

汤庆艳, 张铭杰, 李文渊, 等. 新疆北山二叠纪大型镁铁-超镁铁质岩体的动力学背景及成矿潜力[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 468-481.
Tang Qingyan, Zhang Mingjie, Li Wenyuan, et al. Geodynamic setting and metallogenic potential of Permian large-sized mafic-ultramafic intrusions in Beishan area, Xinjiang, China[J]. Geology in China, 2015, 42(3): 468-481(in Chinese with English abstract).

新疆北山二叠纪大型镁铁-超镁铁质岩体的动力学背景及成矿潜力

汤庆艳¹ 张铭杰¹ 李文渊^{1,2} 余明¹ 张照伟² 汪扬¹

(1. 兰州大学地质科学与矿产资源学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘要:新疆北山地区聚集着坡北、罗东、红石山、漩渦岭和笔架山等众多的二叠纪大型镁铁-超镁铁质杂岩体, 主要由橄榄岩、辉石岩和辉长岩组成, 具有堆晶韵律层, 其形成年龄(260.7~289 Ma)与塔里木大火成岩省年龄接近。岩体橄榄石 Fo 值与 Ni 含量正相关; 与原始地幔相比, 微量元素富集 Rb、Sr 和 Pb, 亏损 Nb、Ta、Ti、Zr 和 Hf; 稀土元素具 LREE 亏损-平坦型球粒陨石标准化配分曲线。岩石 PGE 含量低、具 IPGE 亏损型原始地幔标准化配分型式。Sr-Nd 同位素位于亏损地幔(DM)与 OIB 范围之间, Re-Os 同位素组成与地幔柱岩浆作用形成的 Noril'sk 铜镍硫化物矿床和峨眉山溢流玄武岩重叠。模拟计算表明, 母岩浆 MgO 含量高, 岩浆初始液相线温度及结晶温度高, 岩浆演化过程中经历了分离结晶作用、地壳混染以及早期的硫化物熔离。由此推断北山大型镁铁-超镁铁杂岩体可能是在后碰撞伸展环境叠加地幔柱作用, 诱发软流圈上涌、岩石圈底侵, 导致俯冲流体交代的岩石圈地幔在高温条件下高程度部分熔融形成的, 具有较大的岩浆矿床成矿潜力。

关键词:成矿潜力; 动力学背景; 镁铁-超镁铁质岩体; 二叠纪; 新疆北山

中图分类号: P588.125, P611.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)03-0468-14

Geodynamic setting and metallogenic potential of Permian large-sized mafic-ultramafic intrusions in Beishan area, Xinjiang, China

TANG Qing-yan¹, ZHANG Ming-jie¹, LI Wen-yuan^{1,2}, YU Ming¹,
ZHANG Zhao-wei², WANG Yang¹

(1. School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Permian large-sized mafic-ultramafic complexes such as Pobei, Luodong, Bijiaoshan, Hongshishan and Xuanwoling, are developed as a cluster in Beishan area, Xinjiang. They are mainly composed of peridotite, pyroxenite and gabbro. They have significant cumulate rhythmic layers of magmatic minerals, and are commonly considered to be layered mafic-ultramafic intrusions

收稿日期: 2014-12-05; 改回日期: 2015-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372095, 41472070)、兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(LZUjbyk-2015-64)、中国地质调查局项目(12120114044401)及高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120211110023)联合资助。

作者简介: 汤庆艳, 女, 1986年生, 博士, 地球化学专业; E-mail: tangqy@lzu.edu.cn。

通讯作者: 张铭杰, 男, 1965年生, 教授, 岩石学与矿床学专业; E-mail: mjzhang@lzu.edu.cn。

hosting Ni-Cu sulfide deposits. Their intrusive ages (260.7–289 Ma) are close to the age of the Tarim large igneous province. Beishan layered mafic-ultramafic intrusions show positive correlation between Fo values and Ni content of olivine minerals. Their trace elements are characterized by negative anomalies of high field strength elements (Zr, Hf, Nb, Ta and Ti), and richness of Rb, Sr and Pb in comparison with the primitive mantle (PM). They have LREE-depleted-flat rare earth element (REE) patterns. The rocks display low PGE content and IPGE-depleted PGE primitive mantle normalized distribution patterns. The Sr, Nd isotopes are located between depleted mantle (DM) and OIB ranges, whereas Re-Os isotopic compositions overlap the ranges of mantle plume magmatic Noril'sk Cu-Ni sulfide deposits and Emeishan basalts. Simulated calculations show that the parental magmas of Beishan complexes had high MgO content and high magmatic initial liquidus temperature and crystallization temperature, and underwent fractional crystallization and different degrees of crustal contamination in their evolution process. Parental magma experienced sulfide segregation in the mantle source or during the emplacement, and resulted in depletion of PGE. It is inferred that large-sized mafic-ultramafic complexes in Beishan area were formed by high degree of partial melting of lithospheric mantle modified by subduction fluid at high temperature due to lithosphere delamination and asthenosphere upwelling triggered by a superposed mantle plume in a post-collisional extension tectonic setting, and thus show large metallogenic potentials for the formation of magmatic deposits.

Key words: metallogenic potential; geodynamic setting; mafic-ultramafic intrusions; Permian; Beishan block in Xinjiang

About the first author: TANG Qing-yan, female, born in 1986, Ph.D, lecturer, mainly engages in the study and teaching of ore geochemistry.

About the corresponding author: ZHANG Ming-jie, male, born in 1965; Ph.D, professor, engages in the study of petrology and ore geochemistry; E-mail: mjzhang@lzu.edu.cn.

1 引言

大型镁铁-超镁铁质岩体是地球深部大规模岩浆活动的产物,是认识壳幔演化的理想窗口,同时蕴藏着丰富的矿产资源,如南非Bushveld大型层状镁铁-超镁铁质岩体赋存着超大型铂族元素(PGE)矿床^[1]。新疆北山地区分布着坡北(中坡山)、罗东、笔架山、红石山(穷塔格、蚕虫山)和漩涡岭等数十个二叠纪大型镁铁-超镁铁质杂岩体,岩体规模大,具有堆晶结构和岩浆矿物韵律层等层状岩体特征。已发现坡北和红石山大型铜镍硫化物矿床,以及罗东、笔架山和漩涡岭等铜镍硫化物矿点,使该区成为重要的铜镍岩浆矿床成矿潜力区^[2,3]。

新疆北山大型镁铁-超镁铁质杂岩体聚集区位于塔里木板块东北部的北山裂谷带内,属中亚造山带的南缘部分(图1)。超镁铁质杂岩体沿白地洼—淤泥河深大断裂及红柳河—依格孜塔格断裂分布,呈现多期侵入体复合与同期侵入体岩相分带相叠置的复杂结构。铜镍矿化集中分布于侵入体的特定岩相带。岩体年龄位于260.7~289 Ma^[2-7],同期还发育中基性火山岩和花岗岩^[8,9],与塔里木大火成岩省玄武岩^[10]及超镁铁质岩体年龄^[11,12]接近。

北山镁铁-超镁铁质杂岩体具有Rb、Sr和Pb富

集,Nb、Ta、Ti、Zr和Hf亏损的地球化学特征,Sr和Nd同位素位于亏损地幔(DM)与OIB范围之间,Re-Os同位素变化与西伯利亚大火成岩省Noril'sk铜镍硫化物矿床相似,成岩成矿作用过程中存在明显的壳源物质混染^[2-5,14-18]。对该区岩体形成的构造背景及地幔动力学机制有不同的认识,如岛弧环境^[14,19]、碰撞造山后伸展环境^[4-5,20]及地幔柱作用^[2]。岩石地球化学与同位素组成特征是揭示地幔源区特征、探讨成矿构造背景的重要手段。本文对新疆北山超镁铁质杂岩体地质和岩石地球化学特征进行对比,探讨超镁铁质岩体聚集的地球动力学背景与岩浆铜镍与钛铁矿床的成矿潜力。

2 岩体地质特征

新疆北山镁铁-超镁铁质岩体聚集区位于罗布泊东北缘北山裂谷带的西段(图2)。其中坡北岩体规模巨大,主体为1个辉长岩体,其中分布着20多个同时代的镁铁-超镁铁质岩体,出露面积200 km²;侵位于中元古界长城系白湖群及下石炭统的变质岩中。坡北岩体西端分布有罗东岩体,东北方向依次分布有漩涡岭和笔架山等镁铁-超镁铁质岩体,北部红柳河—依格孜塔格断裂一带分布着穷塔格—红石山等镁铁-超镁铁质岩体(图2)。北山镁

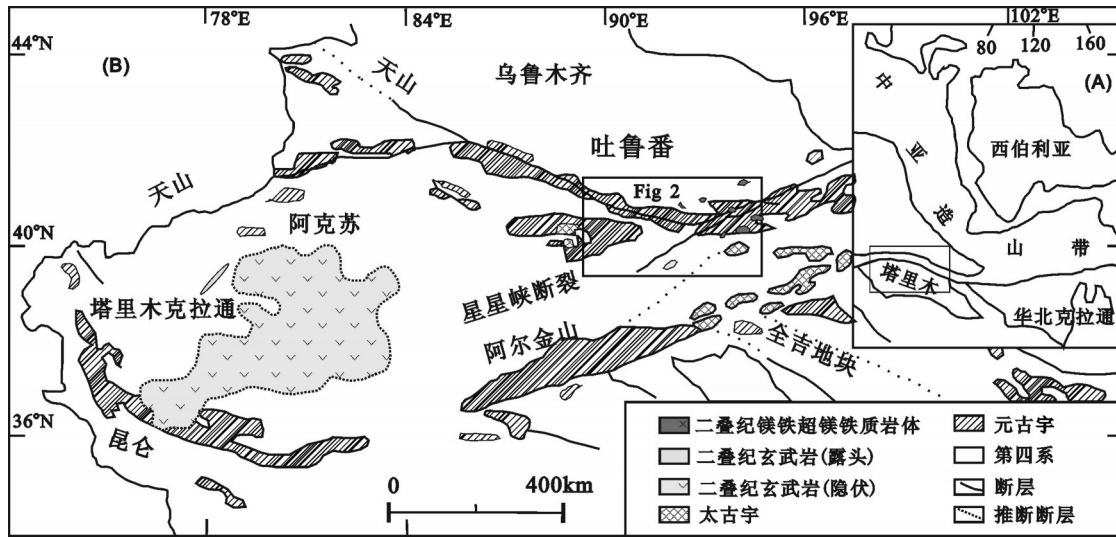


图1 新疆北山镁铁-超镁铁质岩体聚集区构造位置图(据文献[13])

Fig.1 Simplified tectonic-geological map showing the location of the mafic-ultramafic complexes in Beishan area, northern Xinjiang, China (modified after reference [13])

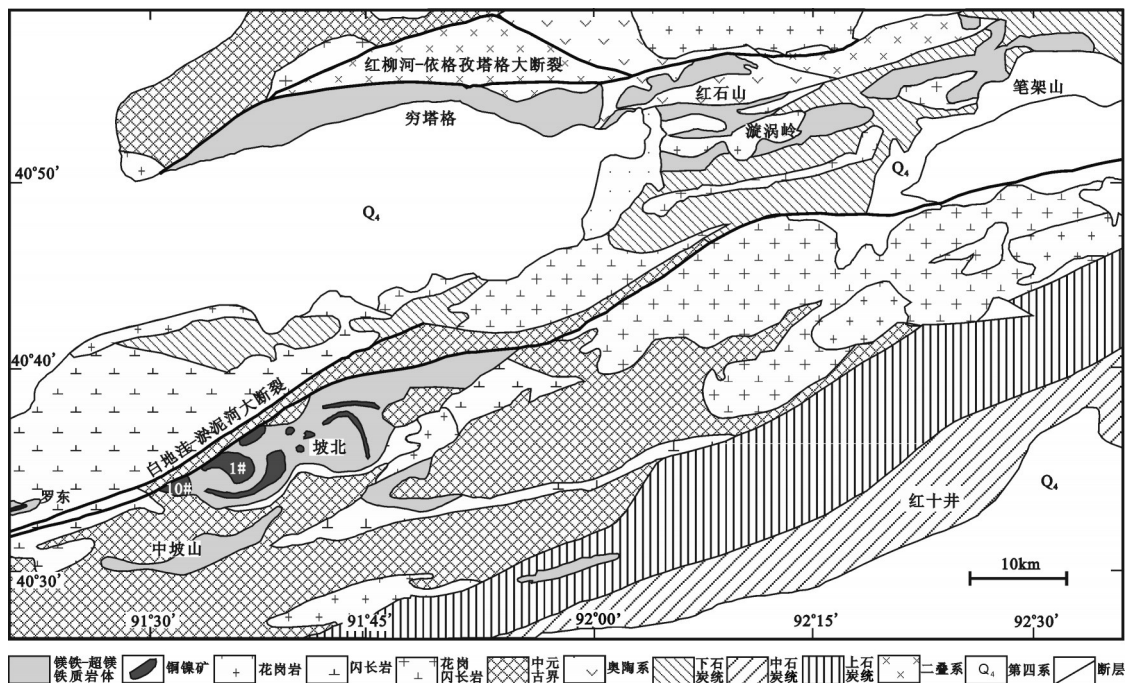


图2 北山地区镁铁-超镁铁质侵入体地质图(据文献[17, 21]修改)

Fig.2 Geological sketch map of mafic-ultramafic complexes in Beishan area, Xinjiang (after references [17, 21])

铁-超镁铁质杂岩体主要由橄榄岩、辉石岩、橄长岩、辉长岩和闪长岩组成,普遍发育堆晶结构和韵律性层理,为玄武质岩浆就地分异结晶形成的完整系列,各岩体的岩石组成略有差别。

2.1 岩石学特征

坡北大型镁铁-超镁铁质岩体因位于中坡山北部而得名,主要由橄榄岩、辉石岩、辉长岩和斜长岩组成,岩石类型间界线明显或渐变,最新钻井资料

显示向下延伸达2400 m并未见底。坡北岩体南部的中坡山岩体也是同期的大型镁铁-超镁铁质岩体,主要由辉长岩、辉石岩、闪长岩及斜长岩组成^[6]。坡北杂岩体中规模较大的坡一和坡十2个超镁铁质岩体(即坡北1号和2号岩体)也是铜镍硫化物含矿较为显著的岩体(图2)。

坡一岩体呈不规则岩盆状。岩体四周流面产状均向内倾斜,向北倾、向东侧伏,岩相分异明显,主要岩相为纯橄岩、橄辉岩、橄辉辉石岩和辉石岩,及少量的橄辉长岩相。岩体四周为中粒浅色橄辉长岩。堆晶结构和韵律性层理发育。各相岩体中赋存有辉长岩脉。在超基性岩相底部及边部赋存了厚大的镍矿体。矿体多呈似层状和透镜状,矿化主要与橄辉岩有关,主要矿石类型为稀疏浸染状,局部见有贯入式富矿体^[22]。

坡十岩体平面呈椭圆形,主要由纯橄岩、单辉橄岩、斜长单辉橄岩、单辉辉石岩、橄辉长岩和辉长岩构成,基性岩相分布于岩体边部,超基性岩相分布于岩体中部,不同岩相在矿物含量上为渐变过渡关系。岩体及矿体均北倾并向东侧伏。矿体主要产于二辉(角闪)橄辉岩中下部或底部,呈弧形或近似盆状产出。矿石以浸染状构造为主,局部可见块状构造。矿石结构主要为自形-半自形粒状,海绵陨铁结构^[14, 23]。

罗东镁铁-超镁铁质杂岩体为漏斗状,呈北东走向,面积2.4 km²。平面形态为眼球状。岩体分异良好,主要由橄辉岩相(纯橄岩、单辉橄岩、斜长橄辉岩和橄辉辉石岩)、辉石岩相(橄辉二辉岩、方辉辉石岩)、橄长岩和辉长岩相(橄辉长岩、辉长岩、苏长辉长岩和淡色辉长岩)组成,辉长岩是杂岩体的主要岩相^[24]。堆晶结构和堆晶韵律发育。

漩涡岭镁铁-超镁铁岩体东西长约4 km,出露面积近5 km²,主要出露辉长岩、橄辉长岩、橄长岩和橄辉岩。辉长岩相占岩体总出露面积的60%左右。橄辉长岩相呈椭圆状零星分布于辉长岩相中,橄长岩相出露于岩体南部橄辉长岩相边缘地带,橄辉岩和橄辉岩相呈条带状、透镜状出露于岩体南部橄长岩相边缘带,岩相之间呈渐变过渡关系^[7]。

笔架山层状镁铁-超镁铁质岩体出露较好,分布于蚕头山一小青山断裂南侧。平面呈椭圆形,出露面积近5 km²。岩体与下石炭统红柳园组变质砂

岩地层呈侵入接触关系。主要由橄辉岩、橄长岩、橄辉长岩和辉长岩组成。辉长岩中有斑点状辉石颗粒聚集呈聚斑出现,个别达粗粒或伟晶状。岩体中斜长石和辉石单矿物水平状纹层及韵律性层理发育,显示出层状岩体特征^[25]。

红石山-穷塔格镁铁-超镁铁质岩体侵位于下石炭统红柳园组大理岩和石英片岩中,多被第四系沉积物覆盖,出露面积2.63 km²。岩体呈北东东向产出^[26]。地表主要出露橄辉岩、橄辉岩和(橄辉)辉长岩,岩相呈渐变过渡关系。红石山岩体由纯橄岩、单斜辉石橄辉岩、橄长岩、辉长岩和闪长岩组成^[27]。穷塔格岩体含有伟晶辉长岩(王恒,2015,个人通讯)。橄辉岩位于岩体中部,周围主要为辉长岩,边部有少量的辉绿岩和闪长岩。岩体自底部到顶部依次出现纯橄岩、橄辉岩、橄长岩和辉长岩。岩体具堆晶结构和堆晶韵律层。单斜辉石橄辉岩、橄长岩相赋存硫化物矿体。

2.2 岩体年龄

新疆岩浆型矿床形成时代的统计表明280~300 Ma是天山及其邻区大规模成矿的峰期。北山地区镁铁-超镁铁质岩体锆石U-Pb定年结果表明为早二叠世岩浆作用产物。北山岩体形成时代大多介于289~274 Ma^[2-6],笔架山、红石山、漩涡岭和罗东岩体年龄介于286~260.7 Ma^[2, 7, 27-28]。

坡十岩体橄辉长岩中锆石SIMS U-Pb年龄有(284.0±2.2) Ma^[2]和(275.5±1.2) Ma^[19],辉长岩锆石SHRIMP U-Pb年龄有(289±13) Ma^[5]、278.0 Ma^[4]和(274±4) Ma^[6],角闪辉长岩锆石TIMS年龄为274.0 Ma^[6]。坡一岩体辉长岩的锆石U-Pb年龄为(278±2) Ma^[3]和(271.0±6.2) Ma^[19]。中坡山岩体辉长岩锆石U-Pb年龄为(274±4) Ma^[6]。

红石山岩体橄辉长岩的锆石U-Pb年龄为(281.2±2.6) Ma^[19],橄长岩和闪长岩锆石的SIMS U-Pb年龄分别为(286.4±2.8) Ma^[27]和(279.7±4.8) Ma^[2]。罗东岩体辉长岩锆石的U-Pb年龄为(284.0±2.3) Ma^[27]和(283.8±1.1) Ma^[19]。笔架山岩体辉长岩锆石的U-Pb年龄为(279.2±2.3) Ma^[2]。漩涡岭岩体辉长岩锆石的U-Pb定年结果为(260.7±2.0) Ma^[7]。

北山镁铁-超镁铁岩体年代学数据表明,在年龄数据误差范围内,与区域上的塔里木大火成岩省玄武岩^[10]及其他中亚造山带晚古生代镁铁-超镁铁

质岩体是同时期岩浆活动的产物,同一岩体内部不同类型岩石的年龄存在差异,表明相关岩浆事件持续时间较长(289~274 Ma)。

2.3 矿物成分特征

北山镁铁质-超镁铁质岩体不同类型岩石主要由橄榄石、辉石和斜长石等矿物组成,主要岩浆矿物橄榄石、单斜辉石和斜长石等的含量在各岩性中呈渐变过渡关系,矿物化学组成显示岩浆分异结晶特征^[23]。矿石矿物有镍黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿和磁铁矿等。

坡北、漩涡岭和罗东岩体中橄榄岩类的橄榄石 Fo 值变化于 87.0~90.0 mol%, Ni 含量变化于 1045.1×10^{-6} ~ 3536.1×10^{-6} 。橄榄岩类中,坡北岩体橄榄石的 Fo 与 Ni 含量相关性不明显,漩涡岭 Fo 与 Ni 含量负相关,罗东岩体 Fo 与 Ni 含量正相关。辉石岩中,坡北和罗东岩体中橄榄石 Fo 和 Ni 含量较橄榄岩类低, Fo 值为 80.3~89.7 mol%; Ni 含量为 786×10^{-6} ~ 2915.4×10^{-6} , Fo 与 Ni 含量正相关(图3)。辉长岩类中,红石山、笔架山和漩涡岭岩体的橄榄石 Fo 和 Ni 含量最低, Fo 值为 68.8~88.9 mol%, Ni 含量变化范围为 157.2×10^{-6} ~ 2357.4×10^{-6} ; 红石山 Fo 与 Ni 相关性不明显,笔架山和漩涡岭 Fo 与 Ni 含量均呈正相关关系。

橄榄石结晶过程中, Ni 为相容元素,坡北和漩

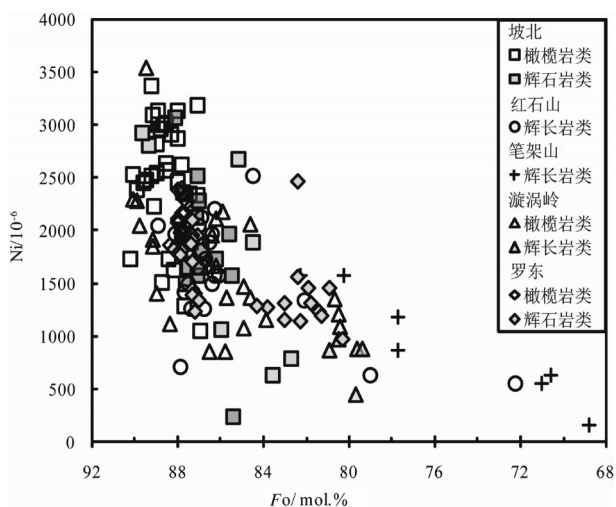


图3 北山镁铁-超镁铁质岩体橄榄石 Ni 与 Fo 图解
(北山岩体的橄榄石数据来自文献[7, 18, 22-24, 29])

Fig.3 Ni contents versus Fo values of the olivine from the mafic-ultramafic complexes in Beishan area, Xinjiang
(data of olivine in Beishan intrusions after references [7, 18, 22-24, 29])

涡岭岩体橄榄岩类以及红石山辉长岩类的橄榄石中 Fo 与 Ni 相关性不明显或呈负相关,表明橄榄石成分明显受间隙残余熔体含量变化的影响,硫化物熔离发生在橄榄石结晶之前。坡北、罗东、笔架山和漩涡岭辉石岩类和辉长岩类中橄榄石 Fo 值与 Ni 含量成正相关,表明橄榄石中 Ni 含量的变化主要受分离结晶作用的控制。

3 岩体地球化学特征

3.1 主量元素

北山镁铁-超镁铁质杂岩体中各类氧化物含量变化范围较大,全岩 MgO 含量变化于 3.4%~48.0%, SiO_2 含量介于 38.8%~54.3%, Al_2O_3 含量介于 0.8%~28.1%,但 MgO 含量在 20%~30% 范围的分析数据稀少,可能是缺少相应岩石类型的样品造成的。

北山镁铁-超镁铁质杂岩体中 MgO 与 SiO_2 、CaO、 Al_2O_3 和 Na_2O+K_2O 含量呈负相关,与 TFe_2O_3 呈正相关关系(图5),表明岩石的化学成分主要受橄榄石、斜方辉石、单斜辉石和斜长石等矿物的控制。 TiO_2 和 MgO 含量的相关性在 MgO > 25% 时呈明显的负相关, MgO < 25% 时呈正相关关系。全岩中 TiO_2 和 TFe_2O_3 变化特征除了与橄榄石、辉石和斜长石有关外,可能还与含 TiO_2 、 TFe_2O_3 较高矿物如铬尖晶石、角闪石、黑云母和磁铁矿等含量变化有关(图4-d、e)。北山岩体在岩浆演化过程中发生了橄榄石、铬尖晶石、辉石和斜长石的分离结晶作用。

3.2 微量元素

北山镁铁-超镁铁质杂岩体中不同类型岩石微量元素原始地幔标准化配分曲线较为相似(图5-a、c),与大陆地壳、Marianas 和 Philippines 岛弧火山岩及阿拉斯加型岩体 Kondyor 岩体相似^[19],与 OIB 和塔里木大火成岩省的玄武岩^[33, 34]与巴楚层状侵入体^[35]明显不同。明显富集 Sr、U 和 Pb, 普遍亏损高场强元素 Zr 和 Hf, 具有明显的 Nb、Ta 和 Ti 负异常。岩体的 Th/Yb 比值(0.1~2.4)和 Nb/Yb 比值(0.03~22.2)与 OIB 相比(分别为 1.9 和 22.2)较低,表明岩浆源区受到俯冲物质改造或地壳物质混染。而红石山岩体 Th/Yb 比值(0.1~0.5)和 Nb/Yb 比值(0.9~3.7)与原始地幔值(分别为 0.2 和 1.5)接近。

北山镁铁-超镁铁质杂岩体稀土元素总量从橄榄岩至辉长岩逐步增高,稀土元素配分曲线近平坦

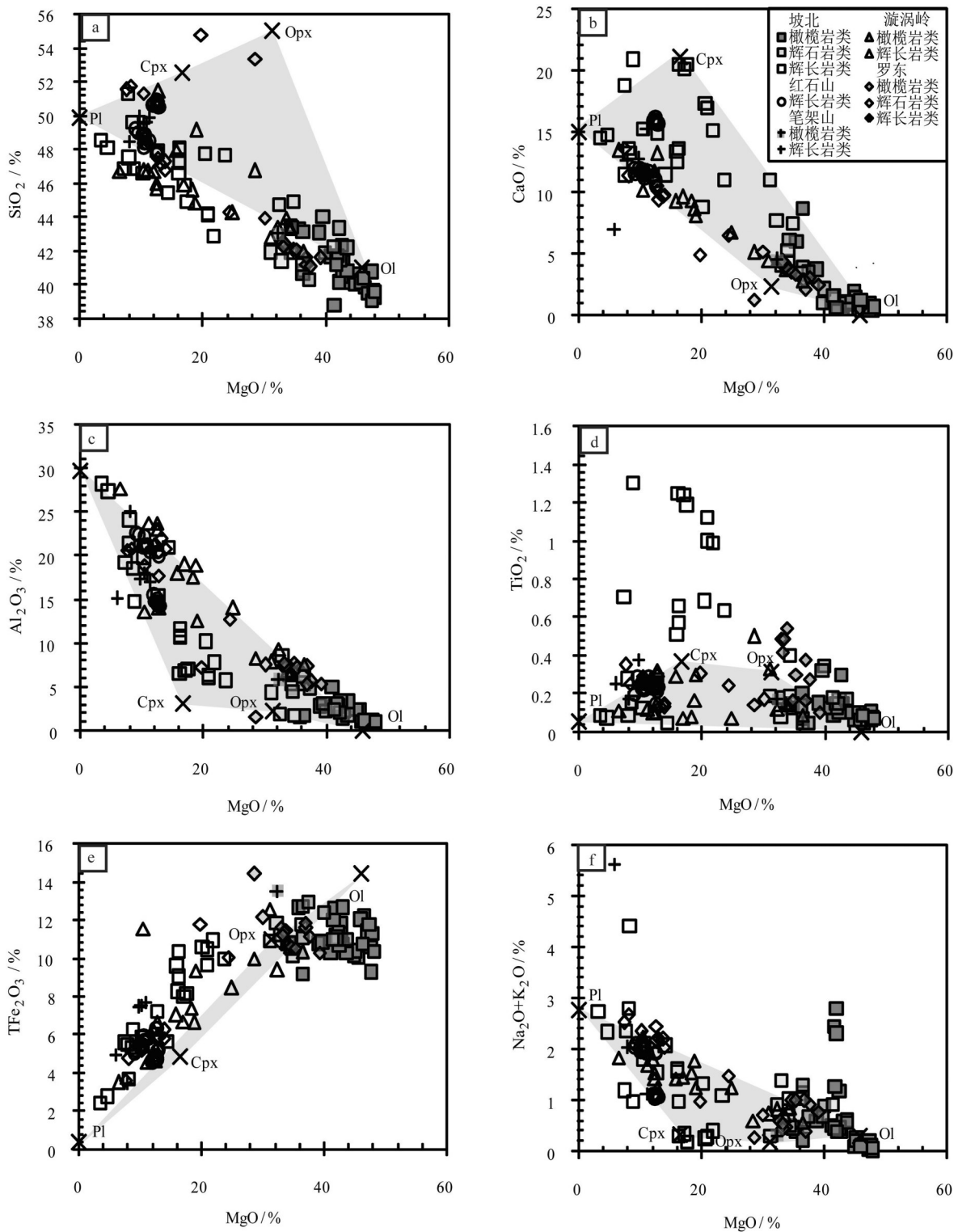


图4 北山镁铁-超镁铁质杂岩体MgO与其他主量元素氧化物含量变化图解

(数据来源:坡北岩体来自文献[17, 21, 22, 30];红石山岩体来自[19];笔架山岩体来自[18];漩涡岭岩体来自[31];罗东岩体来自[32])

Fig.4 Plots of whole-rock major oxide versus MgO contents in the mafic-ultramafic complexes of Beishan area, Xinjiang (data source: Pobei complex after references [17, 21, 22, 30], Hongshishan, Bijiashan, Xuanwoling and Luodong complexes after references [19], [18], [31] and [32], respectively)

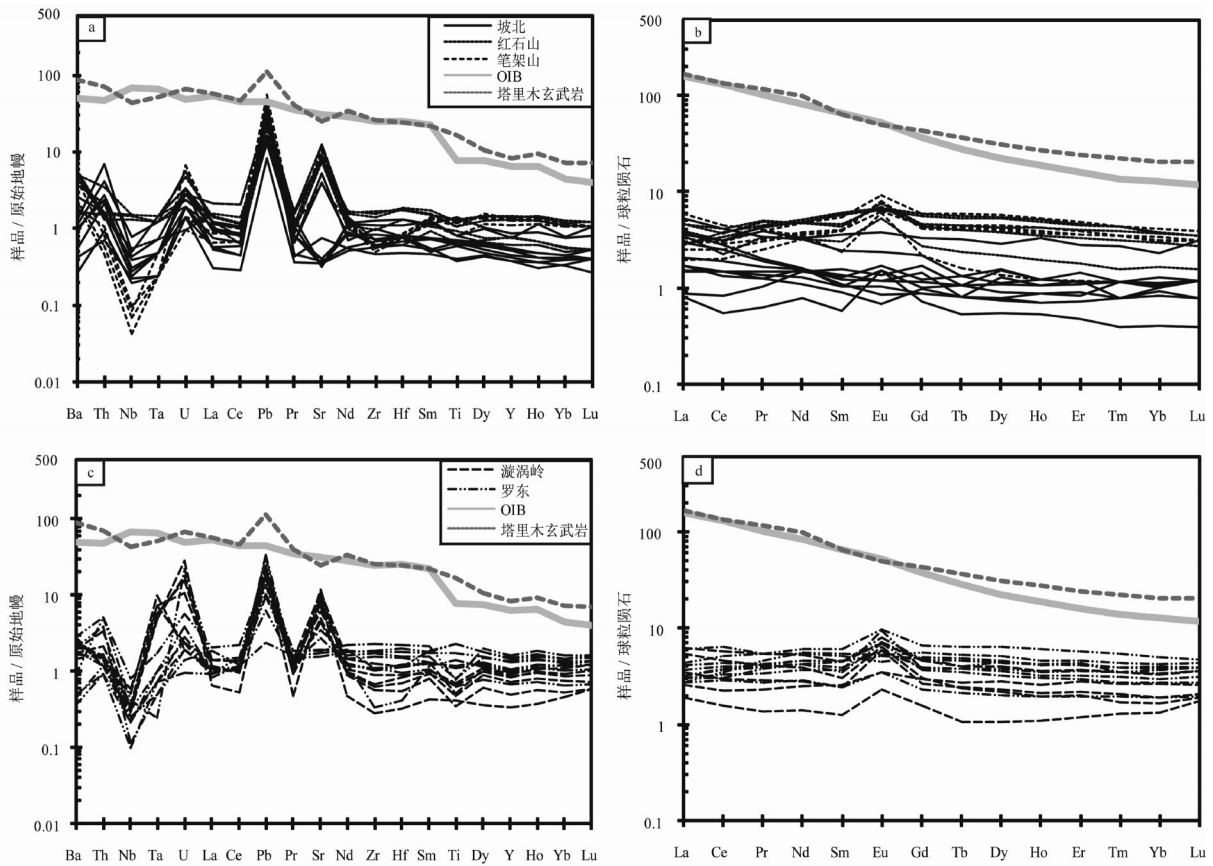


图5 北山镁铁-超镁铁质杂岩体微量元素原始地幔标准化配分模式图(a、c)和稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(b、d) (数据来源:原始地幔来自文献[36],球粒陨石来自文献[37];坡北岩体来自文献[17, 21, 22, 30];红石山、笔架山岩、漩涡岭和罗东岩体分别来自文献[19, 18, 31, 32]。图a和b的图例相同,图c和d的图例相同)

Fig.5 Primitive mantle-normalized alteration-resistant trace element patterns (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of the mafic-ultramafic complexes in Beishan area, Xinjiang

The primitive mantle values after reference [36]. The chondrite values after reference [37]. The compositions of Pobei intrusion after [17, 21, 22, 30], and the data of Hongshishan, Bijiaoshan, Xuanwoling and Luodong intrusions after references [19, 18, 31, 32], respectively

型(图5-b、d),如坡北岩体出现轻稀土元素亏损型配分曲线^[9],与中亚造山带喀拉通克和黄山等铜镍硫化物矿床的超镁铁质杂岩体的轻稀土元素富集型明显不同^[15,16]。(La/Yb)_N比值为0.6~4.7,(La/Sm)_N比值为0.5~3.7,(Gd/Yb)_N比值为0.6~2.1,表明岩浆形成演化过程中稀土元素分馏程度较弱。岩体Eu异常较明显,δEu为0.6~2.9,辉长岩相具有明显的δEu正异常,含斜长石的橄榄岩相也具有弱的δEu正异常。

3.3 PGE和Cu元素特征

北山镁铁-超镁铁质杂岩体不同类型岩石PGE含量相对较低,低于原始地幔的含量(23.5×10^{-9}),硫化物中ΣPGE较高。原始地幔标准化配分型式相似(图6),PPGE(Pt和Pd)和Cu相对富集,IPGE(Ir、Ru和Rh)亏损。个别样品呈现弱的Rh负异常和Ru正

异常。与中亚造山带的喀拉通克、黄山和黄山东等铜镍硫化物矿床赋超镁铁岩中的铂族元素分配型式相似^[15,16]。

PGE元素中地球化学性质差异最大的Pd和Ir元素的比值(Pd/Ir)可表征铂族元素的总体分异特征。坡一、坡十、红石山和罗东岩体Pd/Ir比值较高,分别为10.1~46.5、4.7~17.7、3.2~8.0和9.7~20.7,高于原始地幔的Pd/Ir比值(1.22),与地幔橄榄岩捕虏体未分异的PGE特征明显不同,但是低于热液交代作用相关的硫化物和岩石的Pd/Ir比值(>100),表明北山岩体的PGE特征主要为岩浆作用的结果,热液作用的影响小。PGE经历了岩浆过程的分异,坡一岩体较坡十、红石山和罗东岩体PGE分异更明显。

罗东、坡一、坡十和红石山岩体Ni/Cu比值变化分别为1.0~5.4、1.9~12.2、1.4~2.5和1.4~38.5,Pt/Pd比值

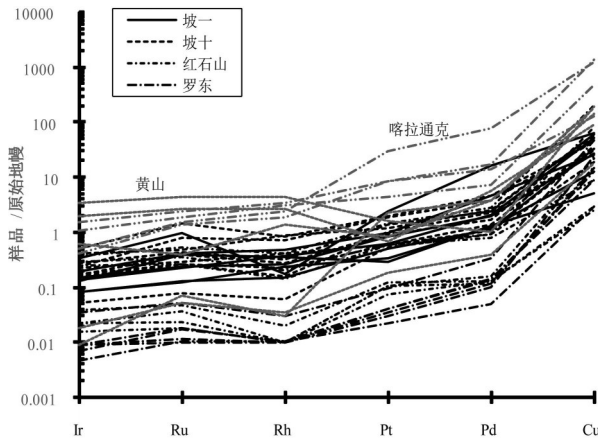


图6 北山镁铁-超镁铁质杂岩体PGE和Cu原始地幔标准化配分模式图

(坡一和坡十岩石数据来自文献[38];红石山、罗东、黄山和喀拉通克数据来自文献[15,16, 26, 39];原始地幔的数据来自文献[40])

Fig.6 Primitive mantle-normalized chalcophile element patterns of the sulfide bearing rocks from mafic-ultramafic complexes in Beishan area, Xinjiang

(The compositions of rocks from Poyi and Poshi after reference [38]; the data of Hongshishan, Luodong, Huangshan and Kalatongke after references [15,16, 26, 39], respectively. The primitive mantle values after reference [40])

分别为0.6~1.0、0.3~0.9、0.9~1.2和1.0~2.1, Cu/Pd比值分别为385000~1547000、24482~180311、72797~217783和73000~1670000, Ir与Ru、Rh、Pt和Pd呈现明显的正相关^[30, 38, 41]。在Pd/Ir-Ni/Cu图解上岩石和硫化物样品全部落入高镁玄武岩的区域^[26, 30, 38, 39, 41]。

3.4 同位素特征

北山镁铁-超镁铁质杂岩体的Sr-Nd同位素组成变化较大, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i变化于0.7034~0.7094, ε_{Nd}为-4.0~8.57, 位于OIB的Sr-Nd同位素范围内, 与塔里木大火成岩省的玄武岩相比, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i比值较低, ε_{Nd}(t)明显较高(图7)。北山杂岩体与中亚造山带铜镍硫化物矿床的ε_{Nd}(284 Ma)和(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i^[30, 38, 41]和塔里木大火成岩省层状侵入体^[35]变化范围一致。

坡一岩体二辉橄榄岩、橄榄辉石岩和辉长岩的(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i=0.7058~0.7059, ε_{Nd}(278 Ma)=2.68~2.82^[4]; 坡十岩体(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i=0.7026~0.7043, ε_{Nd}(284 Ma)值较高, 为4.02~8.57^[5, 14]; 红石山岩体的(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i=0.7035~0.7073, ε_{Nd}(281 Ma)=1.2~7.5^[25]; 笔架山岩体的(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i=0.7036~0.7062, ε_{Nd}(279 Ma)值较高, 为

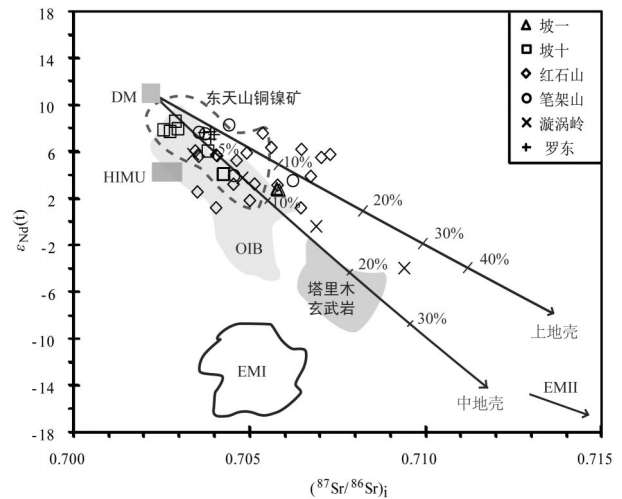


图7 北山镁铁-超镁铁质杂岩体ε_{Nd}(t)与(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i图(数据来源:东天山铜镍矿:[42, 43];塔里木大火成岩省玄武岩:[44];北山:[4, 14, 18, 25, 32])

Fig.7 The diagram of ε_{Nd}(t) versus (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i for mafic-ultramafic complexes in Beishan area, Xinjiang

The data of Ni-Cu-bearing mafic-ultramafic intrusions in Eastern Tianshan Mountains after references [42, 43] and Tarim basalts after reference [44]. Data for Beishan after references [4, 14, 18, 25, 32]

3.5~8.3^[18]; 罗东岩体的(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i变化范围窄, 为0.7037~0.7040, ε_{Nd}(261 Ma)值高, 为7.0~7.7; 漩涡岭与其他岩体相比, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i高(0.7034~0.7094), ε_{Nd}(261 Ma)最低(-4.0~5.8)^[18]。

北山镁铁-超镁铁质杂岩体中Re-Os同位素数据较少。坡北岩体岩石Os含量为0.07×10⁻⁹~5.13×10⁻⁹, Re/Os=1.47~30.74, γ_{Os}(t)=23~339^[38], 硫化物Os含量为72×10⁻⁹~247×10⁻⁹, Re/Os=0.50~2.19, γ_{Os}(t)=54~154^[17]。红石山岩体岩石Os含量为0.10×10⁻⁹~1.59×10⁻⁹, Re/Os=3~11.8, γ_{Os}(t)=18~283^[26]。坡北和红石山岩体Re/Os与Os含量位于地幔柱岩浆作用形成的Noril'sk铜镍硫化物矿床的硫化物范围内; 部分落于地幔熔体、富硫沉积物与峨眉山溢流玄武岩范围内(图8-a)。在γ_{Os}(t)-Os含量图解中, 坡北和红石山岩体的γ_{Os}(t)普遍高于洋岛玄武岩的范围(图8-b), 表明岩浆演化过程中存在富含放射性组分的地壳物质的加入。

北山镁铁-超镁铁质杂岩体的Hf和O同位素组成变化有所不同。锆石的氧同位素δ¹⁸O均较高, 普遍高于地幔值, ε_{Hf}(t)=-6.3~8(图9)。坡北岩体的锆石ε_{Hf}(t)=-0.8~5.3, δ¹⁸O=6.3‰~8.6‰^[27]。红石山岩

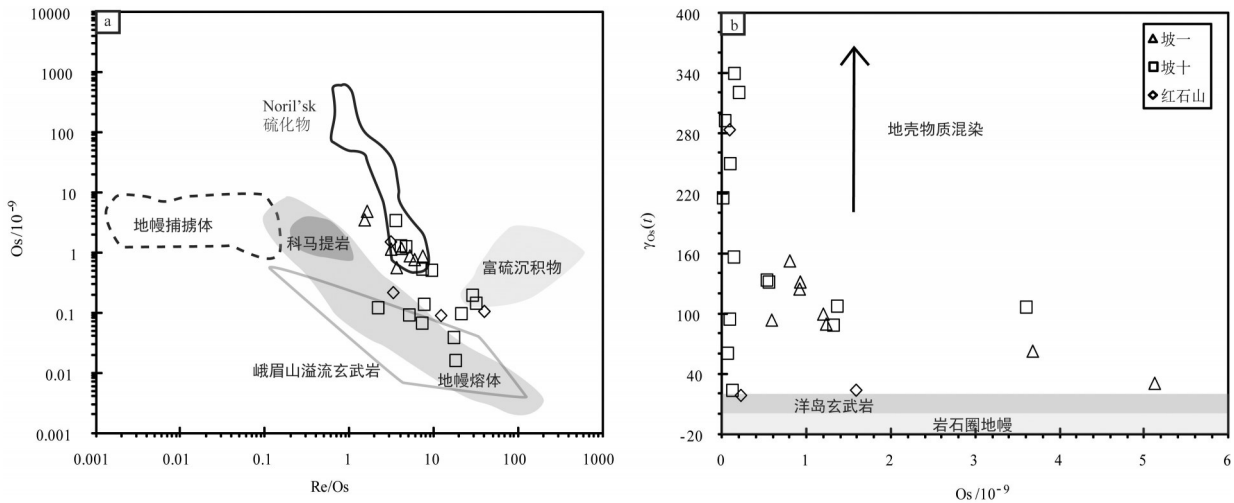


图8 北山镁铁-超镁铁质杂岩体Os含量与Re/Os(a)和 $\gamma_{Os}(t)$ (b)图解
(峨眉山溢流玄武岩:[45, 46];洋岛玄武岩和岩石圈地幔:[47-49];北山岩体:[26, 38];其余数据来自[50])

Fig.8 The diagrams of Os (10^{-9}) versus Re/Os (a) and $\gamma_{Os}(t)$ (b) for mafic-ultramafic complexes in Beishan area, Xinjiang (Data for the Emeishan continental flood basalts after references [45, 46]; and for OIBs (mantle plume and lithospheric mantle after references [47-49]; data for Beishan intrusions after references [26, 38]; Others after references [50])

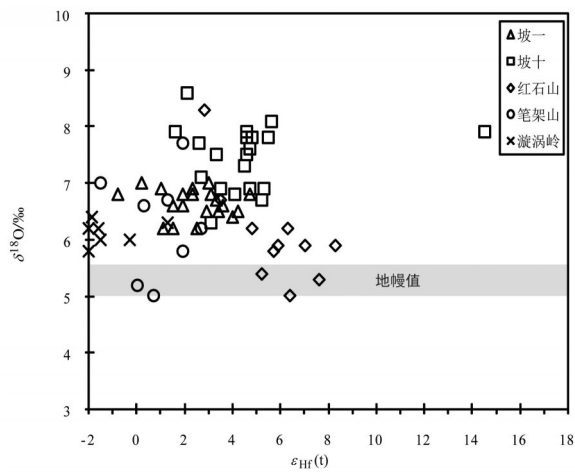


图9 北山镁铁-超镁铁质杂岩体的 $\delta^{18}O$ (‰)和 $\epsilon_{Hf}(t)$ 相关图
(地幔锆石 $\delta^{18}O$ 数据来自[51];其余数据来自[27])

Fig.9 The diagram of $\delta^{18}O$ (‰) versus $\epsilon_{Hf}(t)$ for mafic-ultramafic complexes in Beishan area, Xinjiang (mantle zircon $\delta^{18}O$ after reference [51], and others after reference [27])

体的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值高,为2.8~8.3, $\delta^{18}O=5.0‰\sim 8.3‰$,部分样品位于地幔值范围内;笔架山岩体锆石 $\epsilon_{Hf}(t)=-5.3\sim 2.7$, $\delta^{18}O=5.0‰\sim 11.9‰$;漩涡岭岩体锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值最低,为 $-6.3‰\sim 1.3‰$, $\delta^{18}O$ 变化范围小,为 $5.8‰\sim 6.8‰$ 。

由于上地幔具有均一的氧同位素组成($\delta^{18}O=5.18‰\pm 0.28‰$),而俯冲的低温蚀变洋壳的 $\delta^{18}O$ 值为 $+6‰\sim +12‰$,沉积物的 $\delta^{18}O=12‰\sim 25‰$ 。北山岩体锆石Hf-O同位素特征显示其地幔源区遭受了俯冲流体不同程度的改造作用^[18], $\delta^{18}O$ 从坡北(6.3‰~8.6‰)、红石山(5.0‰~8.3‰)、笔架山(5.0‰~11.9‰)到漩涡岭(5.8‰~6.8‰)依次升高。 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值从红石山(2.8~8.3)、坡北(-0.8~5.3)、笔架山(-5.3~2.7)到漩涡岭(-6.3~1.3)依次降低。坡北和笔架山岩体遭受的俯冲作用最强,漩涡岭较弱,红石山最弱。坡一岩体硫化物 $\delta^{34}S_{V-CDT}$ 变化范围较小,为 $-2.0‰\sim -0.3‰$,表明硫来自于幔源岩浆^[17,41]。可见母岩浆中显著的同化混染物中贫硫,外来硫的加入较低。

4 岩浆作用与硫化物熔离控制因素

4.1 成矿母岩浆及其演化

北山镁铁-超镁铁质杂岩体Sr-Nd同位素组成表明母岩浆应源自亏损的地幔源区^[6],稀土元素分馏弱,表明岩浆生成于尖晶石稳定域的地幔源区。由于石榴石强烈富集重稀土元素,石榴石稳定域地幔的部分熔融、且有石榴石残留相时所生成的岩浆具有稀土元素强烈分馏的地球化学特征。尖晶石

稳定地幔的部分熔融所生成岩浆的稀土元素受多种矿物相的共同制约,往往具有弱分馏的稀土元素地球化学特征^[52]。坡北岩体中坡一和坡十等超镁铁质岩体与被侵入的辉长岩具有一致的微量元素和同位素组成^[4],表明为同源岩浆不同期次侵入形成的,其岩浆规模巨大。

北山镁铁-超镁铁质杂岩体附近没有找到与之相对应的喷出岩及母岩浆侵位时形成的冷凝边用于直接确定母岩浆中各组分的含量。根据橄榄石-熔体平衡原理和质量平衡原理,采用橄榄石最高 Fo 值计算母岩浆组成,坡一和坡十岩体母岩浆的 MgO 含量分别为12.4%^[41]和12.7%^[31],红石山、罗东和漩涡岭岩体母岩浆的 MgO 含量分别为11.89%^[26]、14.7%^[32]和14.0%^[31];应为高镁的玄武质或苦橄质岩浆,其 MgO 含量高于邻区中亚造山带铜镍硫化物矿床母岩浆的 MgO 含量^[15,16]。

北山镁铁-超镁铁质杂岩体PGE特征表明其含量和配分型式受控于岩浆过程。地幔部分熔融过程中, Os 、 Ir 、 Ru 和 Ni 是相容元素,而 Rh 、 Pt 、 Pd 和 Cu 是不相容元素,地幔不同程度的部分熔融形成岩浆的 Pd/Ir 和 Ni/Cu 比值不同,高度部分熔融形成的岩浆具有高的 Ir 含量,低的 Pd/Ir 和高的 Ni/Cu 比值。在 $Pd/Ir-Ni/Cu$ 图解上北山岩体位于高 MgO 玄武岩浆的区域。坡北和漩涡岭岩体高 Fo 值表明其母岩浆相对原始。与中亚造山带铜镍硫化物矿床赋矿超镁铁质岩体相比,北山杂岩体母岩浆具有较高的 MgO 含量、低 Pd/Ir 和高 Ni/Cu 比值、以及相似的PGE配分模式,由此推断,其源区部分熔融程度较高。

北山镁铁-超镁铁质杂岩体具有IPGE与PPGE分馏、 Ir 与 Ru 、 Rh 、 Pt 和 Pd 正相关的特征,表明PGE组成除了受母岩浆组成的控制之外,还受 R 因子的控制。罗东岩体 R 值介于993~7063,母岩浆为PGE不亏损的拉斑玄武质岩浆^[39]。原生岩浆中PGE的富集程度以及岩浆演化上升过程中硫化物熔离可造成母岩浆的PGE亏损。坡北岩体和硫化物PGE含量很低,模拟计算表明母岩浆中含有 $113 \times 10^{-6} Cu$ 、 $1 \times 10^{-9} Pt$ 和 $0.07 \times 10^{-9} Ir$ ^[38], R 因子变化范围为100~1200,说明坡北成矿母岩浆PGE亏损^[30,38]。红石山岩体具有异常低的PGE含量和远高于原始地幔的 Cu/Pd 比值,表明其母岩浆经过了强烈的硫化物熔离,即不含矿岩体由发生了硫化物熔离的残余

岩浆结晶而来,硫化物是从PGE强烈亏损的玄武岩中熔离出来的^[26]。

4.2 成矿控制因素

坡北、红石山和罗东杂岩体的 Cu/Pd 比值分别为24482~217783、73000~1670000和385000~1547000^[17,38],明显高于原始地幔的 Cu/Pd 比值(6850)^[40],表明母岩浆在地幔源区或侵位之前经历了硫化物熔离^[38,53]。坡一岩体的橄榄石晶体中含有少量的铬尖晶石和硫化物,为同时结晶产物。二辉橄榄岩到橄榄二辉岩橄榄石的 $Fo-Ni$ 模拟计算表明硫化物熔离与橄榄石分离结晶同时^[17]。

北山杂岩体 $Sr-Nd-Os-O-Hf$ 同位素表明母岩浆演化过程中经历了不同程度的地壳物质的混染^[14,21]。同位素混合模拟计算表明不同岩体(以至岩体内部)的混染程度不同。罗东岩体存在0~5%的中地壳物质的混染,笔架山岩体存在0~10%的上地壳物质的混染,坡北岩体的地壳物质混染程度较低(约10%),红石山岩体存在5%~15%上地壳物质的混染,漩涡岭岩体地壳物质混染程度强,有10%~25%的中地壳物质的加入。坡十岩体 $\gamma_{Os}(t)$ 和 $\delta^{18}O$ 高于坡一岩体,表明坡十岩体地壳物质的混染程度高于坡一岩体。

地幔特征的硫同位素组成与贫硫围岩、结合 $Sr-Nd-Os-O-Hf$ 同位素组成揭示地壳混染可能是造成北山岩体硫化物熔离的关键因素^[38]。坡一岩体硫化物样品 $\gamma_{Os}(t)$ 高于岩石样品,表明硫化物熔离时有地壳物质的加入^[17],但是硫化物硫同位素($-2.0\sim-0.3\text{‰}$)具有地幔的硫同位素特征^[17,41]。坡北岩体的 $\delta^{18}O$ 普遍高于地幔值,锆石 $Hf-O$ 同位素特征显示坡北岩体地幔源区遭受了以俯冲流体为主的改造作用^[28,54]。笔架山岩体俯冲物质的改造较强,漩涡岭岩体俯冲物质的改造较弱。

北山杂岩体与赋含大型铜镍硫化物矿床的众多含大量橄长岩的岩体相似,如Duluth和Voisey's Bay岩体,原生岩浆规模巨大,有高 MgO 的玄武质岩浆或苦橄质岩浆,来自洋岛型地幔源区或亏损型大陆岩石圈地幔源区中等程度的部分熔融^[41],具有较大的成矿潜力。北山杂岩体保存完整,地表剥蚀仅出露辉长岩及闪长岩,在深部岩浆通道等部位存在大型矿床的可能性。

4.3 构造背景

北山镁铁-超镁铁质杂岩体形成的构造背景被

认为是碰撞造山后伸展环境,是否与二叠纪塔里木地幔柱作用有关值得关注^[14,21,55]。碰撞造山期间活动大陆边缘和碰撞造山后伸展环境形成的镁铁质岩浆都起源于交代地幔的部分熔融,相关岩浆的地球化学特征与地幔柱作用岩浆有显著差异。北山杂岩体形成的不同地幔动力学背景如下:

(1)活动大陆边缘俯冲相关岩浆作用^[19,55,56]或后碰撞伸展环境岩石圈底侵和软流圈上涌^[4,5,14,17,21,57]:北山镁铁-超镁铁质杂岩体平坦的稀土配分模式明显不同于洋岛玄武岩和塔里木玄武岩轻稀土富集的配分模式;微量元素显示明显的Nb、Ta和Ti负异常,Sr-Nd同位素显示地幔源区与塔里木玄武岩相比更加亏损。低Nb/Yb和La/Ba,高Th/Yb、La/Nb、U/Th、Ba/Th、Th/Zr和Rb/Y,与岛弧玄武岩的特征相似,暗示成岩过程存在岩石圈地幔流体的交代作用^[21,28]或者花岗质熔体产生的初生弧壳的参与^[17]。依据Th-Hf-Ta判别图解确定坡北岩体的原始岩浆为岛弧火山岩浆系列有待商榷,显示出亏损地幔受到地幔流体的交代^[14,21]。

(2)地幔柱作用的产物,为塔里木大火成岩省的重要组成部分^[2,6,32,34,44,54]。北山杂岩体形成时间与塔里木二叠纪地幔柱作用时间(287~291 Ma)^[10]相近,空间相邻(图1)。Sr-Nd-Os同位素具洋岛玄武岩特征;高MgO含量的母岩浆成分及较高的岩浆结晶温度表明形成母岩浆是地幔源区在较高温度下部分熔融形成的苦橄质岩浆,同世界范围内与地幔柱有关的典型苦橄岩的母岩浆成分较为一致;坡一岩体橄榄石的初始结晶温度为1331℃,岩浆的初始液相线温度为1411℃^[22],罗东和漩涡岭岩体的岩浆结晶温度为1412℃^[31,32],表明这些岩体的岩浆源区发生部分熔融的实际温度明显高于正常玄武岩岩浆起源温度,即地幔源区存在明显的热异常。

另一方面,北山镁铁-超镁铁质杂岩体形成可能与晚古生代的北山裂谷活动有关,裂谷的形成通常是地幔柱上部的岩石圈地幔抬升的地面响应^[59,60]。北山裂谷的形成和发展与塔里木二叠纪地幔柱的活动有关^[2,27,28]。塔里木玄武岩具有高TiO₂,低MgO和负 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值,是软流圈低程度部分熔融的产物,上升的过程中受到了中元古代沉积岩的混染^[2,34,35]。塔里木板块及其东北缘的东天山-北山地区存在峰期为280 Ma的地幔柱活动^[2]。因此,北山镁铁-超镁铁质杂岩体

可能是二叠纪塔里木地幔柱活动的产物,其岩浆源区由深部地幔柱物质和受俯冲流体交代的岩石圈地幔物质组成。

5 结 论

(1)北山镁铁-超镁铁质杂岩体形成年龄接近,由橄榄岩、辉石岩、橄长岩、辉长岩及闪长岩组成,具有堆晶韵律层,近平坦型的稀土元素配分模式,富集Rb、Sr和Pb,亏损Zr、Hf、Nb和Ti。IPGE亏损型PGE配分型式。

(2)北山镁铁-超镁铁质杂岩体Sr-Nd-Os-Hf-O同位素表明北山岩体经历了地壳物质的混染,其中漩涡岭岩体的地壳混染程度最高,坡北和笔架山岩体的混染程度最低。地壳混染是硫化物熔离的关键因素。

(3)模拟计算表明,北山镁铁-超镁铁质杂岩体母岩浆为高MgO岩浆,岩浆结晶温度高,可能是地幔柱作用叠加俯冲流体交代的岩石圈地幔高程度部分熔融形成的。

致谢:本文完成过程中,新疆地矿局第六地质大队邓刚、王恒及两名匿名评审专家和编辑部李亚萍老师给予了宝贵修改意见,李建平、吴生东、宋哲和贾祥娟参与资料整理,在此表示衷心的感谢。

参考文献(References):

- [1] Ballhaus C, Sylvester P. Noble metal enrichment processes in the Merensky reef, Bushveld complex [J]. *Journal of Petrology*, 2000, 41(4): 545-561.
- [2] Qin KZ, Su BX, Sakyi PA, et al. SIMS Zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu bearing mafic-ultramafic intrusions in Eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim Basin (NW China) [J]. *American Journal of Science*, 2011, 311: 237-260.
- [3] 姜德波,王登红,肖克炎,等.中国镍矿预测类型及主要战略接续区[J]. *中国地质*, 2014, 41(3): 715-727.
Lou Debo, Wang Denghong, Xiao Keyan, et al. Prediction types and main successive strategic resource base areas of Ni ore deposits in China[J]. *Geology in China*, 2014, 41(3): 715-727(in Chinese with English abstract).
- [4] 李华芹,陈富文,梅玉萍,等.新疆坡北基性-超基性岩带No.1号岩体Sm-Nd和SHRIMP U-Pb同位素年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2006, 25(4): 463-469.
Li Huaqin, Chen Fuwen, Mei Yuping, et al. Isotopic ages of No. 1 intrusive body in Pobei mafic-ultramafic belt of Xinjiang and their

- geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 2006, 25(4): 463–469 (in Chinese with English abstract).
- [5] 李华芹, 梅玉萍, 屈文俊, 等. 新疆坡北基性-超基性岩带10号岩体 SHRIMP U-Pb 和矿石 Re-Os 同位素定年及其意义[J]. *矿床地质*, 2009, 28(5): 633–642.
- Li Huaqin, Mei Yuping, Qu Wenjun, et al. SHRIMP zircon U-Pb and Re-Os dating of No. 10 intrusive body and associated ores in Pobei mafic-ultramafic belt of Xinjiang and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28 (5): 633–642 (in Chinese with English abstract).
- [6] 姜常义, 程松林, 叶书锋, 等. 新疆北山地区中坡山北镁铁质岩与岩石成因[J]. *岩石学报*, 2006, 22(1): 115–126.
- Jiang Changyi, Cheng Songlin, Ye Shufeng, et al. Lithochemistry and petrogenesis of Zhongposhanbei mafic rock body, at Beishan region, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(1): 115–126 (in Chinese with English abstract).
- [7] 苏本勋, 秦克章, 孙赫, 等. 新疆北山地区旋窝岭镁铁-超镁铁岩体的年代学、岩石矿物学和地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2010, 26(11): 3283–3294.
- Su Benxun, Qin Kezhang, Sun He, et al. Geochronological, petrological, mineralogical and geochemical studies of the Xuanwoling mafic-ultramafic intrusion in Beishan area, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(11): 3283–3294 (in Chinese with English abstract).
- [8] 陕亮, 许荣科, 郑有业, 等. 北山地区白山堂铜多金属矿区岩浆岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其地质意义[J]. *中国地质*, 2013, 40(5): 1600–1611.
- Shan Liang, Xu Rongke, Zheng Youye, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb chronology of magmatic rock in the Baishantang copper polymetallic deposit of Beishan area, Northwest China[J]. *Geology in China*, 2013, 40(5): 1600–1611.
- [9] 李煜航, 杨兴科, 王庆良, 等. 新疆北山矛头山东早二叠世火山岩喷发活动时代厘定及地球化学特征分析[J]. *中国地质*, 2012, 39(3): 683–694.
- Li Yuhang, Yang Xingke, Wang Qingliang, et al. Redetermination of the volcanic eruption time and analysis of geochemical characteristics of volcanic rocks in eastern Maotoushan of Beishan area, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 2012, 39(3): 683–694 (in Chinese with English abstract).
- [10] Yu X, Yang S F, Chen H L, et al. Permian flood basalts from Tarim Basin, Northwest China [J]. *Gondwana Research*, 2011, 20: 485–497.
- [11] Zhang C L, Xu Y G, Li Z X, et al. Diverse Permian magmatism in the Tarim Block, NW China: Genetically linked to the Permian Tarim mantle plume? [J]. *Lithos*, 2010, 119: 537–552.
- [12] 屈翠侠, 杨兴科, 何虎军, 等. 新疆北山盐滩一带侵入岩地球化学特征、时代及地质意义[J]. *中国地质*, 2013, 40 (5): 1409–1420.
- Qu Cuixia, Yang Xingke, He Hujun, et al. Geochemical features and ages of the intrusive rocks from Yantan belt in Beishan area of Xinjiang and their geological implications[J]. *Geology in China*, 2013, 40(5): 1409–1420.
- [13] Lu S N, Zhao G C, Wang H C, et al. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton: a review. *Precam Research*, 2008, 160: 77–93.
- [14] 颀炜, 宋谢炎, 聂晓勇, 等. 新疆坡十铜镍硫化物含矿岩体岩浆源区特征及构造背景探讨[J]. *地学前缘*, 2011, 18(3): 189–200.
- Xie Wei, Song Xieyan, Nie Xiaoyong, et al. Features of the mantle source and tectonic setting of the Poshi Ni-Cu sulfide-bearing intrusion, Xinjiang, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18 (3): 189–200 (in Chinese with English abstract).
- [15] Li C, Zhang M J, Fu P E, et al. The Kalatongke magmatic Ni-Cu deposit in the central Asian orogenic belt, NW China [J]. *Mineralium Deposita*, 2012, 47: 51–67.
- [16] Zhang M J, Li C, Fu P E, et al. The Permian Huangshanxi Cu-Ni deposit in western China [J]. *Mineralium Deposita*, 2011, 46: 153–170.
- [17] Xia M Z, Jiang C Y, Li C, et al. Characteristics of a newly discovered Ni-Cu sulfide deposit hosted in the Poyi ultramafic intrusion, Tarim Craton, NW China[J]. *Economic Geology*, 2013, 108: 1865–1878.
- [18] Su B X, Qin K Z, Santosh M, et al. The Early Permian mafic-ultramafic complexes in the Beishan Terrane, NW China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 66: 175–187.
- [19] Ao S J, Xiao W J, Han C M, et al. Geochronology and geochemistry of early Permian mafic-ultramafic complexes in the Beishan area, Xinjiang, NW China[J]. *Gondwana Research*, 2010, 18: 466–478.
- [20] Mao J W, Pirajno F, Zhang Z H, et al. A review of the Cu-Ni sulphide deposits in the Chinese Tianshan and Altay orogens (Xinjiang Autonomous Region, NW China) [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32(2–4): 184–203.
- [21] Song X Y, Xie W, Deng Y F, et al. Slab break-off and the formation of Permian mafic-ultramafic intrusions in southern margin of Central Asian orogenic belt, Xinjiang, NW China[J]. *Lithos*, 2011, 127: 128–143.
- [22] 王亚磊, 张照伟, 张铭杰, 等. 新疆坡北镁铁-超镁铁质岩体地球动力学背景探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 2013, 32(5): 693–707.
- Wang Yalei, Zhang Zhaowei, Zhang Mingjie, et al. Geodynamic setting of the Pobei mafic-ultramafic intrusion in Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2013, 32(5): 693–707 (in Chinese with English abstract).
- [23] 苏本勋, 秦克章, 孙赫, 等. 新疆北山地区红石山镁铁-超镁铁岩体的岩石矿物学特征[J]. *岩石学报*, 2009, 25 (4): 873–887.
- Su Benxun, Qin Kezhang, Sun He, et al. Petrological and mineralogical characteristics of Hongshishan mafic-ultramafic complex in Beishan area, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*,

- 2009, 25(4):873–887(in Chinese with English abstract).
- [24] 孙赫, 秦克章, 唐冬梅, 等. 新疆北山罗东岩体橄榄石特征对岩浆演化和硫化物熔离的指示[J]. 科技导报, 2010, 28(18): 21–26.
Sun He, Qin Kezhang, Tang Dongmei, et al. Olivine characteristics' implication for magmatic evolution and sulfide segregation of Luodong complex in Beishan area, Xinjiang[J]. Science & Technology, 2010, 28(18): 21–26 (in Chinese with English abstract).
- [25] 夏昭德, 夏明哲, 王垚, 等. 塔里木板块东北部笔架山东基性-超基性岩体地球化学特征与岩石成因[J]. 地质科技情报, 2012, 31(2):1–8.
Xia Zaode, Xia Mingzhe, Wang Yao, et al. Geochemical Characters and Petrogenesis of the Bijia Shandong Basic-Ultrabasic Intrusion, NE Tarim Plate[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(2):1–8(in Chinese with English abstract).
- [26] 夏芳, 柴凤梅, 陈斌, 等. 新疆北山红石山含铜镍镁铁-超镁铁质岩体 PGE 和 Re-Os 同位素地球化学特征及成矿意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2012, 31(1): 1–12.
Xia Fang, Chai Fengmei, Chen Bin, et al. Geochemical characteristics of platinum group elements and Re-Os isotopes of the Hongshishan Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion in Beishan block of Xinjiang and their metallogenic significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2012, 31(1): 1–12(in Chinese with English abstract).
- [27] Su B X, Qin K Z, Sakyi P A, et al. Geochronologic-petrochemical studies of the Hongshishan mafic-ultramafic intrusion, Beishan area, Xinjiang (NWChina) [J]. International Geology Review, 2012, 54:270–289.
- [28] Su B X, Qin K Z, Sakyi P A, et al. U-Pb ages and Hf-O isotopes of zircons from Late Paleozoic mafic-ultramafic units in southern Central Asian Orogenic Belt [J]. Gondwana Research, 2011, 20: 516–531.
- [29] 苏本勋, 秦克章, 唐冬梅, 等. 新疆北山地区坡十镁铁-超镁铁岩体的岩石学特征及其对成矿作用的指示[J]. 岩石学报, 2011, 27(12): 3627–3639.
Su Benxun, Qin Kezhang, Tang Dongmei, et al. Petrological features and implications for mineralization of the Poshi mafic-ultramafic intrusion in Beishan area, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica., 2011, 27(12): 3627–3639 (in Chinese with English abstract).
- [30] 夏明哲, 赵献军, 宋艳芳, 等. 塔里木板块东北部坡十侵入体铂族元素地球化学特征及成矿作用[J]. 地质与勘探, 2013, 49(1): 1–8.
Xia Mingzhe, Zhao Xianjun, Song Yanfang, et al. The platinum group elements geochemical characteristics of Poshi intrusion, northeast Tarim block and its mineralization[J]. Geology and Exploration, 2013, 49(1): 1–8(in Chinese with English abstract).
- [31] 夏昭德, 王垚, 姜常义, 等. 新疆北山地区漩涡岭镁铁质-超镁铁质层状岩体岩石学与矿物学研究[J]. 地质学报, 2013, 87(4): 486–497.
Xia Zhaode, Wang Yao, Jiang Changyi, et al. Petrography and mineralogy of the Xuanwoling mafic-ultramafic layered intrusion in the Beishan region, Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(4): 486–497(in Chinese with English abstract).
- [32] 凌锦兰, 夏明哲, 郭娜欣, 等. 新疆北山地区罗东镁铁质-超镁铁质层状岩体岩石成因[J]. 地球化学, 2011, 40(6): 499–515.
Ling Jinlan, Xia Mingzhe, Guo Naxin, et al. Petrogenesis of Luodong mafic-ultramafic layered intrusion, Beishan region, Xinjiang[J]. Geochimica, 2011, 40(6): 499–515(in Chinese with English abstract).
- [33] Zhang Y, Liu J, Guo Z. Permian basaltic rocks in the Tarim basin, NW China [J]. Gondwana Research, 2010, 18:596–610.
- [34] Zhou M F, Zhao J H, Jiang C Y, et al. OIB-like, heterogeneous mantle sources of Permian basaltic magmatism in the western Tarim basin, NW China [J]. Lithos, 2009, 113:583–594.
- [35] Zhang C, Li X, Li Z, et al. A Permian layered intrusive complex in the western Tarim Block, northernwestern China: Product of a ca. 275 Ma mantle plume?[J]. Journal of Geology, 2008, 116(3): 269–287.
- [36] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics in ocean basalt[J]. Geol. Soc. London Sp, 1989, 42:313–345.
- [37] Anders E, Grevesse N. Abundances of the elements: Meteoritic and solar[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53: 197–214.
- [38] Yang S H, Zhou M F, Lightfoot P C, et al. Re-Os isotope and platinum-group element geochemistry of the Pobei Ni-Cu sulfide-bearing mafic-ultramafic complex in the northeastern part of the Tarim Craton[J]. Mineralium Deposita, 2014, 49: 381–397.
- [39] 柴凤梅, 夏芳, 陈斌, 等. 新疆北山地区两个含铜镍镁铁-超镁铁质岩体铂族元素地球化学研究[J]. 地质学报, 2013, 87: 474–485.
Chai Fengmei, Xia Fang, Chen Bin, et al. Platinum group elements geochemistry of two mafic-ultramafic intrusions in the Beishan Block, Xinjiang, NW China[J]. Acta Geologica Sinica. 2013, 87: 474–485 (in Chinese with English abstract).
- [40] Barnes S J, Maier W D. The fractionation of Ni, Cu, and the noble metals in silicate and sulphide liquids[J]. Geological Association of Canada Short Course Notes, 1999, 13: 69–106.
- [41] 姜常义, 郭娜欣, 夏明哲, 等. 塔里木板块东北部坡十镁铁质-超镁铁质层状侵入体岩石成因[J]. 岩石学报, 2012, 28(7): 2209–2223.
Jiang Changyi, Guo Naxin, Xia Mingzhe, et al. Petrogenesis of the Poyi maficultramafic layered intrusion, NE Tarim Plate [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(7): 2209–2223(in Chinese with English abstract).
- [42] Chai F M, Zhang Z C, Mao J W, et al. Geology, petrology and

- geochemistry of the Baishiquan Ni- Cu- bearing mafic-ultramafic intrusions in Xinjiang, NW China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32: 218-235.
- [43] Tang D M, Qin K Z, Sun H, et al. The role of crustal contamination in the formation of Ni- Cu sulfide deposits in Eastern Tianshan, Xinjiang, Northwest China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 49: 145-160.
- [44] Tian W, Campbell I H, Allen C M, et al. The Tarim picrite-basalt-rhyolite suite, a Permian flood basalt from northwest China with contrasting rhyolites produced by fractional crystallization and anatexis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2010, 160: 407-425.
- [45] Xu J F, Suzuki K, Xu Y G, et al. Os, Pb, and Nd isotope geochemistry of the Permian Emeishan continental flood basalts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71:2104-2119.
- [46] Qi L, Zhou M F. Platinum- group elemental and Sr- Nd- Os isotopic geochemistry of Permian Emeishan flood basalts in Guizhou Province, SW China [J]. *Chemical Geology*, 2008, 248: 83-103.
- [47] Shirey S B, Walker R J. The Re- Os isotope system in cosmochemistry and high- temperature geochemistry[J]. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, 1998, 26: 423-500.
- [48] Widom E, Shirey SB. Os isotope systematics in the Azores: implications for mantle plume sources[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 142:451-465.
- [49] Widom E, Hoernle K A, Shirey S B, et al. Os isotope systematics in the Canary Ialands and Madeira [J]. *Journal of Petrology*, 1999, 40:279-296.
- [50] Lambert D D, Foster J G, Frick L R, et al. Re- Os isotopic systematics of the Voisey's Bay Ni-Cu-Co magmatic ore system, Labrador, Canada[J]. *Lithos*, 1999, 47: 67-88.
- [51] Valley J W, Kinny P D, Schulze D J, et al. Zircon megacrysts from kimberlite [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1998, 133: 1-11.
- [52] Weyer S, Münker C, Mezger K. Nd/Ta, Zr/Hf and REE in the depleted mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 205(3-4): 309-324.
- [53] Barnes SJ, Naldrett AJ, Gorton MP. The origin of the fractionation of platinum- group elements in terrestrial magmas[J]. *Chemical Geology*, 1985, 53: 303-323.
- [54] Su B X, Qin K Z, Tang D M, et al. Late Paleozoic mafic-ultramafic intrusions in southern Central Asian Orogenic Belt (NW China): Insight into magmatic Ni-Cu sulfide mineralization in orogenic setting. *Ore Geology Reviews*, 2013, 51: 57-73.
- [55] Xiao W J, Windley B F, Badarch G, et al., Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altai [J]. *Journal of the Geological Society*, 2004, 161:339-342.
- [56] Han B F, Guo Z J, Zhang Z C, et al. Age, geochemistry, and tectonic implications of a late Paleozoic stitching pluton in the North Tian Shan suture zone, western China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2010, 122:627-640.
- [57] Gao J F, Zhou M F, Lightfoot P C, et al. Sulfide-saturation and magma emplacement in the formation of the Permian Huangshandong Ni- Cu sulfide deposit, Xinjiang, NW China[J]. *Economic Geology*, 2013, 108: 1833-1848.
- [58] Rogers N, Macdonald R, Fitton J G, et al. Two mantle plumes beneath the east African rift system [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 176: 387-400.
- [59] 秦克章, 田野, 姚卓森, 等. 新疆喀拉通克铜镍矿田成矿条件、岩浆通道与成矿潜力分析[J]. *中国地质*, 2014, 41(3): 912-935.
- Qin Kezhang, Tian Ye, Yao Zhuosen, et al. Metallogenetic conditions, magma conduit and exploration potential of the Kalatongk Cu- Ni orefield in Northern Xinjiang[J]. *Geology in China*, 2014, 41(3): 912-935(in Chinese with English abstract).
- [60] Saunders A D, England R W, Reichow M K, et al. A mantle plume origin for the Siberian traps [J]. *Lithos*, 2005, 79: 407-424.