

金川铜镍硫化物矿床 1 号矿体矿石成因研究

王沪文^{1,2}, 汤中立^{1,3}, 闫海卿³, 焦建刚³, 徐刚³, 邱根雷³

(1. 兰州大学地质科学与矿产资源学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 四川省地质矿产勘查开发局 109 地质队, 四川 成都 610100; 3. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 金川 Ni-Cu-(PGE) 硫化物矿床赋存于超镁铁岩体中, 是世界第三大镍矿床。金川岩体中部(1#矿体) Ni 金属储量约占整个金川矿床的 56.8%, 岩石呈同心带状分布, 矿体横剖面形态为舌状, 中间为网状矿石, 周围是浸染状矿石, 其网状结构矿石丰度远远高于其他矿石类型。1#矿体不同类型矿石亲 Cu 元素 100% 硫化物计算后, 原始地幔标准化配分模式指示矿石的 IPGE 具有、高低 2 个系列的数值特征, Pt 变化很大, 大部分样品 Pt/(Pt+Pd) 值在 (0.3~0.7) 范围之外。钻孔样品 Ni、Cu 品位的变化指示富 Cu 矿石富集于网状矿体中、下部, 网状矿石的 Ni、Cu 品位呈明显的负相关关系, Ni/Cu 值在深部变化较大。研究认为, 1#矿体遭受热液蚀变作用影响明显, 矿石 IPGE 的变化和小尺度的 Ni/Cu 值循环变化由 MSS 分离结晶作用所致, 矿体中、下部富集富 Cu 矿石和深部 Ni/Cu 值变化较大由 MSS 分离结晶作用和热液蚀变作用综合所致。

关键词: 金川; 铜镍硫化物矿床; 热液蚀变作用; MSS 分离结晶作用; 矿石成因

中图分类号: P618.41; P618.63 **文献标识码:** A

金川超镁铁岩体富含至少 5×10^8 t 矿石, 平均 Ni 品位 1.2%, Cu 品位 0.6%, 是世界第三大 Ni-Cu-(PGE) 矿床 (Naldrett, 2004)。金川矿床 II 矿区 1#矿体赋含的矿石储量和 Ni 金属储量分别约占整个金川矿床的 48.4% 和 56.8% (高亚林等, 2009)。矿体最主要的矿石为网状矿石 (海绵陨铁状矿石), 且具有特殊的火焰状或舌状矿体, 矿石呈同心带状分布。1#矿体是金川超大型铜镍硫化物矿床的最主要矿体, 其地质地球化学和成矿特征从一个方面反映了金川矿床的形成过程, 对其研究在经济意义和学术价值方面都具有代表性和典型性。迄今为止, 众多学者对其进行了大量的研究, 但仍然有很多方面未能有令人信服的解释, 对岩体的矿化作用仍不清楚。例如: ①为什么 1#矿体中、下部富集富铜铂钯矿石? ②矿石主要以网状硫化物

矿石位于岩体的中心部位而不是底部, 上覆和下伏浸染状矿石, 1#矿体很少或几乎没有块状矿石。前人提出的模式并没有准确解释出为何如此大量的网状矿石产生, 并保存于金川 1#矿体中。与世界上其他同类型矿床相比, 这些特征都是独一无二的。因此, 笔者呈现了金川矿床 1#矿体从宏观到微观详细的地质和地球化学研究结果。据此研究 1#矿体矿石带剖面结构和矿石组分, 以及不同尺度的地球化学变化特征, 目的是了解矿石带内矿石组分变化的原因。

1 区域地质背景

金川矿床位于甘肃省金昌市, 区域上位于华北地台东部阿拉善地块西南缘的龙首山隆起带内 (汤

收稿日期: 2012-06-05; 修回日期: 2012-08-25

基金项目: 国土资源部深部探测技术与实验研究专项 (Sinoprobe-05-01)

作者简介: 王沪文 (1987-), 男, 硕士, 岩石学、矿物学、矿床学专业。E-mail: 471769848@qq.com

中立等, 2002)。华北克拉通北临古亚洲造山带, 南邻中央造山带。龙首山隆起于华北克拉通西南缘, 其南缘与早古生代祁连造山带相邻, 北缘与潮水凹陷盆地相邻(汤中立等, 2002)(图1)。在龙首山地区, 新元古代和古生代砾岩、砂岩及灰岩不整合覆盖于古元古代和中元古代变质单元上。古元古代和新元古代变质单元分别命名为白家咀子组和塔马子沟组。白家咀子组由混合岩、片麻岩和大理岩组成, 而塔马子沟组由片岩、层状大理岩组成。龙首山地区镁铁质-超镁铁质岩体主要发育于

中、晚元古代, 表现为规模大小不等的侵入岩体、岩群, 断续散布于龙首山隆起两侧, 受区域构造断裂控制, 与构造线平行展布(汤中立等, 1995)。这些镁铁质-超镁铁质岩体均为北西-南东走滑延伸的橄榄岩-辉石岩岩体, 且倾向南西, 大多数岩体延深小于1 000 m。其中, 金川、藏布台、青石窑等岩体为区域上迄今所知3个最大的镁铁质-超镁铁质侵入体(汤中立等, 1995)。大多数岩体都发生了硫化物矿化作用, 但到目前为止, 仅发现金川岩体赋含具经济价值的硫化物矿石。

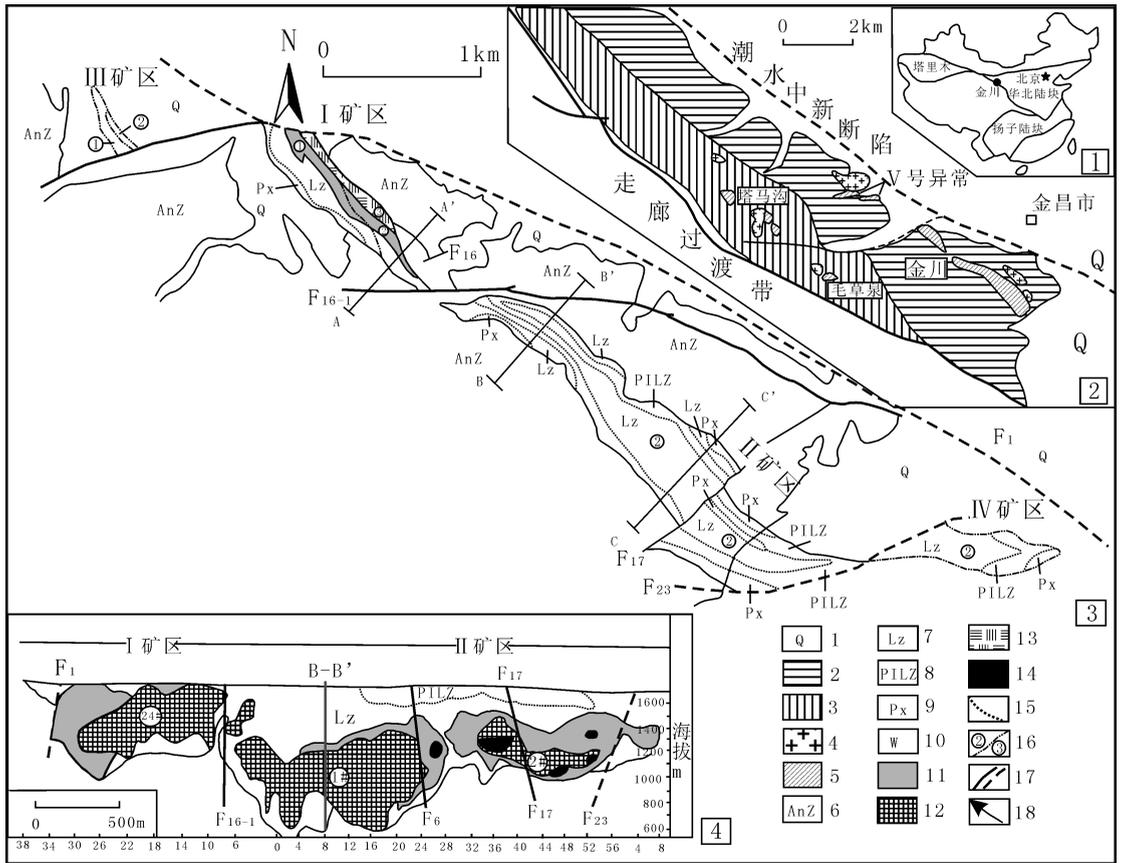


图1 金川硫化物矿床位置(1、2)平面(3)及纵剖面图(4)(修改自 Tang et al., 2007)

Fig. 1 Map of the location (1, 2), geological plane (3) and longitudinal section (4) of the Jinchuan sulfide deposit

1. 第四系; 2. 龙首山群白家咀子组; 3. 龙首山群塔马子沟组; 4. 花岗岩; 5. 镁铁-超镁铁质岩体; 6. 下寒武统;
7. 二辉橄榄岩; 8. 含斜长二辉橄榄岩; 9. 橄榄二辉岩; 10. 二辉岩; 11. 浸染状矿; 12. 海绵陨铁状矿; 13. 接触交代型矿; 14. 块状矿; 15. 岩相界线; 16. 不同阶段岩相界线; 17. 实测/推测断层; 18. 钻孔

2 矿体地质特征

金川矿区自北西到南东含有三大矿体, 分别为24#、1#、2#矿体(图1)。1#矿体分布于I矿

区4行-II矿区28行, 赋存于岩体的中、下部, 上部尖灭于1 400~1 320 m标高, 下部延深至550 m标高尚未尖灭。全长1 600余米, 平均厚98 m。其中, 富矿长1 300 m, 平均厚69 m。富矿在16~18行厚度最大, 达250余米。沿倾斜膨大部位

为矿体中上部(1 100 m 标高),向上、向下逐渐变薄(高亚林, 2009)。1号矿体呈同心分带的“舌状”矿体产于岩体的中下部(图2)。主要矿石为网状矿石,向外依次为浸染状矿石,二辉橄榄岩、斜长二辉橄榄岩、橄榄辉石岩,局部发育异剥

橄榄岩和少量的辉长岩(Tonnelier, 2010)。部分矿体直接与岩体的顶底板围岩大理岩、黑云斜长片麻岩等接触(高亚林, 2009)。矿化特征以铜镍矿化的富矿为主,并富含Pt、Pd、Au、Ag、Se、Te等有益组分,已富集形成38个Pt、Pd富集体

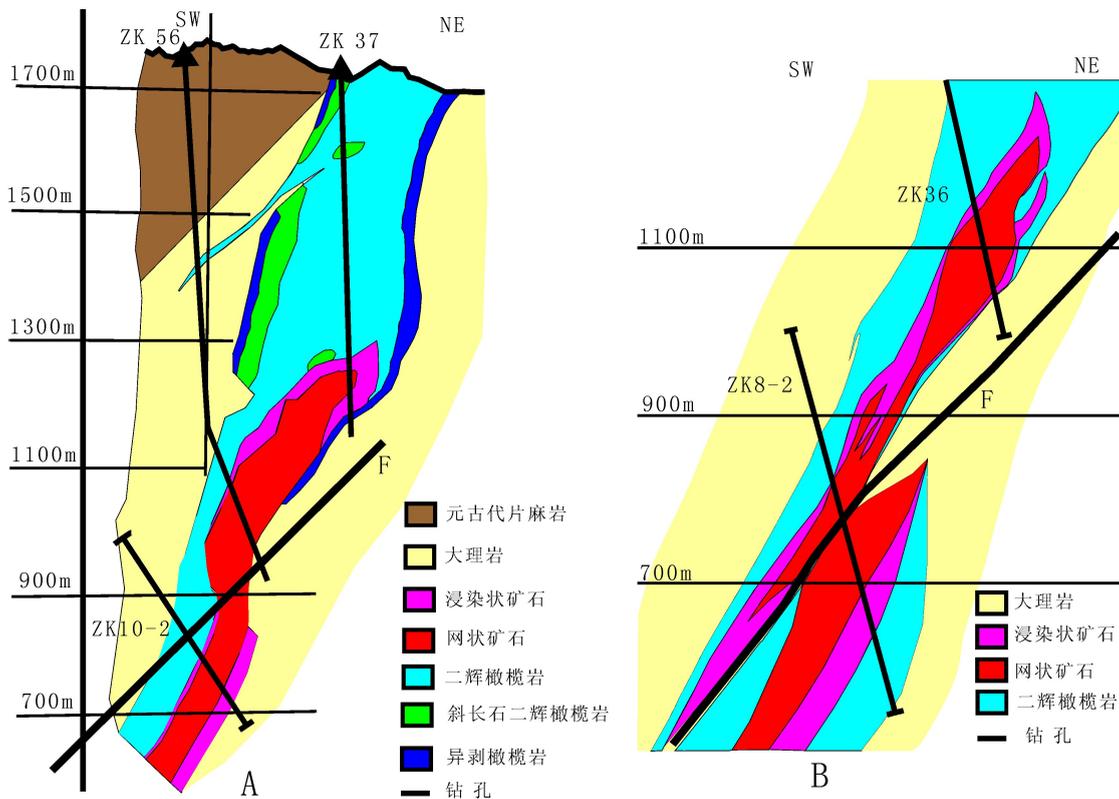


图2 金川Ⅱ矿区1#矿体地质横剖面图

Fig. 2 Cross-section through ore body 1# in Mining area II

A: 10行; B: 8行

(高亚林, 2009; 丰成友等, 2012; 曹德智等, 2012; 宋忠宝等, 2012)。

3 矿石结构和矿物学

1#矿体中矿石结构根据硫化物含量来分类,可以简单地划分为浸染状矿石和网状矿石(海绵陨铁状矿石)。浸染状矿石(小于15%硫化物)样品特征为10%~50%粗粒(0.5~5 cm)网状硫化物被不含矿二辉橄榄岩包围。当硫化物含量达到15%时,形成了连接很好的网状,且完全把间隙硅酸盐熔体排除出去形成网状结构矿石。网状矿石含有相对一致的硫化物,正常硫化物含量在15%~

32%, 80%样品含量在19%~27%。部分矿石富含Cu、Pt、Pd等元素,多分布于网状矿石的中部到底部,个别叠加于矿体底部相邻的浸染状贫矿体中,具变海绵陨铁结构。矿石往往交代、蚀变强烈,造岩矿物和金属硫化物呈定向排列,呈星云状、雾状构造,交代结构、碎裂结构、固溶体分离叶片状结构发育(汤中立等, 1995)。

金川矿石的硫化物-氧化物组合在不同矿体和岩石类型间有变化,含有20%~85%磁黄铁矿,2%~50%镍黄铁矿,2%~60%黄铜矿,5%~25%磁铁矿和5%~10%铁铬铁矿(Tonnelier, 2010)。岩浆矿石中主要的铂族矿物是砷铂矿($PtAs_2$)和碲铂矿($PtTe_2$),但是热液和构造改

变后的矿石含有碲钼矿 (PdTe₂)、黄碲钼矿 (PdTe)、方碲钼矿 (PdBiTe) 和斜碲钼矿 (Pd-Bi₂)，和未知的富 Ag-Pd-Te-Bi 相、富 Pd-Bi-Cl 相 (Yang et al., 2006)。受热液影响的矿石中出现墨铜矿、方黄铜矿和紫硫镍矿。金川的网状矿石显示出较大的化学组分变化，范围从贫黄铜矿区域的 75%Po、20%Pn、5% Cp 到富黄铜矿区域的 20% Po、20%Pn、60% Cp (Tonnelier, 2010)。

4 矿石地球化学

4.1 PGE 特征

样品主要采自金川矿床Ⅱ矿区1#矿体勘探线5行、7行、11行、13行井下标高978~1154 m中段，原始数据见表1。金川大多数矿石的硫化物含量在5%~30%，全岩Ni含量为0.5%~3.35%，全岩Cu含量为0.1%~3.6%。在各类型

表1 金川1#矿体矿石PGE、Ni、Cu等元素含量

Tab.1 Concentrations of PGE, Ni, Cu of ore body 1# of Jinchuan deposit

样号	矿石类型	Ir/ $\times 10^{-9}$	Ru/ $\times 10^{-9}$	Rh/ $\times 10^{-9}$	Pt/ $\times 10^{-9}$	Pd/ $\times 10^{-9}$	Cu/%	Ni/%	S/%
5-5	网状矿石	13.30	5.25	7.92	31.00	405.00	1.29	3.35	10.26
5-8	网状矿石	7.89	3.26	5.75	32.40	148.00	1.30	2.30	7.98
5-15	网状矿石	80.20	54.40	19.00	150.00	175.00	0.24	1.25	6.48
7-9	网状矿石	58.10	34.80	16.30	8.30	152.00	1.18	2.94	10.44
11-4	网状矿石	76.90	69.40	14.00	701.00	307.00	1.22	2.75	9.95
11-7	网状矿石	4.77	1.82	3.12	28.00	115.00	2.58	1.70	7.38
11-12	网状矿石	93.20	65.30	25.50	32.60	301.00	0.20	2.39	9.58
Y13U-03	网状矿石	10.10	5.73	9.10	82.10	83.60	1.67	1.89	7.71
5-16	浸染状矿石	16.80	12.70	6.98	298.00	37.03	0.30	0.71	2.75
5-17	浸染状矿石	24.60	19.30	7.56	29.10	102.00	0.33	0.94	3.16
11-15	浸染状矿石	0.83	0.77	0.43	8.50	27.70	0.29	0.45	1.61
Y14U-01	浸染状矿石	18.90	16.70	9.10	129.00	52.00	0.64	0.85	3.77
5-20	浸染状矿石	4.58	3.64	2.45	39.90	29.50	0.10	0.22	0.59
7-15	斑杂状矿石	6.79	3.57	3.06	29.40	135.00	0.68	2.28	8.22

注：分析测试由中国科学院广州地球化学研究所完成。

矿石中，随着硫化物的增加，Ni、Cu、PGE也随之增加(表1)。PGE含量相对较低，Pd+Pt+Rh+Ru+Ir含量对多数岩浆矿石来说在 $30 \times 10^{-9} \sim 2000 \times 10^{-9}$ 。

4.2 1#矿体矿石Ni、Cu的变化

为了更好地理解1#矿体不同尺度下地球化学变化特征，笔者研究了8行、10行切穿1#矿体不同深度的钻孔ZK8-2、ZK10-2、ZK36、ZK37、ZK56的Ni、Cu含量变化(表2、表3，钻孔ZK36、ZK37、ZK56的数据引用自甘肃地矿局第六地质队勘探报告，1974)。这些钻孔切穿了1#矿体1200 m水平(ZK37)、1100 m水平(ZK36)、800 m水平(ZK10-2)、700 m水平(图2)。ZK37、ZK36关于Ni、Cu的数据很详细，横跨矿石带每2 m一个数据，提供了1#矿体小尺度的地球化学信息。

几个钻孔的Ni、Cu含量变化见图3。1#矿体矿石带是同心带状分布的，核心是富Ni矿石(图

3-A)，向网状矿石带边缘部Cu逐渐富集(图3-B、图3-C)。在网状矿石带内Ni变化相对较小，而Cu变化较大，表现在：①单个钻孔内Cu波动性比Ni大(图3-C、图3-D)。②Cu富集或靠近矿石带的中部或底部边缘(图3-B、图3-C)。Ni与Cu均有5~50 m尺度的循环变化，Ni/Cu值在浸染状和网状矿石中变化不大，但在矿石带内也表现出10~50 m的循环变化，在网状矿石内不同尺度下的循环变化尤其明显，而且在网状矿石带内，能明显看到Ni和Cu含量呈反相关关系(图3)。整个矿石带的Ni/Cu值变化是不均匀的，钻孔中含有最高Ni/Cu的样品赋存于矿带边缘或靠近边缘处(图3-B)，同时在网状矿石带内呈现较大尺度的波动性变化(图3-C、图3-D)。

1#矿体8行、10行剖面钻孔中网状矿石带Ni/Cu变化见图4。浅部钻孔ZK37和ZK36网状矿石样品的平均Ni/Cu值分别为 2.7 ± 0.5 、 1.1 ± 1.1 ，深部钻孔ZK56、ZK10-2、ZK8-2网状矿石样

表2 金川1[#]矿体钻孔 ZK8-2 样品 Ni、Cu 含量Tab. 2 Concentrations of Ni, Cu of ZK8-2 drill hole samples of ore body 1[#]

样品编号	深度/m	岩性	Ni/ $\times 10^{-6}$	Cu/ $\times 10^{-6}$
Zk8-2-47	141	二辉橄榄岩	653	110
ZK8-2-49	145	二辉橄榄岩	773	146
ZK8-2-51	151	二辉橄榄岩	893	85.9
ZK8-2-53	156	二辉橄榄岩	916	114
ZK8-2-55	161	二辉橄榄岩	890	96.8
ZK8-2-57	167	二辉橄榄岩	888	131
ZK8-2-59	169	二辉橄榄岩	856	61.8
ZK8-2-61	178	二辉橄榄岩	895	85.6
ZK8-2-2	187	网状矿石	20 280	11 060
ZK8-2-4	200	网状矿石	10 270	11 220
ZK8-2-6	212	网状矿石	16 960	16 530
ZK8-2-8	229	网状矿石	15 700	35 930
ZK8-2-10	238	网状矿石	10 710	13 280
ZK8-2-12	243	网状矿石	11 920	2 032
ZK8-2-14	248	网状矿石	13 870	5 190
ZK8-2-16	256	网状矿石	12 070	22 400
ZK8-2-18	258	网状矿石	16 630	21 060
ZK8-2-20	263	网状矿石	24 620	12 440
ZK8-2-22	272	网状矿石	16 290	27 150
ZK8-2-24	279	网状矿石	32 780	5 848
ZK8-2-26	284	网状矿石	16 540	3 646
ZK8-2-28	287	网状矿石	17 070	13 390
ZK8-2-30	296	网状矿石	14 620	10 030
ZK8-2-32	298	网状矿石	25 100	16 810
ZK8-2-34	316	二辉橄榄岩	7854	13 750
ZK8-2-36	334	二辉橄榄岩	5 309	1 712
ZK8-2-38	380	辉石岩	4 938	21 910
ZK8-2-40	393	橄榄辉石岩	9 357	3 517
ZK8-2-42	407	橄榄辉石岩	1 065	983
ZK8-2-44	422	橄榄辉石岩	9 795	6 883

注：分析测试由北京国家地质实验测试中心完成。

品的 Ni/Cu 平均值分别为 1.5 ± 1.0 、 3.4 ± 2.0 、 1.8 ± 2.0 。可以看出，在浅部网状矿石 Ni/Cu 值向深部是降低的，且波动性较小，但是在深部变化却很大，尤其是钻孔 ZK10-2、ZK8-2，主要表现为 Cu 的变化范围很大。

5 讨论

5.1 热液改造作用

Yang et al. (2006) 和 Su et al. (2008) 认为金川矿石遭受了普遍的热液改造过程。基于矿物学、结构、流体包裹体研究，Yang et al. (2006) 认为金川矿床有 3 种类型 PGM：I 岩浆作用期的 PGM；II 热液蚀变带的 PGM；III 形成于剪切变形

-热液蚀变作用的 PGM。Yang et al. (2006) 用热液蚀变作用解释具有岩浆结构 II 型矿石较高的 Cu-Pt-Pd-Au-Rh 含量以及 III 型矿石的构造改变形结构和高丰度的碲化物（碲钼矿、黄碲钼矿）、辉碲铋矿、铋化物（斜碲钼矿）。此解释是合理的，因为 Cu-PPGE-Au 在热液流体中比 Ni-IPGE-Co 更易溶解（Wood, 2002; Leshner et al., 2002），III 型矿石中富 Ag 相的出现且相对于 Pd 明显地更富 Pt，确定了与热液而非岩浆过程的一致性。Yang et al. (2006) 中 II 型矿石的 Ni-Co-Os-Ir-Ru 和 Cu-Pd-Au-Rh 组分与网状富铜铂钼矿石相似（Tonnelier, 2010），根据这些元素的地球化学性质（Barnes et al., 2005），II 型矿石中碲化物、辉碲铋矿、铋化物更高的丰度反映了这些组分优先进入残余硫化物熔体中。

表3 金川1#矿体钻孔ZK10-2样品Ni、Cu含量

Tab. 3 Concentrations of Ni, Cu of ZK10-2 drill hole samples of ore body 1#

样品编号	深度/m	岩性	Ni/ $\times 10^{-6}$	Cu/ $\times 10^{-6}$
ZK10-2-1	184	斜长角闪岩	82.00	83.09
ZK10-2-2	222.7	橄榄辉石岩	8 168.08	3 084.40
ZK10-2-3	224	橄榄辉石岩	6 002.51	2 225.51
ZK10-2-4	283	网状矿石	28 053.25	1 443.06
ZK10-2-5	294	网状矿石	16 515.30	2901.86
ZK10-2-6	306	网状矿石	12 614.05	9 488.77
ZK10-2-7	312	网状矿石	12 294.94	14 590.72
ZK10-2-8	319	网状矿石	13 882.70	16 855.73
ZK10-2-9	328.5	网状矿石	28 105.65	
ZK10-2-10	334	网状矿石	24 087.93	4 174.89
ZK10-2-11	339	网状矿石	29 617.74	4 876.12
ZK10-2-12	344	网状矿石	25 944.17	3 316.43
ZK10-2-13	356	网状矿石	29 797.49	3 607.22
ZK10-2-14	370.5	网状矿石	14 778.08	2 429.41
ZK10-2-15	383	网状矿石	24 007.75	13 381.72
ZK10-2-16	387.5	网状矿石	7 617.71	38 817.91
ZK10-2-17	394	网状矿石	15 704.68	19 432.63
ZK10-2-18	405	网状矿石	20 374.31	12 555.95
ZK10-2-19	407.5	网状矿石	20 802.82	5 829.14
ZK10-2-20	415	网状矿石	25 057.35	20 996.07
ZK10-2-21	427	网状矿石	15 989.53	1 364.44
ZK10-2-22	433	网状矿石	18 006.49	
ZK10-2-23	440	网状矿石	17 146.02	5 342.69
ZK10-2-24	443	网状矿石	18 777.58	5 258.31
ZK10-2-25	446	橄榄辉石岩	9 006.41	5 943.08
ZK10-2-27	463.5	斜长角闪岩	843.62	739.24

注：分析测试由长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室完成。

Su et al. (2008) 用岩浆值 $0.3\sim 0.7$ Pt/(Pd+Pt)、 $0.3\sim 0.7$ Ir/(Ir+Ru)、 $0.4\sim 0.8$ Ir/(Ir+Rh) (在 MSS 结晶作用、R 因子变化、岩浆演化阶段没有明显的分离) 来区分岩浆矿石和热液改造矿石。Ir/(Ir+Ru) 变化范围很小, 因为二种元素在热液流体中相对不活跃, 故笔者不予采用。Ir/(Ir+Rh) 对热液运移略微敏感, Pt/(Pt+Pd) 对热液迁移作用最敏感。笔者统计了 1# 矿体中本次工作以及来自 Su et al. (2008)、Song et al. (2006, 2009)、Tonnelier (2010) 中共 90 个样品的值, 并进行了 100% 硫化物的计算, 从图 5 中可知, 虽然大部分样品的 Ir/(Ir+Rh) 都在岩浆值 ($0.4\sim 0.8$) 之内, 但是大部分样品的 Pt/(Pt+Pd) 明显在 Su et al. (2008) 的岩浆值 ($0.3\sim 0.7$) 范围之外, 此与 Su et al. (2008) 观点一致, 即大量的矿石遭受了热液改造作用。这与某些热液样品相对于 Ni-Co-Ru-Ir-Cr 而富集 Se-Au-Cu-

Pd-Pt 相一致, 因为后者比前者更易于溶解在热液流体中 (Leshner et al., 1984; Wood, 2002)。而 Pt 与 Cu 呈弱相关关系, Pd 随 Cu 变化不大 (图 6), 且 Pt 显示较大的变化性 (图 7), Pd-Pt 变化不一致, 发生了一定程度的分离, 说明 Pt/(Pt+Pd) 比值的变化与 Pt 的易迁移性有关。

Ripley et al. (2005) 用矿物学和 H、O、S 稳定同位素方法研究了蚀变作用对金川岩体及其矿物的影响, 认为金川矿床至少遭受两期蚀变作用, 早期有演化海水或变质流体的参与, 与金川岩体形成时的裂谷构造背景相对应。晚期是在岩体形成之后与大量的大气水发生反应或者是演化海水、变质流体、大气水混合物的参与。Chai et al. (1993) 提出高达 $6\ 000\times 10^{-9}$ 的 Pd (约占全岩样品中 Pd 的 70%) 赋存于镍黄铁矿中, 而只有少量的 Pt (小于 2×10^{-9}) 赋存于 3 种主要硫化物矿物中。这与 Pd 和硫化物相中计算的镍黄铁矿数量良好的相关

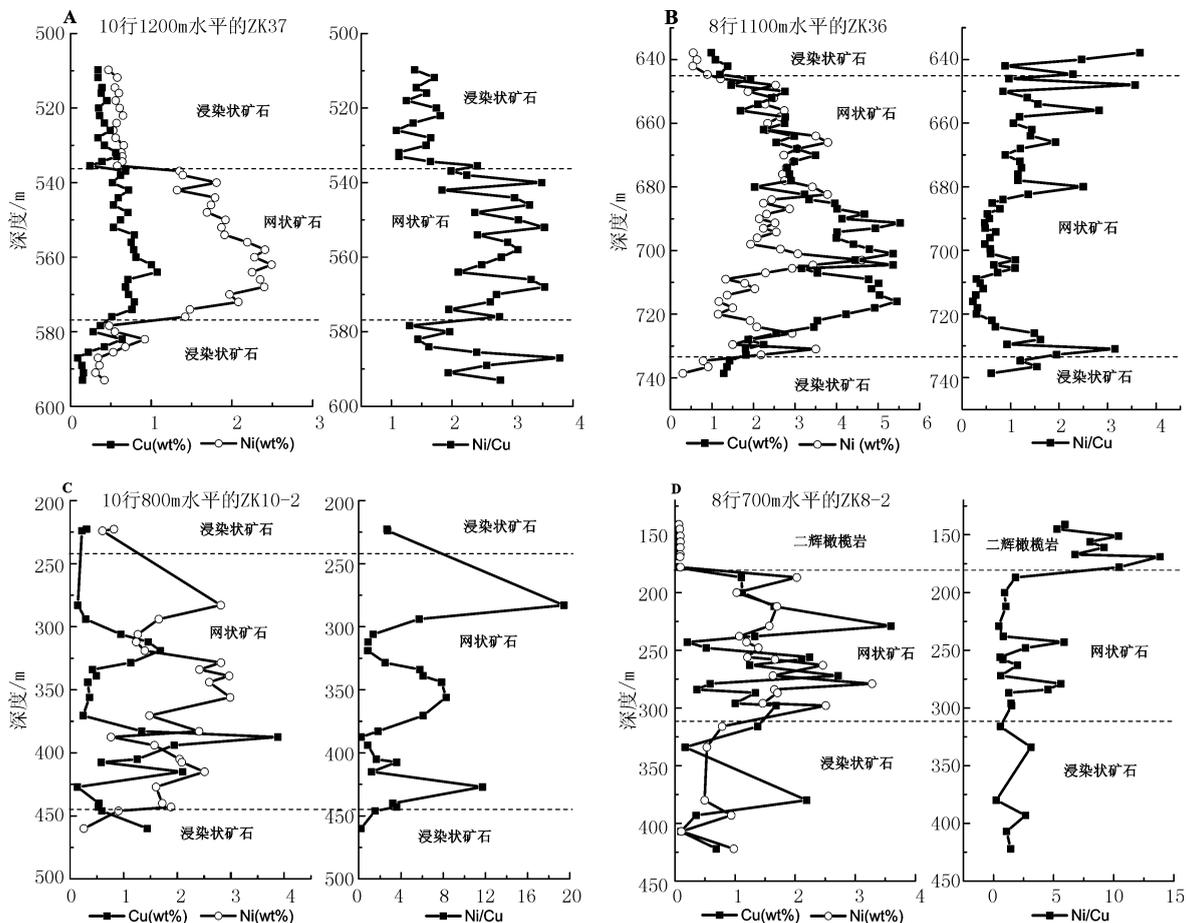


图3 金川Ⅱ矿区1[#]矿体钻孔Ni、Cu品位及Ni/Cu变化图

Fig. 3 Compositional variations of Ni, Cu, and Ni/Cu ratio across the ore zone of ore body 1[#] in Mining area II

A: 10行ZK37; B: 8行ZK36; C: 10行ZK10-2; D: 8行ZK8-2

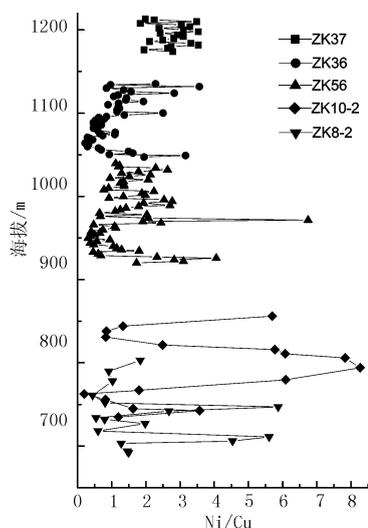


图4 金川1[#]矿体网状矿石Ni/Cu随深度变化图

Fig. 4 Variation in Ni/Cu ratio of net-textured ores for the entire zone of ore body 1[#]

关系以及Pt和镍黄铁矿没有任何关系相一致(Tonnelier, 2010)。如果Pt主要赋存于PGM中,在岩浆后期或岩浆期后热液过程中很容易遭受流体的活化作用。Yang et al. (2006)对PGM的研究很好的证明了这一点。Pt/(Pt+Pd)比例的变化也可能受富CO₂流体的迁移作用的影响(Lehmann et al., 2007),在New Rambler矿床中Pt比Pd更易溶解于富CO₂流体中(Nyman et al., 1990)。

如果不考虑Pt迁移的准确机制,Pt相对于Pd的分离代表了岩浆晚期的变质热液过程,这个过程具有一定的选择性,且并不怎么迁移Au、Cu、Ni或任何其他PGE,除了强烈变形区域(如24#矿体靠近F₁₆₋₁处)。总之,笔者认为,金川1[#]矿体矿石像前人研究(Ripley et al., 2005; Yang et al., 2006; Su et al., 2008)的那样遭受了强烈的热液过程改造作用。

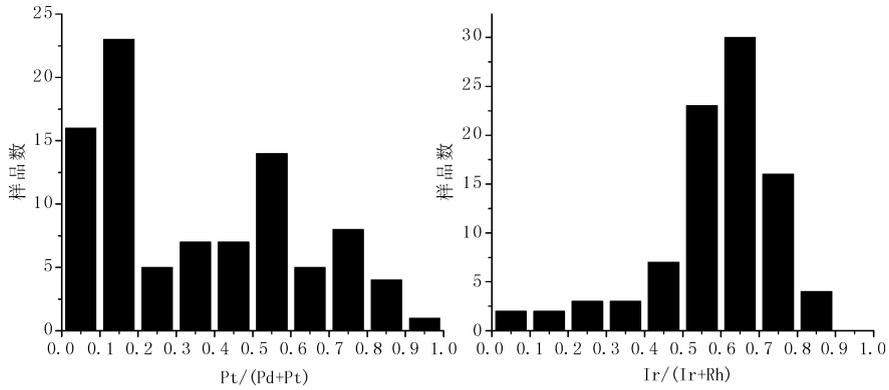


图 5 金川 1[#] 矿体矿石 Pt/ (Pt+Pd)、Ir/ (Ir+Rh) 样品统计图

Fig. 5 Histograms showing sample distribution in terms of Pt/ (Pt+Pd), Ir/ (Ir+Rh) of ore body 1[#]

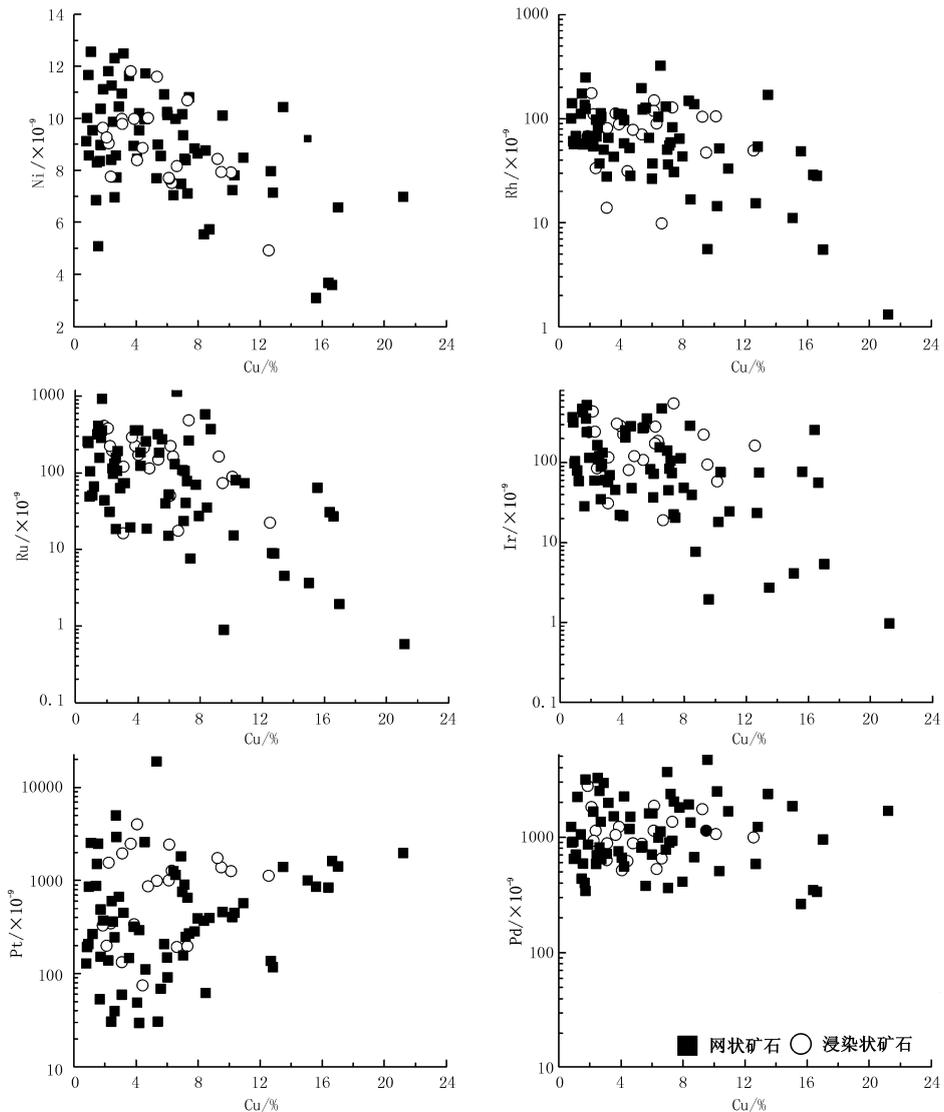


图 6 100%硫化物计算后金川 1[#] 矿体矿石 Ni、Cu、PGE 变化图

部分数据引自于 Song et al. (2006, 2009), Su et al. (2008), Tonnellier (2010)

Fig. 6 Variations of Ni, Cu, and PGE in sulfide ores on a 100% sulfide basis of ore body 1[#]

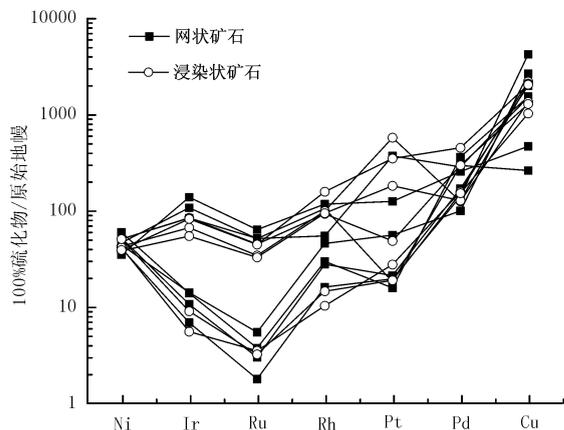


图7 100%硫化物计算后金川矿床1#矿体不同类型矿石PGE、Ni、Cu原始地幔标准化图

原始地幔数据来源于 McDounough et al.

(1995), Barnes et al. (1999)

Fig. 7 Mantle normalized composition of sulfide ores recalculated to 100% sulfide of ore body 1#

5.2 MSS分离结晶作用

金川矿石总体上在1#矿体中更特殊,因为其硫化物均匀分布的网状矿石占主体。硫化物分布显示了浸染状矿石和块状矿石中硫化物不同程度的连通性。它们也显示了在网状矿石带贫黄铜矿和富黄铜矿之间不寻常的循环变化,反映在Ni/Cu(图3)和 $(Pt+Pd)/(Ru+Rh+Ir+Os)$ 的变化上(表1),这可以很好地用MSS分离结晶作用来解释此现象。根据亲Cu元素的地球化学性质(Barnes et al., 2005),在MSS分离结晶作用中,MSS堆积体(富Fe、贫Cu-PPGE)会富集Os、Ir、Ru、Rh等相容元素,而Cu、Pt、Pd、Au等则会富集于残余富Cu硫化物熔体中。

Tonnellier (2010)对金川1#矿体中矿石组分进行了模拟,认为对于Cu、Ni、Ir,1#矿体中组分的变化与分离结晶作用模式相吻合。高程度的MSS分离作用(90%)必然会产生多数富Cu-PPGE硫化物和1#矿体中多数的贫Cu-PPGE的MSS堆积体。苏尚国等(2010)对2#矿体进行的MSS分离结晶作用数值模拟提供了相似的解释。相似地,Ni/Cu和 $(Pd+Pt)/(Rh+Ru+Ir)$ 比例随着硫化物含量的增加而变化是因为硫化物熔体分异作用,即当硫化物的数量足以围绕橄榄石颗粒形成连续的网状体时发生的硫化物分异作用。在1#矿体中,这种几何特征只有硫化物含量超过

15%才会发生。因此,笔者认为,1#矿体特殊的结构特征-网状体结构对硫化物熔体分异有强烈的控制作用。硅酸盐岩浆在1000℃以上就开始结晶,而硫化物熔体从900℃才开始结晶(Barnes et al., 2005),因此在很多地方富Cu硫化物熔体会通过橄榄石晶间迁移至下盘膨大部位。孔隙度高的地方就是硫化物熔体明显分异的部位,导致了矿体中上部贫Cu-PPGE。MSS堆积体的矿带和靠近矿体中部或底部边缘的富Cu-PPGE矿带(图3,图8-A),解释了1#矿体从上到下Ni/Cu值略微变小的趋势(图4),也与甘肃省地矿局第六地质队勘探报告(1974)中1#矿体中下部发育铂钯富集体相符合。孔隙度低的部位分异的硫化物熔体不能有效的迁移,导致MSS堆积体中圈闭大量分异的硫化物熔体(图8-B),解释了1#矿体网状矿石带小尺度范围内Ni/Cu值的循环变化和Ni-Cu呈反相关关系(图3)以及1#矿体中浸染状矿石和网状矿石亲Cu元素配分模式IPGE分为高低两个系列

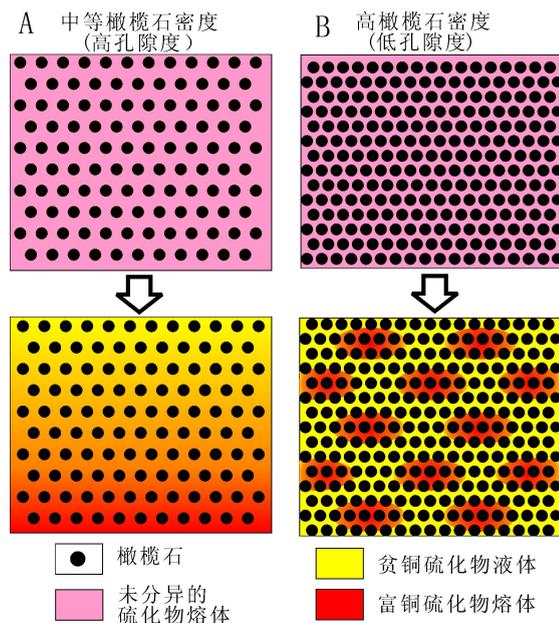


图8 金川贫Cu和富Cu硫化物矿石的成因模式
(修改自 Tonnellier, 2010)

Fig. 8 Proposed genesis model for the net-textured ore zone in ore body 1# between Cu-rich sulfide liquid and Cu-poor sulfide liquid

A. 在中等橄榄石密度的矿石中,硫化物连通性好,硫化物熔体分异可以在较大尺度上发生; B. 在高橄榄石密度矿石中,硫化物连通性中等,硫化物熔体分异可以在较小尺度上发生

的现象(图7)。1#矿体深部 Ni/Cu 比例 30~50 m 的循环变化(图3), 说明了在 15~20 m 尺度内发生了 MSS 的分离结晶作用, 导致部分硫化物富集 Cu、Pt、Pd 等元素。

1#矿体深部 Ni/Cu 值变化大(图4)的原因可能与 MSS 结晶作用和热液蚀变作用有关。分异的富 Cu 硫化物熔体向下迁移, 在深部不均匀的叠加会导致 Cu 的变化较大。此外, 矿体深部相对于地表或周围岩石来说是一个应力集中带, 其更易受构造的影响而改变组构, 从而导致其更易受后期热液蚀变作用影响而改变矿石的 Cu-PPGE 含量。

所以 1#矿体不同尺度内 Ni/Cu 变化的原因有可能是: 硫化物熔体的分异作用发生于不同尺度内, 在小尺度内导致 Ni/Cu 的循环变化; 在大尺度内导致分异的硫化物熔体向下迁移, 从而导致 1#矿体中部或底部富铜铂钯矿石的形成。分离的富 Cu-PPGE 硫化物熔体在矿体深部不均匀叠加或热液蚀变作用可能导致了矿体深部 Ni/Cu 值变化范围较大(图4)。

6 结论

(1) 金川矿床 1#矿体普遍遭受了热液蚀变改造。

(2) 1#矿体矿石 IPGE 具有高、低两个系列的数值特征和 Ni-Cu 呈反相关关系以及小尺度的 Ni/Cu 值循环变化由 MSS 分离结晶作用所致。

(3) 1#矿体中、下部富集富铜铂钯矿石和深部 Ni/Cu 值变化较大是 MSS 分离结晶作用和热液蚀变作用综合所致。

参考文献 (References):

高亚林, 汤中立, 宋谢炎, 等. 金川铜镍矿床隐伏富铜矿体成因研究及其深部找矿意义[J]. 岩石学报, 2009, 25 (12): 3379-3395.

Gao Yalin, Tang Zhongli, Song Xieyan, et al. Study on genesis of the concealed Cu-rich ore body in the Jinchuan Cu-Ni deposits and its prospecting in depth [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25 (12): 3379-3395 (in Chinese with English abstract).

高亚林. 金川矿区地质特征、时空演化及深部找矿研究 [D]. 兰州大学, 2009: 1-145.

Gao Yalin. Study on Geological Characteristics, Temporal and Spatial Evolution, Prospecting in the Depth and border of Jinchuan Deposit [D]. Lanzhou University, 2009: 1-145 (in Chinese with English abstract).

丰成友, 张德全, 贾群子, 等. 柴达木周缘金属矿床成因类型、成矿规律与成矿系列[J]. 西北地质, 2012, 45 (1): 1-8.

Feng Chengyou, Zhang Dequan, Jia Qunzi, et al. Genetic Types, Metallogenic Rules and Series of Metallic Deposits around Qaidam [J]. Northwestern Geology, 2012, 45 (1): 1-8.

苏尚国, 汤中立, 周岱. 金川含矿超镁铁岩侵入体侵位序列 [J]. 地学前缘, 2010, 17 (2): 118-126.

Su Shangguo, Tang Zhongli, Zhou Dai. Emplacement sequence in the Jinchuan sulfide ore-bearing ultramafic intrusion, western China [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17 (2): 118-126 (in Chinese with English abstract).

汤中立, 李文渊. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比[M]. 北京: 地质出版社, 1995.

Tang Zhongli, Li Wenyuan. Mineralisation Model and Geology of the Jinchuan Ni-Cu Sulfide Deposit Bearing PGE [M]. Geological Publishing House, Beijing, 1995 (in Chinese with English abstract).

汤中立, 白云来, 徐章华, 等. 华北古陆西南缘(龙首山-祁连山)成矿系统及成矿构造动力学[M]. 北京: 地质出版社, 2002.

Tang Zhongli, Bai Yunlai, Xu Zhanghua, et al. Metallogenic systems and metallotectonic dynamics in the southwest margin (the Longshoushan mountains and the Qilianshan mountains) of North China paleocontinent [M]. Geological Publishing House, Beijing, 2002 (in Chinese with English abstract).

曹德智, 王军, 杨伟毅, 等. 东昆仑它温查汉铁多金属矿床控矿因素、找矿前景及方向分析[J]. 西北地质, 2012, 45 (1): 56-62.

Cao Dezhi, Wang Jun, Yang Weiyi, et al. The Ore Controlling Factors, Metallogenic Condition and Prospecting in West Part of Tawenchahan Polymetallic Ore District, East Kunlun Mountains, Qinghai Province [J].

- Northwestern Geology, 2012, 45 (1): 56-62.
- 宋忠宝, 张雨莲, 张照伟, 等. 青海锡铁山铅锌矿的成因讨论[J]. 西北地质, 2012, 45 (1): 134-139.
- Song Zhongbao, Zhang Yulian, Zhang Zhaowei, et al. Genetic Discussion of Xitieshan Lead-Zinc Deposit in Qinghai Province [J]. Northwestern Geology, 2012, 45 (1): 134-139.
- Barnes S J, Maier W D. The fractionation of Ni, Cu, and the noble metals in silicate and sulfide liquids; Geological Association of Canada Short Course Notes [M]. 1999, 13: 69-106.
- Barnes S J, Lightfoot P C. Formation of Magmatic Nickel Sulfide Ore Deposits and Processes Affecting Their Copper and Platinum Group Element Contents [J]. Econ Geol, 2005, 100: 179-213.
- Chai G, Naldrett A. J., Rucklidge J. C. In situ quantitative analyses for PGE and Au in sulfide minerals of the Jinchuan Ni-Cu deposit by accelerator mass spectrometry [J]. Canadian Mineralogist, 1993, 31: 19-30.
- Lehmann J, Arndt NT, Windley B, et al. Field relationships and geochemical constraints on the emplacement of the Jinchuan intrusion and its Ni-Cu-PGE sulfide deposit, Gansu, China [J]. Economic Geology, 2007, 102: 75-94.
- Leshner CM, Keays RR. Metamorphically and hydrothermally mobilized Fe-Ni-Cu sulfides at Kambalda, Western Australia. In: D. L. Buchanan and M. J. Jones, eds, sulfide deposits in mafic and ultramafic rocks [M]. Inst. Min. Metall., London, UK, 1984.
- Leshner CM, Keays RR. Komatiitic-associated Ni-Cu- (PGE) deposits: mineralogy, geochemistry, and genesis. In: L. J. CABRI, ed, The geology, geochemistry, mineralogy, and mineral beneficiation of the platinum-group elements [M]. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2002, 579-617.
- McDonough W. F., Sun S. S. The composition of the Earth [J]. Chem Geol, 1995, 120: 223-253.
- Naldrett A. J. Magmatic sulfide deposits: Geology, geochemistry, and exploration [M]. Berlin, Springer, 2004.
- Nyman M. W., Sheets R. W., Bodnar R. J. Fluid-inclusions evidence for the physical and chemical conditions associated with intermediate-temperature PGE mineralization at the New Rambler deposit, southeastern Wyoming [J]. Canadian Mineralogist, 1990, 28 (3): 629-638.
- Ripley E M, Sarkar A, Li C. Mineralogic and stable isotope studies of hydrothermal alteration at the Jinchuan Ni-Cu deposit, China [J]. Econ Geol, 2005, 100: 1349-1361.
- Song X Y, Keays R R, Zhou M F, et al. Siderophile and chalcophile elemental constraints on the origin of the Jinchuan Ni-Cu- (PGE) sulfide deposit, NW China [J]. Geochim Cosmochim Acta, 2009, 73: 404-424.
- Song X Y, Zhou M F, Wang C Y, et al. Role of Crustal Contamination in Formation of the Jinchuan Intrusion and Its World-Class Ni-Cu- (PGE) Sulfide Deposit, Northwest China [J]. International Geology Review, 2006, 48: 1113-1132.
- Su SG, Li C, Zhou MF, et al. Controls on variations of platinum-group element concentrations in the sulfide ores of the Jinchuan Ni-Cu deposit, western China [J]. Miner Deposita, 2008, 43: 609-622.
- Tang ZL, Yan HQ, Jiao JG, et al. Regional metallogenic controls of small-intrusion-hosted Ni-Cu (PGE) ore deposits in China [J]. Earth science frontiers, 2007, 14 (5): 92-103.
- Tonnellier N. J. Geology and genesis of the Jinchuan Ni-Cu- (PGE) deposit, China. Ph. D. thesis [M]. Laurentian University, 2010.
- Wood, SA. The aqueous geochemistry of the platinum-group elements with applications to ore deposits. In: L. J. CABRI, ed, The geology, geochemistry, mineralogy, and mineral beneficiation of the platinum-group elements [M]. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2002.
- Yang XZ, Ishihara S, Zhao D H. Genesis of the Jinchuan PGE deposit, China: evidence from fluid inclusions, mineralogy and geochemistry of precious elements [J]. Mineralogy and Petrology, 2006, 86: 109-128.

Ore Genesis of Ore Body # 1 of the Jinchuan Ni-Cu Sulfide Deposit

WANG Lu-wen^{1,2}, TANG Zhong-li^{1,3}, YAN Hai-qing³,
JIAO Jian-gang³, XU Gang³, QIU Gen-lei³

(1. School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. 109 Geological Brigade of Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610100, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit is hosted by ultramafic intrusions in northwestern China. It is the third-largest Ni deposit in the world. The central part of the Jinchuan intrusion (Ore Body 1) has a “tongue-like” shape in cross section and hosts ~56.8% of the known Ni resources. It is characterized by concentrically zoned, with net-textured ore surrounded by disseminated sulfide. Net-textured ore is dominant over other ore types in ore body # 1. Based on 100% sulfide recalculation, different types of ore in ore body # 1 have high and low value characteristics of IPGE, and Pt vary largely, Pt/ (Pt+Pd) ratios of most samples are out of (0.3-0.7). The Ni, Cu content variations of drill hole samples indicate that Cu-rich ores concentrated at base of net-texture ore body, and content of this two elements appears obvious negative relationships, Ni/Cu ratios vary largely in deep. This research reveals that the ore body # 1 was affected obviously by hydrothermal alteration. IPGE and small scale variations of Ni/Cu ratios are likely due to fractional crystallization of MSS. Small Cu-PPGE rich lenses and large scale variations of Ni/Cu in the deep part of ore body # 1 may be the result of MSS fractionation or hydrothermal alteration.

Key words: Jinchuan; Ni-Cu sulfide deposit; hydrothermal alteration; fractional crystallization of MSS; ore genesis