

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.241>



# 大陆俯冲隧道板片-地幔楔界面反向流体交代作用:西阿尔卑斯造山带超高压变质白片岩的地球化学证据

陈伊翔<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院壳幔物质与环境重点实验室,中国科学技术大学地球和空间科学学院,安徽合肥 230026
2. 中国科学院比较行星学卓越创新中心,安徽合肥 230026

**摘要:**前人对深俯冲板片释放熔/流体交代地幔楔形成弧岩浆源区的过程和机制已得到充分认识,然而对地幔楔岩石能否脱水交代深俯冲地壳并不清楚.在对欧洲西阿尔卑斯造山带 Dora-Maira 地体白片岩的地球化学研究中,首次发现地幔楔交代岩能够脱水反向交代深俯冲地壳岩石,从而极大影响俯冲地壳的地球化学组成.结合白片岩和围岩的全岩地球化学特征以及锆石学结果,查明了白片岩的原岩为 S 型花岗岩,澄清了关于 Dora-Maira 白片岩原岩属性的长期争议.在此基础上,发现白片岩中变质锆石相对残留岩浆锆石  $\delta^{18}\text{O}$  值显著降低,指示原岩形成后受到低  $\delta^{18}\text{O}$  变质流体的交代作用.白片岩具有高温岩石中最高  $\delta^{26}\text{Mg}$  值达 0.75‰,显著高于围岩变花岗岩,指示交代流体具有重 Mg 同位素组成.基于地球主要岩石储库的 Mg 同位素组成,推测交代流体来自俯冲隧道中富滑石地幔楔蛇纹岩在弧下深度的脱水分解,而这些地幔楔蛇纹岩是新特提斯洋壳在弧前深度变质脱水产生的流体与地幔楔浅部橄榄岩反应形成.这些结果不仅提供了利用 Mg-O 同位素示踪俯冲隧道中流体来源的新思路,也提供了地幔楔蛇纹岩来源流体反向交代深俯冲地壳岩石的首个典型实例.这种反向交代不仅极大改变了深俯冲地壳的地球化学组成,而且对弧岩浆岩重 Mg 同位素成因具有重要意义.

**关键词:** Mg 同位素; O 同位素; 俯冲隧道; 反向流体交代; 西阿尔卑斯造山带; 地球化学.

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2019)12-4057-07

收稿日期: 2019-08-19

## Reversed Metasomatism at the Slab-Mantle Interface in a Continental Subduction Channel: Geochemical Evidence from the Ultrahigh-Pressure Metamorphic Whiteschist in the Western Alps

Chen Yixiang<sup>1,2</sup>

1. CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China
2. CAS Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China

**Abstract:** It is well known that the mantle wedge metasomatized by fluids derived from the subducting slab serves as the source of arc magmas. However, it is uncertain whether the subducting crust would be metasomatized by fluids released from mantle wedge

**基金项目:** 国家“973”计划项目“大陆俯冲带壳幔相互作用”(No.2015CB856106);国家自然科学基金面上项目(Nos.41473032,41622302).

**作者简介:** 陈伊翔(1983-),特任教授,2016年获得国家自然科学基金委优秀青年科学基金资助.主要研究方向为俯冲带熔/流体活动及其地球化学效应. ORCID: 0000-0003-4900-4638. E-mail: yxchen07@ustc.edu.cn

**引用格式:** 陈伊翔, 2019. 大陆俯冲隧道板片-地幔楔界面反向流体交代作用: 西阿尔卑斯造山带超高压变质白片岩的地球化学证据. 地球科学, 44(12):4057-4063.

metasomatites. Now this is firstly illustrated by a detailed study of petrology and geochemistry for whiteschist from the Dora-Maira Massif in the Western Alps. Based on the whole-rock geochemistry and zirconology for the whiteschist and its country rock, it is concluded that the protolith of the whiteschist is a kind of S-type granites, providing a resolution to the long-standing controversy on the protolith nature of the whiteschist in this region. The  $\delta^{18}\text{O}$  values of metamorphic zircon in the whiteschist are significantly lower than those of magmatic zircon, suggesting that the protolith was metasomatized by low  $\delta^{18}\text{O}$  fluids before the peak UHP metamorphism. The whiteschist shows the highest  $\delta^{26}\text{Mg}$  values up to 0.75‰ among high- $T$  silicate rocks, which are much higher than those of the metagranite, suggesting that the metasomatic fluids have heavy Mg isotope compositions. Based on the Mg isotope systematics of major terrestrial silicate reservoirs, it is proposed that such fluids would probably originate from talc-rich serpentinites that were generated at forearc depths by hydration of the mantle wedge peridotite during prograde subduction of the Neotethyan oceanic slab. The mantle wedge serpentinites were then metastably carried by the subducting continental crust to subarc depths, where they underwent dehydration for reversed metasomatism of the deeply subducting continental crust at the slab-mantle interface in the continental subduction channel. The results provide not only the new idea for tracing fluid sources in the continental subduction channel, but also the first example that the deeply subducting continental crust underwent the reversed metasomatism by the fluids derived from dehydration of the mantle wedge metasomatite. This reversed metasomatism would greatly modify the geochemical composition of the deeply subducted continental crust, which has bearing on the origin of arc magmas rich in heavy Mg isotopes.

**Key words:** Mg isotopes; O isotopes; subduction channel; reversed metasomatism; western Alps; geochemistry.

## 0 引言

俯冲带流体活动对地球内部圈层和表生圈层间的物质传输和地球化学循环具有重要意义 (Bebout, 2007; Zheng, 2012, 2019). 一般情况下, 深俯冲地壳在进变质过程中会经受变质脱水甚至部分熔融, 释放出流体交代上覆地幔楔橄榄岩形成地幔交代岩, 而这些交代岩的部分熔融则产生了弧岩浆岩. 实际上, 在弧前深度形成的地幔楔交代岩中含有含水矿物, 如蛇纹石、绿泥石或滑石. 在进一步俯冲过程中这些矿物能否脱水反向交代俯冲地壳岩石? 如果能够发生, 这个过程又如何影响深俯冲地壳乃至弧岩浆岩的地球化学组成? 这是俯冲带壳幔相互作用的前沿领域之一.

大陆地壳由于密度较低, 陆壳发生深俯冲通常假定存在先前深俯冲洋壳的重力拖曳. 大洋板片在弧前深度 (<60~80 km) 俯冲过程中释放出流体交代地幔楔, 会使地幔楔橄榄岩水化形成富水的蛇纹岩. 在俯冲板片—地幔楔之间会形成俯冲隧道, 俯冲隧道中既包括不同深度拆离的俯冲地壳, 也包括从地幔楔底部刮削下来的地幔岩石, 如地幔楔蛇纹岩 (Zheng, 2012; Zheng *et al.*, 2013; Zheng and Chen, 2016; Chen *et al.*, 2017a). 这些不同来源的物质在俯冲隧道内发生混合, 经历不同程度的变质变形乃至部分熔融作用, 形成各种形式的高压/超高压构造混杂岩. 由于大陆俯冲带是在先前俯冲的大洋俯冲带基础之上发展起来的, 因此大陆俯冲隧道中的流体

来源比较复杂, 既有俯冲大陆地壳来源的流体, 也有地幔楔蛇纹岩来源的流体. 如何从岩石学和地球化学角度识别这些不同来源的流体, 特别是如何识别地幔楔来源流体对地壳岩石的反向交代作用, 已经成为俯冲带地球化学研究的前沿 (Zheng, 2019).

Chen *et al.* (2016, 2017b) 对欧洲西阿尔卑斯造山带 Dora-Maira 地体出露的白片岩进行了锆石学和地球化学研究. 结果首次证明, 地幔楔蛇纹岩流体反向交代深俯冲陆壳. 这一反向交代作用不仅极大改变了深俯冲地壳的地球化学组成, 而且对弧岩浆岩重 Mg 同位素成因具有重要意义.

## 1 西阿尔卑斯 Dora-Maira 地体白片岩的原岩属性

欧洲西阿尔卑斯造山带 Dora-Maira 地体是典型的超高压变质大陆地体, 此地出露的白片岩是最早发现超高压变质矿物柯石英的地壳表壳岩石之一 (Chopin, 1984). 这种白片岩具有独特的地球化学组成, 富集  $\text{SiO}_2$  (>70%) 和 MgO (绝大部分 >5%), 亏损 Na、Ca、Fe、Rb、Ba 和 Sr 等元素 (Schertl and Schreyer, 2008; Ferrando *et al.*, 2009; Ferrando, 2012). 白片岩的这个独特地球化学成分与通常陆壳岩石有较大差别, 导致前人对原岩特征的认识争议巨大, 主要观点包括富 Mg 的海相蒸发岩 (Chopin, 1984)、经历强烈海水蚀变的花岗岩 (Gauthiez-Putallaz *et al.*, 2016) 或正常的花岗岩 (Schertl and

Schreyer, 2008; Ferrando, 2012).

为了厘清这些问题, Chen *et al.* (2016, 2017b) 对这些白片岩和变花岗岩中锆石进行了微区 U-Pb 定年和 O-Hf 同位素分析 (图 1). 结果发现, 白片岩和围岩变花岗岩中残留锆石具有类似的 U-Pb 年龄分布特征, 主要集中在  $\sim 262$  Ma, 两种岩石中残留锆石的 O-Hf 同位素组成范围也较为一致. 这些结果指示, 白片岩和变花岗岩具有类似的源区组成. 考虑到白片岩中变质锆石的  $\delta^{18}\text{O}$  值比岩浆锆石显著降低, 并且白片岩全岩  $\delta^{18}\text{O}$  值也明显低于变花岗岩, 显然其原岩不可能为富 Mg 的蒸发岩, 也不可能为经历强烈海水蚀变的花岗岩, 而应为正常花岗岩.

结合继承岩浆锆石较高的  $\delta^{18}\text{O}$  值以及变花岗岩中石榴石、白云母等富铝矿物的出现, 进一步制约了这种原岩应为 S 型花岗岩. 这些结果澄清了关于 Dora-Maira 地体白片岩原岩属性的长期争议, 也为探讨白片岩经历的流体交代过程奠定了基础.

## 2 大陆板片—地幔楔界面反向流体交代作用

Chen *et al.* (2016) 研究发现, 白片岩中变质锆石相对残留岩浆锆石  $\delta^{18}\text{O}$  值显著降低, 指示了变花岗岩原岩形成后经历了相对低  $\delta^{18}\text{O}$  变质流体的交代

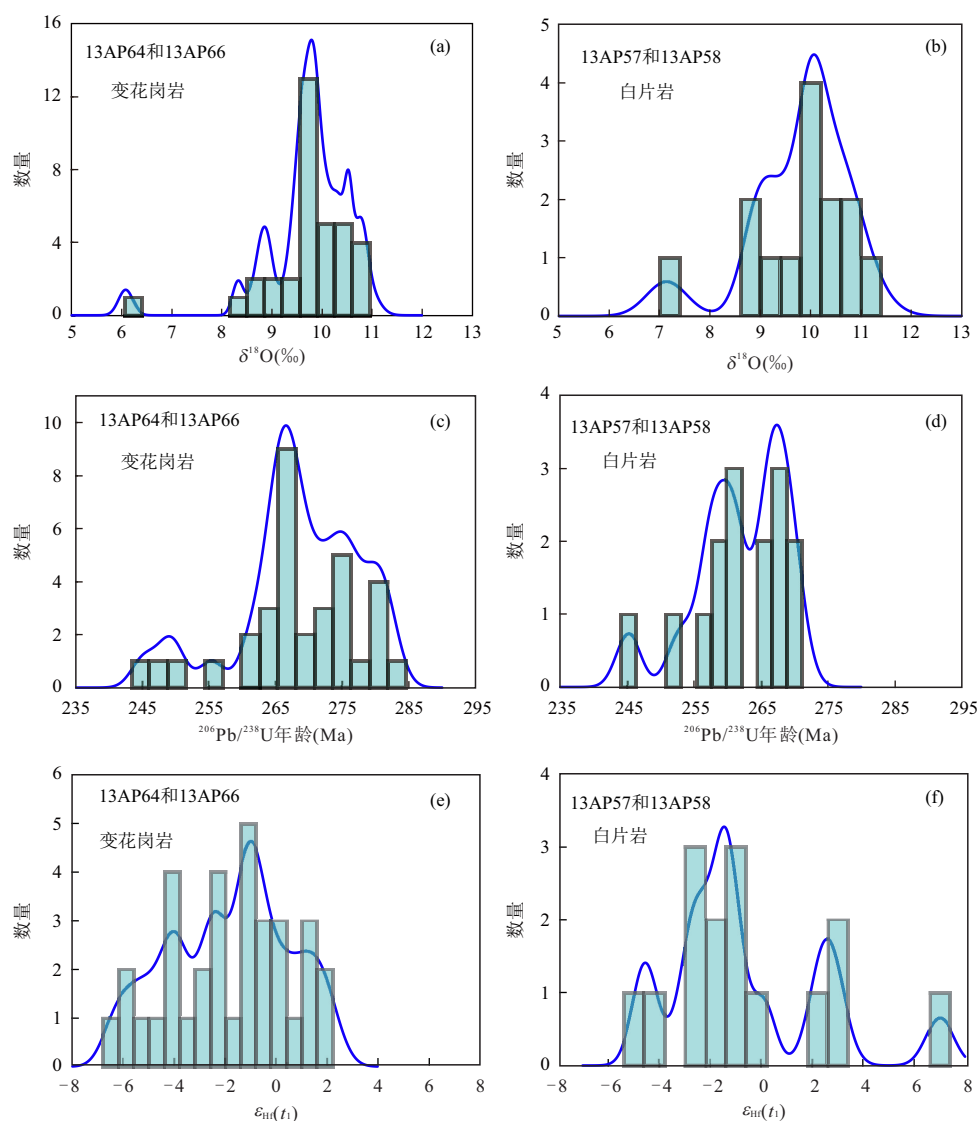


图 1 西阿尔卑斯造山带 Dora-Maira 地体白片岩和围岩变花岗岩中残留岩浆锆石 U-Pb 年龄和 Hf-O 同位素组成对比  
Fig.1 The comparison of  $\delta^{18}\text{O}$  values, U-Pb ages and  $\epsilon_{\text{Hf}}(t_1)$  values for the relict magmatic zircons of the metagranite and white-chist from the Dora-Maira Massif, western Alps

修改自 Chen *et al.* (2017b)

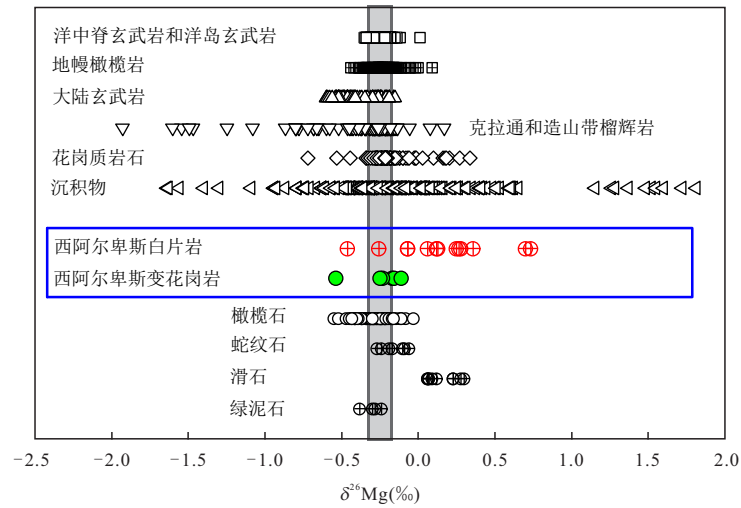


图2 西阿尔卑斯Dora-Maira地体白片岩和变花岗岩的Mg同位素组成以及地球主要硅酸盐储库的Mg同位素组成  
 Fig.2 The Mg isotope composition of whiteschist and metagranite in the Dora-Maira Massif and the major silicate reservoirs of the Earth

修改自Chen *et al.*(2016)

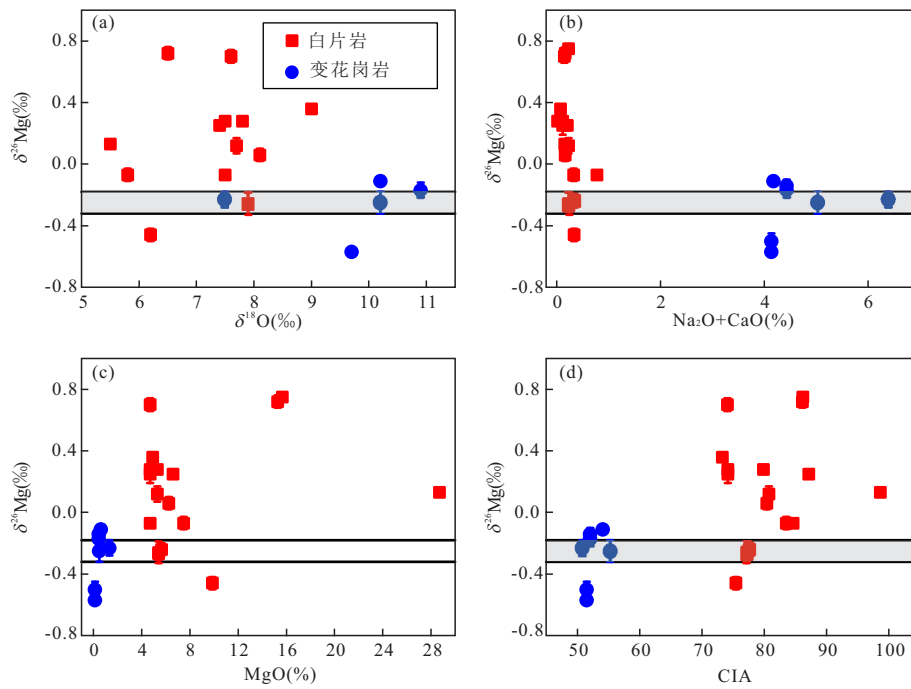


图3 全岩δ²⁶Mg值与δ¹⁸O值、Na₂O+CaO、MgO以及CIA的关系

Fig.3 Correlations between whole-rock δ²⁶Mg values and δ¹⁸O values, Na₂O+CaO, MgO and CIA  
 数据来自Chen *et al.*(2016);CIA为化学风化指数,指Al₂O₃/(Al₂O₃+Na₂O+K₂O+CaO)的摩尔数比值

作用.因此,白片岩是一种地壳交代岩,其独特的地球化学组成是流体交代原岩变花岗岩形成的.为了进一步制约白片岩经历的流体交代过程,对白片岩和围岩变花岗岩进行了Mg同位素分析,结果总结在图2和图3中.

研究发现,白片岩具有高温岩石中最重的Mg同位素组成,δ²⁶Mg值高达0.75‰,显著高于围岩变花岗岩(图2).考虑到白片岩极富集Mg和高δ²⁶Mg的特征,这些交代流体必须具有高Mg含量和高δ²⁶Mg值的特征.前人研究发现,地幔Mg同位素组

成相对均一( $\delta^{26}\text{Mg}=-0.24\text{‰}$ ),并且在部分熔融、岩浆结晶分异以及变质脱水等过程中Mg同位素变化极小(Teng, 2017). 化学风化虽然能够使产物具

有重的Mg同位素组成,但同时也会使岩石中Mg含量降低、O同位素组成变重,这与我们观察不符(图3). 同时,变沉积物和变玄武岩在高压下脱水产生的

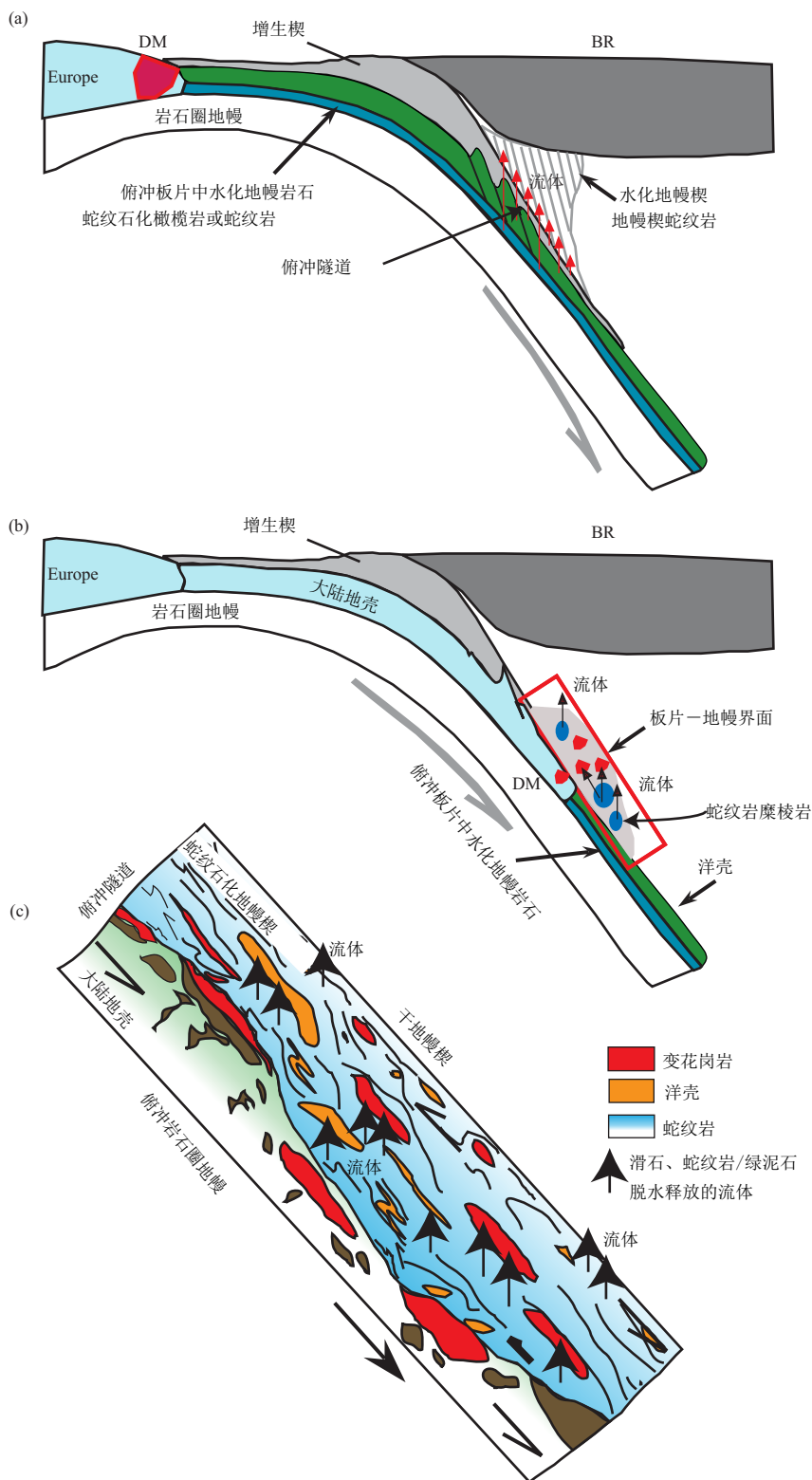


图4 西阿尔卑斯造山带 Dora-Maira (DM)地体白片岩形成过程的构造示意  
Fig.4 The tectonic model for the formation of Dora-Maira whiteschist in the western Alps  
修改自 Chen *et al.*(2016);图中 Europe指欧洲陆块, BR指 Briançonnais 地体



流体 Mg 含量极低,同样很难解释白片岩的高 Mg 含量特征.结合白片岩全岩 Mg 同位素组成及其与  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}$ 、化学风化指数等变量之间的相关关系(图 3),以及地球主要硅酸盐储库的 Mg 同位素组成,Chen *et al.*(2016)提出只有富滑石蛇纹岩变质脱水才可以提供如此重 Mg 同位素的流体.滑石脱水产生的流体富 Mg、贫 Na 和 Ca 以及大离子亲石元素(LILE),因此也能解释白片岩富  $\text{MgO}$ 、贫  $\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}$  和 LILE 的特征.考虑到交代流体具有较低的  $\delta^{18}\text{O}$  值,而洋底低温水化形成的蛇纹岩通常具有高  $\delta^{18}\text{O}$  值,我们提出这种富滑石蛇纹岩应该来自高温地幔楔蛇纹岩.

结合 Dora-Maira 地体变质演化和前人岩石学研究结果,可以进一步限定出滑石变质脱水发生在进变质阶段.考虑到 Dora-Maira 地体为超高压变质大陆地体,这种流体交代作用很可能发生在大陆板片—地幔楔界面的俯冲隧道中.据此 Chen *et al.*(2016)提出了白片岩形成的反向交代模型(图 4).约 45~40 Ma,新特提斯洋壳在西阿尔卑斯俯冲到大陆岩石圈之下,在弧前深度交代地幔楔橄榄岩形成富滑石的蛇纹岩(图 4a).在 40~35 Ma, Dora-Maira 地区的大陆岩石圈在俯冲大洋板片的重力拖曳下发生俯冲(图 4b).这时,地幔楔富滑石蛇纹岩受到俯冲大陆板片刮削进入俯冲隧道,在亚稳定条件下被携带到 >100 km 的弧下深度,在那里发生变质分解,脱水交代俯冲隧道中的变花岗岩(图 4c),形成以镁铝榴石和柯石英为主的超高压变质矿物组合.这个反向交代模型也得到了地震层析成像结果的支持,地震学结果揭示西阿尔卑斯超高压变质岩片之下就是蛇纹石化地幔楔(Liao *et al.*, 2018; Solari *et al.*, 2018).因此,通过查明大陆俯冲隧道中富 Mg 流体的来源,可以揭示地幔楔蛇纹岩来源流体对深俯冲陆壳岩石的反交代作用.正是这种反交代极大改变了陆壳的地球化学组成,使白片岩具有了富 Mg、贫 Na、Fe 和 Ca 以及 LILE 的特征.

### 3 对地幔楔和岛弧岩浆岩 Mg 同位素组成的启示

Chen *et al.*(2016)推测,富滑石的蛇纹岩脱水会释放富 Mg 且具有重 Mg 同位素的流体.如果这个推测得到证实,将对理解地幔楔及弧岩浆岩 Mg 同位素组成具有重要启示.目前研究发现,部分岛弧岩浆具有重 Mg 同位素组成,如小安的列斯岛弧  $\delta^{26}\text{Mg}$  值

为  $-0.25\text{‰}\sim-0.10\text{‰}$  (Teng *et al.*, 2016),菲律宾岛弧为  $-0.19\text{‰}\sim 0.06\text{‰}$  (Li *et al.*, 2017).尽管超高压榴辉岩中高压脉体具有较重的 Mg 同位素组成,  $\delta^{26}\text{Mg}$  值可达  $0.15\text{‰}$  (Huang *et al.*, 2019),考虑到变沉积物或变玄武岩高压下脱水释放的流体 Mg 含量极低,而蛇纹岩脱水产生的流体 Mg 含量较高,弧岩浆岩的重 Mg 同位素组成更可能是弧下深度蛇纹岩脱水造成的(Chen *et al.*, 2016; Huang *et al.*, 2019).蛇纹石  $\delta^{26}\text{Mg}$  值相对较低,其脱水释放的流体可能更富集轻 Mg 同位素(Wang *et al.*, 2019).与此相反,滑石的  $\delta^{26}\text{Mg}$  值相对较高,由滑石脱水产生的流体就可以具有极重的 Mg 同位素组成(Chen *et al.*, 2016).因此,富滑石蛇纹岩或其他富滑石基性岩脱水交代地幔楔就能够形成具有重 Mg 同位素组成的地幔交代岩,由这种交代岩部分熔融可能是形成具有重 Mg 同位素组成弧岩浆岩的主要途径之一.

## 4 结论与展望

我们对西阿尔卑斯造山带 Dora-Maira 地体白片岩的研究揭示,其原岩为 S 型花岗岩,澄清了关于其原岩属性的长期争议.在此基础上,揭示了白片岩独特的地球化学组成是俯冲隧道中俯冲板片—地幔楔界面富滑石蛇纹岩来源流体交代的产物.这些结果不仅为应用 Mg-O 同位素示踪大陆俯冲隧道中不同组分的流体来源(特别是蛇纹岩来源流体)提供了典型范例,而且首次鉴定出地幔楔蛇纹岩脱水流体对深俯冲陆壳的反交代作用.这种反交代可以极大改变深俯冲地壳的地球化学成分,不仅在壳幔物质循环中具有重要意义,而且对理解弧岩浆岩的重 Mg 同位素组成也具有启示意义.

但是,目前仍有诸多关键问题需要解决:(1)不同类型岩石在各种变质温度压力条件下脱水释放流体的元素含量(如 Mg、Fe、C、S 等元素);(2)这些流体的 Mg、Fe 等元素的同位素组成及其与硅酸盐矿物和全岩间的分馏系数;(3)流体在与地幔楔岩石反应过程中的行为和地球化学组成变化.深入探讨这些问题,能使我们进一步理解俯冲带深部的壳幔相互作用过程和机制,深入制约俯冲带物质循环和弧岩浆的形成.

## References

- Bebout, G. E., 2007. Metamorphic Chemical Geodynamics of Subduction Zones. *Earth and Planetary Science Letters*,

- 260(3–4): 373–393. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.05.050>
- Chen, R. X., Li, H. Y., Zheng, Y. F., et al., 2017a. Crust-Mantle Interaction in a Continental Subduction Channel: Evidence from Orogenic Peridotites in North Qaidam, Northern Tibet. *Journal of Petrology*, 58(2): 191–226. <https://doi.org/10.1093/petrology/egx011>
- Chen, Y. X., Schertl, H. P., Zheng, Y. F., et al., 2016. Mg-O Isotopes Trace the Origin of Mg-Rich Fluids in the Deeply Subducted Continental Crust of Western Alps. *Earth and Planetary Science Letters*, 456: 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.09.010>
- Chen, Y. X., Zhou, K., Zheng, Y. F., et al., 2017b. Zircon Geochemical Constraints on the Protolith Nature and Metasomatic Process of the Mg-Rich Whiteschist from the Western Alps. *Chemical Geology*, 467:177–195. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.08.013>
- Chopin, C., 1984. Coesite and Pure Pyrope in High-Grade Blueschists of the Western Alps: A First Record and Some Consequences. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 86(2):107–118.
- Ferrando, S., 2012. Mg-Metasomatism of Metagranitoids from the Alps: Genesis and Possible Tectonic Scenarios. *Terra Nova*, 24(6): 423–436. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2012.01078.x>
- Ferrando, S., Frezzotti, M. L., Petrelli, M., et al., 2009. Metasomatism of Continental Crust during Subduction: The UHP Whiteschists from the Southern Dora-Maira Massif (Italian Western Alps). *Journal of Metamorphic Geology*, 27(9): 739–756. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2009.00837.x>
- Gauthiez-Putallaz, L., Rubatto, D., Hermann, J., 2016. Dating Prograde Fluid Pulses during Subduction by In Situ U-Pb and Oxygen Isotope Analysis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 171(2): 15. <https://doi.org/10.1007/s00410-015-1226-4>
- Huang, J., Guo, S., Jin, Q. Z., et al., 2019. Iron and Magnesium Isotopic Compositions of Subduction-Zone Fluids and Implications for Arc Volcanism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.06.020>
- Li, S. G., Yang, W., Ke, S., et al., 2017. Deep Carbon Cycles Constrained by a Large-Scale Mantle Mg Isotope Anomaly in Eastern China. *National Science Review*, 4(1): 111–120. <https://doi.org/10.1093/nsr/nww070>
- Liao, J., Malusà, M. G., Zhao, L., et al., 2018. Divergent Plate Motion Drives Rapid Exhumation of (Ultra) High Pressure Rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 491: 67–80. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.03.024>
- Schertl, H. P., Schreyer, W., 2008. Geochemistry of Coesite-Bearing “Pyrope Quartzite” and Related Rocks from the Dora-Maira Massif, Western Alps. *European Journal of Mineralogy*, 20(5): 791–809. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2008/0020-1862>
- Solarino, S., Malusà, M. G., Eva, E., et al., 2018. Mantle Wedge Exhumation beneath the Dora-Maira (U) HP Dome Unravelling by Local Earthquake Tomography (Western Alps). *Lithos*, 296–299:623–636. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.11.035>
- Teng, F. Z., 2017. Magnesium Isotope Geochemistry. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 82(1):219–287. <https://doi.org/10.2138/rmg.2017.82.7>
- Teng, F. Z., Hu, Y., Chauvel, C., 2016. Magnesium Isotope Geochemistry in Arc Volcanism. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(26):7082–7087. <https://doi.org/10.1073/pnas.1518456113>
- Wang, W. Z., Zhou, C., Liu, Y., et al., 2019. Equilibrium Mg Isotope Fractionation among Aqueous Mg<sup>2+</sup>, Carbonates, Brucite and Lizardite: Insights from First-Principles Molecular Dynamics Simulations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 250:117–129. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.01.042>
- Zheng, Y. F., 2012. Metamorphic Chemical Geodynamics in Continental Subduction Zones. *Chemical Geology*, 328: 5–48. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.02.005>
- Zheng, Y. F., 2019. Subduction Zone Geochemistry. *Geoscience Frontiers*, 10(4):1223–1254.
- Zheng, Y. F., Chen, Y. X., 2016. Continental versus Oceanic Subduction Zones. *National Science Review*, 3(4):495–519. <https://doi.org/10.1093/nsr/nww049>
- Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., Chen, Y. X., 2013. Continental Subduction Channel Processes: Plate Interface Interaction during Continental Collision. *Chinese Science Bulletin*, 58(35):4371–4377. <https://doi.org/10.1007/s11434-013-6066-x>