

# 新疆葫芦铜镍矿床锆石 U-Pb 年代学、铂族元素地球化学特征及其地质意义\*

孙涛<sup>1,2</sup> 钱壮志<sup>1,2</sup> 汤中立<sup>1,2</sup> 姜常义<sup>1,2</sup> 何克<sup>1,2</sup> 孙亚莉<sup>3</sup> 王建中<sup>1</sup> 夏明哲<sup>1,2</sup>

SUN Tao<sup>1,2</sup>, QIAN ZhuangZhi<sup>1,2</sup>, TANG ZhongLi<sup>1,2</sup>, JIANG ChangYi<sup>1,2</sup>, HE Ke<sup>1,2</sup>, SUN YaLi<sup>3</sup>, WANG JianZhong<sup>1</sup> and XIA MingZhe<sup>1,2</sup>

1. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054

2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 西安 710054

3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

1. College of Earth Science and Land Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2. Key Laboratory of western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China

3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2009-08-11 收稿, 2010-04-01 改回.

Sun T, Qian ZZ, Tang ZL, Jiang CY, He K, Sun YL, Wang JZ and Xia MZ. 2010. Zircon U-Pb chronology, platinum group element geochemistry characteristics of Hulu Cu-Ni deposit, East Xinjiang, and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11):3339–3349

**Abstract** Hulu intrusion lies in the eastern part of Tudun-Huangshan-Jingerquan-Tulargen mafic-ultramafic rocks belts in East Tianshan, and cover an area of about 0.75 km<sup>2</sup>, is a multiple intrusion and composed of gabbro diorite, gabbro, pyroxenite, pyroxene peridotite and peridotite. The zircon LA-ICP-MS U-Pb dating for gabbro diorite of Hulu intrusion yielded 274.5 ± 3.9 Ma. The data suggest that the Hulu intrusion was intruded at Early Permian, is the result of a post-collisional extensional setting. The total concentration of platinum-group element (PGE) in ores and rocks is low. The average concentration of PGE in rocks is 7.90 × 10<sup>-9</sup>, and 45.57 × 10<sup>-9</sup> in ores. Rock and ore samples have similar mantle-normalized PGE patterns, the diversity between IPGE and PPGE is lower. The diagram of Ni/Cu versus Pd/Ir reveals that the initial magma of Hulu mafic-ultramafic complex is high magnesian basaltic magma. The Ni/Cu ratio of ores and rocks is from 114.67 × 10<sup>3</sup> ~ 157.42 × 10<sup>3</sup> (136.05 × 10<sup>3</sup> in average) and 11.07 × 10<sup>3</sup> ~ 294.35 × 10<sup>3</sup> (125.48 × 10<sup>3</sup> in average) respectively, which show that the magma has occurred sulfide pre-segregation from the magmatic system resulting in parental magma depleted in PGE. Crustal contamination (addition of SiO<sub>2</sub> and S) and the fractionation of olivine and pyroxene in the magma evolution process may be the main factors leading to S-saturation and sulfide segregation in deep crust.

**Key words** LA-ICP-MS zircon U-Pb date; Platinum group element; Geochemistry; Hulu Cu-Ni deposit; East Tianshan

**摘要** 新疆东部葫芦岩体地表出露面积 0.75 km<sup>2</sup>, 是由辉长闪长岩、辉长岩、辉石岩、辉橄岩、橄辉岩组成的复式岩体。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 岩体形成年龄为 274.5 ± 3.9 Ma, 是东天山后碰撞伸展环境的产物。岩石和矿石的 PGE 总量低, 其中 IPGE 与 PPGE 含量相近, PPGE 略高于 IPGE。岩石平均 7.90 × 10<sup>-9</sup>, 矿石平均 45.57 × 10<sup>-9</sup>。在原始地幔标准化图解上, 岩石和矿石具有相似的分配模式, PPGE 和 IPGE 之间分异较弱。Ni/Cu-Pd/Ir 关系图显示母岩浆主要为高镁的玄武质岩浆。根据矿石 Cu/Pd 比值 114.67 × 10<sup>3</sup> ~ 157.42 × 10<sup>3</sup> (平均 136.05 × 10<sup>3</sup>) 和岩石 Cu/Pd 比值 11.07 × 10<sup>3</sup> ~ 294.35 × 10<sup>3</sup> (平均 125.48 × 10<sup>3</sup>) 推断, 葫芦矿床成矿岩浆演化过程中经历了深部硫化物部分熔离的过程, 这可能是导致该矿床 PGE 明显亏损的原因之一。地壳物质的混染 (SiO<sub>2</sub>、S 等的加入) 以及橄辉石、辉石等矿物的分离结晶, 是引起该矿床硫饱和并发生硫化物熔离作用而成矿的主要因素。

**关键词** LA-ICP-MS; 锆石 U-Pb 定年; 铂族元素; 地球化学; 葫芦铜镍矿床; 东天山

**中图法分类号** P588.125; P597.3

\* 本文受国家自然科学基金重点项目(40534020)、中国地质调查局地质大调查项目(资(2010)矿评01-03-17)和长安大学中央高校专项基金(CHD2010JC028, CHD2009JC058)联合资助。

第一作者简介: 孙涛, 男, 1983年生, 博士研究生, 矿床学专业, E-mail: suntao06@126.com

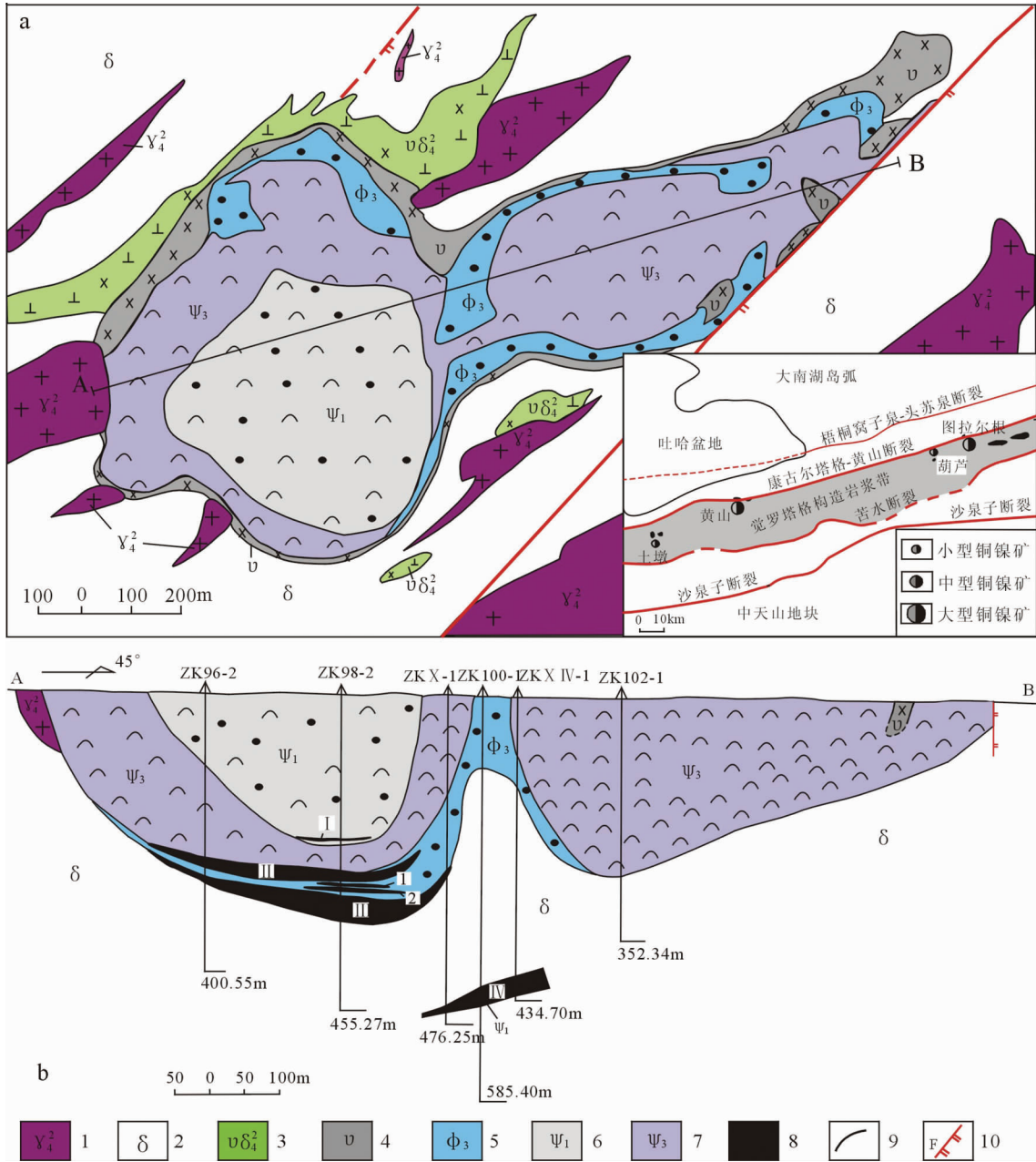


图1 葫芦铜镍矿床地质图(a)和剖面图(b) (据新疆第三地质大队, 2005<sup>①</sup> 修编)

1-花岗岩; 2-闪长岩; 3-辉长闪长岩; 4-辉长岩; 5-辉石岩; 6-辉橄岩; 7-橄辉岩; 8-硫化物矿体; 9-地质界线; 10-断层

Fig. 1 Simplified geological map (a) and profile map (b) of Hulu Cu-Ni deposit

1-granite; 2-diorite; 3-gabbro-diorite; 4-gabbro; 5-pyroxenite; 6-pyroxene peridotite; 7-peridotite; 8-sulfide ore body; 9-boundary; 10-fault

东天山北部土墩-黄山-镜儿泉-图拉尔根一带, 分布有大量中小型镁铁质-超镁铁质岩体, 其中多数岩体赋含铜镍矿床, 已构成我国重要的镁铁-超镁铁岩成矿带。已有研究显示, 关于该成矿带镁铁质-超镁铁质岩体形成的构造环境, 尚有与蛇绿岩有关(白云来, 2000)、与后碰撞伸展有关(何国琦等, 1994; 毛景文等, 2002; 秦克章等, 2002; Zhou *et al.*, 2004;

韩宝福等, 2004)、阿拉斯加型岩体(刘德权, 1983; 胡受奚等, 1990; Xiao *et al.*, 2004) 和与地幔柱有关(王登红等, 2002; Mao *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2008) 等不同认识。但近年来, 多数学者都倾向于后碰撞伸展环境的观点, 其认识趋同的原因主要在于岩体精确定年的进展, 如黄山东、黄山、香山和香山西三个岩体的锆石 U-Pb 定年结果分别为  $274 \pm 3\text{Ma}$ 、

① 新疆第三地质大队. 2005. 新疆哈密市镜儿泉葫芦铜镍矿IV号矿体富矿补充勘查报告

269 ± 2Ma、285 ± 1.2Ma 和 278.6 ± 1.8Ma (韩宝福等, 2004; Zhou *et al.*, 2004; Qin *et al.*, 2003; 肖庆华等, 2010)。在该成矿带, 葫芦铜镍矿床位于东段, 成矿岩体属镁铁质-超镁铁质复式岩体, 矿床达中型规模, 是该岩带具代表性的铜镍岩浆硫化物矿床之一, 但相对黄山、香山、图拉尔根矿床而言, 研究程度并不高。依据上述研究现状, 本文针对葫芦镁铁质-超镁铁质岩体进行单颗粒锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年研究, 并试图从铂族元素地球化学方面, 对该矿床的成矿作用进行初步探讨。

## 1 矿床地质概况

葫芦铜镍矿床位于哈密市东偏南 180km 处, 土墩-黄山-镜儿泉-图拉尔根镁铁质-超镁铁质岩带东段, 主要受康古尔塔格-黄山断裂控制。含矿岩体形似葫芦, 长 1400m, 宽 340~720m, 地表出露面积 0.75km<sup>2</sup> (图 1a)。葫芦岩体是一个基性-超基性复式岩体, 可分为东、西两个部分。岩体的内带为橄榄岩相, 平面上呈葫芦状、剖面上呈盆状产出。中环带为辉石岩相, 形成葫芦岩体东、西两环, 东部小环切穿西部大环, 两环相交呈葫芦状, 是铜镍矿床的主要赋矿岩石。外环带为辉长岩相、辉长闪长岩相, 一般在辉石岩相之下, 局部可见辉长岩相侵入橄榄岩相和辉石岩相中; 辉长闪长岩相为不连续宽窄多变的边缘相带, 一般呈灰绿色, 具有辉长结构, 块状构造, 电子探针分析单斜辉石为普通辉石, 斜长石为中长石和更长石, 与辉长岩相多呈渐变过渡关系, 局部也有侵入接触关系。

矿区圈出 I、II、III、IV 等 4 个矿体, 其中 III、IV 号矿体是矿区中的主要矿体, III 号矿体出露于地表, IV 号矿体为深部盲矿体 (图 1b)。I、II、III 号矿体为就地熔离型矿体, 呈似层状产于辉石岩相和橄榄岩相底部, 矿体与围岩之间呈渐变关系, 矿体主要为贫矿, 有少量富矿体, 垂向上一一般富矿体位于贫矿体下部; IV 号矿体为深熔贯入型矿体, 呈似层状或透镜状, 其含矿岩石为辉橄岩, 围岩为闪长岩, 矿体与围岩接触界线明显, 界线平直。矿石类型主要有稀疏浸染状和稠密浸染状两种, 还有少量的团块状、星散浸染状和条带状铜镍硫化物矿石。矿石矿物主要有磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿, 其次为黄铁矿、方黄铜矿、辉铜矿、紫硫镍铁矿、白铁矿、碲银矿、铂碲铋镍矿等。

## 2 样品采集与分析方法

用于锆石 U-Pb 测年的样品采自葫芦铜镍矿床地表新鲜的辉长闪长岩。锆石样品靶的制备, 首先是将挑选好的无裂隙和不含包裹体的锆石用环氧树脂固定, 待环氧树脂充分固化后抛光至锆石露出核部, 然后进行锆石的阴极发光 (CL) 显微成像和 LA-ICP-MS 测试。锆石样品制靶和测试均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成, 锆石测试用四极杆

ICP-MS Elan6100DRC; 测试过程在标准模式下进行; 激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M, 用激光束斑直径为 30μm, 激光脉冲为 10Hz, 能量为 32~36mJ。测试过程中, 样品每完成 4~5 个测点的测定, 加测标样一次。在所测锆石样品分析 15~20 个点前后各测两次 NISTSRM610。锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标标准物质, 元素含量采用 NIST SRM610 作为外标, <sup>29</sup>Si 作为内标。详细分析步骤和数据处理方法参见相关文献 (袁洪林等, 2003)。

铂族元素 (PGE) 样品包括了主要含矿岩性和矿石类型, 样品新鲜具有代表性。测试样品前处理在中国科学院广州地球化学研究所进行, 测试在西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室完成。分析测试采用铈试金法结合电感耦合等离子体质谱仪进行, 具体实验条件和步骤参见文献 (Sun *et al.*, 1998; Sun and Sun, 2005; 钱壮志等, 2009a), 全流程空白值: Os 和 Ir 为 0.015 × 10<sup>-9</sup>、Ru 为 0.05 × 10<sup>-9</sup>、Rh 为 0.01 × 10<sup>-9</sup>、Pt 为 0.15 × 10<sup>-9</sup>、Pd 为 0.3 × 10<sup>-9</sup>。主量元素分析在国家地质实验测试中心采用 3080E 型 X 荧光光谱仪完成, XRF 熔片法按国家标准 GB/T 14506.28—1993; 稀土元素、微量元素及 Ni、Cu 由西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室采用 X7 型 ICP-MS 分析。矿石 S 分析采用燃烧碘量法, 在西安地质矿产研究所测试中心完成。

## 3 实验结果

### 3.1 锆石 U-Pb 测年

葫芦铜镍矿床辉长闪长岩 (J6/1) 中挑选出的锆石大小不等, 自形程度较好, 多呈淡棕色, 阴极发光 (CL) 图像显示锆石环带较好 (图 2)。锆石中 U 含量为 87.48 × 10<sup>-6</sup> ~ 607.51 × 10<sup>-6</sup>, Th 含量为 47.87 × 10<sup>-6</sup> ~ 532.03 × 10<sup>-6</sup>, Th/U 比值较高, 为 0.55~1.00, 平均为 0.73 (表 1), 具典型的岩浆锆石 Th/U 比值特征。样品 J6/1 的 19 粒锆石共 22 个测点分析结果见表 1。在一致曲线图中 (图 3), 数据点密集成群分布于一致曲线上或其附近, <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 比值年龄的加权平均值为 274.5 ± 3.9Ma (MSWD = 2.7), 95% conf, 代表了葫芦铜镍矿床镁铁质-超镁铁质岩体的形成年龄。

### 3.2 铂族元素测试结果

葫芦矿床岩石和矿石的 PGE 含量低 (表 2), Pd 组 (PPGE, 包括 Rh, Pt, Pd) 高于 Ir 组 (IPGE, 包括 Os, Ir, Ru)。其中岩石样品中 ΣPGE 含量很低, 介于 1.98 × 10<sup>-9</sup> ~ 26.62 × 10<sup>-9</sup> 之间, 平均 7.90 × 10<sup>-9</sup>, 相对于原始地幔 ΣPGE (23.5 × 10<sup>-9</sup>; McDonough and Sun, 1995) 亏损。其中, 辉石岩 ΣPGE 含量为 2.85 × 10<sup>-9</sup> ~ 26.62 × 10<sup>-9</sup>, 平均 14.74 × 10<sup>-9</sup>; 辉长岩 ΣPGE 含量为 6.06 × 10<sup>-9</sup> ~ 7.54 × 10<sup>-9</sup>, 平均 6.80 × 10<sup>-9</sup>; 辉长闪长岩 ΣPGE 含量为 1.98 × 10<sup>-9</sup> ~ 2.32 × 10<sup>-9</sup>, 平均 2.15 × 10<sup>-9</sup>。整体上岩石 ΣPGE 含量显示随基性程度降低而变小。在矿石中, 稠密浸染状矿石 ΣPGE 含量为

表1 葫芦镍矿床辉长闪长岩中锆石 U-Pb 分析数据

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb data of gabbro-diorite in Hulu Cu-Ni deposit, East Tianshan

测点号	组成 ( $\times 10^{-9}$ )				Th/U				同位素比值				年龄 (Ma)			
	U	Th	Pb	Th/Pb	1 $\sigma$	207Pb/235U	1 $\sigma$	206Pb/238U	1 $\sigma$	207Pb/206Pb	1 $\sigma$	207Pb/235U	1 $\sigma$	206Pb/238U	1 $\sigma$	
1	135.19	83.55	23.92	0.62	0.00124	0.29095	0.0065	0.04101	0.00029	261	38	259	5	259	2	
2	129.40	80.10	23.22	0.62	0.00136	0.2946	0.0073	0.04164	0.00031	254	43	262	6	263	2	
3	607.51	532.03	112.92	0.88	0.00114	0.31152	0.00616	0.04319	0.0003	299	32	275	5	273	2	
4	347.9	313.09	62.25	0.90	0.00116	0.29993	0.00609	0.04177	0.00029	288	34	266	5	264	2	
5	441.19	263.70	87.70	0.60	0.00111	0.33548	0.0064	0.04651	0.00032	299	31	294	5	293	2	
6	223.14	223.68	40.26	1.00	0.00113	0.3014	0.00597	0.04231	0.00029	270	33	267	5	267	2	
7	311.43	289.94	56.41	0.93	0.00095	0.29225	0.00494	0.04267	0.00027	180	28	260	4	269	2	
8	95.69	59.71	18.18	0.62	0.00158	0.30266	0.00931	0.0448	0.00037	147	57	268	7	283	2	
9	87.48	47.87	16.51	0.55	0.00209	0.31953	0.01232	0.04456	0.00045	285	70	282	9	281	3	
10	130.01	92.40	23.95	0.71	0.00148	0.31015	0.00835	0.04354	0.00034	270	47	274	6	275	2	
11	213.73	117.27	39.99	0.55	0.00202	0.31751	0.00591	0.04426	0.00029	286	30	280	5	279	2	
12	273.59	209.1	50.49	0.76	0.00188	0.31302	0.00608	0.04375	0.0003	280	32	277	5	276	2	
13	123.06	90.87	23.71	0.74	0.00237	0.32868	0.01441	0.04572	0.00052	291	79	289	11	288	3	
14	148.50	81.20	26.93	0.55	0.00152	0.30599	0.00703	0.04307	0.00031	264	39	271	5	272	2	
15	231.90	184.55	42.96	0.80	0.00108	0.31476	0.0059	0.04405	0.00029	277	31	278	5	278	2	
16	168.44	131.63	30.85	0.78	0.00125	0.30492	0.00692	0.04359	0.00031	228	39	270	5	275	2	
17	339.23	242.08	66.64	0.71	0.00097	0.33486	0.00552	0.04681	0.0003	280	26	293	4	295	2	
18	376.50	266.19	69.68	0.71	0.00101	0.31372	0.00545	0.04414	0.00028	265	28	277	4	278	2	
19	187.07	117.19	34.17	0.63	0.00188	0.31196	0.00699	0.04361	0.00031	280	38	276	5	275	2	
20	221.09	168.59	40.31	0.76	0.00165	0.31033	0.00623	0.04357	0.0003	270	33	274	5	275	2	
21	331.94	316.66	60.56	0.95	0.00179	0.31165	0.00487	0.04363	0.00027	276	24	275	4	275	2	
22	161.21	105.15	29.23	0.65	0.00256	0.31306	0.0148	0.04353	0.00053	292	86	277	11	275	3	



图2 葫芦铜镍矿床辉长闪长岩锆石 CL 图像

Fig.2 CL images of zircons from gabbro-diorite in Hulu Cu-Ni deposit, East Tianshan

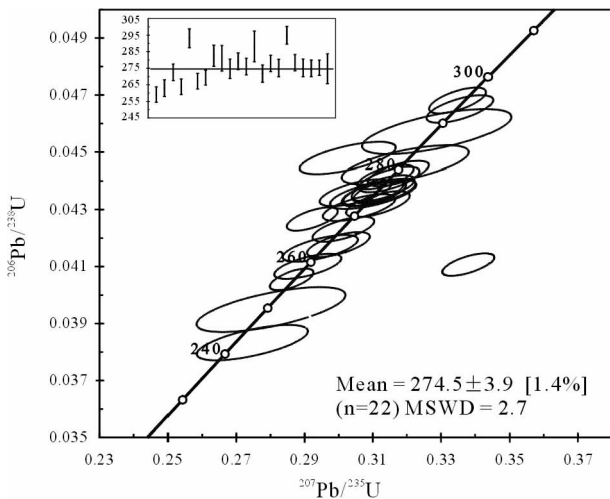


图3 葫芦铜镍矿床辉长闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图

Fig.3 LA-ICP-MS U-Pb concordia diagram of zircons from gabbro-diorite in Hulu Cu-Ni deposit, East Tianshan

$59.92 \times 10^{-9}$ , 稀疏浸染状矿石  $\Sigma$ PGE 含量为  $31.23 \times 10^{-9}$ , 明显高于不含硫化物的岩石样品中的 PGE 含量。

与国内典型矿床相比,葫芦矿床岩石中  $\Sigma$ PGE 含量低于喀拉通克矿床岩石 ( $0.23 \times 10^{-9} \sim 43.64 \times 10^{-9}$ , 平均  $10 \times 10^{-9}$ ; 钱壮志等, 2009a; Song and Li, 2008) 和白石泉矿床岩石 ( $2.31 \times 10^{-9} \sim 78.23 \times 10^{-9}$ , 平均  $15 \times 10^{-9}$ ; 柴凤梅等, 2006), 略高于黄山东矿床岩石 ( $0.67 \times 10^{-9} \sim 2.42 \times 10^{-9}$ ,

表2 葫芦铜镍矿床岩石和矿石铂族元素及 Cu, Ni 含量 ( $\times 10^{-9}$ )Table 2 Concentrations of platinum-group elements and Cu, Ni in ores and rocks from Hulu Cu-Ni deposit ( $\times 10^{-9}$ )

样品号	JK2	JK3	JK1	J5/1	J3/1	J3/2	J6/1	J6/2
样品名称	稠密浸染状	稀疏浸染状	星点状矿化辉石岩	辉石岩	辉长岩	辉长岩	辉长闪长岩	辉长闪长岩
Os	0.86	1.00	0.15	0.07	0.09	0.10	0.07	0.07
Ir	0.77	0.44	0.19	0.06	0.10	0.07	0.07	0.06
Ru	3.18	2.07	0.82	0.69	0.73	0.90	0.76	0.72
Rh	1.33	0.56	0.28	0.06	0.11	0.11	0.06	0.06
Pt	10.30	10.85	11.04	1.02	2.07	1.58	0.75	0.61
Pd	43.48	16.30	14.14	0.95	4.44	3.30	0.61	0.46
Ni	10800	6362	2967	491.8	41.58	42.60	2.05	2.40
Cu	4986	2566	1521	128.8	51.15	36.52	117.6	135.4
$\Sigma$ PGE	59.92	31.23	26.62	2.85	7.54	6.06	2.32	1.98
Ni/Cu	2.17	2.48	1.95	3.82	0.81	1.17	0.02	0.02
Pd/Ir	56.61	37.39	72.89	14.89	45.78	44.57	9.26	7.86
Pd/Pt	4.22	1.50	1.28	0.93	2.14	2.09	0.81	0.75
Pt/Pt*			1.47	1.08	0.79	0.68	1.03	1.01
Ni/(Ni + Cu)	0.68	0.71	0.66	0.79	0.45	0.54	0.02	0.02
(Pt + Pd)/(Os + Ir + Ru)	11.20	7.73	21.71	2.40	7.08	4.56	1.51	1.26
Cu/Pd ( $\times 10^3$ )	114.67	157.42	107.57	135.58	11.52	11.07	192.79	294.35
Ni/Pd ( $\times 10^3$ )	248.39	390.31	209.83	517.68	9.36	12.91	3.37	5.22

平均  $2 \times 10^{-9}$ ) (钱壮志等, 2009b)、香山矿床岩石和图拉尔根矿床岩石 ( $1.21 \times 10^{-9} \sim 4.59 \times 10^{-9}$ ; 孙赫等, 2008)。

在原始地幔标准化图解上, 岩石 (图 4a) 和矿石 (图 4b) 具有相似的 PGE 配分模式, 均属于 Pt-Pd 配分型, 为向左中等倾斜的曲线, 矿石较岩石向左倾斜度高, 含 Pt、Pd 较高, 岩石具 Ru 的弱峰。都具有 Os-Ir 平坦, Pd 和 Ir 中等分异特征, 岩石 PGE 相对于原始地幔亏损。

#### 4 葫芦铜镍矿床形成时代与地质背景

本文 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年表明, 葫芦铜镍矿床含矿岩体的形成时代为  $274.5 \pm 3.9$  Ma。在东天山土墩-黄山-镜儿泉-图拉尔根镁铁质-超镁铁质岩带, 已有 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年或矿石 Re-Os 同位素测年资料显示 (毛景文等, 2002; Qin *et al.*, 2003; 韩宝福等, 2004; Zhou *et al.*, 2004; 李月臣等, 2006; Zhang *et al.*, 2008), 几个重要赋含铜镍硫化物矿床的镁铁质-超镁铁质岩体的成岩或成矿年龄都集中在 298 ~ 269 Ma 之间 (早二叠世) (表 3)。考虑到测试方法的不同和误差的差异, 则这些岩体的锆石 U-Pb 测试年龄非常集中 (269 ~ 285 Ma), 特别是本文测试的葫芦矿床岩体的锆石 U-Pb 年龄与韩宝福等 (2004) 发表的黄山东矿床岩体的锆石 U-Pb 年龄几乎一致, 都为 274 Ma, 这就很好的限定了东天山土墩-黄山-镜儿泉-图拉尔根镁铁质-超镁铁质岩带赋含铜镍

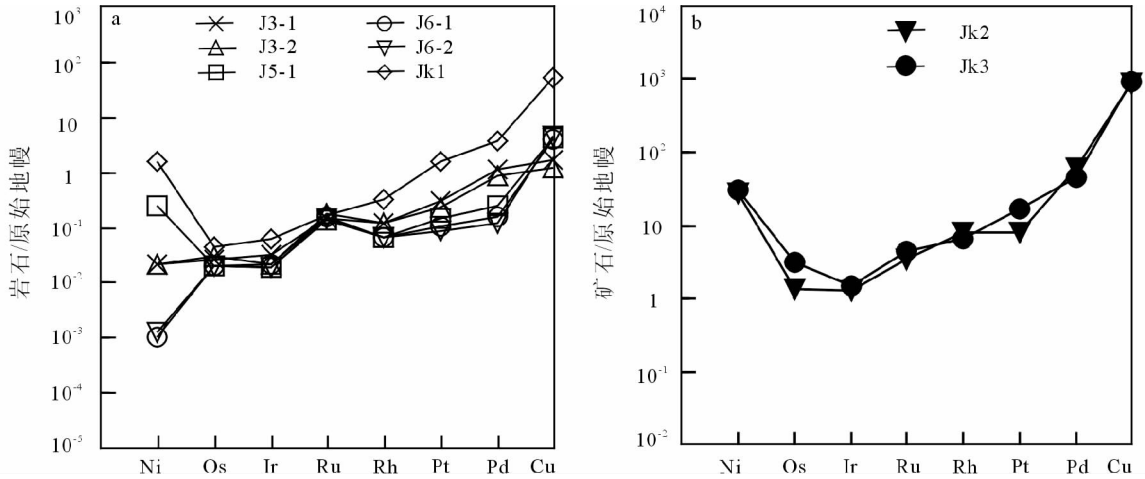


图4 葫芦铜镍矿床岩石(a)、矿石(b) PGE 原始地幔标准化分布模式图(原始地幔 PGE 数据采用 McDonough and Sun, 1995)

Fig. 4 Mantle-normalized plots of different types of rocks (a) and sulfide ores (b) of Hulu Cu-Ni deposit (primary mantle data after McDonough and Sun, 1995)

表3 东天山地区主要镁铁质-超镁铁质岩体年龄数据

Table 3 Geochronological data of the mainly mafic-ultramafic intrusions in East Tianshan

矿床或岩体名称	构造位置	测试方法和对象	年龄 (Ma)	资料来源
黄山东矿床		Re-Os 等时线, 硫化物矿石	282 ± 20	毛景文等, 2002
黄山东矿床		Re-Os 等时线, 硫化物矿石	284 ± 14	Zhang <i>et al.</i> , 2008
香山矿床		Re-Os 等时线, 硫化物矿石	298 ± 7.1	李月臣等, 2006
葫芦矿床	觉罗塔格构造带	Re-Os 等时线, 硫化物矿石	283 ± 13	陈世平等, 2005
香山矿床		SHRIMP 锆石 U-Pb, 角闪辉长岩	285 ± 1.2	Qin <i>et al.</i> , 2003
黄山东矿床		SHRIMP 锆石 U-Pb, 黑云母橄榄苏长岩	274 ± 3	韩宝福等, 2004
黄山矿床		SHRIMP 锆石 U-Pb, 闪长岩	269 ± 2	Zhou <i>et al.</i> , 2004
葫芦矿床		LA-ICP-MS 锆石 U-Pb, 辉长闪长岩	274.5 ± 3.9	本文

矿床岩体的形成时代,也限制了这些矿床的形成时代,即这些岩体或矿床是在早二叠世很短时限范围内形成的。

已有的研究表明,天山地区在晚石炭世(±320Ma)之后进入后碰撞伸展阶段(赵振华等,2006;吴昌志等,2006;韩宝福等,2006;Zhu *et al.*, 2005, 2006;唐冬梅等,2009)。葫芦铜镍矿床形成于早二叠世(274.5 ± 3.9Ma),为后碰撞伸展环境下,幔源岩浆作用的产物。依据岩石学研究(夏明哲等,2008),其原生岩浆可能与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(韩宝福等,2004);主体为软流圈地幔的物质,在尖晶石稳定域内,经高程度部分熔融,形成了高镁的拉斑玄武质岩浆向上侵位,产生了后碰撞的岩浆作用。

## 5 铂族元素及其成矿作用意义

### 5.1 母岩浆性质

地幔部分熔融可以导致形成的岩浆中 Ni/Cu 比值小于地幔值,而 Pd/Ir 比值高于地幔值(Barnes, 1990)。但是,在

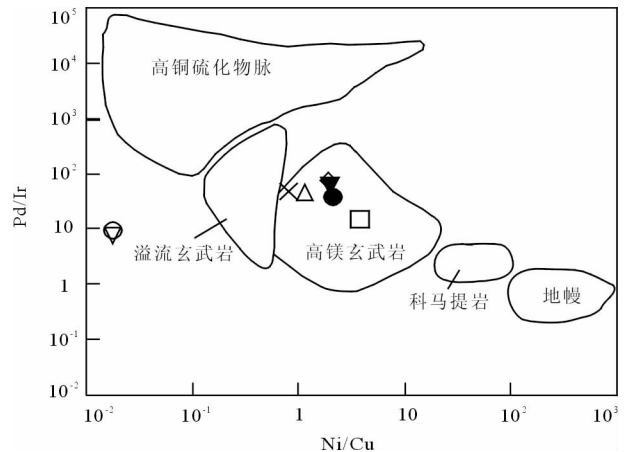


图5 葫芦铜镍矿床岩石和矿石 Ni/Cu-Pd/Ir 关系图(据 Barnes *et al.*, 1988)

图例同图4

Fig. 5 Ratio plots of Ni/Cu vs. Pd/Ir of rocks and ores from Hulu Cu-Ni deposit (after Barnes *et al.*, 1988)

Symbols are the same as those in Fig. 4

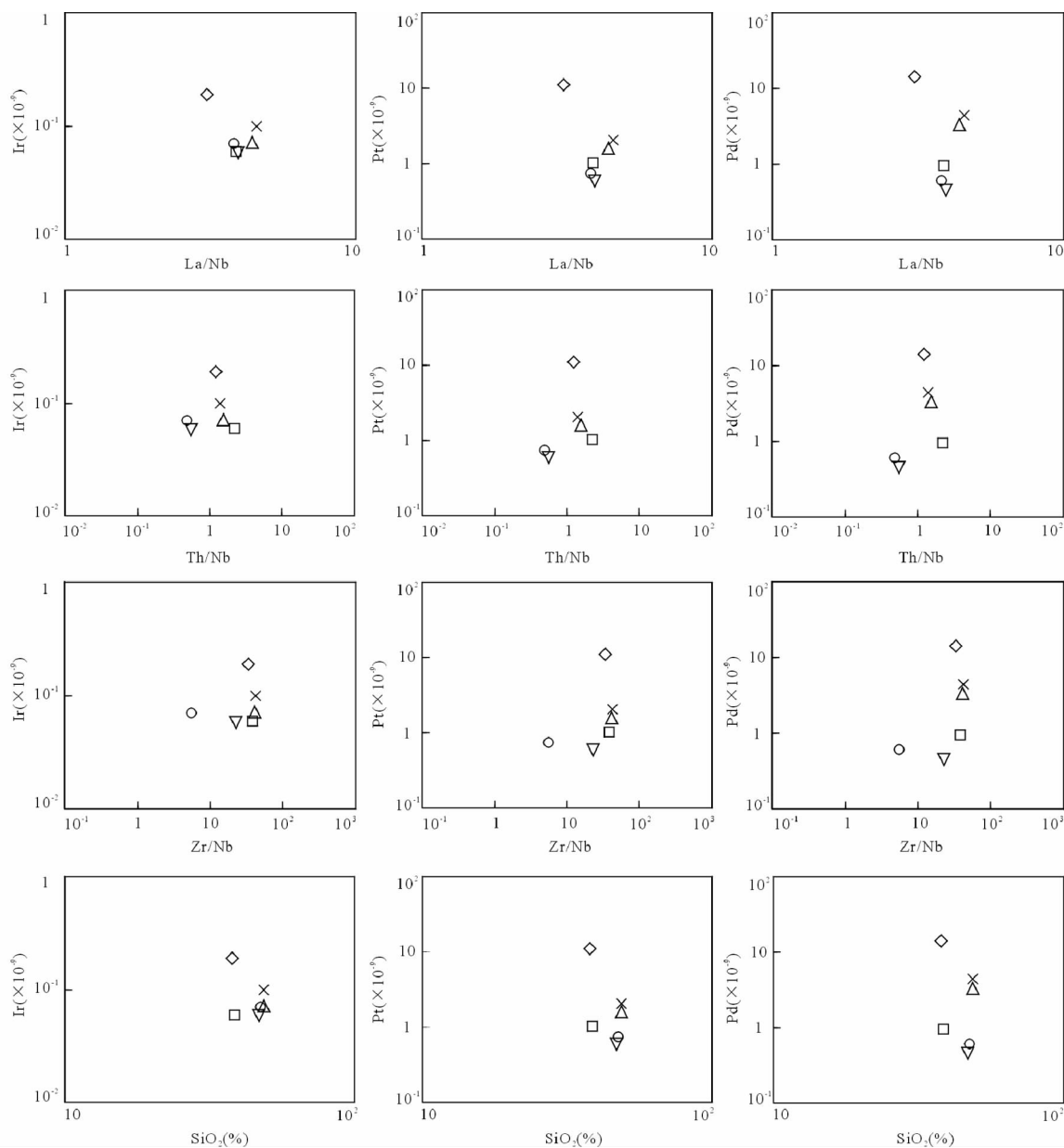


图 6 葫芦铜镍矿床 La/Nb、Th/Nb、Zr/Nb 和 SiO<sub>2</sub> 分别与 Ir、Pt、Pd 的关系图

图例同图 4

Fig. 6 Scattergrams of La/Nb, Th/Nb, Zr/Nb, SiO<sub>2</sub> vs. Ir, Pt and Pd respectively in Hulu Cu-Ni deposit for showing the relationships between PGE-saturation and crustal contamination

Symbols are the same as those in Fig. 4

硫化物/硅酸盐岩浆体系中,硫化物的熔离作用对残余岩浆的 Ni/Cu 比值、Pd/Ir 比值影响不大,故可以用 Ni/Cu 和 Pd/Ir 比值进行投图来指示岩体母岩浆的性质 (Barnes and Lightfoot, 2005)。在 Ni/Cu-Pd/Ir 图解(图 5)中,葫芦矿床的岩石和矿石样品大部分都落入高镁玄武岩区,只有两件辉长闪长岩样品落在其他区域,表明葫芦岩体的母岩浆可能为 MgO 含量较高的玄武岩岩浆。至于原生岩浆性质,夏明哲等 (2008) 利用橄榄石-熔体平衡原理,依据岩体中橄榄石最高

的 Fo = 80 估算,约束的原生岩浆 MgO 含量下限为 7.1%。但是,岩体中 Fo 分子为 80 的橄榄石不能代表与原生岩浆平衡的最初的液相线相。原生岩浆 MgO 含量与 Mg-Fe 在橄榄石-熔体之间的分配系数 ( $K_D(\text{Fe-Mg})^{\text{ol-liq}}$ ) 具有正相关关系,而  $K_D(\text{Fe-Mg})^{\text{ol-liq}}$  一般为  $0.30 \pm 0.03$ ,随着压力的升高,  $K_D(\text{Fe-Mg})^{\text{ol-liq}}$  值将会增大 (Ulmer, 1989); 如果岩浆在相平衡时的压力大于 2.3GPa 时,  $K_D(\text{Fe-Mg})^{\text{ol-liq}}$  值将会达到 0.35 (Putirka, 2005)。所以, MgO = 7.1% 的岩浆不能代表原生岩

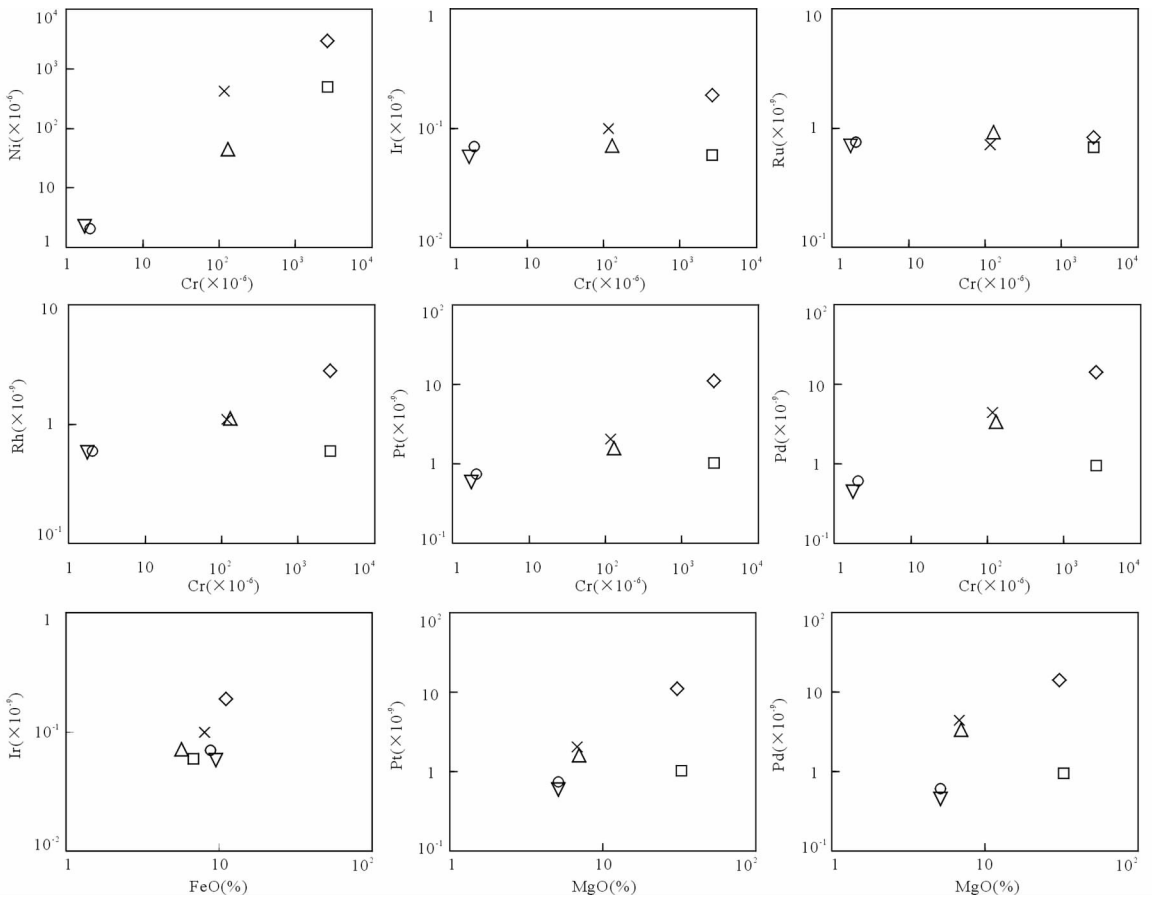


图7 葫芦岩体 Cr 与 Ni、Ir、Ru、Rh、Pt、Pd 和 FeO 与 Ir 以及 MgO 与 Pt、Pd 关系图

图例同图4

Fig. 7 Diagrams of Cr against Ni, Ir, Ru, Rh, Pt, Pd, and FeO vs. Ir and MgO against Pt, Pd in Hulu intrusion for fractional crystallization processes

Symbols are the same as those in Fig. 4

浆,只能作为原生岩浆 MgO 含量的下限值来参考。孙赫(2009)选取  $F_0 = 86$  的橄榄石利用质量平衡定量估算出原始岩浆中的  $MgO = 11\%$ ,属于高镁玄武岩浆。

由上述分析,引起该矿床 PGE 明显亏损的原因,是原生岩浆本身 PGE 亏损,还是母岩浆演化的深部地质过程所致,需要进一步探讨。但根据矿石 Cu/Pd 比值  $114.67 \times 10^3 \sim 157.42 \times 10^3$  (平均  $136.05 \times 10^3$ ) 和岩石 Cu/Pd 比值  $11.07 \times 10^3 \sim 294.35 \times 10^3$  (平均  $125.48 \times 10^3$ ) (表2),二者都高于原始地幔的 Cu/Pd 比值 ( $7.69 \times 10^3$ ) (McDonough and Sun, 1995)。PGE 在硫化物/硅酸盐熔体间的分配系数为 20000,远大于 Cu 的分配系数 1000 (Francis, 1990; Fleet *et al.*, 1993, 1996),因此若早期岩浆经历过 S 饱和,则硫化物熔离可使 Pd 相对于 Cu 更多被带走,剩余岩浆 Cu/Pd 值将明显增高,并高于相应的原始地幔值。于此推断,在葫芦矿床成矿母岩浆演化过程中经历了深部硫化物部分熔离的过程,这可能是导致该矿床 PGE 明显亏损的原因之一。

## 5.2 硫化物熔离成矿作用

在图6中,葫芦岩体的 Ir、Pt、Pd 含量分别随着 La/Nb 比值和  $SiO_2$  含量的增加而迅速降低,与 Th/Nb、Zr/Nb 的相关性一般;通过计算,La/Nb 与 Ir、Pt、Pd 相关系数平均为  $-0.7$ , $SiO_2$  与 Ir、Pt、Pd 相关系数平均为  $-0.6$ 。通常在幔源岩浆上升过程中,地壳物质的加入往往会增加岩浆的  $SiO_2$ 、 $K_2O$  和 Zr、Hf、Th、Cs、Rb、Ba 等大离子亲石元素的丰度,同时会升高 La/Nb、Th/Nb 和 Rb/Nb 比值,降低 Ti/Yb 和 Ce/Pb 比值 (Mecdonald *et al.*, 2001; Barker *et al.*, 1997; Campbell and Griffiths, 1993)。可见,葫芦岩体的 PGE 含量随 La/Nb 比值以及  $SiO_2$  含量的增加而降低可能与地壳物质的加入有关。已有的岩石地球化学资料和 Re-Os 同位素资料表明葫芦岩体在岩浆演化或成矿过程中有地壳物质的混染(夏明哲等,2008)。另外,葫芦岩体的  $\delta^{34}S$  值为  $1.455\% \sim 4.867\%$  (孙赫,2009),也显示了有地壳 S 的加入。

PPGE 在岩浆结晶分异过程中表现为不相容元素的性质



(Barnes *et al.*, 1985; Keays, 1995), 基本不进入橄榄石、辉石等矿物相, 而硫化物熔离作用却可以导致岩浆中 PGE 含量的降低。在图 7 中, 除 Ir、Ru 与 Cr 的相关性不是很明显外, 其他 PGE 和 Ni 都与 Cr 具有较好的正相关关系; 同时, Ir 与 FeO 以及 Pt、Pd 与 MgO 含量均具有正相关关系。据此, 结合葫芦矿床母岩浆在演化过程中主要发生了橄榄石和斜方辉石的分离结晶/堆晶作用(夏明哲等, 2008), 以及 PGE 具有非常强的亲硫性推断, 母岩浆由于橄榄石、辉石以及铬铁矿的分离结晶作用, 可能是导致该矿床硫化物发生熔离作用的重要因素。

已有研究显示, 岩浆中硫的溶解度与 FeO 含量成正比, 与 SiO<sub>2</sub> 含量成反比(Irvine, 1975; Lightfoot and Hawkesworth, 1997; 朱永峰, 1998)。可见, 葫芦岩体由于橄榄石、辉石等矿物的结晶/堆晶作用以及地壳物质(如 SiO<sub>2</sub>、S 等)的加入, 可以引起岩浆中 SiO<sub>2</sub> 含量的升高和 FeO 含量降低, 从而使得岩浆中硫的溶解度降低, 促使硫饱和并发生熔离作用而成矿。

## 6 结论

东天山葫芦镁铁质-超镁铁质岩体形成年龄为  $274.5 \pm 3.9$  Ma, 是后碰撞伸展环境的产物。原生岩浆主要来源于亏损的软流圈地幔, 经高程度部分熔融形成的高镁玄武质岩浆。在岩浆演化、侵位过程中, 曾发生了地壳物质的混染(如 SiO<sub>2</sub>、S 等的加入)和橄榄石、辉石等矿物的结晶/堆晶作用, 使硫化物达到饱和并熔离成矿。

**致谢** 感谢秦克章研究员的细心审稿并提出宝贵的修改意见; 本文野外工作及研究中得到了新疆有色地勘局 704 大队的惠卫东、三金柱总工和新疆地矿局六大队程松林、邓刚总工的大力支持; 西北大学大陆动力学国家重点实验室的柳小明教授及第五春荣博士等在 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试中给予了热情指导。在此一并致谢。

## References

Bai YL. 2000. Geotectonic settings of Huangshan-Jingerquan nickel-copper metallogenic system in Hami, Xinjiang. *Acta Geologica Gansu*, 9(2): 1-7 (in Chinese with English abstract)

Barker JA, Menzies MA, Thirlwall MF and Macpherson CG. 1997. Petrogenesis of Quaternary intraplate volcanism Sana'a Yemen: Implication and polybaric melt hybridization. *Journal of Petrology*, 38:1359-1390

Barnes SJ, Naldrett AJ and Gorton MP. 1985. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas. *Chem. Geol.*, 53:303-323

Barnes SJ, Boyd R, Komeliusson A, Nilsson LP, Often M, Pedersen RB and Robins B. 1988. The use of mantle normalization and metal ratios in discriminating between the effects of partial melting, crystal fractionation and sulphide segregation on platinum-group elements, gold, nickel and copper: Examples from Norway. In: Prichard HM,

Potts PJ, Bowles JFW and Cribb SJ (eds.). *GeoPlatinum-87*. London: Elsevier, 113-143

Barnes SJ. 1990. The use of metal ratios in prospecting for platinum group element deposit in mafic and ultramafic intrusion. *Journal of Geochemical Exploration*, 37(1):91-99

Barnes SJ and Lightfoot PC. 2005. Formation of magmatic nickel sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum-group element contents. In: Hedenquist JW, Thompson JFH, Goldfarb RJ and Richards JP (eds.). *Economic Geology, 100<sup>th</sup> Anniversary Volume*: 179-213

Campbell IH and Griffiths RW. 1993. The evolution of mantle's chemical structure. *Lithos*, 30: 389-399

Chai FM, Zhang ZC, Mao JW, Dong LH, Ye RH, Wu H and Mo XH. 2006. Platinum group elements geochemistry of Baishiquan mafic-ultramafic intrusives in central Tianshan block, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 27(2): 123-128 (in Chinese with English abstract)

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

Fleet ME, Chryssoulis SL, Stone WE and Weisener CG. 1993. Partition of platinum-group elements and Au in the Fe-Ni-Cu-S system: Experiments on the fractional crystallization of sulfide melt. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 115:36-44

Fleet ME, Crocket JH and Stone WE. 1996. Partition of platinum group elements (Os, Ir, Ru, Pt, Pd) and gold between sulfide liquid and basalt melt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(13): 2397-2412

Francis RD. 1990. Sulfide globules in mid-ocean ridge basalts (MORB) and the effect of oxygen abundance in Fe-S-O on the ability of those liquids to partition metals from MORB and komatiitic magmas. *Chemical Geology*, 85:199-213

Han BF, Ji JQ, Song B, Chen LH and Li ZH. 2004. SHRIMP U-Pb zircon age of the mafic-ultramafic rocks and geological significance in Kalatongke and Huangshan, Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 49(22): 2324-2328 (in Chinese)

Han BF, Ji JQ, Song B, Chen LH and Zhang L. 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Time of post-collisional plutonism. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1077-1086 (in Chinese with English abstract)

He GQ, Li MS, Liu DQ *et al.* 1994. Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization in Xinjiang of China. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 1-437 (in Chinese)

Hu SX, Guo JC, Gu LX *et al.* 1990. Important role and geological characteristics of Caledonian orogenic belt in Tianshan tectonics frame. *Geology Science of Xinjiang*, 1:32-46 (in Chinese with English abstract)

Irvine TN. 1975. Crystallization sequences of the Muskox intrusion and other layered intrusions: II. Origin of chromitite layers and similar deposits of other magmatic ores. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 39: 991-1020

Keays RR. 1995. The role of komatiitic and picritic magmatism and saturation in the formation of the ore deposits. *Lithos*, 34:1-18

Li YC, Zhao GC, Qu WJ, Pan CZ, Mao QG and Du AD. 2006. Re-Os isotope dating of Xiangshan deposit, East Tianshan, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 245-251 (in Chinese with English abstract)

Lightfoot PC and Hawkesworth CJ. 1997. Flood basalts and magmatic Ni, Cu and PGE sulphide mineralization: Comparative geochemistry of the Noril'sk (Siberian Trap) and West Greenland Sequences. In: Mahoney JJ and Coffin MF (eds.). *Large Igneous Province*. Washington DC, American Geophysical Union; 357-380

Liu DQ. 1983. Plate tectonic and distribution of mineral resources. *Northwestern Geology*, 4(2): 1-12 (in Chinese with English abstract)

Mao JW, Yang JM, Qu WJ, Du AD, Wang ZL and Han CM. 2002. Re-

- Os dating of Cu-Ni sulfide ores from Huangshandong deposit in Xinjiang and its geodynamic significance. *Mineral Deposits*, 21(4): 323–330 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Pirajno F, Zhang ZH *et al.* 2008. A review of the Cu-Ni sulphide deposits in the Chinese Tianshan and Altay orogens (Xinjiang Autonomous Region, NW China) principal characteristics and ore-forming processes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32: 184–203
- McDonough WW and Sun SS. 1995. The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, 120: 223–253
- Mecdonald R, Rogers NW, Fitton JG *et al.* 2001. Plume-lithosphere interactions in the generation of the basalts of the Kenya Rift, East Africa. *Journal of Petrology*, 42: 877–900
- Putirka KD. 2005. Mantle potential temperatures at Hawaii, Iceland, and themid-ocean ridge system, as inferred from olivine phenocrysts: Evidence for thermally driven mantle plume. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 6: Q05L08. doi:10.1029/2005GC000915
- Qian ZZ, Wang JZ, Jiang CY, Jiao JG, Yan HQ, He K and Sun T. 2009a. Geochemistry characters of platinum-group elements and its significances on the process of mineralization in the Kalatongke Cu-Ni sulfide deposit, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 832–844 (in Chinese with English abstract)
- Qian ZZ, Sun T, Tang ZL, Jiang CY, He K, Xia MZ and Wang JZ. 2009b. Platinum group elements geochemistry and its significances of the Huangshandong Ni-Cu sulfide deposit, East Tianshan, China. *Geological Review*, 55(6): 873–884 (in Chinese with English abstract)
- Qin KZ, Fang TH, Wang SL, Zhu BQ, Feng YM, Yu HF and Xiu QY. 2002. Plate tectonics division and metallogenic settings in East Tianshan Mountains, NW-China. *Xinjiang Geology*, 20(4): 302–308 (in Chinese with English abstract)
- Qin KZ, Zhang LC and Xiao WJ. 2003. Overview of major Au, Cu, Ni and Fe deposits and metallogenic evolution of the eastern Tianshan Mountains, Northwestern China. In: Mao, Goldfarb and Seltman (eds.). *Tectonic evolution and metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan*. London, 227–249
- Song XY and Li XR. 2008. Geochemistry of the Kalatongke Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, NW China: Implications for the formation of magmatic sulfide mineralization in a post-collisional environment. *Mineral Deposita*, 303–327
- Sun H, Qin KZ, Li JX, Tang DM, Fan X and Xiao QH. 2008a. Constraint of mantle partial melting on PGE mineralization of mafic-ultramafic intrusions in eastern Tianshan; Case study on Tulargen and Xiangshan Cu-Ni deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 1079–1086 (in Chinese with English abstract)
- Sun H. 2009. Ore-forming mechanism in conduit system and ore-forming potential evaluation of mafic-ultramafic complexes of eastern Tianshan, Xinjiang. Ph. D. Dissertation. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 1–262 (in Chinese with English summary)
- Sun YL, Guan XY and Du AD. 1998. Determination of platinum group elements by inductively coupled plasma-mass spectrometry combined with nickel sulfide fire assay and tellurium coprecipitation. *Spectrochimica Acta (Part b-Atomic Spectroscopy)*, 53: 1463–1467
- Sun YL and Sun M. 2005. Nickel sulfide fire assay improved for pre-concentration of platinum group elements in geological samples: A practical means of ultra-trace analysis combined with inductively coupled plasma-mass spectrometry. *The Analyst*, 130: 664–669
- Tang DM, Qin KZ, Sun H, Su BX, Xiao QH, Cheng SL and Li J. 2009. Lithological, chronological and geochemical characteristics of Tianyu Cu-Ni deposit: Constraints on source and genesis of mafic-ultramafic intrusions in eastern Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 817–831 (in Chinese with English abstract)
- Ulmer P. 1989. The dependence of the Fe<sup>2+</sup>-Mg cation-partitioning between olivine and basaltic liquid on pressure, temperature and composition. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 101: 261–273
- Wang DH, Chen YC, Xu ZG and Lin WW. 2002. Cu-Ni-(PGE) sulfide metallogenic series in north Xinjiang. *Mineral Deposits*, 19(2): 147–155 (in Chinese with English abstract)
- Wu CZ, Zhang ZZ, Khin Z, Fernando DP, Tang JH, Zheng YC, Wang CS and San JZ. 2006. Geochronology, geochemistry and tectonic significances of the Hongyuntan granitoids in the Qoltag area, East Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1121–1134 (in Chinese with English abstract)
- Xia MZ, Jiang CY, Qian ZZ, Sun T, Xia ZD and Lu RH. 2008. Geochemistry and petrogenesis for Hulu intrusion in East Tianshan, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2749–2760 (in Chinese with English abstract)
- Xiao QH, Qin KZ, Tang DM, Su BX, Sun H, San JZ, Cao MJ and Hui WD. 2010. Xiangshanxi composite Cu-Ni—Ti-Fe deposit belongs to comagmatic evolution product: Evidences from ore microscopy, zircon U-Pb chronology and petrological geochemistry, Hami, Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 503–522 (in Chinese with English abstract)
- Xiao WJ, Zhang LC, Qin KZ *et al.* 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implication for the continental growth of central Asia. *American Journal of Science*, 304: 370–395
- Yuan HL, Wu Fy, Gao S, Liu XM, Xu P and Sun DY. 2003. Determination of U-Pb age and rare earth element concentrations of zircons from Cenozoic intrusions in northeastern China by laser ablation ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 48(14): 2411–2420
- Zhang ZH, Mao JW, Du AD, Franco Pirajno, Wang ZL, Chai FM, Zhang ZC and Yang JM. 2008. Re-Os dating of two Cu-Ni sulfide deposits in northern Xinjiang, NW China and its geological significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32: 204–217
- Zhao ZH, Wang Q, Xiong XL, Zhang HX, Niu HC, Xu JF, Bai ZH and Qiao YL. 2006. Two types of adakites in north Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1249–1265 (in Chinese with English abstract)
- Zhou MF, Leshner M, Yang ZX, Li JW and Sun M. 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, eastern Xinjiang, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt. *Chemical Geology*, 209: 233–257
- Zhu YF. 1998. Review of the solubility behavior of sulfur in magmatic melt. *Geological Science and Technology Formation*, 17(2): 35–38 (in Chinese with English abstract)
- Zhu YF, Zhang LF, Gu LB *et al.* 2005. The zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in western Tianshan Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 50: 2201–2212
- Zhu YF, Guo X, Zhang LF and Song B. 2006. Geochemistry and zircon SHRIMP dating on the Late Paleozoic volcanic rocks in west Tianshan Mountains (Central Asia, Xinjiang). *Geochim. Cosmochim. Acta, (Suppl.)*: A755

### 附中文参考文献

- 白云来. 2000. 新疆哈密黄山-镜尔泉铜镍成矿体系的地质构造背景. *甘肃地质学报*, 9(2): 1–7
- 柴凤梅, 张招崇, 毛景文, 董连慧, 叶会寿, 吴华, 莫新华. 2006. 新疆哈密白石泉含铜镍镁铁-超镁铁质岩体铂族元素特征. *地球学报*, 27(2): 123–128
- 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
- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 陈立辉, 李宗怀. 2004. 新疆喀拉通克和山东含铜镍矿镁铁-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(22): 2324–2328
- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 陈立辉, 张磊. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆

- 壳垂向增长( I ):后碰撞深成岩浆活动的时限. 岩石学报, 22(5):1077-1086
- 何国琦, 李茂松, 刘德权等. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1-437
- 胡受奚, 郭继春, 顾连兴等. 1990. 加里东造山带在天山构造格架中的主要地位及其构造地质特征. 新疆地质科学, 1:32-46
- 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(2):1-12
- 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(4):323-330
- 钱壮志, 王建中, 姜常义, 焦建刚, 闫海卿, 何克, 孙涛. 2009a. 喀拉通克铜镍矿床钼族元素地球化学特征及其成矿作用意义. 岩石学报, 25(4):832-844
- 钱壮志, 孙涛, 汤中立, 姜常义, 何克, 夏明哲, 王建中. 2009b. 东天山黄山东铜镍矿床钼族元素地球化学特征及其意义. 地质论评, 55(6):873-884
- 秦克章, 方同辉, 王书来, 朱宝清, 冯益民, 于海峰. 2002. 东天山古生代板块构造分区、演化与成矿地质背景研究. 新疆地质, 20(4): 302-308
- 孙赫, 秦克章, 李金祥, 唐冬梅, 范新, 肖庆华. 2008. 地幔部分熔融程度对东天山镁铁质-超镁铁质岩钼族元素矿化的约束——以图拉尔根和香山铜镍矿为例. 岩石学报, 24(5):1079-1086
- 孙赫. 2009. 东天山镁铁-超镁铁岩铜镍硫化物矿床通道式成矿机制与岩体含矿性评价研究. 博士学位论文. 北京:中国科学院地质与地球物理研究所, 1-262
- 唐冬梅, 秦克章, 孙赫, 苏本勋, 肖庆华, 程松林, 李军. 2009. 天宇铜镍矿床的岩相学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征:对东疆镁铁-超镁铁质岩体源区和成因的制约. 岩石学报, 25(4):817-831
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚等. 2002. 新疆北部 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床成矿系列探讨. 矿床地质, 19(2):147-154
- 吴昌志, 张遵忠, Khin Z, Fernando DP, 唐俊华, 郑远川, 汪传胜, 三金柱. 2006. 东天山觉罗塔格红云滩花岗岩年代学、地球化学及其构造意义. 岩石学报, 22(5):1121-1134
- 夏明哲, 姜常义, 钱壮志, 孙涛, 夏昭德, 卢荣辉. 2008. 新疆东天山葫芦岩体岩石学与地球化学研究. 岩石学报, 24(12):2749-2760
- 肖庆华, 秦克章, 唐冬梅, 苏本勋, 孙赫, 三金柱, 惠卫东, 曹明坚. 2010. 新疆哈密香山西铜镍-钛铁矿床系同源岩浆分异演化产物——矿相学、锆石 U-Pb 年代学及岩石地球化学证据. 岩石学报, 26(2):503-522
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 柳小明, 徐平, 孙德有. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析. 科学通报, 48(14):1511-1520
- 赵振华, 王强, 熊小林, 张海祥, 牛贺才, 许继峰, 白正华, 乔玉楼. 2006. 新疆北部的两类埃达克岩. 岩石学报, 22(5):1249-1265
- 朱永峰. 1998. 硫在岩浆熔体中的溶解行为综述. 地质科技情报, 17(2):35-38