

王亚磊, 张照伟, 尤敏鑫, 等. 东天山白鑫滩铜镍矿锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及对 Ni-Cu 找矿的启示[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 452-467.

Wang Yalei, Zhang Zhaowei, You Minxin, et al. Chronological and geochemical characteristics of the Baixintan Ni-Cu deposit in Eastern Tianshan Mountains, Xinjiang, and their implications for Ni-Cu mineralization[J]. Geology in China, 2015, 42(3): 452-467(in Chinese with English abstract).

## 东天山白鑫滩铜镍矿锆石 U-Pb 年代学、 地球化学特征及对 Ni-Cu 找矿的启示

王亚磊<sup>1</sup> 张照伟<sup>1</sup> 尤敏鑫<sup>1</sup> 李 鑫<sup>2</sup> 李 侃<sup>1</sup> 王博林<sup>1</sup>

(1. 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室 西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;

2. 新疆地质矿产勘查开发局第一区域地质调查大队, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:**白鑫滩铜镍矿床位于觉罗塔格构造岩浆带内, 岩体走向受大草滩断裂控制, 目前矿床规模达中型。含矿岩体侵入于中奥陶统恰干布拉克组, 直接围岩为英安岩和火山角砾凝灰岩, 主要岩石类型为辉长岩、橄榄辉石岩和辉石橄榄岩, 岩石由中心向两侧基性程度逐渐降低, 岩体产状平缓, 主要赋矿岩相为辉石橄榄岩相, 矿体多呈似层状或透镜状。含长辉石橄榄岩中锆石 La-ICP-MS U-Pb 定年结果为(277.9±2.6) Ma, 表明岩体形成于早二叠纪。以 24 号勘探线为界, 岩体西段矿石 Cu/Ni 比值普遍高于岩体东段矿石。样品中 MgO 与 FeO<sup>T</sup> 呈正相关关系, 与 CaO、SiO<sub>2</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 呈负相关关系, 样品 m/f 值为 2.43~3.9, 为铁质系列超镁铁岩, 有利于铜镍矿的形成; 样品稀土元素配分型式为轻稀土略富集的右倾型, 轻、重稀土元素之间分馏程度较弱, 具有弱的负 Eu 异常; 富集大离子亲石元素, 而相对亏损高场强元素, 有明显的 Nb、Ta 负异常。岩浆演化过程中主要发生了橄榄石和辉石的分离结晶/堆晶作用, 并遭受了少量中-下地壳物质混染, 岩浆源区遭受了明显的俯冲流体交代作用。白鑫滩矿床形成时代及构造背景与黄山东、黄山、香山等典型矿床一致, 是图拉尔根—黄山东—土墩铜镍矿带的西延部分, 该铜镍矿带向西仍有较大的铜镍找矿潜力, 大草滩断裂可能也是该区重要的控岩控矿断裂。

**关键词:**白鑫滩铜镍矿床; 锆石 U-Pb 年代学; 岩浆源区; 岩浆演化; 找矿潜力

中图分类号: P618.41; P618.63 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)03-0452-16

## Chronological and geochemical characteristics of the Baixintan Ni-Cu deposit in Eastern Tianshan Mountains, Xinjiang, and their implications for Ni-Cu mineralization

WANG Ya-lei<sup>1</sup>, ZHANG Zhao-wei<sup>1</sup>, YOU Min-xin<sup>1</sup>, LI Xin<sup>2</sup>, LI Kan<sup>1</sup>, WANG Bo-lin<sup>1</sup>

(1. MLR Key Laboratory of Genesis and Exploration of Magmatic Ore Deposits, Xi'an Center of Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. No. 1 Regional Geological Survey Party of Xinjiang Geology and Mineral Development Center, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

收稿日期: 2015-01-28; 改回日期: 2015-03-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41302052)和中国地质调查局项目(12120114044401)联合资助。

作者简介: 王亚磊, 男, 1986 年生, 硕士, 助理研究员, 主要从事岩浆矿床成矿与找矿研究; E-mail: wangyalei1986@126.com。

**Abstract:** The medium-sized Baixintan Ni-Cu deposit is located at northern Dacacotan fracture, Eastern Tianshan Mountains. The intrusion is emplaced in middle Ordovician Qiaganbulake Group, and the direct country rocks are dacite and tuff. The Baixintan deposit mainly consists of gabbro, olivine pyroxenite and wehrlite, with wehrlite being the main ore-bearing rock type. Orebodies are mostly in bedded or lenticular form. From the center outwards the basicity shows a decreasing trend. Zircon U-Pb La-ICP-MS age of plagioclase-bearing wehrlite is  $(277.9 \pm 2.6)$  Ma, suggesting Early Permian. With No. 24 exploration line as the dividing line, the Cu/Ni ratio of western orebody is higher than that of the eastern orebody. The values of MgO and  $FeO^T$  show positive correlation, and there is a negative relationship between MgO and  $SiO_2$ , CaO and  $TiO_2$ . The m/f ratio is between 2.43 and 3.9, belonging to the iron series ultramafic rocks. Chondrite-normalized REE patterns show LREE enrichment and negative or no Eu anomaly. The rocks are enriched in LILE and depleted in HFSE (Nb, Ta). The fractionation crystallization/cumulation was dominated by olivine and pyroxenes in the process of magmatic evolution. The geochemical features of analyzed rocks indicate that the parental magma of the rocks experienced weak contamination by middle-lower crust components during its upward migration. The magma source was metasomatized by subduction fluid. The chronological and geochemical characteristics, together with regional evolution history of Eastern Tianshan area, indicate that the Baixintan Cu-Ni deposit might be the product of post-collision extension and mantle plume activities. There is still huge potential for Cu-Ni mineralization on the western side of the Huangshandong-Jingerquan-Tulargen Cu-Ni ore belt. The Dacacotan fracture may be another main structure which controls the mafic intrusion and the Ni-Cu deposit.

**Key words:** Baixintan Ni-Cu deposit; zircon U-Pb dating; magma source; magmatic evolution; prospecting potential

**About the first author:** WANG Ya-lei, male, born in 1986, assistant researcher, engages in the study of magmatic metallogenesis and prognosis; E-mail: wangyalei1986@126.com.

## 1 引言

新疆东天山觉罗塔格构造岩浆带位于中亚造山带东段,区内岩浆岩非常发育,是中国镍资源的主要产地之一<sup>[1]</sup>,由东向西依次有图拉尔根、葫芦、黄山东、黄山、香山和土墩等铜镍矿床,其中图拉尔根、黄山东和黄山矿床规模达到大型,初步测算该区已探明镍金属量超过100万t。前人对该区典型

铜镍矿床的形成时代、构造背景、成矿作用过程等进行了系统的研究<sup>[2-9]</sup>,认为该区仍有巨大的铜镍矿成矿潜力<sup>[10-11]</sup>,近几年不断有新的矿床和含矿岩体被发现,如位于图拉尔根以东的圪塔山口矿床<sup>[12]</sup>和红石岗北矿化岩体。上述这些典型矿床都位于库姆塔格沙垅以东(图1),近几年对沙垅以西的恰塔尔塔格和大草滩岩体开展了勘查工作,但未发现有经济价值的铜镍矿体,因此产生了是否有必要继续

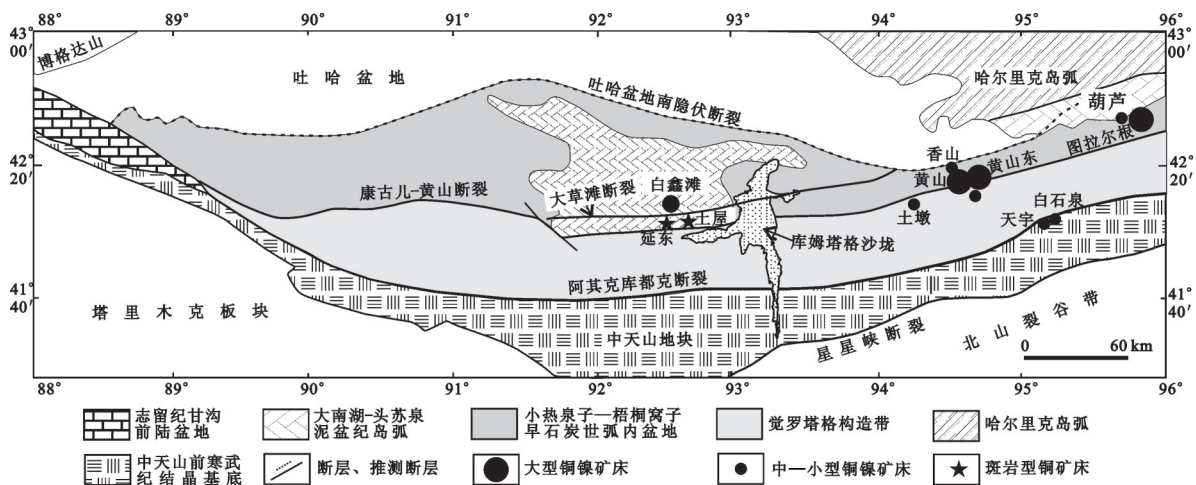


图1 东天山区域地质简图(据文献[6,8]补充修改)

Fig.1 Regional geological map of Eastern Tianshan Mountains (modified after references [6, 8])

在沙垅以西寻找铜镍矿的质疑。

白鑫滩铜镍矿床位于库姆塔格沙垅以西,土屋-延东斑岩型铜矿北侧,是新疆地质矿产勘查局第一区域地质调查队于2012年在检查1:25万五堡幅区域化探Ni-Cu-Cr-Co异常基础上,进一步开展1:5万地球化学土壤测量时发现的,矿床规模已达中型。目前白鑫滩矿床的研究程度甚低,如该矿床形成于何时?与东天山已发现其他典型铜镍矿床形成时代是否一致?含矿岩体母岩浆上升过程中成矿的主要控制因素是什么?矿床的发现对于区域找矿有何指示意义?针对上述问题,本文对白鑫滩矿床开展了岩相学、锆石U-Pb定年、主量和微量元素等方面的研究工作,厘定了该矿床的形成时代、构造背景和成矿作用过程,为进一步探讨该区的铜镍找矿潜力及方向提供了新的资料。

## 2 岩体地质概况及岩相学特征

### 2.1 岩体地质概况

白鑫滩铜镍矿床位于大南湖一头苏泉泥盆纪岛弧内,大草滩断裂以北(图1),岩体走向受区域构造线方向控制。岩体平面上呈葫芦状,沿走向长约3.1 km,最宽处约760 m,平均宽约600 m,出露面积为2.1 km<sup>2</sup>。岩体地表呈负地形,局部发育球状风化,地表出露的主要岩石类型为辉长岩,经钻探及探槽工程验证,沿岩体走向,向南西方向岩石基性程度变大,主要岩石类型为辉石岩相和橄榄岩相,其中主要赋矿岩性为辉石橄榄岩。矿区围岩地层为中奥陶统恰干布拉克组,岩体直接围岩为英安岩和火山角砾凝灰岩,局部由于热接触变质作用发育角岩化,在西段白鑫滩含矿岩体侵入于二长花岗岩中(图2-a)。地表见有大量的褐铁矿化,黄钾铁矾矿化和孔雀石化,目前地表已圈定11个矿体,其中较大的3条分别为IV、VI和XI号矿体,钻探资料表明深部隐伏矿体与地表矿体相连,矿体多呈似层状或透镜状,产状平缓(图2-b)。矿床主要矿石类型为浸染状矿石,局部见块状矿石,矿石矿物主要为磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿,有少量的紫硫镍矿和方黄铜矿。矿体Ni品位为0.2%~5.45%,平均为0.51%,Cu品位为0.2%~1.54%,平均为0.55%。

### 2.2 岩相学特征

白鑫滩含矿镁铁-超镁铁岩体岩石类型较为简

单,主要为辉长岩、橄榄辉石岩和二辉橄榄岩。各种岩石的岩相学特征如下:

**辉长岩:**浅灰色,半自形粒状结构,块状构造。主要由斜长石和单斜辉石组成;斜长石含量约60%,多呈细小的板条状,少数矿物颗粒较大,有较弱的钠黝帘石化;单斜辉石含量约40%,主要呈短柱状,矿物颗粒大于斜长石;岩石整体较新鲜,蚀变不强(图3-a)。

**橄榄辉石岩:**半自形粒状结构、嵌晶结构、包橄结构、块状构造。主要由辉石、橄榄石组成,含有少量的斜长石及角闪石。橄榄石含量20%~30%,大多数被辉石包裹,矿物颗粒多呈浑圆状和港湾状(图3-b);辉石含量60%~70%,呈自形-半自形短柱状,有单斜辉石和斜方辉石,蚀变较弱,局部角闪石全部交代辉石,形成角闪石包括橄榄石的现象(图3-c);斜长石呈半自形-他形充填于辉石颗粒之间(图3-b)。

**辉石橄榄岩:**半自形粒状结构、嵌晶结构、包橄结构、块状构造。主要有橄榄石、辉石、和少量角闪石及硫化物组成。橄榄石含量50%~70%,粒径为0.2~1.5 mm,表面裂纹发育,蛇纹石化程度较强、沿裂隙有大量粉尘状磁铁矿,堆晶结构和包橄结构发育(图3-d、e、f);辉石含量20%~40%,呈较大的颗粒包裹橄榄石或呈他形粒状充填于橄榄石颗粒之间(图3-d),部分颗粒有较强的次闪石化和透闪石化;局部见后期角闪石交代辉石,硫化物沿橄榄石颗粒边缘分布(图3-f)。

## 3 样品采集及测试方法

岩体地表覆盖严重,仅局部有辉长岩出露,地表辉石岩及橄榄岩相岩石蚀变严重。为保证分析样品尽量新鲜,样品主要采自钻孔ZK6602和ZK0703(图2-a)。用于锆石U-Pb定年的样品取自钻孔ZK0703斜长辉石橄榄岩,岩石具有零星铜镍矿化。进行锆石测年时,选择无明显裂痕及包裹体、震荡环带较清晰的锆石进行定年。锆石U-Pb定年在西安地质调查中心岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成,采用193 nm ArF准分子(excimer)激光器的Geo Las200M剥蚀系统,ICP-MS为Agilent7700,激光束斑直径36 μm,以GJ-1为同位素标样,SRM610为元素含量标样进行校正,普通铅校正依据实测<sup>204</sup>Pb进行校正,数据处理利用

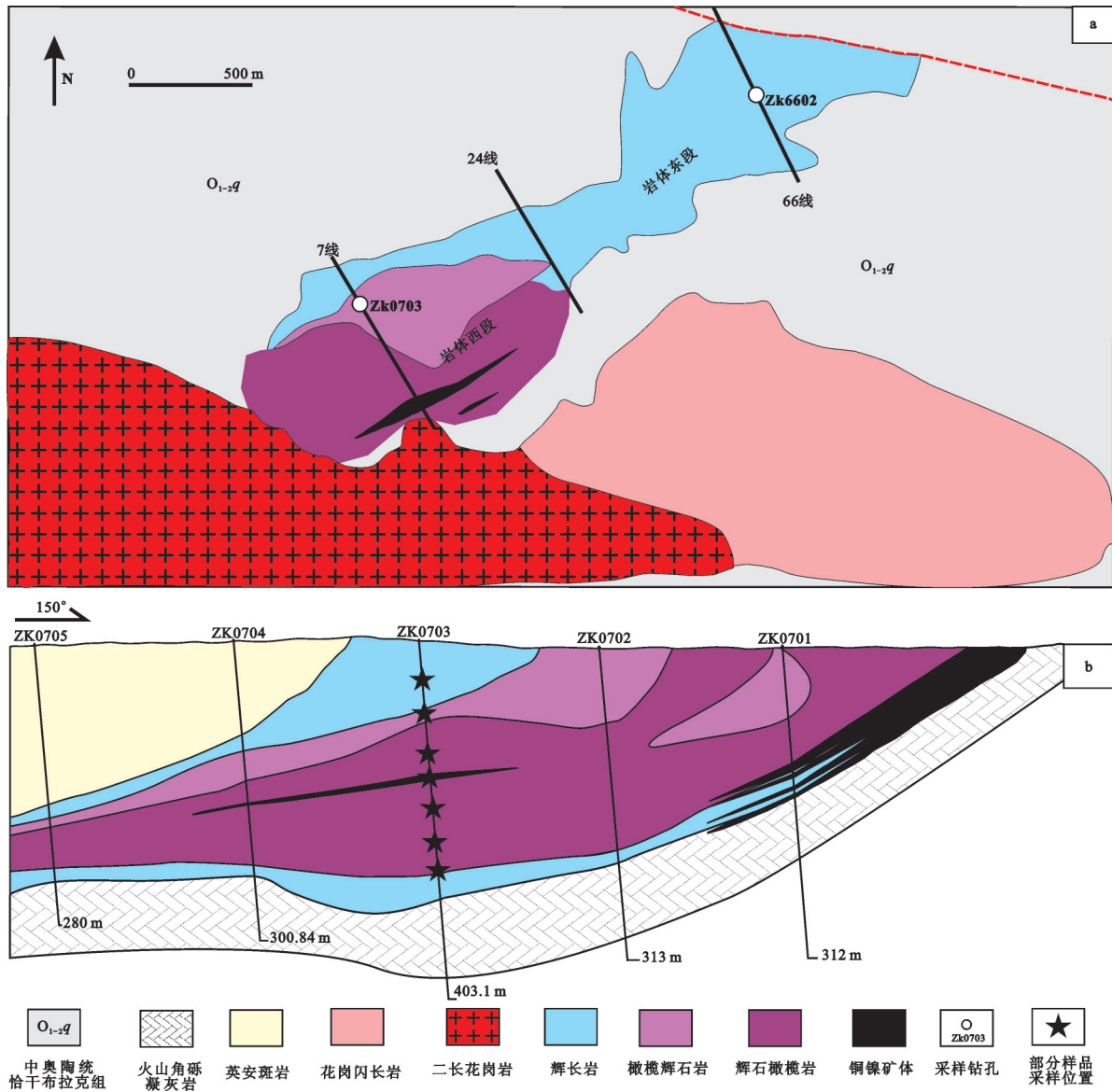


图2 白鑫滩矿床矿区地质简图(a)及7号勘探线剖面图(b)

Fig.2 Simplified geological map of the Baixintan deposit (a) and geological section along No. 7 exploration line (b)

ICPMSDatacal (9.2) 软件, 年龄结果采用 ISOPLOT 程序计算。

主量和微量元素分析均在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。主量元素分析采用 3080E 型 X 荧光光谱仪完成, 分析精度为 1%~5%。微量元素分析采用美国 X-7 型 ICP-MS 测定, 分析精度优于 10%。

## 4 分析结果

### 4.1 Ni、Cu 成矿元素

Ni、Cu 成矿元素数据主要引自矿床勘查过程中

新疆第一区域地质调查大队的分析结果。前已述及, 白鑫滩岩体沿走向呈葫芦状, 为便于对比研究, 以 24 号勘探线为界, 将岩体分为东、西两段。在成矿元素垂向变化图上(图 4), ZK0703 中 Ni、Cu 具有相似的变化趋势, Ni 随深度变化呈明显的中部高而两端低的对称分布特征; ZK6602 中 Ni 含量随深度逐渐变大。对比岩体东、西段之间矿石 Ni、Cu 含量及 Cu/Ni 比值时, 为减小由于分析误差造成的影响, 笔者选择了 Ni 含量大于 0.2% 的样品。图 5 显示在 Ni 品位相同的情况下, 岩体东段部分矿石中 Cu 含量低于岩体西段矿石, 岩体东段矿石 Cu/Ni 比值也

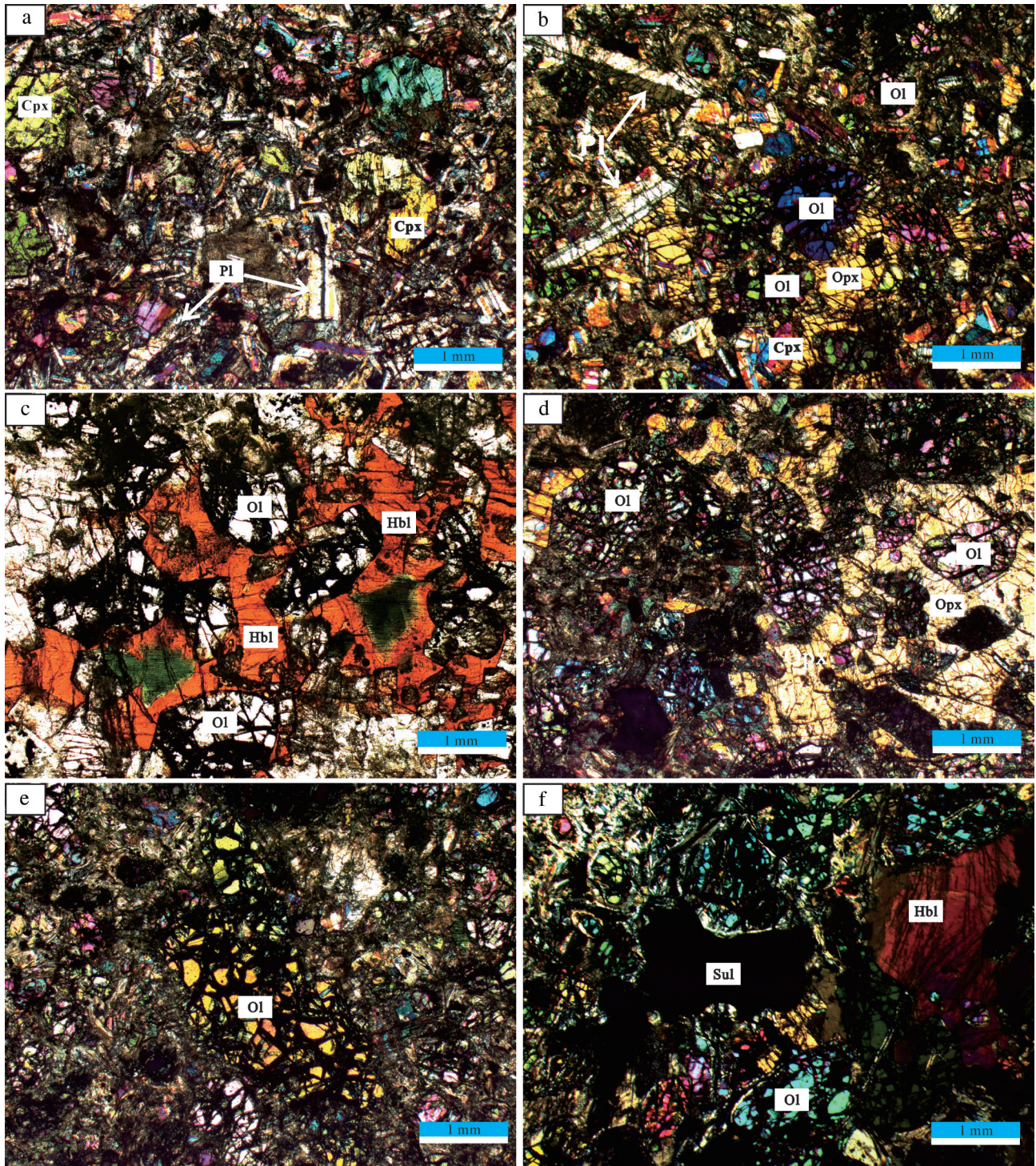


图3 白鑫滩含矿岩体显微照片

Ol—橄榄石; Opx—斜方辉石; Cpx—单斜辉石; Pl—斜长石; Hbl—角闪石; Sul—硫化物

Fig.3 Microphotograph of Baixintan Ni-Cu bearing intrusion

Ol—Olivine; Opx—Orthopyroxene; Cpx—Clinopyroxene; Pl—Plagioclase; Hbl—Hornblende; Sul—Sulfide

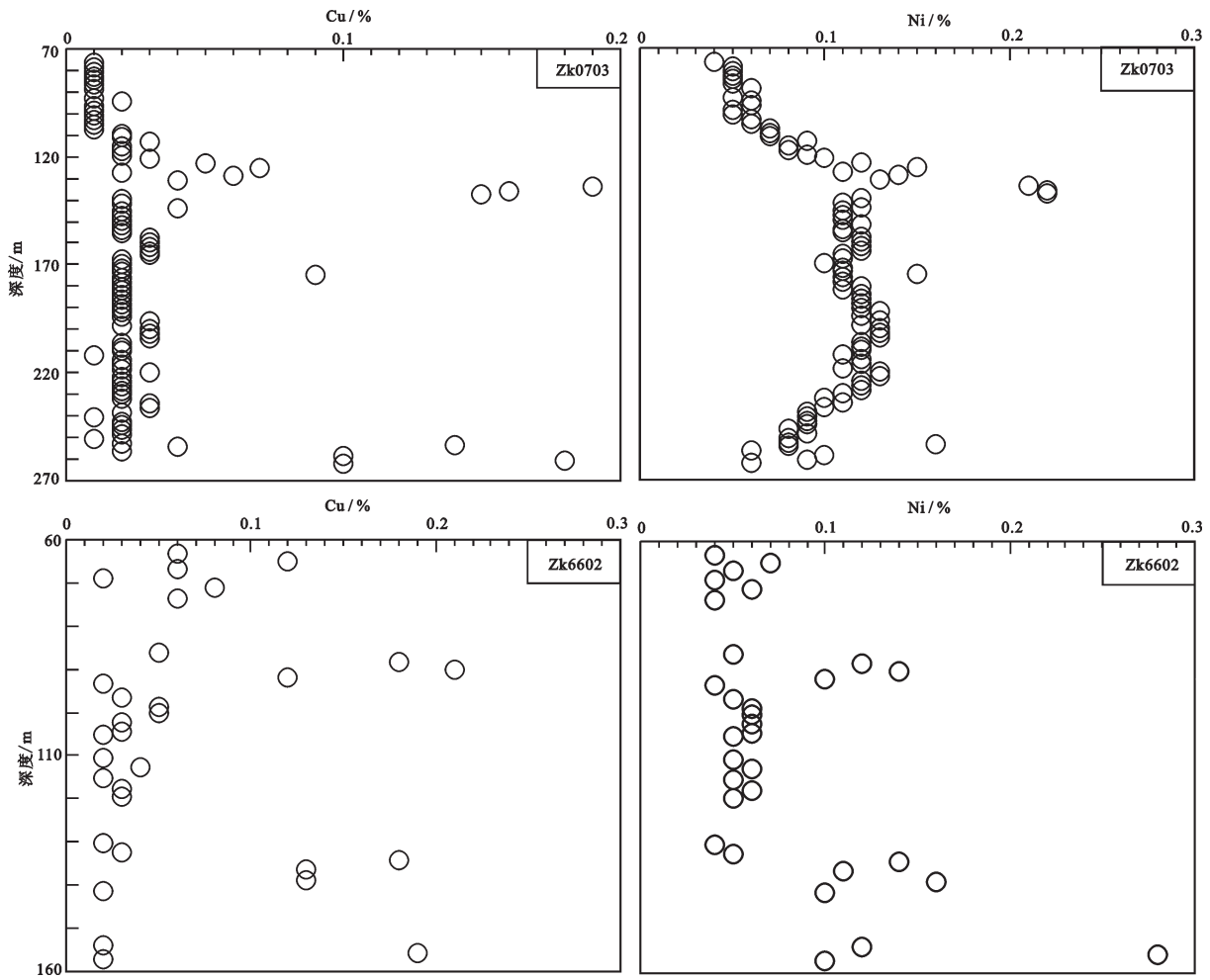


图4 白鑫滩矿床ZK0703和ZK6602垂向上Ni、Cu金属元素变化图

Fig.4 Stratigraphic variations of Ni, Cu values in drill hole ZK0703 and ZK6602 of the Baixintan deposit

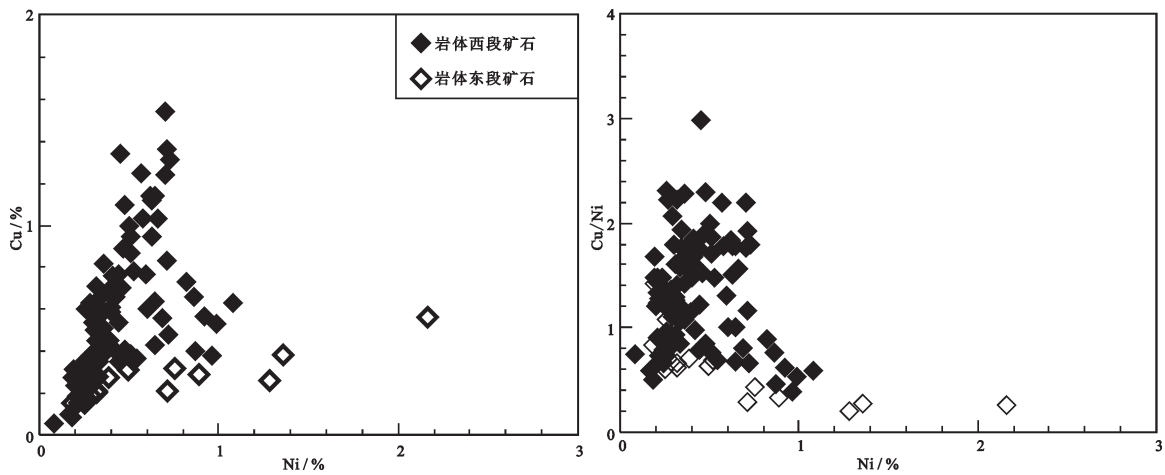


图5 白鑫滩矿床岩体东、西段矿石之间Ni、Cu含量及Ni/Cu比值对比图解

Fig.5 Variations of Ni, Cu values and Ni/Cu ratios for the east and west ore blocks of the Baixintan deposit

相对低于岩体西段矿石。白鑫滩矿床Ni/Cu比值的平均值为1.11,黄山东、黄山、香山和图拉尔根矿床Ni/Cu比值的平均值分别为2.20、1.90、1.71和1.86,白鑫滩矿床矿石的Ni/Cu比值总体较东天山其他典型矿床低。

#### 4.2 锆石U-Pb年龄

白鑫滩岩体的锆石多呈短柱状,长50~100  $\mu\text{m}$ ,无色透明,与大多数镁铁-超镁铁岩体中锆石特征一致,锆石阴极发光显示锆石生长环带不明显(图6)。所测定19个有效点的锆石U、Th含量分别介于 $233\times 10^{-6}$ ~ $3011\times 10^{-6}$ 、 $239\times 10^{-6}$ ~ $7704\times 10^{-6}$ ,Th/U比值为0.36~2.56,多数都大于1,表明锆石为岩浆成因。锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和年龄为 $(276.6\pm 4.4)$  Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(277.9\pm 2.6)$  Ma(图7),与东天山地区黄山东、黄山、香山等典型铜镍矿床及镁铁-超镁铁岩体形成时代一致<sup>[7,12-15]</sup>。

#### 4.3 主量和微量元素

白鑫滩矿床主要岩石类型为辉长岩相、辉石岩相和辉石橄榄岩相,本次分析的17件样品的主量元素数据见表2。样品的 $\text{SiO}_2$ 含量介于40.86%~

49.56%,属碱性-超碱性岩范畴,其余氧化物的变化范围均较大,其中 $\text{FeO}^{\text{T}}$ 含量变化范围为7.47%~17.62%, $\text{MgO}$ 含量变化范围为11.89%~31.63%, $\text{Mg}^{\#}$ 变化范围为0.73~0.81,均大于原始岩浆的 $\text{Mg}^{\#16}$ ,与岩石中普遍存在橄榄石、辉石堆晶有关。样品m/f值变化范围为2.43~3.9,为铁质系列超镁铁岩,有利于形成铜镍矿。样品LOI(烧失量)较高(2.36%~8.92%),表明岩体有一定程度的蚀变。主量元素相关性图解上(图8), $\text{MgO}$ 与 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 和 $\text{TiO}_2$ 之间均呈负相关关系,与 $\text{FeO}^{\text{T}}$ 之间呈正相关关系。

样品的微量元素数据见表2,样品的 $\Sigma\text{REE}$ 含量较低,变化范围为 $25.47\times 10^{-6}$ ~ $60.89\times 10^{-6}$ 。在稀土元素球粒陨石标准化图解上,所有岩石类型的配分曲线型式一致,均呈轻稀土略富集的右倾型,轻、重稀土元素之间的分馏程度较弱,具有较弱的负Eu异常(图9-a)。在微量元素原始地幔标准化图解上(图9-b),所有样品都相对富集大离子亲石元素,相对Th、La具有明显的Nb、Ta负异常,与东天山地区二叠纪典型铜镍矿床及镁铁-超镁铁岩体的微量元素特征相似<sup>[2-3,12-13,17-19]</sup>。

表1 白鑫滩含长辉石橄榄岩锆石La-ICP-MS U-Pb年龄测定结果  
Table 1 La-ICP-MS U-Pb dating results of plagioclase-bearing wehrlite in Baixintan intrusion

分析点号	Th U		Th/U	同位素比值						表面年龄/Ma					
	$10^{-6}$			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$
2	4940	2373	2.08	0.05216	0.00065	0.31818	0.00488	0.04410	0.00068	300.1	27.8	278.2	4.2	280.5	3.8
3	1370	874	1.57	0.05137	0.00145	0.30514	0.01098	0.04279	0.00112	257.5	64.8	270.1	6.9	270.4	8.5
4	4556	1801	2.53	0.05221	0.00221	0.31163	0.00717	0.04357	0.00203	294.5	96.3	274.9	12.5	275.4	5.6
6	255	709	0.36	0.05459	0.00177	0.33967	0.02109	0.04550	0.00281	394.5	78.7	286.8	17.3	296.9	16.0
7	5453	2315	2.36	0.05185	0.00069	0.31641	0.00524	0.04410	0.00069	279.7	26.9	278.2	4.3	279.1	4.0
11	1978	1056	1.87	0.05472	0.00094	0.33624	0.00619	0.04442	0.00087	466.7	38.9	280.2	5.4	294.3	4.7
12	2020	1505	1.34	0.05221	0.00097	0.32322	0.00742	0.04473	0.00108	294.5	47.2	282.1	6.7	284.4	5.7
13	1387	868	1.60	0.05271	0.00145	0.32545	0.01292	0.04453	0.00184	316.7	67.6	280.9	11.3	286.1	9.9
14	2171	1077	2.02	0.05211	0.00107	0.31528	0.00762	0.04368	0.00096	300.1	50.9	275.6	6.0	278.3	5.9
15	915	473	1.93	0.05307	0.00167	0.32914	0.00893	0.04504	0.00102	331.5	104.6	284.0	6.3	288.9	6.8
16	239	233	1.03	0.05350	0.00176	0.33457	0.00982	0.04557	0.00088	350.1	80.5	287.3	5.5	293.1	7.5
17	3328	2122	1.57	0.05296	0.00089	0.32067	0.00629	0.04359	0.00069	327.8	38.9	275.0	4.3	282.4	4.8
18	2175	1493	1.46	0.05201	0.00124	0.32093	0.00791	0.04450	0.00088	287.1	53.7	280.6	5.4	282.6	6.1
21	3225	1360	2.37	0.05379	0.00102	0.32583	0.00700	0.04361	0.00067	361.2	42.6	275.2	4.1	286.4	5.4
23	6403	2583	2.48	0.05237	0.00299	0.30549	0.01550	0.04285	0.00139	301.9	131.5	270.5	8.6	270.7	12.1
24	2234	1311	1.70	0.05203	0.00126	0.32413	0.00827	0.04484	0.00081	287.1	55.6	282.8	5.0	285.1	6.3
26	2584	1496	1.73	0.05229	0.00132	0.31050	0.00758	0.04306	0.00107	298.2	57.4	271.8	6.6	274.6	5.9
28	4900	2417	2.03	0.05504	0.00120	0.33226	0.00910	0.04350	0.00083	413.0	48.1	274.5	5.1	291.3	6.9
29	7704	3011	2.56	0.05318	0.00143	0.31600	0.00764	0.04346	0.00107	344.5	63.0	274.2	6.6	278.8	5.9

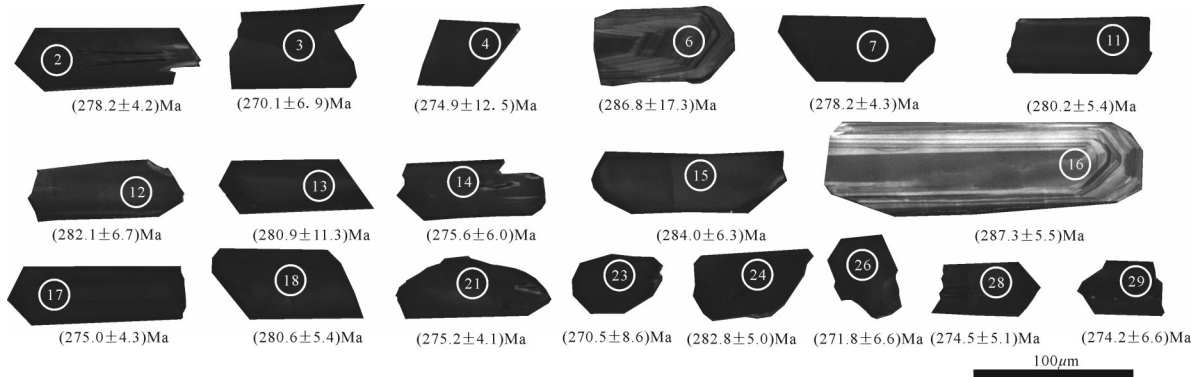


图6 白鑫滩岩体锆石阴极发光图像  
Fig.6 CL images of zircon of the Baixintan deposit

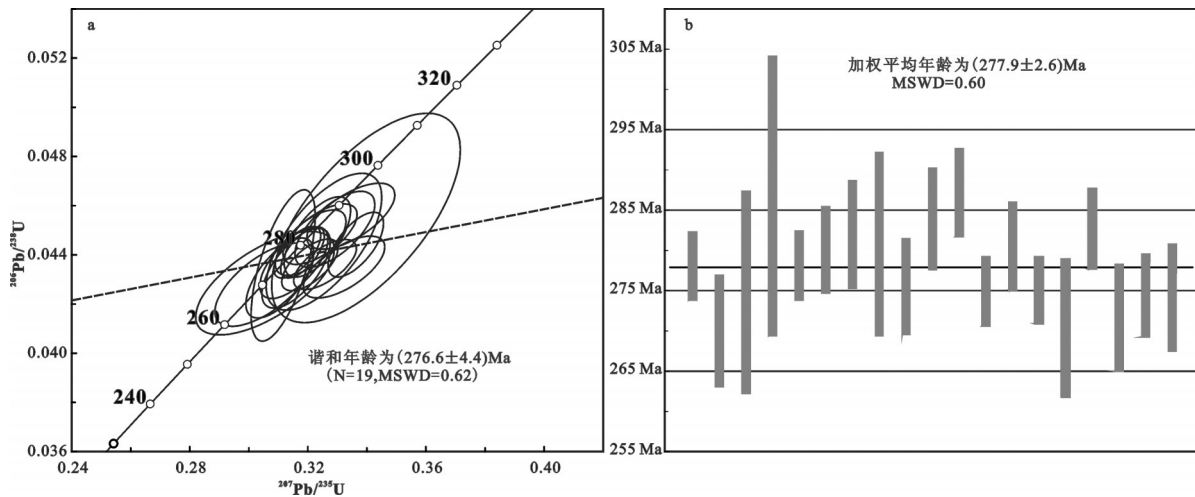


图7 白鑫滩岩体锆石U-Pb年龄图解  
Fig.7 U-Pb age data for zircon of Baixintan intrusion

## 5 讨论

### 5.1 岩浆演化过程

铜镍矿床是典型的岩浆矿床,其成矿作用过程与岩浆演化过程密切相关。玄武质岩浆上升过程中镁铁质矿物的分离结晶及同化混染作用是导致岩浆中硫化物熔离的主要机制<sup>[22]</sup>,准确评价其岩浆演化过程有利于深入理解其成矿作用过程。在主要元素相关性图解上,MgO含量与SiO<sub>2</sub>之间呈明显负相关,与FeO<sup>T</sup>之间呈明显正相关关系(图8-a、b),表明存在橄榄石分离结晶/堆晶作用。MgO含量与CaO之间呈明显的负相关关系(图7-c),表明存在单斜辉石的分离结晶/堆晶作用。MgO含量与TiO<sub>2</sub>

之间呈一定程度的负相关关系(图7-d),这与Ti在结晶相中的不相容性一致。Si/Ti-(Mg+Fe)/Ti图解(图10)也显示岩浆演化过程中主要发生了橄榄石和辉石的分离结晶/堆晶作用,与岩体岩相学特征一致,橄榄石结晶早于辉石。

### 5.2 岩浆源区性质

东天山地区与洋壳俯冲相关的岩浆活动均早于320 Ma<sup>[26-28]</sup>,洋盆至石炭纪末已完全碰撞闭合。从早二叠世开始,东天山地区进入后碰撞伸展环境,发育大规模幔源岩浆底侵及花岗岩岩浆活动<sup>[29-31]</sup>,近年来越来越多的研究者倾向于认为东天山地区早二叠纪含铜镍矿镁铁-超镁铁岩体的形成与塔里木地幔柱活动密切相关<sup>[14,32-33]</sup>,白鑫滩矿床形成时代与该地



表 2 白鑫滩岩体样品主量(%)和微量元素( $10^{-6}$ )分析结果  
 Table 2 Major (%) and trace elements ( $10^{-6}$ ) analyses of Baixintan intrusion

分析项目	辉长岩			橄榄辉石岩			辉石橄榄岩			橄榄辉石岩							
	BXT-01	BXT-03	BXT-04	BXT-06	BXT-07	BXT-08	BXT-09	BXT-10	BXT-11	BXT-12	BXT-13	BXT-14	BXT-15	BXT-16	BXT-17	BXT-18	BXT-20
SiO <sub>2</sub>	49.59	49.24	46.04	44.96	44.5	47.14	45.33	44.05	42.47	40.86	42.02	43.17	43.51	43.69	40.87	43.31	44.72
TiO <sub>2</sub>	0.59	0.61	0.49	0.58	0.6	0.87	0.36	0.3	0.34	0.36	0.37	0.45	0.41	0.47	0.39	0.59	0.65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.85	13.87	14.05	7.8	7.7	10.73	14.31	12.17	6.21	5.44	6.03	5.61	6.39	7.02	6.76	8.06	10.06
FeO <sup>T</sup>	7.47	7.69	9.75	11.88	12.22	10.75	8.97	9.98	13.04	12.12	14.2	13.09	12.75	12.43	17.62	14.95	11.71
MnO	0.14	0.14	0.15	0.17	0.18	0.17	0.14	0.15	0.18	0.17	0.18	0.19	0.19	0.18	0.18	0.18	0.17
MgO	11.89	13.88	18.8	27.17	27.23	20.84	20.39	24.14	31.63	29.83	30.77	31.48	30.3	29	26.94	24.97	23.25
CaO	12.43	11.82	7.54	4.21	4.25	5.86	7.53	6.38	3.51	8.67	3.57	3.2	3.6	4.11	4.29	4.66	6.29
Na <sub>2</sub> O	1.85	1.55	1.51	1.31	1.36	1.59	1.59	1.32	0.82	0.87	0.97	0.96	0.96	1.16	0.73	1.23	1.37
K <sub>2</sub> O	0.28	0.26	0.51	0.47	0.47	0.69	0.31	0.32	0.27	0.26	0.24	0.29	0.39	0.44	0.18	0.3	0.4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.09	0.08	0.12	0.11	0.14	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06	0.08	0.08	0.09	0.07	0.09	0.07
LOI	2.36	3.19	4.76	3.94	3.39	3.53	4.39	4.25	4.65	8.92	4.54	5.16	4.73	4.03	4.5	4.14	3.7
Total	99.68	99.12	98.8	99.18	98.58	99.05	99.41	99.58	99.84	98.5	99.48	99.21	99.53	99.8	98.88	99.35	99.66
Mg <sup>#</sup>	0.74	0.76	0.77	0.8	0.8	0.78	0.8	0.81	0.81	0.81	0.79	0.81	0.81	0.81	0.73	0.75	0.78
Sc	46.27	43.57	20.63	5.09	4.39	9.79	19.58	7.48	3.23	8.54	24.98	2.8	19.85	35.49	38.33	13.08	26.9
Cr	455.1	1501	586	2610	2338	1665	842.3	1593	2173	2238	2688	2805	2898	2787	2373	2090	2031
Co	59.75	65.42	101.4	115.1	107.4	97.8	99.98	111.3	139.3	124.4	166.4	133.3	132.5	126.7	282.9	192.8	112.5
Ni	169.1	509.1	1202	1494	1575	1357	962.2	1208	1568	1565	3320	1555	1727	1558	7778	5543	1486
Cu	155.9	167.7	696.1	129.7	286.7	217.7	129.2	274.9	306.3	261.4	1757	154.2	208.6	139.6	4521	4496	396
Rb	22.1	16.64	34.3	37	29.32	38.94	21.19	18.27	15.65	15.05	14.23	16.71	22.13	26.46	12.01	18.23	21.9
Sr	339.2	305.3	323.7	211.8	208.6	305.4	366.9	328.8	163	247.2	175.9	163.6	182.1	259.5	234.2	408.4	365.8
Y	16.1	15.09	10.6	12.11	12.19	17.55	9.57	8.02	7.81	8.02	7.64	9.91	9.28	10.77	7.84	13.66	10.26
Zr	58.59	48.65	42.81	57.43	50.87	82.54	35.35	28.55	29.08	26.99	29.32	36.96	50.68	48.15	26.75	41.94	46.85
Nb	3.11	1.45	1.33	2.63	1.67	2.44	1.05	0.98	0.93	0.94	0.87	1.2	2.88	2.28	0.87	1.37	2.22
Cd	0.24	0.26	0.5	0.16	0.51	0.24	0.13	0.13	0.1	0.11	0.35	0.22	0.13	0.21	0.66	0.89	0.2

续表2

分析项目	辉长岩			橄榄辉石岩			辉石橄榄岩			橄榄辉石岩							
	BXT-01	BXT-03	BXT-04	BXT-06	BXT-07	BXT-08	BXT-09	BXT-10	BXT-11	BXT-12	BXT-13	BXT-14	BXT-15	BXT-16	BXT-17	BXT-18	BXT-20
Cs	0.76	0.48	2.6	2.65	3.15	4.65	0.72	0.69	0.7	0.62	0.58	0.78	1.66	2.52	1.34	1.83	1.48
Ba	109.1	93.12	92.87	117.6	94.22	134.8	80.63	109.5	55.5	56.34	61.75	80.44	95.87	104.7	55.84	88.37	108.1
Hf	1.75	1.54	1.27	1.68	1.5	2.35	1.06	0.88	0.89	0.84	0.9	1.11	1.43	1.41	0.82	1.27	1.34
Ta	0.21	0.12	0.11	0.2	0.13	0.19	0.089	0.081	0.076	0.078	0.075	0.1	0.2	0.17	0.069	0.1	0.16
Pb	2.73	6.12	11.51	2.66	8.08	3.14	2.27	2.68	2.61	3.02	7.91	2.28	2.41	3.57	10.87	19.27	3.42
Th	1.36	1.12	0.97	1.06	0.97	1.27	0.74	1.9	0.48	0.56	0.6	0.66	1.26	1.04	0.56	1.42	0.75
U	0.41	0.48	0.29	0.79	0.3	0.45	0.24	0.21	0.2	0.21	0.21	0.77	0.42	0.39	0.16	0.34	0.26
La	6.55	5.49	4.95	7.08	5.99	7.62	4.14	5.31	3.42	3.57	3.29	4.51	5.75	5.92	3.23	5.37	5.17
Ce	14.38	11.96	10.6	15.17	13.05	17.69	9.71	11.19	7.95	8.38	7.8	10.44	12.01	12.87	7.75	12.61	11.27
Pr	2.24	1.95	1.66	2.34	2.11	2.79	1.42	1.64	1.18	1.24	1.15	1.55	1.75	1.93	1.16	2.02	1.78
Nd	10.5	9.4	7.74	10.66	9.88	13.21	6.67	7.26	5.53	5.84	5.41	7.26	7.64	8.73	5.47	9.55	8.27
Sm	2.89	2.63	2.03	2.55	2.48	3.45	1.73	1.75	1.41	1.49	1.36	1.81	1.81	2.1	1.4	2.52	2.07
Eu	1.05	0.95	0.75	0.84	0.83	1.18	0.64	0.63	0.45	0.48	0.48	0.58	0.57	0.69	0.5	0.83	0.74
Gd	3.66	3.38	2.49	3.02	3.02	4.21	2.06	2.06	1.73	1.83	1.65	2.18	2.07	2.45	1.69	3.05	2.45
Tb	0.61	0.56	0.39	0.47	0.47	0.67	0.32	0.32	0.26	0.28	0.25	0.34	0.31	0.37	0.26	0.48	0.37
Dy	3.72	3.51	2.44	2.9	2.94	4.14	2.02	2.04	1.71	1.78	1.65	2.13	1.98	2.35	1.66	3.12	2.35
Ho	0.77	0.72	0.51	0.59	0.6	0.85	0.42	0.41	0.35	0.36	0.34	0.44	0.4	0.48	0.34	0.64	0.47
Er	2.12	2	1.42	1.67	1.7	2.39	1.17	1.18	1	1.03	0.97	1.25	1.16	1.37	0.96	1.82	1.36
Tm	0.31	0.28	0.2	0.26	0.26	0.36	0.18	0.19	0.15	0.16	0.15	0.19	0.18	0.21	0.15	0.27	0.2
Yb	1.77	1.66	1.2	1.39	1.38	1.98	0.99	1.03	0.84	0.84	0.82	1.02	1	1.16	0.79	1.61	1.16
Lu	0.3	0.28	0.2	0.24	0.24	0.34	0.17	0.18	0.14	0.15	0.14	0.18	0.17	0.2	0.13	0.26	0.19
ΣREE	50.86	44.79	36.58	49.18	44.96	60.89	31.63	35.18	26.12	27.43	25.47	33.88	36.79	40.84	25.48	44.16	37.85

注:  $Mg^0 = Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Fe^{2+})$ ,  $m / f = (Mg^{2+} + Ni^{2+}) / (Fe^{3+} + Fe^{2+} + Mn^{2+})$ ,  $Fe^T = 0.899 \times Fe_2O_3$ ; 数据表中涉及到主量元素的计算及文中主量元素投图时均按照扣除烧失量后百分含量计。

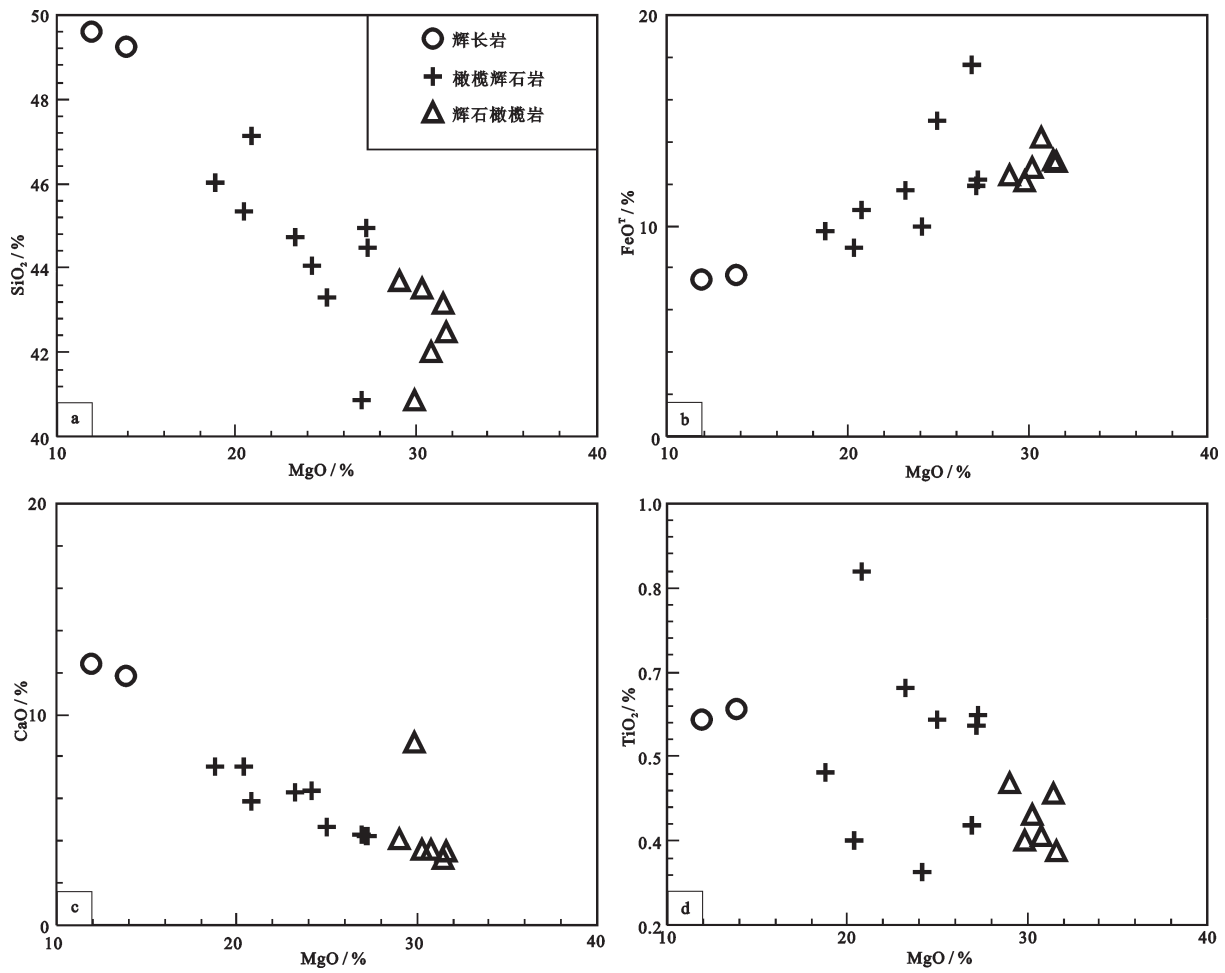


图8 白鑫滩铜镍矿床主量元素相关性图解

Fig. 8 Variations of whole rock composition in Baixintan intrusion

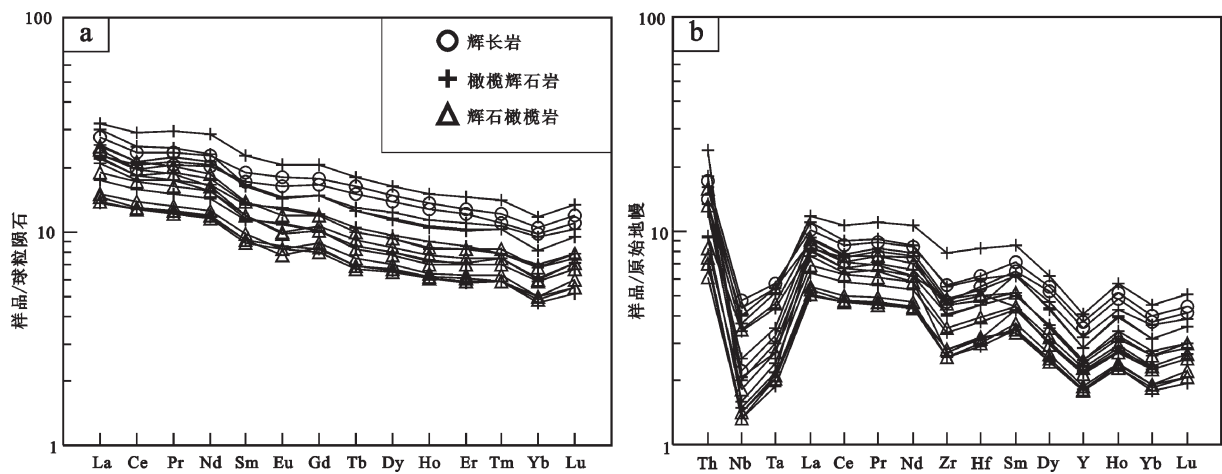


图9 白鑫滩岩体稀土和微量元素标准化图解(球粒陨石标准化值据[20];原始地幔标准化值据[21])

Fig. 9 Chondrite-normalized REE patterns and primitive-normalized trace element diagrams of Baixintan intrusion (normalization values after references [20, 21])

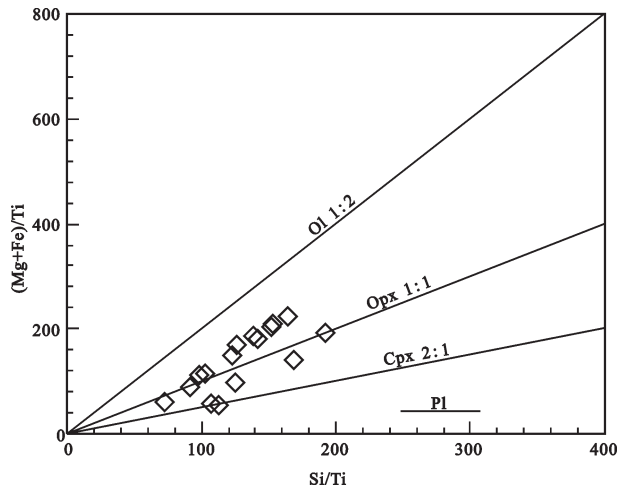


图10 分离结晶判别图解

Fig. 10 Discrimination diagrams for fractionation crystallization processes

区其他典型矿床形成时代一致,且在微量元素特征上都具有明显的Nb、Ta负异常,富集大离子亲石元素而相对亏损高场强元素,表明可能具有相似的地幔源区,可能形成于相同的构造背景。研究表明La、Ba、Th、Zr和Nb之间由于具有相似的分配系数,分离结晶作用不会影响岩浆中La/Nb、La/Ba和Ba/Nb的比值,且岩浆演化过程中同化混染作用较弱,故利用这些元素的比值可以指示其岩浆源区性质<sup>[34-35]</sup>,图12-a、b表明白鑫滩岩体与东天山地区其他典型矿床一样,其岩浆源区遭受了明显的俯冲流体交代。由此可见,尽管白鑫滩岩体形成时该区洋壳俯冲作用已经结束,但早期俯冲流体对上覆地幔的交代作用仍主导着白鑫滩岩体的微量元素特征。

### 5.3 成矿作用过程及对找矿的启示

铜镍矿的成矿作用过程研究主要包括导致硫化物熔离的主要机制、硫化物熔离的主要场所及熔离后硫化物的聚集过程。研究表明镁铁质矿物的分离结晶及地壳物质混染(尤其是外来S的加入)是导致基性岩浆中S过饱和并发生硫化物熔离的两个主要控制因素<sup>[36-37]</sup>。白鑫滩岩体的元素地球化学特征表明岩体母岩浆上升过程中受到了一定程度的同化混染作用,在同化混染作用过程中可能有少量SiO<sub>2</sub>组分的加入;同时在岩浆演化早期由于橄榄石和辉石的分离结晶导致岩浆体系中Fe<sup>2+</sup>的含量降低;通常岩浆体系中硫化物达到过饱和时的溶解度

(SCSS)与Fe<sup>2+</sup>的含量成正比,而与SiO<sub>2</sub>的活度成反比,因此SiO<sub>2</sub>的加入和镁铁质矿物的分离结晶可能是导致白鑫滩含矿岩体母岩浆中硫化物熔离的主要控制因素。

通过对典型铜镍矿床的地质特征及相关模拟计算研究,认为国内典型铜镍矿床硫化物熔离都发生在深部岩浆房内,熔离后的硫化物由于重力分异作用越向下部硫化物含量越高,并形成不同的分层<sup>[36-40]</sup>,之后由于后期构造运动或新岩浆的补给使携带硫化物的岩浆上升至现存空间并就位。由于含硫化物的岩浆在深部岩浆房和上升过程中存在单硫化物固溶体分离结晶作用,导致矿石的Cu/Ni和(Pd+Pt)/(Os+Ir+Ru+Rh)比值随含矿岩浆的前进方向呈逐渐减小的趋势<sup>[39,41-43]</sup>,如俄罗斯Noril'sk-Talnakh矿床岩浆通道的前锋围岩中矽卡岩化作用强烈,岩浆通道前段矿石富Ni,尾部矿石富Cu、Pt、Pd。Sudbury矿区Frood mine矿区矿石特征表明前端矿石富Ni,尾端矿石富Cu、Pt、Pd<sup>[41]</sup>。因此利用矿石Cu/Ni成矿元素变化特征结合岩相分布规律可以反演岩浆流动方向,进而推测含硫化物岩浆上升的通道。白鑫滩矿床东、西段矿石之间相比,西段矿石中的Cu含量及Cu/Ni比值都相对较高,据此推测含矿岩浆的前进方向为由西向东;与成矿元素的变化特征相似,岩体西段的辉石岩相和橄榄岩相所占比例明显高于岩体东段,岩相学变化特征也表明含矿岩浆的流动方向是由西向东。白鑫滩含矿岩体产状平缓且延深不大,虽然岩体西段的侧伏及延伸方向都还未确定,但成矿元素及岩相学变化特征都表明含矿岩浆流动方向为由西向东,因此有必要继续对岩体西段及深部开展进一步的勘查工作。

之前东天山地区铜镍矿勘查工作主要集中在觉罗塔格构造带东段图拉尔根—黄山—土墩铜镍矿带上,土墩铜镍矿以西的铜镍找矿工作开展较少。白鑫滩矿床的形成年龄为(277.9±2.6) Ma,与东天山地区已发现典型铜镍矿床形成时代一致,可能是图拉尔根—黄山—土墩铜镍矿带的西延部分,进一步扩宽了该带的铜镍找矿空间。白鑫滩矿床区域上位于大草滩断裂以北,与康古尔—黄山深大断裂相距较远,而觉罗塔格构造带东段典型铜镍矿床则主要沿康古尔—黄山深大断裂分布。区域物探资料表明康古尔—黄山深大断裂是该区重力和航

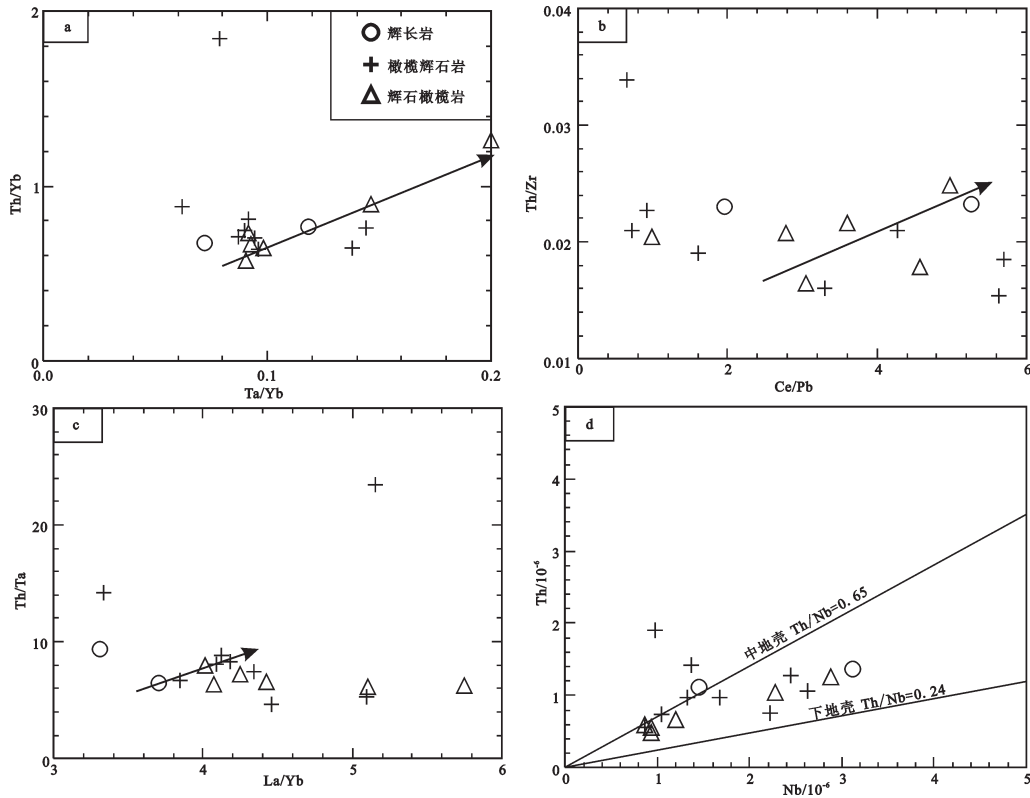


图 11 同化混染判别图解

Fig. 11 Discrimination plots for contamination from selected trace elements

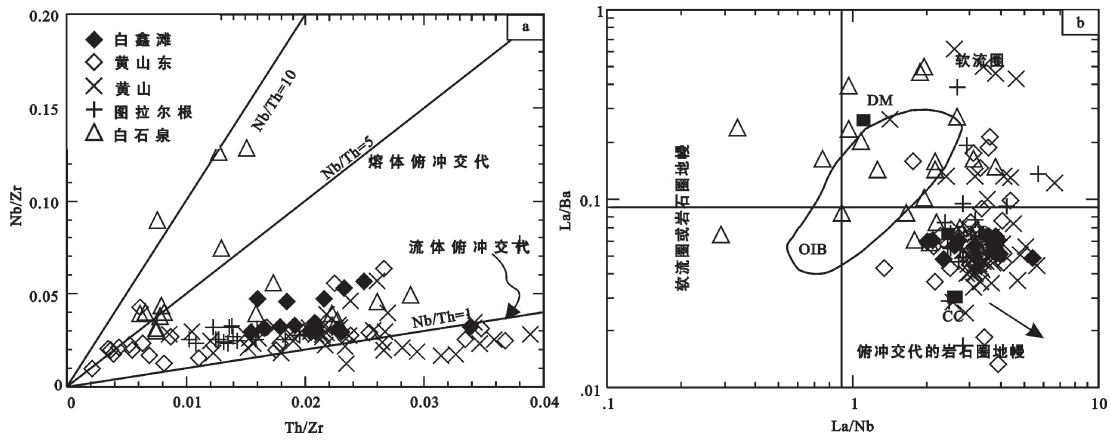


图 12 岩浆源区性质判别图解

Fig. 12 Discrimination diagrams for the magma source region

磁异常的分界线,并伴有串珠状的局部磁异常,是该区最重要的控岩控矿断裂。大草滩断裂位于康古尔—黄山深大断裂以北,沿大草滩断裂也发育有呈串珠状的磁异常,已知对应的镁铁-超镁铁质岩体主要有白鑫滩和海豹滩岩体,白鑫滩矿床的发现

表明大草滩断裂可能也是该区重要的控岩控矿断裂,沿该断裂两侧有继续寻找铜镍矿的潜力。

## 6 结论

(1)白鑫滩铜镍矿床形年龄为(277.9±2.6) Ma,

是早二叠纪岩浆作用的产物,与东天山地区黄山东、黄山等典型矿床形成时代一致。

(2)白鑫滩矿床含矿岩体母岩浆上升过程中主要经历了橄榄石和辉石的分离结晶,橄榄石结晶早于辉石。岩石普遍富集大离子亲石元素,具有明显的Nb、Ta负异常。岩浆演化过程中遭受了较弱的中、下地壳物质混染,岩浆源区遭受了明显的俯冲流体交代作用。

(3)矿石Ni、Cu成矿元素变化特征及岩体岩相变化特征表明,含矿岩浆的流动方向为由西向东,岩体西段是今后勘查的重点。

(4)白鑫滩矿床是东天山图拉尔根—黄山—土墩铜镍矿带的西延部分,白鑫滩矿床的发现表明罗塔格构造带向西仍有较大的铜镍找矿空间,且大草滩断裂可能也是该带重要的控岩控矿断裂。

**致谢:**本次研究的野外工作得到了新疆地矿局第一区调大队李鑫工程师及其他技术人员的大力支持;长安大学王柱命、何克老师在样品测试过程中提供了宝贵的支持;马中平研究员和匿名审稿专家提出了宝贵的修改意见和建议,在此表示诚挚的感谢。

#### 参考文献(References):

- [1] 王京彬,徐新.东天山大地构造演化的成矿示踪[J].中国地质,2006,33(3):461-469.  
Wang Jingbin, Xu Xin. Ore deposits as a guide to the tectonic evolution in the first East Tianshan Mountains, NW China[J]. Geology in China, 2006, 33(3): 461-469(in Chinese with English abstract).
- [2] 焦建刚,汤中立,钱壮志,等.东天山地区图拉尔根铜镍硫化物矿床成因及成矿过程[J].岩石学报,2012,28(11):3772-3786.  
Jiao Jiangan, Tang Zhongli, Qian Zhuangzhi, et al. Genesis and metallogenic process of Tulargen large scale Cu-Ni sulfide deposit in eastern Tianshan area, Xinjiang[J]. Acta petrologica Sinica, 2012, 28(11): 3772-3786(in Chinese with English abstract).
- [3] Tang D M, Qin K Z, Su B X, et al. Magma source and Tectonics of the Xiangshanzhong mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian Orogenic belt, NW China, traced from geochemical and isotopic signatures[J]. Lithos, 2013, 170-171:144-163.
- [4] 娄德波,王登红,肖克炎,等.中国镍矿预测类型及主要战略接续区[J].中国地质,2014,41(3):715-727.  
Lou Debo, Wang Denghong, Xiao Keyan, et al. Prediction types and main successive strategic resource base of Ni ore deposits in China[J]. Geology in China, 2014, 41(3): 715-727(in Chinese with English abstract).
- [5] Sun T, Qian Z Z, Deng Y F, et al. PGE and isotope(Hf-Sr-Nd-Pb) constraints on the origin of the Huangshandong magmatic Ni-Cu sulfide deposit in the Central Asian Orogenic Belt, Northwestern China[J]. Economic Geology, 2013, 108: 1849-1864
- [6] 毛亚晶,秦克章,唐冬梅,等.东天山岩浆铜镍硫化物矿床的多期次岩浆侵位于成矿作用——以黄山铜镍矿床为例[J].岩石学报,2014,30(6):1575-1594.  
Mao Yajing, Qin Kezhang, Tang Dongmei, et al. Multiple stages of magma emplacement and mineralization of Eastern Tianshan, Xinjiang: Exeemplified by the Huangshan Ni-Cu deposit[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(6): 1575-1594(in Chinese with English abstract).
- [7] 三金柱,秦克章,汤中立,等.东天山图拉尔根大型铜镍矿区两个镁铁-超镁铁岩体的锆石U-Pb定年及其地质意义[J].岩石学报,2010,26(11):3027-3035.  
San Jinzhu, Qin Kezhang, Tang Zhongli, et al. Precise zircon U-Pb age dating of two mafic-ultramafic complexes at Tulargen large Cu-Ni district and its geological implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(10): 3027-3035(in Chinese with English abstract).
- [8] 秦克章,丁奎首,许英霞,等.东天山图拉尔根、白石泉铜镍钴矿床钴、镍赋存状态及原岩含矿性研究[J].矿床地质,2007,26(1):1-14.  
Qin Kezhang, Ding Kuishou, Xu Yingxia, et al. Ore potential of protoliths and modes of Co-Ni occurrence in Tulargen and Baishiquan Cu-Ni-Co deposits, East Tianshan, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2007, 26(1): 1-14(in Chinese with English abstract).
- [9] Wang M F, Guo X N, Michalak P P, et al. Origin of the Tudun Cu-Ni sulfide deposit in the eastern Tianshan, NW China: Constraints on the geochemistry of platinum group elements[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 64: 445-454.
- [10] 娄德波,肖克炎,王登红,等.新疆黄山—镜儿泉地区岩浆型镍铜硫化物矿床远景分析[J].中国地质,2013,40(4):1278-1289.  
Lou Debo, Xiao Keyan, Wang Denghong, et al. A prospective analysis of magmatic Ni-Cu sulfide deposits in Huangshan-Jing'erquan area, Xinjiang[J]. Geology in China, 2013, 40(4): 1278-1289(in Chinese with English abstract).
- [11] 孙涛,王登红,娄德波,等.中国成镍矿带与找矿方向探讨[J].中国地质,2014,41(6):1986-2001.  
Sun Tao, Wang Denghong, Lou Debo, et al. Geological characteristics of the nickel metallogenic belts in China and the prospecting orientation[J]. Geology in China, 2014, 41(6): 1986-2001(in Chinese with English abstract).
- [12] 冯宏业,许英霞,秦克章,等.东天山圪塔山口镁铁-超镁铁质岩体地球化学、锆石U-Pb年代学及其对Ni-Cu成矿的指示[J].岩石学报,2014,30(6):1558-1574.  
Feng Hongye, Xu Yingxia, Qin Kezhang, et al. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of Getashankou mafic-ultramafic intrusions, East Tianshan, and its implication for Ni-Cu

- mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(6): 1558–1574(in Chinese with English abstract).
- [13] 肖庆华, 秦克章, 唐冬梅, 等. 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[J]. *岩石学报*, 2010, 26(2): 503–522.  
Xiao Qinghua, Qin Kezhang, Tang Dongmei, et al. 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[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(2): 503–522(in Chinese with English abstract).
- [14] Qin K Z, Su B X, Patrick A S, et al. SIMS Zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu bearing mafic-ultramafic intrusion in eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim basin(NW China): Constraints on a CA 280 Ma mantle plume[J]. *American Journal of Science*, 2011, 311: 1–23.
- [15] 韩宝福, 宋彪, 陈立辉, 等. 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*, 2004, 49(22): 2324–2328.  
Han Baofu, Song Biao, Chen Lihui, et al. SHRIMP zircon U-Pb ages of Kalatongke No.1 and Huangshandong Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic complexes, North Xinjiang, and geological implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(22): 2324–2328(in Chinese).
- [16] Hess P C. Phase equilibria constraints on the origin of ocean floor basalts[C]//Morgan JP, Blackman D K, Sinton JM(eds). *Mantle Flow and Melt Generation at Mid-Ocean Ridges Geophysical Monograph*. American Geophysical Union, 71: 67–102.
- [17] 夏明哲, 姜常义, 钱壮志, 等. 新疆东天山葫芦岩体岩石学与地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2008, 24(12): 2749–2760.  
Xia Mingzhe, Jiang Changyi, Qian Zhuangzhi, et al. Geochemistry and petrogenesis for Hulu intrusion in East Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(12): 2749–2760(in Chinese with English abstract).
- [18] 夏明哲, 姜常义, 钱壮志, 等. 新疆东天山黄山东岩体岩石地球化学特征与岩石成因[J]. *岩石学报*, 2010, 26(8): 2413–2430.  
Xia Mingzhe, Jiang Changyi, Qian Zhuangzhi, et al. Geochemistry and petrogenesis of Huangshandong intrusion, East Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(8): 2413–2430(in Chinese with English abstract).
- [19] Zhou M F, Leshner C M. Geochemistry and Petrogenesis of 270Ma Ni-Cu (PGE) sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion in Huangshan district, eastern Xinjiang, Central Asian orogenic belt[J]. *Chemical Geology*, 2004, 209: 233–257.
- [20] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J(eds.). *Magmatism in Oceanic Basins*[J]. *Spec. Publ. Geol. Soc. Lond.*, 1989, 42: 313–345.
- [21] McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120: 223–253.
- [22] Naldrett A J. Fundamentals of magmatic sulfide deposits[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2011, 17: 1–50.
- [23] Baker J A, Menzies M A, Thirlwall M F, et al. Petrogenesis of Quaternary intraplate volcanism, Sana'a Yemen: Implication and polybaric melt hybridization[J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38: 1359–1390.
- [24] McDonald R, Rogers N W, Fitton J G, et al. Plume-lithosphere interactions in the generation of the basalts of the Kenya Rift, East Africa[J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42: 877–900.
- [25] Rundnick R L and Gao Shan. Composition of the continental crust[J]. *Treat Geochem*, 2003, 3: 1–64.
- [26] 朱永峰, 王涛, 徐新. 新疆及邻区地质与矿产研究进展[J]. *岩石学报*, 2007, 23(8): 1785–1794.  
Zhu Yongfeng, Wang Tao, Xu Xin. Progress of geology study in Xinjiang and its adjacent regions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(8): 1785–1794(in Chinese with English abstract).
- [27] 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 等. 东天山黄山—镜儿泉地区二叠纪地质-成矿-热事件: 幔源岩浆内侵及其地壳效应[J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 2869–2880.  
Gu Lianxing, Zhang Zhunzhong, Wu Changzhi, et al. Permian geological, metallurgical and geothermal events of the Huangshan—Jing'erquan area, eastern Tianshan: indications for mantle magma intraplating and its effect on the crust[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(11): 2869–2880(in Chinese with English abstract).
- [28] 周涛发, 袁锋, 张达玉, 等. 新疆东天山觉罗塔格地区花岗岩类年代学、构造背景及其成矿作用研究[J]. *岩石学报*, 2010, 26(2): 478–502.  
Zhou Taofang, Yuan Feng, Zhang Dayu, et al. Geochronology, tectonic setting and mineralization of granitoids in Jueluotage area, eastern Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(2): 478–502(in Chinese with English abstract).
- [29] 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等. 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[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1077–1086.  
Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, et al. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar basin, Xinjiang, China(Part I): Timing of post-collisional plutonism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1077–1086(in Chinese with English abstract).
- [30] Zhang L C, Shen Y C, Ji J S. Characteristics and genesis of Kanggur gold deposit in the eastern Tianshan mountains, NW China: Evidence from geology, isotope distribution and

- chronology[J]. *Ore Geology Reviews*, 2003, 23: 71-90.
- [31] 李锦轶, 宋彪, 王克卓, 等. 东天山吐哈盆地南缘二叠纪幔源岩浆杂岩: 中亚地区陆壳垂向增生的地质记录[J]. *地球学报*, 2006, 27(5): 424-446
- Li Jinyi, Song Biao, Wang Kezhao, et al. Permian mafic-ultramafic complexes on the southern margin of the Tu-Ha basin, East Tianshan Mountains: Geological records of vertical crustal growth in Central Asia[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2006, 27(5): 424-446(in Chinese with English abstract).
- [32] 李文渊, 牛耀龄, 张照伟, 等. 新疆北部晚古生代大规模岩浆成矿的地球动力学背景和战略找矿远景[J]. *地学前缘*, 2012, 19(4): 41-50.
- Li Wenyuan, Niu Yaoling, Zhang Zhaowei, et al. Geodynamic setting and further exploration of magmatism-related mineralization concentrated in the Late Paleozoic in the northern Xinjiang Autonomous Region[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(4): 41-50(in Chinese with English abstract).
- [33] 毛景文, Pirajno F, 张作衡, 等. 天山—阿尔泰东部地区海西晚期后碰撞铜镍硫化物矿床: 主要特征及可能与地幔柱的关系[J]. *地质学报*, 2006, 80(7): 925-942.
- Mao Jingwen, Pirajno F, Zhang Zuoheng, et al. Late variscan post-collisional Cu-Ni sulfide deposits in East Tianshan and Altay in China: Principal characteristics and possible relationship with mantle plume[J]. *Acta Geological Sinica*, 2006, 80(7): 925-942(in Chinese with English abstract).
- [34] Saunders A D, Storey M, Kent R W, et al. Consequences of plume-lithosphere interactions[C]//Storey B C, Alabaster T, Pankhurst R J (eds.). *Magmatism and the Cause of Continental Breakup*. Geological Society of London Special Publication, 1992, 68: 41-60.
- [35] Woodhead J D, Hergt J M, Davidson J P, et al. Hafnium isotope evidence for "conservative" element mobility during subduction zone processes[J]. *Earth and Planet Science Letters*, 2001, 192: 331-346.
- [36] 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: 1-208
- Tang Zhongli, Li Wenyuan. *Genesis Model and Geological Contrast of the Jinchuan (Pt-bearing) Cu-Ni Sulfide Deposit*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995: 1-208(in Chinese).
- [37] 汤中立, 徐刚, 王亚磊, 等. 岩浆成矿新探索——小岩体成矿与地质找矿突破[J]. *西北地质*, 2012, 45(4): 1-16.
- Tang Zhongli, Xu Gang, Wang Yalei, et al. The new exploration of magmatic mineralization: Small intrusion mineralization and geological prospecting breakthrough[J]. *Northern Geology*, 2012, 45(4): 1-16(in Chinese with English abstract)
- [38] 秦克章, 田野, 姚卓森, 等. 新疆喀拉通克铜镍矿田成矿条件、岩浆通道与成矿潜力分析[J]. *中国地质*, 2014, 41(3): 912-935.
- Qin Kezhang, Tian Ye, Yao Zhuosen, et al. Metallogenetic conditions, magma conduit and exploration potential of the Kalatongk Cu-Ni orefield in Northern Xinjiang[J]. *Geology in China*, 2014, 41(3): 912-935(in Chinese with English abstract).
- [39] 钱壮志, 王建中, 姜常义, 等. 喀拉通克铜镍矿床铂族元素地球化学特征及其成矿作用意义[J]. *岩石学报*, 2009, 25(4): 832-844.
- Qin Zhuangzhi, Wang Jianzhong, Jiang Changyi, et al. Geochemistry characters of platinum-group elements and its significances on the process of mineralization in the Kalatongk Cu-Ni sulfide deposit, Xinjiang, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(4): 832-844(in Chinese with English abstract).
- [40] Li C, Zhang Z W, Li W Y, et al. Geochronology, petrology and Hf-S isotope geochemistry of the newly-discovered Xiarihamu magmatic Ni-Cu sulfide deposit in the Qinghai-Tibet plateau, Western China[J]. *Lithos*, 2016, 216-217: 224-240
- [41] 苏尚国, 汤中立, 罗照华, 等. 岩浆通道成矿系统[J]. *岩石学报*, 2014, 30(11): 3120-3130.
- Su Shangguo, Tang Zhongli, Luo Zhaohua, et al. Magmatic conduit metallogenetic system[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(11): 3120-3130(in Chinese with English abstract).
- [42] 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 the Jinchuan Cu-Ni deposit and its prospecting in depth[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(12): 3379-3395(in Chinese with English abstract).
- [43] 闫海卿, 王强, 胡彦强, 等. 金川铜镍硫化物岩浆矿床前锋岩浆与岩浆通道[J]. *中国地质*, 2013, 40(3): 806-819.
- Yan Haiqing, Wang Qiang, Hu Yanqiang, et al. Striker magma and magma channel in the Jinchuan copper-nickel sulfide magmatic deposit[J]. *Geology in China*, 2013, 40(3): 806-819(in Chinese with English abstract).