

鲁西郟山稀土矿石英正长岩 元素地球化学特征及其指示意义*

兰君¹, 付瑞鑫^{2,3}, 张鹏¹, 邢楠¹, 李得建⁴, 王健¹, 徐洪岩¹

1. 山东省地质矿产勘查开发局第五地质大队 / 山东省院士工作站泰安分站, 山东 泰安 271000
2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640
3. 中国科学院大学, 北京 100049
4. 山东微山湖稀土有限公司, 山东 济宁 277600

摘要: 郟山矿床是山东最重要的稀土矿床, 也是除内蒙古白云鄂博和四川牦牛坪以外的第三大稀土矿床。本文对控制该矿床稀土矿化的石英正长岩的元素地球化学特征进行了详细研究, 限定了该岩石的源区特征和形成的构造背景; 并通过与四川牦牛坪稀土矿床石英正长岩的对比, 探讨了该矿床的成矿潜力。研究结果显示, 郟山稀土矿床石英正长岩是典型的橄榄粗安岩系岩石, 它与牦牛坪石英正长岩具有相似的地幔源区特征, 但其地幔源区流体作用的强度/规模不如后者, 这可能是造成郟山稀土矿化规模较小的原因之一。元素地球化学特征还显示, 与超大型牦牛坪稀土矿床的石英正长岩一样, 郟山石英正长岩的地幔源区受到碳酸盐化的影响, 同样具有形成超大型碳酸岩型稀土矿床的潜力。

关键词: 郟山稀土矿床; 石英正长岩; 橄榄粗安岩系岩石; 地幔源区; 华北克拉通破坏

分类号: P597.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2023)03-0047-10

The geochemical feature and its implication of the quartz syenite from the Xishan REE deposit in western Shandong

LAN Jun¹, FU Ruixin^{2,3}, ZHANG Peng¹, XING Nan¹, LI Dejian⁴, WANG Jian¹, XU Hongyan¹

1. Shandong Fifth Institute of Geology and Mineral Exploration, Taian 271000, China
2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
4. Shandong Weishanhu REE Company Limited, Jining 277600, China

Abstract: The Xishan REE deposit is located in the western Shandong Province, which is the third largest REE deposit in China. The deposit is genetically associated with quartz syenite. In this study, we presented detailed geochemical studies on the quartz syenite to constrain its source, geodynamic setting, and metallogenetic potentials. The quartz syenite belongs to the shoshonitic series rocks and might be generated by the partial melting of a carbonate-metasomatized mantle source during the destruction of the North China craton. Compared with the quartz syenite from the Miaoniuping REE deposit in Sichuan Province, the Xishan quartz syenite is less hydrous, which might be one of the rea-

* 收稿日期: 2022-09-10

录用日期: 2022-10-14

网络首发日期: 2023-02-27

基金项目: 山东省地勘基金(鲁勘字[2018]30号, 鲁勘字[2020]32号); 山东地矿局基金(KC202104, KY202207); 国家自然科学基金(41930424)

作者简介: 兰君(1986年生), 男; 研究方向: 稀土矿勘查; E-mail: lanjun56@126.com

通信作者: 张鹏(1980年生), 男; 研究方向: 矿床学; E-mail: zhang_6999@163.com

sons that the Xishan REE deposit has a smaller mineralization scale. Considering that both the mantle sources of the Xishan and Maoniuping REE deposits were carbonate-metasomatized, combined with the carbonatite-related REE mineralization being significant in the Maoniuping REE deposit, it is worth exploring carbonatite-related mineralization in the Xishan REE deposit further.

Key words: Xishan REE deposit; quartz syenite; shoshonitic; carbonate-metasomatized mantle; destruction of the North China craton

郯山矿床是除内蒙古白云鄂博和四川牦牛坪以外的我国第三大轻稀土矿床, 稀土矿化与中生代石英正长岩密切相关, 矿体受NW向和NE向断裂控制并穿插于新太古代片麻岩中(蓝廷广等, 2011)。新近找矿勘探显示, 除了脉状矿化外, 在石英正长岩内还存在浸染状和细脉状矿化, 其储量可能超过了70万t, 郯山稀土矿有望成为一个新的超大型稀土矿床。

前人对郯山稀土矿床形成时代、成矿流体性质和成矿物质来源开展了研究, 蓝廷广等(2011)通过矿脉中白云母Rb-Sr定年, 限定了成矿时间约为120 Ma, 通过矿脉与石英正长岩的Nd同位素对比, 认为成矿物质来源于石英正长岩; 李建康等(2009)基于流体包裹体的研究, 认为该矿床可划分为硅酸盐岩浆期、碳酸岩岩浆-热液过渡期、碳酸岩热液期和金属硫化物低温热液期; Jia & Liu (2019)认为岩浆-热液演化过程对稀土元素富集成矿具有控制作用; Wang et al.(2019)获得氟碳铈矿Th-Pb年龄为129 Ma, 并通过碳酸岩C-O同位素研究认为成矿物质来自地幔。已有的研究显示, 郯山稀土矿是一个典型的碱性岩型稀土矿床(李建康等, 2009; 蓝廷广等, 2011; Wang et al., 2019; Jia & Liu, 2019), 与著名的牦牛坪超大型稀土矿床十分相似(翁强等, 2022)。已往的研究主要聚焦稀土矿床的地质地球化学特征, 但对控制稀土矿化的石英正长岩还缺乏深入研究。本文在岩相学研究的基础上, 对郯山稀土矿床石英正长岩的元素地球化学特征进行了研究, 并与牦牛坪稀土矿床的石英正长岩进行了对比, 旨在约束其源区性质和形成的动力学背景, 探究其成矿潜力。

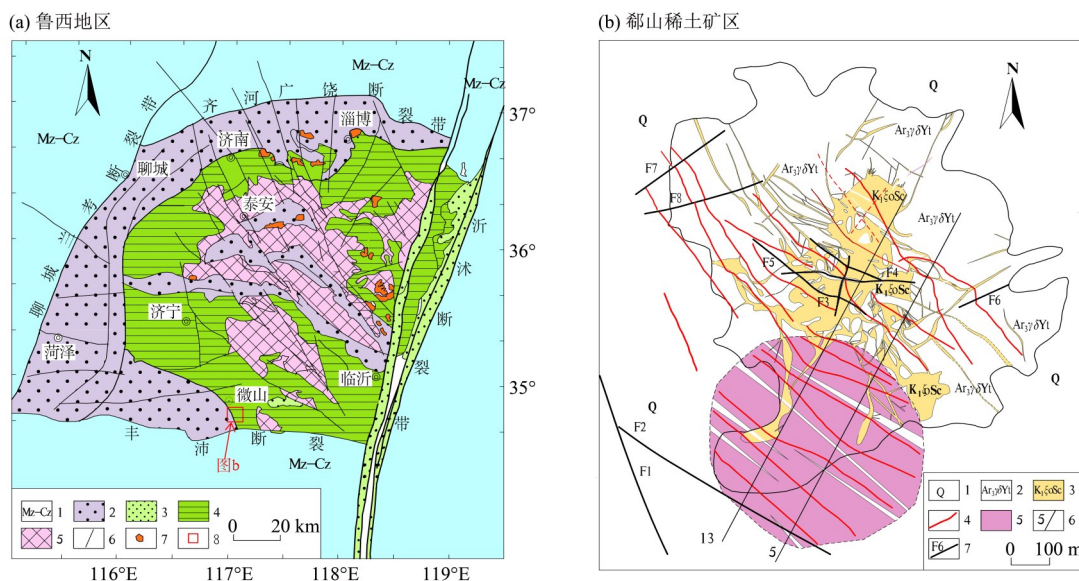
1 区域及矿床地质特征

华北克拉通是我国最古老的克拉通, 由东西两个块体在早元古代沿着中央造山带拼合而成(赵国春等, 2002), 其内分布着大量的太古宙TTG岩石, 它经历了长期较为稳定的克拉通演化, 但其东部地区在中生代以来遭受了强烈的岩石圈减薄,

发生了克拉通破坏(朱日祥等, 2012)。克拉通破坏导致岩石圈地幔发生部分熔融, 并与地壳相互作用, 引起了大规模中生代岩浆活动, 形成了一系列岩浆岩和相关矿床(Li et al., 2014; 孙金凤等, 2013), 特别是形成了巨量的金堆积(朱日祥等, 2015)。鲁西是华北克拉通破坏最强烈的地带之一, 区内发育了一些中生代的碱性岩和碳酸岩, 如早侏罗世铜石碱性杂岩体(Lan et al., 2013), 早白垩世雪野碳酸岩(英基丰等, 2003)、龙宝山和郯山碱性岩杂岩体等(Lan et al., 2011a, 2011b)。在中生代破坏峰期之后, 鲁西的岩浆活动趋于平缓。

郯山稀土矿床位于山东省微山县城东南20km的郯山村, 它产于鲁西地块南部的峰城凸起。区内岩浆活动较为发育, 主要为新太古代、中元古代和中生代的侵入岩, 其中中生代郯山碱性岩杂岩体控制了稀土矿床的形成(图1)。郯山碱性杂岩体主要由石英正长岩、闪长岩、碱性花岗岩、霓辉正长岩和煌斑岩等岩石组成, 以石英正长岩规模最大。郯山石英正长岩呈浅肉红色, 具似斑状结构和块状构造(图2a)。岩相学研究显示, 郯山石英正长岩主要由钾长石(60%~70%)、霓辉石(3%~5%)、石英(10%~15%)、斜长石(5%~10%)和方解石($\geq 5\%$)组成, 含有少量的氟碳铈矿、榍石、锆石和磷灰石等副矿物(图2b)。

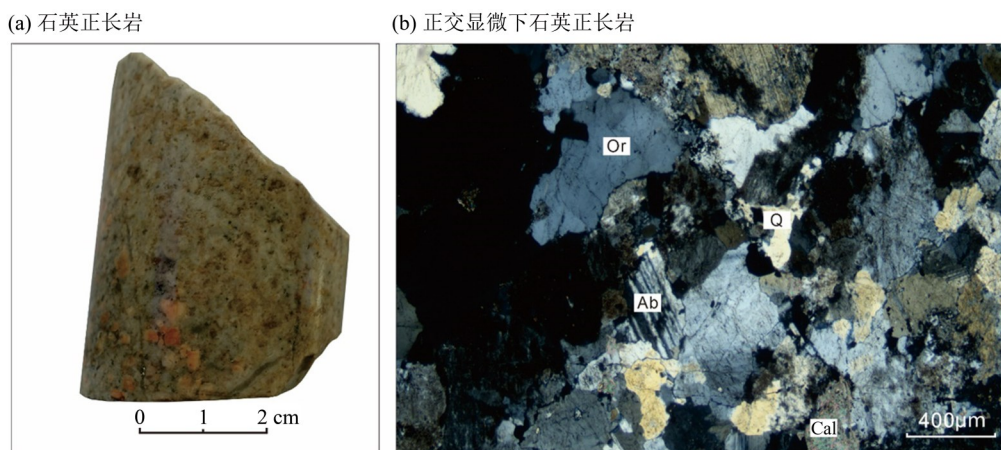
郯山稀土矿床的矿体大致呈118°方向展布, 倾向SW, 倾角40°~60°。已有的勘探工程显示, 郯山稀土矿床的矿体走向最大长度为756 m, 倾向最大延伸为852 m。郯山稀土矿床存在石英重晶石碳酸盐脉型和细脉浸染型两类型稀土矿化, 前者主要分布在石英正长岩与围岩的接触带及附近, 而后者主要分布在石英正长岩体内部。石英重晶石碳酸盐脉型矿体主要由重晶石、碳酸盐(方解石)、石英、萤石和硫化物组成, 矿石矿物主要为氟碳铈矿和氟碳钙铈矿, 该类矿体的稀土氧化物品位介于1.56%~7.46%之间; 细脉浸染型矿体的主体为石英正长岩, 含有萤石、绿泥石和硫化物(黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿和方铅矿)等矿物, 矿



(a) :1-中生代火山-沉积盆地,2-以上古生代为底的断陷沉积盆地, 3-白垩纪断陷盆地, 4-下古生界, 5-前寒武纪基底, 6-断层, 7-中生代侵入岩体, 8-微山郟山稀土矿床;
 (b) :1-第四系, 2-新太古代侵入岩, 3-中生代燕山晚期郟山碱性杂岩体, 4-含稀土石英重晶石碳酸岩脉型矿体, 5-细脉浸染型矿体, 6-勘查线及编号, 7-断层及编号。

图1 鲁西地区地质简图(a) (据金振奎等,1999修改)和郟山稀土矿区地质图(b)

Fig. 1 Geological maps of the western Shandong area (a) and the Xishan REE deposit (b)



Or-正长石, Ab-钠长石, Q-石英, Cal-方解石。

图2 郟山稀土矿床石英正长手标本(a)和显微(b)照片

Fig. 2 Hand specimen image (a) and microscope images (b) of the quartz syenite from the Xishan REE deposit

石矿物也为氟碳铈矿和氟碳钙铈矿, 该类矿体的稀土氧化物品位为0.50%~4.37%, 低于石英重晶石碳酸盐脉型矿体。

2 分析与结果

本文样品采集于山东微山稀土矿区 ZK13-1 钻孔岩芯(图 2a), 全岩主微量元素在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成测试。主量元素利用电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES)分析: 首先对

样品的烧失量(LOI)进行测定, 即称量高温加热前后的样品粉末质量差。然后将烘干后样品粉末与无水偏硼酸锂混合均匀后加热制成玻璃饼, 用王水溶解定容后, 使用 HORIBA 公司 ICP-OES 进行主量元素测定, 检测结果相对误差小于 3%。微量元素在千级超净实验室百级通风橱内完成, 首先用 HNO₃+HF 消解和高压釜加温将样品全部溶解, 稀释后利用 Agilent 7900 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)进行微量元素测定, 使用湿法进样通

过外标+内标(Rh)法对溶液样品中微量元素进行全定量分析,完成测试的微量元素有47种,包括Li, Be, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Cd, In, Sn, Sb, Cs, Ba, REE (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu), Hf, Ta, W, Tl, Pb, Bi, Th, U。所有元素重复扫描次数5次,其精度RSD<5%。郗山石英正长岩的主量

和微量元素分析结果见表1。结果显示,郗山石英正长岩的SiO₂和CaO质量分数(所有主量元素均为氧化物质量分数)分别为64.50%~69.29%和1.53%~2.58%; Al₂O₃、Na₂O和K₂O分别为13.27%~17.30%、3.20%~5.68%(除ZK13-F37外)和4.05%~4.68%(除ZK13-F37外); TiO₂、TFe₂O₃、MgO、MnO和P₂O₅分别为0.11%~0.12%、1.12%~

表1 郗山石英正长岩的主量和微量元素组成¹⁾

Table 1 Major and trace element compositions of the Xishan quartz syenite

| 元素 | ZK13- | | | | | 元素 | ZK13- | | | | |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| | F16 | F18 | F37 | F39 | F47 | | F16 | F18 | F37 | F39 | F47 |
| SiO ₂ | 69.27 | 68.79 | 64.50 | 64.58 | 69.29 | Mo | 2.97 | 29.9 | 41.3 | 1.88 | 78.7 |
| TiO ₂ | 0.16 | 0.11 | 0.12 | 0.20 | 0.20 | Ag | 0.34 | 0.15 | 0.49 | 0.42 | 0.32 |
| Al ₂ O ₃ | 13.50 | 13.27 | 17.30 | 14.08 | 13.55 | Cd | 0.19 | 0.11 | 0.29 | 0.27 | 0.49 |
| TFe ₂ O ₃ | 2.00 | 1.30 | 1.12 | 2.02 | 1.30 | In | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.05 |
| MnO | 0.08 | 0.12 | 0.07 | 0.15 | 0.06 | Sn | 0.80 | 0.48 | 0.77 | 0.86 | 1.32 |
| MgO | 0.40 | 0.53 | 0.45 | 0.40 | 0.21 | Sb | 0.31 | 0.24 | 0.11 | 0.28 | 0.28 |
| CaO | 2.58 | 2.57 | 1.53 | 2.52 | 2.25 | Te | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.05 |
| Na ₂ O | 4.38 | 3.20 | 9.21 | 5.68 | 4.27 | Cs | 0.43 | 0.69 | 0.17 | 0.17 | 0.35 |
| K ₂ O | 4.05 | 4.49 | 2.41 | 4.36 | 4.68 | Ba | 4 498 | 7 372 | 2 482 | 4 714 | 2 195 |
| P ₂ O ₅ | 0.06 | 0.04 | 0.07 | 0.18 | 0.09 | La | 149 | 188 | 124 | 474 | 82 |
| SO ₃ | 0.53 | 0.43 | 0.91 | 1.51 | 0.89 | Ce | 230 | 304 | 191 | 785 | 140 |
| LOI | 2.86 | 3.40 | 1.91 | 3.85 | 2.82 | Pr | 23.5 | 30.8 | 20.3 | 77.7 | 14.7 |
| 合计 | 99.85 | 98.25 | 99.61 | 99.51 | 99.62 | Nd | 71.4 | 90.8 | 61.1 | 239 | 47.4 |
| Li | 10.2 | 5.31 | 149 | 3.10 | 11.7 | Sm | 10.8 | 11.4 | 7.71 | 32.3 | 8.15 |
| Be | 2.57 | 1.91 | 7.25 | 3.35 | 1.70 | Eu | 3.31 | 3.94 | 2.17 | 7.28 | 2.15 |
| B | 3.60 | 6.06 | 1.19 | 2.83 | 2.27 | Gd | 8.39 | 9.20 | 5.87 | 23.0 | 5.81 |
| Sc | 3.09 | 1.64 | 3.01 | 1.21 | 1.87 | Tb | 0.77 | 0.79 | 0.47 | 2.01 | 0.58 |
| V | 23.0 | 18.8 | 30.8 | 21.6 | 21.0 | Dy | 3.30 | 3.31 | 1.85 | 8.05 | 2.54 |
| Cr | 6.52 | 4.60 | 6.00 | 4.02 | 7.00 | Ho | 0.60 | 0.59 | 0.33 | 1.34 | 0.43 |
| Mn | 560 | 903 | 479 | 1103 | 394 | Er | 1.42 | 1.42 | 0.78 | 3.17 | 1.00 |
| Co | 2.29 | 1.66 | 1.26 | 3.31 | 3.69 | Tm | 0.20 | 0.19 | 0.11 | 0.38 | 0.13 |
| Ni | 4.29 | 4.57 | 2.14 | 3.39 | 4.36 | Yb | 1.25 | 1.13 | 0.69 | 2.13 | 0.76 |
| Cu | 19.2 | 8.52 | 13.3 | 8.04 | 16.9 | Lu | 0.18 | 0.15 | 0.10 | 0.28 | 0.11 |
| Zn | 20.8 | 16.7 | 18.3 | 37.4 | 73.1 | Hf | 3.70 | 2.07 | 4.40 | 3.15 | 2.63 |
| Ga | 19.5 | 19.1 | 27.8 | 25.5 | 17.2 | Ta | 0.95 | 0.37 | 1.85 | 2.48 | 0.38 |
| Rb | 99.2 | 122 | 30.6 | 93.5 | 115 | W | 3.51 | 2.82 | 0.63 | 2.44 | 3.87 |
| Sr | 1 544 | 2 121 | 3 593 | 3 719 | 790 | Pb | 13.1 | 6.49 | 13.4 | 6.92 | 8.25 |
| Y | 18.3 | 18.6 | 9.88 | 41.0 | 13.1 | Bi | 0.19 | 0.34 | 0.19 | 0.26 | 0.40 |
| Zr | 186 | 83.0 | 261 | 197 | 105 | Th | 45.3 | 11.6 | 24.5 | 53.7 | 5.98 |
| Nb | 54.0 | 19.9 | 47.5 | 87.0 | 36.2 | U | 10.3 | 1.96 | 15.9 | 12.5 | 12.0 |

1) 主量元素氧化物w/%, 微量元素w/10⁻⁶。

2.02%、0.21%~0.53%、0.06%~0.15%和0.04%~0.18%。与牦牛坪石英正长岩对比, 郟山石英正长岩的SiO₂和CaO总体上高于牦牛坪稀土矿石英正长岩(61.80%~65.55%和0.30%~2.39%); Al₂O₃、Na₂O和K₂O则低于牦牛坪稀土矿石英正长岩(16.28%~19.64%、4.88%~7.28%和5.80%~7.11%); TiO₂、TFe₂O₃、MgO、MnO和P₂O₅与牦牛坪石英正长岩的相应含量相近(翁强, 2022)。

郟山石英正长岩过渡元素Cr、Ni、Co和V的质量分数相对较低, 分别为 4.02×10^{-6} ~ 5.99×10^{-6} 、 2.14×10^{-6} ~ 4.57×10^{-6} 、 1.26×10^{-6} ~ 3.69×10^{-6} 和 18.8×10^{-6} ~ 30.8×10^{-6} ; 大离子亲石元素Rb、Sr和Ba分别为 30.6×10^{-6} ~ 115×10^{-6} 、 790×10^{-6} ~ 3719×10^{-6} 和 2195×10^{-6} ~ 7372×10^{-6} , 明显低于牦牛坪石英正长岩(其相应元素分别为 121×10^{-6} ~ 204×10^{-6} 、 6138×10^{-6} ~ 11865×10^{-6} 和 4105×10^{-6} ~ 9660×10^{-6}); 高场强元素Zr、Hf、Nb和Ta分别为 83.0×10^{-6} ~ 201×10^{-6} 、 2.07×10^{-6} ~ 3.70×10^{-6} 、 19.9×10^{-6} ~ 87.0×10^{-6} 和 0.37×10^{-6} ~ 2.48×10^{-6} , 其中Zr、Hf和Ta与牦牛坪石英正长岩相当(后者分别为 96.0×10^{-6} ~ 342×10^{-6} 、 2.50×10^{-6} ~ 12.8×10^{-6} 和 0.76×10^{-6} ~ 1.08×10^{-6}), 而Nb明显高于后者(5.09×10^{-6} ~ 26.7×10^{-6})。郟山石英正长岩稀土元素总量为 305×10^{-6} ~ 1655×10^{-6} , 总体上低于牦牛坪石英正长岩(723×10^{-6} ~ 1543×10^{-6}), 但两者Y相近, 分别为 9.88×10^{-6} ~ 41.0×10^{-6} 和 5.90×10^{-6} ~ 41.9×10^{-6} 。

3 讨论

3.1 郟山石英正长岩的地球化学属性

Altherr et al. (2008)研究发现热液蚀变会导致Rb与Ba的解耦。本研究的郟山石英正长岩样品并没有发生明显的Rb和Ba解耦, 且Rb和Ba的含量与K₂O含量呈明显的正相关(表1), 暗示热液蚀变过程对岩石的影响较弱。郟山石英正长岩具有较高的Ce/Pb比值(为14.2~113), 明显高于地壳(上地壳Ce/Pb比值为3.7, 中地壳3.5, 下地壳5, 全地壳3.9)的相应比值(Rudnick & Gao, 2003), 显示地壳混染对该岩石的影响可能较弱。因此, 郟山石英正长岩可能没有受到明显的后期热液蚀变和地壳混染的影响。

在TAS图解中, 郟山石英正长岩的投点落在石英二长岩-正长岩区(图3a)。在SiO₂-K₂O图解中, 除ZK13-F37样品外, 其他样品落在橄榄安粗岩区域内(图3b), 显示其具有橄榄安粗岩的特征。

与郟山石英正长岩有所不同, 由于牦牛坪石英正长岩具有较高的K₂O含量, 除少数投点落在橄榄安粗岩区域内, 大部分则落在钾质碱性岩区域内(图3b)。在Na₂O-K₂O图解中, 郟山石英正长岩(除ZK13-F37样品外)与牦牛坪石英正长岩一样, 其投点均落在橄榄安粗岩的区域内, 显示出橄榄安粗岩的特征(图3c)。在Ta/Yb-Ce/Yb图解中, 郟山石英正长岩(除ZK13-F37样品外)与牦牛坪石英正长岩一样, 其投点也均落在橄榄安粗岩的区域内(图3d)。郟山石英正长岩的元素地球化学特征显示, 该岩石与牦牛坪石英正长岩均为典型的橄榄安粗岩系岩石。

Nelsen (1992)和Muller & Groves (1992)将橄榄玄粗岩系岩石和超钾质岩统称为钾质火成岩。人们普遍认为钾质火成岩是富集的陆下岩石圈地幔部分熔融的产物, 其地幔源区富含角闪石和金云母等富钾矿物(Prelevic et al., 2009; Conticelli et al., 2009; Altunkaynak, 2007; Peccerillo, 2006)。已有的研究显示, 钾质火成岩是重要的含矿建造, 是铜、金、稀土和铌等金属矿床的赋矿岩石。前人系统地阐释了钾质岩浆岩对浅成低温热液金矿床和斑岩型铜(金)矿床形成的制约(Holliday et al., 2002; Muller, 2002; Sillitoe, 2002)。

3.2 郟山石英正长岩的源区性质

在球粒陨石标准化的稀土元素配分模式图中, 郟山石英正长岩富集轻稀土元素、亏损重稀土元素, 轻重稀土分馏较强, 无明显的Eu异常, 与牦牛坪石英正长岩的稀土元素配分模式非常一致(图4a)。原始地幔标准化的微量元素蛛网图显示, 郟山石英正长岩除了U和Pb富集程度明显偏低外, 其他元素分布特征与牦牛坪石英正长岩一致, 它们均富集K、Rb、Sr、Ba等大离子亲石元素和轻稀土元素, 但明显亏损高场元素(图4b), 与牦牛坪石英正长岩可能具有相似的源区(翁强, 2022)。基于已有的同位素研究资料(蓝廷广等, 2011), 本文认为郟山石英正长岩是富集地幔部分熔融的产物。

在TiO₂-Na₂O+K₂O判别图解中, 郟山和牦牛坪石英正长岩的投影点均落在碳酸岩化地幔的区域内(图5a), 暗示地幔源区发生了碳酸盐化(Zeng et al., 2010)。此外, 郟山矿床的石英正长岩具有较低的Ti/Eu(160~560)和相对较高的(La/Yb)_N(77~160)的比值, 与牦牛坪石英正长岩十分相似(Ti/Eu < 1000, (La/Yb)_N > 50; 翁强, 2022), 这也暗示其源

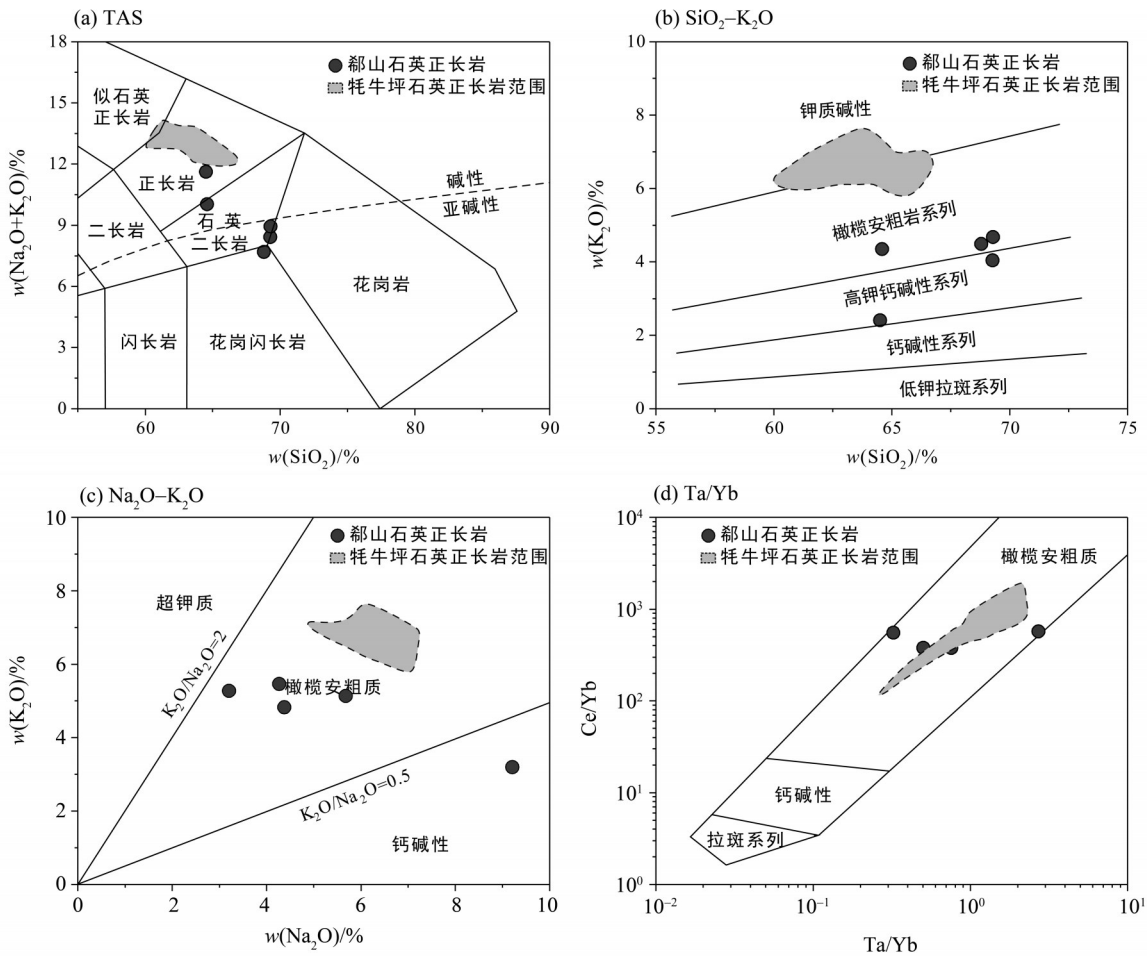


图 3 祁山石英正长岩地球化学分类图

(Le Maitre et al.,2002;Peccerillo and Taylor, 1976;Turner et al,1996;Muller and Groves, 1992)

Fig. 3 The TAS, SiO₂ vs. K₂O, Na₂O vs. K₂O and Ta/Yb vs. Ce/Yb diagrams of Xishan quartz syenite

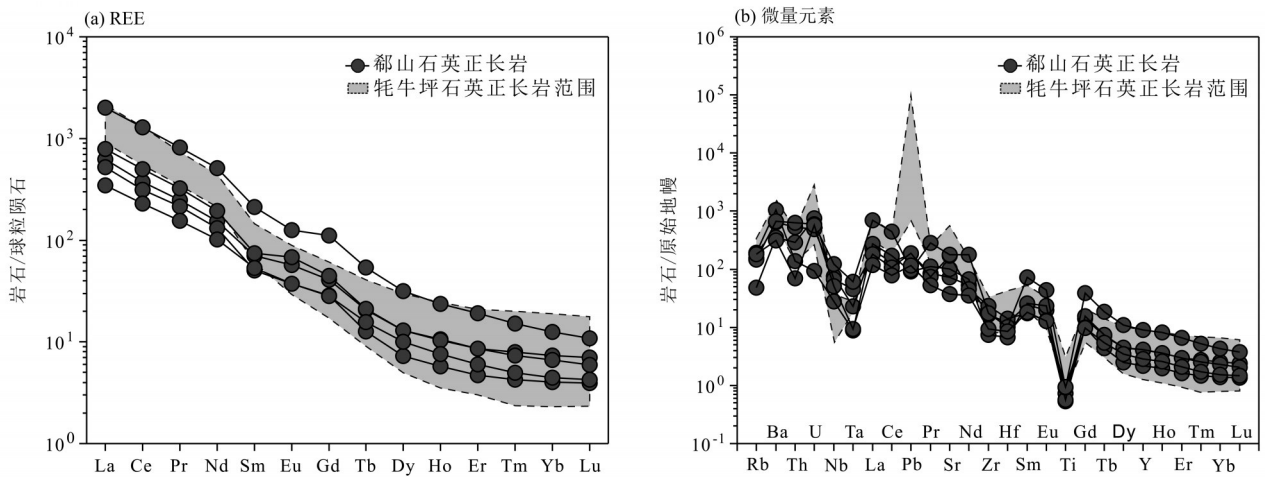


图 4 祁山石英正长岩的稀土分布模式图(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig. 4 REE distribution patterns (a) and trace element spider diagrams (b) for the Xishan quartz syenite

区经历了碳酸质熔体/流体的交代(Zheng et al., 2001;Yang et al.,2014)。矿床地质研究表明, 牦牛坪稀土矿床不但存在碱性岩型稀土矿化, 还存在

着碳酸岩型稀土矿化, 且后者是重要的高品位矿体。基于地球化学特征的一致性, 有理由推测碳酸化对祁山稀土矿床的形成具有重要的影响, 因

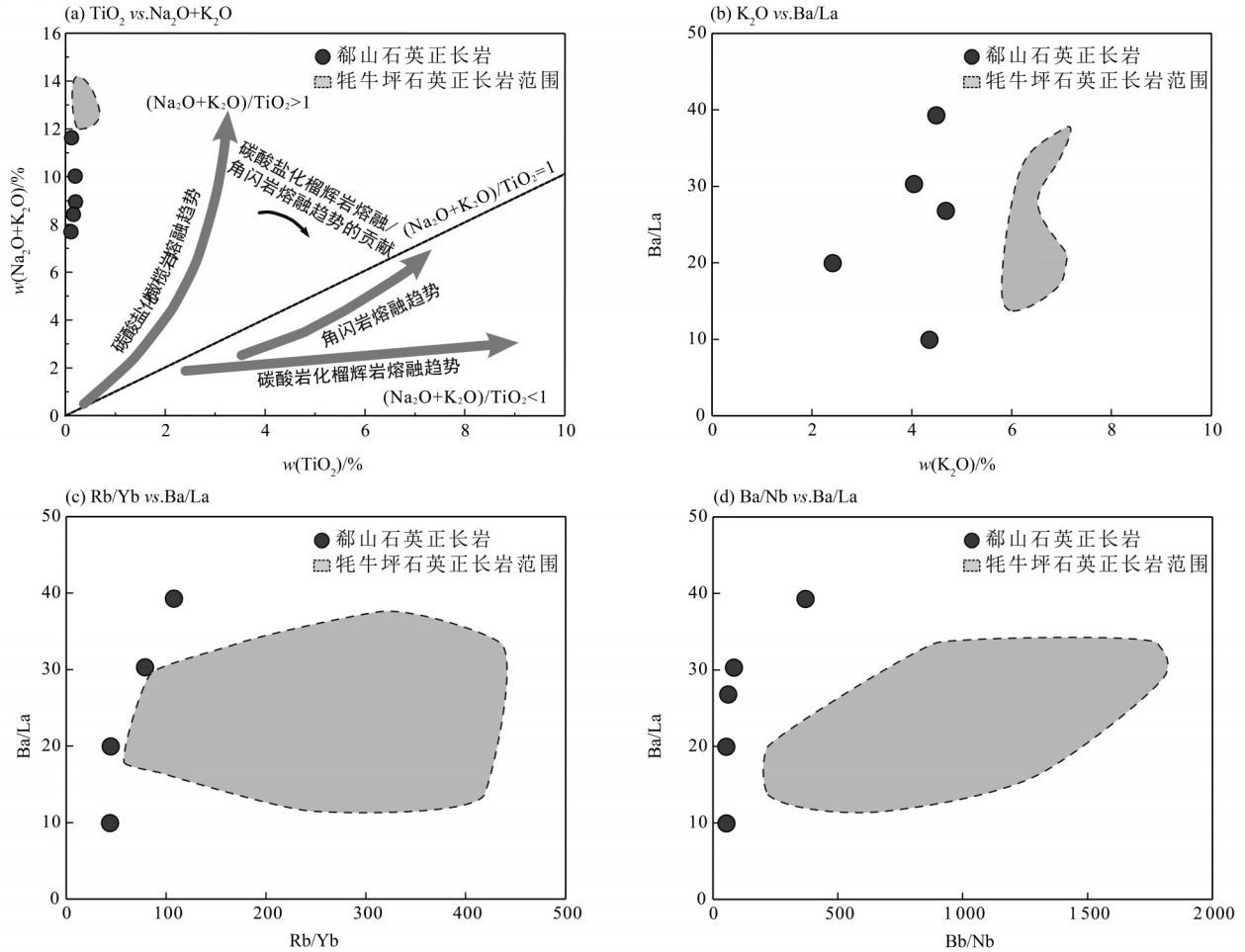


图5 祁山石英正长岩的 TiO_2 vs. $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (据Zeng et al., 2010)、 K_2O vs. Ba/La 、 Rb/Yb vs. Ba/La 和 Ba/Nb vs. Ba/La 图解
Fig. 5 (a) TiO_2 vs. $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, (b) K_2O vs. Ba/La , (c) Rb/Yb vs. Ba/La and (d) Ba/Nb vs. Ba/La diagrams for the Xishan syenite

而寻找碳酸岩型稀土矿体是该矿床未来增储的有效途径之一。

地幔源区含角闪石和金云母的脉体不但制约了钾质岩浆岩的形成, 而且还控制了它的元素地球化学特征, 这主要是由于角闪石与金云母本身具有不同的元素组成。已有的研究显示, 角闪石具有相对较低的Rb和Th含量, 但其K、Sr、Ba、LREE、HFSE等元素含量较高; 而金云母则明显贫REE、HFSE和Th, 但富K、Sr、Ba、Rb等元素 (Ionov et al., 1995; Chazot et al., 1996)。因此, 岩石的K/Rb比值和REE、HFSE等元素的含量可以指示地幔源区含钾和挥发分矿物的种类, 为约束岩石源区组成提供了有效手段。金云母的K/Rb比值=40~400, 一般低于250; 相反, 角闪石和来源于含角闪石源区的熔体的K/Rb比值较高, 一般大于1 100 (Ionov et al., 1995; Chazot et al., 1996)。祁山石英正长岩K/Rb=203~433(主要集中在250以下), 与牦牛坪石英正长岩的K/Rb比值相似(=

149~289; 翁强, 2022), 暗示它们地幔源区含钾和挥发分矿物以金云母为主。Dy/Yb比值也可以有效地限定地幔源区的矿物组成, 如果岩浆部分熔融发生在地幔的石榴子石稳定区, 其熔体的Dy/Yb比值大于2.5; 如果岩浆形成于地幔的尖晶石稳定区, 则熔体的Dy/Yb<1.5 (Jiang et al., 2009)。祁山石英正长岩的Dy/Yb=2.63~3.34, 与牦牛坪石英正长岩的Dy/Yb比值(=2.03~4.44)相似, 暗示岩浆的部分熔融可能发生在石榴子石稳定的地幔区域。由于石榴子石在地幔中稳定存在的深度一般大于80 km, 高Dy/Yb比值暗示其熔融深度>80 km, 可以推测祁山石英正长岩母岩浆的形成深度>80 km。

祁山石英正长岩的Ba/La比值与 K_2O 呈正相关, 牦牛坪石英正长岩也显示出同样的变化特征 (图4b)。已有的地球化学研究显示, 与俯冲作用有关岩浆岩的Ba/La比值可以指示其地幔源区板片物质的输入总量 (Carr et al., 1990; Lin et al., 1990; Leeman et al., 1994; Patino et al., 2000; Jenner et al.,

2009)。对比显示, 郟山石英正长岩的 Ba/La 比值与牦牛坪石英正长岩的 Ba/La 比值变化范围相近, 暗示两者地幔源区板片物质的输入比例相似。郟山与牦牛坪石英正长岩的 Ba/La vs. Rb/Yb 也显示出相似的变化特征(图 5c), 这种相似的地球化学特征也在一定程度上暗示这两类岩浆岩地幔源区的物质组成相似(Jenner et al., 2009)。Cervantes & Wallace(2003)研究认为, 与俯冲作用有关岩浆岩的 Ba/Nb 比值可以指示其地幔源区的流体含量。郟山石英正长岩的 Ba/Nb=52.3~370, 明显低于牦牛坪石英正长岩的 Ba/Nb 比值(216~1 816)(图 5d), 因此可以推测, 郟山与牦牛坪石英正长岩的地幔源区具有相近的物质组成, 但两者的流体含量有明显差别, 后者地幔源区的流体含量明显高于前者, 这可能是导致后者形成超大型稀土矿床的关键控制因素之一。

3.3 郟山石英正长岩形成的构造背景

钾质岩浆岩具有特定的构造指示意义, 被作为地球动力学研究的重要“岩石探针”(Muller et al., 1992; 1997)。Nelson(1992)将钾质火成岩分为造山型和非造山型两类, 造山型钾质火成岩主要分布在岛弧及大陆边缘活动带, 而非造山型钾质火成岩则主要分布在深大断裂和类裂谷带。不同构造背景的钾质火成岩的地球化学特征存在着显

著差异, 因此可以根据岩石的地球化学特征约束其形成的动力学环境。

在 Al_2O_3 - TiO_2 和 Zr-Y 图解中, 郟山和牦牛坪石英正长岩的投点均落在与弧相关的钾质岩浆岩区域内(图 6a 和 b), 表明两者与板内岩浆活动无关, 其形成受俯冲作用的影响, 更可能是其地幔源区的富集受板块俯冲过程制约。翁强等(2022)研究认为, 由于板片携带蚀变洋壳和沉积物形成俯冲熔体/流体的持续交代, 在川西地区下部形成了富含稀土的富集地幔源区; 而印度-亚洲大陆碰撞和青藏高原的快速隆起形成的一系列切壳的深大断裂诱发软流圈物质上涌, 导致这种富集地幔部分熔融形成了牦牛坪石英正长岩的母岩浆。已有的研究显示, 郟山石英正长岩的同位素年龄介于 122~123 Ma 之间(蓝廷广等, 2011; 于学峰等, 2010), 形成于华北克拉通破坏的峰期(吴福元等, 2008)。因此, 有理由认为, 与牦牛坪石英正长岩的形成机制相似, 早期板块的俯冲作用在鲁西地块下部形成了富含稀土的富集地幔, 而华北克拉通破坏诱发的软流圈物质上涌导致富稀土的富集地幔部分熔融形成了郟山石英正长岩的母岩浆。显然, 郟山石英正长岩及其相关的稀土矿化均是华北克拉通破坏的产物。

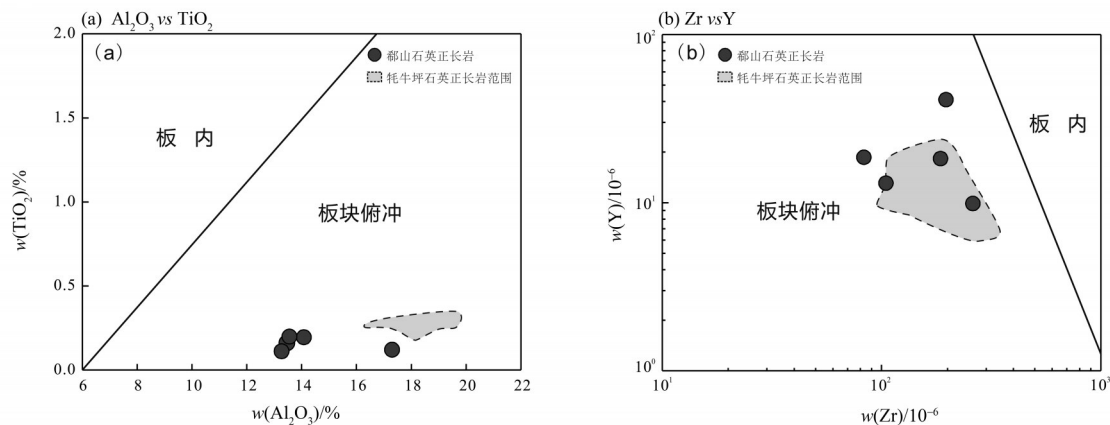


图6 郟山石英正长岩构造环境判别图(据 Muller et al., 1992)

Fig. 6 Discrimination diagrams for the tectonic settings of the Xishan quartz syenite

4 结论

郟山稀土矿床成矿岩体石英正长岩是典型的橄榄粗安岩系岩石, 其地幔源区特征与牦牛坪石英正长岩的地幔源区特征相似, 但它的地幔源区

流体作用强度/规模不如后者, 这可能是造成郟山稀土矿床矿化规模相对小的原因之一。与超大型牦牛坪稀土矿床的石英正长岩一样, 郟山石英正长岩的地幔源区也受到碳酸盐化的影响, 具有形成超大型碳酸岩型稀土矿床的潜力。

参考文献:

- 金振奎, 刘泽容, 石占中, 1999. 鲁西地区断裂构造类型及其形成机制[J]. 石油大学学报(自然科学版), 23(5): 1-5.
- 蓝廷广, 范宏瑞, 胡芳芳, 等, 2011. 山东微山稀土矿床成因: 来自云母 Rb-Sr 年龄、激光 Nd 同位素及流体包裹体的证据. 地球化学, 40(5): 428-442.
- 李建康, 袁忠信, 白鸽, 等, 2009. 山东微山稀土矿床成矿流体的演化及对成矿的制约. 矿物岩石, 29(3): 60-68.
- 孙金凤, 杨进辉, 2013. 华北中生代岩浆作用与去克拉通化. 岩石矿物学杂志, 32(5): 577-592.
- 翁强, 2022. 川西碱性岩-碳酸岩型稀土矿床形成机制[D]. 北京: 中国科学院大学.
- 翁强, 牛贺才, 杨武斌, 等, 2022. 川西碱性岩-碳酸岩型稀土矿床成矿模型[J]. 矿物岩石地球化学通报, 41(3): 465-473+464.
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 等, 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[J]. 岩石学报, 24(6): 1145-1174.
- 英基丰, 周新华, 张宏福, 2003. 碳酸岩岩浆演化的指示性矿物-环带金云母-以山东西部雪野碳酸岩为例[J]. 岩石学报, 19(1): 113-119.
- 于学峰, 唐好生, 韩作振, 等, 2010. 山东郟山-龙宝山地区与碱性岩有关的稀土矿床地质特征及成因[J]. 地质学报, 84(3): 407-417.
- 赵国春, 孙敏, WILDE S A, 2002. 华北克拉通基底构造单元特征及早元古代拼合[J]. 中国科学: 地球科学, 32(7): 538-549.
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等, 2012. 华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 42(8): 1135-1159.
- 朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 等, 2015. 克拉通破坏型金矿床. 中国科学: 地球科学, 45(8): 1153-1168.
- ALTHERR R, TOPUZ G, SIEBEL W, et al, 2008. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of Paleocene plagioclinites from the Eastern Pontides (NE Turkey) [J]. Lithos, 105(1/2): 149-161.
- ALTUNKAYNAK S, 2007. Collision-driven slab breakoff magmatism in northwestern Anatolia, Turkey[J]. J Geol, 115(1): 63-82.
- CARR MJ, FEIGENSON MD, BENNETT EA, 1990. Incompatible element and isotopic evidence for tectonic control of source mixing and melt extraction along the Central-American Arc [J]. Contrib Mineral Petrol, 105(4): 369-380.
- CERVANTES P, WALLACE P J, 2003. Role of H₂O in subduction - zone magmatism: New insights from melt inclusions in high-Mg basalts from central Mexico[J]. Geology, 31(3): 235-238.
- CHAZOT G, MENZIES M A, HARTE B, 1996. Determination of partition coefficients between apatite, clinopyroxene, amphibole, and melt in natural spinel lherzolites from Yemen: implications for wet melting of the lithospheric mantle [J]. Geochimica Cosmochimica Acta 60(3): 423-437.
- CONTICELLI S, MARCHIONNI S, ROSA D, et al, 2009. Shoshonite and sub-alkaline magmas from an ultrapotassic volcano: Sr-Nd-Pb isotope data on the Roccamonfina volcanic rocks, Roman Magmatic Province, Southern Italy[J]. Contrib Mineral Petrol, 157(1): 41-63.
- HOLLIDAY J R, WILSON A J, BLEVIN P L, et al. 2002. Porphyry gold-copper mineralization in the Cadia district, eastern Lachlan Fold Belt, New South Wales, and its relationship to shoshonitic magmatism [J]. Min Dep, 37(1): 100-116.
- IONOV D A, HOFMANN A W, 1995. Nb - Ta-rich mantle amphiboles and micas: Implications for subduction-related metasomatic trace element fractionations [J]. Earth Planet Sci Lett 131(3/4): 341-356.
- JENNER F E, BENNETT V C, NUTMAN A P, et al, 2009. Evidence for subduction at 3.8 Ga: Geochemistry of arc-like metabasalts from the southern edge of the Isua Supracrustal Belt[J]. Chem Geol 261(1/2): 83-98.
- JIA Y H, LIU Y, 2019. REE enrichment during Magmatic - Hydrothermal Processes in Carbonatite - Related REE Deposits: A Case Study of the Weishan REE Deposit, China. Minerals, 10(1): 25.
- JIANG Y H, JIANG S Y, DAI B Z, et al, 2009. Middle to Late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan Province, southeast China: Implications for a continental arc to rifting[J]. Lithos 107(3/4): 185-204.
- LAN T G, FAN H R, SANTOSH M, et al, 2011a. Geochemistry and Sr - Nd - Pb - Hf isotopes of the Mesozoic Dadian alkaline intrusive complex in the Sulu orogenic belt, eastern China: Implications for crust - mantle interaction [J]. Chem Geol, 285(1/2/3/4): 97-114.
- LAN T G, FAN H R, HU F F, et al, 2011b. Multiple crust-mantle interactions for the destruction of the North China Craton: Geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic evidence from the Longbaoshan alkaline complex [J]. Lithos, 122(1/2): 87-106.
- LAN T G, FAN H R, SANTOSH M, et al, 2013. Crust - mantle interaction beneath the Luxi Block, eastern North China Craton: Evidence from coexisting mantle-and

- crust-derived enclaves in a quartz monzonite pluton [J]. *Lithos*, 177: 1–16.
- Le MAITRE R W, STRECKEISEN A, ZANETTIN B, et al, 2002. *Igneous rocks A classification of igneous rocks and glossary of terms* [M]. 2nd ed. Cambridge UK: Cambridge University Press.
- LEEMAN W P, CARR M J, MORRIS J D, 1994. Boron geochemistry of the Central–American Volcanic Arc—constraints on the genesis of subduction–related magmas [J]. *Geochimica Cosmochimica Acta* 58(1): 149–168.
- LI S R, SANTOSH M, 2014. Metallogeny and craton destruction: Records from the North China Craton [J]. *Ore Geol Rev*, 56: 376–414.
- LIN P N, STERN R J, MORRIS J, et al, 1990. Nd- and Sr-isotopic compositions of lavas from the northern Mariana and southern Volcano arcs: Implications for the origin of island melts [J]. *Contributions Mineral Petrol*, 105(4): 381–392.
- MULLER D, 2002. Gold–copper mineralization in alkaline rocks [J]. *Mineralium Deposita*, 37(1): 1–3.
- MULLER D, GROVES D I, 1995. Potassic igneous rocks and associated gold–copper mineralization [M]. Berlin: Springer.
- MULLER D, ROCK N M S, GROVES D I, 1992. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks in different tectonic settings: A pilot study [J]. *Mineral Petrol*, 46(4): 259–289.
- NELSON D R, 1992. Isotopic characteristics of potassic rocks: Evidence for the involvement of subducted sediments in magma genesis [J]. *Lithos*, 28 (3/4/5/6): 403–420.
- PATINO L C, CARR, M J, FEIGENSON M D, 2000. Local and regional variations in Central American arc lavas controlled by variations in subducted sediment input [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 138(3): 265–283.
- PECCERILLO A, MARTINOTTI G, 2006. The Western Mediterranean lamproitic magmatism: Origin and geodynamic significance [J]. *Terra Nova*, 18(2): 109–117.
- PECCERILLO R, TAYLOR, S R, 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J]. *Contr Mineral and Petrol*, 58: 63–81.
- RUDNICK R L, GAO S, 2003. Composition of the continental crust [M]// *Treatise on Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 1–64.
- SILLITOE R H, 2002. Some metallogenic features of gold and copper deposits related to alkaline rocks and consequences for exploration [J]. *Min Dep*, 37(1): 4–13.
- TURNER S, ARNAND N, LIU J, et al, 1996. Post-collision shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and source of ocean island basalts [J]. *J Petrology*, 37(1): 45–71.
- WANG C, LIU J, ZHANG H, et al, 2019. Geochronology and mineralogy of the Weishan carbonatite in Shandong Province, Eastern China [J]. *Geosci Front*, 10(2): 769–785.
- YANG W B, NIU H C, SHAN Q, et al, 2014. Geochemistry of primary–carbonate bearing K-rich igneous rocks in the Awulale Mountains, western Tianshan: Implications for carbon–recycling in subduction zone [J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 143: 143–164.
- ZENG G, CHEN, L H, XU X S, et al, 2010. Carbonated mantle sources for Cenozoic intra–plate alkaline basalts in Shandong, North China [J]. *Chem Geol*, 273 (1/2): 35–45.
- ZHENG J, O'REILLY S Y, GRIFFIN W L, et al, 2001. Relict refractory mantle beneath the eastern North China block: significance for lithosphere evolution [J]. *Lithos*, 57(1): 43–66.

(责任编辑 秦社彩)