

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.111>



镁铁—超镁铁质岩成岩成矿过程中的锂同位素地球化学：回顾与展望

肖燕^{1,2}, 潘旗旗^{1,2,3}, 唐冬梅^{2,4}, 毛亚晶^{2,4}, 田世洪⁵, 陈晨⁶, 苏本勋^{2,3,4}, 刘霞^{2,3,4}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029
2. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029
3. 中国科学院大学, 北京 100049
4. 中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源研究重点实验室, 北京 100029
5. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西南昌 330013
6. 中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室, 广东广州 510460

摘要: 锂(Li)同位素体系是示踪镁铁—超镁铁质岩成岩成矿过程(如结晶分异、地壳混染和熔/流体—矿物相互作用等)的全新工具。通过实例研究综述了原位Li同位素在镁铁—超镁铁质岩中应用的主要进展, 主要包括:(1)美国Yellow Hill阿拉斯加型杂岩体Li同位素研究揭示弧岩浆早期堆晶过程可发生明显的Li同位素分馏;(2)土耳其和西藏蛇绿岩的Li同位素研究证明其在示踪蛇绿岩地幔序列岩石成因及豆荚状铬铁矿演化过程中的潜力;(3)Stillwater层状岩体超镁铁岩带Li同位素研究揭示流体对于大型层状岩体各矿物形成及铬铁矿中矿物元素交换的作用;(4)橄榄石Li含量与同位素分析在揭示岩浆铜镍矿床成矿过程的应用。

关键词: Li同位素; 镁铁—超镁铁质岩; 成矿作用; 结晶分异; 熔/流体—矿物相互作用; 地球化学。

中图分类号: P599

文章编号: 1000-2383(2021)12-4334-12

收稿日期: 2021-04-30

Retrospects and Prospects on Li Isotope Geochemistry during Petrogenesis and Mineralization of Mafic-Ultramafic Rocks

Xiao Yan^{1,2}, Pan Qiqi^{1,2,3}, Tang Dongmei^{2,4}, Mao Yajing^{2,4}, Tian Shihong⁵, Chen Chen⁶, Su Benxun^{2,3,4}, Liu Xia^{2,3,4}

1. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
2. Innovation Academy for Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
4. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
5. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China
6. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510460, China

Abstract: In-situ Li isotope geochemistry has been better utilized to trace many complex processes including fractional crystallization, crust contamination and melt/fluid-mineral reaction during the petrogenesis and mineralization of mafic-ultramafic

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 41973012, 41773014).

作者简介: 肖燕(1982—), 女, 副研究员, 博士, 主要从事地幔地球化学研究工作. ORCID: 0000-0003-4566-8242. E-mail: xiaoyan@mail.iggcas.ac.cn

引用格式: 肖燕, 潘旗旗, 唐冬梅, 等, 2021. 镁铁—超镁铁质岩成岩成矿过程中的锂同位素地球化学: 回顾与展望. 地球科学, 46(12):4334-4345.

rocks. This study summarizes the major progresses in Li isotope geochemistry during petrogenesis and mineralization of mafic-ultramafic intrusions based on case studies. Firstly, the Li isotope study of Yellow Hill Alaskan-type intrusion reveal Li isotope fractionation during magma differentiation. Secondly, the studies on ophiolites from Turkey and Tibet indicate that Li isotope systematics have potential to constrain genesis of ophiolitic mantle section and evolution of chromitites. Thirdly, the Li isotope study of the ultramafic zone of the Stillwater complex demonstrates that hydrous fluids constrained mineral composition and acted as a critical medium of chemical exchange between minerals in the chromitites. Finally, Li isotope fractionation behavior in the formation of magmatic Ni-Cu sulfide deposits has been investigated.

Key words: Li isotope; mafic-ultramafic intrusion; mineralization; fractional crystallization; melt/fluid-mineral reaction; geochemistry.

0 引言

锂(Li)有 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^7\text{Li}$ 两个稳定同位素,是元素周期表中相对质量差(15%)最大的金属稳定同位素体系.多接收感应耦合等离子体质谱(MC-ICP-MS)的出现和发展提高了Li同位素测试的分析精度和分析效率(Tomascak *et al.*, 1999; 田世洪等, 2021).进入21世纪之后,随着二次离子质谱(secondary ion mass spectroscopy, SIMS; Tang *et al.*, 2007; Su *et al.*, 2014; 李献华等, 2015)和激光剥蚀-多接收电感耦合等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS; Xu *et al.*, 2013)的发展以及矿物标样的成功研发(Su *et al.*, 2015),Li同位素原位分析技术得以实现,进而能够探寻矿物颗粒内部Li元素含量和同位素组成的空间分布,精细刻画矿物尺度记录的地质过程.SIMS技术具有高空间分辨率和高灵敏度的优点,对于硅酸盐岩的主要造岩矿物,其分析精度高达1‰,是目前原位微区Li同位素分析的主要测试技术(Tang *et al.*, 2007; 李献华等, 2015; Su *et al.*, 2015, 2017).LA-MC-ICP-MS原位微区Li同位素分析起步较晚,但凭借基体效应较弱的优势也得到广泛关注(Xu *et al.*, 2013).在地幔部分熔融过程中,Li作为中等不相容元素会优先富集于硅酸盐熔体中,导致其在壳-幔体系中发生分异:陆壳和新鲜大洋中脊玄武岩(MORB)的平均Li含量分别为 18×10^{-6} (Teng *et al.*, 2008)和 $(5 \sim 6) \times 10^{-6}$ (Chan *et al.*, 1992; Elliott *et al.*, 2006),明显高于正常地幔的平均值 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-6}$ (Tomascak *et al.*, 2016; Marschall *et al.*, 2017).Li在自然界中主要以+1价阳离子形式存在于矿物、熔体或流体中,具有较强的流体活动性,在熔/流体中的含量可达地幔矿物的数倍至数十倍($> 5 \times 10^{-6}$ vs. $1 \times 10^{-6} \sim 1.5 \times 10^{-6}$; Tomascak *et al.*, 2016),在洋壳蚀变和板块俯冲等与流体有关的地质活动中, ${}^7\text{Li}$ 优先在流体相中

富集.另外,Li的扩散速率较快,在矿物或熔体中相对原子质量更轻的 ${}^6\text{Li}$ 比 ${}^7\text{Li}$ 扩散更快.这些特征导致自然界不同地体出现较大的Li同位素分馏,使其广泛应用于陆壳风化过程,板块俯冲及壳幔物质循环以及洋壳热液蚀变等地质过程(Tomascak *et al.*, 2016).

应用原位Li同位素来示踪地幔不均一性是近年地球化学研究的重要进展之一(苏本勋, 2017).基于地幔橄榄岩全岩Li同位素分析,未经交代的原始上地幔的 $\delta^7\text{Li}$ 值为 $(3.5 \pm 1.0)\text{‰}$ (2σ ; Pogge von Strandmann *et al.*, 2011).平衡状态下地幔各单矿物中的Li含量呈现橄榄石 $>$ 单斜辉石 $>$ 斜方辉石的趋势,富集橄榄岩中橄榄石的Li含量为 $(1.0 \sim 2.2) \times 10^{-6}$,辉石的Li含量为 $(0.5 \sim 1.3) \times 10^{-6}$ (Tomascak *et al.*, 2016).早期研究者认为地幔部分熔融过程中不发生有效分馏($< 0.5\text{‰}$; Tomascak *et al.*, 1999).但是在一项先行性的Li同位素研究中,Seitz *et al.* (2003)发现交代作用较弱的地幔橄榄岩的Fo值与Li含量有很好的线性关系,暗示地幔部分熔融过程可以造成Li含量的变化(图1).后期Xiao *et al.* (2017)对只经历了不同程度部分熔融的浙江建德橄榄岩单矿物进行了原位Li元素含量分析,橄榄石的Li含量高于单斜辉石和斜方辉石,这与地幔中达到平衡状态的橄榄岩相似.这些样品中橄榄石的Li含量和 $\delta^7\text{Li}$ 值($= [({}^7\text{Li}/{}^6\text{Li})_{\text{样品}} / ({}^7\text{Li}/{}^6\text{Li})_{\text{标样}} - 1] \times 1000$)都与橄榄石Fo值和尖晶石的Cr $^{\#}$ 有较好的负相关关系,揭示了地幔部分熔融过程可以产生可识别的Li同位素分馏,即随着部分熔融程度的增加,Li含量降低($< 1 \times 10^{-6}$), $\delta^7\text{Li}$ 值变轻(图1).虽然Li同位素易受动力学扩散分馏的影响,但是此项研究表明部分熔融能够造成可识别的Li同位素变化,且这种变化可以在地幔中长时间保存.已有的研究发现地幔中Li含量和Li同位素存在明显的不均一性,可能与冷却过程中矿物间Li扩散作用,与寄主玄武

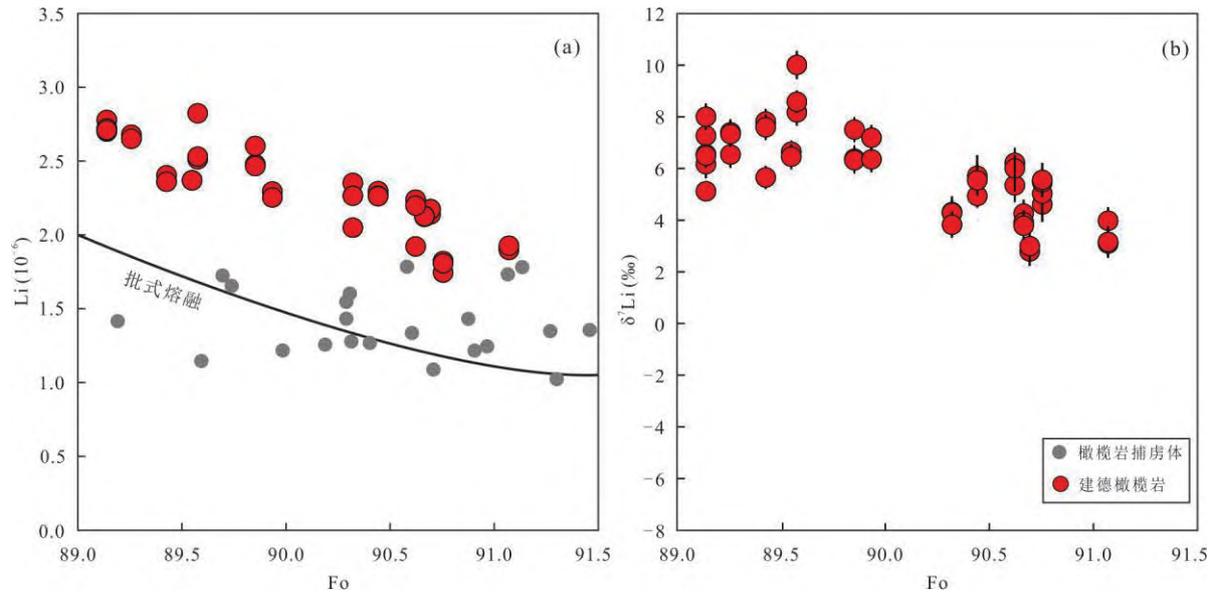


图 1 浙江建德二辉橄榄岩中橄榄石的 Li 含量(a)和 Li 同位素(b)与 Fo 值之间的相关图解

Fig.1 Variations in Li concentrations (a) and $\delta^7\text{Li}$ values (b) of olivine with Fo contents in the Jiande lherzolites compared with slightly-metasomatized lherzolites

灰色圆点代表交代作用较弱的地幔橄榄岩捕虏体(Seitz *et al.*, 2003);批式熔融线引自 Seitz *et al.* (2003)

岩间的扩散以及地幔交代作用有关(Rudnick and Ionov, 2007; Tang *et al.*, 2007; Su *et al.*, 2014, 2018b; Jing *et al.*, 2019). 由于 Li 在橄榄石中的扩散速率低于辉石, ^6Li 扩散速度又高于 ^7Li , 冷却过程中 Li 从橄榄石中进入单斜辉石中, 导致单斜辉石高 Li 含量和低 $\delta^7\text{Li}$ 值以及高 $\delta^7\text{Li}$ 值的橄榄石(Gao *et al.*, 2011), 而辉石中核部 $\delta^7\text{Li}$ 重而边部 $\delta^7\text{Li}$ 轻则反映了与寄主岩浆(低 Li 含量)的 Li 交换(Rudnick and Ionov, 2007). Su *et al.* (2014) 对分别经历了典型碳酸盐和硅酸盐交代的橄榄石以及寄主岩中橄榄石捕虏体和斑晶进行了 SIMS 原位 Li 同位素分析, 结果表明碳酸盐熔体—橄榄岩反应可以降低橄榄石的 $\delta^7\text{Li}$ 值, 而硅酸盐熔体—橄榄岩反应则升高橄榄石的 $\delta^7\text{Li}$ 值. 因此, 在硅酸盐交代与碳酸盐交代过程中, Li 同位素会表现出相反的地球化学行为. Xu *et al.* (2013) 利用 LA-MC-ICP-MS 对华北宽甸橄榄岩捕虏体进行了原位 Li 同位素分析, 也发现硅酸盐熔体交代作用使辉石较橄榄石更富集 Li 元素, 与 SIMS 原位结果一致(苏本勋, 2017). 在此基础上, 将这一判别标志应用于东北大椅山、浙江西垄、福建明溪和牛头山以及土耳其 Thrace 盆地的地幔橄榄岩捕虏体研究(Su *et al.*, 2018b; Jing *et al.*, 2019; Xiao *et al.*, 2019), 其所揭示的地幔交代作用与矿物岩石学特征高度吻合(邓黎旭等, 2019), 进一步证明了 Li 同位素体系可以有效判别地幔交代作用类

型并揭示交代介质来源.

鉴于上述研究揭示的 Li 同位素在高温条件下存在分馏, Li 同位素体系也被应用到镁铁—超镁铁岩成岩成矿的研究中(如 Lundstrom *et al.*, 2005; Su *et al.*, 2016, 2017, 2018a, 2020; Zhang *et al.*, 2019). 幔源镁铁—超镁铁质岩石是探索地幔的直接窗口, 不仅能够追踪地幔源区的特征, 而且赋存具重要经济意义的 Cr、Fe、Ti、V、Ni、Cu 和 PGE 等矿产资源. 目前关于 Li 同位素在示踪镁铁—超镁铁岩成岩成矿过程中研究进展的系统总结较少, 本文揭示了 Li 同位素体系在镁铁—超镁铁岩成岩成矿研究中的重要性及其可能的应用前景, 包括 Li 同位素制约深部堆晶对弧岩浆的影响, 示踪蛇绿岩地幔序列中纯橄岩和铬铁岩的形成与演化过程, 记录层状岩体中铬铁矿成矿过程中强烈的流体活动以及揭示岩浆铜镍矿床的结晶分异过程, 以期抛砖引玉, 推动并扩大 Li 同位素的应用范围.

1 Li 同位素制约深部堆晶对弧岩浆的影响: 以阿拉斯加型岩体为例

自然界不同储库间存在较大的 Li 同位素分馏(Su *et al.*, 2016; 图 2), 例如: 海水的 $\delta^7\text{Li}$ 值为 30.8‰, 新鲜 MORB 的 $\delta^7\text{Li}$ 在 1.6‰~5.6‰ 之间(Chan *et al.*, 1992; Tomascak *et al.*, 2016; Marschall

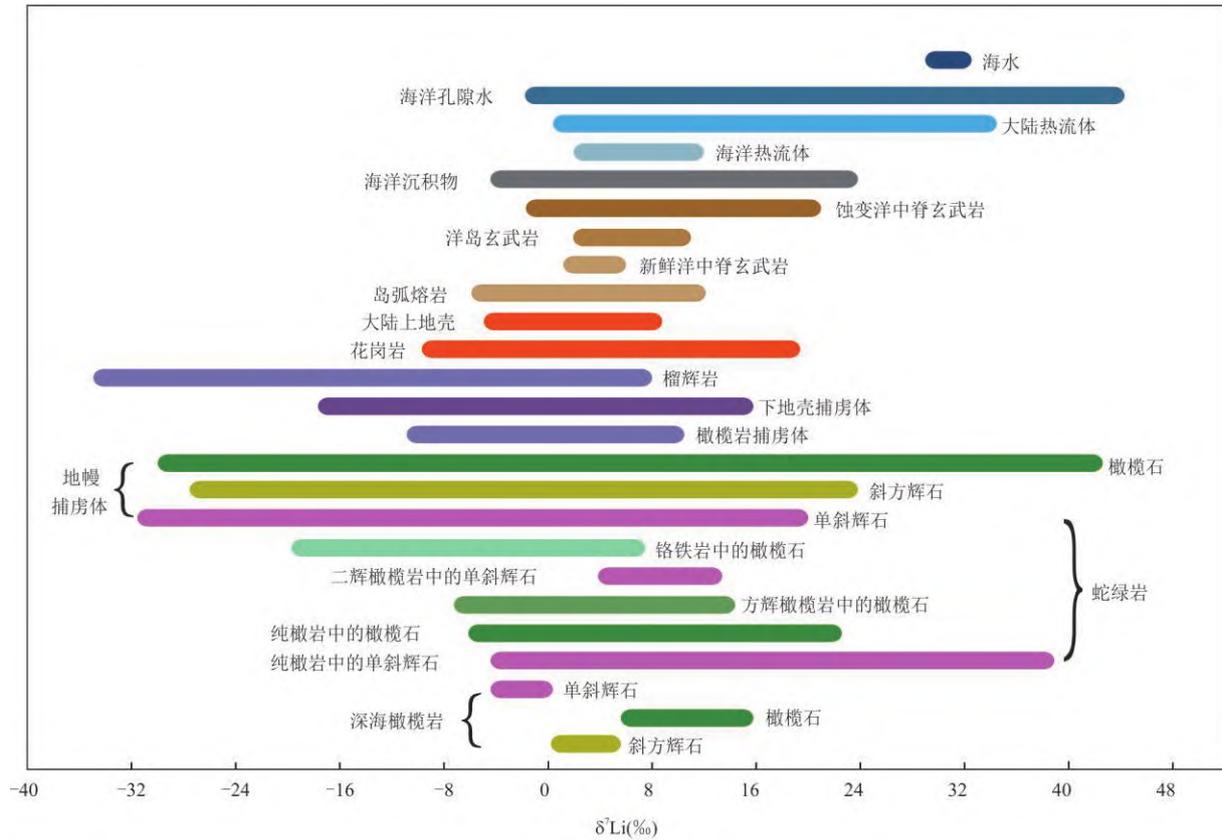


图 2 地球典型储库的 Li 同位素组成以及不同构造背景下地幔组成矿物(地幔橄榄岩捕虏体, 蛇绿岩地幔序列中橄榄岩和铬铁岩, 深海橄榄岩)的 Li 同位素组成

Fig.2 Lithium isotopic composition of various terrestrial reservoirs and mantle minerals in the mantle xenoliths, ophiolitic mantle and abyssal peridotites

图据李献华等(2015); Tomascak *et al.*(2016); 苏本勋(2017)修改

et al., 2017), 而蚀变 MORB 的 $\delta^7\text{Li}$ 则在 $-1.7\text{‰} \sim 20.8\text{‰}$ 之间 (Chan *et al.*, 1992, 2002). 由此看出, 在俯冲变质脱水过程中, 那些从海水中获取的“重”Li 不断地从蚀变洋壳中释放并交代上覆地幔, 形成相对重 Li 同位素组成的地幔楔和轻 Li 同位素组成的残留板片 (Tomascak *et al.*, 2002; Elliott *et al.*, 2004; 李东永等, 2019). 因此, 俯冲洋壳的蚀变程度愈高, 经脱水作用后的残余相的 $\delta^7\text{Li}$ 值就越低, 而由高 $\delta^7\text{Li}$ 的地幔楔熔融形成的弧岩浆应具有较重的 Li 同位素组成. 然而, 大多数弧岩浆的 Li 同位素组成为 $+0.9\text{‰} \sim +7.4\text{‰}$ (最高达 12‰) (Chan *et al.*, 2002; Tomascak *et al.*, 2002; Magna *et al.*, 2006; Kosler *et al.*, 2009), 并没有显著高于新鲜 MORB 的 Li 同位素组成, 暗示弧岩浆除了受到俯冲洋壳的蚀变作用影响以外, 还经历了某种地质过程使其 Li 同位素变轻. Tomascak *et al.* (2002) 认为俯冲过程中高 $\delta^7\text{Li}$ 的板片流体与地幔楔橄榄岩发生扩散再平衡, 使流体重 Li 同位素特征消失. 但是也有部分

学者推测该过程与岩浆演化过程中矿物的分离结晶有关, 即先结晶的橄榄石“扣除”了 Li 的重同位素 (Su *et al.*, 2017; 苏本勋, 2017).

阿拉斯加型杂岩体形成于与板块俯冲作用有关的岛弧或活动陆缘, 是地幔楔部分熔融产生的玄武质或玄武—安山质岩浆在地壳深度结晶分异的产物 (崔梦萌等, 2020). 与其他弧岩浆相比, 阿拉斯加型杂岩体作为弧岩浆的底部或岩浆通道, 也是铬铁矿床和铂族元素矿床的重要载体, 其岩浆演化持续且独立, 无或少地壳混染 (崔梦萌等, 2020). 对其进行 Li 同位素的系统研究有助于从根本上理解弧岩浆演化过程中同位素的分馏机制. 梁子 (2018) 对美国阿拉斯加东南部的 Yellow Hill 岩体中纯橄岩和异剥橄榄岩的橄榄石进行了原位 Li 同位素分析. Yellow Hill 岩体的纯橄岩和异剥橄榄岩中橄榄石的 Fo 值为 $87.1 \sim 91.3$ (图 3); 单斜辉石具有较高的 $\text{Mg}^{\#}$ ($90.8 \sim 95.0$) 和 CaO 含量 ($23.3\% \sim 25.3\%$, 质量百分) 以及变化范围较大的 Al_2O_3 ($0.38\% \sim 3.63\%$, 质

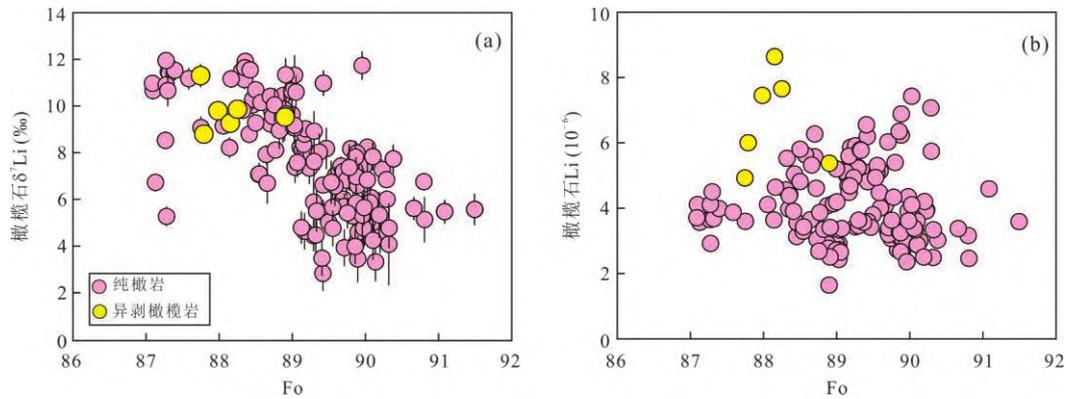


图3 Yellow Hill岩体中纯橄岩和异剥橄岩的橄榄石Li同位素(a)和Li(b)含量与Fo值的相关图

Fig.3 Correlation diagrams of Li (a) and $\delta^7\text{Li}$ (b) vs. Fo in olivine for the dunites and wehrlites of the Yellow Hill complex

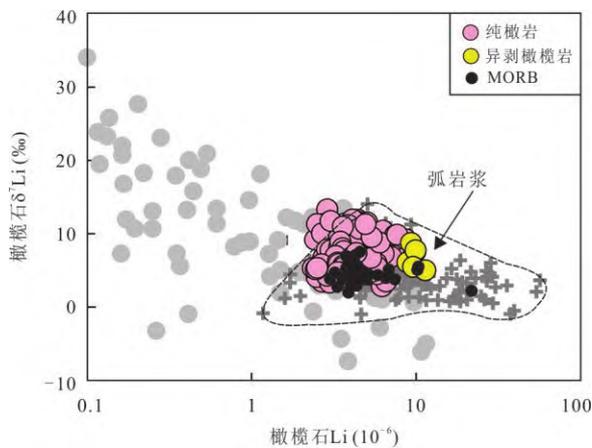


图4 Yellow Hill岩体中纯橄岩和异剥橄岩的橄榄石Li含量和Li同位素组成

Fig. 4 Li vs. $\delta^7\text{Li}$ in olivine from the dunites and wehrlites of the Yellow Hill complex

灰色圆形代表新疆中天山地块东岩体中的纯橄岩(Su *et al.*, 2017). 弧岩浆数据引自 Chan *et al.* (2002)、Tomascak *et al.* (2002)、Magna *et al.* (2006)和 Koşler *et al.* (2009); MORB 数据引自 Chan *et al.* (1992, 2002); Elliott *et al.* (2006); Tomascak *et al.* (2016)

量百分); 铬铁矿具有较高的 $\text{Cr}^\#$ (68.2~82.7) 和较低的 $\text{Mg}^\#$ (18.8~42.2) (梁子, 2018). 这些纯橄岩中的橄榄石具有较大的Li含量 ($1.35 \times 10^{-6} \sim 8.64 \times 10^{-6}$) 和 $\delta^7\text{Li}$ (2.82‰~11.9‰) 变化范围 (图3). 同一橄榄石颗粒中, Li含量和Li同位素较为均一, 与橄榄石的Fo值有较好的相关性, 排除了后期蚀变和壳源混染的影响 (梁子, 2018). 通过详细的矿物学、岩石学和地球化学分析, 并与岛弧岩浆和新疆峡东阿拉斯加型岩体对比发现, Yellow Hill橄榄石的Li同位素虽然处于岛弧岩浆的范围内, 但是比大多数岛弧岩浆偏重, 与峡东岩体纯橄岩的趋势一致 (图4). 由此推测, 元素Li在弧岩浆分异过程中 ^7Li 较 ^6Li 优

先进入橄榄石, 进而导致残余岩浆的轻Li同位素特征, 这可能是导致弧岩浆Li同位素组成与MORB相似的原因. 弧岩浆的演化时序漫长且过程复杂, 喷出或侵入的弧岩浆上侵就位过程中或多或少都会经历矿物的分离结晶作用, 此项工作暗示早期矿物的分离结晶会造成弧岩浆Li同位素组成的变化.

2 Li同位素示踪蛇绿岩中铬铁矿床的成因机制

蛇绿岩中铬铁矿床的成因及其与围岩纯橄岩和方辉橄榄岩的关系一直存在较大争议 (Su *et al.*, 2016, 2018). Li同位素体系的引入为制约铬铁矿成矿过程提供了关键信息 (Su *et al.*, 2016, 2018; Chen *et al.*, 2019, 2020; Zhang *et al.*, 2019). Su *et al.* (2018) 和 Chen *et al.* (2019, 2020) 对土耳其 Pozantı-Karsantı 和 Bursa 蛇绿岩中各个岩石单元的橄榄石进行了细致的原位Li同位素分析, 并与西藏罗布莎蛇绿岩进行对比研究 (Su *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2019), 结果显示不同成因的各岩石单元之间具有明显不同的Li含量和Li同位素变化范围和趋势. 这些岩石单元中各个矿物的Li含量和 $\delta^7\text{Li}$ 值都与蛇纹石不一致, 排除了后期蚀变的可能性 (图5). 土耳其 Pozantı-Karsantı 和 Bursa 蛇绿岩壳-幔过渡带中纯橄岩的Li含量和 $\delta^7\text{Li}$ 值分别为 $(0.7 \sim 1.9) \times 10^{-6}$ 和 $-2.5\% \sim 20.3\%$ (Su *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2020). 与壳-幔过渡带相比, 地幔序列中方辉橄榄岩、纯橄岩和铬铁岩的Li含量和 $\delta^7\text{Li}$ 值变化更大 (图5). 土耳其 Pozantı-Karsantı 和 Kızıldağ 蛇绿岩地幔序列方辉橄榄岩中橄榄石的Li含量为 $(0.95 \sim 1.93) \times 10^{-6}$, 与地幔橄榄岩捕虏体中橄榄石相似

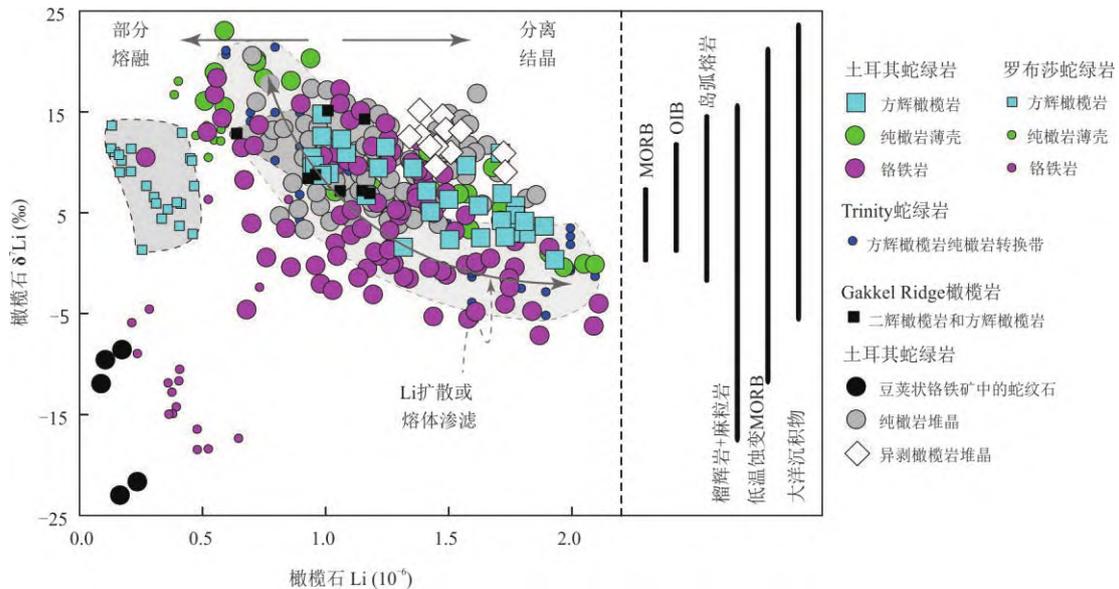


图 5 土耳其 Pozanti-Karsanti、Kızıldağ 和 Bursa 蛇绿岩中方辉橄榄岩、纯橄岩和铬铁岩及其壳—幔过渡带堆晶中橄榄石的 Li 同位素组成图解

Fig.5 Diagram of Li vs. $\delta^7\text{Li}$ for olivine in the Pozanti-Karsanti, Kızıldağ and Bursa ophiolitic harzburgites, dunites, chromitites and cumulates

图据 Su *et al.* (2018). 数据来源: Pozanti-Karsanti 蛇绿岩 (Su *et al.*, 2018), Kızıldağ 蛇绿岩 (Chen *et al.*, 2019), Bursa 蛇绿岩 (Chen *et al.*, 2020), 罗布莎蛇绿岩 (Su *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2019), Trinity 蛇绿岩 (Lundstrom *et al.*, 2005), Gakkel Ridge 橄榄岩 (Gao *et al.*, 2011). MORB、OIB、岛弧熔岩、榴辉岩和麻粒岩、蚀变大洋中脊玄武岩以及大洋沉积物等的 Li 同位素范围引自 Tomascak *et al.* (2016). Li 扩散或熔体渗滤的趋势线引自 Lundstrom *et al.* (2005)

($1.0 \times 10^{-6} \sim 1.8 \times 10^{-6}$; Seitz *et al.*, 2003; Su *et al.*, 2014); 但橄榄石 Li 同位素的变化较大 ($0.33\% \sim 14.6\%$), 较 Gakkel Ridge 橄榄岩稍轻 ($7.14\% \sim 15.1\%$; Gao *et al.*, 2011), 表明其可能经历了低 $\delta^7\text{Li}$ 熔体的交代作用 (图 5). Pozanti-Karsanti 和 Kızıldağ 蛇绿岩地幔序列纯橄岩中橄榄石的 Li 含量和 $\delta^7\text{Li}$ 值分别是 $(0.51 \sim 1.68) \times 10^{-6}$ 和 $1.84\% \sim 23.0\%$, 其中 Li 同位素范围与弧岩浆分布范围一致, 稍高于 MORB 和 OIB (图 5). 纯橄岩的橄榄石变化趋势与 Trinity 蛇绿岩中纯橄岩的趋势一致 (Lundstrom *et al.*, 2005), 指示其形成可能与俯冲板片脱水作用相关的弧岩浆作用有关. 与方辉橄榄岩和纯橄岩不同, 地幔序列铬铁岩中橄榄石的 Li 含量 ($0.55 \times 10^{-6} \sim 2.47 \times 10^{-6}$) 和 $\delta^7\text{Li}$ 值 ($-7.18 \sim 18.3\%$) 的变化较大 (图 4). 扩散作用对 Li 同位素的分馏具有显著影响 (如 Tomascak *et al.*, 2016), 然而, 铬铁岩主要由橄榄石和铬铁矿两种矿物组成, 而铬铁矿基本不含 Li (Su *et al.*, 2016, 2018). 因此, 橄榄石与铬铁矿之间 Li 的扩散作用可忽略不计 (Su *et al.*, 2016, 2018). 铬铁岩中橄榄石低的 Li 同位素组成落入榴

辉岩和麻粒岩范围内, 可能与脱水后的板片的熔融有关或者具有与纯橄岩一致的 Li 同位素组成后期又受到流体的改造作用 (Su *et al.*, 2018). 铬铁矿体和纯橄岩薄壳的 Li 同位素组成差异明显, 指示其记录了不同的熔/流体组分变化.

西藏罗布莎蛇绿岩赋存中国最大的豆荚状铬铁矿床, 其铬铁岩中的橄榄石具有低 Li 含量 ($0.20 \times 10^{-6} \sim 0.90 \times 10^{-6}$) 和 Li 同位素 ($-20.0\% \sim -5.00\%$) 特征, 被认为形成于成熟的岛弧地幔楔环境 (Su *et al.*, 2016). 与洋中脊橄榄岩、弧后背景的 Trinity 蛇绿岩和相对成熟弧背景的罗布莎蛇绿岩相比, 土耳其蛇绿岩显示更高更宽的 Li 含量和 Li 同位素变化范围, 与俯冲相关的各个地质储库的 Li 同位素组成相重叠, 这可能与俯冲初始阶段各种俯冲物质不同比例参与岩浆活动密切相关 (图 5). 该项工作表明 Li 同位素所揭示的流体活动对铬铁矿的结晶富集至关重要, Li 同位素可作为揭示蛇绿岩属性和形成构造背景以及铬铁矿矿床成因机制的重要地球化学示踪剂.

3 Li 同位素记录粒间熔/流体对大型层状岩体中铬铁矿形成的作用

Ireland and Penniston-Dorland (2015) 首次对 Bushveld 层状岩体中的长英质岩石和基性岩石进行了 Li 含量和 Li 同位素的分析, 结果显示 Li 含量变化较大而 Li 同位素较均一. 长英质岩石 Li 含量较低, 平均 $(5.00 \pm 4.00) \times 10^{-6}$, $\delta^7\text{Li}$ 值为 $5.90\% \pm 5.80\%$; 基性岩石含量较高且变化大 $(30.0 \times 10^{-6} \pm 36.0 \times 10^{-6})$, $\delta^7\text{Li}$ 值为 $3.7\% \pm 3.6\%$. 与之相邻的围岩石英岩的 Li 含量为 $(15.0 \pm 7.0) \times 10^{-6}$, $\delta^7\text{Li}$ 值在 3.20% 和 21.5% 之间; 变泥质岩的 Li 含量不均一 $(14.0 \times 10^{-6} \sim 105 \times 10^{-6})$, 平均 67.0×10^{-6} , $\delta^7\text{Li}$ 值为 $3.5\% \pm 8.2\%$. 这些变化暗示着围岩的混染.

根据上述 Li 在蛇绿岩和 Bushveld 层状岩体中的应用, Su *et al.* (2020) 对美国 Stillwater 大型层状岩体超基性带中橄榄岩亚带的嵌晶结构方辉橄榄岩、纯橄岩、铬铁岩和古铜辉石岩进行了细致的矿物岩石学观察和单矿物原位 Li-O 同位素分析. 橄

岩亚带由橄榄岩—方辉橄榄岩—古铜辉石岩, 以及厚薄不均一的铬铁矿层组成, 通常作为每一个完整旋回的起始, 与上一旋回的古铜辉石岩带相接触, 其中橄榄石及铬铁矿作为堆晶矿物, 并被辉石主晶所包裹. 少量的长石、云母等堆晶矿物可在粒间出现. 岩相学观察发现最早结晶的橄榄石和铬铁矿极少直接接触, 多有斜方辉石和/或单斜辉石等粒间矿物相隔. 橄榄石的 Li 含量 $(1.00 \times 10^{-6} \sim 3.00 \times 10^{-6})$ 较均一, 但 $\delta^7\text{Li}$ 值 $(4.00\% \sim 26.0\%)$ 变化较大且重于共生斜方辉石和单斜辉石 (图 6a). 斜方辉石和单斜辉石的 Li 含量和 $\delta^7\text{Li}$ 值分别是 $(0.50 \sim 5.00) \times 10^{-6}$ 和 $(4.00 \sim 8.00) \times 10^{-6}$, $-13.0\% \sim 7.00\%$ 和 $-14.0\% \sim -6.00\%$ (图 5b 和 5c). 相对于 Li 同位素, 橄榄石的 O 同位素组成大部分在正常地幔范围内 $(4.91\% \sim 5.72\%)$, 斜方辉石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 $(5.11\% \sim 5.87\%)$ 多高于正常地幔值, 单斜辉石具有最大的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围 $(4.64\% \sim 5.86\%)$ (图 6). 与 Bushveld 层状岩体不同, Stillwater 橄榄岩岩带中各矿物的 Li 含量变化小而 Li 同位素变化较大, 排除围

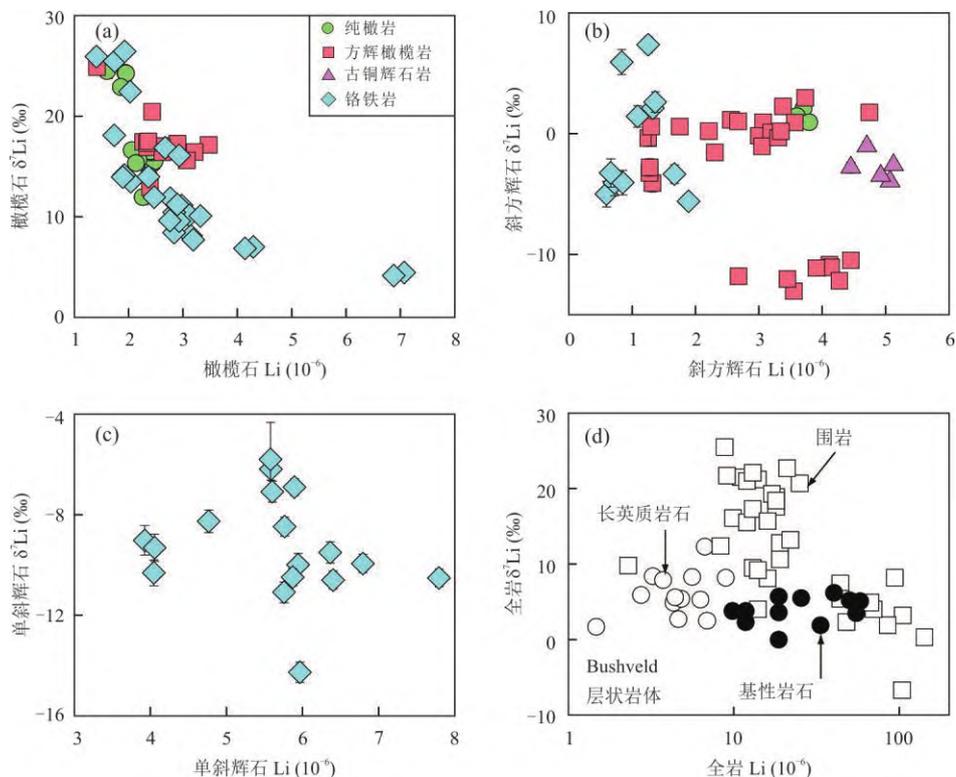


图 6 Stillwater 层状岩体超基性岩层中橄榄石(a)、斜方辉石(b)、单斜辉石(c)和全岩(d)的 Li 同位素组成(据 Su *et al.*, 2020); Bushveld 层状岩体引自 Ireland and Penniston-Dorland(2015)

Fig.6 Correlation diagrams of Li and $\delta^7\text{Li}$ for olivine (a), orthopyroxene (b), clinopyroxene (c) and whole rock (d) from the ultramafic zone of the Stillwater complex (after Su *et al.*, 2020), with comparison of data from the Bushveld complex (Ireland and Penniston-Dorland, 2015)

岩混染的可能性. 另外, 同一样品中, 橄榄石具有比斜方辉石较高的 $\delta^7\text{Li}$ 和较低 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 并且橄榄石的 Li 含量与 $\delta^7\text{Li}$ 值之间有良好的负相关关系, 暗示着橄榄石结晶后经历了强烈的元素和同位素组成改造. 不同岩相以及不同类型铬铁岩之间, 矿物组合和橄榄石颗粒大小呈规律性变化, 以及铬铁岩中的矿物元素含量(尤其是过渡族元素和流体活性元素)和 Li-O 同位素特征明显区别于方辉橄榄岩和纯橄岩, 揭示出铬铁岩中更加强化的矿物与粒间熔/流体的反应特征. 这一熔/流体不仅包括岩浆分离结晶过程中的粒间熔体, 也有铬铁矿结晶过程中释放的吸附流体的重要参与. 而斜方辉石和单斜辉石的化学成分更多地反映了演化岩浆的组分变化, 在过渡族元素含量以及 O-Cr 同位素方面明显受到铬铁矿的影响. 该项工作表明硅酸盐矿物的化学组成及其变化明显与铬铁矿的结晶聚集相关, 以熔/流体为介质进行的矿物间元素交换比单一的亚固相元素交换更为有效快捷, Li 同位素对我们认识矿物—粒间熔/流体反应有重要指示意义.

4 Li 含量与 Li 同位素揭示岩浆铜镍矿床成矿过程

橄榄石是岩浆铜镍硫化物矿床中最早结晶的硅酸盐矿物, 其结晶分异可能造成岩浆 Li 含量变化与 Li 同位素分馏. 岩浆铜镍硫化物矿床中橄榄石的 Li 含量 ($2.00 \times 10^{-6} \sim 25.0 \times 10^{-6}$) 和 $\delta^7\text{Li}$ 值变化较大 ($8.75\% \sim 45.0\%$) (Mao *et al.*, 2021, under review; Tang *et al.*, 2021), 高于平均上地幔值 ($\sim 4\% \pm 2\%$; Tomascak *et al.*, 2016; Marschall *et al.*, 2017), 也高于典型俯冲富水环境形成的阿拉斯加型岩体 (Su *et al.*, 2017b; 梁子, 2018)、层状岩体 (Su *et al.*, 2020) 以及大多数蛇绿岩中橄榄石中的 Li 同位素值 (Lundstrom *et al.* 2005; Su *et al.*, 2016, 2018; Chen *et al.*, 2019, 2020; Zhang *et al.*, 2019; 图 7).

不同岩浆铜镍矿床中 $\delta^7\text{Li}$ 值也有较大差别, 金川 ($\text{Li} = 5.60 \times 10^{-6} \sim 6.10 \times 10^{-6}$, $\delta^7\text{Li} = 16.1\% \sim 20.7\%$) 和天宇 ($\text{Li} = 8.75 \times 10^{-6} \sim 18.6 \times 10^{-6}$, $\delta^7\text{Li} = 12.0\% \sim 19.5\%$) 铜镍矿中橄榄石中 Li 含量和其他矿床类似 (图拉尔根、喀拉通克、黄山、香山、白石泉, $2.66 \times 10^{-6} \sim 15.0 \times 10^{-6}$), 而 $\delta^7\text{Li}$ 值明显偏低 (图拉尔根、喀拉通克、黄山、香山和白石泉; Tang *et al.*, 2021). 另外, 天宇和白石泉的海绵陨铁状矿石中橄榄石的 $\delta^7\text{Li}$ 值略高于浸染状矿石, 以天宇为

例, 其海绵陨铁状矿石的 $\delta^7\text{Li}$ 值为 $12.5\% \sim 19.5\%$, 而浸染状矿石的该值为 $12.0\% \sim 15.0\%$. 矿物间扩散 (Gao *et al.*, 2011)、矿物与熔/流体反应 (Su *et al.*, 2020)、结晶分异 (Su *et al.*, 2017)、地壳混染 (Ireland and Penniston-Dorland, 2015) 和流体作用 (热液流体、海水及浅表水等), 都会导致橄榄石中 Li 含量及 Li 同位素的变化. 因此, 天宇和白石泉铜镍矿床的橄辉岩、辉橄岩、浸染状矿化和海绵陨铁状矿化矿石样品的橄榄石颗粒中, 均未见明显的 Li 含量和同位素环带, Li 含量和同位素也没有相关性, 说明扩散对橄榄石中 Li 同位素不起关键性作用. 而橄榄石的 Fo 值与 Li 含量存在负相关关系 (图 8a), 指示 Li 含量随着岩浆演化而逐渐升高. 以白石泉和天宇矿床为例, 两个矿床具有相似的地幔源区、形成时代相同且经历了相似比例的地壳混染 (Tang *et al.*, 2021), 因此上述过程不是造成橄榄石 $\delta^7\text{Li}$ 值发生分异的主要原因, 而可能为矿物与熔体或者流体的反应. Li-O-Hf 同位素端元混合模拟显示, 白石泉经历了更高层次的地幔俯冲物质及相关流体加入. 然而, 源区俯冲流体的加入并不能造成现今如此高的 Li 同位素值 (图 7), 必须有更重 Li 端元的加入, 如 5% 盆地卤水的加入可以很好的解释现在的 Li 同位素值, 而天宇几乎没有该卤水的加入 (Tang *et al.*, 2021; 图 7). 白石泉名义上无水矿物 (橄榄石、辉石) 的水含量也高于天宇矿床, 据原生角闪石计算的与角闪石平衡的岩浆水含量也略高, 可能由白石泉矿

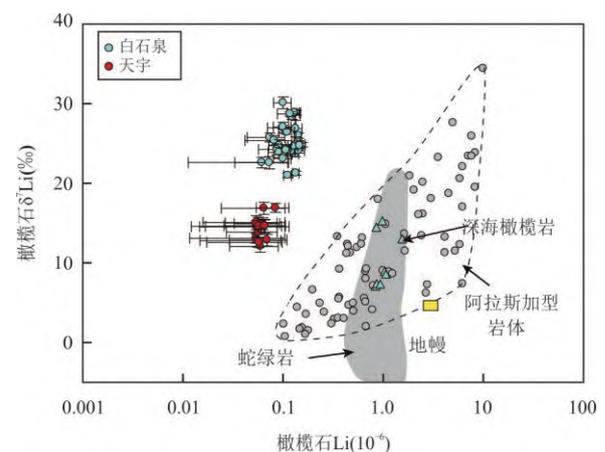


图 7 白石泉和天宇橄榄石 Li 含量和 $\delta^7\text{Li}$ 相关性图

Fig. 7 Correlation diagram of Li vs. $\delta^7\text{Li}$ of olivine in the Baishiquan and Tianyu

图据 Tang *et al.* (2021). 阿拉斯加型岩体据 Su *et al.* (2017b); 蛇绿岩和深海橄辉岩引自 Lundstrom *et al.* (2005)、Gao *et al.* (2011)、Su *et al.* (2018) 和 Chen *et al.* (2019); 地幔值引自 Pogge von Strandmann *et al.* (2011)

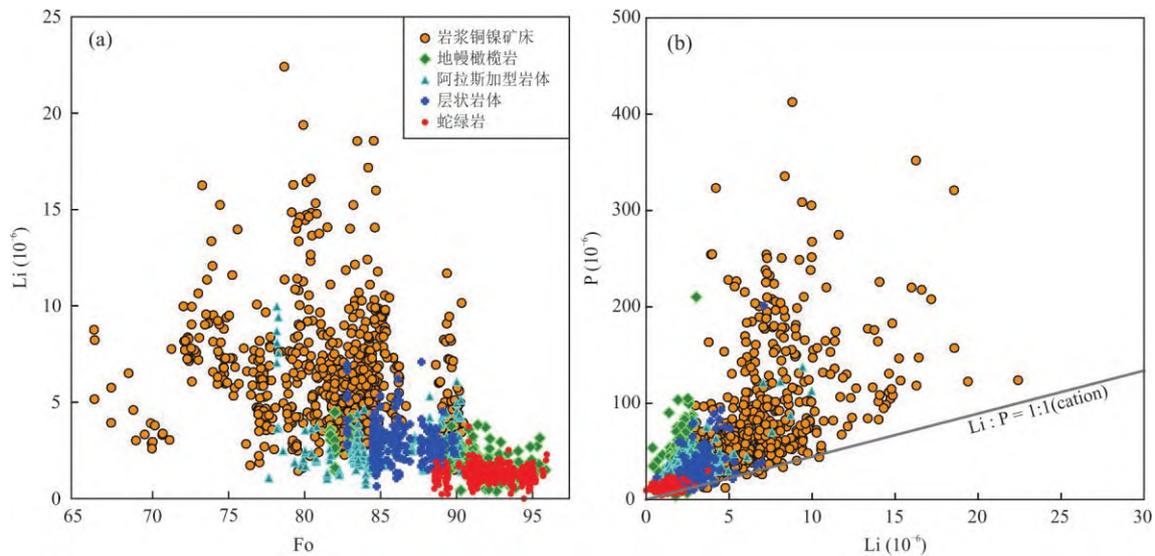


图8 橄榄石 Li 含量和 Fo 相关性图(a)和橄榄石 Li 含量与 P 含量相关性图(b)

Fig.8 Correlation diagrams of Li vs. Fo (a) and P (b) in olivine for the magmatic Ni-Cu deposits

据 Mao *et al.* (2021, under review). 阿拉斯加型岩体据 Su *et al.* (2017); 蛇绿岩引自 Lundstrom *et al.* (2005)、Su *et al.* (2018) 和 Chen *et al.* (2019); 地幔橄榄岩引自 Chan *et al.* (2002)、Magna *et al.* (2006)、Tang *et al.* (2007)、Pogge von Strandmann *et al.* (2011) 和 Su *et al.* (2014)

床在岩浆源区经历含水熔体改造程度较高造成, 配合浅表卤水的加入, 导致其超高的橄榄石 Li 同位素值. 以上认识表明 Li-O-Hf 等同位素相结合可以判定岩浆矿床中水的参与程度及其加入的部位 (Tang *et al.*, 2021).

不同于新疆天宇与白石泉矿床, 新疆黄山、黄山东、坡一和坡十等铜镍矿床的橄榄石面扫描 (Li、P、Mg、Fe、Mn、V、Sc、Ni、Co、Zn、Cr、Al) 揭示 Li 与 P 呈耦合环带, 且 Li 与 P 呈显著正相关, 而 Li 与其他元素之间并没有相关性. 具 Li-P 耦合环带的橄榄石的 (Li+Na):P (离子数) 接近 1:1 (图 8b) (Mao *et al.*, 2021, under review). 这些发现表明 Li 与 P 耦合可使部分橄榄石保留了 Li 生长环带, 从而改变橄榄石中 Li 元素与 Li 同位素的地球化学行为. 该现象指示当橄榄石中存在 Li(Na)+P 耦合替代 Mg+Si 时, 其 Li 含量与 Li 同位素可能仍然保留高温岩浆过程的信息. 然而, 并不是所有铜镍矿床的橄榄石都具有 Li-P 耦合环带, 例如上述的天宇和白石泉矿床的橄榄石. 另外, 喀拉通克铜镍矿床橄榄石呈元素扩散平衡特征, 其核部元素含量较均一, 边部逐渐变化. 边部的 Li 与 Fe、Mg、Mn、Ni 等元素含量变化密切相关, 表明喀拉通克铜镍矿床橄榄石的 Li 含量记录了一期扩散平衡事件.

上述铜镍矿床的 Li 元素含量与 Li 同位素的变化特征指示详细的矿物学与矿物内部 Li 同位素变化特征剖析是精细刻画成矿过程的有力手段.

5 问题与展望

尽管 Li 同位素已在地幔地球化学研究中体现出了较大的应用前景, 但镁铁—超镁铁岩成岩成矿过程中 Li 同位素地球化学研究仍处于初始阶段, 在分馏机制与控制条件方面还存在争议, 需要后续更多深入的研究. 其中, 温度等结晶条件的变化会引起矿物间以及矿物与熔流体间 Li 同位素的重新分配, 但是缺乏不同温度条件下 Li 同位素分馏系数的系统研究, 严重制约了我们对镁铁—超镁铁岩成岩成矿过程的理解. 随着 Li 同位素分馏机理认识的加深和单矿物原位 Li 同位素分析方法的完善, 结合岩石矿物显微结构和流体组成, Li 同位素将为精细刻画镁铁—超镁铁岩成岩成矿过程及深部动力学机制提供更多依据.

致谢: 感谢审稿专家提出的建设性审稿意见.

References

- Chan, L. H., Alt, J. C., Teagle, D. A. H., 2002. Lithium and Lithium Isotope Profiles through the Upper Oceanic Crust: A Study of Seawater-Basalt Exchange at ODP Sites 504B and 896A. *Earth and Planetary Science Letters*, 201(1): 187–201. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(02\)00707-0](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(02)00707-0)
- Chan, L. H., Edmond, J. M., Thompson, G., et al., 1992. Lithium Isotopic Composition of Submarine Basalts: Implica-

- tions for the Lithium Cycle in the Oceans. *Earth and Planetary Science Letters*, 108(1–3): 151–160. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(92\)90067-6](https://doi.org/10.1016/0012-821x(92)90067-6)
- Chen, C., de Hoog, J.C.M., Su, B.X., et al., 2020. Formation Process of Dunites and Chromitites in Orhaneli and Harmançik Ophiolites (NW Turkey): Evidence from In-Situ Li Isotopes and Trace Elements in Olivine. *Lithos*, 376–377: 105773. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105773>
- Chen, C., Su, B.X., Xiao, Y., et al., 2019. Intermediate Chromitite in Kızıldağ Ophiolite (SE Turkey) Formed during Subduction Initiation in Neo-Tethys. *Ore Geology Reviews*, 104: 88–100. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.10.004>
- Cui, M.M., Bai, Y., Luo, Y., et al., 2020. Characteristics, Petrogenesis and Metallogenesis of Alaskan-Type Complexes. *Mineral Deposits*, 39(3): 397–418(in Chinese with English abstract).
- Deng, L. X., Liu, Y. S., Zong, K. Q., et al., 2019. Carbonate Metasomatism and Its Identification Characteristics in Mantle Peridotite. *Earth Science*, 44(4): 1113–1127(in Chinese with English abstract).
- Elliott, T., Jeffcoate, A., Bouman, C., 2004. The Terrestrial Li Isotope Cycle: Light-Weight Constraints on Mantle Convection. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(3–4): 231–245. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(04\)00096-2](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(04)00096-2)
- Elliott, T., Thomas, A., Jeffcoate, A., et al., 2006. Lithium Isotope Evidence for Subduction-Enriched Mantle in the Source of Mid-Ocean-Ridge Basalts. *Nature*, 443(7111): 565–568. <https://doi.org/10.1038/nature05144>
- Gao, Y.J., Snow, J.E., Casey, J.F., et al., 2011. Cooling-Induced Fractionation of Mantle Li Isotopes from the Ultraslow-Spreading Gakkel Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1–2): 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.003>
- Ireland, R.H.P., Penniston-Dorland, S.C., 2015. Chemical Interactions between a Sedimentary Diapir and Surrounding Magma: Evidence from the Phepane Dome and Bushveld Complex, South Africa. *American Mineralogist*, 100(8): 1985–2000. <https://doi.org/10.2138/am-2015-5196>
- Jing, J.J., Su, B.X., Xiao, Y., et al., 2019. Reactive Origin of Mantle Harzburgite: Evidence from Orthopyroxene-Spinel Association. *Lithos*, 342/343: 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.05.011>
- Košler, J., Magna, T., Mlčoch, B., et al., 2009. Combined Sr, Nd, Pb and Li Isotope Geochemistry of Alkaline Lavas from Northern James Ross Island (Antarctic Peninsula) and Implications for Back-Arc Magma Formation. *Chemical Geology*, 258(3–4): 207–218. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.10.006>
- Liang, Z., 2018. Petrological and Geochemical Studies of Mafic-Ultramafic Complexes from Southeastern Alaska, United States (Dissertation). Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 41–53(in Chinese with English abstract).
- Li, D.Y., Xiao Y.L., Wang, Y.Y., et al., 2019. Mg-Li-Fe-Cr Isotopic Fractionation during Subduction. *Earth Science*, 44(12): 4081–4085(in Chinese with English abstract).
- Li, X.H., Liu, Y., Tang, Y.J., et al., 2015. In-Situ Li Isotopic Microanalysis Using SIMS and Its Applications. *Earth Science Frontiers*, 22(5): 160–170(in Chinese with English abstract).
- Lundstrom, C.C., Chaussidon, M., Hsui, A.T., et al., 2005. Observations of Li Isotopic Variations in the Trinity Ophiolite: Evidence for Isotopic Fractionation by Diffusion during Mantle Melting. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(3): 735–751. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.08.004>
- Magna, T., Wiechert, U., Grove, T.L., et al., 2006. Lithium Isotope Fractionation in the Southern Cascadia Subduction Zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 250(3–4): 428–443. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.08.019>
- Mao, Y.J., Schoneveld, L., Barnes, S.J., et al., 2021. Coupled Li-P Zoning and Trace Element Composition of Olivine from Magmatic Ni-Cu Deposits: Implications for Postcumulus Re-Equilibration of Olivine. *Journal of Petrology* (in review).
- Marschall, H.R., Wanless, V.D., Shimizu, N., et al., 2017. The Boron and Lithium Isotopic Composition of Mid-Ocean Ridge Basalts and the Mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 207: 102–138. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.03.028>
- Pogge von Strandmann, P.A.E., Elliott, T., Marschall, H.R., et al., 2011. Variations of Li and Mg Isotope Ratios in Bulk Chondrites and Mantle Xenoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(18): 5247–5268. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.06.026>
- Rudnick, R.L., Ionov, D.A., 2007. Lithium Elemental and Isotopic Disequilibrium in Minerals from Peridotite Xenoliths.

- liths from Far-East Russia: Product of Recent Melt/Fluid-Rock Reaction. *Earth and Planetary Science Letters*, 256(1–2): 278–293. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.01.035>
- Seitz, H. M., Brey, G. P., Stachel, T., et al., 2003. Li Abundances in Inclusions in Diamonds from the Upper and Lower Mantle. *Chemical Geology*, 201(3–4): 307–318. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2003.08.001>
- Su, B. X., 2017. Applications of Li Isotopes in Mantle Geochemistry. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(1): 6–13 (in Chinese with English abstract).
- Su, B. X., Bai, Y., Cui, M. M., et al., 2020. Petrogenesis of the Ultramafic Zone of the Stillwater Complex in North America: Constraints from Mineral Chemistry and Stable Isotopes of Li and O. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 175(7): 1–20. <https://doi.org/10.1007/s00410-020-01707-y>
- Su, B. X., Chen, C., Bai, Y., et al., 2017. Lithium Isotopic Composition of Alaskan-Type Intrusion and Its Implication. *Lithos*, 286–287: 363–368. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.06.024>
- Su, B. X., Chen, C., Pang, K. N., et al., 2018a. Melt Penetration in Oceanic Lithosphere: Li Isotope Records from the Pozantı-Karsantı Ophiolite in Southern Turkey. *Journal of Petrology*, 59(1): 191–205. <https://doi.org/10.1093/ptrology/egy023>
- Su, B. X., Zhou, X. H., Sun, Y., et al., 2018b. Carbonatite-Metasomatism Signatures Hidden in Silicate-Metasomatized Mantle Xenoliths from NE China. *Geological Journal*, 53(2): 682–691. <https://doi.org/10.1002/gj.2920>
- Su, B. X., Gu, X. Y., Deloule, E., et al., 2015. Potential Orthopyroxene, Clinopyroxene and Olivine Reference Materials for In-Situ Lithium Isotope Determination. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 39(3): 357–369. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908x.2014.00313.x>
- Su, B. X., Zhang, H. F., Deloule, E., et al., 2014. Distinguishing Silicate and Carbonatite Mantle Metasomatism by Using Lithium and Its Isotopes. *Chemical Geology*, 381: 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.05.016>
- Su, B. X., Zhou, M. F., Robinson, P. T., 2016. Extremely Large Fractionation of Li Isotopes in a Chromitite-Bearing Mantle Sequence. *Scientific Reports*, 6: 22370. <https://doi.org/10.1038/srep22370>
- Tang, D. M., Qin, K. Z., Su, B. X., et al., 2021. Addition of H₂O at the Baishiquan and Tianyu Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposits, Southern Central Asian Orogenic Belt, China: Evidence from Isotopic Geochemistry of Olivine and Zircon. *Mineralium Deposita*. <https://doi.org/10.1007/s00126-021-01063-2>
- Tang, Y. J., Zhang, H. F., Nakamura, E., et al., 2007. Lithium Isotopic Systematics of Peridotite Xenoliths from Hannuoba, North China Craton: Implications for Melt-Rock Interaction in the Considerably Thinned Lithospheric Mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(17): 4327–4341. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.07.006>
- Teng, F. Z., Rudnick, R. L., McDonough, W. F., et al., 2008. Lithium Isotopic Composition and Concentration of the Deep Continental Crust. *Chemical Geology*, 255(1–2): 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.06.009>
- Tomascak, P. B., Magna, T. S., Dohmen, R., 2016. Advances in Lithium Isotope Geochemistry. Springer International Publishing, Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-01430-2>
- Tomascak, P. B., Tera, F., Helz, R. T., et al., 1999. The Absence of Lithium Isotope Fractionation during Basalt Differentiation: New Measurements by Multicollector Sector ICP-MS. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(6): 907–910. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(98\)00318-4](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(98)00318-4)
- Tomascak, P. B., Widom, E., Benton, L. D., et al., 2002. The Control of Lithium Budgets in Island Arcs. *Earth and Planetary Science Letters*, 196(3–4): 227–238. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(01\)00614-8](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(01)00614-8)
- Tian, S. H., Lu, N., Hou, Z. Q., et al., 2021. Lithium Isotopic Solution Analysis Using MC-ICP-MS and Its Applications. *Geological Review*, 67(5): 1441–1464 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, Y., Zhang, H. F., Su, B. X., et al., 2017. Partial Melting Control of Lithium Concentrations and Isotopes in the Cenozoic Lithospheric Mantle beneath Jiande Area, the Cathaysia Block of SE China. *Chemical Geology*, 466: 750–761. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.07.024>
- Xiao, Y., Zhang, H. F., Su, B. X., et al., 2019. Subduction-Driven Heterogeneity of the Lithospheric Mantle beneath the Cathaysia Block, South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 186: 104062. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.104062>
- Xu, R., Liu, Y. S., Tong, X. R., et al., 2013. In-Situ Trace Elements and Li and Sr Isotopes in Peridotite Xenoliths from Kuandian, North China Craton: Insights into Pacific

Slab Subduction-Related Mantle Modification. *Chemical Geology*, 354: 107–123. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.06.022>

Zhang, P.F., Zhou, M.F., Robinson, P.T., et al., 2019. Evolution of Nascent Mantle Wedges during Subduction Initiation: Li-O Isotopic Evidence from the Luobusa Ophiolite, Tibet. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 245: 35–58. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.09.037>

附中文参考文献

- 崔梦萌, 白洋, 罗扬, 等, 2020. 阿拉斯加型岩体的基本特征、成岩过程及成矿作用. *矿床地质*, 39: 397–418.
- 邓黎旭, 刘勇胜, 宗克清, 等, 2019. 地幔橄榄岩中碳酸盐熔体交代作用及其鉴定特征. *地球科学*, 44(4): 1113–1127.
- 李东永, 肖益林, 王洋洋, 等, 2019. 板块俯冲过程中的 Mg-Li-Fe-Cr 同位素分馏. *地球科学*, 44: 4081–4085.
- 李献华, 刘宇, 汤艳杰, 等, 2015. 离子探针 Li 同位素微区原位分析技术与应用. *地学前缘*, 22(5): 160–170.
- 梁子, 2018. 阿拉斯加东南部镁铁-超镁铁杂岩体岩石学和地球化学(硕士学位论文). 北京: 中国科学院大学.
- 苏本勋, 2017. 锂同位素在地幔地球化学中的应用. *矿物岩石地球化学通报*, 36(1): 6–13.
- 田世洪, 路娜, 侯增谦, 等, 2021. MC-ICP-MS 锂同位素溶液分析技术与应用. *地质论评*, 67(5): 1441–1464.