

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2018.02.001

中国岩浆铜镍硫化物矿床地质特点及其启示

宋谢炎*, 胡瑞忠, 陈列锰

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

摘要:我国岩浆硫化物矿床类型比较齐全, 产出的构造背景比较复杂, 尽管铂族元素矿床比较匮乏, 但铜镍矿床资源总量名列世界前茅。不仅在华北克拉通西南缘和峨眉大火成岩省发现了一系列与地幔柱岩浆活动有关的铜镍(铂族元素)矿床, 例如金川和杨柳坪超大型铜镍铂族元素矿床; 还在中亚造山带南缘境内以及东昆仑造山带发现了一批规模可观的铜镍矿床, 甚至超大型矿床, 例如夏日哈木超大型镍钴矿床, 使得我国产于板块聚合边界铜镍矿床在镍资源总量中所占的比例远高于世界平均值。这种特点一方面取决于我国特殊的地质背景, 反映了我国铜镍矿床成因的特点; 另一方面也说明我国这类矿床的勘查策略和技术具有优势, 我国地质工作者卓有成效的找矿实践极大地丰富了铜镍硫化物矿床的找矿理论, 拓展了这类矿床的找矿空间。对华北克拉通、峨眉大火成岩省、中亚造山带南缘及东昆仑造山带已发现矿床的地质特征进行总结, 对于未来这些区域找矿潜力的合理评价及预测是非常重要的。

关键词:铜镍硫化物矿床, 大火成岩省, 板块聚合边界, 岩浆通道系统

中图分类号: P611.1

文献标识码: A

Characteristics and inspirations of the Ni-Cu sulfide deposits in China

Song Xieyan*, Hu Ruizhong, Chen Liemeng

(State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry,
Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 550081, China)

Abstract: A series of magmatic sulfide deposits, including the giant Jinchuan Ni-Cu-(PGE) deposit in North China Craton and Xiarihamu Ni-Co deposit in central of Tibet Plateau, have been discovered in different tectonic settings in China in past decades. China is one of the countries having largest reserve of Ni metal in the world, and scanty of resource of platinum-group element. The magmatic sulfide deposits in China may be genetically related with the magmatism derived from mantle plumes, such as the Neoproterozoic Jinchuan deposit at the southwestern margin of North China Craton and the Permian deposits in the Emeishan Large Igneous Province, and the magmatism resulted from subduction-collision processes at convergent tectonic settings, such as a series of large Ni-Cu sulfide deposits occur in the southern margins of the Central Asian Orogenic Belt and the East Kunlun Orogenic Belt. Particularly, the proportion of Ni reserve from the deposits in convergent tectonic settings in the total Ni reserve in China is much

基金项目: 国家自然科学基金(41630316, 41473050, 41772067), 中国科学院 B 类战略性先导科技专项(XDB18000000), 科技部“国家重点研发计划”(2016YFC060503), 矿床地球化学国家重点实验室领域前沿项目

收稿日期: 2018-01-15

* 通讯联系人, E-mail: songxieyan@vip.gyig.ac.cn

higher than the average value in the world. This is consistent with geological background of China, in which the Central Asian Orogenic Belt occurs in the northern part and the Tethys Orogenic Belt occurs in the southern part. On the other hand, the discoveries of many Ni-Cu deposits in the orogenic belts reflect that the prospecting strategy and technology on the magmatic sulfide deposit are more advantageous in China than in the other countries. These discoveries are significant for further exploration of Ni-Cu sulfide deposits in the world. Recent studies indicated that the formation of the Huangshan-Jingerquan Ni-Cu deposit zone at the convergent margin of the Central Asian Orogenic Belt is closely related to plate collision coupling with regional shearing. There are still large potential to find new deposits in the regions covered by Quaternary sediments in the Huangshan-Jingerquan zone. New insights by the studies of magma conduit system of the Jinchuan deposit indicated a good prospecting potential to the depths. Summarizing for the geological characteristics of the Ni-Cu sulfide deposits in North China craton, Emeishan Large Igneous Province, southern margins of Central Asian Orogenic Belt and east Kunlun Orogenic Belt is very important for reasonable evaluation of prospecting potential in these regions.

Key words: Ni-Cu sulfide deposit, Large Igneous Province, convergent margin, magma plumbing system

全球一共有 140 多个镍储量超过 10 万吨岩浆铜镍硫化物矿床^[1], 这些矿床比较集中地分布在俄罗斯、澳大利亚、加拿大、中国等少数国家. 国内外大量研究表明强烈的幔源镁铁—超镁铁岩浆活动是成矿的先决条件^[2-3]. 世界上超大型岩浆铜镍矿床, 如: 俄罗斯的 Noril'sk 和 Pechenga, 我国的金川, 加拿大的 Voisey's Bay, 澳大利亚的 Mt. Keith 等矿床, 主要产于克拉通内部或大陆边缘. 因此, 主流观点认为超大型铜镍矿床的形成是地幔柱活动的产物, 硫化物熔离和运移过程发生在岩浆通道系统中, 硫化物聚集—成矿总是发生在岩浆流速突然降低的部位, 如: 岩浆通道突然变宽、变缓、转弯的部位. 同时, 在板块聚合边界, 包括碰撞带、活动大陆边缘甚至岛弧带中也不断发现铜镍成矿带, 其中不乏大中型矿床, 甚至超大型矿床, 例如西班牙的 Aguablanca 矿床^[4], 博茨瓦纳的 Selebi-Phikwe 成矿带^[5], 芬兰的 Kotalahti 和 Vammala 成矿带^[6] 和巴西的 Santa Rita 超大型铜镍矿床^[7]. 近年来在中亚造山带南缘我国境内发现了一系列大中型铜镍矿床^[8-12], 以黄山—镜儿泉成矿带最为典型, 随后在东昆仑造山带又新发现了夏日哈木超大型镍钴矿床^[13-14]. 这些发现表明俯冲—碰撞过程中的幔源岩浆作用也有利于岩浆铜镍硫化物矿床的形成, 为这类矿床的找矿工作拓展了空

间. 然而, 大陆内部及造山带岩浆铜镍矿床岩浆作用过程及成矿机制有什么区别并不清楚.

我国不仅岩浆铜镍矿床资源丰富, 而且产出地质背景多样, 在华北地台西南缘发现了世界第三大金川铜镍矿床, 在峨眉大火成岩省发现了杨柳坪、力马河、白马寨等矿床, 在中亚造山带南缘及东昆仑造山带发现了一系列大中型、甚至超大型铜镍矿床. 这些矿床具有独特的地质特征, 是研究和认识大陆内部及板块聚合边界岩浆铜镍矿床的地质特点、成矿条件和矿床机制的天然实验室. 本文试图在近年来国内外同行研究成果的基础上, 对我国主要岩浆铜镍硫化物矿床的地质背景和地质特征及其对铜镍矿床找矿的指示意义进行总结和分析.

1 全球岩浆铜镍硫化物矿床的时空分布和基本地质特点

全球岩浆硫化物矿床, 包括铜镍矿床和铂族元素矿床的空间分布是极其不均匀的, 主要分布在欧亚大陆、北美大陆、非洲大陆半部及澳大利亚(图 1). 虽然多数岩浆硫化物矿床与拉斑系列的镁铁—超镁铁岩浆有关, 如俄罗斯的 Noril'sk 矿床、我国的金川矿床、以及澳大利亚的 Mt Keith 矿床等, 但也有一些矿床与碱性和钙碱性系列岩浆有关, 如南非的 Bushveld 岩体. 大多数超大型矿床与地幔柱活动诱发的大

陆裂谷幔源岩浆活动有密切的因果关系,如俄罗斯的 Noril'sk 矿床是西伯利亚地幔柱活动的产物. 但其他超大型矿床与地幔柱活动的关系仍然存在不同认识,如南非 Bushveld 岩体与地幔柱活动的关系并不明确. 然而,非常明确

的一点是产于大陆裂谷的铜镍矿床规模一般远大于产于板块聚合边界(目前的造山带)的铜镍矿床,后者仅占国外镍金属储量的不到 10%,而且镍品位更低(图 2),所以,造山带铜镍硫化物矿床的勘查工作在国外不被重视.

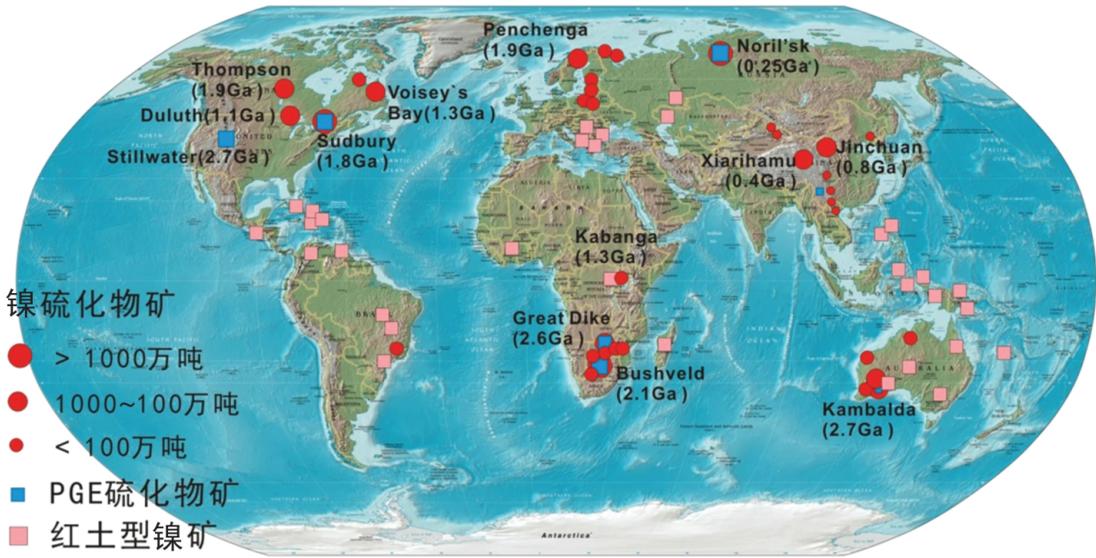
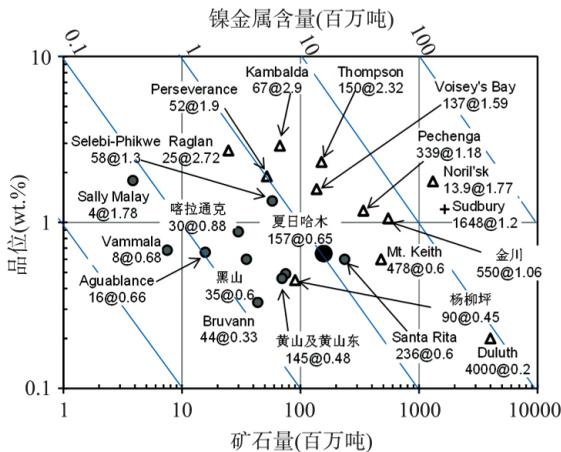


图 1 全球岩浆硫化物矿床及红土型镍矿分布图(据[1,13])

Fig. 1 Distribution of magmatic sulfide deposits and lateritic Ni deposits in the world(after ref.[1,13])



▲ 产于裂谷带的矿床 ● 产于造山带的矿床 + Sudbury

图 2 全球主要大型—超大型铜镍矿床的品位及储量对比(据[2,13])

Fig. 2 Comparison on grades and reserves of the large and super-large Ni-Cu sulfide deposits in the world(after ref.[2,13])

裂谷带和造山带铜镍矿床主要位于岩浆通道变宽、变缓或转弯的部位,成矿与岩浆流速的降低导致密度大的硫化物沉降—聚集有关,而残余岩浆离开该岩浆房形成其他不含矿岩体或喷出地表. 因此,铜镍硫化物含矿岩体往往具有很高的矿化率,例如:金川岩体的矿化率大多 47%. 产于克拉通大陆裂谷的含矿岩体往往顺着沉积岩的岩性界面侵位,形成产状非常舒缓、延伸较大的岩席,例如:俄罗斯的 Noril'sk 矿床的含矿岩体水平延伸大 20 km,厚度仅约 300 m;而侵入于变质岩中的岩体则可能形成形态复杂的不规则岩体^[3]. 然而,由于勘探过程控制的空间范围有限,或因后期构造活动的破坏,造成对成矿岩浆通道系统的认识不够系统.

总体而言,岩浆硫化物矿床没有明显的时代选择性,然而对于不同类型的矿床,其形成时代却有一定的规律(图 3). 首先,与绝大多数科马提岩有关的和产于大型层状岩体中的岩浆硫

化物矿床形成于太古代和早元古代,并且有三个成矿高峰期:28.5 亿年~30 亿年、26.5 亿年~28 亿年和 19 亿年~21 亿年;而岩浆通道系统中的岩浆硫化物矿床在太古代、元古代、古生代和中生代都可以形成世界级的矿床(图 3)。值得注意的是,还有一些地质时代没有发现重

要的岩浆硫化物矿床,如:22 亿年~24 亿年和 18 亿年~14 亿年;有些全球性地幔柱活动时期并没有对应的岩浆硫化物矿床,这种现象究竟是相应的矿床还没有被发现,还是这些时代没有发生大规模的岩浆硫化物成矿,这些问题还值得进一步研究。

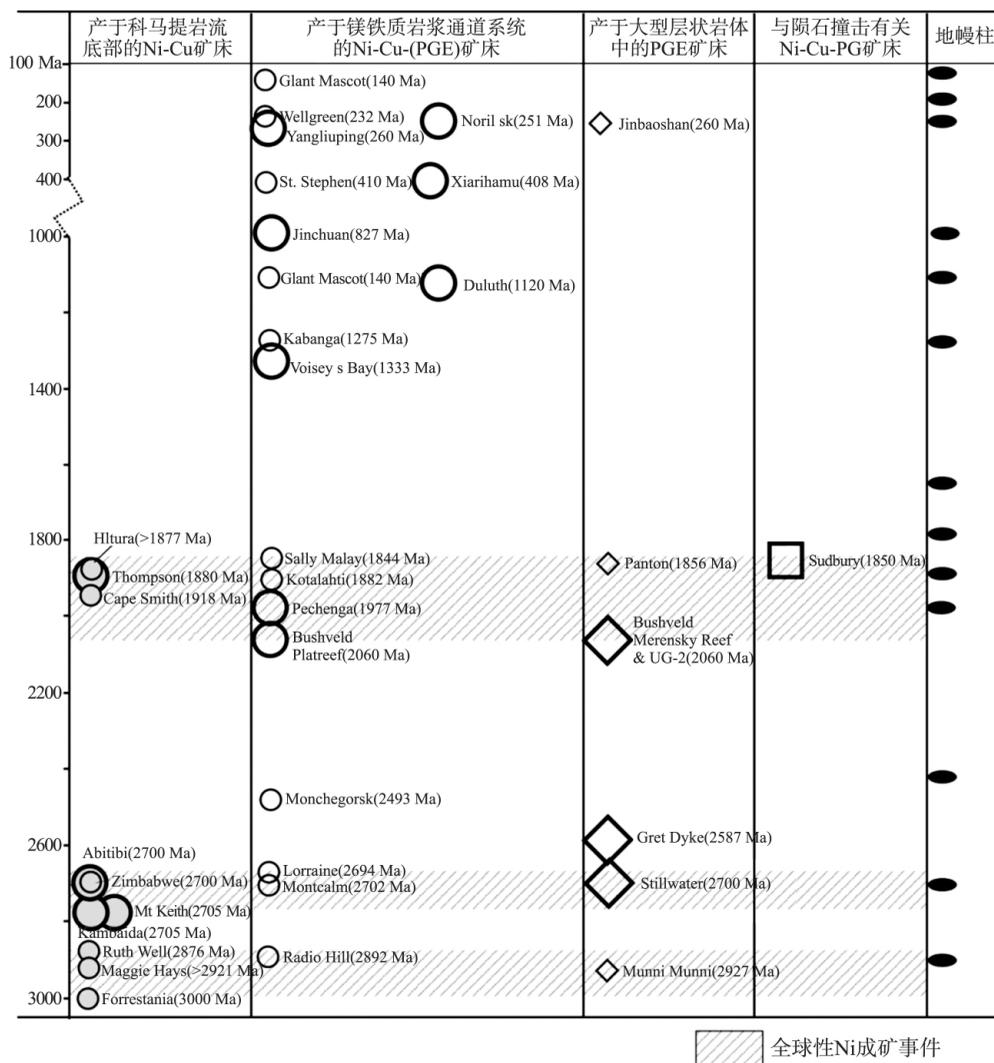


图 3 全球主要大型—超大型岩浆硫化物矿床的时代及其与地幔柱活动的关系(据[1,13])

Fig. 3 Ages of the major large and super-large magmatic sulfide deposits in the world and their linkage with mantle plumes(after ref.[1,13])

2 我国岩浆铜镍硫化物矿床的时空分布和基本地质特点

我国岩浆硫化物矿床以铜镍矿床为主,铂族元素矿床很少且仅分布在峨眉大火成岩省;

大中型及超大型铜镍矿床则在中亚造山带南缘、华北地台边缘、峨眉大火成岩省及东昆仑造山带等构造单元均有分布(图 4)。近年来研究表明峨眉大火成岩省的铜镍(铂族元素)矿床与二叠世地幔柱活动存在密切的时空关系^[15-19],

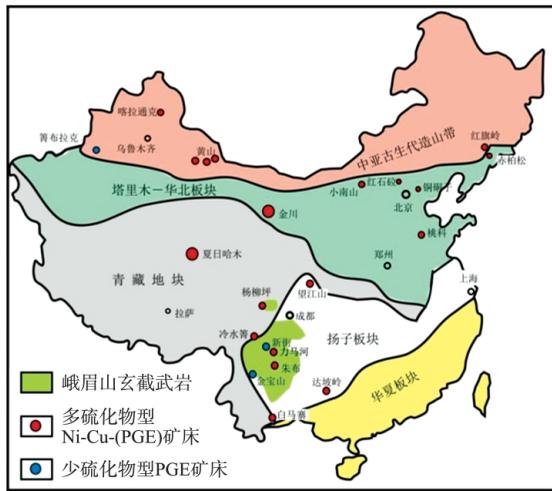


图 4 我国主要岩浆硫化物矿床的分布

Fig. 4 Distribution of the major magmatic sulfide deposits in China

确认了东昆仑造山带的夏日哈木超大型镍钴矿床与俯冲—碰撞作用导致的幔源岩浆活动有关^[13-14]。然而,中亚造山带南缘一系列大中型铜镍矿床是与塔里木地幔柱活动有关,还是与俯冲—碰撞过程有关,仍然存在不同观点。根据含矿岩体年龄的相似性,张传林等^[20]和 Qin *et al.*^[10]认为塔里木地幔柱可能为新疆北部岩浆硫化物成矿提供了热源。但是,最新的锆石 U-Pb 年龄数据表明塔里木玄武岩浆的活动主要发生在 290 Ma 左右^[21],略早于新疆早二叠世铜镍硫化物含矿岩体的锆石 U-Pb 年龄 (270~285 Ma)(表 1)。更重要的是约 2000 km 以外的内蒙古温根南岩体 (282 Ma) 最近也发现了很好的铜镍硫化物矿化^[22],甘肃阿拉善地块南缘小口子辉长岩体 (284.4 Ma 岩体化南岩体) 也发现有硫化物矿化(焦建刚未发表数据)。这些岩体的微量元素组成也与新疆北部铜镍硫化物含矿岩体一致,但空间上距离塔里木地幔柱较远。Song *et al.*^[23]通过对比研究发现新疆早二叠世铜镍硫化物含矿岩体与形成于俯冲阶段的西天山志留世菁布拉克和北山泥盆世黑山岩体具有相似的岩石学、矿物组合和地化学特征。菁布拉克和黑山岩体的铜镍硫化物矿化说

明俯冲阶段板片撕裂导致的软流圈上涌也可以形成与成矿有关的玄武质岩浆^[11-12,24]。最接近塔里木地幔柱的坡北,白石泉和天宇等含矿岩体与塔里木大火成岩省镁铁—超镁铁岩体及岩墙地球化学特征差异明显,意味着两者具有不同的地幔源区和经历了不同的岩浆演化过程^[9,25];Zhang *et al.*^[26]对北山地区早二叠 (282 Ma) 的辉绿岩脉的地球化学研究进一步支持了上述观点。Zhang *et al.*^[27]和 Li *et al.*^[28]认为黄山和喀拉通克岩体与塔里木地幔柱之间没有任何成因联系。特别值得注意的是,东昆仑造山带夏日哈木超大型镍钴硫化物矿床(镍金属储量达 100 万吨,平均品位为 0.68 wt.%,锆石 U-Pb 年龄~406 bwt.%Ma)与地幔柱没有成因联系^[13-14]。

综上所述,我国岩浆硫化物矿床的形成主要与地幔柱作用和板块聚合边界的俯冲—碰撞过程有关。笔者对金川、峨眉大火成岩省、中亚造山带南缘、东昆仑造山带的主要铜镍矿床进行了统计,结果显示包括金川和峨眉大火成岩省与地幔柱有关的铜镍矿床探明的镍金属储量大约为 615 万吨,包括中亚造山带南缘及东昆仑造山带的铜镍矿床的镍金属储量约为 316 万吨(表 1),造山带的铜镍矿床的镍金属储量占总储量的约 34%,远高于世界平均值。另一方面,我国造山带的铜镍矿床与其他国家的类似,镍的品位都大大低于金川及峨眉大火成岩省铜镍矿床的镍品位,例如,黄山及黄山东矿床的镍平均品位仅为 0.48 wt.%,远低于金川矿床镍平均品位 1.02 wt.%(图 2)^[29-31]。然而,峨眉大火成岩省铜镍矿床镍金属储量的总和仅有 60 万吨左右,远小于中亚造山带南缘铜镍矿床镍金属储量的总和(约 214 万吨),也小于夏日哈木单个矿床的镍金属储量(约 102 万吨),最大的杨柳坪矿床镍的平均品位也仅有 0.45 wt.%(图 2,表 1)。上述特点表明造山带铜镍矿床也具有很好的经济价值,是应该得到足够重视的勘查对象。

近年来,大量锆石 U-Pb 年代学研究表明,我国太古代和早元古代的岩浆硫化物成矿作用

非常微弱,铜镍成矿主要集中于晚元古代(金川)和晚古生代(峨眉大火成岩省及中亚造山带南缘)(表 1)。这与我国主要构造单元的地质演化特征密切相关,因此,从区域构造演化角度理解这些矿床的成矿地质背景和矿床地质特征是非常必要的。

表 1 我国主要岩浆铜镍硫化物矿床及含矿岩体
Table 1 The major magmatic sulfide deposits and mineralized intrusions in China

| 构造单元 | 矿床 | 测试方法 | 年龄(Ma) | 镍/铜储量(万吨) | 资料来源 |
|---------|--------|---------------------------------------|-----------------|-----------------------|----------------|
| 华北克拉通 | 金川 | 斜长二辉橄榄岩(斜)锆石 U-Pb 年龄 | 827±8/832±0.6 | 550/200(超大型) | [32-33] |
| 峨眉大火成岩省 | 杨柳坪 | | | 55/20(超大型) | [34] |
| | 力马河 | 辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 | 263±3 | 5.4/3.2 | [15,35] |
| | 白马寨 | Re-Os 同位素年龄 | 259 ± 20 | 5.0/ | [36] |
| 中亚造山带南缘 | 喀拉通克 | 苏长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 | 287±5 | 25/42(大型) | [37] |
| | 图拉尔根 | 辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 | 300±3.2 | 11/6(大型) | [38] |
| | 圪塔山口 | 辉长岩锆石 SIMS U-Pb 年龄 | 283±1.9 | 小型 | [39] |
| | 葫芦 | 辉长闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄 | 282±1.2 | 8/4 | [40] |
| | 黄山东 | 橄榄苏长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 | 274±3 | 36/17(大型) | [37] |
| | 黄山南 | 辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 | 283±1.4 | 据私人公司的新增储量估计为大型 | [41] |
| | 黄山 | 闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄(弱矿化,与辉长岩呈侵入接触关系) | 269±2 | 32/20(大型) | [42] |
| | | 辉长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄 | 285±2.5/284±3.5 | | [10,43] |
| | 香山 | 苏长辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 | 285±1.2/280±1.1 | 4/2 | [44-45] |
| | 二红洼 | 橄榄辉长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄 | 283±1.5 | 弱矿化 | [46] |
| | 白鑫滩 | 辉橄岩及橄榄辉长岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄 | 278±2.6/287±3 | 弱矿化 | [47],邓宇峰(私人通信) |
| | 恰特卡尔特格 | 辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 | 277±1.6 | 未见矿化 | [48] |
| | 海豹滩 | 辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 | 269±3.2 | 未见矿化 | [47] |
| | 白石泉 | 辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 及 LA-ICP-MS U-Pb 年龄 | 284±8,281±0.9 | 9.4/7 | [30,49] |
| | 天宇 | 辉长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄 | 290±3.4 | / | [50] |
| | 菁布拉克 | 辉石闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 | 431±6 | 0.42/0.11 | [51] |
| | 坡北 | 辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 | 278±2/ 289±10 | 50(128)/0.4(0.2)(超大型) | [30,52] |
| | 红石山 | 橄榄辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 | 282±2.6 | / | [53] |
| | 黑山 | 辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 | 357±4 | 12/4(大型) | [12] |
| | 红旗岭 | 辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 | 216±5 | 27/7(大型) | [54-55] |
| 东昆仑造山带 | 夏日哈木 | 辉石岩及苏长辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 | 406±2.7 | 102/2.04 | [12] |

2.1 金川超大型铜镍矿床的地质特征 金川位于华北地台西南缘龙首山推覆地体的北缘,矿体赋存于北西向透镜状超镁铁岩体中(长约 6500 m,宽小于 530 m,最大延深大于 1100 m),已探明镍金属储量超过 550 万吨,镍平均品位 1.02 wt.%(图 2),PGE 储量约 100 吨,以高矿化率(~47%)及单个矿体巨大闻名于世。金川岩体的锆石/斜锆石 SHRIMP 年龄为 ~825 Ma^[32-33],微量元素成分显示出与洋岛玄武岩的亲性^[56],而其富集的 Nd 同位素组成表明岩浆起源于被地幔柱加热的异常富集的岩石圈地幔^[32],这些特征暗示金川矿床的形成可能是地幔柱与俯冲作用叠加的结果。

汤中立和李文渊^[57]认为金川矿床形成于新元古代大陆边缘裂谷,提出了“幔源岩浆深部熔离,依次贯入”的“小岩体成大矿”成矿模式。Song *et al*^[58]通过岩相学和后期断裂构造分析,认为 F₁₆₋₁断层两侧原本为东、西两个相互独立的岩体,具有不同的成岩成矿过程。尽管金川岩体为倾向南西,倾角 50°~70°的倾斜岩体,通过构造恢复发现这两个岩体的原始产状是近水平的。由于岩体侵位于早元古的中高级变质岩中,东、西两个岩体规模都比较小,没有能够形成像俄罗斯 Noril'sk-Talnakh 那样舒展而巨大的岩席。巨大的 1 号矿体呈中心对称的“火焰状”产于东岩体的中西部,2 号矿体呈透镜状产于东岩体东段的底部;24 号矿体则产于西岩体的底部和下部,向下硫化物增多^[31,59]。镁铁质岩浆携带硫化物乳珠进入西岩体,随后硫化物发生沉降一聚集形成了 24 号矿体,其成矿过程与俄罗斯 Noril'sk 矿床相似,而东岩体的 1 号和 2 号矿体则是有深部分异的橄榄石—硅酸盐熔体晶粥和橄榄石—硫化物熔体晶粥依次挤入形成的。不同的成矿机制导致 1 号、2 号和 24 号矿体铜镍和铂族元素组成存在差异(如 2 号矿体贫 PGE,1 号和 24 号矿体内部存在有规律的铂族元素宏观分异)^[31,59-61]。由于地幔柱导致的地幔熔融是金川矿床形成的物质基础,因此,金川矿床的镍和铂族元素品位明显高于中亚造山带和东昆仑造山带的铜镍矿床。

2.2 峨眉大火成岩省铜镍矿床的地质特征 众所周知,峨眉大火成岩省不仅形成了攀枝花、红格、白马、太和等超大型钒钛磁铁矿矿床,也形成了一系列岩浆硫化物矿床,锆石 U-Pb 年龄表明这些含矿岩体均形成于 260 Ma^[62-63],与峨眉地幔柱岩浆活动有关^[15,64-66]。Song *et al*^[17]根据矿床的地质特征将这些岩浆硫化物矿床划分为:(1)与硫化物就地堆积有关的铜镍铂族元素矿床(杨柳坪、清矿山等);(2)与深部熔离作用有关的贯入型铜镍硫化物矿床(力马河和白马寨等);(3)超镁铁岩床内的贫铜镍的层状铂族元素矿床(金宝山等);(4)含钒钛磁铁矿的层状岩体内的层状铂族元素矿床(新街和安益)^[34,65-68]。

2.2.1 杨柳坪超大型铜镍铂族元素矿床 该矿床位于峨眉大火成岩省外带北部边缘的一个穹隆构造中部,是峨眉大火成岩省唯一的超大型铜镍矿床(表 1)。含矿岩体呈舒缓的岩席状顺层侵位于石炭系大理岩中,岩席厚 100~300 m,延伸可达数公里;矿体产于岩体底部的蛇纹岩中,硫化物向下增多^[34]。系统的岩石学、元素和同位素地球化学的研究表明该矿床与周围峨眉山玄武岩具有密切的成因联系,矿石铜镍铂族元素的富集与某些层位玄武岩中这些元素的亏损有很好的对应关系^[16]。

2.2.2 力马河小型铜镍矿床 力马河岩体位于峨眉大火成岩省内带,呈漏斗状侵位于元古代变质岩中,矿体呈不规则透镜状产于岩体底部辉石岩和橄榄辉石岩中,反映出岩浆通道变宽和变缓的部位硫化物堆积成矿的特点^[66]。白马寨镁铁—超镁铁岩体位于峨眉大火成岩省外带南部边缘,侵位于奥陶系砂岩和板岩中,岩体从中心向外依次为致密块状铜镍硫化物矿体、辉石岩和辉长岩,Wang *et al*^[69]认为该矿床为高 MgO 的玄武岩浆在深部岩浆房发生硫化物熔离后,在向上运移过程中因流动分异形成的。

2.3 中亚造山带南缘铜镍矿床的地质特征 中亚造山带南缘的铜镍矿床主要分布在新疆北部,包括准噶尔地块北缘(喀拉通克),北天山(黄山—镜儿泉成矿带),中天山(西部的菁布拉

克,东部的天宇和白石泉),以及塔里木地块北缘的北山褶皱带(坡北、黑山),这些含矿岩体在各构造单元中的分布都大致平行于区域性大断裂或板块缝合线^[8-10,25,42,70]。近年来,精确的锆石 U-Pb 测年表明除个别形成于晚泥盆世和志留世以外,多数含矿岩体形成于早二叠世(270~290 Ma);特别是黄山—镜儿泉成矿带的含矿岩体最多、规模最大、含矿岩相的年龄最为集中(280~285 Ma)(表 1)。

在黄山—镜儿泉成矿带内,发现了黄山、黄山东、图拉尔根等三个大型矿床,若干含矿岩体分布在北东东向、长超过 500 km,宽度仅约 50 km 的狭长地带(表 1)^[23]。特别是,前人在该带的石炭系火山岩和沉积岩中识别出糜棱岩化、拉伸线理、剪切褶皱、沉积砾石塑性拉伸、变形石香肠等韧性剪切构造;杨兴科等^[71]将其称为“秋格明塔什—黄山巨型韧性剪切带”,Wang *et al*^[72]将其称为“康古尔—黄山韧性剪切带”,是伊利—准噶尔地块与塔里木地块之间巨型的韧性剪切带的东段。陈文等^[73]根据全岩、钾长石、斜长石的 Ar-Ar 年代学研究,认为该韧性剪切带早期(300~280 Ma)以推覆剪切为主,可能与板块俯冲—碰撞过程有关,晚期(262~242 Ma)以右行走滑剪切为主,反映了碰撞后陆内走滑、抬升过程。Wang *et al*^[72]认为该带早二叠世含矿岩体为同构造侵入体,其分布可能受韧性剪切构造的控制。根据韧性剪切构造的分布范围和地质特点,特别是黄山西和黄山东岩体边缘及内部变形特征,Branquet *et al*^[74]对黄山和黄山东岩体边缘及围岩的韧性剪切构造及岩体内部的断裂构造进行了细致的分析,认为是区域性剪切作用形成的次一级张性构造为幔源岩浆上升提供了通道,并为岩浆房的形成提供了空间。Branquet *et al*^[74]的研究还表明,黄山和黄山东岩体经历的多个阶段的岩浆侵入与区域性剪切作用是同时发生的,因此形成了黄山岩体独特的“蝌蚪状”形态和黄山东岩体的“菱形”形态,以及它们向下收敛的楔形纵剖面。这些特点都有别于大陆裂谷环境形成的镁铁—超镁铁岩体的地质特征^[74]。

综上所述,黄山—镜儿泉成矿带的形成与早二叠世东天山区域性走滑构造在时间和空间上有强烈的耦合关系和密切的内在联系。

2.4 东昆仑造山带铜镍矿床的地质特征 近东西向的东昆仑造山带位于青藏高原中部,横亘于柴达木地块和松潘—甘孜地块之间^[13]。东昆仑夏日哈木超大型镍钴矿床的发现是 2000 年以来我国岩浆硫化物矿床最重要的找矿发现,不仅实现了青藏高原岩浆硫化物找矿突破,也正在改变我国岩浆硫化物矿床的地质版图。除夏日哈木矿床外,东昆仑造山带还发现了石头坑德和水仙南两个含铜镍硫化物矿化的镁铁—超镁铁岩体,它们的年龄均为 405~420 Ma,构成了一个长约 400 km 的晚古生代早期镁铁—超镁铁岩带。

夏日哈木岩体呈近东西向展布的椭圆形平缓岩盆,长约 2.4 km,宽约 1.2 km,侵位于金水口群斜长片麻岩、黑云母石英片岩或大理岩中。该岩体由超镁铁岩和镁铁岩构成,两者间呈侵入接触关系,超镁铁岩部分主要由橄榄辉岩、斜方辉石岩和二辉岩构成,矿化主要产于橄榄辉岩和斜方辉石岩相中^[13]。尽管与黄山及黄山东矿床相比,夏日哈木矿床的矿化比较集中、矿体规模较大、镍金属品位也较高,镍金属储量达到超大型规模(表 1),但在东昆仑造山带发现的含矿镁铁—超镁铁岩体数量很少,也没有发现黄山—镜儿泉成矿带那样的韧性剪切构造。虽然石头坑德和水仙南两个岩体的岩石组合与夏日哈木相似,但已发现的铜镍硫化物矿化微弱。从目前已有的资料还很难对东昆仑造山带铜镍硫化物矿床的找矿潜力进行很有说服力的判断。

3 我国岩浆铜镍硫化物矿床的启示

如前所述,我国铜镍硫化物矿床规模名列世界前茅,矿化类型多样,尤其是造山带铜镍矿床所占比例远高于世界平均水平。同时,产于大火成岩省的铜镍矿床的规模、产状等地质特征与国外同类成矿存在显著区别。这些特点是我国国土面积中造山带占比较高,稳定克拉通

占比较少的地质特点决定的,也为造山带寻找铜镍硫化物矿床提供了很好的范例。另一方面,我国发现的铂族元素矿床和铬铁矿矿床还很少,根据岩浆演化规律,通过已发现矿床地质—地球化学特征的分析,探讨铂族元素和铬铁矿矿床找矿潜力和找矿方向也是非常有意义的。

3.1 峨眉大火成岩省找矿潜力及启示 与俄罗斯西伯利亚大火成岩省相比,我国峨眉大火成岩省地处扬子地块西部,以大规模钒钛磁铁矿成矿为特色,已发现的岩浆硫化物矿床规模较小。一个可能的原因是扬子地块西部缺乏富硫地层,尽管高钛峨眉山玄武岩常常亏损铂族元素,说明其在喷出前发生过硫化物熔离^[18],力马河铜镍矿床强烈亏损铂族元素的特征表明之前发生过一次弱的硫化物熔离^[17,66],但这并不意味着多数峨眉山玄武岩浆在运移过程中能够从围岩中获得了足够导致剧烈的硫化物熔离的硫。富硫地层的缺乏使得峨眉山玄武岩浆能够经过硅酸盐矿物分离结晶达到钛铁氧化物的过饱和,从而为大规模的钒钛磁铁矿成矿创造了有利条件^[75-78]。

另一方面,高钛峨眉山玄武岩和含钒钛磁铁矿层状岩体铂族元素的亏损以及磁铁矿贫铬的特征^[18,79-80],暗示高钛玄武岩浆在侵入层状岩体或喷出地表之前,在深部已经发生过硫化物熔离和铬铁矿的分离结晶。这些硫化物和铬铁矿有可能在深部岩浆房发生聚集—成矿,金宝山大型铂族元素矿床及新街岩体下部岩相带的铂族元素矿化层的发现印证了这种推测。因此,峨眉大火成岩省内带深部仍有寻找铂族元素及铬铁矿矿化的潜力,在今后的找矿工作中应该予以重视。

3.2 金川超大型铜镍铂族元素矿床深部找矿潜力的启示 龙首山地体向北的推覆是欧亚板块碰撞的远程效应,推覆构造不仅使金川岩体出露地表,也对成矿岩浆通道系统造成了严重破坏,而且龙首山地体可能仅包含了区域成矿系统的一部分而非整体,这可能是在龙首山地体至今也没能找到“第二个金川矿床”的原因。

尽管金川岩体与北部龙首山推覆构造前缘

断裂之间的空间非常有限^[57-58],但 2000 年以来,金川集团有限公司井下深部控制过程发现 1 号矿体的西段矿体有变厚趋势,2 号矿体深部有膨缩变化现象,24 号矿体底部围岩中发现了一定规模的独立矿体,新增镍金属量大 60 万吨,充分说明金川深部仍然具有较好的找矿潜力。我们认为金川矿床西岩体的下盘方向围岩中还有可能发现较富的铜镍硫化物矿体;东岩体对应的深部岩浆房应该还有大量的硫化物残留,即向下仍有可能发现规模可观的新的矿体。当然,如何寻找和定位这个深部岩浆房还需要开展大量的地质、物探和地球化学的研究工作。

3.3 黄山—镜儿泉成矿带的找矿潜力 新疆黄山—镜儿泉成矿带含矿岩体密集分布于韧性剪切构造中说明大规模区域性走滑形成的次一级张性构造为幔源岩浆的上升提供非常好的通道。结合^[72,74]的研究结果,笔者认为当同碰撞阶段发生大规模的区域性剪切走滑时,不仅使俯冲洋壳更加容易在较浅的深度断离,也有助于软流圈地幔及交代地幔的减压熔融,更有利于幔源岩浆的上升,也在地壳内为含矿岩体的形成创造了良好的空间,从而在近 500 km 狭长的黄山—镜儿泉成矿带上形成若干含矿岩体。黄山西和黄山东岩体独特的“蝌蚪状”和“菱形”的形态也说明了岩体就位与剪切走滑空间的关系^[72,74]。黄山—镜儿泉成矿带的这些地质和地球化学特征以及区域构造背景说明,在聚合板块边界,一些特殊的地质过程也可以产生有利于大规模地幔部分熔融和岩浆硫化物成矿的条件。这为寻找与造山带有关的大型—超大型岩浆硫化物矿床提供了科学依据。值得注意的是,黄山—镜儿泉成矿带还存在大面积的戈壁覆盖区,深部具有发现新的含矿镁铁—超镁铁岩体的潜力巨大。最近在黄山东矿床以东的戈壁覆盖区已经发现了一些具有一定规模和强度的航磁异常,并在大黄山发现了具有岩浆硫化物矿化的镁铁—超镁铁岩体,笔者认为应该开展更大区域的航磁、地面物探及地质查证工作。

需要指出的是,不同的聚合板块边缘的地

质作用过程往往存在区别,要根据具体情况进行细致的分析和研究,不能一概而论。例如:东昆仑造山带夏日哈木矿床周围的围岩中没有发现明显的韧性剪切构造,说明没有发生同时代的区域性走滑,这可能是东昆仑造山带含矿镁铁—超镁铁侵入体较少的的原因。然而,夏日哈木超大型矿床的发现说明该成矿带进一步找矿潜力仍然不容忽视。

参考文献

- [1] Hoatson D M, Jaireth S, Jaques A L. Nickel sulfide deposits in Australia: Characteristics, resources, and potential. *Ore Geology Reviews*, 2006, 29(3-4): 177-241.
- [2] Naldrett A J, Magmatic sulfide deposits-geology, geochemistry and exploration. Springer Berlin Heidelberg New York, 2004, 727.
- [3] 宋谢炎,朱丹,肖家飞等. 浆通道系统与岩浆铜镍硫化物成矿研究的若干新认识. *地学前缘*, 2010, 17(1): 153-163. (Song X Y, Zhu D, Xiao J F, *et al.* New insights on the formation of magmatic sulfide deposits in magma conduit system. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(1): 153-163.)
- [4] Piña R, Romeo I, Ortega L, *et al.* Origin and emplacement of the Aguablanca magmatic Ni-Cu-(PGE)sulfide deposit, SW Iberia: A multidisciplinary approach. *Geological Society of America Bulletin*, 2010, 122: 915-925.
- [5] Maier W D, Barnes S J, Chinyepi G, *et al.* The composition of magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits in the Tati and Selebi-Phikwe belts of eastern Botswana. *Mineralium Deposita*, 2008, 43: 37-60.
- [6] Barnes S J, Makkonen H V, Dowling S E, *et al.* The 1.88 Ga Kotalahti and Vammala Nickel Belts, Finland: Geochemistry of the mafic and ultramafic metavolcanic rocks. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 2009, 81: 103-141.
- [7] Barnes S J, Osborne G A, Cook D, *et al.* The Santa Rita nickel sulfide deposit in the Fazenda Mirabela intrusion, Bahia, Brazil; Geology, sulfide geochemistry, and genesis. *Economic Geology*, 2011, 106: 1083-1110.
- [8] Song X Y, Li X R. Geochemistry of the Kalatongke Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, NW China: Implications for the formation of magmatic sulfide mineralization in a post-collisional environment. *Mineralium Deposita*, 2009, 44: 303-327.
- [9] 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. *Lithos*, 2011, 127: 128-139.
- [10] Qin K Z, Su B X, Sakyi P A, *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): Constraints on a ca. 280 Ma mantle plume. *American Journal of Science*, 2011, 311: 237-260.
- [11] Xie W, Song X Y, Chen L M, *et al.* Geochemistry insights on the genesis of the subduction-related heishan magmatic Ni-Cu-(PGE) deposit in Gansu, NW China, at the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt. *Economic Geology*, 2014, 109: 1563-1583.
- [12] Xie W, Song X Y, Deng Y F, *et al.* Geochemistry and petrogenetic implications of a Late Devonian mafic-ultramafic intrusion at the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 2012, 144-145: 209-230.
- [13] Song X Y, Yi J N, Chen L M, *et al.* The giant xiarihamu Ni-Co sulfide deposit in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibet Plateau, China. *Economic Geology*, 2016, 111: 29-55.
- [14] Li C, Zhang Z, Li W, *et al.* Geochronology, petrology and Hf-S isotope geochemistry of the newly discovered Xiarihamu magmatic Ni-Cu sulfide deposit in the Qinghai-Tibet plateau, western China. *Lithos*, 2015, 216 - 217: 224-240.
- [15] Zhou M F, Arndt N T, Malpas J, *et al.* Two magma series and associated ore deposit types in

- the Permian Emeishan large igneous province, SW China. *Lithos*, 2008, 103: 352–368
- [16] Song X Y, Zhou M F, Keays R R, *et al.* Geochemistry of the Emeishan flood basalts at Yangliuping, Sichuan, SW China: Implication for sulfide segregation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006b, 152: 53–74.
- [17] Song X Y, Zhou M F, Tao Y, *et al.* Controls on the metal compositions of magmatic sulfide deposits in the Emeishan large igneous province, SW China. *Chemical Geology*, 2008, 253: 38–49.
- [18] Song X Y, Keays R R, Long X, *et al.* Platinum-group element geochemistry of the continental flood basalts in the central Emeishan Large Igneous Province, SW China. *Chemical Geology*, 2009a, 262: 246–261.
- [19] Wang C Y, Zhou M F. Genesis of the Permian Baimazhai magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, Yunnan, SW China. *Mineralium Deposita*, 2006, 41: 771–783.
- [20] 张传林, 周刚, 王洪燕等. 塔里木和中亚造山带西段二叠纪大火成岩省的两类地幔源区. *地质通报*, 2010, 29(6): 779–790. (Zhang C L, Zhou G, Wang H Y, *et al.* A view on two types of mantle domains of Permian large igneous province in Tarim and western section of the Central Asian Orogenic Belt. *Geological Bulletin of China*, 29(6): 779–790.)
- [21] 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. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2010, 160: 407–425.
- [22] 杨思思, 苏尚国, 侯建光等. 内蒙古温根 C 区基性—超基性侵入岩岩石学、矿物学特征. *中国矿业*, 2014, 23(S1): 119–128. (Yang S S, Su S G, Hou J G, *et al.* Petrology and geochemistry of the western zone C basic-ultrabasic intrusion, Inner Mongolia. *China Mining Magazine*, 2014, 23(S1): 119–128.)
- [23] Song X Y, Chen L M, Deng Y F, *et al.* Syn-collisional tholeiitic magmatism induced by asthenosphere upwelling due to slab detachment at the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society, London*, 2013a, 170: 941–950.
- [24] Yang S H, Zhou M F. Geochemistry of the 430-Ma Jinbulake mafic-ultramafic intrusion in Western Xinjiang, NW China: Implication for subduction related magmatism in the South Tianshan orogenic belt. *Lithos*, 2009, 113: 259–273.
- [25] 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: Evidence from trace element geochemistry, Re-Os, Sr-Nd, zircon Hf-O, and sulfur isotopes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 49: 145–160.
- [26] Zhang Y, Yuan C, Sun M, *et al.* Permian doleritic dikes in the Beishan Orogenic Belt, NW China: Asthenosphere-lithosphere interaction in response to slab break-off. *Lithos*, 2015, 233: 174–192.
- [27] Zhang M J, Li C, Fu P, *et al.* The Permian Huangshanxi Cu-Ni deposit in western China: Intrusive-extrusive association, ore genesis, and exploration implications. *Mineralium Deposita*, 2011, 46: 153–170.
- [28] Li C, Zhang M J, Fu P, *et al.* The Kalatongke magmatic Ni-Cu deposits in the Central Asian Orogenic Belt, NW China: Product of slab window magmatism? *Mineralium Deposita*, 2012, 47: 51–67.
- [29] 汤中立, 钱壮志, 姜常义等. 中国镍铜铂岩浆硫化物矿床与成矿预测. *地质出版社*, 2006, 304. (Tang Z L, Qian Z Z, Jiang C Y, *et al.* Magmatic sulfide Ni-Cu-PGE deposits and metallogenic processes in China. Geological Publication House, Beijing, 2006, 304.)
- [30] 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): Principal characteristics and ore-forming processes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32: 184–203.
- [31] Song X Y, Keays R R, Zhou M F, *et al.* Siderophile and chalcophile elemental constraints

- on the origin of the Jinchuan Ni-Cu-(PGE)sulfide deposit, NW China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009b, 73: 404—424.
- [32] Li X H, Su L, Chung S L, *et al.* Formation of the Jinchuan ultramafic intrusion and the world's third largest Ni-Cu sulfide deposit; Associated with the ~825 Ma south China mantle plume? *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2005, 6: 1—16.
- [33] Zhang M, Kamo S L, Li C, *et al.* Precise U-Pb zircon-baddeleyite age of the Jinchuan sulfide ore-bearing ultramafic intrusion, western China. *Mineralium Deposita*, 2010, 45: 3—9.
- [34] Song X Y, Zhou M F, Cao Z M, *et al.* Ni-Cu-(PGE) magmatic sulfide deposits in the Yangliuping area, Permian Emeishan igneous province, SW China. *Mineralium Deposita*, 2003, 38: 831—843.
- [35] 宋谢炎, 张成江, 胡瑞忠等. 峨眉火成岩省岩浆矿床成矿作用与地幔柱动力学过程的耦合关系. *矿物岩石*, 2005, 25(4): 35—44. (Song X Y, Zhang C J, Hu R Z, *et al.* Genetic linkage of magmatic deposits in the Emeishan Large Igneous Province with dynamics of mantle plume. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2005, 25(4): 35—44.)
- [36] Sun X, Wang S, Sun W, *et al.* PGE geochemistry and Re-Os dating of massive sulfide ores from the Baimazhai Cu-Ni deposit, Yunnan province, China. *Lithos*, 2006, 105: 12—24.
- [37] 韩宝福, 季建清, 宋 彪等. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁—超镁铁杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *科学通报*, 2004, 49(22): 2324—2328. (Han B F, Ji J Q, Song B, *et al.* SRIMP zircon U-Pb ages and geological significances of the Ni-Cu mineralized Kalatongke and Huangshandong mafic-ultramafic intrusions, Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(22): 2324—2328.)
- [38] 三金柱, 秦克章, 汤中立等. 东天山图拉尔根大型铜镍矿区两个镁铁—超镁铁岩体的锆石 U-Pb 定年及其地质意义. *岩石学报*, 2010, 26(10): 3027—3035. (San J Z, Qin K Z, Tang Z L, *et al.* Precise zircon U-Pb age dating of two mafic ultramafic complexes at Tulaergen larg Cu-Ni district and its geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(10): 3027—3035.)
- [39] 冯宏业, 许英霞, 秦克章等. 东天山圪塔山口镁铁—超镁铁质岩体地球化学、锆石 U-Pb 年代学及其对 Ni-Cu 成矿的指示. *岩石学报*, 2014, 30(6): 1558—1574. (Feng H Y, Xu Y X, Qin K Z, *et al.* Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of Getashankou mafic-ultramafic intrusions, eastern Tianshan, and its implication for Ni-Cu mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(6): 1558—1574.)
- [40] Han C M, Xiao W J. SIMS U-Pb zircon dating and Re-Os isotopic analysis of the Hulu Cu-Ni deposit, eastern Tianshan, Central Asian Orogenic Belt, and its geological significance. *Journal of Geosciences*, 2013, 58: 251—270.
- [41] Zhao Y, Xue C, Zhao X, *et al.* Magmatic Cu-Ni sulfide mineralization of the Huangshannan mafic-ultramafic intrusion, Eastern Tianshan, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 105: 155—172.
- [42] Zhou M F, Leshner C M, Yang Z X, *et al.* Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, Eastern Xinjiang, Northwest China; Implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt. *Chemical Geology*, 2004, 209: 233—257.
- [43] 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志等. 关于东天山花岗岩与陆壳垂向增生的若干认识. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1103—1120. (Gu L X, Zhang Z Z, Wu C Z, *et al.* Some problems on granites and vertical growth of the continental crust in the eastern Tianshan Mountains, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1103—1120.)
- [44] 秦克章, 方同辉, 王书来等. 东天山板块构造分区、演化与成矿地质背景研究. *新疆地质*, 2002, 20(4): 302—308. (Qin K Z, Fang T H, Wang S L, *et al.* Plate tectonics division, evolution and metallogenic settings in eastern Tianshan mountains, NW China. *Xinjiang Geology*, 2002, 20(4): 302—308.)
- [45] Han C M, Xiao W J, Zhao G C, *et al.* In-situ U-Pb, Hf and Re-Os isotopic analyses of the

- Xiangshan Ni-Cu-Co deposit in Eastern Tianshan (Xinjiang), Central Asia Orogenic Belt: Constraints on the timing and genesis of the mineralization. *Lithos*, 2010, 120: 547–562.
- [46] Sun T, Qian Z Z, Li C, *et al.* Petrogenesis and economic potential of the Erhongwa mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, NW China: Constraints from olivine chemistry, U-Pb age and Hf isotopes of zircons, and whole-rock Sr-Nd-Pb isotopes. *Lithos*, 2013, 182–183: 185–199.
- [47] 王亚磊, 张照伟, 尤敏鑫等. 东天山白鑫滩铜镍矿锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及对 Ni-Cu 找矿的启示. *中国地质*, 2015, 42(3): 452–467. (Wang Y L, Zhang Z W, You M X, *et al.* Chronological and geochemical characteristics of the Baixintan Ni-Cu deposit in Eastern Tianshan Mountains, Xinjiang, and their implications for Ni-Cu mineralization. *Geology in China*, 2015, 42(3): 452–467.)
- [48] 李锦轶, 宋 彪, 王克卓等. 东天山吐哈盆地南缘二叠纪幔源岩浆杂岩: 中亚地区陆壳垂向生长的地质记录. *地球学报*, 2006, 27(5): 424–446. (Li J T, Song B, Wang K Z, *et al.* Permian mafic-ultramafic complexes on the southern margin of the Tu-Ha basin, East Tianshan mountains: Geological records of vertical crustal growth in Central Asia. *Acta Geoscientica Sinica*, 2006, 27(5): 424–446.)
- [49] 毛启贵, 肖文交, 韩春明等. 新疆东天山白石泉铜镍矿床基性—超基性岩体锆石 U-Pb 同位素年龄、地球化学特征及其对古亚洲洋闭合时间的制约. *岩石学报*, 2006, 22(1), 153–162. (Mao Q G, Xiao W J, Han C M, *et al.* Zircon U-Pb age and the geochemistry of the Baishiquan mafic-ultramafic complex in the Eastern Tianshan, Xinjiang province: Constrains on the closure of the Paleo-Asian Ocean. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(1), 153–162.)
- [50] 唐冬梅, 秦克章, 孙 赫等. 天宇铜镍矿床的岩相学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征: 对东疆镁铁—超镁铁岩体源区和成因的制约. *岩石学报*, 2009, 25(4): 817–831. (Tang D M, Qin K Z, Sun H, *et al.* Lithological, chronological and geochemical characteristics of Tianyu Cu-Ni deposit: Constrains on source and genesis of mafic-ultramafic intrusions in eastern Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(4): 817–831.)
- [51] Yang S H, Zhou, M F. Geochemistry of the ~430 Ma Jingbulake mafic-ultramafic intrusion in Western Xinjiang, NW China: Implication for subduction related magmatism in the South Tianshan orogenic belt. *Lithos*, 2009, 113: 259–273.
- [52] 李华芹, 陈富文, 梅玉萍等. 新疆坡北基性—超基性岩带 I 号岩体 Sm-Nd 和 SHRIMP U-Pb 同位素年龄及其地质意义. *矿床地质*, 2006, 25(4): 463–469. (Li H X, Chen F W, Mei Y P, *et al.* Isotopic ages of No. 1 intrusive body in Pobei mafic-ultramafic belt of Xinjiang and their geological significance. *Mineral Deposits*, 2006, 25(4): 463–469.)
- [53] 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: Implications for late Paleozoic tectonic evolution of the southern Altaids. *Gondwana Research*, 2010, 18: 466–478.
- [54] Wu F Y, Wilde S A, Zhang G L, *et al.* Geochronology and petrogenesis of the post-orogenic Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic complexes in Jilin Province, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 23, 781–797.
- [55] Wei B, Wang CY, Li C, *et al.* Origin of PGE-depleted Ni-Cu sulfide mineralization in the Triassic Hongqiling No.7 Orthopyroxenite Intrusion, Central Asian Orogenic Belt, Northeastern China. *Economic Geology*, 2013, 103: 1813–1831.
- [56] Song X Y, Zhou M F, Wang Y C, *et al.* Role of crustal contamination in formation of the Jinchuan intrusion and its world-class Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, Northwestern China. *International Geology Review*, 2006a, 48: 1113–1133.
- [57] 汤中立, 李文渊. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比. 北京: 地质出版社, 1995, 209. (Tang Z L, Li W Y. Mineralisation model

- and geology of the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit bearing PGE. Beijing: Geological Publishing House, 1995, 209.)
- [58] Song X Y, Danyushevsky L V, Keays R R, *et al.* Structural, lithological, and geochemical constraints on the dynamic magma plumbing system of the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, NW China. *Mineralium Deposita*, 2012, 47: 277–297.
- [59] Chen L M, Song X Y, Keays R R, *et al.* Segregation and Fractionation of Magmatic Ni-Cu-PGE Sulfides in the Western Jinchuan Intrusion, Northwestern China: Insights from Platinum Group Element Geochemistry. *Economic Geology*, 2013, 108: 1793–1811.
- [60] Su S, Li C, Zhou M F, *et al.* Controls on variations of platinum-group element concentrations in the sulfide ores of the Jinchuan Ni-Cu deposit, Western China. *Mineralium Deposita*, 2008, 43: 609–622.
- [61] Chen L M, Song X Y, Danyushevsky L V, *et al.* A laser ablation ICP-MS study of platinum-group and chalcophile elements in base metal sulfide minerals of the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, NW China. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65: 955–967.
- [62] Zhou M F, Malpas J, Song X Y, *et al.* A temporal link between the Emeishan Large Igneous Province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction. *Earth Planetary Science Letters*, 2002, 196: 113–122.
- [63] Zhong H, Campbell I H, Zhu W G, *et al.* Timing and source constraints on the relationship between mafic and felsic intrusions in the Emeishan large igneous province. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75: 1374–1395.
- [64] Zhong H, Hu R Z, Wilson A H, *et al.* Review of the link between the Hongge layered intrusion & Emeishan flood basalts, Southwest China. *International Geology Review*, 2005, 47: 971–985.
- [65] Wang C Y, Zhou M F. Genesis of the Permian Baimazhai magmatic Ni-Cu-(PGE) sulphide deposit, Yunnan, SW China. *Mineralium Deposita*, 2006, 41: 771–783.
- [66] Tao Y, Li C, Song X Y, *et al.* Mineralogical, petrological, and geochemical studies of the Limahé mafic-ultramafic intrusion and associated Ni-Cu sulfide ores, SW China. *Mineralium Deposita*, 2008, 43: 849–872.
- [67] Zhong H, Yao Y, Prevec S A, *et al.* Trace-element & Sr-Nd isotopic geochemistry of the PGE-bearing Xinjie layered intrusion in SW China. *Chemical Geology*, 2004, 203: 237–252.
- [68] Yu S Y, Song X Y, Chen L M. Postdated melting of subcontinental lithospheric mantle by the Emeishan mantle plume: evidence from the Anyi Intrusion, Yunnan, SW China. *Ore Geology Reviews*, 2014, 57: 560–573.
- [69] Wang C Y, Zhou M F, Keays R R. Geochemical constraints on the origin of the Permian Baimazhai mafic-ultramafic intrusion, SW China. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2006, 152: 309–321.
- [70] Zhang Z C, Mao J W, Chai F M, *et al.* Geochemistry of the Permian Kalatongke mafic intrusions, Northern Xinjiang, Northwest China: Implications for the genesis of magmatic Ni-Cu sulfide deposits. *Economic Geology*, 2009, 104: 185–203.
- [71] 杨兴科, 张连昌, 姬金生等. 东天山秋格明塔什—黄山韧性剪切带变形特征分析. *西安工程学院学报*, 1998, 20(3): 11–18. (Yang X K, Zhang L C, Ji J S, *et al.* Analysis of Deformation features of Qiugamintashi-Huangshan ductile sheara zone, Eastern Tianshan. *Journal of Xi'an Engineering University*, 1998, 20(3): 11–18.)
- [72] Wang B, Cluzel D, Jahn B M, *et al.* Late Paleozoic pre- and syn-kinematic plutons of the Kangguer-Huangshan shear zone: Inference on the tectonic evolution of the Eastern Chinese North Tianshan. *American Journal of Science*, 2014, 314: 43–79.
- [73] 陈文, 孙枢, 张彦等. 新疆东天山秋格明塔什—黄山韧性剪切带⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学研究. *地质学报*, 2005, 79(6): 790–804. (Chen W, Sun S, Zhang Y, *et al.* ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of the Qiugemingtashi-Huangshan ductile sheara zone in East Tianshan, Xinjiang, NW China. *Acta Geological Sinica*, 2005, 79(6): 790–804.)

- [74] Branquet Y, Gumiaux C, Sizaret S, *et al.* Synkinematic mafic/ultramafic sheeted intrusions: Emplacement mechanism and strain restoration of the Permian Huangshan Ni-Cu ore belt (Eastern Tianshan, NW China). *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 56: 240–257.
- [75] Song X Y, Qi H W, Hu R Z, *et al.* Thick Fe-Ti oxide accumulation in layered intrusion and frequent replenishment of fractionated mafic magma: evidence from the Panzhihua intrusion, SW China. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14(3): 712–732.
- [76] Zhang X Q, Song X Y, Chen L M, *et al.* Fractional crystallization and the formation of thick Fe-Ti oxide stratiform in the Baima layered intrusion, SW China. *Ore Geology Reviews*, 2012, 49: 96–108.
- [77] Bai Z J, Zhong H, Naldrett A J, *et al.* Whole-rock and mineral composition constraints on the genesis of the giant Hongge Fe-Ti-V oxide deposit in the Emeishan Large Igneous Province, Southwest China. *Economic Geology*, 2012, 107: 507–524.
- [78] She Y W, Yu S Y, Song X Y, *et al.* The formation of P-rich Fe-Ti oxide ore layers in the Taihe layered intrusion, SW China: Implications for magma-plumbing system process. *Ore Geology Reviews*, 2014, 57: 539–559.
- [79] Chen L M, Song X Y, Yu S Y, *et al.* Controls on trace element partitioning among co-crystallizing minerals: Evidence from the Panzhihua layered intrusion, SW China. *American Mineralogists*, 2017, 102: 1006–1020.
- [80] She Y W, Song X Y, Chen L M, *et al.* Platinum-group element geochemistry of the layered intrusions in the Emeishan Large Igneous Province, SW China: Implication for the principle controls on magmatic sulfide immiscibility. *American Journal of Sciences*, 2017, 317: 483–513.

(责任编辑 吴劲薇)