

# 莱芜-淄博地区高镁闪长岩成矿作用研究

蓝廷广, 陈应华, 王洪, 唐燕文

(中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

高镁安山岩(侵入相高镁闪长岩)的发育通常代表了强烈的壳幔相互作用过程,特别是洋壳/陆壳对岩石圈地幔的交代过程,因此对岩石圈演化具有重要指示意义。华北克拉通东部鲁西地区发育有大量早白垩世高镁闪长岩及相关矽卡岩铁矿,前人对这些高镁闪长岩的岩石成因进行了深入研究,提出了拆沉/俯冲交代地幔部分熔融以及壳幔岩浆混合等成因模型(Xu et al., 2008; Yang et al., 2012; Chen et al., 2013),对相关矿床也开展了成矿年代、矿床地质、成矿过程等研究,但对高镁闪长岩是如何成矿的却少有涉及。成矿与不成矿到底受控于物质来源、结晶分异或同化混染过程还是受控于侵位深度、温度、氧逸度等物理化学条件?陆内伸展环境(或岩石圈减薄)下的高镁闪长岩与其他环境(如俯冲碰撞环境)的高镁闪长岩相比是否具有独特的控矿因素?为解答上述问题,本研究选择莱芜-淄博地区代表性成矿与不成矿高镁闪长岩体,开展成矿作用的对比研究。

莱芜地区高镁闪长岩以角峪含黑云母二长闪长岩、金牛山二长闪长岩以及矿山含角闪石二长岩为代表,其中金牛山和角峪岩体基本上不成矿或微弱成矿,而矿山岩体强烈成矿,形成了20多个矽卡岩型铁矿床/矿点,Fe资源量超过5亿吨(FeO平均品位45%~50%)。淄博地区高镁闪长岩以金岭岩体为代表的,该岩体为一个面积约70 km<sup>2</sup>的复式杂岩体,岩性从早到晚分别为含黑云母辉石闪长岩、二长闪长岩以及含角闪石英二长岩。围绕该杂岩体形成了10多个矽卡岩铁矿,Fe资源量约2亿吨(FeO平均品位48%~52%),其中侵位最早的含黑云母辉石闪长岩成矿能力最弱,形成的Fe资源量少于2万吨,最晚的含角闪石英二长岩的成矿能力最强,形成的Fe资源量超过1亿吨,而二长闪长岩位于二者之前,形成Fe资源量约0.56亿吨。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年显示,莱芜高镁闪长岩从角峪岩体、金牛山岩体到矿山岩体,成岩年龄依次变年轻,分别为131.0±1.3 Ma、130.1±1.9 Ma和129.3±0.6 Ma,其中金牛山岩体中含较多2433~2585 Ma继承锆石。淄博金岭岩体,从含黑云母辉石闪长岩、二长闪长岩到含角闪石英二长岩,分别为131.6±1.6 Ma、131.3±1.2 Ma和129.7±1.6 Ma,其中含角闪石英二长岩中同样发现较多2389~2524 Ma继承锆石。值得一提的是,两个地区均是侵位最早的岩体成矿能力弱,而最年轻的岩体成矿能力最强,可能暗示了成矿作用与岩浆演化过程(如结晶分异或同化混染)有关。

主量元素显示,按侵位年龄从早到晚,两个地区的高镁闪长岩SiO<sub>2</sub>均有从低到高的演化趋势,如在莱芜地区,从角峪→金牛山→矿山岩体,SiO<sub>2</sub>演化趋势为54.1wt%~56.5wt%→54.4wt%~57.5wt%→57.9wt%~62.2wt%,在淄博地区,从含黑云母辉石闪长岩→二长闪长岩→含角闪石英二长岩,SiO<sub>2</sub>为52.5wt%~55.1wt%→52.9wt%~57.8wt%→63.9wt%~65.0wt%。然而TFeO、MgO以及Mg#=100\*(MgO/40.3)/(MgO/40.3+TFeO/71.8)并没有相应的演化趋势,如莱芜地区,TFeO为6.62wt%~7.67wt%→6.89wt%~7.56wt%→1.82wt%~2.83wt%,MgO为4.48wt%~5.70wt%→6.52wt%~7.72wt%→3.61wt%~5.76wt%,Mg#为51~59→62~65→70~84;淄博地区,TFeO为7.84wt%~9.10wt%→7.14wt%~9.19wt%→1.32wt%~1.91wt%,MgO为7.71wt%~8.53wt%→4.42wt%~5.88wt%→2.41wt%~2.79wt%,Mg#为63~65→52~56→69~79,SiO<sub>2</sub>与TFeO和MgO没有很好的协变关系,表明岩体从基性到中-酸性的变化并不完全由结晶分异控制,晚期的强烈成矿并不是基性岩浆连续演化的结果。成矿最强的岩体SiO<sub>2</sub>含量最高、TFeO、MgO含量最低但Mg#最高,SiO<sub>2</sub>升高以及TFeO、MgO降低,符合结晶分异过程,但也可由酸性的地壳物质混染造成,而Mg#的显著升高,则不可能由地壳物质混染造成,因为地壳物质的混染通常造成Mg#降低。成矿岩体的这种低TFeO和MgO但高Mg#特征,可能指示了一种非常规结晶分异过程或者岩浆-热液过程,造成Fe的强烈析出而Mg相对稳定。微量稀土元素显示,两个地区的岩体在蛛网图以及REE标准化图解上没有显著差别,不同期次的岩体相差不大,均富集大离子亲石

**基金项目:** 国家自然科学基金(批准号:41472079);“深地资源勘查开采”重点专项(任务编号:2016YFC0600105)

**作者简介:** 蓝廷广,男,1983年生,副研究员,主要从事岩浆岩及其成矿作用研究以及流体包裹体LA-ICP-MS分析。E-mail: lantingguang@126.com

元素(如 Rb、Sr、Ba)等,亏损高场强元素(如 Nb、Ta、Zr、Hf、P、Ti),富集轻稀土、亏损重稀土元素、轻重稀土元素分馏较强,具埃达克质特征。总体上莱芜地区的高镁闪长岩 Nb、Ta 含量更高, Zr、Hf 更低,其余相似。

Sr-Nd-Pb 同位素显示,莱芜地区的高镁闪长岩同位素组成较为均匀,没有显著差别,尽管按侵位先后(角峪→金牛山→矿山岩体),Sr 同位素初始比值( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub>略有连续升高的趋势(0.706259~0.706824→0.706994~0.707125→0.707223~0.707507),且最早的角峪岩体具有最低的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-16.0~-15.3)和 Pb 同位素组成( $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=36.306\sim 36.527$ ,  $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=15.205\sim 15.259$ ,  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=16.334\sim 16.609$ ),最晚的矿山岩体具有中等的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-15.8~-14.8)和 Pb 比值( $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=37.001\sim 37.193$ ,  $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=15.312\sim 15.347$ ,  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=16.873\sim 16.986$ ),而金牛山岩体具有最高的( $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-15.1~-14.8)和 Pb 比值( $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=37.195\sim 37.529$ ,  $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=15.405\sim 15.418$ ,  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=17.517\sim 17.597$ )。结合研究区壳幔端元的同位素组成,这些同位素特征暗示上述岩体形成于壳幔岩浆混合,并且具有相似的物质来源,但地壳物质参与程度可能略有不同。淄博高镁闪长岩,侵位最早的含黑云母辉石闪长岩具有最低的( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub>(0.704726~0.704875)、最高的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-6.4~-5.5)和最低的 Pb 同位素比值( $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=37.087\sim 37.115$ ,  $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=15.348\sim 15.353$ ,  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=17.110\sim 17.143$ )。二长闪长岩和含角闪石英二长岩的同位素组成没有显著差别,二长闪长岩的( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub>、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、( $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>i</sub>、( $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>i</sub>和( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>i</sub>分别为 0.705761~0.705974, -6.0~-9.5, 37.317~37.707, 15.367~15.444 和 17.123~17.598,含角闪石英二长岩则为 0.705585~0.706058, -8.2~-7.7, 37.364~38.050, 15.404~15.546 和 17.410~18.302。总体上含角闪石英二长岩具有最高的 Pb 同位素组成。侵位最早、最基性的含黑云母辉石闪长岩可能代表了较为原始的富集地幔部分熔融,而二长闪长岩和含角闪石英二长岩则明显受到地壳物质的混染。对比莱芜和淄博高镁闪长岩,莱芜地区岩体明显具有更多地壳物质参与。

锆石中  $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$  比值(Ballard et al., 2002)及 Ce 异常( $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{D}}$ )(Trail et al., 2012)能够很好地指示岩浆氧化还原状态。分析表明,无论是莱芜还是淄博高镁闪长岩,侵位最晚、成矿最强的岩体具有最高的  $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$  和  $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{D}}$  比值,暗示高氧逸度对成矿与否起了重要的控制作用,Fe 的强烈析出与氧逸度的升高密切相关。该结论同样受到岩体中磁铁矿微量元素支持。磁铁矿中的 V 主要受控于氧逸度,氧逸度越高 V 含量越低( $\text{V}^{3+}$  转变为  $\text{V}^{5+}$ ,磁铁矿中不相容),而 Ti 则主要受控于温度(高于 600°C,磁铁矿和钛磁铁矿通常形成固溶体)(Nadoll et al., 2014)。此外,Sn 在高温磁铁矿中更为富集(Nadoll et al., 2014)。两个地区的高镁闪长岩,均是成矿最强的岩体 Ti、Sn 含量最高而 V 最低, Ti 与 V 以及 Ti 与 Sn 分别成负相关和正相关关系,表明从不成矿到强成矿岩体,氧逸度和温度升高。

上述结果表明,古老地壳物质参与是莱芜和淄博地区高镁闪长岩成矿的基本条件,但不是唯一条件。没有地壳物质参与可能不成矿,但并不是地壳物质参与越多成矿能力越强。成矿与否同时还受氧逸度控制,氧逸度升高是造成岩浆中 Fe 强烈析出的重要因素。一个可能的成因模型是,研究区深部存在较大的基性岩浆房,早期岩浆中地壳物质参与较少,形成偏基性、氧逸度较低的不成矿岩浆。而随着岩浆房结晶分异的进行以及地壳物质的不断参与,岩浆越来越偏酸性并且氧逸度升高,很可能遇到特定的地层导致氧逸度突变,造成 Fe 的强烈析出而成矿。

## 参 考 文 献:

- Ballard J R, Palin J M, Campbell I H. 2002. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: application to porphyry copper deposits of northern Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144: 347-364.
- Nadoll P, Angerer T, Mauk J L, et al. 2014. The chemistry of hydrothermal magnetite: A review. *Ore Geology Reviews* 61: 1-32.
- Trail D, Watson E B, Tailby N D. 2012. Ce and Eu anomalies in zircon as proxies for oxidation state of magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 97, 70-87.
- Xu W L, Hergt J M, Gao S, et al. 2008. Interaction of adakitic melt-peridotite: Implications for the high-Mg# signature of Mesozoic adakitic rocks in the eastern North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 265: 123-137.
- Yang D B, Xu W L, Pei F P, et al. 2012. Spatial extent of the influence of the deeply subducted South China Block on the southeastern North China Block: constraints from Sr-Nd-Pb isotopes in Mesozoic mafic igneous rocks. *Lithos*, 136-139: 246-260.