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*

胡克兵[1]　姚书振[1]　屈文俊[2]　杜安道[2]　敖松坚[3]

HU KeBing[1], YAO ShuZhen[1], QU WenJun[2], DU AnDao[2] and AO SongJian[3]

1. 中国地质大学, 武汉　430074
2. 国家地质实验测试中心, 北京　100037
3. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京　100029

1. *China University of Geoscience*, *Wuhan* 430074, *China*
2. *National Research Center of Geoanalysis*, *Beijing* 100037, *China*
3. *State Key laboratory of Lithospheric Evolution*, *Institute of Geology and Geophysics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029, *China*

2007-05-07 收稿, 2008-03-14 改回.

Hu KB, Yao SZ, Qu WJ, Du AD and Ao SJ. 2008. Re-Os isotopic analysis of the Hulu Cu-Ni sulfide deposit magmatic ore systme, Esat Tianshan, Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 24(10):2359 – 2370

Abstract　Re and Os concentrations and Os isotopic analysis compositions have been obtained for massive, matrix and isseminated sulphide ores from three environments within the Hulu intrusion in order to assess the role of crustal contamination in the genesis of the Hulu Cu-Ni deposit. The initial Os isotopic composition implies significant magma interactions with radiogenic Os that most likely resides in the crust, which may be crucial to undersanding this style of magmatic sulphide ore system at the Hulu deposit in the eastern Tianshan.

Key words　Re-Os isotopic analysis; Magmatic sulphide deposit; Hulu; East Tianshan

摘　要　通过对葫芦铜镍硫化物矿石的 Re-Os 同位素物质来源示踪研究, 其$^{187}Os/^{188}Os$初始比值介于 1.40 ~ 1.97, γOs 值介于 1110 ~ 1565, 平均为 1379, 表明在成矿过程及岩浆侵位期间有大量地壳物质加入到成矿系统中。

关键词　Re-Os 同位素; 铜镍硫化物矿床; 葫芦; 东天山

中图法分类号　P597.3; P618.41; P618.63

东天山黄山—镜儿泉铜镍成矿带的赋矿岩石为镁铁-超镁铁岩体, 在该带分布有黄山、黄山东、黄山南、香山、土墩、二红洼、葫芦等镁铁-超镁铁岩体, 沿康古尔塔格断裂和次级断裂侵位于石炭系干墩组和梧桐窝子组中, 这些岩体高度分异, 普遍具有铜镍矿化; 现在业已探明黄山、黄山东为大型矿床, 土墩、香山为中型矿床, 黄山南、二红洼为小型矿床(图 1); 近年来通过在该区实施地质大调查项目后, 又在该区东部和南部找到了图拉尔根(三金柱等, 2003)和白石泉铜镍矿床(吴华等, 2005), 进一步拓宽了该区铜镍硫化物矿床的找矿范围, 显示东天山地区具有很好的找矿潜力和资源前景。

自从新疆地质矿产勘查开发局第六地质大队 1986 年发现黄山铜镍硫化物矿床以来, 黄山—镜儿泉铜镍成矿带受到国内外地质界和矿业界的广泛关注, 并取得了有关矿床地质特征、矿床地球化学、成岩成矿时代和矿床成矿预测等方面的研究成果(王润民等, 1987; 顾连兴等, 1994; 李华芹等, 1998; 毛景文等, 2002; 韩宝福等, 2004; Zhou *et al.*, 2004; 李月臣等, 2006; 毛启贵等, 2006)。

* 新疆国家“十一五”国家科技支撑计划重点项目(2007BAB07B03-01-01 和 2007BAB25B04)和家重点基础研究发展规划项目(2007CB411307)共同资助.

第一作者简介: 胡克兵, 男, 1964 年生, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事矿床地球化学和矿床勘查工作, E-mail: xjhuyang@163.com

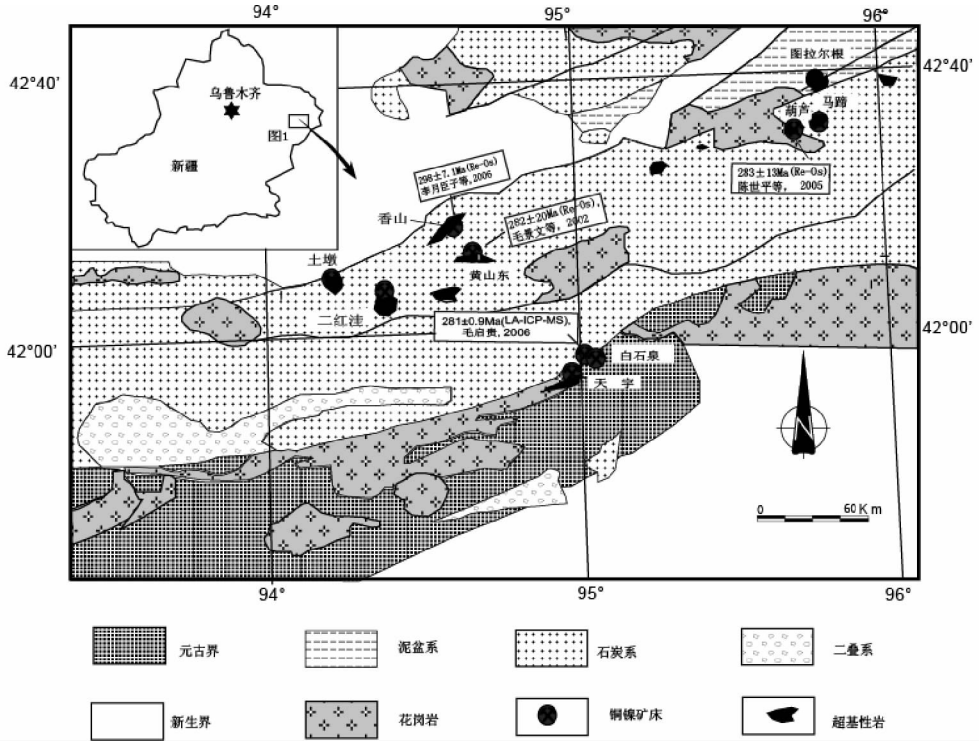


图 1 东天山东部铜镍硫化物矿床地质简图(根据顾连兴等,1994)

Fig. 1 Sketch map of the Cu-Ni sulfide deposit in the East Tianshan (after Gu *et al.*, 1994)

近年来,随着负热离子质谱技术(NTIMS)的广泛应用(VÖlkening *et al.*, 1991)和^{187}Re 衰变常数的精确测定($\lambda = 1.666 \times 10^{-11}$/year, Smoliar *et al.*, 1996),导致 Re-Os 同位素体系在岩石学和矿床学应用研究方面取得了很大进展。Re-Os 同位素体系近年来在成矿研究方面的主要进展集中体现在与岩浆硫化物有关的大型 Cu-Ni-PGE 矿床成矿时代厘定和成矿物质来源 Os 同位素示踪(Walker *et al.*, 1991, 1994; Dickin *et al.*, 1992; Marcantonio *et al.*, 1993; Horan *et al.*, 1994; Lambert *et al.*, 1998, 1999)。为了进一步厘定这套铜镍硫化物矿床物质来源,笔者挑选了葫芦铜镍硫化物矿石中的镍黄铁矿进行 Re-Os 同位素测定,追索其成矿物质来源和成矿动力学背景。

1 矿床地质特征和采样位置

葫芦铜镍矿位于哈密市东偏南 180km。地理坐标为东经 95°41′48″,北纬 42°31′18″。矿区出露地层为下石炭统梧桐窝子组,整合于干墩组之上,以灰绿色为主、局部黄色—黄灰色玄武岩、细碧岩、角斑岩、石英角斑岩、凝灰岩、硅质岩等。现已探明铜镍金属储量 11.98×10^4t,其中镍 8.02×10^4t(中型),铜 3.96×10^4t(小型),伴生钴 0.51×10^4t,矿床品位:Ni 为 0.83% ~2.15%,Cu 为 1.04%,Co 为 0.025% ~0.093%,伴生有 Au、Ag、Pd、Pt 等贵金属元素(王润民等,1987)。

葫芦杂岩体长轴方向为 NE78°,长 1.69km ~1.94km,平均 1.81km,宽度 0.11km ~0.72km,平均 0.35km,面积约为 0.62km^2。平面形态呈现为西大东小不规则的葫芦形态,边部多数为岩枝、岩舌侵入围岩,东西两侧伸入围岩达 170m ~187m(图 2)。剖面形态呈现为不对称盆状,西部 98 线最深达 439.90m,中部 100 线最浅为 188.83m(图 3)。

葫芦杂岩体可以进一步划分为如下 4 个岩相带,各岩相带特征概述如下。

辉长闪长岩相:岩石组合为斑状闪长岩、斑状辉长闪长岩、辉石角闪辉长岩和角闪辉长岩。岩性一般为灰绿色,斑晶为中长石或拉长石,含量 7% ~8%,钠黝帘石化斜长石 35% ~75%,辉石 0% ~60%,绿帘石 0% ~30%,石英、黑云母 0% ~3%,角闪石 0% ~55%,少量榍石、磷灰石。围岩蚀变为次闪石化、钠黝帘石化和绿帘石化等。

橄榄岩相:岩石组合为斜长角闪橄榄岩、角闪橄榄岩、斜长橄榄岩、辉石斜长橄榄岩、含长单辉辉橄岩、角闪辉橄岩。灰绿色、墨绿色,变余自形粒状结构、变余包含结构、变余包含嵌晶结构,块状、团块状和网脉状构造,矿物粒径 0.3mm ~5.5mm。橄榄石 30% ~90%,斜长石 1% ~25%,角闪石 2% ~35%,黑云母 0% ~15%,金云母 0% ~5%,单斜辉石 0% ~20%,紫苏辉石 0% ~5%,少量铬尖晶石、磷灰石、黄铁矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿、孔雀石等。围岩蚀变为蛇纹石化、滑石化、纤闪石化、菱镁矿化、绿泥石化和碳酸盐化等。

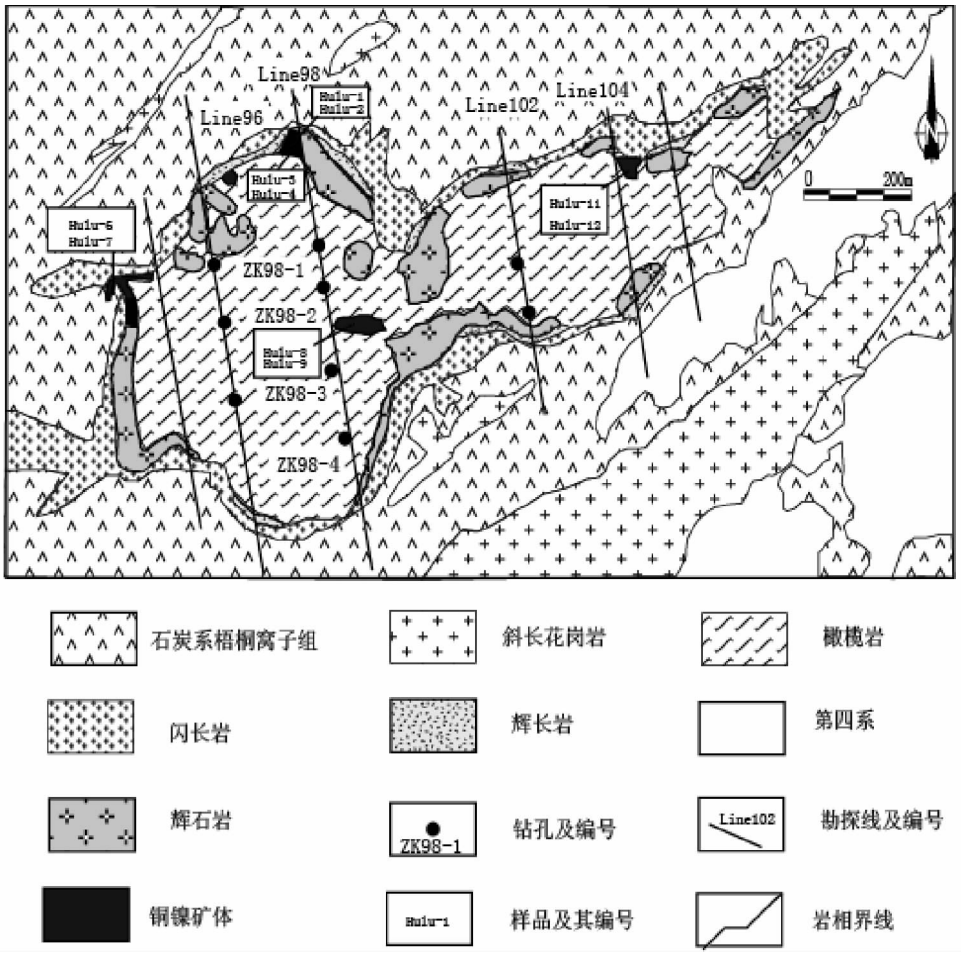


图 2　新疆葫芦铜镍硫化物矿床地质和采样位置图(陈世平等,2005)

Fig. 2　Geological map of the Hulu Cu-Ni sulfide deposit geology and showing sampling locations map(After Chen *et al.* , 2005)

橄辉岩相:该岩相带与辉长闪长岩相、辉石岩相为相变接触关系。岩石组合为橄辉岩、角闪橄辉岩、斜长橄辉岩等。灰绿色、褐绿色,包含嵌晶结构,块状构造,矿物粒径 2mm ~ 4mm。橄榄石 5% ~25%,单斜辉石 50% ~55%,斜长石 10% ~25%,普通角闪石 15% ~20%,微量铬尖晶石、金云母、榍石、磷灰石、磁铁矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、孔雀石、褐铁矿等。围岩蚀变以蛇纹石化、纤闪石化和绿泥石化为主。

辉石岩相:该岩相带与橄辉岩、橄榄岩为相变接触关系。岩石组合为斜长角闪辉石岩、角闪辉石岩、辉石岩等,深部见到有金云母单斜辉石岩、橄辉辉石岩和二辉角闪辉石岩。暗绿色、墨绿色,纤状变晶结构、半自形粒状嵌晶、变余粒状嵌晶结构,片状、块状构造,矿物粒径 1mm ~ 5mm。斜长石 3% ~25%,单斜辉石 50% ~95%,紫苏辉石 2% ~8%,普通角闪石 2% ~25%,橄榄石 3% ~8%,金云母 2% ~5%,少量磷灰石、铬尖晶石、磁铁矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿等。围岩蚀变为蛇纹石化、纤闪石化、绿泥石化为主。

葫芦矿区共圈定大小矿体 6 个,编号为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ及 1 号、2 号。其中Ⅲ和Ⅳ号矿体规模较大,Ⅲ号矿体出露地表,形成矿化氧化带,其余为盲矿体,各矿体特征概述如下。

Ⅰ号矿体:为较小的盲矿体,分布于 95 线和 99 线之间,走向长度为 250m,倾向延伸长度为 280m,最大埋深 350m,最小埋深 180m,平均真厚度 1.70m,矿体呈似层状,倾向东南,倾角 39°。产于含长方辉角闪橄榄岩、斜长单辉角闪橄榄岩相偏下部,为上悬矿体,以表外矿体为主,局部为矿体,贫矿平均品位:Cu:0.11%,Ni:0.28%,Co:0.018%。

Ⅱ号矿体:为盲矿体,分布于 95 线和 99 线之间,走向长度为 400m,倾向延伸长度为 470m,最大埋深 380m,最小埋深 35m,平均真厚度 8.82m,矿体呈似层状,倾向东南,倾角 40°。产于含斜辉角闪橄榄岩、二辉角闪橄榄岩相偏下部,矿体较贫,平均品位:Cu:0.15%,Ni:0.36%,Co:0.025%。

Ⅲ号矿体:出露地表,以贫矿为主夹富矿体,分布于 95 线和 99 线之间,走向长度为 400m,倾向延伸长度为 640m,最大埋深 410m,最小埋深 30m,平均真厚度:贫矿体 16.42m,富矿体 4.90m,矿体呈似层状,倾向东南,倾角 30 ~41°。矿体产于斜长角闪辉石岩、二辉角闪辉石岩相底部,近地表相

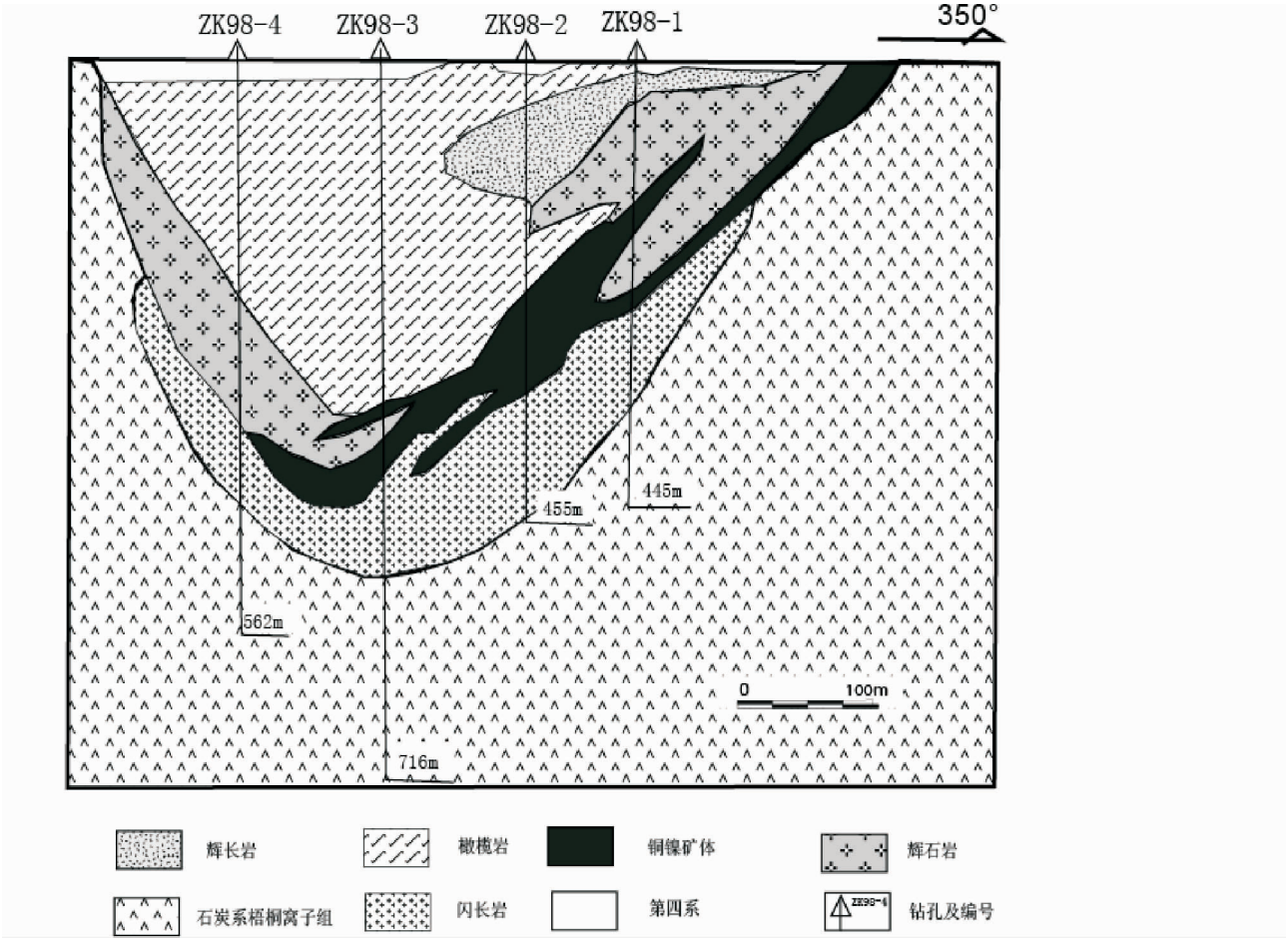


图 3 新疆葫芦铜镍硫化物矿床地质剖面图(陈世平等,2005)

Fig. 3 Geological profile map of the Hulu Cu-Ni deposit(After Chen *et al.*, 2005)

变为单辉橄辉岩相。矿石平均品位:贫矿石:Cu:0.28%,Ni:0.54%,Co:0.028%;富矿石:Cu:0.54%,Ni:1.41%,Co:0.028%。

Ⅳ号矿体:为矿区最大的盲矿体,以贫矿为主夹富矿体,分布于99线和101线之间,长度为290m,倾向延伸长度为290m,最大埋深530m,最小埋深330m,平均真厚度:贫矿11m,富矿体8m,矿体呈似层状,倾向东南,倾角43°。矿体产于单辉辉橄岩相中,基本为全岩矿化,为深熔贯入型矿体。矿石平均品位:贫矿石:Cu:0.19%,Ni:0.38%,Co:0.019%;富矿石:Cu:0.45%,Ni:1.24%,Co:0.057%。

1号、2号矿体:为小盲矿体,分布于98线及其两侧,长度为50m,倾向延伸长度为65m,1号矿体最大埋深300m,最小埋深255m,2号矿体最大埋深310m,最小埋深263m;平均真厚度3.3m,矿体呈似层状,倾向东南,倾角38°。矿体位于角闪橄榄岩相下部,为就地熔离型矿体。矿石平均品位:1号矿体:Cu:0.21%,Ni:0.39%,Co:0.028%;2号矿体:Cu:0.21%,Ni:0.36%,Co:0.025%。

矿石中金属矿物有磁铁矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿,少量钛铁矿、辉铜矿、铂碲铋镍矿等;脉石矿物以橄榄石、透辉石、紫苏辉石、普通角闪石、基性斜长石、黑云母、白云母等。次生矿物有褐铁矿、孔雀石、铜蓝和黄钾铁钒。矿石结构为自形-半自形粒状结构,不混熔连晶结构、海绵陨铁结构;矿石构造为稀疏浸染状构造、稠密浸染状构造、细脉浸染状构造。根据金属矿物、脉石矿物的晶体大小、结晶程度、相互包裹和穿插关系,将成矿过程进一步划分成岩浆结晶早期、岩浆晚期、热液期和表生期成矿阶段。

2 样品及测试方法

本次研究所取的样品集中于矿体中-北部,共采集了11件矿石样品进行Re-Os同位素测定,其具体采样位置示于图2中,为了保证采集样品的代表性,我们所取的样品具有不同的矿石类型(表1),其中有细脉、网脉状、浸染状和块状矿石。

本次样品同位素组成是在国家地质实验中心采用同位素稀释-ICP-MS质谱法测定;实验中采用Carius管封闭溶样来分解样品(杜安道等,2001;Shirey and Walker,1995),化学处理过程简述如下。

表 1 葫芦铜镍硫化物矿床矿石样品一览表

Table 1 The sample of Cu- Ni sulfide ores from the Hulu deposit

序号	样品号	岩性描述	矿石类型	矿物组合
1	Hulu-1	辉长岩	团块状、网脉状	镍黄铁矿 + 黄铜矿 + 斑铜矿
2	Hulu-2	辉长岩	细脉、网脉状	镍黄铁矿 + 黄铜矿 + 斑铜矿
3	Hulu-3	辉长岩	细脉、网脉状	镍黄铁矿 + 黄铜矿 + 斑铜矿
4	Hulu-4	辉长岩	细脉、网脉状	镍黄铁矿 + 黄铜矿
5	Hulu-6	辉石岩	稠密浸染状	镍黄铁矿 + 黄铜矿
6	Hulu-7	辉石岩	团块状	镍黄铁矿
7	Hulu-8	橄榄岩	稠密浸染状	镍黄铁矿 + 黄铜矿
8	Hulu-9	橄榄岩	团块状、网脉状	镍黄铁矿 + 黄铜矿
9	Hulu-11	橄榄岩	团块状、网脉状	镍黄铁矿
10	Hulu-12	橄榄岩	稠密浸染状	镍黄铁矿 + 黄铜矿

2.1 样品分解

将准确称取的待分析样品，通过长细颈漏斗加入到 Carius 管（一种高硼厚壁大玻璃安瓿瓶）底部，然后置于温度为 -50 ~ -80℃的盛有液氮与乙醇混合溶液的保温杯中。经过一段时间的冷却后，把准确称取的^{185}Re 和^{190}Os 混合稀释剂加入到 Carius 管底部，再加入 2mLc（HCl）= 10mol/L 的 HCl，6mLc（HNO_3）= 16mol/L 的 HNO_3。当管底溶液冰冻凝固后，用丙烷氧气火焰加热将 Carius 管封闭。待封闭的 Carius 管回温至室温后，放入不锈钢套管内，并置于鼓风烘箱内，逐渐升温到 230℃，保温 10h。最后，在 Carius 管底部冷冻的情况下打开，并用 40mL 水将管中溶液转入蒸馏瓶中。

2.2 蒸馏分离 Os

为满足仪器测量所要求的酸度及消除 OsO_4 水吸收液中的少量铼的干扰，锇的蒸馏分两次进行。首先，于 105 ~ 110℃蒸馏 50min，用 10mL 水吸收蒸出的 OsO_4，将蒸馏残液转入 50mL 小烧杯中待分离铼用。然后，将吸收液转入已洗净的原蒸馏瓶中，再加入 40mL 水进行第二次蒸馏，蒸馏约 1h 左右。蒸出的 OsO_4 用 10mL 水吸收后用于 ICP-MS 测定锇同位素比值。

2.3 萃取分离 Re

将第一次蒸馏残液置于电热板上，加热至近干后，再加入少量水，加热至近干。然后加入 10mLc（NaOH）= 5mol/L 的 NaOH，使其转为碱性介质。稍微加热后取上清液转入 120mL Teflon 分液漏斗中，加入 10mL 丙酮，萃取 5min。静止分相后弃去水相。再加 2mLc（NaOH）= 5mol/ L 的 NaOH 溶液到分液漏斗中，振荡 2min，洗去丙酮相中的杂质，弃去水相。将丙酮转到已加有 2mL 水的小玻璃烧杯中。在电热板上 50 ℃加热以蒸发丙酮，并加热溶液至近干后加数滴浓硝酸，以除去残存的锇。最后，用数毫升稀 HNO_3 溶解盐类并转移至 10mL 比色管中，调整溶液硝酸浓度为 2%，用 ICP-MS 测定铼同位素比值。

2.4 质谱测定

采用美国 TJA 公司生产的 TJA PQ ExCell ICPMS（电感耦合等离子体质谱仪）测定铼同位素比值。采用美国 Finigan 公司 HR ICP-MS 测定锇同位素比值。对于 Re：选择质量数为 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 10pg，普 Os 约为 1pg，远远小于所测样品中的铼、锇含量，不会影响实验中铼、锇含量的准确测定。

3 测试结果

Re-Os 同位素测试结果列于表 2 中。由于矿石类型的差异（表 1），Re 和 Os 的含量存在着明显差异，对于块状铜镍矿石（Hulu-7）Re 和 Os 的含量相对较低，总 Re 和 Os 含量分别为（34.412 ± 0.058）× 10^{-9} 和（0.537 ± 0.012）× 10^{-9}。而稠密浸染状铜镍矿石（Hulu-6，8，12）总 Re 和总 Os 含量介于（81.833 ± 1.798）~（90.690 ± 2.444）× 10^{-9} 和（0.5336 ± 0.009）~（0.697 ± 0.009）× 10^{-9} 之间，而细脉、网脉状的矿石总 Re 和总 Os 含量介于块状和稠密浸染状铜镍矿石之间。总的 Re 和 Os 含量和香山和喀拉通克铜镍硫化物矿床相当（李月臣等，2006；韩春明等，2006）。

根据等时线方程$^{187}Os/^{188}Os = (^{187}Os/^{188}Os)_i + {}^{187}Re/^{188}Os(e^{\lambda t} - 1)$（Peck *et al.*，1992），其中，$^{187}Os/^{188}Os$ 为现今所测定到的比值；$(^{187}Os/^{188}Os)_i$ 为体系中相对于 Re 及 Os 封闭时的初始比值；$^{187}Re/^{188}Os$ 为现今测到的比值；采用衰变系数（λ）为 1.666×10^{-11}/year（Smoliar *et al.*，1996），t 为体系相对于 Re 及 Os 封闭以后所经历的地质年龄。根据上述公式计算，$(^{187}Os/^{188}Os)_i$ 介于 1.40 ~ 1.97 之间，表明成矿物质来源于下地壳。

与 Sm-Nd 同位素体系研究的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值一样，Re-Os 同位素体系，是用 γ_{Os} 来反映 t 时相对于统一地幔库（UMR）的 Os 同位素成分差异；γ_{Os} 是指示地壳物质加入成矿体系的一个重要参数，它能够反映壳-幔混染程度，根据 Walker *et al.*（1989）提出的公式：$\gamma_{Os} = [(^{187}Os/^{188}Os)_{样品}(t)/(^{187}Os/^{188}Os)_{UMR}(t) - 1] \times 100$，计算得出葫芦矿床的 γ_{Os} 介于 1118 ~ 1565 之间，与加拿大著名的 Voisey's Bay 矿床的 γ_{Os} 值为 898 ~ 1908 之间（Lambert *et al.*，1999）相当，表明葫芦矿床成矿物质来源于下地壳。

表 2 新疆葫芦铜镍硫化物 Re-Os 同位素数据

Table 2 Re-Os isotopic for the sulfides ores at the Hulu Cu-Ni sulfide deposit, East Tianshan

样号	样重(g)	Re ($\times10^{-9}$)		总 Os ($\times10^{-9}$)		C 普 Os ($\times10^{-9}$)		^{187}Re ($\times10^{-9}$)		Re/普 Os	$\frac{^{187}Re}{^{188}Os}$	$\frac{^{187}Os}{^{188}Os}$	$\left(\frac{^{187}Os}{^{188}Os}\right)_i$	γ_{Os}
		Re	2σ	Os	2σ	Os	2σ	Re	2σ		(2σ)	(2σ)		
Hulu-1	1.201	56.139	1.326	0.472	0.011	1.209	0.039	35.284	0.833	46.43	224.2(8.9)	2.999(0.115)	1.9397	1543
Hulu-2	1.201	36.362	0.433	0.458	0.011	1.508	0.047	22.854	0.272	24.11	116.5(3.9)	2.332(0.090)	1.7816	1417
Hulu-3	0.303	38.146	0.475	0.416	0.005	1.257	0.013	23.976	0.299	30.35	146.6(2.4)	2.543(0.034)	1.8498	1471
Hulu-4	1.200	43.466	0.483	0.481	0.008	1.375	0.026	27.320	0.304	31.61	152.7(3.3)	2.690(0.060)	1.9678	1565
Hulu-6	1.201	82.513	1.185	0.537	0.012	1.246	0.036	51.861	0.745	66.22	319.8(10.2)	3.315(0.115)	1.8032	1434
Hulu-7	1.200	34.412	0.508	1.088	0.042	4.590	0.198	21.629	0.319	7.50	36.2(1.7)	1.822(0.104)	1.6511	1313
Hulu-8	1.201	81.833	1.798	0.697	0.009	2.250	0.027	51.433	1.130	36.37	175.7(4.4)	2.379(0.033)	1.5488	1232
Hulu-9	0.500	49.974	0.709	0.4903	0.005	1.4605	0.017	31.410	0.446	34.22	165.3(3.0)	2.580(0.031)	1.7986	1430
Hulu-11	1.200	60.432	0.534	0.5201	0.005	1.6484	0.018	37.983	0.336	36.66	177.1(2.5)	2.425(0.027)	1.5880	1263
Hulu-12	1.199	90.690	2.444	0.5336	0.009	1.4449	0.029	57.001	1.536	62.77	303.2(10.1)	2.838(0.067)	1.4055	1118

注：①普 Os 是根据 Nier 值的 Os 同位素丰度，通过$^{192}Os/^{190}Os$测量比计算得出，^{187}Os是^{187}Os同位素总量；②Re/Os 中的 Os 为普通 Os；③$\gamma_{OS}=100[(^{187}Os/^{188}Os)_{sample}(T)/(^{187}Os/^{188}Os)_{chondrite}(T)-1]$，2.83 亿年的球粒陨石$(^{187}Os/^{188}Os)_{chondrite}=0.0960+0.4007(e^{\lambda(4.56*10E09)}-e^{\lambda(2.83*10E08)})=0.12573$，使用的$^{187}Re$衰变常数为$\lambda=1.666\times10^{-11}y^{-1}$。2σ-为不确定度。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 95%。模式年龄的不确定度还包括衰变常数的不确定度(1.02%)，置信水平 95%。Os/ Os 的不确定度包括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 95%

4 讨论

4.1 成矿物质来源

近年来，负热离子质谱的应用和^{187}Re衰变常数的精确测定($\lambda=1.666\times10^{-11}a^{-1}$，Smoliar *et al.*, 1996)导致 Re-Os 同位素体系在矿床学应用研究方面取得了很大进展，集中体现在与硫化物有关的大型 Cu-Ni-PGE 矿床成矿时代厘定和成矿物质来源 Os 同位素示踪(Yang *et al.*, 2004；李文渊, 1996)，如 Norseman-Wiluna 地区(西澳)、Noril'sk Camp(俄罗斯西伯利亚)、Stillwater 杂岩(美国 Montana 地区)、Pechenga 杂岩(俄罗斯克拉半岛)、Bushveld 杂岩(南非)、肖德贝里杂岩(加拿大安大略)、广西宝坛、陕西省略阳煎茶岭、东天山黄山东等大型与硫化物有关的 Cu-Ni-PGE 矿床都进行了大量的 Re-Os 同位素体系方面的研究(Shirey *et al.*, 1998；毛景文和杜安道, 2001；毛景文等, 2002；王瑞廷等, 2005)。岩浆成因的 Cu-Ni 硫化物矿床中因普遍富含铂族元素而被认为其成矿物质来源于地幔(Naldrett, 1981)。但通过近年来的 Re-Os 同位素研究表明：该类矿床的成矿物质既可完全来自于地幔，也可完全来自于地壳，但多数情况下，则是壳-幔混合来源的产物(Shirey *et al.*, 1998；Lambert *et al.*, 1999；Sproule *et al.*, 1999)。

Re-Os 同位素体系是铜镍硫化物矿床形成的强有力的示踪剂和成矿过程地壳物质混入程度的高度灵敏的指示剂(Foster *et al.*, 1996)。在镁铁质-超镁铁质岩浆上涌过程中及其在地壳岩浆房中与地壳物质，尤其是与含硫化物地壳发生反应，使其组分发生变化。由于地壳相对富 Re，混入越多地壳物质产生放射性^{187}Os含量越高，相应$^{187}Os/^{188}Os$初始值发生变化。锇被认为是一种像 Ni 和 Cr 一样相容性元素(Morgan, 1986；Walker *et al.*, 1989；Martin *et al.*, 1994；Hart and Ravizza, 1996；Hauri *et al.*, 1996)，Re 是一种不相容元素(Walker *et al.*, 1989)，而且与 S 丰度相关性好。在壳幔分异和地球化学循环过程中，Os 趋于在地幔富集，Re 相对亲地壳。由此以来，可以使用 Re/Os 和普通 Os 判断成岩成矿物质的来源。Foster *et al.* (1996) 在 Re/Os 和普通 Os 图中初步确定地幔熔体的位置，Sproule *et al.* (1999)进一步把世界上主要的铜镍硫化物矿床中矿石和富硫地壳的数值范围也标在图中。Walker *et al.* (1994) 在研究俄罗斯 Noril'sk 岩浆型 Cu-Ni 硫化物矿床及有关基性和超基性岩时作了大量 Re-Os 同位素测量，初步证明 Noril'sk 铜镍矿基本上未受地壳同化混染；而 Voisey's Bay, Duluth, Sudbury 和 Sally Malay 同化混染了不同量的地壳物质(Lambert *et al.*, 1999；Sproule *et al.*, 1999)。侵入体与诺利尔斯克和泰拉克(Talnakh) 矿床中的 Re-Os 同位素分析得到了$^{187}Os/^{188}Os$初

始比值，与其它同位素数据（Pb、Nd）一起，反映了洋岛玄武岩（OIB）是幔源。因此诺利尔斯克型含矿侵入体肯定来源于热点地区的原始地幔熔体。王瑞廷等（2005）对陕西省略阳煎茶岭铜镍硫化物矿石的 Re-Os 同位素测年，获得等时线年龄数据为 878 ± 27Ma，其等时线 $^{187}Os/^{188}Os$ 初始比值为 0.131 ± 0.01，γ_{Os} 为 −15.37 − +280.65，表明成矿物质主要来自于 Re 亏损地幔，后期有壳源物质加入成矿系统。毛景文等（2002）通过对黄山东铜镍硫化物矿石的 Re-Os 同位素测年，获得等时线年龄数据为 282 ± 20Ma，其等时线 $^{187}Os/^{188}Os$ 初始比值为 0.25 ± 0.04，γ_{Os} 值平均为 99，显示出在成矿过程及岩浆侵位期间有大量地壳物质混入成岩成矿系统。毛景文和杜安道（2001）对宝坛铜镍硫化物矿石进行了计算，使用 ^{187}Re 衰变常数为 $1.666 \times 10^{-11} y^{-1}$ r（Smolar *et al.*，1996），得到宝坛地区铜镍硫化物矿石 982Ma 的 γ_{Os} 值。宝坛地区铜镍硫化物矿石的 γ_{Os} 变化范围比较大，从 +5 到 +716。其中贯入型矿石的 γ_{Os} 达 +5 和 +20，底部熔离型矿石的 γ_{Os} 为 +320 至 +716。这些结果表明来自地幔的镁铁质-超镁铁质岩浆及铜镍硫化物矿质，在上涌和定位过程中由于地壳物质的同化混染而导致 γ_{Os} 增加。由上述 Re-Os 同位素研究表明，与镁铁质-超镁铁岩有关的铜镍硫化物矿床的成矿物质既可完全来自于地幔，也可完全来自于地壳，但多数情况下，则是壳-幔混合来源（Shirey *et al.*，1998；表 3）。

本次工作获得葫芦矿石的 $^{187}Os/^{188}Os$ 初始比值为 1.40 ~ 1.97，γOs 值为 1118 ~ 1565 之间，平均为 1379，与加拿大 Labrador -Voisey's Bay 矿床 γ_{Os} 值（1040 ± 200）接近，表明葫芦铜镍硫化物矿床在成矿过程及岩浆侵位期间有大量地壳物质加入成岩成矿系统中，这个结论在在 Re/Os 和普通 Os 图中也可以得到印证（图 4）。

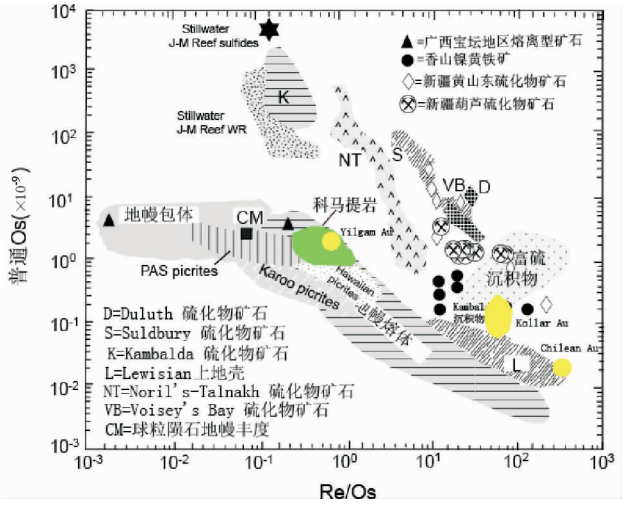


图 4 新疆葫芦硫化物矿石 Re/Os 和普通 Os 对比图（据 Lambert *et al.*，1999）

Fig. 4 Re/Os vs. common Os of the sulfide ores at the Hulu deposit (After Lambert *et al.*, 1999)

4.2 成矿动力学背景

近 20 年来，大量证据表明在造山带岩浆弧环境具有很好岩浆铜镍硫化物矿床成矿潜力，例如澳大利亚的早元古代 Sally Malay 侵入杂岩（铜镍矿石 4 百万吨，平均品位：Ni 1.8%，Cu 0.73%；Hoatson and Blake，2000）、西班牙早石炭世 Aguablanca 侵入岩体（铜镍矿石 16 百万吨，平均品位：Ni 0.66%，Cu 0.46%；Pina *et al.*，2006）和博茨瓦纳 Tati 造山带中铜镍矿床（如 Phoenix，Selkirk and Tekwane 矿床；铜镍矿石 4.5 百万吨，平均品位：Ni 2.05%，Cu 0.85%；Maier *et al.*，2008）。中亚造山带中赋存有大量的岩浆铜镍硫化物矿床，在斋桑造山带中，以马克苏特为代表，矿体赋存在辉长岩—苏长岩—粗玄岩建造中，矿床规模可达大型，是该区内最大的铜镍矿床（陈哲夫等，1999）；准噶尔造山带北缘喀拉通克矿田包括有 7 个矿床，其中大型镍矿床 2 个，中型 1 个，小型 4 个，矿体赋存在苏长岩中（王润民等，1987）；东天山造山带黄山—镜儿泉一带，自西向东分布着土墩、二红洼、香山（黄山北）、黄山、黄山南、黄山东、红石岗、黑石梁、葫芦、串珠、马蹄等镁铁-超镁铁岩体，沿康古尔塔格断裂和次级断裂侵位于石炭系干墩组和梧桐窝子组中。这些岩体高度分异，普遍具有铜镍矿化，现已探明黄山、黄山东和图拉尔根为大型矿床，土墩、香山和白石泉铜镍为中型矿床，黄山南、二红洼为小型矿床（郭宏等，2006）。最近，在新疆—甘肃的北山造山带新发现了坡十、坡一、罗东和黑山等铜镍硫化物矿床。

根据葫芦岩体的岩石地球化学特征，并结合东天山东段基性—超基性岩体的空间分布特征，认为该岩体形成于洋内俯冲的增生岛弧环境，是晚古生代北天山洋壳向北俯冲增生的产物。样品的球粒原始标准化微量元素配分曲线图基本相似，总体上富集大离子亲石元素（LILE），相对亏损高场强元素（HFSE），尤其明显亏损 Nb、Ta 和 Ti（表 4 和图 5）。表明岩体形成于消减带之上的火山弧环境，具有岛弧岩浆特点。

沿着康古尔塔尔断裂带分布有几百千米长的基性-超基性杂岩体，对于成因机制有很大分歧，有的认为是代表消亡洋盆的蛇绿岩带（姬金生等，1999；周济元等，2001）、阿拉斯加型侵入杂岩体（刘德权，1983；胡受奚等，1990）、岛弧环境（倪志耀，1994）、弧间拉张（朱文斌等，1996）、后碰撞幔源岩浆上侵形成（何国琦等，1994；毛景文等，2002；李锦轶等，2002；秦克章等，2000；韩宝福等，2004）。在黄山一带的基性-超基性杂岩体呈同心环带状构造，纯橄榄岩位于核心，向外岩性变化为橄榄岩、橄榄辉石岩和角闪辉长岩（马瑞士等，1997）；一些杂岩体含有铜镍硫化物矿床（Xiao *et al.*，2004）。带状基性-超基性杂岩体侵位于变形的泥盆纪—石炭纪地层之中。我们认为这些岩体与西南阿拉斯加 Togick 岛弧的 Goodnews 湾的阿拉斯加型同心环带状岩体类似（Taylor，1967；Goldfarb，1997；Goldfarb *et al.*，2001）。黄山杂岩体地球化学特征与大洋拉斑质玄武岩和 MORB 玄武岩

表 3 世界上与镁铁-超镁铁质岩有关的大型 Cu-Ni-PGE 矿床的 Re-Os 同位素体系特征

Table 3 Re-Os dataing for the large Cu-Ni-PGE deposit associated with mafic-ultramafic rocks in the world

矿床名称	金属元素	Re($\times10^{-6}$)	Os($\times10^{-6}$)	$(^{187}Os/^{188}Os)_i$	Re-Os 年龄 (Ma)	成矿物质来源	参考文献
甘肃金川	Cu-Ni-PGE	44 ~ 265	3.6 ~ 57	0.255 ± 0.014	852 ± 25	上地幔并有上地壳物质大量加入	Yang *et al.* (2004)
新疆哈密黄山东	Cu-Ni-PGE	28.9 ~ 304.2	0.34 ~ 30.75	0.25 ± 0.04	282 ± 20		毛景文和杜安道 (2002)
广西宝坛	Cu-Ni	1.6 ~ 639	3.79 – 125.3	0.102 ± 0.01	982 ± 21	Re 亏损地幔, 少量地壳混染	毛景文等 (2001)
加拿大肖德贝里 Levack 矿床	Cu-Ni-PGE	150 ~ 302	12.77 – 64.01	4.70 ± 0.25	1840 ± 60		
加拿大肖德贝里 Falconbridge 矿床	Cu-Ni-PGE	149 ~ 334	61 ~ 91	5.34 ± 0.24	1780 ± 110	壳源,为陨石冲击造成地壳物质重融产物	Walker *et al.* (1991)
加拿大肖德贝里 Trathcona 矿床	Cu-Ni-PGE	69.7 ~ 216.5	1.79 ~ 29.24	8.73 ± 0.37	1770 ± 60		
美国 Stillwater-Montana 矿床	PGE	192 ~ 1550	2160 ~ 23300	0.138	2700	下地壳	Lambert *et al.* (1994)
俄罗斯 Norll'sk 1 号岩体和 Talnakh 矿床	Cu-Ni-PGE	4.067 ~ 79.70	0.2031 ~ 88.68	0.1326 ± 0.025	245.7 ± 60	上地幔,有少量地壳混染	Walker *et al.* (1994)
澳大利亚 Kambalda-Perseverance-Mt Keith 矿床	Fe-Ni-Cu-PGE	0.21 ~ 272.57	23.64 ~ 1886.58	0.10889 ± 0.00035	2706 ± 36	上地幔	Foster *et al.* (1996)
加拿大 Labrador - Voisey ' s Bay 矿床	Ni-Cu-Co	148 ~ 288	4.8 ~ 24		1323 ± 135	上地幔并有上地壳物质大量加入	Lambert *et al.* (1998)
新疆喀拉通克	Cu-Ni-PGE	6.605 ~ 61.1	0.035 ~ 0.333	0.352 ± 0.044	305 ± 15	上地幔,有少量地壳混染	韩春明等 (2006)
新疆香山	Cu-Ni-PGE	39.61 ~ 110.6	0.437 ~ 3.765	0.682 ± 0.032	298 ± 7.1	上地幔,有部分地壳混染	李月臣等 (2006)

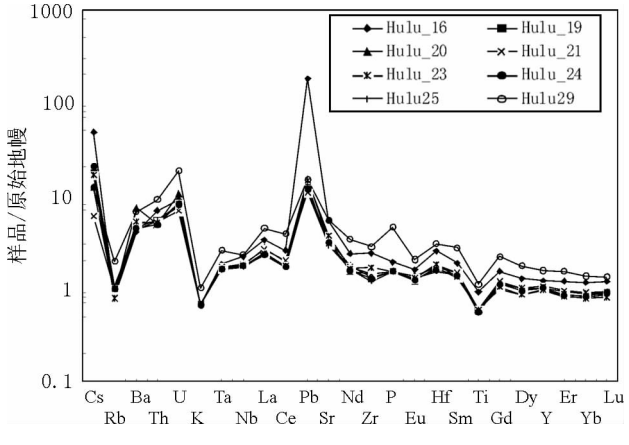


图 5 葫芦基性杂岩体微量元素蛛网图解(标准化值根据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Primitive mantle-normalized trace elements spider-diagram of the Hulu basic complex (Normalization values from Sun and McDonough, 1989)

相似。岩石地球化学特征和沉积相研究表明,康古尔塔格—黄山断裂带北侧出露一套分别由洋岛拉斑玄武岩、浅海碳酸盐岩、深海复理石、蛇绿岩等不同构造单元组成的弧前增生楔。同时,大量泥盆纪—二叠纪钙碱性花岗岩(周济元等, 2001)侵入于增生楔中形成增生岩浆弧,亦即大南湖—头苏泉岛弧带, 并在哈密沁城—镜儿泉—头苏泉一带发育大量中泥盆世—晚二叠世斑岩体(王润民等,1987)。李月臣等(2006)对香山岩体的岩石地球化学特征进行了研究,结果表明该岩体形成于消减带之上的岛弧环境。

上述事实表明,康古尔塔格—黄山断裂带北侧发育泥盆世—晚二叠世增生岩浆弧,与侵入同一时限增生楔中的黄山阿拉斯加型杂岩体共同记录了古天山洋沿着康古尔塔格—黄山缝合带向北俯冲增生过程。这些阿拉斯加型侵入杂岩体的形成早于古亚洲洋的闭合和与之相伴随的韧性剪切变形(顾连兴等, 1994; Zhou *et al.*, 2004),是古天山洋向北俯冲增生过程中形成的与增生岩浆弧密切相关的一套基性-超基性杂岩体,并非是碰撞后的产物, 这与东天山地区晚古生代增生造山作用相一致(李月臣等, 2006; 毛启贵等,2006)。

表 4 葫芦岩体辉长橄榄岩主量(wt%)、微量元素($\times 10^{-6}$)地球化学成分

Table 4 Major element(wt%) and trace element($\times 10^{-6}$) data of gabbro-olivine at the Hulu complex

样号	Hulu16	Hulu19	Hulu20	Hulu21	Hulu23	Hulu24	Hulu25	Hulu29
SiO_2	29.67	38.25	38.67	38.72	38.48	39.28	39.03	38.29
TiO_2	0.20	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12	0.24
Al_2O_3	3.86	5.79	5.15	5.85	5.70	5.34	5.46	4.74
TFe_2O_3	25.46	11.68	12.27	11.63	11.74	11.83	11.87	12.68
MnO	0.14	0.14	0.15	0.14	0.14	0.15	0.15	0.17
MgO	23.07	31.37	31.84	32.19	31.44	31.48	31.76	31.37
CaO	2.70	2.35	2.57	2.40	2.52	2.56	2.43	3.08
Na_2O	0.04	0.12	0.14	0.11	0.15	0.11	0.11	0.13
K_2O	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
P_2O_5	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.09
LOI	9.13	9.85	8.98	8.52	9.45	8.97	9.04	8.96
Total	94.32	99.73	99.95	99.73	99.80	99.89	100.01	99.78
La	2.28	1.58	1.84	1.79	1.63	1.58	1.61	3.04
Ce	4.57	2.98	3.45	3.55	3.08	3.02	3.05	6.93
Pr	0.75	0.48	0.54	0.55	0.50	0.49	0.50	1.01
Nd	3.20	2.04	2.34	2.32	2.18	2.09	2.17	4.55
Sm	0.83	0.58	0.65	0.66	0.58	0.61	0.62	1.22
Eu	0.27	0.20	0.23	0.22	0.22	0.21	0.21	0.34
Gd	0.90	0.59	0.68	0.70	0.62	0.66	0.67	1.29
Tb	0.15	0.10	0.11	0.11	0.10	0.11	0.11	0.21
Dy	0.93	0.63	0.74	0.74	0.63	0.69	0.74	1.27
Ho	0.19	0.13	0.16	0.16	0.13	0.14	0.16	0.26
Er	0.57	0.38	0.45	0.45	0.39	0.40	0.44	0.72
Tm	0.09	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06	0.07	0.10
Yb	0.57	0.39	0.43	0.44	0.39	0.41	0.43	0.67
Lu	0.09	0.06	0.06	0.07	0.06	0.07	0.07	0.10
∑REE	15.38	10.22	11.75	11.82	10.57	10.53	10.84	21.72
Sc	9.14	9.80	12.72	9.26	10.33	11.38	12.84	12.71
Cr	1430	1716	1844	1976	1895	1823	2567	2382
Co	481	124	107	103	109	103	111	118
Ni	11841	786	654	587	653	593	627	669
Cu	6639	315	169	149	251	123	138	172
Ga	4.07	4.82	4.44	5.28	4.78	4.58	4.78	4.13
Rb	0.51	0.54	0.55	0.63	0.49	0.63	0.66	1.25
Sr	112	70	69	64	79	67	61	115
Y	5.47	4.24	4.84	4.81	4.34	4.56	4.59	6.99
Zr	27	16	15	16	19	14	13	31
Nb	1.54	1.26	1.26	1.29	1.23	1.25	1.22	1.64
Cs	1.53	0.56	0.39	0.19	0.54	0.65	0.66	0.39
Ba	28	32	51	35	36	31	30	47
Hf	0.77	0.52	0.51	0.55	0.57	0.50	0.47	0.94
Ta	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.11
Tl	0.10	0.06	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05
Pb	33.6	2.18	2.78	2.03	2.70	2.14	2.38	2.75
Bi	9.11	0.18	0.15	0.12	0.14	0.13	0.15	0.17
Th	0.58	0.47	0.41	0.44	0.43	0.41	0.45	0.76
U	0.19	0.17	0.22	0.14	0.17	0.17	0.16	0.38

5 结论

岩石地球化学特征表明葫芦矿床形成于岛弧环境,结合东天山黄山—镜儿泉一带镁铁—超镁铁杂岩体和火山岩空间分布特征,表明该矿床为晚古生带北天山洋盆向北俯冲增生的产物;葫芦矿石硫化物的$^{187}Os/^{186}Os$初始比值为1.40~1.97,γ_{Os}平均值为1379,说明在成矿过程中仅有大量地壳物质混染加入到岩浆和成矿系统之中。东天山康古尔塔格—黄山断裂带北侧的镁铁-超镁铁侵入杂岩体属于阿拉斯加型杂岩体,并非蛇绿岩或碰撞后幔源侵入体,它与该区的钙碱性花岗岩、斑岩一起记录了古天山洋于泥盆纪—二叠纪向北连续俯冲增生的连续过程。

致谢 实验分析测试过程中,中国科学院地质与地球物理研究所和国家地质测试中心实验室的工作人员曾付出了辛苦的劳动;成文过程中,得到杨富全和史仁灯研究员的严格审查和大量帮助;感谢肖文交研究员、马英军研究员、王京彬研究员、高俊研究员、李锦轶研究员、秦克章研究员、方维萱教授和徐新教授对本次研究工作的耐心指导,在此一并表示诚挚的感谢。

References

Chen SP, Wang DH, Qu WJ, Chen ZH and Gao XL. 2005. Geological features and ore formation of the Hulu Ni-Cu sulfide deposits, Eastern Tianshan, Xinjiang. Xingjiang Geology, 23(3): 230 – 233 (in Chinese with English abstract)

Chen ZF, Zhou SY and Wu TD. 1999. Characteristics of large metallic ore deposits and metallogenic environment in Central Asia. Xinjiang Urumqi: Science Technology and Hygiene Publishing House, 1 – 265 (in Chinese with English abstract)

Du AD, Zhao DM, Wang SX *et al*. 2001. Precise Re-Os dating for molybdenite by ID-NTIMS with Catius tube sample preparation. Rock and Mineral Analysis, 20: 247 – 252 (in Chinese with English abstract)

Dickin AP, Richardson JM, Crock, McNutRH and Peredery V. 1992. Osmium iotope evidence for a crustal origion of platinum group elements in the Sudbury nicke ore, Ontario. Geochim. Cosmochim. Acta, 56:3531 – 3537

Foster JG, Lambert DD and Frick LR. 1996. Re-Os isotopic evidence for genesis of Archaean nickel ores from uncontaminated komatiites. Nature, 382:703 – 706

Goldfarb RJ. 1997. Metallogenic evolution of Alaska. Economic Geology, 9:4 – 34

Goldfarb RJ, Groves DI and Gardoll S. 2001. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis. Ore Geology Reviews, 18:1 – 75

Gu LX, Chu JL, Guo JC, *et al*. 1994. The east Xinjiang-type mafic-ultramafic complexes in orogenic environments. Acta Petrologica Sinica, 10: 339 – 356 (in Chinese with English abstact)

Guo H, LiX, Mao QG and Zhang JE. 2006. Characteristics of magmatic Cu-Ni sulfide deposits and their geodynamic mechanism in the East Tianshan. Xinjiang Geology, 24(2):135 – 140 (in Chinese with English abstact)

Han BF, Ji JQ, Song B, Chen LH and Li ZH. 2004. SHRIMP zircon U-Pb ages of Kalatongke No. 1 and Huangshandong Cu-Ni- bearing mafic-ultramafic complexes, North Xinjiang, and geological implications. Chinese Science Bulletin, 49: 2324 – 2328 (in Chinese)

Han CM, Xiao WJ, Zhao GC, Qu WJ, Mao QG and Du AD. 2006. Re-Os isotopic analysis of the Kalatongke Ni-Cu Sulfide Deposit, Northern Xinjiang, NW China, and its geological significance. Acta Petrologica Sinica, 22(1): 163 – 170 (in Chinese with English abstract)

Hart SR and Ravizza GE. 1996. Os partitioning between phases in lherzolite and basalt. In: Basu A and Harf SR (eds.). Earth Processes: Reading the Isotopic Code, Geophys Monogr. Washington. DC:Am. Geophys. Union, 95:123 – 134

Hauri EH, Lassiter JC and DePaolo DJ. 1996. Osmium isotope systematics of drilled lavas from Mauna Loa, Hawaii. Journal Geophys. Res, 101:11795 – 806

He GQ, Li MS and Liu DQ. 1994. Paleozoic crustal evolution and mineralization in Xinjiang of China. Urumqi: Xinjiang People's Publication House & Education and Cultural Press LTD, 437p (In Chinese with English abstract)

Horan MF, Morgan JW, Grauch RI, Coveney RMJr, Murowchick JB, *et al*. 1994. Rhenium and osmium isotopes in black shales and Ni-Mo-PGE-rich sulfide layers, Yukon Territory, Canada, and Hunan and Guizhou provinces, China. Geochim. Cosmochim. Acta, 56: 3531 – 37

Hoatson DM and Blake DH. 2000. Geology and economic potential of the Palaeoproterozoic layered mafic-ultramafic intrusions in the East Kimberley, Western Australia. Australian Geological Survey Organization Bulletin, 246:469

Hu SX, Guo JC and Gu LX. 1990. Important role and geological characteristics of Caledonian orogenic belt in Tianshan tectonic frame. Geological Science of Xinjiang. Geological Publication Beijing: House, 32 – 46 (in Chinese)

Ji JS, Li HQ and Zhang LC. 1999. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic ages of magnetite-chlorite formation gold deposit in the volcanic rock area of Late Paleozoic Era, East Tianshan. Chinese Science Bulletin, 44: 1801 1804

Lambert DD, Walker RJ and Morgan JW. 1998. Re-Os and Sm-Nd isotope geochemistry of the Stillwater complex, Montana:Implications for the prteogenesis of the J-M Reef. Journal of Petrology, 35:1717 – 1753

Lambert DD, Foster JG, Frick LR, *et al*. 1999. Re-Os isotopic systematics of the Voisey's Bay Ni-Cu-Co magmatic ore system, Labrador, Canada. Lithos, 47:69 – 88

Li HQ, Xie CF, Chang HL, Cai H, Zhu JP and Zhou S. 1998. Study on metallogenetic chronology on nonferrous and precious metallic ore deposits in north Xinhiang, China. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 264 (in Chinese with English abstract)

Li JY, Wang KZ, Li WQ, Guo HC, Song B, Wang Y, Mo SG, Zhao ZR, Zhu ZX and Pan CZ. 2002. Tectonic evolution since the Late Paleozoic and mineral prospecting in eastern Tianshan Mountains, NW China. Xinjiang Geology, 4: 7 – 13 (in Chinese with English abstract)

Li WY. 1996. Re-Os isotopic system and its application to study of magmatic Cu-Ni-PGE deposit. Advance in Earth Sciences, 11(6): 580 – 584 (in Chinese with English abstract)

Li YC, Zhao GC, Qu WJ, Pan CZ, Mao QG and Du AD. 2006. Re-Os isotopic dataing of the Xiangshan deposit, East Tianshan, NW China. Acta Petrologica Sinica, 22:245 – 25 (in Chinese with English abstract)

Liu DQ. 1983. Plate tectonic and distribution of mineral resources. Northwestern Geology, 4(2): 1 – 12 (in Chinese)

Ma RS, Shu LS and Sun J. 1997. Tectonic Evolution and Metallogeny of

Eastern Tianshan Mountains. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 202 (in Chinese with English abstract)

Maier WD, Barnes SJ, Chinyepi G, Barton Jr JM, Eglington B and Setshedi I. 2008. The composition of magmatic Ni Cu (PGE) sulfide deposits in the Tati and Selebi-Phikwe belts of eastern Botswana. Minerlium Deposita, 43:37 – 60

Mao JW and Du AD. 2001. Re-Os age of Cu-Ni ores from the Baotan Cu-Ni sulfide deposit in Guangxi and its geological implications. Science in China (Series D), 31(12):992 – 998(in Chinese)

Mao JW, Yang JM, Qu WJ *et al*. 2002. Re-Os age of Cu-Ni ores from the Huangshandong Cu-Ni sulfide deposit in the East Tianshan Mountains and its implication for geodynamic processes. Mineral Deposits, 21(4):323 – 330(in Chinese with English abstract)

Mao QG, Xiao WJ, Han CM, Sun M, Yuan C, Yan Z, Li JL, Yong Y and Zhang JE. 2006. Zircon U-Pb age and the geochemistry of the Baishiquan mafic-ultramafic complex in the Eastern Tianshan, Xinjiang province: Constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean. Acta Petrologica Sinica, 22: 153 – 162 (in Chinese with English abstract)

Martin CE, Carlson RW, Shirey SB, Frey FA and Chen CY. 1994. Os isotopic variation in basalts from Haleakala Volcano, Maui, Hawaii: A recora of magmatic nprocesses in oceanic mantle and crust. Earth Planet. Sci. Lett., 128:287 – 301

Marcantonio F, Zindler A, Reisberg L and Mathez EA. 1993. Re-Os Isotope systematics in chromities from the Stillwater Complex, Montana, USA. Geochim. Cosmochim. Acta, 57:4029 – 37

Morgan JW. 1986. Ultramafic xenoliths: Clues to Earth's late accretionary history. J. Geophys. Res., 91:12375 – 87

Naldrett AJ. 1981. Nickel sulfide deposits: classification, composition, and genesis. Econ. Geol., 75th Anniversary Volume, 628 – 685

Ni ZY. 1994. Chemical composition of pyroxenes from the Huangshandong mafic-ultramafic complex in Hami, Xinjiang. Acta Petrologica et Mineralogica 13(1): 55 – 66(in Chinese with English abstract)

Peck DC, Keays RK, Ford RJ, *et al*. 1992. Direct crystallization of refractory platinum group element alloys from boninitic magmas: Evidence from western Tasmania. Australian J Earth Sci, 39: 373 – 387

Pina R, Lunar R, Ortega L, Gervilla F, Alapieti T and Martinez C. 2006. Petrology and geochemistry of mafic-ultramafic fragments from the Aguablanca Ni-Cu ore breccia, southwest Spain. Econ. Geol., 101:865 – 881

Qin KZ. 2000. The orogeny of central Asia type and mineralization in north Xinjiang. Beijing: Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences: 1 – 194 (in Chinese with English abstract)

San JZ, Tian B and Lei JW. 2003. The discovery of magmatic Cu-Ni deposit of Tulargen with whole-rock mineralization at eastern Tianshan, Xinjiang. Mineral Deposits, 3: 270(in Chinese)

Shirey SB and Walker RJ. 1998. The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 26:423 – 500

Shirey SB and Walker RJ. 1995. Carius tube digestion for low- blank rhenium-osmium analysis. Anal. Chem., 67 : 2136 – 2141

Smoliar MI, Walker RJ and Morgan JW. 1996. Re-Os ages of group ⅡA, ⅢA, ⅣA and ⅥB iron meteorites. Science, 271:1099 – 1102

Sproule RA, Lambert DD and Hoatson DM. 1999. Re-Os isotopic constrains on the genesis of the Sally Malay Ni-Cu-Co deposit, East Kimberley, Western Australia. Lithos, 47:89 – 106

Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process. In: Saunders AD and Norry MJ (eds). Magmatism in Ocean Basins. Geological Society London Special Publication, 42: 313 – 345

Taylor HP. 1967. The zoned ultramafic complexes of southeastern Alaska. In: Wyllie PJ(ed.). Ultramafic and Related Rocks. New York, John Wiley and Sons, 97 – 121

Völkening J, Walczyk T and Heumann K. 1991. Osimium isotope ratio determinations by Negative thermal ionization mass spectrometry. Int. J. Mass Spectr. Ion Proc., 105:147 – 59

Wang RT, Mao JW, He Y, *et al*. 2005. Geochemical characteristics of platinum group elements of the sulfide nickle ores and related rocks in Jianchaling, Lueyang County, Shannxi Province, China and their implication for genesis. Acta Petrologica Sinica, 21(1):219 – 226 (in Chinese with English abstract)

Walker RJ, Carlson RW, Shirey SB and Boyd FR. 1989. Os, Sr, Nd, and Pb isotope systematics of Southern Afracan peridotite xenoliths: Implications for the chemical evolution of sobcontinential mantle. Geochim. Cosmochim. Acta, 153:1583 – 95

Walker RJ, Morgan JW, Naldrett AJ, *et al*. 1991. Re-Os isotope systematics of Ni-Cu sulfide ores, Sudbury igneous complex, Ontario: Evidence for a major crustal component. Earth Planet. Sci. Lett., 105:416 – 429

Walker RJ, Morgan JW, Naldrett AJ, *et al*. 1994. Re-Os isotope evidence for an enriched-mantle source for the Noril'sk-type, ore-bearing intrusion, Siberia. Geochi. Cosmochi. Acta, 58: 4179 – 4197

Wang RM, Liu DQ and Yin DT. 1987. The conditions of controlling metallogny of Cu, Ni sulphide ore deposits and the orientation of finding ore, Hami, Xinjiang, China. Minerals and Rocks, 7(1): 1 – 152(in Chinese with English abstact)

Wu H, Li HQ and Mo XH. 2005. Age ofthe Bmshiqun mafic-ultramafic complex, Hami, Xinjiang and its geological significance. Acta Geologica Sinica, 79: 498 – 502(in Chinese widl English abstract)

Xiao WJ, Zhang LC, Qin KZ, Sun S and Li JL. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Chinese Tianshan: Implications for the continental growth of central Asia. American Journal of Science, 304: 370 – 395

Yang G, Du AD, Qu WJ *et al*. 2004. Pt-Os and Re-Os dating of ores from the Jinchuan Cu-Ni-PGE deposit, a world class Ni deposi. In: Shellnutt, Zhou MF and Pang KN (eds.). Proceediug of the IGCP479 Hongkong Workshop: Recent advances in magmatic ore system in mafic-ultramafic rocks. Hongkong University, December 11 – 15, 2004, 40

Zhou JY, Cui BF, Xiao HL, Chen SZ and Zhu DM. 2001. The Kangguertag-Huangshan collision zone of bilateral subduction and its metallogenic model and prognosis in Xinjiang, China. Volcanology and Mineral Resources, 22:252 – 263 (in Chinese with English abstract)

Zhou MF, Lesher CM, Yang ZX, Li JW and Sun M. 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, Eastern Xinjiang, Northwestern China: Implication for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt. Chemical Geology, 209: 233 – 257

Zhu WB, Ma RS and Wang CY. 1996. Tectonic attribute of Huangshan-Jingershan complex in Eastern Xinjiang, China. Scientia Geologica Sinica 31(1): 22 – 32(in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈世平，王登红，屈文俊，陈郑辉，高晓理. 2005. 新疆葫芦铜镍硫化物矿床的地质特征与成矿时代. 新疆地质，23(3):230 – 233

陈哲夫，周守澐，乌统旦. 1999. 中亚大型金属矿床特征与成矿环境. 新疆科技卫生出版社，1 – 265

杜安道，赵敦敏，王淑贤等. 2001. Carius 管溶样和负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿铼-锇同位素地质年龄. 岩矿测试，20(4):247 – 252

郭宏,李霞,毛启贵,张继恩. 2006. 新疆东天山岩浆铜镍硫化物矿床地质特征及成矿环境. 新疆地质,24(2):135 – 140

顾连兴,赭建林,郭继春. 1994. 造山带环境中的东疆型镁铁—超镁铁杂岩. 岩石学报,10: 339 – 356

韩宝福, 季建清, 宋彪, 陈立辉, 李宗怀. 2004. 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, 49(2): 2324 – 2328

韩春明,肖文交,赵国春,屈文俊,毛启贵,杜安道. 2006. 新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素研究及其地质意义. 岩石学报, 22:163 – 170

何国琦,李茂松,刘德权. 1994. 中国新疆古生代地壳演化与成矿. 新疆人民出版社,香港文化教育出版社,1 – 437

胡受奚,郭继春,顾连兴. 1990. 加里东造山带在天山构造格架中的重要地位及其地质特征. 新疆地质科学(第 1 辑). 北京: 地质出版社. 32 – 46

李华芹,谢才富,常海亮,蔡红,朱家平,周肃. 1998. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学. 北京:地质出版社, 202 – 221

李锦轶,王克卓,李文铅,郭华春,宋彪,王瑜,莫申国,赵子然,朱志新,潘成泽. 2002. 东天山晚古生代以来大地构造与矿产勘查. 新疆地质, 4: 7 – 13

李文渊. 1996. Re-Os 同位素体系及其在岩浆 Cu-Ni-PGE 矿床研究中的应用. 地球科学进展, 11:580 – 584

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. 岩石学报, 22(1): 245 – 251

刘德权. 1983. 新疆板块构造与矿产分布. 西北地质, 4:1 – 12

姬金生,李华琴,张连昌. 1999. 东天山康古尔金矿磁铁矿绿泥石建造年代学. 科学通报,5:439 – 442

马瑞士,舒良树,孙家齐. 1997. 东天山构造演化与成矿. 北京: 地质出版社. 172 – 175

毛景文,杜安道. 2001. 广西宝坛地区铜镍硫化物矿石 982Ma 铼-锇同素年龄及其地质意义. 中国科学(D 辑), 31:992 – 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. 矿床地质, 21:323 – 330

毛启贵,肖文交,韩春明,孙敏,袁超,闫臻,李继亮,雍拥,张继恩. 2006. 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限的制约. 岩石学报, 22(1): 153 – 162

倪志耀. 1994. 黄山东镁铁超镁铁杂岩中的辉石化学成分研究. 岩石矿物学杂志, 13:55 – 66

秦克章. 2000. 新疆北部中亚型造山与成矿作用. 北京:中国科学院地质与地球物理研究所博士后研究工作报告. 1 – 194

三金柱,田斌,雷军文. 2003. 新疆东天山新发现图拉尔根全岩矿化岩浆铜镍矿床. 矿床地质, (3): 270

吴华,李华芹,莫新华. 2005. 新疆哈密白石泉铜镍矿区基性—超基性岩的形成时代及其地质意义. 地质学报,79: 498 – 502

王润民, 刘德权, 殷定泰. 1987. 新疆哈密土墩—黄山一带铜镍硫化物矿床成矿控制条件及找矿方向的研究. 矿物岩石, 7:1 – 152

王瑞廷, 赫英, 王东生, 刘民武. 2005. 略阳煎茶岭铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. 地质论评, 49(2): 205 – 211

周济元,崔炳芳,肖惠良,陈世忠, 朱德茂. 2001. 康古尔塔格—黄山碰撞带双向俯冲、成矿模式和预测. 火山和矿产资源, 22:252 – 263

朱文斌,马瑞士,王赐银. 1996. 论新疆东部黄山—镜儿泉杂岩带的构造属性. 地质科学, 31(1): 22 – 32