

板块俯冲对岩浆作用影响的同位素地球化学示踪研究

国 坤, 翟世奎, 于增慧, 蔡宗伟, 张 侠

(中国海洋大学 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 同位素已成为俯冲带岩浆作用研究中灵敏的地球化学示踪剂, 是约束岩浆运移过程和时间尺度的有力工具。综述了近几十年来利用 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素、Li 和 B 同位素以及 Be 和短周期铀系同位素等方法, 在俯冲带岩浆作用过程、时间尺度、岩浆源区物质特征、岩浆形成演化及控制机制等方面取得的进展和成果。最后指出将不同同位素研究应用于弧后盆地岩浆作用的研究中, 必将为全球俯冲带岩浆作用研究带来突破性的进展和成果。

关键词: 板块俯冲; 岩浆作用; 同位素; 弧后盆地

中图分类号: P67 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)06-0126-07

doi: 10.11759/hyqx20150826002

板块构造理论提供了一个统一的理论框架, 使我们理解各种形形色色的地质现象, 如地幔的不均一性, 大陆、海洋和岩石圈的演化, 地震、火山、金属矿床和油气藏的分布等。汇聚板块边缘的俯冲带是板块构造理论模型的一个重要组成部分^[1], 是板块消亡并同时产生岩浆作用的关键地区之一, 并在地壳和地幔的长期物质组成平衡中扮演重要角色^[2]。元素从俯冲板块回到上覆地壳和软流圈中是地球上元素物质再循环的重要过程之一。俯冲板块释放的流体和/或熔体在弧岩浆和新地壳的产生过程中发挥了重要作用, 残余板块物质继续俯冲至深部, 最终影响了深部地幔的化学组成^[3-4], 部分古老板块可能参与形成了板内玄武岩岩浆^[5-6]。

俯冲带岩浆作用研究是全球岩浆作用研究的重要组成部分。不同于大洋中脊岩浆来源相对较单一, 俯冲带岩浆具有多来源的特点, 地幔楔物质熔融是该区岩浆物质的主要来源, 而俯冲洋壳和深海沉积物也有着重要的贡献^[7], 在一些特殊地区甚至还有基底壳源物质加入到岩浆源区中, 如冲绳海槽^[8-9]。绝热减压熔融过程是控制洋中脊地区地幔物质熔融的主要机制^[10], 而在俯冲带, 除绝热减压熔融过程之外, 俯冲板块在一定深度下释水造成地幔物质熔点降低也是岩浆形成的重要机制。

同位素在岩浆演化分异过程中保持恒定, 不会受控于晶体-液体的平衡过程, 部分熔融作用形成的岩浆具有源区同位素组成的特点^[11]。因此, 同位素在岩浆作用研究中发挥了重要作用, 特别是近几十年同位素测试分析技术提高之后, 非传统同位素的出

现为俯冲带岩浆作用研究提供了新的方法和模型。放射性同位素 Sr-Nd-Pb-Hf 在俯冲带岩浆作用研究中应用最为广泛, 包括识别地幔端元、示踪俯冲物质及壳-幔物质的混合、计算沉积物组分比例等^[12-13]。Li、B 同位素, μ -Be 和短周期铀系同位素, 在示踪和计算俯冲组分的影响中发挥重要作用^[14-16]。本文系统整理了国内外俯冲带岩浆作用研究方面经典的和新的同位素资料, 对上述同位素的研究进展与研究成果进行了评述, 最后提出了弧后盆地岩浆作用研究的热点及同位素研究的应用前景。

1 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素的示踪研究

Sr-Nd-Pb-Hf 同位素是俯冲带岩浆作用研究中最广泛的一组同位素。本文着重总结了弧后盆地玄武岩 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素组成的研究。早期弧后盆地玄武岩的研究, 主要是为了证明 BABB(弧后盆地玄武岩)是 MORB(大洋中脊玄武岩)和 IAB(岛弧玄武岩)之间的过渡类型。Hawkins 等^[17], Volpe 等^[18-20]连

收稿日期: 2015-08-26; 修回日期: 2016-02-17

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)(2013CB429702); 中国大洋矿产资源研究开发协会“十二五”重大项目(DY125-11-R-01, DY125-12-R-03)

[Foundation: National Key Basic Research Programme of China (973), No.2013CB429702; China Ocean Mineral Resources R&D Association (COMRA) Project, No.DY125-11-R-01, No.DY125-12-R-03]

作者简介: 国坤(1986-), 男, 山东即墨人, 博士研究生, 海洋地球化学专业, 主要研究方向为岩石地球化学, E-mail: guokun1016@163.com; 翟世奎, 通信作者, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为海洋地质学, E-mail: zhaishk@public.qd.sd.cn

续报道了马里亚纳海槽玄武岩(MTB)和劳海盆玄武岩(LBB)Sr-Nd-Pb 同位素组成,研究了 MTB、LBB 与 MORB 和 IAB 之间同位素组成特征的差异。随着研究的进行,在弧后盆地也发现了似-MORB 熔岩的存在。Fretzdorff 等^[21]在东斯科舍海盆中心识别出了受俯冲组分影响微小的似-MORB 熔岩。Ishizuka 等^[22]通过分析四国海盆熔岩 Sr-Nd-Pb 同位素组成,发现了两种不同类型熔岩的存在,一种是位于四国海盆扩张中心、没有俯冲组分影响的似-MORB 熔岩,一种是位于伊豆-小笠原岛弧海山链、受俯冲组分影响的熔岩。

随着弧后盆地玄武岩 Sr-Nd-Pb 同位素数据的增加,众多学者对弧后盆地地幔源区性质进行了研究。Hochstaedter 等^[23]和 Hickey-vargas 等^[24]分析了 MTB 的 Pb 同位素组成,发现 MTB 岩浆源区没有太平洋型地幔的特征,而具有印度洋型地幔的特征。考虑到 Pb 是一种俯冲迁移元素,俯冲组分中的 Pb 会掩盖掉地幔中的 Pb 组成。因此, Pearce 等^[25]用不活动元素 Hf 取代 Pb,结合 Nd 同位素组成对马里亚纳地区的地幔性质进行了研究,结果表明:研究区域地幔源区属于印度洋型地幔,而不是太平洋型地幔,与 Hochstaedter 和 Hickey-vargas 得出了相同的结论。当然,西太平洋俯冲带也存在太平洋型地幔。Hoang 等^[12]分析了琉球岛弧和冲绳海槽玄武岩的 Sr-Nd-Pb 同位素组成,发现了太平洋型地幔存在的证据。Loock 等^[26]在劳海盆发现了共存的印度洋型和太平洋型地幔。Hergt 和 Hawkesworth^[27]证明了劳海盆地幔源区最初为太平洋型地幔,随后被印度洋型地幔所取代。

2 Li 和 B 同位素的示踪研究

Li 和 B 同位素是俯冲带岩浆作用研究中应用较多的同位素。在俯冲带,俯冲沉积物和蚀变洋壳都具有较高的 ^7Li , ^7Li 倾向于在液相中富集,因此流体具有相对较高的 ^7Li ,同时也会使上覆地幔楔和周围地幔中的 Li 同位素组成变重^[28]。Li 以其在流体相中高 ^7Li 的特点成为研究俯冲带岩浆作用的重要示踪元素之一。

Elliott 等^[28]指出,流体改造后的岛弧地区地幔楔具有重 Li 组成的特征,而俯冲板片自身是轻 Li 组成。Moriguti 等^[29]研究了 Izu 岛弧火山岩 Li 同位素组成,结果表明,随着俯冲深度的增加(150~210 km) $\delta^7\text{Li}$ 从+7.6‰减小到+1.1‰,加入到岩浆源区中的流体数量在逐渐减少,俯冲组分中蚀变洋壳和沉积物

的比例为 97 : 3。Moriguti 等^[30]继续研究了日本弧东北部熔岩的 Li-B-Pb 同位素组成,结果表明,横穿日本岛弧方向熔岩的 Li 同位素组成特征明显不同于 Izu 弧,没有表现出明显的变化和高 $\delta^7\text{Li}$,造成这种不同的原因可能是不同俯冲带不同的物理特性,例如俯冲角度、俯冲板片化学组成等。随着研究的深入,在岛弧熔岩中也发现了负 $\delta^7\text{Li}$ 的存在。Agostini 等^[31]对 Western Anatolia 钙碱性和超钾质火山岩的 Li 同位素组成进行了研究,结果表明,虽然俯冲进程减缓或停止了,但在深部释放出来的高温、富 Li 的流体继承了俯冲板片低 $\delta^7\text{Li}$ 的特征,从而使岩浆中的 $\delta^7\text{Li}$ 出现了负值。Parkinson 等^[32]以单斜辉石斑晶为例计算出了 ^6Li 的扩散速度比 ^7Li 快约 3%。Marschall 等^[33]提出扩散分馏机制可能是导致火山岩出现负 $\delta^7\text{Li}$ 的原因。

B 的两种稳定同位素 ^{10}B 和 ^{11}B 在不同储库中含量变化较大,原始地幔的 $\delta^{11}\text{B}$ 为-8‰~-12‰,地壳岩石的 $\delta^{11}\text{B}$ 比较高,海洋沉积物 $\delta^{11}\text{B}$ 为-7‰~+8‰,蚀变洋壳 $\delta^{11}\text{B}$ 为-5‰~+25‰。同时,B 在自然界中没有不同价态的变化,不受氧化还原条件的支配^[34]。由于壳、幔岩石中不同的 B 含量和 $\delta^{11}\text{B}$,B 同位素已被广泛应用于壳-幔演化示踪、俯冲带岩浆作用研究中。

早期俯冲带 B 研究主要集中于岛弧熔岩 B 含量和 B/Be, B/Nb 的变化^[14, 35-36],直到 1991 年,Palmer 等^[37]首先对俯冲带熔岩 $\delta^{11}\text{B}$ 进行了报道,识别出了 Halmahera 岛弧火山岩中的两个混合端元(地壳端元和地幔端元)。Ishikawa 等^[38]分析了横切 Izu 岛弧方向熔岩的 B 同位素组成,并结合 Pb 同位素组成对 Izu 弧俯冲组分进行了研究。结果表明 Izu 弧熔岩的 $\delta^{11}\text{B}$ 与 $\delta^7\text{Li}$ 相似,在横穿岛弧方向上随俯冲深度的增加而减小,俯冲蚀变洋壳和沉积物的比例为 99% : 1%,这与 Moriguti 等^[29]通过 Li 同位素计算的比例相似。Tonarini 等^[39]对 Sandrich 南部火山弧前缘熔岩的 $\delta^{11}\text{B}$ 进行了研究,认为部分高 $\delta^{11}\text{B}$ 不能简单地总结为俯冲板片物质或衍生流体的加入,而是因为火山弧之下高的 $\delta^{11}\text{B}$ 的蛇纹石经多阶段再循环产生的富 ^{11}B 的流体加入到地幔楔中,使部分地幔具有高 $\delta^{11}\text{B}$ 的特征。Smith 等^[40]研究了小安德烈斯 Martinique 岛弧熔岩的 B 同位素组成,结果表明,熔岩 B 含量和 $\delta^{11}\text{B}$ 不成相关性,说明岩浆中至少存在 3 种不同的组分,可以用一个二阶段过程来解释,第一阶段是俯冲板片脱水衍生的含水流体加入到地幔楔中产生岩浆,第二阶段是不同数量的沉积物和蚀变洋壳同化作用

过程中对岩浆的改造^[40]。

虽然近几年 Li 和 B 同位素得到了国内外学者的关注,取得了一定的成果,但与其他同位素(如 C-H-O、Sr-Nd-Pb 等)的发展和应用相比,还显得不够成熟,如分馏机制的不健全、地球化学行为认识上的不充分以及壳幔 Li、B 同位素特征的厘定等关键问题都尚未完全解决,国内的 Li 和 B 同位素研究和测试分析也处于起步阶段,这些可能都是未来 Li 和 B 同位素研究及应用所面临的问题。

3 Be 和铀系短周期同位素的示踪研究

^{10}Be 是一种宇宙成因的放射性核素,半衰期为 1.5 Ma,是大气中的氧原子发生分裂所形成^[41]。在大洋沉积物的最上部, ^{10}Be 含量可以达到 $5\,000 \times 10^6$ 原子/g,相反,洋中脊、洋岛和大陆裂谷等衍生的幔源岩浆中 ^{10}Be 含量一般低于检测值($<1 \times 10^6$ 原子/g)。因此,将 ^{10}Be 和其他微量元素、同位素结合研究,可以计算俯冲带岩浆源区中大洋俯冲沉积物的贡献。

Brown 等^[42]报道了苏门答腊岛弧玄武岩 ^{10}Be 含量,认为 ^{10}Be 来自通过板块俯冲进入到岩浆之中的海底沉积物。Morris 等^[14]报道了阿留申弧、安第斯弧、俾斯麦弧和美国中部玄武岩的 $^{10}\text{Be}/\text{Be}$ 和 B/Be ,建立了 $^{10}\text{Be}/\text{Be}$ - B/Be 岛弧熔岩模式。结果表明,岛弧岩浆中存在两种组分,一种是均一的、富含 ^{10}Be 和 B 的俯冲组分,一种是普遍亏损 ^{10}Be 和 B 的其他储库(例如亏损地幔、富集地幔、地壳),俯冲组分为深海沉积物和蚀变洋壳或它们的衍生流体。

^{10}Be 同位素是反映岩浆作用过程中沉积物存在的最直接的证据。Gill 等^[43]结合 ^{10}Be 、B 含量和铀系短周期同位素组成,研究了俾斯麦弧的岩浆作用。结果表明, $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 与 $^{10}\text{Be}/\text{Be}$ 、 B/Be 成正相关,而与 $^{238}\text{U}/^{230}\text{Th}$ 不成正相关,说明 U 是在岩浆生成之前加入到岩浆源区之中的, ^{10}Be 和 B/Be 的特点表明 400km 深处的岩浆作用已经没有俯冲组分的影响了。Turner 等^[15]用同样的方法研究了 Kamchatka 和 Aleutians 地区的岩浆作用。结果表明深海沉积物对 Kamchatka 区岩浆源区的贡献非常小,而对 Aleutians 区岩浆源区的贡献较大。Dreyer 等^[44]研究了横穿千岛岛弧方向熔岩 ^{10}Be 、B 和 Nd 同位素之间的关系,结果表明从弧前到弧后,火山岩中 ^{10}Be 、 B/Be 逐渐降低。

铀系短周期同位素的衰变过程是一个涉及不同核素之间相互作用的复杂过程。对于一个近期没有

受到扰动的体系,其铀系母子体核素的放射性活度是相同的,母子体处于铀系平衡状态。如果该体系受到扰动,母子体核素之间发生分异,此时两者的放射性活度不相同,活度比不等于 1,体系处于铀系不平衡状态,大概在子体核素 5 倍半衰期之后重新回到放射性平衡状态。铀系的这种不平衡为我们研究年轻地质事件的过程和时间尺度提供了独特的地球化学工具,在地幔熔融和岩浆作用研究中得到了广泛的应用^[15, 45]。Peate 等^[46]发现劳海盆南部边缘 VFR 的玄武安山岩在 $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ - $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ 图解中,靠近 50ka 的汤加弧等时线,说明它们的俯冲组分来自活动的俯冲带,而不是岩石圈的储存。Fretzdorff 等^[47]同样发现斯科舍海盆的 E4 和 E8 段熔岩俯冲组分是在 350 ka 加入到弧后岩浆源区中的。

地幔物质的绝热减压过程是洋中脊地区岩浆形成的主要机制,而在俯冲带,地幔物质的绝热减压、地幔楔物质的熔融程度以及加入地幔楔的水通量等都是影响岩浆形成的关键因素。DuFrane 等^[48]研究了菲律宾 Bicol 弧和 Bataan 弧熔岩铀系同位素的组成。结果表明,两个岛弧的熔岩的同位素特征可以用 1%~5% 沉积物熔体的加入来解释,蚀变洋壳衍生流体是导致 ^{238}U 过剩的主要原因,动力学熔融模型和连续加入熔融模型都可以解释 U-Th 同位素组成。Turner 等^[49]讨论了 $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$ 对俯冲板片部分熔融过程的约束。结果表明,地幔物质的部分熔融会产生 ^{231}Pa 过剩,而流体的加入会产生 ^{235}U 过剩, $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$ 不平衡特征不是洋壳的脱水造成,可能是地幔物质的减压熔融过程造成的, $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$ 的大小与地幔对流和板片俯冲速率有关。Reubi 等^[50]研究了智利 Andean 弧 Llama 熔岩的铀系不平衡特征。结果表明,Llama 熔岩铀系同位素与微量元素比值成线性关系,不能简单的解释为板片流体的加入或部分熔融、或沉积物熔体的加入,5%~20% 的花岗闪长质到闪长质岩石基底的同化作用可能是主要原因。Mitchell 等^[51]对 Cascade 弧熔岩铀系短周期同位素特征进行了分析,结果表明该研究区岩浆源区是软流圈物质熔融的产物,最多只有 1% 的板片流体加入到了岩浆源区中。

然而,目前我国还不能进行火山岩的 Th-Ra 和 Pa-U 短周期同位素组成的分析。因此,积极引进并完善目前国际上先进的分析测试手段,加强国际间合作交流,特别是铀系同位素组成的测试方法,在我国建立铀系元素同位素的分析测试实验室是目前需要解决的首要问题。

4 弧后盆地岩浆作用研究

近几十年在俯冲带岩浆作用过程方面的研究取得了很多重要的成果,但大部分都集中在岛弧区,而在弧后盆地的成果却相对较少。弧后盆地是俯冲带沟-弧-盆体系中重要的组成部分,其岩浆作用兼具岛弧和洋中脊岩浆作用的特点,深入了解弧后盆地岩浆的形成和演化过程,可以完善对全球岩浆作用的认识。而在西太平洋分布着众多的弧后盆地,特别是劳海盆、冲绳海槽等正在活动的弧后盆地,为我们研究早期弧后盆地岩浆作用的特点提供了理想的研究对象。

4.1 弧后盆地岩浆作用研究热点

自从20世纪60年代以来,尽管对全球弧后盆地进行了多次考察和取样,也获得了大量的研究成果,然而相对于广阔大洋地区来说,我们的认识还远远不够,仍然有很多科学问题没有解决或存在争议。

(1) 俯冲组分对弧后盆地岩浆作用的影响。板块俯冲过程不仅是物理过程,还存在于地壳和地幔、沉积物和地幔之间的物质转移和化学组成变化。俯冲输入与弧后输出之间的关系是目前国际海洋地质学关注的重点^[52-53]。研究表明,弧及弧后岩浆的成因与俯冲组分的输入有密切关系^[54],而在四国海盆、劳海盆中都已发现没有俯冲组分影响的玄武岩,俯冲作用在这些弧后盆地岩浆作用过程中扮演的角色是什么?在马里亚纳海槽和劳海盆存在一个共性,沿弧或弧后扩张轴部的组分变化,主要是板片流体数量和搬运途径的不同以及输入到岩浆源区中的沉积物数量和类型的不同所引起,然而,在海沟靠近大洋的一侧存在一些海山链或海山,它们的俯冲输入可能会对弧及弧后岩浆的生成产生一定的影响,这些海山是以何种形式影响岩浆作用、影响有多大?等等。

(2) 印度洋型地幔对西太平洋弧后盆地的影响。研究发现,西太平洋广大地区,包括西菲律宾海盆、四国海盆、马里亚纳海槽、劳海盆、日本海、冲绳海槽等都具有印度洋型地幔的特点,而马里亚纳海槽和劳海盆的印度洋型地幔正在置换原先存在的太平洋型地幔。印度洋型地幔在西太平洋俯冲带中发挥着怎样的作用还不是很清楚,太平洋型地幔与印度洋型地幔之间的界限也不明确。要解决这些问题可能需要更多基底岩石样品的Pb、Hf同位素数据。

(3) 弧后扩张停止后的岩浆作用。西菲律宾海盆、四国海盆、南海等都停止了扩张,并且发生了板

内火山活动,形成了一系列的海山链。那么,这些海山链的形成,与当初的俯冲作用有何种关系,它的深部地球动力学机制是怎样的。这些问题还有待进一步的研究。

4.2 同位素在弧后盆地岩浆作用研究中的应用前景

铀系短周期同位素地球化学和年代学研究是近年来在俯冲带和大洋中脊岩浆作用研究中的新方法。U-Th体系的半衰期为76 ka, Pa-U体系半衰期为1.6 ka, 铀系不平衡特征在火山岩中存在时间约为5倍的该体系半衰期,因此铀系不平衡可以记录最早为380 ka到最近的岩浆活动过程。很多正在活动的弧后盆地是受到现代俯冲的影响,因此俯冲组分加入到岩浆中的时间可由铀系放射性元素进行约束,这为我们了解俯冲组分对弧后盆地岩浆作用的影响提供了一个可靠的工具。

Li、B和Be同位素及其元素组成在地壳、地幔、沉积物及衍生流体中的不同含量,使其在壳-幔演化、板块俯冲过程及大洋沉积物和蚀变洋壳在地幔中循环等方面的研究中得到了广泛应用。然而,在弧后盆地岩浆作用研究中的应用却相对较少, Li、B同位素在弧后盆地岩浆作用过程中的分馏机制也还有待进一步的研究。随着研究的进行,数据的增多, Li、B和Be同位素必定在弧后盆地岩浆作用研究中发挥重要作用。

Sr-Nd-Pb同位素是最早被应用于弧后盆地岩浆作用研究中的同位素之一,在岩浆源区的地幔端元、性质及地壳物质同化等研究中发挥重要作用。对更多弧后盆地火山岩样品的Sr-Nd-Pb同位素组成进行分析,有利于更清楚、全面的认识弧后盆地岩浆源区的性质、俯冲组分的影响等。Hf作为一种非俯冲迁移元素,对揭示俯冲带岩浆初始物源有重要作用,引入Hf同位素组成的研究,可以丰富火山岩同位素的研究手段,完善对俯冲带岩浆作用的认识。

5 小结

综上所述,同位素已经成为研究俯冲带壳-幔演化、板块俯冲和岩浆形成演化过程中灵敏的地球化学示踪剂,是约束岩浆运移过程和时间尺度的有力工具。将不同同位素结合研究,或与主量、微量元素结合研究,可以更加清晰地了解壳-幔相互作用过程,示踪地壳物质在地幔中的循环。将不同同位素应用

于弧后盆地岩浆作用的研究中, 必将为全球俯冲带岩浆作用研究带来突破性的进展和成果。

参考文献:

- [1] Spandler C, Pirard C. Element recycling from subducting slabs to arc crust: A review[J]. *Lithos*, 2013, 170, 6: 208-223.
- [2] Bourdon B, Sims K W. U-series constraints on intraplate basaltic magmatism[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 52(1): 215-254.
- [3] Taira A, Saito S, Aoike K A N, et al. Nature and growth rate of the Northern Izu-Bonin (Ogasawara) arc crust and their implications for continental crust formation[J]. *Island Arc*, 1998, 7(3): 395-407.
- [4] Tatsumi Y, Eggins S. Subduction zone magmatism[M]. Cambridge: Blackwell Science, 1995.
- [5] Bebout G E. Chemical and isotopic cycling in subduction zones[J]. *Treatise on Geochemistry*, 2014, 4: 703-747.
- [6] Hofmann A W. Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism[J]. *Nature*, 1997, 385: 219-229.
- [7] Shinjo R. Geochemistry of high Mg andesites and the tectonic evolution of the Okinawa Trough-Ryukyu arc system[J]. *Chemical Geology*, 1999, 157, 1: 69-88.
- [8] Meng X W, Chen Z, Du D, et al. Sr, Nd isotope geochemistry of volcanic rock series and its geological significance in the middle Okinawa Trough[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2000, 43(5): 458-463.
- [9] 黄朋, 李安春, 蒋恒毅. 冲绳海槽北、中段火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(6): 1703-1712.
Huang Peng, Li Anchun, Jiang Hengyi. Geochemical feature and their geological implications of volcanic rocks from the northern and middle Okinawa Trough[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(6): 1703-1712.
- [10] McKenzie D, Bickle M J. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere [J]. *Journal of Petrology*, 1988, 29(3): 625-679.
- [11] Rollison H R. 岩石地球化学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000: 179-190.
Rollison H R. *Petrogeochemistry*[M]. Hefei: University of science and technology of China press, 2000.
- [12] Hoang N, Uto K. Upper mantle isotopic components beneath the Ryukyu arc system: Evidence for 'back-arc' entrapment of Pacific MORB mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 249(3): 229-240.
- [13] Shimoda G, Tatsumi Y, Nohda S, et al. Setouchi high-Mg andesites revisited: geochemical evidence for melting of subducting sediments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 160, 3: 479-492.
- [14] Morris J D, Leeman W P, Tera F. The subducted component in island arc lavas: constraints from Be isotopes and B-Be systematics[J]. *Nature*, 1990, 344: 31-36.
- [15] Turner S, McDermott F, Hawkesworth C, et al. A U-series study of lavas from Kamchatka and the Aleutians: constraints on source composition and melting processes[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1998, 133(3): 217-234.
- [16] Penniston-Dorland S C, Bebout G E, Pogge von Strandmann P A E, et al. Lithium and its isotopes as tracers of subduction zone fluids and metasomatic processes: Evidence from the Catalina Schist, California, USA[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 77(1): 530-545.
- [17] Hawkins J W, Melchior J T. Petrology of Mariana Trough and Lau basin basalts[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90(B13): 11431-11468.
- [18] Volpe A M, Douglas Macdougall J, Hawkins J W. Mariana trough basalts (MTB): Trace element and Sr-Nd isotopic evidence for mixing between MORB-like and Arc-like melts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1987, 82(3): 241-254.
- [19] Volpe A M, Douglas Macdougall J, Hawkins J W. Lau Basin basalts (LBB): trace element and Sr-Nd isotopic evidence for heterogeneity in back-arc basin mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988, 90(2): 174-186.
- [20] Volpe A M, Douglas M J, Lugmair G W, et al. Fine-scale isotopic variation in Mariana Trough basalts: evidence for heterogeneity and a recycled component in back-arc basin mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 1-3: 251-264.
- [21] Fretzdorff S, Livermore R A, Devey C W, et al. Petrogenesis of the Back-Arc East Scotia Ridge, South Atlantic Ocean[J]. *Journal of Petrology*, 2002, 43(8): 1435-1467.
- [22] Ishizuka O, Yuasa M, Taylor R N, et al. Two contrasting magmatic types coexist after the cessation of back-arc spreading[J]. *Chemical Geology*, 2009, 266(3): 274-296.
- [23] Hochstaedter A G, Gill J B, Morris J D. Volcanism in the Sumisu Rift, II. Subduction and non-subduction related components[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 100(1): 195-209.
- [24] Hickey-Vargas R. Isotope characteristics of submarine lavas from the Philippine Sea: implications for the origin of arc and basin magmas of the Philippine tectonic plate[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 107(2): 290-304.
- [25] Pearce J A, Kempton P D, Nowell G M, et al. Hf-Nd element and isotope perspective on the nature and

- provenance of mantle and subduction components in Western Pacific arc-basin systems[J]. *Journal of Petrology*, 1999, 40(11): 1579-1611.
- [26] Looock, G, McDonough W f. Isotopic composition of volcanic glasses from the Lau Basin[J]. *Mar Mining*, 1990, 9(2): 235-245.
- [27] Hergt J M, Hawkesworth C J. Pb-Sr-Nd isotopic evolution of the Lau Basin: Implications for mantle dynamics during back-arc opening[J]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results*, 1994, 135: 505-517.
- [28] Elliott T, Jeffcoate A, Kasemann S. Li isotopic evidence for subduction induced mantle heterogeneity[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(18): A159.
- [29] Moriguti T, Nakamura E. Across-arc variation of Li isotopes in lavas and implications for crust/mantle recycling at subduction zones[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 163(1): 167-174.
- [30] Moriguti T, Shibata T, Nakamura E. Lithium, boron and lead isotope and trace element systematics of Quaternary basaltic volcanic rocks in northeastern Japan: mineralogical controls on slab-derived fluid composition[J]. *Chemical Geology*, 2004, 212(1): 81-100.
- [31] Agostini S, Ryan J G, Tonarini S, et al. Drying and drying of a subducted slab: coupled Li and B isotope variations in Western Anatolia Cenozoic Volcanism[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 272(1): 139-147.
- [32] Parkinson I J, Hammond S J, James R H, et al. High temperature lithium isotope fractionation: Insights from lithium isotope diffusion in magmatic systems[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 257(3-4): 609-621.
- [33] Marschall H R, Pogge von Strandmann P A E, Seitz H, et al. The lithium isotopic composition of orogenic eclogites and deep subducted slabs[J]. *Earths and Planetary Science Letters*, 2007, 262(3-4): 563-580.
- [34] 蒋少涌, 于际民. 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.
Jiang Shaoyong, Yu Jimin. Boron isotope as a tracer in the study of crust-mantle evolution and subduction processes[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(2): 391-399.
- [35] Ryan J G, Leeman W P, Morris J D, et al. The boron systematics of intraplate lavas: Implications for crust and mantle evolution[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(3): 415-422.
- [36] Brenan J M, Ryerson F J, Shaw H F. The role of aqueous fluids in the slab-to-mantle transfer of boron, beryllium, and lithium during subduction: experiments and models[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(19): 3337-3347.
- [37] Palmer M R. Boron-isotope systematics of Halmahera arc (Indonesia) lavas: Evidence for involvement of the subducted slab[J]. *Geology*, 1991, 19(3): 215-217.
- [38] Ishikawa T, Nakamura E. Origin of the slab component in arc lavas from across-arc variation of B and Pb isotopes [J]. *Nature*, 1994, 370(6486): 205-208.
- [39] Tonarini S, Leeman W P, Leat P T. Subduction erosion of fore-arc mantle wedge implicated in the genesis of the South Sandwich Island (SSI) arc: evidence from boron isotope systematics[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 301(1): 275-284.
- [40] Smith H J, Leeman W P, Davidson J, et al. The B isotopic composition of arc lavas from Martinique, Lesser Antilles[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 146(1): 303-314.
- [41] 张丽, 周卫健, 常宏, 等. 暴露测年样品中 ^{26}Al 和 ^{10}Be 分离及其加速器质谱测定[J]. *岩矿测试*, 2012, 31(1): 83-89.
Zhang Li, Zhou Weijian, Chang Hong, et al. The extraction of in-situ ^{26}Al and ^{10}Be from rock sample and accelerator mass spectrometric measurements[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2012, 31(1): 83-89.
- [42] Brown L, Klein J, Middleton R, et al. ^{10}Be in island-arc volcanoes and implications for subduction[J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 718-720.
- [43] Gill J B, Morris J D, Johnson R W. Timescale for producing the geochemical signature of island arc magmas: U-Th-Po and Be-B systematics in recent Papua New Guinea lavas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(17): 4269-4283.
- [44] Dreyer B M, Morris J D, Gill J B. Incorporation of subducted slab-derived sediment and fluid in arc magmas: B-Be- ^{10}Be - ϵNd systematics of the Kurile convergent margin, Russia[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(8): 1761-1782.
- [45] Bourdon B, Turner S, Dosseto A. Dehydration and partial melting in subduction zones: Constraints from U-series disequilibria[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(B6): 1-19.
- [46] Peate D W, Kokfelt T F, Hawkesworth C J, et al. U-series isotope data on Lau Basin glasses: The role of subduction-related fluids during melt generation in back-arc basins[J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42(8): 1449-1470.
- [47] Fretzdorff S, Haase K, Leat P, et al. ^{230}Th - ^{238}U disequilibrium in East Scotia back-arc basalts: Implications for slab contributions[J]. *Geology*, 2003, 8: 693-696.
- [48] DuFrane S A, Asmerom Y, Mukasa S B, et al. Subduction and melting processes inferred from U-series,

- Sr-Nd-Pb isotope, and trace element data, Bicol and Bataan arcs, Philippines[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(13): 3401-3420.
- [49] Turner S, Regelous M, Hawkesworth C, et al. Partial melting processes above subducting plates: Constraints from ^{231}Pa - ^{235}U disequilibria[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(2): 480-503.
- [50] Reubi O, Bourdon B, Dungan M A, et al. Assimilation of the plutonic roots of the Andean arc controls variations in U-series disequilibria at Volcan Llaima, Chile[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 303(1): 37-47.
- [51] Mitchell E C, Asmerom Y. U-series isotope systematics of mafic magmas from central Oregon: Implications for fluid involvement and melting processes in the Cascade arc[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 312(3): 378-389.
- [52] Plank T, Langmuir C H. Tracing trace elements from sediment input to volcanic output at subduction zones[J]. *Nature*, 1993, 362(22): 739-743.
- [53] Pearce J A, Kempton P D, Nowell G M, et al. Hf-Nd Element and Isotope Perspective on the Nature and Provenance of Mantle and Subduction Components in Western Pacific Arc-Basin Systems[J]. *Journal of Petrology*, 1999, 10(11): 1579-1611.
- [54] Leat P T, Livermore R A, Millar I L, et al. Magma supply in back-arc spreading centre segment E2, East Scotia Ridge[J]. *Journal of Petrology*, 2000, 41(6): 845-866.

Advances in isotopic geochemistry tracing for the influence of subduction over magmatism

GUO Kun, ZHAI Shi-kui, YU Zeng-hui, CAI Zong-wei, ZHANG Xia

(Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, College of Marine Geosciences, Ocean university of China, Qingdao 266100, China)

Received: Aug. 26, 2015

Key words: plate subduction; isotope; magmatism; Back-arc basin

Abstract: Isotopes are sensitive geochemical tracers for use in the study of magmatism in subduction zones and are useful for constraining magma migration processes and time scales. This study summarizes a number of advances and achievements in the study of magmatic processes, including time scale, magma source characteristic, magma evolution, and control mechanisms in subduction zones using Sr-Nd-Pb-Hf isotopes, Li and B isotopes, and Be and uranium series isotopes methods. We concluded that the use of these isotopes in back-arc basin magmatism research will enable breakthroughs in global subduction zone magmatism research.

(本文编辑: 刘珊珊)