

新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床 Re₂O₃ 同位素测年 及成矿物质来源示踪

张作衡¹, 柴凤梅², 杜安道³, 张招崇², 闫升好¹, 杨建民¹, 屈文俊³, 王志良¹

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083;
3. 国家地质实验测试中心, 北京 100037)

摘要: 通过对喀拉通克矿区 1 号和 2 号岩体中铜镍硫化物矿石的 Re₂O₃ 同位素测年, 获得两个等时线年龄数据分别为 282.5 ± 4.8 Ma 和 290.2 ± 6.9 Ma, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值分别为 0.2563 ± 0.0037 和 0.2721 ± 0.0053 , Y_{Os} 值分别为 202.23~1061.59 和 195.07~473.24, 平均值分别为 495.05 和 289.83。上述结果表明成岩成矿年龄极为接近, 均介于石炭纪末至早二叠世之间, 并且在成矿和岩浆侵位过程中有大量地壳物质混入成岩成矿系统。喀拉通克镁铁质-超镁铁质岩带形成于后碰撞的伸展构造环境。

关键词: 喀拉通克; 铜镍矿床; 铼钨同位素; 新疆

中图分类号: P597; P611

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2005)04-0285-09

Re₂O₃ dating and ore forming material tracing of the Karatungk Cu₂Ni sulfide deposit in northern Xinjiang

ZHANG Zuo_heng¹, CHAI Feng_mei², DU An_dao³, ZHANG Zhao_chong², YAN Sheng_hao¹,
YANG Jian_min¹, QU Wen_jun³ and WANG Zhi_liang¹

(1. Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2. Faculty of Geoscience and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. National Research Center of Geoanalysis, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract: A series of mafic-ultramafic plutons are distributed in the southern margin of Altay folded belt and many of them are associated in space and time with Cu₂Ni sulfide deposits. As geologists are divided in opinion on the genesis of the mafic-ultramafic rocks, the genesis of mineralization is still a problem of much controversy. Some chalcopyrite, pyrrhotite and pentlandite samples were collected from the No. 1 and No. 2 intrusions of the Cu₂Ni sulfide ores in the Karatungk deposit to carry out Re₂O₃ dating and tracing of ore-forming materials. The two groups of measured points defined isochronal ages of 282.5 ± 4.8 Ma and 290.2 ± 6.9 Ma with the initial $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ rates being 0.2563 ± 0.0037 and 0.2721 ± 0.0053 , respectively. The data show that the ore-forming age is later than that of the Early Carboniferous rocks which host the mafic-ultramafic intrusions, and is corresponding to the extension stage. They share the same mineralization time with the extensively developed shear zone type gold deposits. The ages are also similar to the alkali-rich granitoids developed in the southern margin of Altay folded zone and the northern margin of the Junggar folded belt. Their initial $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ values and Y_{Os} values of 202.23~1061.59 and 195.07~473.24 indicate that large quantities of crustal substances were mixed with the Cu₂Ni sulfide metallogenic system in the ore-forming process.

Key words: Karatungk; Cu₂Ni sulfide deposit; Re₂O₃ dating; Xinjiang

收稿日期: 2005-04-20; 修订日期: 2005-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40402012); 国家 305 项目(2001BA609A_07_02); 973 资助项目(2001CB409807)

作者简介: 张作衡(1971-), 副研究员, 从事金属矿床成矿作用和矿床地球化学研究。

喀拉通克镁铁质-超镁铁质岩带位于准噶尔北缘-阿尔泰山南缘,长约200 km,宽10~20 km,从西向东断续分布有锡伯渡、乌尔腾萨依、盆特克、依铁克、喀拉通克等10个岩体集中区。喀拉通克矿区位于额尔齐斯深断裂的南侧,距该断裂约10 km,由11个岩体组成,分南北两个带。其中1和2号岩体位于南带,是赋存铜镍矿体的主要岩体,1号岩体已探明赋存有大型铜镍矿床。针对喀拉通克矿床及镁铁质-超镁铁质岩体,已经开展了大量的研究工作,揭示出铜镍矿床是在含矿岩浆分异过程中形成的,镁铁质-超镁铁质岩带是晚古生代幔源岩浆活动的产物。对于含矿岩体的成因和形成的构造环境,前人已经做了不少探索(如李先梓等,1991;刘德权等,1992;冉红彦等,1994;王登红等,2002;张招崇等,2003)。在成岩成矿年代学研究方面,大量工作主要针对1号岩体。已有资料表明,成岩成矿时代主要集中在晚古生代(王润民等,1991;李华芹等,1998),但矿床年龄大多是通过Sm-Nd、Rb-Sr、K-Ar法所测岩体年龄间接推断的,而且跨度也比较大,从273 Ma到317 Ma。喀拉通克矿区年龄的多样性给地质解释带来了很大的不确定性,为准确厘定铜镍硫化物发生矿化的时代,笔者在区内矿床规模最大而且具有代表性的1号和2号岩体有关岩石中挑选了黄铜矿、磁

黄铁矿和镍黄铁矿进行Re-Os同位素年龄测定,并进行成矿物质来源示踪研究,为深入探讨成岩成矿的地球动力学背景提供基础证据。

1 基本地质特征和采样位置

喀拉通克矿区内已发现岩体11个,按岩体产出特征和与构造的关系,可分为南北两个岩带:南岩带长4000 m,宽100~300 m;北岩带长2200 m,宽50~250 m。岩带的总体走向约为 310° ,与次级背斜轴一致。南岩带的3个主要岩体(Y1、Y2、Y3)分异良好、相带清晰、矿化强烈,其中Y1岩体长695 m, Y2岩体长度大于1440 m、Y3岩体长度大于1320 m,走向均为 310° 左右。北岩带的岩体(Y4~Y9)规模小、分异差、矿化相对较弱,其中Y6、Y7、Y8岩体走向为 $NE30\sim 45^{\circ}$,与主构造线有不同的偏离。Y1岩体出露面积约为 0.1 km^2 (图1a),其上部的闪长岩相和辉长岩相有不同程度的剥蚀;Y2岩体是本区内最大的隐伏岩体,岩相分带除了缺少橄榄苏长岩相外,与Y1岩体极为相似,各相发育完整(图1b),岩体由上至下可划分为黑云母石英闪长岩相、黑云母石英角闪岩相、黑云母角闪苏长岩相等。

铜镍硫化物矿体主要分布于岩体中下部各岩

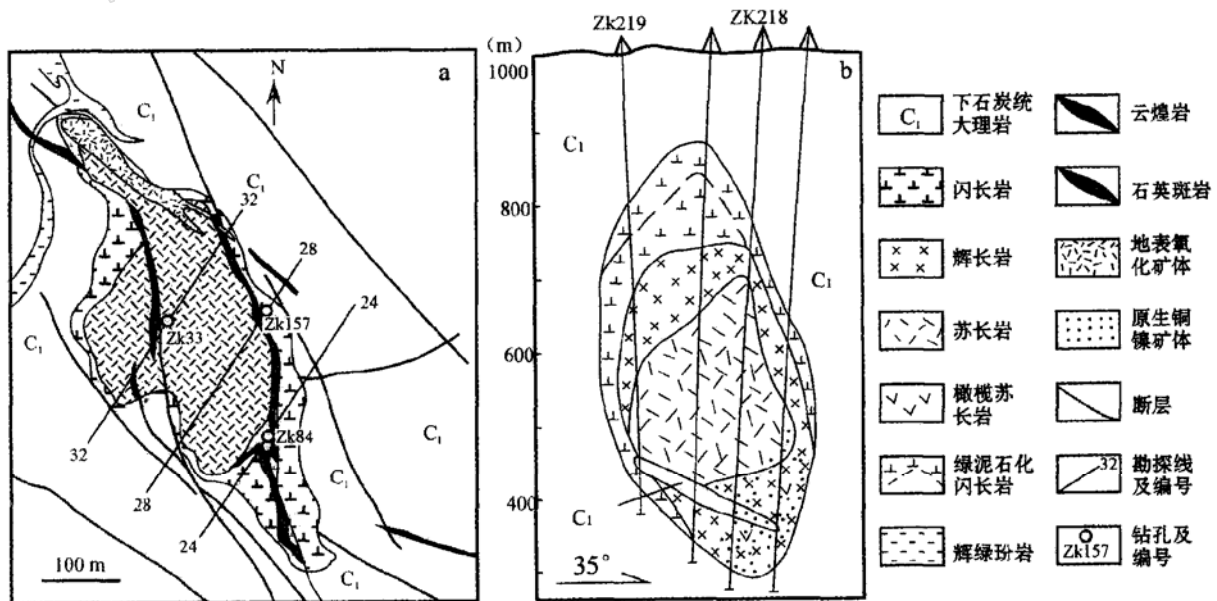


图1 喀拉通克1号岩体地质图(a)[据王润民等(1991)简化]和2号岩体剖面简图(b)(据邹海洋等,2001)

Fig. 1 Geological map of No. 1 intrusion (a) (simplified from Wang Runmin *et al.*, 1991) and geological sketch section of No. 2 intrusion (b) (after Zou Haiyang *et al.*, 2001) in the Karatungku Cu-Ni sulfide ore deposit

相,按构造可分为致密块状矿石、稠密浸染状矿石、中等稠密浸染状矿石及稀疏浸染状矿石等。致密块状矿石与浸染状矿石和岩体之间界线明显,而各类浸染状矿石之间以及它们与围岩之间则呈渐变关系。矿石组构主要为反映岩浆熔离作用的珠滴构造、浸染状构造、条带状构造及海绵陨铁结构以及反映矿浆贯入成矿作用的块状构造和胶结状构造等,同时还有反映热液成矿作用的细脉-网脉状构造等。不同类型矿石中已发现的矿石矿物有 50 余种,主要有硫化物、砷化物、碲化物、氧化物、自然金属及金属互化物等。矿石主要矿物成分为磁黄铁矿、黄铜矿、镍黄铁矿,次要和微量矿物有磁铁矿、黄铁矿、紫硫镍矿和钛铁矿以及少量的闪锌矿、方铅矿、硫锰矿、墨铜矿、斑铜矿、方钴矿等和自然金、自然银、银金矿、碲银矿、碲镍铂钨矿、碲钨矿、镍碲钨矿、银碲钨矿、砷铂矿等贵金属矿物。

考虑到样品的代表性,在样品采集时尽可能选取不同类型和金属含量有差别的矿石,但考虑到硫化物含量和蚀变作用对矿石中 Re 和 Os 含量的影响,本次在喀拉通克 1 号和 2 号岩体岩芯采集了以致密块状矿石类型为主的 9 件矿石样品,分别挑选了黄铜矿、磁黄铁矿和镍黄铁矿进行 Re-Os 同位素直接定年,具体采样位置和矿石类型列于表 1。

表 1 喀拉通克铜镍硫化物矿床 Re-Os 测年样品特征

Table 1 Characteristics of Re-Os dating samples from the Cu-Ni sulfide ores in the Karatungk deposit

样号	矿石类型	采样位置
28/Zk157_08	致密块状	1 号岩体 28 线钻孔 157, 孔深 308m
28/Zk157_04	致密块状	1 号岩体 28 线钻孔 157, 孔深 280m
Ky104_5	稀疏浸染状	1 号岩体 32 线 693m 中段, 深度 693m
Ky104_3	致密块状	1 号岩体 32 线 693m 中段, 深度 693m
Z2_36	致密块状	2 号岩体 39 线钻孔 245, 孔深 694.8m
Z2_35	致密块状	2 号岩体 39 线钻孔 245, 孔深 685.6m
Z2_37	致密块状	2 号岩体 39 线钻孔 245, 孔深 698m

2 分析结果

本项分析测试工作在国家地质实验测试中心完成,采用 Carius 管封闭溶样分解样品(杜安道等, 2001; Shirey and Walker, 1995), 样品分解以及 Re 和 Os 的分离等化学处理过程参见毛景文等(2002)。分别采用美国 TJA 公司生产的 TJA PQ EXCell ICP-

MS(电感耦合等离子体质谱仪)和 Finigan 公司生产的 HR ICP-MS 测定 Re 同位素和 Os 同位素比值。本实验全流程空白 Re 为 2.8 pg, 普 Os 约为 0.1 pg, 大大小于所测样品中铼钨含量, 因此不会影响实验中铼、钨含量的准确测定。

分别取 1 号岩体和 2 号岩体选取矿石样品, 进行硫化物单矿物的分离, 然后分别选出 7 件和 6 件单矿物进行 Re-Os 同位素测试, 结果列于表 2。由表 2 可以看出, 同一岩体各硫化物之间 Re 和 Os 的含量变化较大, 如 1 号岩体 Re 的含量为 $4.73 \pm 0.10 \sim 90.4 \pm 1.2$ ng/g, 2 号岩体 Re 的含量为 $7.98 \pm 0.12 \sim 91.40 \pm 1.0$ ng/g, 两个岩体的 Re 含量的总体变化范围比较接近。Os 的含量分别为 $0.3008 \pm 0.0024 \sim 13.54 \pm 0.12$ ng/g 和 $0.5559 \pm 0.0047 \sim 20.19 \pm 0.17$ ng/g, 岩体之间 Os 的含量变化比较大。采用衰变常数(λ) 1.666×10^{-11} (Smoliar *et al.*, 1996), 利用 ISOPLOT 软件(Model 3)将两个岩体中硫化物的分析数据回归成等时线, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值分别 0.2563 ± 0.0037 和 0.2721 ± 0.0053 , 平均权重方差 MSWD 分别为 1.5 和 1.02, 获得等时线年龄分别为 282.5 ± 4.8 Ma 和 290.2 ± 6.9 Ma(图 2a 和 2b), γ_{Os} 值范围分别为 202.23~1061.59 和 195.07~473.24, 平均值分别为 495.05 和 289.83。另外, 1 号岩体硫化物的 Re/Os 值为 5.11~52.94, 2 号岩体硫化物的 Re/Os 值为 4.31~19.34。

3 讨论

3.1 年代学和构造背景

由于 Re-Os 同位素体系封闭性好, 受后期改造很弱, 可以直接准确测定成矿时代(如 Stein *et al.*, 1998), 近年来应用越来越广泛。辉钼矿的铼和钨的含量都较高, 利用 ICP-MS 方法可以准确测得成矿年龄。NTIMS 和改进的 TJA PQ ExCell ICP-MS(电感耦合等离子体质谱仪)HR ICP-MS 高精度方法的使用, 可以直接对矿石及矿石中的硫化物进行直接测年并已取得了明显成效(如毛景文等, 2001a, 2001b)。

前人对喀拉通克岩体进行了大量的测年工作, 如王润民等(1991)利用 K-Ar 法测得 1 号岩体 K-Ar 法年龄 273.8~284 Ma, 2 号岩体的 K-Ar 年龄 275.6~306.4 Ma, 3 号岩体 K-Ar 法年龄 229.1~306.4 Ma, 同时利用 Rb-Sr 等时线法获得 1 号、2 号和 3 号

表2 喀拉通克铜镍硫化物矿床矿石 Re-Os 同位素测试数据
Table 2 Re-Os dating data of the Cu-Ni sulfide ores in the Karatungk deposit

岩体	样号及矿物	样重/g	Re/ng·g ⁻¹		普 Os/ng·g ⁻¹		¹⁸⁷ Os/ng·g ⁻¹		¹⁸⁷ Re/ng·g ⁻¹		¹⁸⁷ Re/ ¹⁸⁸ Os		¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os		γ _{Os}	Re/Os
			测试值	不确定度	测试值	不确定度	测试值	不确定度	测试值	不确定度	测试值	不确定度	测试值	不确定度		
1号	28/Zk157-08-cp	0.401	15.92	0.19	0.3008	0.0024	0.05745	0.00051	10.01	0.12	253.2	3.7	1.4534	0.0088	1061.59	52.94
	28/Zk157-08-po	0.403	22.34	0.64	0.7759	0.0065	0.0943	0.0011	14.04	0.40	137.7	4.1	0.9246	0.0099	639.02	28.79
	28/Zk157-04-cp	0.400	22.05	0.22	0.8103	0.0076	0.0928	0.0015	13.86	0.14	130.1	1.8	0.871	0.014	596.51	27.21
	28/Zk157-04-po	0.400	39.18	0.39	2.406	0.018	0.1956	0.0022	24.63	0.24	77.90	0.97	0.6185	0.0055	394.36	16.29
2号	Ky104-5-po	0.404	4.73	0.10	0.9262	0.0080	0.0460	0.0012	2.974	0.062	24.43	0.55	0.3781	0.0099	202.23	5.11
	Ky104-3-cp	0.401	63.51	0.54	4.7121	0.042	0.3444	0.0069	39.92	0.34	64.46	0.79	0.5561	0.0107	344.43	13.48
	Ky104-3-po	0.302	90.4	1.2	13.54	0.12	0.729	0.019	56.82	0.75	31.93	0.51	0.4094	0.0105	227.23	6.68
2号	Z2-35-cp	0.400	7.98	0.12	0.5559	0.0047	0.0448	0.0007	5.018	0.078	68.7	1.2	0.6133	0.0090	390.40	14.36
	Z2-35-po	0.408	50.62	0.57	2.618	0.020	0.2467	0.0023	31.82	0.36	92.5	1.2	0.7169	0.0047	473.24	19.34
	Z2-37-po	0.407	91.4	2.0	20.17	0.16	0.997	0.017	57.4	1.2	21.67	0.50	0.3761	0.0059	200.74	4.53
	Z2-37-pn	0.403	87.1	1.9	20.19	0.17	0.979	0.024	54.7	1.2	20.62	0.49	0.3690	0.0086	195.07	4.31
	Z2-36-cp	0.400	31.36	0.31	4.585	0.036	0.2608	0.0045	19.71	0.20	32.71	0.42	0.4328	0.0070	246.03	6.84
	Z2-36-po	0.404	62.70	0.75	10.033	0.075	0.5500	0.0069	39.41	0.47	29.89	0.42	0.4171	0.0044	233.49	6.25

说明:普 Os 按 Nier 值进行计算;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(总和 0.0072)和待分析样品同位素比值测量误差,置信水平 95%;¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 的不确定度包括质谱测量的分馏校正误差和待分析同位素比值测量误差,置信水平 95%;cp—黄铜矿;po—磁黄铁矿;pn—镍黄铁矿。

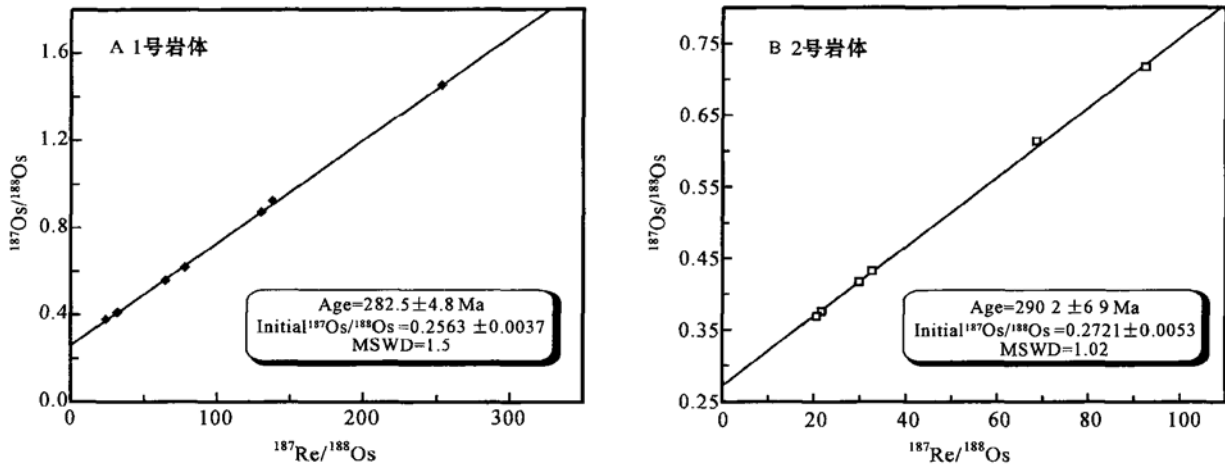
图2 喀拉通克矿石硫化物 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 对 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 等时线图

Fig. 2 Re-Os isochrons of the Cu-Ni sulfide ores in the Karatungk deposit

岩体的年龄分别为 285~ 317 Ma、296~ 308 Ma 和 290 Ma; 李华芹等(1998)用 Sm-Nd 等时线法测得 1 号岩体的年龄为 281.4~ 297.7 Ma。但总体上这些年龄的范围均偏大。本次 Re-Os 同位素测年获得的 1 号岩体 282.5 ± 4.8 Ma 和 2 号岩体 290.2 ± 6.9 Ma 的结果与这些年龄相比,在误差范围内大致吻合,误差明显减小,成矿年龄偏小一些,尤其是与韩宝福等(2004)获得的喀拉通克岩体苏长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 287 ± 5 Ma 相比,年龄更为接近。这表明该岩体和相关的铜镍硫化物矿床形成于石炭纪末至二叠纪初。

对于本区镁铁质-超镁铁质岩的成因及构造环境,以往的研究趋向于认为其形成于拉张环境,但对于拉张环境出现于整体碰撞前还是碰撞后存在不同的观点。冯益民(1986)认为北天山向北俯冲引发裂陷槽和镁铁质超镁铁质岩的上侵;王润民等(1991)认为喀拉通克含矿岩体是在围岩形成以后,北北东-南南西向构造挤压以前的拉张应力环境中形成的;李先梓等(1991)认为是过渡壳拉张环境喷发火山岩之后侵入;刘德权等(1992)认为喀拉通克镁铁质-超镁铁质岩属于新陆壳阶段“弛张期”热侵位岩体,形成于造山运动结束、地壳固结之后的应力反弹阶段的地壳薄弱部位;肖序常等(1992)则认为由于准噶尔洋盆向北俯冲,导致南面岩石圈的拉张,上地幔隆起,地壳减薄,引起依连哈毕尔-博格达-黄山一带上地幔物质上涌;冉红彦等(1994)认为,喀拉通克的岩浆作用发生在西伯利亚板块和准噶尔板块碰撞之后开始拉张的环境,因而岩浆作用具有岛弧岩浆作用

的特点;杨炳滨(1994)认为所有的“岩浆型铜镍矿床全部见于岛弧带和弧后盆地拉张环境”,形成于造山后拉张阶段。张招崇等(2003)认为喀拉通克岩体的形成与西伯利亚板块和准噶尔板块碰撞后的拉张作用有关;韩宝福等(2004)更是认为这些岩体与整个中亚造山带后碰撞伸展背景下岩石圈地幔拆沉和软流圈地幔上涌、熔融作用密切相关。

李华芹等(1998)认为喀拉通克的岩浆岩来自于亏损地幔源区。喀拉通克 1 号岩体全岩氧同位素组成为 5.47‰~ 11.21‰,随镁铁质程度降低而增大。岩石锆初始值 0.703 26~ 0.704 42,镁铁质超镁铁质岩锆初始值为 0.512 561, $\epsilon\text{Nd} = 5.07 \sim 5.93$; 矿石锆初始值 0.512 534, $\epsilon\text{Nd} = 5.09$ 。但喀拉通克镁铁质超镁铁质岩具有富集型稀土元素和 LILE 的特征,微量元素和同位素特征出现了解释上的不一致性,造成这种情况的原因可能是亏损的软流圈混染了富集 LILE 的岩石圈地幔(Lightfoot *et al.*, 1993)或地壳物质的混染(Wooden *et al.*, 1993)。张招崇等(2003)对微量元素的研究结果表明,大部分样品遭受了上地壳物质的混染,同时又具有部分岛弧岩浆的特点。

在石炭纪晚期,受塔里木板块和哈萨克斯坦-西伯利亚板块的聚合运动驱使,古天山大洋闭合(Yakubchuk *et al.*, 2002),然后开始陆内演化阶段。后碰撞伸展不仅有大量花岗质岩浆活动,还有基性-中基性火山活动,例如在喀拉通克-恰库尔特一带有玄武岩、安山岩的喷发,并形成了索尔库都克铜金矿床,其成矿年龄为 284.3~ 288.3 Ma(李华芹等,

1998)。在准噶尔北缘普遍发育有大量与碰撞后陆内断裂有关的深熔型幔源碱性花岗岩,如乌伦台、萨惹什克等碱性花岗岩体,相关的铜、金等矿床的形成时间与其相近(290~260 Ma)(王登红等,2002)。位于阿尔泰山南缘的喀拉通克等镁铁质-超镁铁质岩及其铜镍硫化物矿床也属于一时期的产物,只是物质来源更深一些。陆内地质事件除了伸展期间的岩浆活动和成矿作用外,还有大规模的剪切作用,并伴随有剪切带型金矿的发育,例如阿尔泰山造山带南缘玛尔卡库里和布尔根区域性韧性剪切带与多拉纳萨依-赛都-萨尔布拉克和科克萨依等金矿床具有极为密切的关系(王登红等,2002)。闫升好等(2004)测得多拉纳萨依和赛都金矿床的 Ar/Ar 坪年龄分别为 292.8 ± 1.0 Ma 和 292.8 ± 1.0 Ma;李华芹等(1998)的测年研究表明萨尔布拉克矿区外围的流纹斑岩的 Rb/Sr 等时线为 292.1 Ma,石英脉的年龄为 285 Ma,赛都金矿石英脉中流体包裹体的 Rb/Sr 等时线年龄为 272~305.6 Ma。这些年龄在误差范围内与镁铁质-超镁铁质岩体和富碱花岗岩的成岩时代显著吻合。

本次研究获得的精确年龄说明喀拉通克岩体和有关的矿化作用发生在石炭纪末至二叠纪初。区域地质研究表明,本区在中石炭世时已经完成俯冲碰撞过程,进入板内演化过程(李锦轶,1991)。因此喀拉通克岩体形成时不可能为岛弧环境,应是碰撞后的拉张环境(冉红彦等,1994),其地球化学特征之所以具有岛弧岩浆的某些特征可能是源区保留有早期俯冲的洋壳(张招崇等,2003)。在大陆地壳环境下,拉张作用导致幔源岩浆上升,引起地壳重熔形成碱性花岗岩岩浆,同时幔源岩浆本身也可直接喷发或侵入到上地壳。

3.2 成矿物质来源和矿床成因

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 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始值也发生变化。 γ_{Os} 是指示地壳物质加入成矿体系的一个重要参数(Walker *et al.*, 1989, 1994), $\gamma_{\text{Os}(t)}$ 是表示样品 Os 同位素组成在某一特定时间 t 相对于当时球粒陨石平均值的 Os 同位素组成差异。由于地壳的 Re/Os 比值高,因此地壳组分加入岩浆体系或成矿体系越多, γ_{Os} 值越表现为大正值,而 Re 的亏损引致 γ_{Os} 为负值。

世界上许多大型、超大型岩浆成因 Cu、Ni 硫化物矿床普遍被认为成矿物质来源于地幔,但近年来

通过对世界上许多大型和超大型岩浆型 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床,如美国的 Stillwater(Lambert *et al.*, 1994)、Babbiff(Ripley *et al.*, 1998)、南非的 Bushveld(Hart *et al.*, 1989)、加拿大 Sudbury(Walker *et al.*, 1991)、俄罗斯 Noril'sk(Walker *et al.*, 1994)、澳大利亚 Kambalda(Foster *et al.*, 1996)、我国的金川(李文渊,1996)、黄山东(毛景文等,2002)、红旗岭(傅德彬,1986)、宝坛(毛景文等,2001a)和煎茶岭(王瑞廷等,2005)等, Re-Os 同位素体系的研究揭示出这类矿床的成矿物质既可以完全源于地幔,如 Kambalda 矿床(Foster *et al.*, 1996),也可以壳源为主,如 Sudbury 矿床壳源 Os 占 80% 以上(Walker *et al.*, 1991),但多数情况则是壳幔混合源,如 Stillwater、Bushveld、Duluth、Sudbury、Noril'sk、黄山东、宝坛矿床,这表明地壳混染作用对此类矿床的形成具有重要的作用,传统上认为由幔源物质形成的矿床在成矿过程中绝大多数均有不同比例的地壳物质的参与(熊永良,1994;蒋少涌等,2000)。

喀拉通克铜镍硫化物的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值 0.2563 ± 0.0037 和 0.2721 ± 0.0053 高于太古宙未混染科马提岩有关铜镍硫化物矿石的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始值 0.10889 ± 0.00035 (Brooks *et al.*, 1999) 和晚元古代宝坛铜镍硫化物矿石的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始值 0.102 ± 0.010 (毛景文等,2001a),但明显低于澳大利亚中 Deborah 中成中温脉状金矿石的初始比值 1.04 ± 0.16 (Arne *et al.*, 2001)。 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 除一个样品为 1.4534 外,其他介于 0.3690 和 0.9246 之间,高于各类地幔的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值(0.105~0.152)(Shirey *et al.*, 1998; Walker *et al.*, 1989; Meisel *et al.*, 1996; Snow *et al.*, 1995),但远远低于平均大陆地壳值 3.63。总体特征表现出与美国 Duluth 杂岩体(0.50~1.96)、加拿大 Sudbury(0.55~0.91) 和澳大利亚 Kimberley(0.18~0.66) 部分相似,反映出成矿物质来源的壳幔混合特征。

γ_{Os} 计算公式为: $\gamma_{\text{Os}(t)} = 100[(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{样品}}(t) / (^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{球粒陨石}}(t) - 1]$, 其中球粒陨石的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 的计算公式为: $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}(t) = (^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i + (^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os})(e^{\lambda T} - e^{\lambda t})$, 式中 $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i$ 为 0.09531, $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 为 0.40186, T 为地球形成年龄 4.558×10^9 a(Shirey and Walker, 1998)。使用的衰变常数 ^{187}Re 为 $\lambda = 1.666 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ (Smoliar *et al.*, 1996), 分别代入 282.5 Ma

和 290.2 Ma 获得球粒陨石的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}(t)$ 分别为 0.125 118 和 0.125 067。结合样品中 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 测试值, 计算出的 $\gamma_{\text{Os}}(t)$ 也列于表 2 中。从表中可以看出, 喀拉通克铜镍硫化物矿石硫化物的 γ_{Os} 变化范围比较大, 从 195.07 到 1 061.59, 平均值达到 400.34; 1 号岩体中 γ_{Os} 值范围 202.23~1 061.59, 平均为 495.05, 2 号岩体的 γ_{Os} 值为 195.07~473.24, 平均值为 289.83。喀拉通克矿床的 $\gamma_{\text{Os}}(t)$ 值高于芬兰 Keivinstä 矿床的 $\gamma_{\text{Os}}(t)$ 值(+130~+170, 壳源 Os 占>28%), 与加拿大 Sudbury(+430~+814, 壳源 Os 占>80%) 部分重叠, 总体上低于澳大利亚 Kimberley 岩体(+950~+1300, 壳源 Os>70%)。通过对比发现, 喀拉通克矿床中的 Os 很可能以壳源为主, 为>28%~<80%, 只有部分来自地幔。在普通 Os 对 Re/Os 比值的图解(图 3)中也可以看出, 喀拉通克硫化物的投影点落于 Voisey's Bay-Sudbury、Noril'sk 矿床、Duluth 矿床和富硫沉积物之间, 并与后三者有部分的重叠。Noril'sk 矿床的成矿物质来源被认为是幔源(Walker *et al.*, 1994), Sudbury 矿床被认为是典型的壳源为主甚至完全是壳源的(Walker *et al.*, 1991), Duluth 矿床壳源 Os>35%(Ripley *et al.*, 1998)。以上现象表明, 喀拉通克岩体在侵位和分异成矿过程中混入了大量的壳源 Os, 估计应在 30% 至 50%, 甚至可能更高。

另一方面, 引起硫化物不混熔的原因有多种,

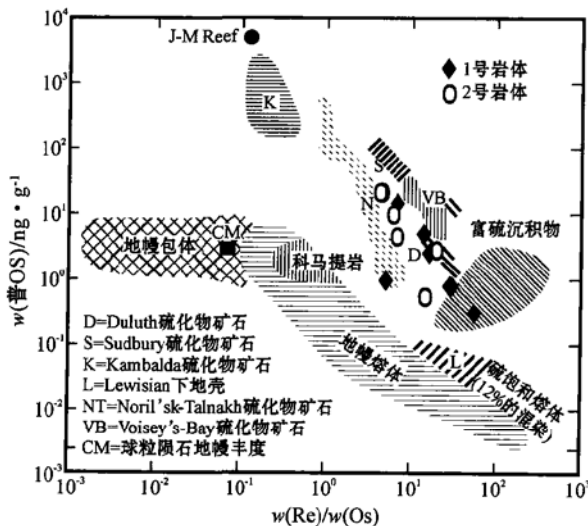


图 3 喀拉通克岩体硫化物中 Os 对 Re/Os 含量关系图
(据 Lambert 等, 1999)

Fig. 3 Diagram of common Os versus Re/Os for sulfides from the Karatung intrusion (after Lambert *et al.*, 1999)

如温度、压力、氧逸度和硫逸度的改变等(Maclean, 1969)。但后来发现地壳硫的加入也是引起镁铁质岩浆硫达到过饱和而引起 Cu、Ni 等元素富集成矿的重要原因(Ripley, 1981), 同时富 Si 的地壳物质中 Si 的加入也会改变镁质岩浆中硫的溶解度而引起 Cu、Ni 等的富集成矿(Irvine, 1975)。由于喀拉通克矿床比较强烈的地壳来源 Os 的混入, 因此可以推测地壳物质的混染可能是引起本区含矿镁铁质岩浆发生不混熔作用而导致成矿的重要原因。

4 结 论

喀拉通克是新疆北部具有代表性的典型岩浆铜镍硫化物矿床, 对其 1 号和 2 号含矿岩体矿石中黄铜矿和磁黄铁矿的 Re-Os 同位素测年获得了 282.5 ±4.8 Ma 和 290.2 ±6.9 Ma 数据。精确的成岩成矿年龄说明喀拉通克岩体和有关的矿化作用发生在石炭期末至二叠纪初, 形成环境不可能为岛弧环境, 应是后碰撞的伸展环境。成岩成矿年龄与区域内剪切带型金矿床的年龄接近, 它们均形成于伸展构造环境。在这种环境中, 不仅有幔源富碱质花岗岩浆的侵位, 而且有镁铁质-超镁铁质岩浆上侵和定位, 分异演化过程中伴随着 Cu、Ni 等元素的富集成矿。两个含矿岩体的年龄有所区别似乎说明了岩体定位或分异成矿并不是同时进行的, 而是有一个过程。

1 号岩体和 2 号岩体的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值 0.256 3 ±0.003 7 和 0.272 1 ±0.005 3 以及 γ_{Os} 值 202.23~1 061.59 和 195.07~473.24, 说明岩浆起源于亏损的软流圈地幔, 并在上侵定位和分异演化过程中遭受了比较强烈的地壳物质的混染作用, 而强烈的壳幔混染可能是喀拉通克岩体富集成矿的重要机制。由于岩体形成于后碰撞的伸展环境, 侵位于石炭纪地层, 因此在镁铁质-超镁铁质岩浆上侵期间, 也必然有较多地壳物质加入到成岩成矿系统。

References

- Arne D C, Bierlein F P, Morgan J W, *et al.* 2001. Re-Os dating of sulfides associated with gold mineralization in central Victoria, Australia [J]. *Economic Geology*, 96(6): 1455~1459.
- Brooks C K, Keays R R, Lambert D D, *et al.* 1999. Re-Os isotope geochemistry of Tertiary picritic and basaltic magmatism of East Greenland: constraints on plume-lithosphere interactions and the genesis of the Platinovalf reef, Skaergaard intrusion[J]. *Lithos*, 47: 107~126.

- Du Andao, Zhao Dunmin, Wang Shuxian, *et al.* 2001. Precise Re₂O₇ dating for molybdenite by ID-TIMS with Carius tube sample preparation[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 20(4): 247~ 252(in Chinese).
- Foster G, Lambert D D, Frick L R, *et al.* 1996. Re₂O₇ isotopic evidence for genesis of Archaean nickel ores from uncontaminated komatiites[J]. *Nature*, 382: 703~ 706.
- Fu Debin. 1986. The deep seated ore magma origin of mafic-ultramafic magma copper nickel sulfide deposit. *Geology and Prospecting*, 22(4): 24~ 35(in Chinese).
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, *et al.* 2004. SHRIMP U-Pb zircon age of the mafic-ultramafic rocks and geological significance in Karatung and Huangshan, Xinjiang[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(2): 2324~ 2328 (in Chinese).
- Hart S R and Kinloch E D. 1989. Os isotope systematics in Witwatersrand and Bushveld ore deposit[J]. *Economic Geology*, 84: 1651~ 1655.
- Irvine T N. 1975. Crystallization sequence of the Muskox intrusion and other layered intrusions: II origin of the chromitite layers and similar deposits of other magmatic ores[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 39: 991~ 1020.
- Jiang S Y, Yang J H, Zhao K D, *et al.* 2000. The Re₂O₇ isotope system as a tracer and a method to date in ore deposits[J]. *J. Nanjing Univ. (Nature Sciences)*, 36(6): 669~ 677 (in Chinese).
- Lambert D D, Foster J G, Frick L R, *et al.* 1999. Re₂O₇ isotopic systematics of the Voisey's Bay Ni-Cu-Co magmatic ore system, Labrador, Canada[J]. *Lithos*, 47: 69~ 88.
- Lambert D D, Walker R J, Morgan J W, *et al.* 1994. Re₂O₇ and Sm-Nd isotope geochemistry of the Stillwater Complex, Montana: Implications for the petrogenesis of the JM reef[J]. *Journal of Petrology*, 35: 1717~ 1753.
- Li Huaqin, Xie Caifu, Chang Hailiang, *et al.* 1998. Study on Metallogenic Chronology of Nonferrous and Precious Metallic Ore Deposits in Northern Xinjiang, China[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Li Jinyi. 1991. On evolution of Paleozoic of East Junggar, Xinjiang, China[A]. Xiao Xuchang and Tang Yaoqing. Tectonic Evolution of the Southern Margin of the Paleo-Asian Composite Megasuture[C]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 92~ 108 (in Chinese).
- Li Wenyuan. 1996. Re₂O₇ isotopic system and its application to study of magmatic Cu-Ni-PGE deposit [J]. *Advance in Earth Sciences*, 11(6): 580~ 584 (in Chinese).
- Li Xianzi, Li Xing, Luo Changyi, *et al.* 1991. Metallogenic condition and Prospecting research on the PGE ore deposits in Xinjiang[J]. *Bulletin of The Institute of Xi'an Geology and Mineral Resources, CAGS*, 33: 1~ 93.
- Lightfoot P C, Hawkesworth J, Hergt J, *et al.* 1993. Remobilisation of the continental lithosphere by a mantle plume: major, trace element and Sr, Nd, and Pb isotope evidence from picritic and tholeiitic lavas of the Noril'sk District, Siberian Trap, Russia[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 71~ 188.
- Liu Dequan, Tang Yanling and Zhou Ruhong. 1992. Evolution of Paleozoic crust and metallogenic series in Northern Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 11(4): 307~ 314(in Chinese).
- Mao Jingwen and Du Andao. 2001a. The 982 Ma Re₂O₇ Age of Copper-Nickel Sulfide Ores in the Baotian Area, Guangxi, and Its Geological Significance[J]. *Science in China (Series D)*, 31(12): 992~ 998 (in Chinese).
- Mao Jingwen, Yang Jianmin, Qu Wenjun, *et al.* 2002. Re₂O₇ age of Cu-Ni ores from the Huangshandong Cu-Ni sulfide deposit in the East Tianshan Mountains and its implication for geodynamic processes[J]. *Mineral Deposits*, 21(4): 323~ 330 (in Chinese).
- Mao Jingwen, Zhang Guangdi, Du Andao, *et al.* 2001b. Geology, geochemistry, and Re₂O₇ isotopic dating of the Huangjiawan Ni-Mo-PGE deposit, Zunyi, Guizhou Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 234~ 243(in Chinese).
- Maclean W H. 1969. Liquidus phase relations in the FeS-FeO (Fe₃O₄)-SiO₂ system and their application in geology[J]. *Economic Geology*, 64: 863~ 884.
- Meisel T, Walker R J, Morgan J W. 1996. The osmium isotopic composition of the Earth's primitive upper mantle[J]. *Nature*, 383: 517~ 520.
- Ran Hongyan and Xiao Senhong. 1994. Trace element abundances and tectonic environment of the host intrusion of Karatung Cu-Ni deposit[J]. *Geochimica*, 23: 392~ 401(in Chinese).
- Ripley E M. 1981. Sulphur isotopic abundances of the Duluth Road Cu-Ni deposits, Duluth Complex, Minnesota[J]. *Economic Geology*, 76: 619~ 620.
- Ripley E M, Lambert D D and Frick L R. 1998. Re₂O₇, Sm-Nd and Pb isotopic constraints on mantle and crustal contributions to magmatic sulfide mineralization in the Duluth Complex [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62: 3349~ 3365.
- Shirey S B and Walker R J. 1998. The Re₂O₇ isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry [J]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci. Lett.*, 26: 423~ 500.
- Shirey S B and Walker R J. 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis[J]. *Anal. Chem.*, 67: 2136~ 2141.
- Smoliar M I, Walker R J and Morgan J W. 1996. Re₂O₇ ages of group IIA, IIIA, IVA and VIB iron meteorites[J]. *Science*, 271: 1099~ 1102.
- Snow J E and Reisberg L. 1995. Os isotopic systematics of the MORB mantle: results from altered abyssal peridotites[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 133: 411~ 421.
- Stein H J, Sundblom K, Markey R J, *et al.* 1998. Re₂O₇ ages for Archean molybdenite and pyrite, Kuttila, Finland and Proterozoic molybdenite, Kabeliai, Lithuania: testing the chronometer in a metamorphic and metasomatic setting[J]. *Mineralium Deposita*, 33: 329~ 343.
- Walker R J, Carlson R W, Shirey S B, *et al.* 1989. Os, Sr, Nd and Pb isotope systematics of southern African peridotite xenoliths: Implications for the chemical evolution of subcontinental mantle [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53: 1583~ 1595.
- Walker R J, Morgan J W, Naldrett A J, *et al.* 1991. Re₂O₇ isotope systematics of Ni-Cu sulfide ores, Sudbury igneous complex, Ontario

- o: Evidence for a major crustal component[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 105: 416~ 429.
- Walker R J, Morgan J W, Horan M F, *et al.* 1994. Re-Os isotopic evidence for an enriched mantle source for the Noril'sk type, ore-bearing intrusions, Siberia[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58: 4179~ 4197.
- Wang Denghong, Chen Yuchuan, Xu Zhigang, *et al.* 2002. The Metallogenic Series and Metallogenic Regularity of Altay Metallogenic Province[M]. Beijing: Atomic Energy Press(in Chinese).
- Wang Ruiting, Mao Jingwen, He Ying, *et al.* 2005. Geochemical characteristics of platinum group elements of the sulfide nickel ores and related rocks in Jianchaling, Lueyang County, Shanxi Province, China and their implication for genesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 219~ 226 (in Chinese with English abstract).
- Wang Runmin and Zhao Changlong. 1991. No.1 Cu-Ni Sulfide Deposit in Karatungk, Xinjiang[M]. Beijing: Geological Publishing House, 298(in Chinese).
- Wooden J L, Czamanske G K, Fedorenko V A, *et al.* 1993. Isotopic and trace element constraints on mantle and crustal contributions to Siberian continental flood basalts, Noril'sk Area, Siberia[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57: 3677~ 3704.
- Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Feng Yimin, *et al.* 1992. Tectonic of North Xinjiang and Adjacent Region[M]. Beijing: Geological Publishing House, 169(in Chinese).
- Xiong Yongliang. 1994. The ore-forming materials for magmatic ore deposits in the light of Re-Os systematics[J]. *Earth Science Frontiers*, 1(3~4): 199~ 203 (in Chinese).
- Yakubchuk A, Cole A, Seltmann R, *et al.* 2002. Tectonic setting, characteristics, and regional exploration criteria for gold mineralization in the Altai orogenic collage: the Tianshan province as a key example[A]. Goldfarb R and Nielsen R L. *Integrated Methods for Discovery: Global Exploration in the Twenty First Century*[C]. Littleton: Society of Economic Geologists, INC, 177~ 201.
- Yan Shanhao, Chen Wen, Wang Yitian, *et al.* 2004. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating and its significance of the Ertix gold metallogenic belt in the Altay orogen, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(4): 500~ 506(in Chinese).
- Yang Bingbin. 1994. Study on ore-control factors of magma type copper nickel deposits in north Xinjiang[J]. *Mineral Resources and Geology*, 8(5): 330~ 333(in Chinese).
- Zhang Zhaochong, Yan Shenghao, Chen Bailin, *et al.* 2003. Geochemistry of the Karatungk basic complex in Xinjiang and its constraints on genesis of the deposit[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(3): 217~ 224(in Chinese with English abstract).
- Zou Haiyang, Dai Tagen and Hu Xiangzhao. 2001. Geological characteristics and prognosis of the karatungke Cu-Ni deposit, Xinjiang[J]. *Geology_Geochemistry*, 29(3): 70~ 75(in Chinese).
- 冯益民. 1986. 新疆西部构造发展史[A]. 中国北方板块构造文集(第一集)[C]. 北京: 地质出版社.
- 傅德彬. 1986. 镁铁质-超镁铁质岩硫化铜镍矿床深成矿浆成因论[J]. *地质与勘探*, 4: 24~ 35.
- 韩宝福, 季建清, 宋 彪, 等. 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[J]. *科学通报*, 49(2): 2324~ 2328.
- 蒋少涌, 杨竞红, 赵葵东, 等. 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, 谢才富, 常海亮, 等. 1998. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学[M]. 北京: 地质出版社.
- 李锦铁. 1991. 试论中国新疆准噶尔山系古生代板块构造演化[A]. 肖序常, 汤耀庆. 古中亚复合巨型缝合带南缘构造演化[C]. 北京: 北京科学技术出版社, 92~ 108.
- 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[J]. *地球科学进展*, 11(6): 580~ 584.
- 李先梓, 李 行, 洛长义, 等. 1991. 新疆铂族元素成矿地质条件及找矿方向研究[J]. *中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊*, 33: 1~ 93.
- 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 1992. 新疆北部古生代地壳演化及成矿系列[J]. *矿床地质*, 11(4): 307~ 314.
- 毛景文, 杜安道. 2001a. 广西宝坛地区铜镍硫化物矿石 982 Ma 铷-锶同位素年龄及其地质意义[J]. *中国科学(D 辑)*, (12): 992~ 998.
- 毛景文, 杨建民, 屈文俊, 等. 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.
- 毛景文, 张光弟, 杜安道, 等. 2001b. 遵义黄家湾镍铂族元素矿床地质地球化学和 Re-Os 同位素年龄测定——兼论华南寒武系底部黑色页岩多金属成矿作用[J]. *地质学报*, 75(2): 234~ 243.
- 冉红彦, 肖森宏. 1994. 喀拉通克含矿岩体的微量元素与成岩构造环境[J]. *地球化学*, 23: 392~ 401.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 等. 2002. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律[M]. 北京: 原子能出版社.
- 王瑞廷, 毛景文, 赫 英, 等. 2005. 煎茶岭硫化镍矿床的铂族元素地球化学特征及其意义[J]. *岩石学报*, 21(1): 219~ 226.
- 王润民, 赵昌龙. 1991. 新疆喀拉通克一号铜镍硫化物矿床[M]. 北京: 地质出版社, 298.
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等. 1992. 新疆北部及邻区大地构造[M]. 北京: 地质出版社, 169.
- 熊永良. 1994. 铷-锶同位素体系对揭示矿质来源的作用[J]. *地学前缘*, 1(3~4): 199~ 203.
- 闫升好, 陈 文, 王义天, 等. 2004. 新疆额尔齐斯金成矿带的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义[J]. *地质学报*, 78(4): 500~ 506.
- 杨炳滨. 1994. 新疆北部岩浆型铜镍硫化物矿床控矿因素的研究[J]. *矿产与地质*, 8: 330~ 333.
- 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 等. 2003. 新疆喀拉通克基性杂岩体的地球化学特征及其对矿床成因的约束[J]. *岩石矿物学杂志*, 22(3): 217~ 224.
- 邹海洋, 戴塔根, 胡祥昭. 2001. 喀拉通克铜镍硫化物矿地质特征及找矿预测[J]. *地质地球化学*, 29: 70~ 75.

附中文参考文献

- 杜安道, 赵敦敏, 王淑贤, 等. 2001. Carius 管溶样和负离子热表面电质谱准确测定辉钼矿铷-锶同位素地质年龄[J]. *岩矿测试*, 20(4): 247~ 252.