^{-3} , 而非海相的蒸发沉积硼酸盐 $\delta(^{11}\text{B}) = -31 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3}$, 平均 -10×10^{-3} ^[3,15]。

大洋蚀变玄武岩与海底沉积物的硼同位素组成也明显高于大陆地壳岩石,并且偏差比较小。大陆热泉水及热泉沉积物中的硼同位素组成变化很大,视火山岩浆作用与海水及海相沉积物的混合程度而不同,与地热系统所处的大地构造位置有明显的依附关系。在水岩作用和热液蚀变中硼同位素也表现出特有的分布特征^[46]。

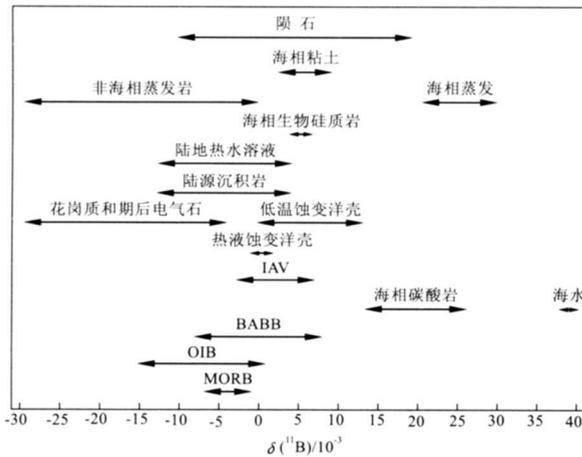


图1 不同的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值分布图

(据 W. M. White, 2000^[47] 修改)

Fig. 1 Distribution of $\delta(^{11}\text{B})$

MORB. 大洋中脊玄武岩 OIB. 海洋岛弧玄武岩

BABB. 弧后盆地玄武岩 IAV. 岛弧火山岩

2 矿床中硼同位素的组成

在国外,硼同位素在矿床研究中的应用十分常见,而国内这方面的研究却十分有限。近10年中,中科院青海盐湖研究所肖应凯等对青藏高原盐湖中的硼同位素组成做过详细研究;南京大学蒋少涌等对东秦岭银铜子和桐木沟铅锌矿床、广西大厂锡多金属矿床和一洞锡矿床、云南的个旧锡矿和西盟锡

矿做过少量的硼同位素研究工作。下面分别对金属矿床和非金属矿床中的硼同位素组成做简要介绍。

2.1 金属矿床中硼同位素的组成

硼同位素在金属矿床中的研究多应用于与海底热液或火山热液作用有关的块状硫化物型矿床和与花岗岩有关的热液矿床(如岩浆热液 W-Sn 矿床、Au-Cu 矿床)^[44]。

Palmer M R 等(1989)对世界上的40多个块状硫化物型矿床中的60个电气石的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值做了系统的测试和总结,这些矿床总的 $\delta(^{11}\text{B}) = -22.8 \times 10^{-3} \sim +18.3 \times 10^{-3}$ 。但是产于不同围岩中的矿床的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值又存在一定的差异,例如:产于变质碎屑沉积岩中矿床的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值和产于变质火山岩中矿床的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值基本一致,分别为 $-15.4 \times 10^{-3} \sim -1.7 \times 10^{-3}$ 和 $-15.7 \times 10^{-3} \sim -1.5 \times 10^{-3}$; 而与海相蒸发岩和碳酸盐岩有关的矿床的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值 ($-8.1 \times 10^{-3} \sim +18.3 \times 10^{-3}$) 差别较大,并且只有这类矿床中的电气石具有 $\delta(^{11}\text{B}) > 0$ 的特征^[20]。与非海相蒸发岩有关的澳大利亚 Broken Hill Pb-Zn-Ag 矿床中电气石的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值则较低,为 $-26.8 \times 10^{-3} \sim -17.0 \times 10^{-3}$ ^[22]; 加拿大安大略省 Kidd Creek 块状硫化物矿床电气石的 $\delta(^{11}\text{B}) = -13.6 \times 10^{-3} \sim -7.8 \times 10^{-3}$ ^[48]; 加拿大大不列颠哥伦比亚省的 Sullivan Pb-Zn-Ag 矿床电气石的 $\delta(^{11}\text{B}) = -11.1 \times 10^{-3} \sim -2.9 \times 10^{-3}$ ^[24]。这些矿床的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值与 Palmer M R 等(1989)的统计值基本上是相吻合的。

加拿大 Nova Scotia 热液 W-Sn 矿床中电气石的 $\delta(^{11}\text{B}) = -18.5 \times 10^{-3} \sim +3.5 \times 10^{-3}$; 英国 Cornwall 花岗岩浆热液 W-Sn 矿床中电气石脉的 $\delta(^{11}\text{B}) = -10.8 \times 10^{-3} \sim -2.8 \times 10^{-3}$, 比花岗岩中电气石的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值 ($-12.7 \times 10^{-3} \sim -5.9 \times 10^{-3}$) 稍高,花岗岩体边缘和接触带中发育的电气石-石英岩和石英-黄玉-电气石岩的 $\delta(^{11}\text{B}) = -10.5 \times 10^{-3} \sim +0.7 \times 10^{-3}$; 澳大利亚超大型 Telfer 金矿床中电气石 $\delta(^{11}\text{B}) = -14.0 \times 10^{-3} \sim -12.6 \times 10^{-3}$, 比当地 Minyari 花岗岩中电气石 $\delta(^{11}\text{B})$ 值 ($-16.2 \times 10^{-3} \sim -15.2 \times 10^{-3}$) 稍高^[43]。我国广西大厂锡多金属矿床热液成因的条带状电气石 $\delta(^{11}\text{B}) = -5 \times 10^{-3} \sim -1 \times 10^{-3}$, 与花岗岩接触带附近的石英-电气石脉中电气石的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值 ($-5 \times 10^{-3} \sim -1 \times 10^{-3}$) 基本是一致的^[6]; 湖南香花岭热液锡矿氟硼镁石的 $\delta(^{11}\text{B}) = -7.69 \times 10^{-3} \sim +1.34 \times 10^{-3}$ ^[32]。从以上数据可以看出,我国与花岗岩体有关矿床的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值 ($-5 \times 10^{-3} \sim -1 \times 10^{-3}$) 比国外与花岗岩

相关的热液矿床的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值(多为 $-15 \times 10^{-3} \sim 0$) 偏高, 这可能与花岗岩的成分有关, 具体原因需要进一步的地球化学研究工作来证实。

2.2 盐湖和硼酸盐矿床中硼同位素的组成

硼作为一种成盐元素广泛分布在盐湖卤水和盐湖沉积物中^[19]。中科院青海盐湖研究所对青藏高原地区盐湖中的硼同位素做了大量的研究工作。李俊周等(1996)测定的大柴达木盆地盐湖及外围水系的 $\delta(^{11}\text{B}) = 4.96 \times 10^{-3} \sim 9.11 \times 10^{-3}$, 平均 6.51×10^{-3} , 而盐湖沉积物的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值为 $-17.78 \times 10^{-3} \sim -2.94 \times 10^{-3}$ ^[34]; 肖应凯等(2001)测定的柴达木盆地中盐湖卤水的 $\delta(^{11}\text{B}) = -6.1 \times 10^{-3} \sim 31.4 \times 10^{-3}$, 平均 9.6×10^{-3} , 表明它们是陆相来源^[19]。王庆忠(2004)研究大柴旦盐湖卤水的 $\delta(^{11}\text{B}) = -13.0 \times 10^{-3} \sim +16.3 \times 10^{-3}$, 小柴旦盐湖卤水的 $\delta(^{11}\text{B}) = -12.2 \times 10^{-3} \sim +23.0 \times 10^{-3}$; 马岛盐湖卤水的 $\delta(^{11}\text{B}) = -6.4 \times 10^{-3} \sim +3.5 \times 10^{-3}$, 属于陆相成因^[37]。

此外, 对硼酸盐型矿床中的硼同位素也做了少量的研究。中国辽东地区硼矿床中电气石和硼镁(铁)矿物的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值分别为 $-3.8 \times 10^{-3} \sim +9.7 \times 10^{-3}$ 和 $+0.8 \times 10^{-3} \sim +17.4 \times 10^{-3}$ ^[38, 39, 41], 两者之间存在一个系统的差异。部分学者认为电气石和硼镁(铁)矿物都是来自于陆源环境, 两者的差异是由于后期的地质作用中硼同位素重新分配的结果^[41], 也有学者认为两者不是同源的, 较高 $\delta(^{11}\text{B})$ 值的硼镁(铁)矿物是来自于海相沉积环境^[38, 39]。肖荣阁等(2002)测定天津蓟县硼矿床锰方硼石的 $\delta(^{11}\text{B}) = +6.7 \times 10^{-3} \sim +14.9 \times 10^{-3}$, 表明硼元素是来自于海相沉积环境^[42]。此外, 肖荣阁等(2001)测定湖南常宁热液硼矿床硼酸盐的 $\delta(^{11}\text{B}) = +8.26 \times 10^{-3} \sim +24.58 \times 10^{-3}$ ^[32]。

3 硼同位素在矿床学中的应用

目前, 硼同位素在矿床中的应用主要涉及到研究成矿物质来源、成矿作用和矿床成因等方面。

3.1 判别成矿物质来源和成矿环境

前已述及, 硼同位素 $\delta(^{11}\text{B})$ 值在不同地质体中的差别较大, 特别是海相和非海相蒸发岩具有完全不同的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值, 因此, 硼同位素作为一种良好的地球化学示踪剂可以用于判别成矿环境和成矿物质来源。Palmer(1991)根据不同地质体中截然不同的 δ

(^{11}B) 值, 从硼的浓度和 $\delta(^{11}\text{B})$ 值的关系, 总结了不同沉积环境的硼同位素组成图(图 2)^[30]。据此, 可以根据矿床硼同位素的组成判断流体的来源。

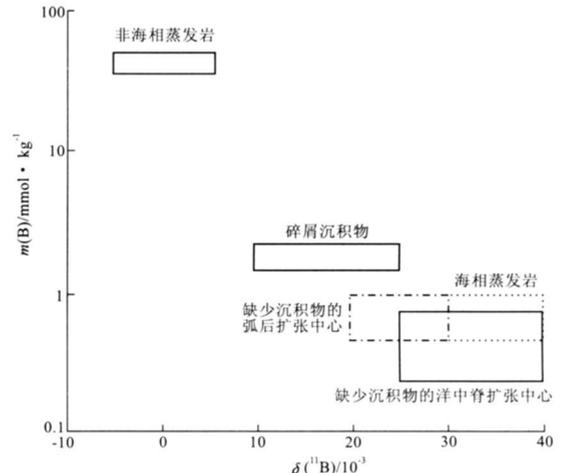


图 2 不同源区流体的硼同位素分布图

(据 Palmer, 1991^[30] 修改)

Fig. 2 Plot of $\delta(^{11}\text{B})$ in the different source area

Slack J F 等(1989)对澳大利亚 Broken Hill 超大型 Pb-Zn-Ag 矿床的地质、地球化学研究表明, 该矿床底盘岩石中可能发育一套古蒸发岩系, 并对成矿有重大影响。硼同位素研究证实了这一推断, 较低的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值 ($-23.1 \times 10^{-3} \sim -17.2 \times 10^{-3}$) 还明确表明它们是来自非海相蒸发硼酸盐^[49]。S Y Jiang(2001)对我国的银洞子和桐木沟 Pb-Zn 矿床的硼同位素研究也发现这些矿床的底盘可能为一套非海相的蒸发岩^[6]。

南非太古代 Barberton 绿岩带中电气石的硼同位素研究表明, 蒸发沉积岩中电气石的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值为 $-0.3 \times 10^{-3} \sim -0.2 \times 10^{-3}$, 与蚀变玄武岩和科马提岩中电气石的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值相近 ($-1.9 \times 10^{-3} \sim +2.2 \times 10^{-3}$), 而切层的电气石脉的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值较低 ($-5.7 \times 10^{-3} \sim -3.7 \times 10^{-3}$)。Byerly 和 Palmer 认为沉积岩和火山岩中电气石的硼源来自海相蒸发岩, 电气石形成于低温环境 ($< 100^\circ\text{C}$), 而石英-电气石脉的形成温度较高 ($350 \sim 600^\circ\text{C}$), 硼来自活化的蒸发岩。喜马拉雅区 Bengal Fan 的钻孔 (ODP Leg 116) 中新世沉积物 (10 Ma) 中的碎屑电气石的 $\delta(^{11}\text{B}) = -10.2 \times 10^{-3} \sim +4 \times 10^{-3}$, 大多数样品为 $-6 \times 10^{-3} \sim +4 \times 10^{-3}$, 而喜马拉雅高地结晶变质岩中电气石的 $\delta(^{11}\text{B}) = -16.1 \times 10^{-3} \sim -9.0 \times 10^{-3}$, 喜马拉雅低地变质沉积岩中电气石的 $\delta(^{11}\text{B}) = -14.4 \times 10^{-3} \sim +3.5 \times 10^{-3}$ 。因此, Chaussidon

等认为这些碎屑电气石可能主要来自后者的风化剥蚀作用^[16]。

3.2 成矿作用与矿床成因研究

硼同位素在研究块状硫化物矿床的成矿作用和成因方面应用较广泛,取得的成果颇多。而对其他类型矿床(如岩浆热液 W-Sn 矿床、Au-Cu 矿床等)的研究则刚开始。对于块状硫化物矿床,无论是世界范围内,还是单个矿床内(如加拿大 Sullivan 矿床),电气石的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值变化范围均较大。控制硼同位素组成的主要因素是硼源。成矿热液与不同的硼源岩石发生水/岩交换作用,淋滤岩石中的硼,形成了具有不同 $\delta(^{11}\text{B})$ 值的电气石^[30](图3)。另外,由于水/岩比值、温度、电气石形成期次、瑞利分馏的影响,海水混染作用、后期热液蚀变和区域变质作用等均对电气石的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值有一定影响^[16]。

有些矿床的研究历史悠久,但是其成因却存在较大的争议,硼同位素研究有时在解决这种争端中意义重大。大厂锡矿产于泥盆纪裂谷盆地碎屑岩和碳酸盐岩中,其成因一直有燕山期花岗岩浆热液夕卡岩型矿床和泥盆纪块状硫化物矿床之争。S Y Jiang 等(2001)研究了大厂锡矿两种类型的电气石硼同位素,发现与层状矿体有关的条带状电气石的硼同位素组成为 $-17.5 \times 10^{-3} \sim -15.0 \times 10^{-3}$,与花岗岩有关的石英-电气石脉硼同位素组成为 $-16.4 \times 10^{-3} \sim -14.5 \times 10^{-3}$,两种电气石的硼同位素组成几乎不存在系统差异。但结合韩发等计算的两种电气石的氧同位素温度,分别为 $(210 \pm 38)^\circ\text{C}$

($n=3$)和 425°C ($n=1$),作者计算出形成两种电气石的成矿热液的硼同位素组成分别为 $-5 \times 10^{-3} \sim -1 \times 10^{-3}$ 和 -10×10^{-3} 左右;由此可见,两种电气石为不同的来源,使人们对大厂锡矿的成因有了进一步的认识^[6]。

Shao-Yong Jiang 等(1999)研究了加拿大 Sullivan Pb-Zn-Ag 矿床电气石的硼同位素组成,其 $\delta(^{11}\text{B}) = -11.1 \times 10^{-3} \sim -2.9 \times 10^{-3}$,这一数值与世界上 33 个块状硫化物矿床和典型的变质沉积岩中电气石的硼同位素组成是一致的,与矿体下盘碎屑沉积岩的硼也是一致的。然而, Sullivan Pb-Zn-Ag 矿床内大量的电气石暗示了当地的碎屑沉积岩不是硼的唯一来源,作者认为深埋于矿体下盘的非海相蒸发岩很可能是额外的硼同位素的来源。电气石的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值的变异很可能反映了这两种硼来源的混合源^[31]。

4 讨论与展望

虽然目前硼同位素应用在地球科学领域的许多方面,但是在硼同位素的分馏机制问题和在矿床应用等方面却依然存在许多问题。

硼同位素的分馏机制问题一直是目前各国科学家亟待解决的问题,虽然取得了许多成果,但是也存在较大的争议。控制硼同位素分馏的因素较多,其中硼源是控制地质体硼同位素组成的主要因素,在

相同的硼源条件下,硼同位素的分馏还受到水-岩交换反应、温度和压力、pH 值、吸附作用以及淋滤作用等因素的影响。

水-岩反应中硼同位素的分馏机制问题研究较多,观点较为统一。Jiang S Y (1997) 对我国大厂锡矿床的硼同位素组成进行了系统的研究。作者指出,在非常温条件下,热液活动中的硼同位素的分馏主要是由热液对岩石的淋滤和热液矿物的沉淀造成

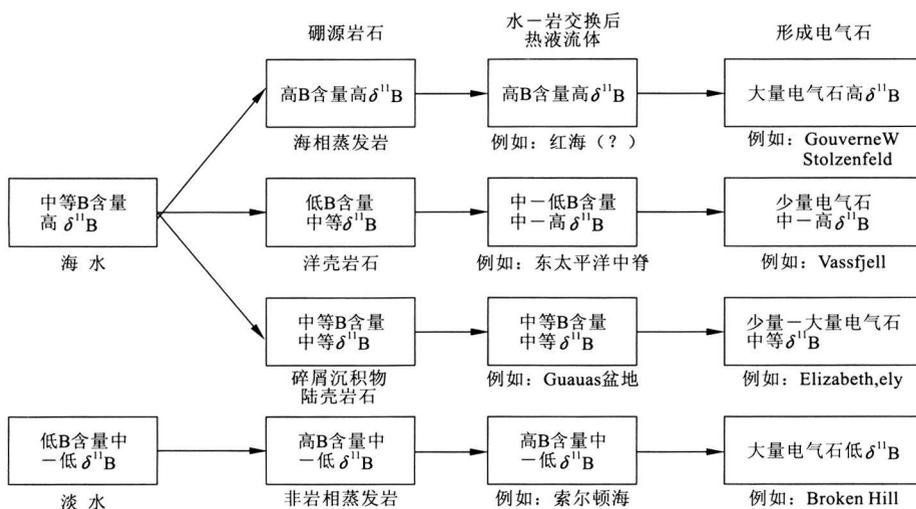


图3 不同源区流体的硼同位素组成(描述用修饰语是相对的)

(据 Palmer, 1991^[30] 修改)

Fig. 3 Boron isotopic composition of the different source area

的,在这种情况下, ^{10}B 都趋于在蚀变矿物中富集,流体中则相对富含 ^{11}B ,其结果是在海底的火山岩和沉积岩遭受热液淋滤(或者补给)时会生成比源岩更富 ^{11}B 的流体,因此热液矿物的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值就相对较高^[50];肖荣阁等(2001)在研究湘南高温地热区的硼同位素组成时则指出,硼同位素在水-岩交换作用中还和硅质带入、带出和是否形成含水矿物有关,在硅化交代作用中,随着硅质的带入, ^{11}B 质被置换带出,岩石进一步亏损 ^{11}B ^[32]。这一点与部分学者对海底热液和大洋玄武岩的测试分析结果是一致的^[8-12,52],即在一般情况下,在水-岩交换作用中, ^{11}B 优先进入流体相,而 ^{10}B 则残留在固相中,造成了硼同位素的分馏。

温度是控制硼同位素分馏的一个重要参数。然而,在目前的研究程度下,温度对于硼同位素分馏的影响还处在定性的实验阶段。通常认为蒸发温度越高,所产生的硼同位素分馏越大^[53];也有实验数据显示:在高温($> 425\text{ }^\circ\text{C}$)条件下,在 $\text{Na}-\text{Ca}-\text{Cl}$ 的热液系统中,硼同位素没有发生盐水和蒸汽之间重大的分馏作用;在低温条件下($150\sim 250\text{ }^\circ\text{C}$),在自然地质系统中仅仅发生有限的水蒸气与流体之间的硼同位素分馏($< 3 \times 10^{-3}$)^[31]。因此,温度对于硼同位素分馏的影响存在较大的争议。假设温度对于硼同位素分馏的影响是不显著的,那么前面提到的 S Y Jiang 等(2001)利用矿物的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值及矿物形成温度来推算矿物形成时流体的 $\delta(^{11}\text{B})$ 值的方法就是值得商榷的;如果温度对于硼同位素分馏的影响是显著的,那么就可以考虑根据硼同位素来建立地质温度计。因此,了解温度对硼同位素分馏的影响对于扩展硼同位素在地质方面的应用及对数据的解释具有重要的意义。

此外,pH值也是控制硼同位素分馏的一个重要参数。一般认为,流体中 $\text{B}(\text{OH})_3$ 和 $\text{B}(\text{OH})_4^-$ 的质量分数是随着pH值的变化而变化的,在变化的过程中发生了硼同位素的分馏^[31]。Emmanuel Lemarchand等(2007)通过铁、锰氧化物吸附实验的研究,认为在自然界, ^{11}B 富集在与铁或者锰的氧化物相互平衡的流体中,并且该过程受到流体的pH值的控制,在酸性和近中性溶液中, ^{11}B 优先富集在流体中,而当pH值大于9时,形成的矿物中的 ^{11}B 值则大大增加^[54]。

硼同位素作为一种示踪剂,在地质学的应用中虽然得到了长足的发展,但是也存在许多不足之处。硼同位素理论体系的建立还不是很完善,分馏机制

的明确与否势必影响到数据解释的合理性和准确性,其解释是否会像硫、氧、氢等稳定同位素那样随着分馏机制认识的不断深入而产生变化,需要进一步的研究工作。目前硼同位素在矿床学中的应用也很有限,虽然在块状硫化物矿床应用中取得了许多研究成果,但是在许多热液矿床中的应用才刚刚起步;目前用于硼同位素研究的主要矿物是电气石,少量涉及到了其他的硼酸盐矿物,对于许多含硼矿物的硼同位素组成及地球化学行为还不是很了解,特别是共生的不同含硼矿物的同位素平衡组成也是当前硼同位素研究的薄弱环节,同时也将影响到不同测试对象所得到的数据的可比性问题;硼同位素在流体中具有相当高的含量,部分学者直接对地质流体的硼同位素组成进行了测试,随着测试精度的不断提高,可否通过直接测定矿物中流体包裹体的硼同位素组成来研究流体的来源问题值得进一步的探讨。因此,加大硼同位素的理论和应用研究,对于扩展硼同位素在矿床学中的应用将具有重要意义。

参考文献:

- [1] 夜卫平,冯建忠. 同位素地球化学研究进展及动态[J]. 陕西地质, 2006, 24(2): 75-85.
- [2] 刘卫国,彭子成,肖应凯. 硼、氯同位素测定方法及地球化学研究进展[J]. 地球科学进展, 1998, 13(6): 547-554.
- [3] 肖应凯,肖军,赵志琦,等. 延庆杨户庄第四纪有孔虫的非海相生存环境: 硼和锶同位素证据[J]. 科学通报, 2008, 53(7): 803-806.
- [4] Leeman W P, Sisson V B. Geochemistry of boron and its implications for crustal and mantle processes [C]. In: Grew E S, Anovitz L M. Boron: Mineralogy, Petrology and Geochemistry. Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America, 1996: 645-708.
- [5] Slack J F. Tourmaline associations with hydrothermal ore deposits [C]. In: Grew E S, Anovitz L M. Boron: Mineralogy, Petrology and Geochemistry. Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America, 1996: 559-644.
- [6] Jiang S Y. Boron Isotope Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits in China: A Preliminary Study [J]. Phys. Chem. Earth (A), 2001, 26(9-10): 851-858.
- [7] 刘从强. 流体-岩石反应体系中的硼同位素地球化学[J]. 地球化学, 1996, 25(1): 93-100.
- [8] Sylwia Krolkowski & Ciaglo, Annette Deyhle, Folkmar Hauff, et al. Boron isotope geochemistry and U-Pb systematics of altered MORB from the Australian Antarctic Discordance (ODP Leg 187) [J]. Chemical Geology, 2007, 242: 455-469.
- [9] You C F, Spivack A J, Gieskes J M, et al. Experimental study

- of boron geochemistry: Implications for fluid processes in subduction zones[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59 (12): 2435-2442.
- [10] Chiara Boschi, Andrea Dini Gretchen L, Fruh-Green, *et al.* Isotopic and element exchange during serpentinization and metasomatism at the Atlantis Massif (MAR 30_N): Insights from B and Sr isotope data[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008: 323-335.
- [11] Jesse Smith H, Arthur J Spivack, Hubert Staudigel, *et al.* The boron isotopic composition of altered oceanic crust[J]. *Chemical Geology*, 1995, 126: 119-135.
- [12] Youa C F, Castilloa P R, Gieskesa J M, *et al.* Trace element behavior in hydrothermal experiments: Implications for fluid processes at shallow depths in subduction zones[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 140: 41-52.
- [13] Darrell T Woodford, Virginia B Sisson, William P Leeman. Boron metasomatism of the Alta stock contact aureole, Utah: Evidence from borates, mineral chemistry, and geochemistry[J]. *American Mineralogist*, 2001, 86: 513-533.
- [14] 宋鹤彬. 川西成都盐盆平落4井富钾硼溴浓卤水水化学同位素地球化学特征及形成机制[J]. *地球学报*, 1997, 18(3): 282-289.
- [15] 黄思静, 曾允孚. 四川成都盆地某深层富钾卤水的地球化学特征及成因[J]. *沉积学报*, 1997, 15(3): 67-71.
- [16] 蒋少涌. 硼同位素及其地质应用研究[J]. *高校地质学报*, 2000, 6(1): 1-16.
- [17] 刘羿, 彭子成, 刘卫国, 等. 古海水pH值代用指标——海洋碳酸盐硼同位素研究进展[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(12): 1240-1250.
- [18] 刘卫国, 彭子成, 肖应凯, 等. 南海珊瑚礁硼同位素组成及环境意义[J]. *地球化学*, 1999, 28(6): 534-541.
- [19] 肖应凯, Swihard G H, 肖云, 等. 海水蒸发时蒸气相硼的浓度及硼同位素分馏研究[J]. *盐湖研究*, 2001, 9(4): 15-23.
- [20] Palmer M R, Slack J F. Boron isotopic composition of tourmaline from massive sulfide deposits and tomalinites[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1989, 103: 434-451.
- [21] Palmer M R. Boron isotope systematics of hydrothermal fluids and tourmalines: a synthesis[J]. *Chem. Geol.*, 1991, 94: 111-121.
- [22] Slack J F, Palmer M R, Stevens B J, *et al.* Origin and significance of tourmaline-rich rocks in the Broken Hill District[J]. *Australia Econ. Geol.*, 1993, 88(3): 505-541.
- [23] Jiang S Y. Stable and radiogenic isotope studies of tourmaline: An overview[J]. *Czech Geol. Soc.*, 1998, 43(1-2): 75-90.
- [24] Jiang S Y, Palmer M R, Slack J F, *et al.* Boron isotope systematics of tourmaline formation at the Sullivan Pb-Zn-Ag deposit[J]. *British Columbia. Chem. Geol.*, 1999, 158: 131-144.
- [25] 蒋少涌, 于际民, 凌洪飞, 等. 壳幔演化和板块俯冲作用过程中的硼同位素示踪[J]. *地学前缘*, 2000, 7(2): 391-399.
- [26] Arnaud Agranier, Cin-Ty A Lee, Zheng-Xue A Li *et al.* Fluid mobile element budgets in serpentinized oceanic lithospheric mantle: Insights from B, As, Li, Pb, PGEs and Os isotopes in the Feather River Ophiolite, California[J]. *Chemical Geology*, 2007, 245: 230-241.
- [27] 王琳, 齐孟文. 环境同位素示踪在环境研究中的应用[J]. *环境与可持续发展*, 2006, 1: 29-30.
- [28] David L Naftza, Thomas D Bullen, Bert J Stolp, *et al.* Utilizing geochemical, hydrologic, and boron isotopic data to assess the success of a salinity and selenium remediation project, Upper Colorado River Basin, Utah[J]. *Science of the total environment*, 2008, 392: 1-11.
- [29] 张崇耿, 肖应凯. 硼同位素分馏及其在环境研究中的应用[J]. *盐湖研究*, 2002: 55-60.
- [30] 祝朝辉, 张乾, 朱笑青, 等. 中国SEDEX型矿床成矿流体硼、氢、氘同位素组成研究评述[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2006, 25(3): 279-284.
- [31] Shao-Yong Jiang, Martin R Palmer, John F Slack, *et al.* Boron isotope systematics of tourmaline formation in the Sullivan Pb-Zn-Ag deposit, British Columbia, Canada[J]. *Chemical Geology*, 1999, 158: 131-144.
- [32] 肖荣阁, 大井隆夫, 野村雅夫, 等. 湘南高温热液矿床中硼同位素组成及分馏作用研究[J]. *华南地质与矿产*, 2001, (2): 1-7.
- [33] 肖应凯, Shirodkar P V, 刘卫国, 等. 青海柴达木盆地盐湖硼同位素地球化学研究[J]. *自然科学进展*, 1999, 9(7): 613-618.
- [34] 李俊周, 孙大鹏. 大柴达木盐湖硼同位素地球化学研究[J]. *地球化学*, 1996, 25(3): 277-285.
- [35] 王庆忠, 肖应凯, 张崇耿, 等. 青海和西藏的某些天然硼酸盐矿物的硼同位素组成[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, 20(4): 364-366.
- [36] 肖应凯, 魏海珍, 尹德忠. 盐湖硼同位素地球化学研究进展[J]. *盐湖研究*, 2000, 8(1): 30-40.
- [37] 宋粤华. 硼同位素化学和柴旦地区盐湖硼同位素地球化学研究[J]. *盐湖研究*, 2004, 12(2): 68-69.
- [38] 吴虹. 辽宁宽甸砖庙矿区硼矿床地球化学特征[J]. *化工矿产地质*, 2005, 27(4): 206-210.
- [39] 刘敬党. 辽东—吉南地区早元古代硼镁石型硼矿床地质特征及矿床成因[J]. *化工矿产地质*, 1996, 18(3): 207-212.
- [40] 谢宏远, 冯本智, 邹日, 等. 辽宁杨木杆硼矿床地质地球化学特征[J]. *矿床地质*, 1998, 17(4): 355-362.
- [41] 肖荣阁, 大井隆夫, 费红彩, 等. 辽东地区沉积变质硼矿床及硼同位素研究[J]. *现代地质*, 2003, 17(2): 137-142.
- [42] 肖荣阁, 大井隆夫, 侯万荣, 等. 天津蓟县硼矿床方硼石矿物的硼同位素研究[J]. *现代地质*, 2002, 16(3): 270-275.
- [43] 陈岳龙, 杨忠芳, 赵志丹. 同位素地质年代学与地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [44] Cantanzaro E J, Champion C E, Garner E L. Boric acid: Isotopic and assay standard reference materials[J]. *U. S. National Bureau Standards Special Publication*, 1970, 260(17): 70.
- [45] 肖荣阁, 大井隆夫, 蔡克勤, 等. 硼及硼同位素地球化学在地

- 质研究中的应用[J]. 地学前缘, 1999, 6(2): 361-368.
- [46] Simon M Peacock, Richard L Hervig. Boron isotopic composition of subduction-zone metamorphic rocks[J]. *Chemical Geology*, 1999, 160: 281-290.
- [47] White W M. *Geochemistry*(电子版)[M]. 美国康奈尔大学, 2000.
- [48] 蒋少涌, 凌洪飞, 倪培, 等. 热液成矿作用过程中的硼同位素示踪[J]. 中国科学基金, 2000, 4: 225-228.
- [49] Slack J F, Palmer M R, Stavens B P J. Boron isotope evidence for the involvement of non-marine evaporites in the origin of the Broken Hill ore deposits[J]. *Nature*, 1989, 342: 913-916.
- [50] Jiang S Y. Origin of tourmaline formation and its bearing on ore genesis in the Dachang tin-polymetallic deposit P. R. China[C]. Society of economic Geologists Field conf. Abstr., Lisbon, 1997: 62.
- [51] Annette Deyhle, Achim Kopf. Deep fluids and ancient pore waters at the backstop: Stable isotope systematics (B, C, O) of mud-volcano deposits on the Mediterranean Ridge accretionary wedge[J]. *Geology*, 2001, 29(11): 1031-1034.
- [52] M usashi M, O ssaka T, Qi T, *et al.* Nature brone isotope fractionation between hot spring water and rock in direct contact[J]. *Isotopenraxis*, 1991, 27: 163-166.
- [53] 廖步勇, 肖应凯, 魏海珍, 等. 硼酸溶液蒸发时温度对硼的挥发和硼同位素分馏的影响[J]. *盐湖研究*, 2003, 11(2): 24-28.
- [54] Emmanuel Lemarchand, Jacques Schott, Jérôme Gaillardet. How surface complexes impact boron isotope fractionation: Evidence from Fe and Mn oxides sorption experiments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 260: 277-296.

STUDY ON BORON ISOTOPE AND APPLICATION TO STUDY ON MINERAL DEPOSIT

CHENG Jia-long^{1,2}, ZHAO Yong-xin¹, LIU Feng-hua¹

(1. *China University of Geosciences(Wuhan)*, Wuhan 430074, China;

2. *Dali Branch of Yunan Institute of Geology and Mineral Resource Prospecting*, Dali 671000, Yunan, China)

Abstract: In nature, boron has two stable isotopes (^{10}B and ^{11}B), usually $\delta^{11}\text{B}/10^{-3}$ values as the isotopic composition of geological bodys. As severe large fractionation between the two isotopes of ^{10}B and ^{11}B in nature, high mobility of boron during both magmatic and fluid-related processes within a large temperature range takes place and lacks complexity associated with oxidation/reduction reactions, boron isotope has been developed in recent years as a powerful geochemical tool. The main factor of controlling boron isotope fractionation is the source of boron. Commonly, $\delta^{11}\text{B}$ of the non-marine borate minerals and tourmaline is of negative value and $\delta^{11}\text{B}$ of some salt lake and the marine minerals is positive. Because of the notable characteristics, there are great progresses in application to study on ore deposits, especially in the massive sulfide deposits, in the granite-related hydrothermal deposits and in salt lake deposits. Geochemistry of boron isotope has been applied widely. There are great success to solve the material source of mineralization, genesis of mineral deposits and so on.

Key Words: boron Isotope, massive sulfide deposits, hydrothermal deposits, salt lake deposits