

青海德尔尼铜(锌钴)矿床 Re-Os 年龄及地质意义

焦建刚¹, 鲁浩², 孙亚莉³, 黄喜峰¹, 段俊¹

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054;
3. 中国科学院 广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 东昆仑德尔尼大型铜(锌钴)矿是赋存在蛇绿岩中的块状硫化物矿床, 8件块状硫化物矿石的 Re-Os 同位素等时线年龄为(295.5 ± 7.2) Ma, 略小于矿区玄武质熔岩的锆石 U-Pb 平均年龄(308.2 ± 4.9) Ma, 矿床形成于晚石炭世—早二叠世, 属于阿尼玛卿洋盆扩张期。成矿时代早于矿区北部印支期花岗岩, 证明德尔尼矿床的成因与印支期花岗岩无直接关系。矿石结构、矿物组合和岩石地球化学研究指示, 矿床为海底喷流沉积—热液叠加成矿, 具有类似于塞浦路斯型块状硫化物矿床的构造背景和矿物组合特征。矿区及外围填图发现, 德尔尼铜矿体主要产出在角砾状蛇纹岩中, 部分位于蛇纹岩与含碳铁硅质岩之间, 这种特殊的赋矿层位可能与晚古生代特提斯洋的快速扩张、岩浆补给少、变质橄榄岩迅速抬升有关。

关键词: 块状硫化物矿床; Re-Os 同位素定年; 蛇绿岩; 德尔尼; 东昆仑

中图分类号: P618.41

文献标志码: A

文章编号: 1000-8527(2013)03-0577-08

Re-Os Dating for Derni Cu(Zn-Co) Ore Deposit in Qinghai Province , China and Its Geological Implication

JIAO Jian-gang¹, LU Hao², SUN Ya-li³, HUANG Xi-feng¹, DUAN Jun¹

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Xi'an Institute of Geology and Mineral Resource, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

3. Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract: Derni massive sulfide Cu(Zn-Co) deposit is mainly wrapped by ophiolite in East Kunlun Mountains, and 8 massive sulfide ores give an isochronal age of (295.5 ± 7.2) Ma by Re-Os isotope, which is a little later than zircon U-Pb age (308.2 ± 4.9) Ma of the basalt in the mining area. The diagenesis and metallogenic epoch is between Late Carboniferous and Early Permian. It is older than the Indo-Chinese epoch granite in the north side of the mining area, suggesting no direct genesis relationship between granite and Derni Cu(Zn-Co) ore deposit. According to the texture and structure of the ores, mineral compositions and various geochemistry data, the genesis of Derni Cu(Zn-Co) ore deposit can be summarized as submarine exhalation-sedimentary mineralization and experienced later hydrothermal superimposition, which is similar to Cyprus-type VMS deposit by tectonic setting and mineral compositions. From mapping and borehole logging, the main ore bodies of Derni Cu(Zn-Co) ore deposit lay in brecciaous serpentinite or between brecciaous serpentinite and carbonaceous Fe-Si rock, which is different from any other VMS deposits in the world, and the special phenomenon may be caused by quick spreading of Late Paleozoic Tethyan middle ocean ridge, lack of enough mafic magma replenishment, accompanied by rapid ascending of meta-peridotite.

Key words: massive sulfide deposit; Re-Os isotope dating; ophiolite; Derni; East Kunlun Mountains

收稿日期: 2012-07-07; 改回日期: 2012-10-07; 责任编辑: 戚开静。

基金项目: 国家自然科学基金项目“甘肃龙首山地区与铜镍成矿有关的幔源岩浆事件重建”(41072058); 国土资源部公益性行业科研专项(200911007, 201011058)。

作者简介: 焦建刚, 男, 副教授, 1976年出生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事矿床地质方面的教学与科研工作。

Email: jiangang@chd.edu.cn。

0 引言

Re-Os 同位素体系在辉钼矿定年中得到广泛应用^[1-4], 在示踪蛇绿岩和基性侵入岩的物质来源方面也得到成功应用^[5]。但是, 在无辉钼矿的矿床中, 由于 Re、Os 含量极低, 在没有更好选择的情况下, 尝试 Re-Os 同位素测年是必要和有意义的。如块状硫化物矿床的定年一直是个难题, 国内对此类矿床的成矿年龄报道也非常稀少, 地质学者一般利用与成矿有关的容矿岩石测年来限定矿床的成矿年龄。对德尔尼大型铜(锌钴)块状硫化物矿床的年代学研究, 矿区外围蛇绿岩剖面上玄武岩³⁹Ar-⁴⁰Ar 年龄为 $(345.3 \pm 7.9) \text{ Ma}$ ^[6]; 矿区钻孔中熔岩的锆石 U-Pb 年龄为 276 ~ 319 Ma, 平均年龄为 $(308.2 \pm 4.9) \text{ Ma}$ ^[7]; 宋忠宝等^[8]2009 年根据块状硫化物矿石全岩 Re-Os 成矿模式年龄提出 310.9 ~ 314.3 Ma 为成矿时代, 279 ~ 282 Ma 为成矿叠加时代; 王永标等^[9]2003 年根据化石确定的矿区地层主要为下二叠统千枚状板岩夹砂岩; 矿区大比例尺地质填图显示块状硫化物矿体主要包含在超基性岩中, 而千枚状板岩夹砂岩是上覆地层, 德尔尼矿床的成矿时代应该介于下二叠统与蛇绿岩形成时代之间。到目前为止, 该矿床的成矿时代一直没有定论。另外, 与火山有关的块状硫化物矿床(VMS)中矿体一般赋存在喷出岩中, 而德尔尼矿床的矿体主要赋存于

超基性岩中(蛇绿岩组成部分), 这种赋存特征的成因引起了长期的争议^[10-13]。本次研究选择矿区不同类型的块状硫化物矿石进行详细鉴定, 对富黄铁矿的矿石开展 Re-Os 同位素定年尝试, 确定了矿床的成矿时代, 探讨了矿床的成因及其与蛇绿岩的关系。

1 地质背景

德尔尼铜(锌钴)矿床位于巴颜喀拉褶皱系阿尼玛卿褶皱带东段的阿尼玛卿前缘大断裂北侧, 阿尼玛卿超基性岩带东段的德尔尼超基性岩体中部。阿尼玛卿超基性岩带呈 NW 或 NWW 向狭长带状, 长约 300 km, 由近百个岩体组成(图 1)。这些岩体呈长条状、透镜状, 或互相平行, 或互相衔接, 断续延伸, 岩体规模大小不一, 相差悬殊。以往研究普遍认为阿尼玛卿超基性岩带具蛇绿岩组合特征, 微量元素判别图证明其形成于洋中脊构造环境^[5, 7], 因此, 称其为阿尼玛卿混杂岩带。其中最大的德尔尼超基性岩体长约 17 km, 宽 200 ~ 1 000 m, 沿近北西向的断裂带分布。岩性以斜辉辉橄岩为主, 次为纯橄岩、辉石岩, 岩石均已蛇纹石化。岩体的围岩为千枚状板岩夹砂岩, 前人根据古生物地理学成果确定其为下二叠统^[9]。且在超基性岩体与千枚状板岩的内接触带常出现宽度不等的片理化蛇纹岩带, 未见烘烤变质现象, 反映岩体呈构造冷侵位产出。

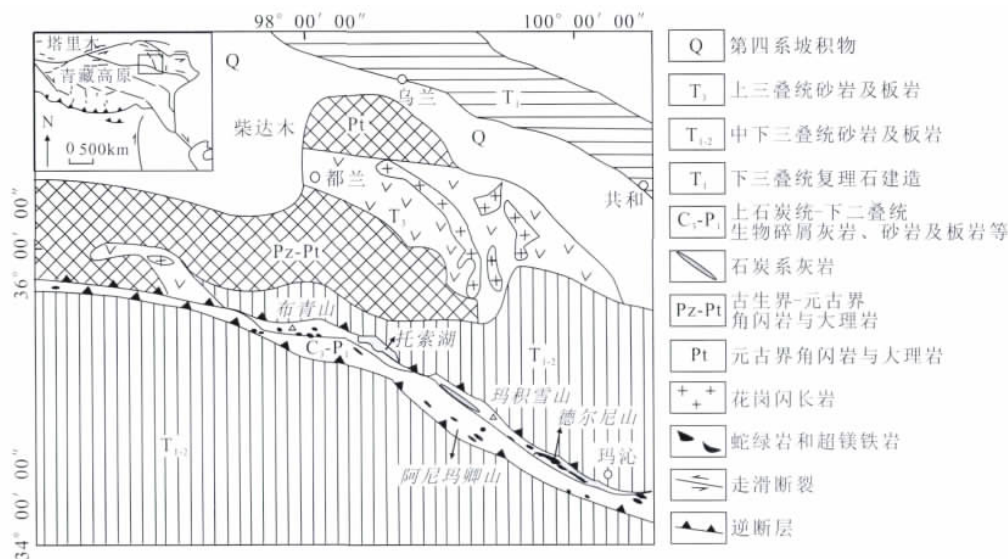


图 1 阿尼玛卿混杂岩带地质略图(据 Yang 等^[14], 2004 修编)

Fig. 1 Geological sketch map of the Animaqing ophiolite belt
(modified after Yang et al^[14], 2004)

2 矿床地质

德尔尼铜(锌钴) 矿床为一个含多种有用组分的综合性矿床, 铜、钴、硫分别达到大型规模, 锌达到中型规模。其中铜金属量 5.45×10^5 t, 平均品位 1.03% ~ 1.48%; 钴金属量 2.85×10^4 t, 平均品位 0.005 4% ~ 0.092%; 锌金属量 1.47×10^5 t, 平均品位为 0.93% ~ 2.21%; 硫 1.46×10^7 t, 平均品位为 31.39% ~ 33.48%, 并伴生 Au、Ag、Se 等多种有益组分^[10]。矿区内主矿体为 I、II、III、V、VII(图 2, 图 3), 各主矿体周围都赋存有埋藏不深的小隐伏矿体, 共 22 个。矿体具有透镜状或似层状, 因受后期构造影响, 呈现出褶皱形态(图 4)。矿体大部分直接产在超基性岩的角砾状蛇纹岩带中, 部分产在超基性岩体紧邻的

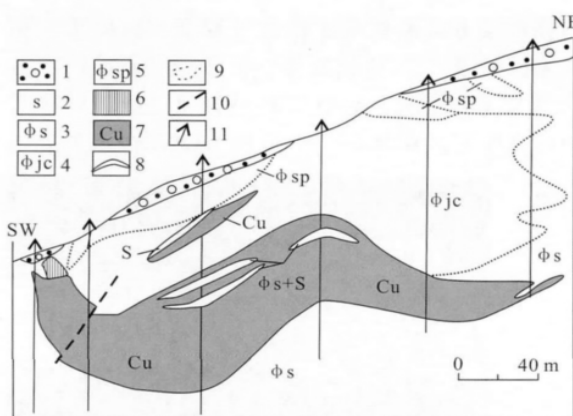


图 4 德尔尼铜(锌钴) 矿床 I 号矿体西段的剖面图
(据章午生^[15], 1995, 修编)

Fig. 4 Section map of No. I ore body in Dorni Cu(Zn-Co) ore deposit (modified after Zhang^[15], 1995)

1. 第四系坡积物; 2. 板岩; 3. 蛇纹岩; 4. 碳酸盐角砾状蛇纹岩; 5. 片状蛇纹岩; 6. 铁帽; 7. 铜锌钴矿石; 8. 蛇纹岩与板岩夹石; 9. 地质界线; 10. 断层; 11. 钻孔

含碳铁硅质岩中, 矿体与围岩界线截然。矿体附近常见的蚀变类型有: 碳酸盐化、蛇纹石化、滑石化、绿泥石化、钠闪石化和硅化。其中以碳酸盐化和蛇纹石化最为发育, 且与矿化有一定的空间关系。

德尔尼矿床的矿石组分较简单, 原生矿石中最主要的矿物为黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、磁黄铁矿、磁铁矿, 含少量的方铅矿、钴镍黄铁矿等。矿石组构主要为块状构造, 其次为条带状、浸染状、角砾状构造等; 半自形—它形粒状结构为主, 粒度一般小于 0.1 mm, 其次有充填、网状、交代残余结构等。原生矿石主要为块状和条带状含铜黄铁矿矿石, 构成矿体的主体部分, 其中黄铁矿 80% ~ 90%、磁黄铁矿 5%、磁铁矿 2%、黄铜矿 1% ~ 2%、闪锌矿 0.5% ~ 2% (图 5), 具有海底喷流沉积的矿石构造特征。块状含铜黄铁矿矿石主要分布在矿体上部, 条带状(含角砾条带状) 含铜黄铁矿矿石主要分布在矿体的下半部以及两端尖灭部位。浸染状、角砾状及氧化矿石分布不广, 主要存在于矿体边部^[4]。

3 Re-Os 同位素样品选择与测试结果

目前, 对岩浆矿床中块状矿石 Re-Os 同位素定年已经有成功实例, 如金川和 Voisey's Bay 铜镍硫化物矿床^[16-17]。热液矿床中 Re-Os 同位素测试

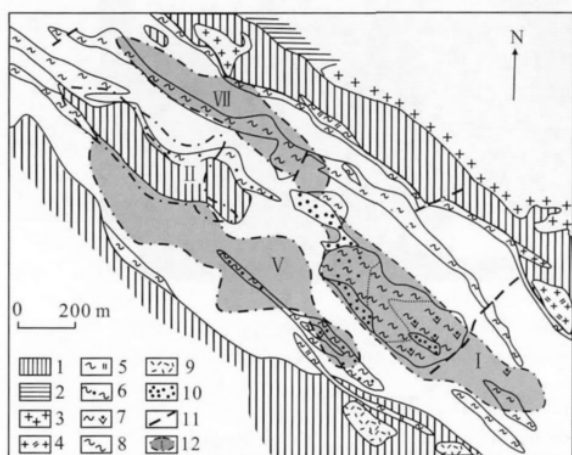


图 2 德尔尼铜(锌钴) 矿床矿区地质略图
(据章午生^[10], 1981)

Fig. 2 Geological map of Dorni Cu(Zn-Co) ore deposit (after Zhang^[10], 1981)

1. 下二叠统, 千枚状含碳板岩、千枚岩夹砂岩偶夹变火山岩层;
2. 大理岩、结晶灰岩夹角闪片岩层; 3. 花岗岩; 4. 花岗闪长岩;
5. 硅化、碳酸盐化蛇纹岩; 6. 碳酸盐角砾状蛇纹岩; 7. 碳酸盐化蛇纹岩; 8. 片状蛇纹岩; 9. 变安山岩; 10. 铁帽; 11. 断层; 12. 矿体水平投影及矿体编号

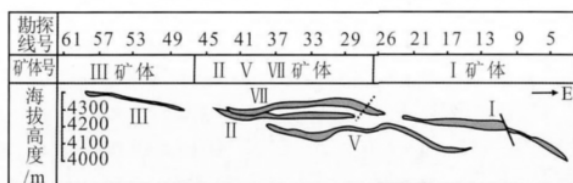


图 3 德尔尼铜(锌钴) 矿床 I、II、III、V、VII 号矿体投影图
(据章午生^[10], 1981)

Fig. 3 Vertical projecting map of the main ore bodies in Dorni Cu(Zn-Co) ore deposit (after Zhang^[10], 1981)

黄铁矿或者黄铜矿单矿物也得到了与地质事实相吻合的结果^[18]。块状硫化物矿床没有别的可靠方法确定成矿年龄,地质学者只有通过围岩的成岩时代来限定成矿年龄,但这种方法存在很多的不

确定性。虽然,块状硫化物矿床中 Re、Os 含量非常低,Re-Os 同位素测年受到限制,但是本矿床中有大量的黄铁矿,可能是 Re-Os 同位素定年的一种较好选择。

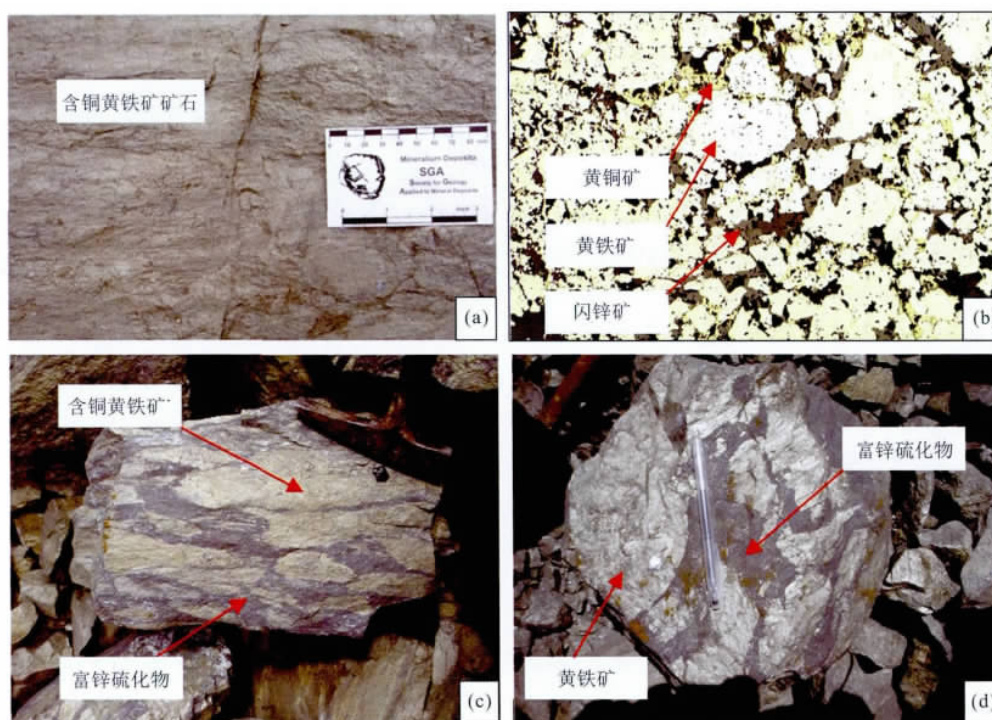


图5 德尔尼铜(锌钴)矿床中块状硫化物矿石宏观与微观照片

Fig. 5 Mineralogy of ores and massive sulfide ores in Dorni Cu (Zn-Co) ore deposit

表1 德尔尼铜(锌钴)矿床块状硫化物 Re-Os 同位素分析结果

Table 1 Re-Os isotopic results of massive sulfide ores in Dorni Cu (Zn-Co) deposit

| 样号 | 样重/g | Re $\pm 2\sigma/10^{-9}$ | ¹⁸⁷ Re $\pm 2\sigma/10^{-9}$ | NOs $\pm 2\sigma/10^{-9}$ | ¹⁸⁸ Os $\pm 2\sigma/10^{-9}$ |
|------|---|---|--|--|---|
| DN-1 | 1.011 \pm 4 | 50.53 \pm 0.25 | 31.76 \pm 0.16 | 0.317 7 \pm 0.001 6 | 0.041 8 \pm 0.000 20 |
| DN-2 | 1.006 \pm 8 | 50.23 \pm 0.31 | 31.57 \pm 0.20 | 0.320 1 \pm 0.002 0 | 0.042 1 \pm 0.000 30 |
| DN-3 | 1.500 \pm 9 | 25.41 \pm 0.10 | 15.97 \pm 0.06 | 0.132 2 \pm 0.001 0 | 0.017 4 \pm 0.000 10 |
| DN-4 | 1.492 \pm 3 | 25.58 \pm 0.15 | 16.08 \pm 0.10 | 0.128 2 \pm 0.001 1 | 0.016 8 \pm 0.000 10 |
| DN-5 | 1.011 \pm 5 | 145.60 \pm 0.35 | 91.51 \pm 0.22 | 2.125 0 \pm 0.038 0 | 0.279 4 \pm 0.005 10 |
| DN-6 | 1.001 \pm 5 | 145.52 \pm 0.36 | 91.47 \pm 0.23 | 2.141 0 \pm 0.020 0 | 0.281 5 \pm 0.002 70 |
| DN-7 | 1.001 \pm 7 | 64.68 \pm 0.19 | 40.66 \pm 0.12 | 0.083 6 \pm 0.001 2 | 0.011 0 \pm 0.000 2 |
| DN-8 | 0.995 \pm 2 | 64.63 \pm 0.14 | 40.62 \pm 0.09 | 0.079 1 \pm 0.000 2 | 0.010 4 \pm 0.000 02 |
| 样号 | T ¹⁸⁷ Os $\pm 2\sigma/10^{-9}$ | R ¹⁸⁷ Os $\pm 2\sigma/10^{-9}$ | ¹⁸⁷ Re/ ¹⁸⁸ Os $\pm 2\sigma$ | ¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os $\pm 2\sigma$ | |
| DN-1 | 0.124 7 \pm 0.001 0 | 0.118 6 \pm 0.001 0 | 764.53 \pm 5.34 | 3.001 2 \pm 0.028 0 | |
| DN-2 | 0.126 7 \pm 0.001 2 | 0.120 6 \pm 0.001 2 | 754.36 \pm 6.71 | 3.028 2 \pm 0.035 4 | |
| DN-3 | 0.070 8 \pm 0.000 2 | 0.068 2 \pm 0.000 2 | 923.91 \pm 7.83 | 4.092 3 \pm 0.033 9 | |
| DN-4 | 0.069 9 \pm 0.000 7 | 0.067 4 \pm 0.000 7 | 959.45 \pm 9.81 | 4.169 2 \pm 0.054 9 | |
| DN-5 | 0.180 2 \pm 0.002 5 | 0.139 1 \pm 0.001 8 | 329.32 \pm 6.03 | 0.648 3 \pm 0.014 9 | |
| DN-6 | 0.186 4 \pm 0.000 7 | 0.145 0 \pm 0.000 3 | 326.71 \pm 3.24 | 0.665 6 \pm 0.006 8 | |
| DN-7 | 0.191 2 \pm 0.001 2 | 0.189 6 \pm 0.001 2 | 3721.40 \pm 56.20 | 17.506 0 \pm 0.282 0 | |
| DN-8 | 0.192 8 \pm 0.001 7 | 0.191 2 \pm 0.001 7 | 3926.30 \pm 11.20 | 18.631 0 \pm 0.167 0 | |

注: NOs. 普通 Os; T¹⁸⁷Os. ¹⁸⁷Os 的总量; R¹⁸⁷Os. 放射成因¹⁸⁷Os。

本次研究选择不同种类的块状硫化物矿石进行 Re-Os 方法测年。样品采自德尔尼铜(锌钴) 矿床 I 号矿体露天采坑, 矿石全部为块状硫化物组成。经过 Re、Os 含量初测, 8 件样品含有相对较高的 Re ($50 \times 10^{-9} \sim 145 \times 10^{-9}$)、Os ($0.08 \times 10^{-9} \sim 2.14 \times 10^{-9}$), 可用于测年, 矿石特点是黄铁矿占 80% 以上, 其次为黄铜矿, 少量的磁黄铁矿。其余样品中黄铁矿含量小于 50%, 其次为黄铜矿、闪锌矿、磁铁矿, 因 Re、Os 含量太低, 没有测同位素。由此可见, 德尔尼块状硫化物矿床中 Re、Os 含量主要受黄铁矿控制, 黄铁矿单矿物 Re-Os 同位素测年可能是最好的选择。但是, 不同类型矿石鉴定结果显示, 黄铁矿存在多期次成因特征明显^[19], 因此, 虽然黄铁矿是这类矿床测年的最佳选择, 但是选择样品仍需要谨慎。本次研究选择富黄铁矿的块状硫化物矿石进行 Re-Os 同位素测年(图 5(a), (b)), 样品 Re、Os 测试在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成, 分析方法见 Sun 等^[20]和梁婷等^[18]文献。

德尔尼含铜黄铁矿矿石的 Re-Os 同位素测试结果列于表 1, 利用 ISOPLOT 软件将 8 个样品进行等时线拟合, 获得德尔尼矿床较为一致的 Re-Os 同位素等时线年龄为 (295.5 ± 7.2) Ma(图 6), 平均权重方差值(MSWD) 为 1.8, 矿床形成于晚石炭世—早二叠世。宋忠宝等^[8] 2009 年获得的德尔尼块状硫化物矿石全岩 Re-Os 模式年龄为 310.9 ~ 314.3 Ma, 由于低 Re 含量的矿石中 Re-Os 模式年龄具有不确定性, 存在多期年龄事件。

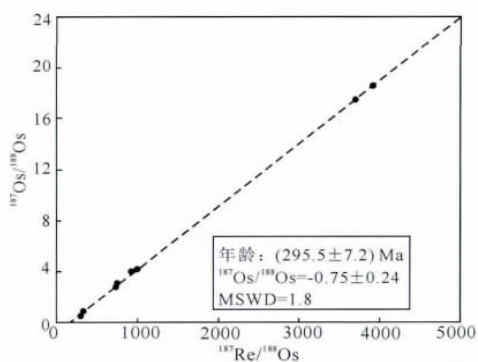


图 6 德尔尼铜(锌钴) 矿床 Re-Os 等时线年龄图

Fig. 6 Re-Os isochronic age of Derni Cu(Zn-Co) ore deposit

4 讨论

4.1 Re-Os 同位素年代学意义及物源示踪

德尔尼蛇绿岩带是古特提斯的最北缘蛇绿岩,

位于晚古生代的阿尼玛卿洋盆中, 该洋盆扩张的时限在 260 ~ 345 Ma 之间^[21-22]。德尔尼铜(锌钴) 矿床位于该蛇绿岩带中, 一般来说, 矿床的形成时代可以出现在洋盆存在、扩张活动的任何时间里。本次获得的德尔尼块状硫化物矿石的 Re-Os 同位素等时线年龄为 (295.5 ± 7.2) Ma, 滞后于矿区玄武质熔岩的锆石 U-Pb 年龄 (308.2 ± 4.9) Ma^[14], 与目前的 VMS 型矿床成矿理论吻合, 即主控 VMS 矿床的岩石层序的形成时代稍微早于或者晚于矿床的形成时代^[23]。证明矿床形成时间为晚石炭世—早二叠世, 构造背景属于阿尼玛卿洋盆开始打开期^[14]。

Re-Os 同位素体系在矿床研究中还广泛用于示踪成矿物质来源。Os 是一种相容元素, Re 是一种不相容元素。在壳幔分异和地球化学循环过程中, Os 趋于在地幔中富集, Re 相对亲地壳^[17], 因此地壳组分加入成矿体系越多, 普通 Os 含量越低, Re/Os 比值越大。在 Re/Os-Os 图中(图 7), 样品点落入 Lewisian 下地壳与富硫沉积物之间, 反映成矿物质主要来源于地壳, 与世界典型铜镍硫化物矿床明显不同, 也暗示德尔尼块状硫化物矿床不是源于地幔, 与围岩橄榄岩没有直接成因关系。

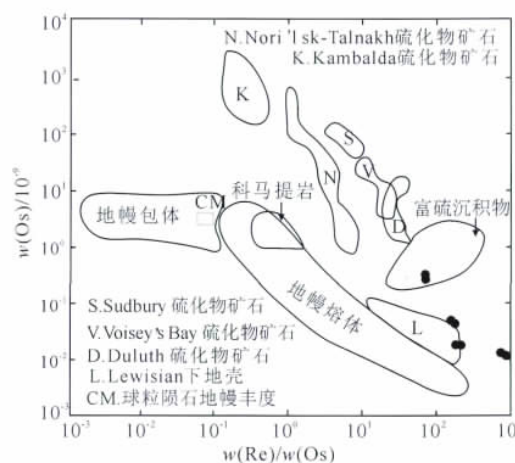


图 7 德尔尼铜(锌钴) 矿床 $w(\text{Re})/w(\text{Os})-w(\text{Os})$ 图解 (底图据 Lambert 等^[17], 1999)

Fig. 7 Diagram of Re/Os vs. Os of Derni Cu(Zn-Co) ore deposit(Base map after Lambert et al^[17], 1999)

4.2 矿床成因

德尔尼大型铜(锌钴) 矿床的成因一直是广大研究者关注的热点, 一是根据矿体产在超基性岩体中, 提出了岩浆熔离矿床成因^[10]; 二是矿床明显受构造控制, 主要沿断裂充填于超基性岩体中, 部分矿化体还赋存于辉长岩、灰岩, 以及花岗岩

与板岩的接触带热液中,由此提出了与邻近花岗岩有关的热液矿床^[11];三是根据矿石组构、矿石矿物组合及赋矿岩石的化学成分特点与块状硫化物矿床相似,提出了海底热液作用或火山喷气-沉积作用成矿(简称海底喷流沉积成矿)^[13]。近年来,越来越多的研究显示该矿床属于海底喷流沉积矿床,并伴随有海底热液叠加成矿作用,具体证据有:甄别出紧邻矿体为热水沉积成因的含碳铁硅质岩^[24];发现海底喷流沉积成因的“草莓状”黄铁矿^[25];块状硫化物矿石普遍发育角砾状、层纹状、条带状构造等沉积构造特征^[4];发现碳酸盐-石英-重晶石-石膏矿物组合^[19]; $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 $-6.15\text{‰} \sim +11.45\text{‰}$, 平均 $+6.37\text{‰}$, 可能主要来自海水,部分与热液作用有关;矿石中的方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 为 $11.32\text{‰} \sim 12.98\text{‰}$, 说明矿床形成期间的海水与洋底玄武岩裂隙中热水进行了混合^[12];脉石矿物石英和方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 分别为 $15\text{‰} \sim 45\text{‰}$ 和 $-2.013\text{‰} \sim 3.83\text{‰}$, 具有海相沉积碳酸盐的特征^[26]。

本次获得的德尔尼铜(锌钴)矿床的 Re-Os 同位素等时线年龄为 (295.5 ± 7.2) Ma, 明显早于矿区北部印支期花岗岩, 矿区也没有出现厚大的石英脉或者碳酸盐岩脉, 因此, 基本可以排除花岗岩有关的热液成因观点; 另外, 矿床中矿石矿物没有镍黄铁矿, 也不是以岩浆熔离成因的浸染状矿石为主, 而是以沉积成因的块状与条带状矿石为主, 不同于典型岩浆熔离矿床。因此, 作者比较认同德尔尼铜(锌钴)矿床为海底喷流沉积

成因。

德尔尼矿床与典型的块状硫化物成矿特征不同, 主要产出在洋中脊环境的超基性岩中, 既没有黑矿型那样产在板块汇聚边缘的火山碎屑岩中; 也不像别子型那样形成于弧前海沟的火山沉积岩系中; 更不像沙利文型赋存在陆源沉积岩中; 与产在洋中脊枕状熔岩中的塞浦路斯型块状硫化物矿床亦有差异。因此有人提出“德尔尼型”^[15]。块状硫化物矿床按成矿环境、赋矿岩石和成矿元素组合可以划分为两类: 一类是与大陆裂谷和岛弧环境长英质火山岩有关的 Cu(Pb-Zn) 矿床, 如白银厂大型铜矿床; 另一类是与洋壳环境基性火山岩有关的 Cu(Zn-Co) 矿床, 如塞浦路斯铜矿床。经过大量对比研究发现: 德尔尼矿床具有类似于塞浦路斯型块状硫化物矿床的构造背景和矿物组合特征(表 2), 都与洋脊蛇绿岩有关, 只是矿体在蛇绿岩中赋存部位不同。

4.3 矿床与蛇绿岩的关系

蛇绿岩一般指洋壳和上地幔残片, 抬升就位在大陆边缘或增生楔和岛弧等构造环境中。根据 1972 年 Penrose 会议建立了理想的蛇绿岩模型: 从下到上组成为地幔橄榄岩, 层状超基性岩和辉长岩, 片状基性岩墙, 喷出岩系列包括枕状与块状熔岩, 上面覆盖着含放射虫或燧石的石灰岩^[28], 典型的例子是塞浦路斯型蛇绿岩。蛇绿岩的典型标志是杂岩体无根、无演化相带、与围岩为构造接触关系而不是侵入关系^[29]。

前人研究认为德尔尼蛇绿岩是一个被构造肢

表 2 德尔尼与塞浦路斯块状硫化物矿床特征对比

Table 2 Comparison of characteristics between Dorni and Cyprus massive sulfide deposits

| 矿床特征 | 德尔尼块状硫化物矿床 | 塞浦路斯块状硫化物矿床 |
|----------|---|---|
| 矿床产出地质背景 | 形成于古生代大洋扩张脊蛇绿岩中 ^[7] , 蛇绿岩具有 N-MORB 型微量元素地球化学特征 ^[27] | 形成于中生代洋壳扩张的洋中脊蛇绿岩中 |
| 矿体与蛇绿岩关系 | 蛇绿岩组合不完整, 没有枕状熔岩; 主要矿体产在蛇绿岩的角砾状辉橄岩中; 成矿时代稍晚于矿体下部的玄武质熔岩 | 蛇绿岩组合完整; 主要矿体产于蛇绿岩的上部枕状熔岩与下部枕状熔岩之间 |
| 矿体特征 | 块状硫化物矿体, 多层叠瓦状分布, 上部块状, 下部条带状矿体 | 块状硫化物矿体, 上部层状, 下部网脉状矿体 |
| 矿石组构 | 致密块状、条带状、细脉状、网脉状为主, 矿物相互穿插、交代, 形成充填、溶蚀、交代结构, 另有自形粒状和半自形粒状结构 | 致密块状、网脉状, 具有特殊的胶体结构 |
| 金属矿物组合 | 矿石矿物以黄铁矿为主, 其次为黄铜矿、磁铁矿、闪锌矿、磁黄铁矿、钴镍黄铁矿 | 矿石矿物以黄铁矿为主, 其次为黄铜矿、闪锌矿、磁黄铁矿和赤铁矿 |
| 成矿元素组合 | 主要为 Cu、Zn、Co, 伴生 Au、Ag; Co 在底部和边部含量增加; 平均矿石品位 Cu: Zn: Co = 19: 5: 1 ^[27] | 主要为 Cu、Zn、Co, 伴生 Au; Co 含量随着深度变大而增加; 平均矿石品位 Cu: Zn: Co = 67: 8: 1 ^[27] |

解的古洋壳, 由于缺少枕状熔岩, 产出环境属于一个快速扩张的洋脊^[7]。典型的塞浦路斯型块状硫化物矿床产出在下段玄武岩中, 而德尔尼铜(锌钴) 矿床产于蛇纹岩的超基性岩组成部分中。大量实例证实块状硫化物矿床产出多与喷出岩关系密切, 德尔尼矿床产出的位置是世界上独特的, 其成因引起了长期的争议。目前的认识主要有 3 种: 第一种观点认为蛇纹岩中的超基性岩由变质橄榄岩、方辉橄榄岩和二辉橄榄岩组成, 属于侵入岩, 由于晚期侵位将块状硫化物包裹进来, 但是, 这种高温岩浆遇到块状硫化物后将“吞食”硫化物, 很难形成目前的沉积结构矿石。第二种观点: 有学者获得超镁铁岩的 Sm-Nd 年龄为 1.2 Ga, 远大于成矿年龄, 因此认为超基性岩部分为地幔部分熔融的残留体, 提出构造侵位^[30], 从而解释了矿体与角砾状蛇纹岩的关系^[10], 但是无法解释为什么矿体没有存在喷出岩(玄武岩) 中, 变质橄榄岩应用 Sm-Nd 定年也值得商榷。第三种观点认为矿体的直接围岩是橄榄质火山角砾岩, 矿床形成于火山岩块状硫化物矿床系列中的最基性端员^[12], 但是这种认识缺乏岩石学证据^[13]。综合前人的研究, 结合成岩、成矿年代学, 我们提出第 4 种认识: 德尔尼铜(锌钴) 矿体主要赋存在蛇纹岩中, 与洋脊的扩张速度有关, 因为矿区缺少枕状熔岩, 也缺少基性岩墙, 一般洋脊的扩张速度快和岩浆补给少会出现这种现象^[31], 因此, 德尔尼矿区的蛇纹岩可能属于一个快速扩张的洋脊。洋脊的快速扩张必然导致玄武岩快速喷发, 变质橄榄岩(蛇纹岩) 快速抬升。由于岩浆补给少, 缺少大量基性熔岩, 因此, 海底喷流沉积形成的块状硫化物与蛇纹岩就位在一起。

4.4 找矿指示

德尔尼铜矿区 I 号矿体 13 勘探线钻孔 ZK1303 的柱状图显示, 上部蛇纹岩厚约 600 m, 其下部存在约 150 m 厚的碳酸盐化碳质板岩, 再往下为约 200 m 厚的(碳酸盐化) 玄武岩^[12], 铜矿体产出在角砾状蛇纹岩中, 矿体具有多层特征, 一直延伸到地表以下 520 m (图 8)。根据上面的研究: 洋脊的快速扩张导致变质橄榄岩(蛇纹岩) 迅速抬升, 在缺乏岩浆补给情况下, 海底喷流沉积作用形成的成矿物质可能沉积在蛇纹岩的超基性岩组成部分及蛇纹岩与含碳铁硅质岩之间。因此, 在玄武岩(①) —含碳铁硅质岩(②) —蛇纹岩(③) “三位一体”组合的地方有利于找矿, 即在有玄武岩出露

的地方, 矿体可能分布在其上部含碳铁硅质岩与角砾状蛇纹岩之间或者角砾状蛇纹岩内部。

在矿区及外围填图过程中, 最新的平硐揭示德尔尼西 326—328 线也存在块状硫化物矿体, 矿体位于未变形的安山质玄武岩之上, 片理化发育的含碳铁硅质岩和蛇纹岩之间, 此处可能形成类似德尔尼铜(锌钴) 矿床的矿体。

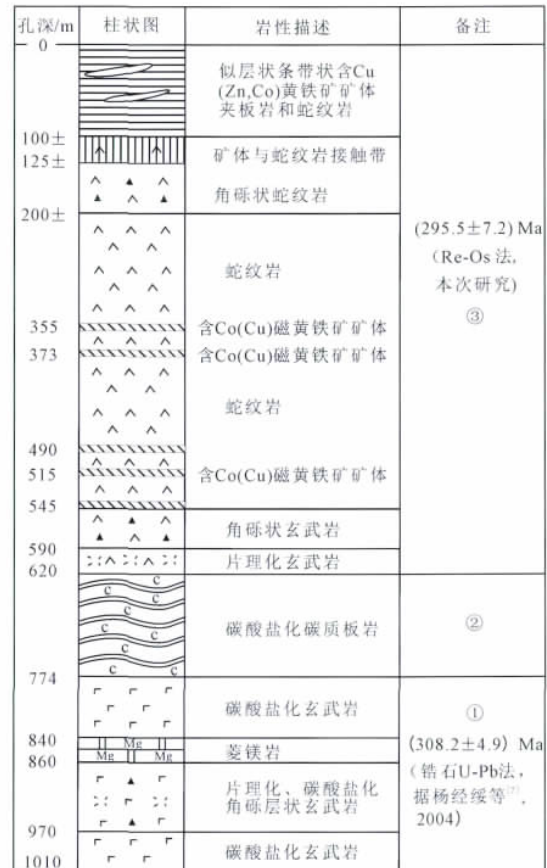


图 8 德尔尼矿床 I 号矿体钻孔 ZK1303 综合柱状图 (据王玉往和秦克章^[12], 1997, 修编)

Fig. 8 Histogram of borehole ZK1303 in No. I ore body in Demi deposit (modified after Wang and Qin^[12], 1997)

5 结 论

(1) 德尔尼铜(锌钴) 矿床 Re-Os 同位素等时线年龄为(295. 5 ± 7. 2) Ma, 形成于晚石炭世—早二叠世, 稍微晚于矿区玄武岩的形成年龄, 早于矿区北部印支期花岗岩, 证明德尔尼矿区的块状硫化物矿体与北部印支期中酸性岩浆活动无关。

(2) 赋矿围岩、矿石结构、矿物组合及各种地球化学特征指示德尔尼铜(钴) 矿床成因归属于海底喷流沉积—热液叠加成矿; 具有类似于塞浦路

斯型块状硫化物矿床的构造背景和矿物组合特征;

(3) 德尔尼铜(锌钴) 矿体赋存在蛇绿岩中的部位与众不同, 可能与晚古生代特提斯洋脊的快速扩张、岩浆补给少, 变质橄榄岩(蛇纹岩) 迅速抬升有关。

致谢: 本研究野外工作得到德尔尼铜矿地质科崔万新科长的帮助; 项目实施获得西安地质矿产研究所宋忠宝研究员及其项目组成员的指导; 论文评审人员提出了宝贵的意见, 使作者受益匪浅; 在此一并表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 杜安道, 赵敦敏, 王淑贤, 等. Carius 管溶样 - 负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿中铼 - 钨同位素地质年龄 [J]. 岩矿测试, 2001, 20(4): 247 - 252.
- [2] 刘舒波, 李超, 岑况, 等. 含辉钼矿全岩样品 Re-Os 同位素定年研究: 在北京大庄科钼矿床中的应用 [J]. 现代地质, 2012, 26(2): 254 - 260.
- [3] 翟德高, 刘家军, 王建平, 等. 内蒙古太平沟斑岩型钼矿床 Re-Os 等时线年龄及地质意义 [J]. 现代地质, 2009, 23(2): 262 - 268.
- [4] 焦建刚, 袁海潮, 何克, 等. 陕西华县八里坡钼矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义 [J]. 地质学报, 2009, 83(8): 1159 - 1165.
- [5] 史仁灯, 支霞臣, 陈雷, 等. Re-Os 同位素体系在蛇绿岩应用研究中的进展 [J]. 岩石学报, 2006, 22(6): 1685 - 1695.
- [6] 陈亮, 孙勇, 裴先治, 等. 德尔尼蛇绿岩⁴⁰Ar - ³⁹Ar 年龄: 青藏最北端古特提斯洋盆存在和延展的证据 [J]. 科学通报, 2001, 46(5): 424 - 426.
- [7] 杨经绥, 王希斌, 史仁灯, 等. 青藏高原北部东昆仑南缘德尔尼蛇绿岩: 一个被肢解了的古特提斯洋壳 [J]. 中国地质, 2004, 31(3): 225 - 239.
- [8] 宋忠宝, 陈向阳, 陈博, 等. 东昆仑德尔尼铜矿的成矿时代及其地质意义 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28(S): 113.
- [9] 王永标, 杨浩. 东昆仑-阿尼玛卿-巴颜喀拉地区早二叠世的生物古地理特征 [J]. 中国科学: D 辑, 2003, 33(8): 775 - 780.
- [10] 章午生. 德尔尼铜矿地质 [M]. 北京: 地质出版社, 1981: 1 - 113.
- [11] 段国莲. 论德尔尼黄铁矿型铜 - 钴矿床的地质特征及其与塞浦路斯铜矿的区别 [J]. 化工矿产地质, 1998, 20(4): 287 - 294.
- [12] 王玉往, 秦克章. VAMSD 矿床系列最基性端员: 青海省德尔尼大型铜钴矿床的地质特征和成因类型 [J]. 矿床地质, 1997, 16(1): 1 - 10.
- [13] 杨经绥, 郑新华, 王希斌, 等. 德尔尼 Cu-Co-Zn 硫化物矿床的成因探讨新进展: 兼论矿床围岩是蛇绿岩地幔岩而不是超基性火山岩 [J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 179 - 180.
- [14] Yang J S, Shi R D, Wu C L, et al. Dorni ophiolite in East Kunlun, Northeast Tibetan Plateau: Evidence for Paleo-Tethyan suture in Northwest China [J]. Journal of Earth Science, 2009, 20(2): 303 - 331.
- [15] 章午生. 块状硫化物矿床的一个特殊类型: 德尔尼铜矿 [J]. 甘肃地质学报, 1995, 4(2): 22 - 31.
- [16] 杨刚, 杜安道, 卢记仁, 等. 金川镍 - 铜 - 铂矿床块状硫化物矿石的 Re-Os(ICP - MS) 定年 [J]. 中国科学: D 辑, 2005, 35(3): 241 - 245.
- [17] 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(1/2): 69 - 88.
- [18] 梁婷, 王登红, 屈文俊, 等. 广西铜坑锡多金属矿床的 Re-Os 同位素组成及成矿物质来源示踪 [J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(3): 230 - 235.
- [19] 董富权. 德尔尼铜矿床成矿期次与矿床成因研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010: 1 - 59.
- [20] Sun Y L, Xu P, Li J, et al. A practical method for determination of molybdenite Re-Os age by inductively coupled plasma-mass spectrometry combined with Carius tube-HNO₃ digestion [J]. Analytical Methods, 2010(2): 575 - 581.
- [21] 陈亮, 孙勇, 裴先治. 德尔尼蛇绿岩: 青藏高原最北端的特提斯岩圈残片 [J]. 西北大学学报: 自然科学版, 1999, 29(2): 141 - 144.
- [22] 陈亮, 孙勇, 裴先治, 等. 古特提斯蛇绿岩的综合对比及其动力学意义: 以德尔尼蛇绿岩为例 [J]. 中国科学: D 辑, 2001, 33(12): 1136 - 1142.
- [23] Franklin J M, Gibson H L, Jonasson I R, et al. Volcanogenic massive sulfide deposits [J]. Economic Geology, 2005, 100: 523 - 560.
- [24] 宋忠宝, 陈向阳, 任有祥, 等. 东昆仑德尔尼铜矿“碳质(砂)板岩”的岩类学、岩石化学及其地质意义 [J]. 西北地质, 2008, 41(4): 77 - 81.
- [25] 李鹏. 青海德尔尼铜矿成矿背景、矿床成因与找矿方向 [D]. 西安: 长安大学, 2007: 1 - 72.
- [26] 阿延寿. 青海德尔尼硫化物矿床成因的新认识 [J]. 青海地质, 2001, 10(1): 40 - 44.
- [27] 祝新友, 姜福芝, 王玉往. 超镁铁岩的 REE 特点及其对青海德尔尼铜钴矿的成因意义 [J]. 有色金属矿产与勘查, 1996, 5(3): 162 - 168.
- [28] Dilek Y. Ophiolite concept and its evolution [M] // Dilek Y, Newcomb S. Ophiolite Concept and the Evolution of Geological Thought. Boulder: Geological Society of America, 2003: 1 - 16.
- [29] 倪志耀, 王仁民. 蛇绿岩鉴别的关键问题探讨 [J]. 火山地质与矿产, 1998, 19(3): 242 - 248.
- [30] 陈杰. 青海德尔尼铜矿床成矿机制浅析 [J]. 青海地质, 1992, 1(1): 53 - 61.
- [31] Robinson P T, Malpas J, Dilek Y, et al. The significance of sheeted dike complexes in ophiolites [J]. Geological Society of America Today, 2008, 18: 4 - 10.