

南祁连裕龙沟铜镍硫化物矿床 Re-Os同位素物质来源示踪研究

高永宝^{1, 2)*}, 李文渊¹⁾, 张照伟^{1, 2)}, 李超³⁾, 周利敏³⁾,
郭周平¹⁾, 张江伟¹⁾, 李侃¹⁾, 钱兵¹⁾, 王亚磊¹⁾, 谭文娟¹⁾

1) 西安地质矿产研究所, 陕西西安 710054;

2) 长安大学地球科学与国土资源学院, 陕西西安 710054;

3) 国家地质实验测试中心, 北京 100037

摘要: 南祁连日月山—化隆基性-超基性岩带发育多个与铜镍矿化有关的岩体, 岩石类型主要有角闪辉石岩、辉长岩、苏长岩、辉石岩、辉橄岩等, 其中裕龙沟基性杂岩体形成于(442.4±1.6) Ma。通过对裕龙沟铜镍矿床稀疏浸染状矿石中硫化物的 Re-Os 及 S 同位素物质来源示踪研究, 其 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值为 0.2239~0.2757, γ_{Os} 为 80~123, $\delta^{34}\text{S}$ 为 0.8‰~2.4‰, 表明其物质来源具有壳-幔混合特征, 壳源 Os 的加入量为 20%~28%, 地壳物质的加入可能是裕龙沟岩体富集成矿的重要因素。

关键词: Re-Os 同位素; 铜镍硫化物矿床; 裕龙沟; 化隆; 南祁连

中图分类号: P611.11; P597.2 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2012.06.08

Re-Os Isotopic Analysis of the Yulonggou Cu-Ni Sulfide Deposit in the South Qilian Mountain

GAO Yong-bao^{1, 2)*}, LI Wen-yuan¹⁾, ZHANG Zhao-wei^{1, 2)}, LI Chao³⁾, ZHOU Li-min³⁾,
GUO Zhou-ping¹⁾, ZHANG Jiang-wei¹⁾, LI Kan¹⁾, QIAN Bing¹⁾, WANG Ya-lei¹⁾, TAN Wen-juan¹⁾

1) Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an, Shaanxi 710054;

2) College of Earth Sciences and Land Resources, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054;

3) National Research Center of Geoanalysis, Beijing 100037

Abstract: There are lots of intrusive rocks composed of amphibole pyroxenite, gabbro, norite, pyroxenite and augite peridotite in Riyueshan-Hualong basic-ultrabasic rock belt of South Qilian Mountain, which are related to copper-nickel mineralization. The Yulonggou basic complex was formed at (442.4±1.6) Ma. Re and Os concentrations as well as Os and S isotopic analyses were obtained for sulfides in disseminated sulfide ores from the Yulonggou Cu-Ni deposit, with the purpose of assessing the role of crustal contamination in the formation of the Yulonggou Cu-Ni deposit. The initial $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ratios are from 0.2239 to 0.2757, the γ_{Os} values are from 80 to 123, and the $\delta^{34}\text{S}$ values are from 0.8‰ to 2.4‰; these data suggest that the ore-forming materials were derived from both the mantle and the crust. The content of crust-derived Os is estimated to be 20%–28%. The crustal contamination might have been one of the most important factors for copper and nickel accumulation in the Yulonggou intrusion.

Key words: Re-Os isotope; Cu-Ni sulfide deposit; Yulonggou; Hualong; South Qilian Mountain

本文由中国地质调查局地质调查项目(编号: 1212011121088、1212011121092、1212011220897 和 1212010911032)、国家自然科学基金项目(编号: 40772062、41102050)和“十一五”国家科技支撑计划项目(编号: 2006BAB01A01)联合资助。

收稿日期: 2012-09-05; 改回日期: 2012-10-16。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 高永宝, 男, 1982 年生。助理研究员, 博士研究生。主要从事区域成矿及成矿规律研究。通讯地址: 710054, 陕西省西安市友谊东路 438 号。电话: 029-87821656。E-mail: gaoyongbao2006@126.com。

*通讯作者: 李文渊, 男, 1962 年生。研究员, 博士生导师。主要从事岩浆铜镍硫化物矿床与区域成矿研究。通讯地址: 710054, 陕西省西安市友谊东路 438 号。电话: 029-87821902。E-mail: xalwenyuan@126.com。

青海省日月山—化隆地区是我国已知铜镍矿重要产地之一。除 20 世纪 50 年代末发现了拉水峡中型铜镍矿床外, 陆续发现了裕龙沟小型铜镍矿床及沙加、关藏沟、乙什春、曲马等多处铜镍矿点, 均与基性-超基性岩体关系密切(李文渊, 1996, 2004, 2006), 显示出该区良好的找矿潜力和资源前景(张照伟等, 2009)。因此备受广大地质学家关注, 目前裕龙沟铜镍矿床仅在矿床地质(李文渊, 1996, 2006)、成岩成矿时代(高永宝等, 2010; 张照伟等, 2012a, b)等方面取得了一定的研究进展。

近年来, Re-Os 同位素在矿床学(薛静等, 2010; 蔡明海等, 2011; 王辉等, 2011; 庞尔成等, 2012), 尤其是岩浆铜镍硫化物矿床应用研究方面取得了很大进展, 直接应用于国内外岩浆铜镍硫化物矿床成矿时代厘定和成矿物质来源示踪(Walker et al., 1994; Foster et al., 1996; Smoliar et al., 1996; Lambert et al., 1998; Ripley et al., 1998; Brenan et al., 2000; Horan et al., 2001; 王登红等, 2001; 毛景文等, 2001, 2002; 李月臣等, 2006; 石贵勇等, 2006; 杨胜洪等, 2007; 胡克兵等, 2008; 陶琰等, 2008; Yang et al., 2008; Zhang et al., 2008; 李华芹等, 2009; 屈文俊等, 2012)。最新研究揭示, 与基性-超基性岩共生的 Cu-Ni 硫化物矿床, 除一些特殊情况外, 块状矿石可得到具有地质意义的 Re-Os 等时线年龄, 但“Os 同位素表面初始比值”往往没有地质意义; 浸染状

矿石常得到没有地质意义的假等时线, 但常可得到具有地质意义的 Os 同位素初始比值(屈文俊等, 2012)。因此, 为了进一步厘定裕龙沟铜镍硫化物矿床的物质来源, 本文选择了裕龙沟矿床稀疏浸染状矿石中的磁黄铁矿、黄铜矿进行 Re-Os 同位素测定, 结合硫化物 S 同位素研究, 探讨其成矿物质来源, 进一步对矿床形成机制进行制约。

1 区域成矿背景及矿床地质特征

1.1 区域成矿背景

裕龙沟铜镍矿床位于南祁连南缘的化隆隆起带(图 1), 其南邻秦岭褶皱带西延部分, 北部为拉脊山加里东褶皱带。基底为元古宙化隆群, 由下至上分为智尕昂、关藏沟及鲁满山三个岩组, 主要为石英岩、黑云母石英片岩、黑云斜长片麻岩、混合片麻岩和混合岩。其上直接被新生代西宁群和贵德群红层角度不整合覆盖。带内多数基性-超基性岩体均侵位于化隆群关藏沟组中。

化隆起带岩浆活动频繁, 从前震旦纪到加里东期都有岩浆侵入。酸性岩主要为片麻状花岗岩、斜长花岗岩以及伟晶岩等。目前已发现基性-超基性岩体 32 个, 规模均较小, 展布方向以北西向为主, 倾向以北东为主, 岩石类型主要为角闪辉石岩、闪石化辉长岩、辉长岩-苏长岩、闪石化辉石岩及辉橄岩等, 岩体与围岩大多为侵入接触关系; 岩体边部

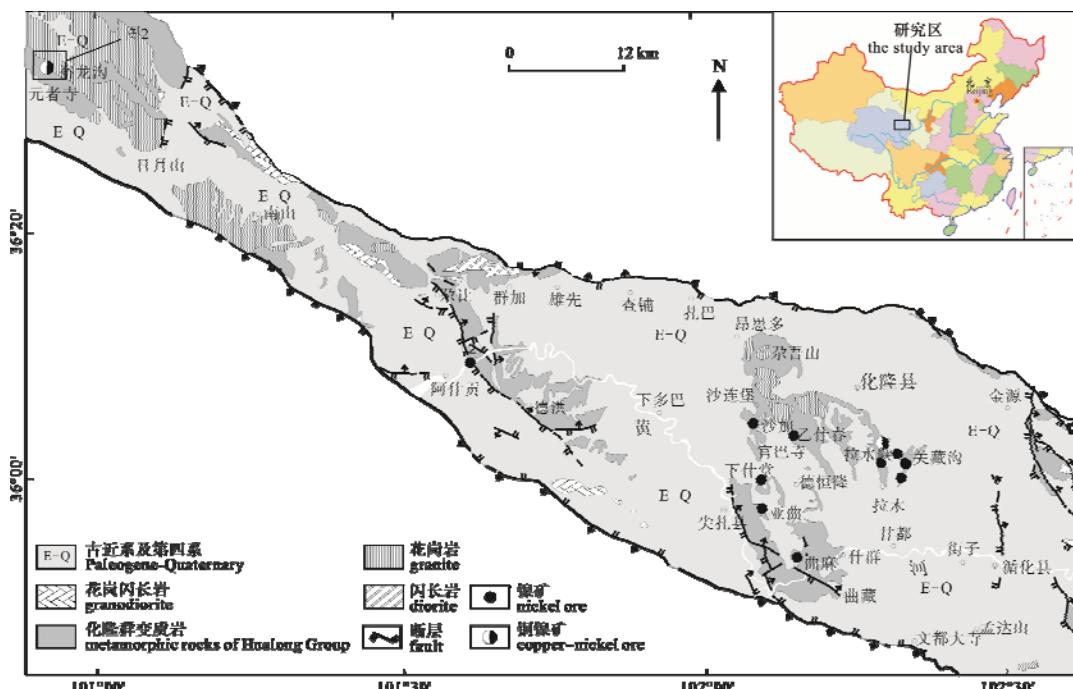


图 1 南祁连日月山—化隆一带区域地质图

Fig. 1 Regional geological map of Riyueshan-Hualong region, south Qilian Mountain

多表现为片理化、强烈破碎或糜棱岩化; 镁铁比值 m/f 变化范围较大, 为 0.5~4.5, 其中拉水峡岩体的 m/f 为 0.5~1.9, 裕龙沟岩体的 m/f 为 0.8~4.5, 亚曲岩体的 m/f 为 1.0~2.3, 乙什春岩体的 m/f 为 1.88~2.69, 均属于铁质系列。区内多处岩体具有铜镍矿化, 目前为止已发现拉水峡中型铜镍矿、裕龙沟小型铜镍矿, 沙加、乙什春、关藏沟、亚曲、曲马、下什塘等矿点多处。区内基性-超基性岩体多形成于加里东期, 其中裕龙沟黑云母角闪辉石岩 ID-TIMS 锆石 U-Pb 年龄为 (442.4 ± 1.6) Ma (MSWD=0.59), 亚曲辉石岩 ID-TIMS 锆石 U-Pb 年龄为 (440.7 ± 0.3) Ma (MSWD=1.1)(高永宝等, 2010; 张照伟等, 2012a)。

化隆隆起带由于遭受过强烈构造运动, 多形成复式褶皱构造, 轴向北西西—南东东, 部分地层倒转, 构造断裂亦比较发育, 存在北西或北西西向、北东东向两组较大的断裂(樊光明等, 2007)。

1.2 矿床地质特征

裕龙沟岩体处于化隆隆起带的西延部分, 围岩主要由元古宙混合岩化黑云母斜长片麻岩组成。岩体受一组北西西向构造断裂控制, 由几个岩体组成, 其中最大一个岩体出露长 1300 m, 东段宽 40~78 m, 中段宽 10~15 m, 西段宽 68 m, 向两端尖灭, 已控制最大延深 430 m。岩体呈 340°延伸, 倾向北北东, 倾角 40°~60°, 为一上陡下缓的单斜岩体(图 2)。岩石类型有黑云斜长角闪岩、黑云角闪岩、黑云辉石角闪岩和黑云角闪辉石岩。岩体可分为三个岩相带, 各岩相带均呈过渡关系, 前两个岩相带具矿化。岩石蚀变较普遍, 以硅化为主, 其次有绿泥石化、滑石化、绢云母化、碳酸盐化以及少量次闪石化等。

岩体内已发现 10 个矿体, 主要分布于岩体东段, 形成一牛轭状含矿带(图 2)。最大的矿体呈扁豆状, 沿走向长 130 m, 侧伏方向长 360 m, 平均厚 10.4 m, 走向 285°左右, 侧伏方向 345°左右, 侧伏角 40°左右。矿体严格受岩相控制, 角闪岩相矿化最好, 黑云角闪岩-黑云角闪辉石杂岩相次之, 黑云斜长角闪岩相基本上无矿化。矿石构造以稀疏浸染状构造为主, 局部呈稠密浸染状构造, 以硫化物为主组成的矿石结构具有典型的填间结构, 局部有似海绵陨铁结构。矿石的主要矿物成分有紫硫镍铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿, 其次有镍黄铁矿、磁铁矿、砷铂矿、碲铋矿。矿石中的有益组分主要有 Cu、Ni、Pt、Pd、Ni 平均品位为 1.17%, 平均含 Cu 0.3%、Pt 2.08×10^{-6} 。角闪岩相的矿化具有岩浆晚期矿床的基本特征, 残余岩浆的叠加使这个岩相的矿化进一步富集。

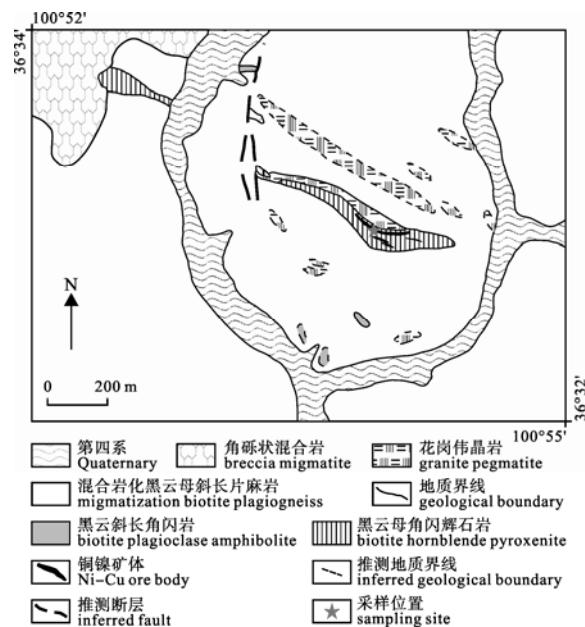


图 2 裕龙沟铜镍矿床地质简图
Fig. 2 Simplified geological map of the Yulonggou Cu-Ni deposit

2 样品及测试方法

本次研究的样品均采集于裕龙沟铜镍矿床最大的主矿体, 采集稀疏浸染状矿石样品 10 件, 挑选磁黄铁矿、黄铜矿等硫化物进行 Re-Os 同位素测定。

本次样品测试是在国家地质实验测试中心采用同位素稀释 ICP-MS 质谱完成的, 实验中采用 Carius 管封闭溶样来分解样品(Shirey et al., 1995; 杜安道等, 2001, 2009), 具体分析步骤简述如下。

2.1 分解样品

准确称取待分析样品, 通过细颈漏斗加入到 Carius 管底部。缓慢加液氮到有半杯乙醇的保温杯中, 使成粘稠状($-50 \sim -80^{\circ}\text{C}$)。将装好样品的 Carius 管放到该保温杯中, 用适量超纯浓 HCl 通过细颈漏斗把准确称取的 ^{185}Re 和 ^{190}Os 混合稀释剂转入 Carius 管底部, 再依次加入 3 mL 10 mol/L HCl、5 mL 16 mol/L HNO₃ 和 1 mL 30% H₂O₂。当管底溶液冻实后, 用液化石油气和氧气火焰加热封好 Carius 管的细颈部分。擦净表面残存的乙醇, 放入不锈钢套管内。轻轻放套管入鼓风烘箱内, 待回到室温后, 逐渐升温到 200°C, 保温 24 h。然后取出, 冷却后在底部冻实的情况下, 先用强火焰烧熔 Carius 管细管部分一点, 使内部压力得以释放。再用玻璃刀划痕, 并用烧热的玻璃棒烫裂划痕部分。

2.2 蒸馏分离 Os

将待打开的 Carius 管放在冰水浴中回温使内容

物完全融化, 用约 20 mL 水将管中溶液转入蒸馏瓶中。把内装 5 mL 超纯水的 25 mL 比色管, 放在冰水浴中, 以备吸收蒸馏出的 OsO₄。连接蒸馏装置, 加热微沸 30 min。所得 OsO₄ 水吸收液可直接用于 ICP-MS 测定 Os 同位素比值。将蒸馏残液转入 150 mL Teflon 烧杯中待分离 Re。

2.3 萃取分离Re

将蒸馏残液置于电热板上, 加热近干; 加少量水, 加热近干。重复两次以降低酸度。根据样品量加入 4~10 mL 5~6 mol/L NaOH(如果碱化后沉淀量过多, 可适当增加 NaOH 用量), 稍微加热, 促进样品转为碱性介质。转入 Teflon 离心管中, 加入 4~10 mL 丙酮, 振荡 1 min, 萃取 Re。在丙酮萃取离心后需进一步纯化含 Re 丙酮溶液。将离心管内上清液转入 Teflon 分液漏斗中分相, 弃去碱溶液。再加入 2 mL 5 mol/L NaOH, 振荡 1 min, 弃去碱溶液。转移丙酮相到 Teflon 离心管中, 离心。离心后, 用滴管直接取上层丙酮相到 150 mL 已加有 2 mL 水的 Teflon 烧杯中, 在电热板上 50°C 加热除去丙酮, 然后电热板温度升至 120°C 加热至干, 加数滴浓硝酸和 30% 过氧化氢, 加热蒸干以除去残存的 Os。用数滴 HNO₃ 溶解残渣, 用水转移到小瓶中, 稀释到适当体积, 备 ICP-MS 测定 Re 同位素比值。

2.4 质谱测定

采用美国 TJA 公司生产的电感耦合等离子体质谱仪 TJA X-series ICP-MS 测定同位素比值。对于 Re: 选择质量数 185、187, 用 190 监测 Os。对于

Os: 选择质量数为 186、187、188、189、190、192, 用 185 监测 Re。

本实验全流程空白 Re 约为 5.7 pg, 普 Os 约为 0.2 pg, 远远低于所测样品的 Re、Os 含量, 不会影响实验中 Re、Os 含量的准确测定。

3 测试结果

裕龙沟铜镍矿床硫化物的 Re-Os 同位素测试结果见表 1。普 Os 是根据 Nier 值的 Os 同位素丰度, 通过 ¹⁹²Os/¹⁹⁰Os 测量比计算得出。Re、Os 含量的不确定度包括样品和稀释剂的称量误差、稀释剂的标定误差、质谱测量的分馏校正误差、待分析样品同位素比值测量误差, 置信水平为 95%。

由于硫化物的不同导致 Re、Os 含量存在明显差异, 黄铜矿的总 Re 和普 Os 含量分别介于 $(13.46 \pm 0.11) \times 10^{-9}$ ~ $(69.35 \pm 0.59) \times 10^{-9}$ 和 $(4.082 \pm 0.049) \times 10^{-9}$ ~ $(12.79 \pm 0.21) \times 10^{-9}$, 远低于磁黄铁矿(总 Re 含量为 $(127.5 \pm 1.1) \times 10^{-9}$ ~ $(407.2 \pm 3.2) \times 10^{-9}$, 普 Os 含量为 $(36.08 \pm 0.31) \times 10^{-9}$ ~ $(415.3 \pm 3.9) \times 10^{-9}$)。总体稀疏浸染状矿石的总 Re 和普 Os 含量分别为 $(13.46 \pm 0.11) \times 10^{-9}$ ~ $(407.2 \pm 3.2) \times 10^{-9}$ 和 $(4.082 \pm 0.049) \times 10^{-9}$ ~ $(415.3 \pm 3.9) \times 10^{-9}$ 。

以裕龙沟基性-超基性岩浆活动时限 (442.4 ± 1.6) Ma(张照伟等, 2012a)作为样品同位素衰变计数年龄, 计算得到各样品的初始同位素组成 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os_{t=442.4 Ma} 以及 $\gamma_{Os}(t=442.4 \text{ Ma})$, 结果如表 1 所示, 裕龙沟铜镍矿床的 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os_{t=442.4 Ma} 为 0.2239~0.2757, $\gamma_{Os}(t=442.4 \text{ Ma})$ 为 80~123。

表 1 裕龙沟铜镍矿床硫化物 Re-Os 同位素数据

Table 1 Re-Os isotopic data of sulfides from the Yulonggou Cu-Ni deposit

样号	矿石类型	矿 物	样重/g	w(Re)/(ng/g)	w(普 Os)/(ng/g)	w(¹⁸⁷ Os)/(ng/g)	¹⁸⁷ Re/ ¹⁸⁸ Os	¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os	(¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os) _t	γ_{Os}
YL-01	稀疏浸染状	Cp	0.403	13.46 ± 0.11	4.082 ± 0.049	0.1943 ± 0.0021	15.93 ± 0.24	0.3658 ± 0.0047	0.2480	100
		Po	0.100	407.2 ± 3.2	415.3 ± 3.9	15.73 ± 0.14	4.735 ± 0.06	0.2911 ± 0.0023	0.2561	106
YL-02	稀疏浸染状	Cp	0.400	59.43 ± 0.79	8.395 ± 0.080	0.5209 ± 0.0048	34.19 ± 0.56	0.4768 ± 0.0040	0.2239	80
		Po	0.105	142.1 ± 1.2	96.26 ± 0.95	4.091 ± 0.045	7.130 ± 0.093	0.3266 ± 0.0035	0.2739	121
YL-03	稀疏浸染状	Po	0.300	169.8 ± 1.4	219.8 ± 1.6	8.366 ± 0.069	3.731 ± 0.04	0.2925 ± 0.0012	0.2649	114
YL-04	稀疏浸染状	Po	0.109	163.4 ± 1.3	36.08 ± 0.31	2.060 ± 0.017	21.87 ± 0.26	0.4387 ± 0.0029	0.2769	123
YL-05	稀疏浸染状	Po	0.101	127.5 ± 1.1	208.4 ± 2.1	7.732 ± 0.080	2.954 ± 0.039	0.2851 ± 0.0029	0.2632	112
YL-06	稀疏浸染状	Po	0.101	139.4 ± 1.2	72.51 ± 0.58	3.214 ± 0.039	9.289 ± 0.111	0.3407 ± 0.0035	0.2720	119
YL-07	稀疏浸染状	Po	0.101	272.9 ± 2.0	117.2 ± 0.9	5.114 ± 0.041	11.25 ± 0.12	0.3354 ± 0.0015	0.2522	103
YL-08	稀疏浸染状	Cp	0.400	69.35 ± 0.59	12.79 ± 0.21	0.7659 ± 0.0120	26.18 ± 0.48	0.4601 ± 0.0092	0.2664	115
		Po	0.100	194.8 ± 2.0	72.38 ± 0.67	3.502 ± 0.036	13.00 ± 0.18	0.3719 ± 0.0035	0.2757	122
YL-09	稀疏浸染状	Po	0.101	144.7 ± 1.3	53.55 ± 0.49	2.547 ± 0.024	13.05 ± 0.17	0.3656 ± 0.0031	0.2691	117
YL-10	稀疏浸染状	Po	0.300	172.0 ± 1.5	101.0 ± 0.9	4.188 ± 0.038	8.228 ± 0.10	0.3188 ± 0.0023	0.2579	108

注: $\gamma_{Os} = 100[(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{sample}(t)} / (^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{chondrite}(t)} - 1]$, 球粒陨石 $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{chondrite}} = 0.0953 \pm 0.40186(e^{\lambda t} - e^{\lambda t_0}) = 0.124041$, 其中 t(地球形成年龄)=4.558 Ga; t(岩体年龄)=442.4 Ma(据张照伟等, 2012a); $\lambda(^{187}\text{Re 衰变常数}) = 1.666 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$; Cp-黄铜矿; Po-磁黄铁矿。

4 讨论

岩浆铜镍硫化物矿床的成矿物质因普遍含铂族元素而认为来源于地幔(Naladrett, 1981), 近年来通过对世界上主要铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素研究表明: 岩浆铜镍硫化物矿床的成矿物质既可以来源于地幔(具有类似于球粒陨石和地幔的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值), 如 Kambalda 矿床(Foster et al., 1996); 也可以来源于地壳(具有高放射成因的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值), 如加拿大的 Sudbury 矿床(Walker et al., 1994); 但大多数尤其是中国的矿床成矿物质来源具有壳幔混合特征(Lambert et al., 1998; Foster et al., 1996), 如美国的 Stillwater(Horan et al., 2001)、南非的 Bushveld(Hart et al., 1989)、美国的 Duluth(Ripley et al., 1998)、俄罗斯的 Noril'sk(Walker et al., 1994)、中国的金川(Yang et al., 2008)、黄山东(毛景文等, 2002)、香山(李月臣等, 2006)、葫芦(胡克兵等, 2008)、宝坛(毛景文等, 2001)、白马寨(石贵勇等, 2006)、力马河(陶琰等, 2008)等。

由于地壳相对地幔富 Re, 具有明显放射性成因的 Os 同位素组成, 混入越多地壳物质, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值也越高(毛景文等, 2001)。裕龙沟矿床稀疏浸染状矿石硫化物的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值为 0.2239~0.2757, 介于与原始地幔有关 Kambalda 矿床的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值 0.10889 ± 0.00035 (Foster et al., 1996) 和与壳源物质有关加拿大 Sudbury 矿床 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值 8.37 ± 0.37 (Walker et al., 1994) 之间, 与甘肃金川矿床($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值为 0.255 ± 0.014)(Yang et al., 2008) 及哈密黄山东矿床($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值为 0.25 ± 0.04)(毛景文等, 2002) 相当, 说明裕龙沟矿床成矿物质可能有一定量的地壳物质加入, 这与裕龙沟铜镍矿床硫化物在 Re/Os-普 Os 关系图(图 3)上的特征一致。裕龙沟岩体普遍存在的 Nb、Ta 亏损, 可能也与地壳混染有关(图 4)。裕龙沟铜镍硫化物矿床硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $0.8\text{\%}\sim2.4\text{\%}$ (表 2), 平均为 1.6\% , 与幔源硫的范围($-2\text{\%}\pm2\text{\%}$)基本一致, 但有 1 个样品(YL-B6)略高于幔源硫范围, 反映其硫化物中的硫主要来源于地幔, 有少量地壳硫的加入。综上可以看出, 裕龙沟铜镍矿床的成矿物质主要来源于地幔, 在岩浆上侵及成矿过程中有地壳物质的加入。

由于地壳的 Re/Os 比值高, 由具有明显放射性成因的 Os 同位素组成, 因此地壳组分加入岩浆或成矿体系越多, γ_{Os} 值越表现为大的正值(毛景文等, 2002)。裕龙沟矿床的 $\gamma_{\text{Os}}(t=442.4 \text{ Ma})$ 为 $80\text{\%}\sim123\text{\%}$, 介

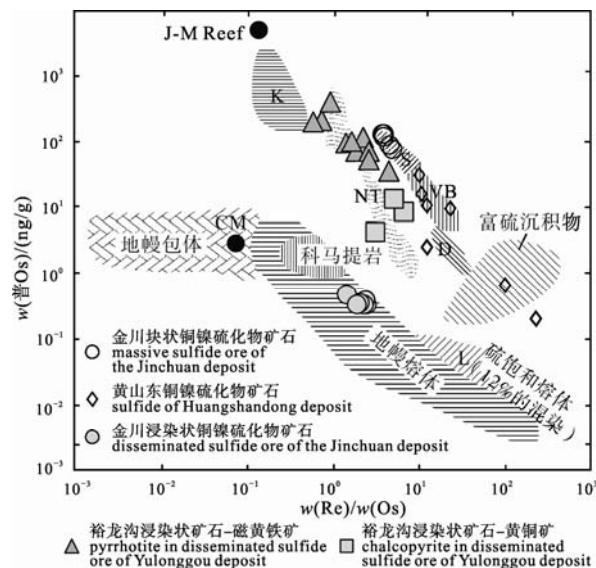


图 3 裕龙沟铜镍矿床硫化物 Re/Os-普 Os 图
(底图据 Lambert et al., 1998; 金川矿床数据据杨胜洪等, 2007; 黄山东矿床数据据毛景文等, 2002)
Fig. 3 Re-Os versus common Os diagram of sulfides from the Yulonggou Cu-Ni deposit
(base map after Lambert et al., 1998; data of the Jinchuan deposit after YANG et al., 2007; data of the Huangshandong deposit after MAO et al., 2002)
D-Duluth 硫化物矿石; S-Sudbury 硫化物矿石; K-Kambalda 硫化物矿石; L-Lewisian 下地壳; NT-Nonrill's-Talnakh 硫化物矿石; VB-Voisey's Bay 硫化物矿石; J-M Reef-J-M Reef 硫化物矿石; CM-球粒陨石地幔丰度
D-sulfide ore of Duluth deposit; S-sulfide ore of Sudbury deposit; K-sulfide ore of Kambalda deposit; L-lower crust of Lewisian; NT-sulfide ore of Nonrill's-Talnakh deposit; VB-sulfide ore of Voisey's Bay deposit; J-M reef -sulfide ore of J-M reef; CM-chondritic mantle abundance

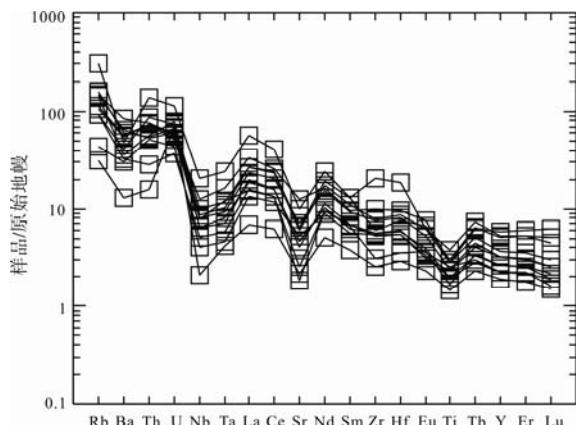


图 4 裕龙沟基性杂岩体微量元素原始地幔标准化图解
(据张照伟等, 2012a; 原始地幔标准值据 Sun et al., 1989)
Fig. 4 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram of Yulonggou basic complex
(after ZHANG et al., 2012a;
primitive mantle data after Sun et al., 1989)

于芬兰 Keivitsa 矿床的 $\gamma_{\text{Os}}(t)$ 值(+130~+170, 壳源 $\text{Os} > 28\%$)和南非 Bushveld 矿床的 $\gamma_{\text{Os}}(t)$ 值(+33~+62,

表 2 裕龙沟铜镍矿床硫化物 S 同位素组成
Table 2 S isotopic data of sulfides from the Yulonggou Cu-Ni deposit

序号	样品编号	矿石类型	测试矿物	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
1	YL-B6	浸染状矿石	磁黄铁矿	2.4
2	YL-B7	浸染状矿石	磁黄铁矿	1.6
3	YL-H8	浸染状矿石	磁黄铁矿	0.8
4	YL-H10	浸染状矿石	磁黄铁矿	1.3
5	YL-B7	浸染状矿石	磁黄铁矿	1.9

注: 本测试由美国印第安纳大学使用 Finnigan MAT252 质谱仪分析完成。

壳源 Os 为 5%~20%)之间(蒋少涌等, 2000), 因此, 推测裕龙沟镁铁-超镁铁岩浆主要来源于地幔, 岩浆上升或成矿过程中加入了 20%~28%的地壳物质, 这可能就是导致裕龙沟镁铁-超镁铁质岩浆发生不混溶作用而导致成矿的重要原因(李文渊, 2006)。

综上, 结合区域成矿背景, 裕龙沟铜镍矿床的形成过程大致如下: 早志留纪, 当拉脊山小洋盆闭合进入陆内造山阶段后, 日月山—化隆一带在后碰撞伸展环境下(张照伟等, 2012a), 地幔高度部分熔融或岩石圈地幔部分熔融产生原始岩浆, 在其上升过程中, 混入了 20%~28%的地壳物质, 但只有少量地壳硫加入, 地壳物质的加入降低了岩浆中 S 的溶解度(李文渊, 2006), 促使母岩浆中硫化物发生饱和或过饱和, 从而发生硫化物融离, 进而上侵形成铜镍矿床。

5 结论

裕龙沟铜镍矿床硫化物的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值为 0.2239~0.2757, $\gamma_{\text{Os}}(t=442.4 \text{ Ma})$ 为 80~123, $\delta^{34}\text{S}$ 为 0.8‰~2.4‰, 说明其成矿物质来源具有壳-幔混合特征, 加入了 20%~28% 的壳源 Os, 地壳物质的加入可能是裕龙沟岩体富集成矿的重要原因。

致谢: 研究过程中得到美国印第安纳大学 Li Chusi 教授、中国地质科学院矿产资源研究所李延河研究员、国家地质实验测试中心屈文俊研究员的有益指导; 审稿过程中得到审稿人的支持与帮助, 并给予了有益指导; 在此向他们深表感谢。

参考文献:

- 蔡明海, 张志刚, 屈文俊, 彭振安, 张诗启, 徐明, 陈艳, 王显彬. 2011. 内蒙古乌拉特后旗查干花钼矿床地质特征及 Re-Os 测年[J]. 地球学报, 32(1): 64-68.
- 杜安道, 屈文俊, 李超, 杨刚. 2009. 镍-锇同位素定年方法及分析测试技术的进展[J]. 岩矿测试, 28(3): 288-304.
- 杜安道, 赵敦敏, 王淑贤, 孙德忠, 刘敦一. 2001. Carius 管溶样-负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿镍-锇同位素地质年
- 龄[J]. 岩矿测试, 20(4): 247-252.
- 樊光明, 雷东宁. 2007. 祁连山东南段加里东造山期构造变形年代的精确限定及其意义[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 32(1): 39-44.
- 高永宝, 李文渊, 张照伟. 2010. 青海日月-化隆地区与基性-超基性岩有关的铜镍矿研究进展及成矿潜力[J]. 矿床地质, 29(SI): 863-864.
- 胡克兵, 姚书振, 屈文俊, 杜安道, 敖松坚. 2008. 新疆东天山葫芦铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素物质来源示踪研究[J]. 岩石学报, 24(10): 2359-2370.
- 蒋少涌, 杨竞红, 赵葵东, 于际民. 2000. 金属矿床 Re-Os 同位素示踪与定年研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 36(6): 669-677.
- 李华芹, 梅玉萍, 屈文俊, 蔡红, 杜国民. 2009. 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, 28(5): 633-642.
- 李文渊. 1996. 中国铜镍硫化物矿床成矿系列与地球化学[M]. 西安: 地图出版社.
- 李文渊. 2004. 祁连山主要矿床组合及其成矿动力学分析[J]. 地球学报, 25(3): 313-320.
- 李文渊. 2006. 祁连山岩浆作用有关金属硫化物矿床成矿与找矿 [M]. 北京: 地质出版社.
- 李月臣, 赵国春, 屈文俊, 潘成泽, 毛启贵, 杜安道. 2006. 新疆香山铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测定[J]. 岩石学报, 22(1): 245-251.
- 毛景文, 杜安道. 2001. 广西宝坛地区铜镍硫化物矿石 982 Ma Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 中国科学(D 辑), 31(12): 992-998.
- 毛景文, 杨建民, 屈文俊, 杜安道, 王志良, 韩春明. 2002. 新疆黄山东铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测定及其地球动力学意义[J]. 矿床地质, 21(4): 323-330.
- 庞尔成, 席伟杰, 施光海, 袁野, 郭坚峰. 2012. 山西代县滩上钼多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义[J]. 地球学报, 33(5): 787-793.
- 屈文俊, 陈江峰, 杜安道, 李超, 王礼兵. 2012. Re-Os 同位素定年对岩浆型 Cu-Ni 硫化物矿床成矿时代的制约[J]. 矿床地质, 31(1): 151-160.
- 石贵勇, 孙晓明, 王生伟, 熊德兴, 屈文俊, 杜安道. 2006. 云南白马寨铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素定年及其地质意义[J].

- 岩石学报, 22(10): 2451-2456.
- 陶琰, 胡瑞忠, 屈文俊, 杜安道. 2008. 力马河镍矿 Re-Os 同位素研究[J]. 地质学报, 82(9): 1292-1304.
- 王登红, 骆耀南, 傅德明, 楚萤石, 卢治安. 2001. 四川杨柳坪 Cu-Ni-PGE 矿区基性-超基性岩的地球化学特征及其含矿性[J]. 地球学报, 22(2): 135-140.
- 王辉, 任云生, 赵华雷, 鞠楠, 屈文俊. 2011. 吉林安图刘生店钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其地质意义[J]. 地球学报, 32(6): 707-715.
- 薛静, 聂凤军, 戴塔根, 彭恩生, 刘翼飞. 2010. 蒙古国阿伦诺尔钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及地质意义[J]. 地球学报, 31(3): 350-356.
- 杨胜洪, 陈江峰, 屈文俊, 杨刚, 杜安道. 2007. 金川铜镍硫化物矿床的 Re-Os“年龄”及其意义[J]. 地球化学, 36(1): 27-36.
- 张照伟, 李文渊, 高永宝, 郭周平, 谭文娟, 姜寒冰. 2009. 南祁连化隆微地块铜镍成矿地质条件及找矿方向[J]. 地质学报, 83(10): 1483-1490.
- 张照伟, 李文渊, 高永宝, 张江伟, 郭周平, 李侃. 2012a. 南祁连裕龙沟岩体 ID-TIMS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 31(2-3): 455-462.
- 张照伟, 李文渊, 高永宝, 张江伟, 郭周平, 李侃, 王亚磊, 钱兵. 2012b. 南祁连亚曲含镍铜矿基性杂岩体形成年龄及机制探讨[J]. 地球学报, 33(6): 925-935.

References:

- BRENAN J M, CHERNIAK D J, ROSE L A. 2000. Diffusion of osmium in pyrrhotite and pyrite: Implications for closure of the Re-Os isotopic system[J]. Earth and Planetary Science Letters, 180(3-4): 399-413.
- CAI Ming-hai, ZHANG Zhi-gang, QU Wen-jun, PENG Zhen-an, ZHANG Shi-qi, XU Ming, CHEN Yan, WANG Xian-bin. 2011. Geological characteristics and Re-Os dating of the Chaganhua molybdenum deposit in Urad Rear Banner, western Inner Mongolia[J]. Acta Geoscientica Sinica, 32(1): 64-68(in Chinese with English abstract).
- DU An-dao, QU Wen-jun, LI Chao, YANG Gang. 2009. A review on the development of Re-Os isotopic dating methods and techniques[J]. Rock and Mineral Analysis, 28(3): 288-304(in Chinese with English abstract).
- DU An-dao, ZHAO Dun-min, WANG Shu-xian, SUN De-zhong, LIU Dun-yi. 2001. Precise Re-Os dating for molybdenite by ID-NTIMS with carius tube sample preparation[J]. Rock and Mineral Analysis, 20(4): 247-252(in Chinese with English abstract).
- FAN Guang-ming, LEI Dong-ning. 2007. Precise timing and significance of Caledonian structural deformation chronology in southeast Qilian[J]. Editorial Committee of Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 32(1): 39-44(in Chinese with English abstract).
- FOSTER J G, LAMBERT D D, FRICK L R, MAAS R. 1996. Re-Os isotopic evidence for genesis of Archaean nickel ores from uncontaminated komatiites[J]. Nature, 382(6593): 703-706.
- GAO Yong-bao, LI Wen-yuan, ZHANG Zhao-wei. 2010. Research progress and metallogenetic potential of the Ni-Cu deposits related with mafic-ultramafic rocks in Hualong belt, Qinghai province[J]. Mineral Deposits, 29(SI): 863-864(in Chinese).
- HART S R, KINLOCH E D. 1989. Osmium isotope systematics in Witwater and Bushveld ore deposit[J]. Economic Geology, 84(6): 1651-1655.
- HORAN M F, MORGAN J W, WALKER R J, COOPER R W. 2001. Re-Os isotopic constraints on magma mixing in the Peridotite Zone of the Stillwater complex, Montana, USA[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 141(4): 446-457.
- HU Ke-bing, YAO Shu-zhen, QU Wen-jun, DU An-dao, AO Song-jian. 2008. Re-Os isotopic analysis of the Hulu Cu-Ni sulfide deposit magmatic ore system, East Tianshan, Xinjiang, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(10): 2359-2370(in Chinese with English abstract).
- JIANG Shao-yong, YANG Jing-hong, ZHAO Kui-dong, YU Ji-min. 2000. Re-Os isotope tracer and dating methods in ore deposits research[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 36(6): 669-677(in Chinese with English abstract).
- LAMBERT D D, FOSTER J G, FRICK L R, RIPLEY E M, ZIENTEK M L. 1998. Geodynamics of magmatic Cu-Ni-PGE sulfide deposits: New insights from the Re-Os isotope system[J]. Economic Geology, 93(2): 121-136.
- LI Hua-qin, MEI Yu-ping, QU Wen-jun, CAI Hong, DU Guo-min. 2009. 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, 28(5): 633-642(in Chinese with English abstract).
- LI Wen-yuan. 1996. Metallogenetic series and geochemistry of nickel-copper sulfide deposits in China[M]. Xi'an: Map Publishing House(in Chinese).
- LI Wen-yuan. 2004. Main mineral deposit associations in the Qilian Mountains and their metallogenetic dynamics[J]. Acta Geoscientica Sinica, 25(3): 313-320(in Chinese with English abstract).
- LI Wen-yuan. 2006. Mineralization and prospecting of metallic sulfide deposit associated with the magmatic activity of Qilian mountain, Northwest China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- LI Yue-chen, ZHAO Guo-chun, QU Wen-jun, PAN Cheng-ze, MAO Qi-gui, DU An-dao. 2006. Re-Os isotopic dataing of the Xiangshan deposit, East Tianshan, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(1): 2359-2370(in Chinese with English abstract).
- MAO Jing-wen, DU An-dao. 2001. 982 Ma Re-Os isotope age and

- its geological significance of copper nickel sulfide ores from Baotan region, Guangxi, China[J]. *Science in China (Series D)*, 31(12): 992-998(in Chinese).
- MAO Jing-wen, YANG Jian-min, QU Wen-jun, DU An-dao, WANG Zhi-liang, HAN Chun-ming. 2002. Re-Os dating of Cu-Ni sulfide ores from Huangshandong deposit in Xinjiang and its geodynamic significance[J]. *Mineral Deposits*, 21(4): 323-330(in Chinese with English abstract).
- NALADRETT A J. 1981. Nickle sulfide deposits: classification, composition, and genesis[M]//Skrinner B J. *Economic Geology, 75th Anniversary Volume, 1905-1980*. El Paso: Econ Geol Publ Co, 628-685.
- PANG Er-cheng, XI Wei-jie, SHI Guang-hai, YUAN Ye, GUO Jain-feng. 2012. Re-Os Isotopic Dating of Molybdenite from the Tanshang Mo-polymetallic Deposit in Daixian County, Shanxi Province, and Its Geological Significance[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(5): 787-793(in Chinese with English abstract).
- QU Wen-jun, CHEN Jiang-feng, DU An-dao, LI Chao, WANG Li-bing. 2012. Re-Os dating: Constraints on mineralization age of magmatic Cu-Ni sulfide ore deposit[J]. *Mineral Deposits*, 31(1): 151-160(in Chinese with English abstract).
- RIPLEY E M, LAMBERT D D, FRICK L R. 1998. Re-Os, Sm-Nd, and Pb isotopic constraints on mantle and crustal contributions to magmatic sulfide mineralization in the Duluth Complex[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(19-20): 3349-3365.
- SHI Gui-yong, SUN Xiao-ming, WANG Sheng-wei, XIONG De-xing, QU Wen-jun, DU An-dao. 2006. Re-Os isotopic dating and its geological implication of Baimazhai Cu-Ni sulfide deposit, Yunnan province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2451-2456(in Chinese with English abstract).
- SHIREY S B, WALKER R J. 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis[J]. *Analytical Chemistry*, 67(13): 2136-2141.
- SMOLIAR M I, WALKER R J, MORGAN J W. 1996. Re-Os ages of group II A, IIIA, IVA, and VIB iron meteorites[J]. *Science*, 271(5252): 1099-1102.
- SUN S S, McDONOUGH W F. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[M]//SAUNDERS A D, NORRY M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313-345.
- TAO Yan, HU Rui-zhong, QU Wen-jun, DU An-dao. 2008. Re-Os isotope study of sulfide and olivine pyroxenite in the Limahe nickle deposit, Sichuan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(9): 1292-1304(in Chinese with English abstract).
- WALKER R J, MORGAN J W, HORAN M F, CZAMANSKE G K, KROGSTAD E J, FEDORENKO V A, KUNILOV V E. 1994. Re-Os isotopic evidence for an enriched-mantle source for the Noril'sk-type, ore-bearing intrusions, Siberia[J]. *Geochimica et Cosmochimical Acta*, 58(19): 4179-4197.
- WANG Deng-hong, LUO Yao-nan, FU De-ming, CHU Ying-shi, LU Zhi-an. 2001. Petrochemistry and ore potentiality of the mafic-ultramafic Rocks in the Yangliuping Cu-Ni-PGF mine, Sichuan province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 22(2): 135-140(in Chinese with English abstract).
- WANG Hui, REN Yun-sheng, ZHAO Hua-lei, JU Nan, QU Wen-jun. 2011. Re-Os dating of molybdenite from the Liushengdian molybdenum deposit in Antu area of Jilin province and its geological significance[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(6): 707-715(in Chinese with English abstract).
- XUE Jing, NIE Feng-jun, DAI Ta-gen, PENG En-sheng, LIU Yi-fei. 2010. Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Aryn nuur Mo deposit in Mongolia and its geological implications[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(3): 350-356(in Chinese with English abstract).
- YANG Sheng-hong, CHEN Jiang-feng, QU Wen-jun, YANG Gang, DU An-dao. 2007. Re-Os "ages" of Jinchuan copper-nickel sulfide deposit and their significance[J]. *Geochimica*, 36(1): 27-36(in Chinese with English abstract).
- YANG Sheng-hong, QU Wen-jun, TIAN Yu-long, CHEN Ji-ang-feng, YANG Gang, DU An-dao. 2008. Origin of the inconsistent apparent Re-Os ages of the Jinchuan Ni-Cu sulfide ore deposit, China: Post-segregation diffusion of Os[J]. *Chemical Geology*, 247(3-4): 401-418.
- ZHANG Z H, MAO J W, DU A D, PIRAJNO F, WANG Z L, CHAI F M, ZHANG Z C, YANG J M. 2008. Re-Os dating of two Cu-Ni sulfide deposits in northern Xinjiang, NW China and its geological significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2-4): 204-217.
- ZHANG Zhao-wei, LI Wen-yuan, GAO Yong-bao, GUO Zhou-ping, TAN Wen-juan, JIANG Han-bing. 2009. Metallogenetic Geological Conditions of Hualong Dome-Like Massif, South Qilian Mountain and Prospecting Direction[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(10): 1483-1490(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhao-wei, LI Wen-yuan, GAO Yong-bao, ZHANG Ji-ang-wei, GUO Zhou-ping, LI Kan. 2012a. ID-TIMS zircon U-Pb age of Yulonggou intrusive rocks in southern Qilian Mountain and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(2-3): 455-462(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhao-wei, LI Wen-yuan, GAO Yong-bao, ZHANG Ji-ang-wei, GUO Zhou-ping, LI Kan, WANG Ya-lei, QIAN Bing. 2012b. The Formation Age of the Yaqu Ni-Cu Bearing Basic Complex in Southern Qilian Mountain and a Discussion on Its Mechanism[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(6): 925-935(in Chinese with English abstract).