

甘肃北山大山头南基性-超基性杂岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其地质意义

王磊, 杨建国, 王小红, 齐琦, 全守村, 李文明, 叶美芳, 谢燮, 姜安定

(西安地质矿产研究所, 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 大山头南铜镍矿化基性-超基性杂岩体位于北山褶皱带东段, 侵位于长城系古铜井群变质岩中。岩相分带明显, 主要包括花岗闪长岩-闪长岩相、辉长岩-橄榄苏长辉长岩相和橄榄二辉岩-纯橄岩相。铜镍矿化主要赋存于橄榄二辉岩-纯橄岩相中。岩石化学特征显示 K_2O 、 Na_2O 、 TiO_2 含量较低, $Mg^\#$ 值介于 0.74~0.85 之间, MgO/FeO^T 的值介于 1.6~3.1 之间, 属于铁质镁铁-超镁铁岩; AFM 图解显示该岩体具拉斑玄武岩的演化趋势; 稀土元素总量较低, 介于 $6.37 \times 10^{-6} \sim 37.51 \times 10^{-6}$ 之间; 稀土元素标准化配分曲线表现为轻稀土元素稍富集的右倾型, LREE/HREE 比值介于 3.03~4.11 之间, 轻重稀土发生了明显的分馏; 采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 方法, 获得杂岩体辉长岩中锆石 U-Pb 年龄为 374.3 ± 3 Ma (MSWD=0.92), 表明该岩体侵位于中晚泥盆世, 与形成大型镍矿床的黑山岩体年龄一致, 形成于洋壳俯冲阶段。该年龄的获得不仅对北山乃至中亚造山带地质构造演化具有重要意义, 而且也能为北山褶皱带东段铜镍找矿提供了新的方向。

关键词: 大山头南基性-超基性岩; 锆石 SHRIMP U-Pb 定年; 岩石化学; 甘肃北山

中图分类号: P597⁺.3; P588.12⁺4; P588.12⁺5 文献标识码: A 文章编号: 1000-6524(2015)05-0697-13

Zircon SHRIMP U-Pb age of Dashantounan basic-ultrabasic intrusion complex in the Beishan Mountain, Gansu Province

WANG Lei, YANG Jian-guo, WANG Xiao-hong, QI Qi, QUAN Shou-cun, LI Wen-ming, YE Mei-fang, XIE Xie and JIANG An-ding

(Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MLR, Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, China)

Abstract: The Dashantounan basic-ultrabasic intrusion hosting Ni-Cu sulfide deposit is located in the eastern part of the Beishan fold belt on the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB). Detailed field geological survey indicates that only Gudongjing Group of Changcheng System occurs in the south of the intrusion. The complex is composed mainly of granodiorite, diorite, gabbro, norite bronzitite, olivine norite-gabbro, olivine websterite, lherzolite, orthopyroxenite peridotite, and dunite. Among them, lherzolite, orthopyroxenite peridotite and dunite are closely related to the Cu-Ni mineralization. The major element, trace element and REE geochemistry indicates that the values of K_2O , Na_2O and TiO_2 are low; the values of $Mg^\#$ are between 0.74 and 0.85, and MgO/FeO^T ratios are between 1.6 and 3.1, suggesting mafic and ultramafic rocks. The values of REE are low, varying between 6.37×10^{-6} and 37.51×10^{-6} . The chondrite normalized REE partition curve exhibits right-inclined REE patterns, implying that the intrusion is enriched in LREE. The ratios of

收稿日期: 2014-05-19; 修订日期: 2015-07-06

基金项目: 中国地质调查局地质调查专项(1212011085090; 12120113046700)

作者简介: 王磊(1985-), 男, 助理研究员, 研究方向: 金属矿床成矿规律与找矿预测, E-mail: tleiwang@163.com。

LREE/HREE vary between 3.03 and 4.11, and the AFM diagram shows a trend of tholeiitic magmatic differentiation. Through the zircon SHRIMP U-Pb dating of gabbro, the authors obtained the intrusion age of 374.3 ± 3 Ma, similar to ages of Dashantou and Heishan intrusion, which suggests the emplacement took place in middle-late Devonian. The age has important practical significance for Cu-Ni mineral exploration in this area.

Key words: Dashantounan basic-ultrabasic intrusion; SHRIMP zircon U-Pb dating; petrochemistry; Beishan of Gansu Province

北山造山带位于中亚造山带中部南缘,总体属塔里木板块东北边缘。北山造山带内已发现的含铜镍硫化物的岩体有西段的坡北、红石山、笔架山岩体,东段的黑山、怪石山、大山头、大山头南等岩体(图 1),其中东段的黑山岩体中铜镍矿床规模已达大型(杨建国等,2012)。笔者最近在国土资源大调查项目的资助下,对大山头南岩体进行了勘查,目前已圈出多条铜镍矿体,显示了良好的成矿潜力。前人对其周围的大山头、怪石山、拾金滩、黑山岩体地质

特征、年代学及构造背景进行了研究(邵小阳等,2010;杨建国等,2012;Xie *et al.*, 2012;闫海卿等,2012;王磊等,2013;王小红等,2014),但该岩体的成岩时代及岩石化学特征等一系列问题仍属空白,亟待解决。笔者首次对大山头南岩体的地质特征、矿化特征、形成时代、岩石化学特征及构造背景进行了研究探讨,这一成果将为精确厘定岩体的侵位时代及其形成的构造背景提供重要的同位素依据,也对本地区其他岩体铜镍找矿具有借鉴指导意义。

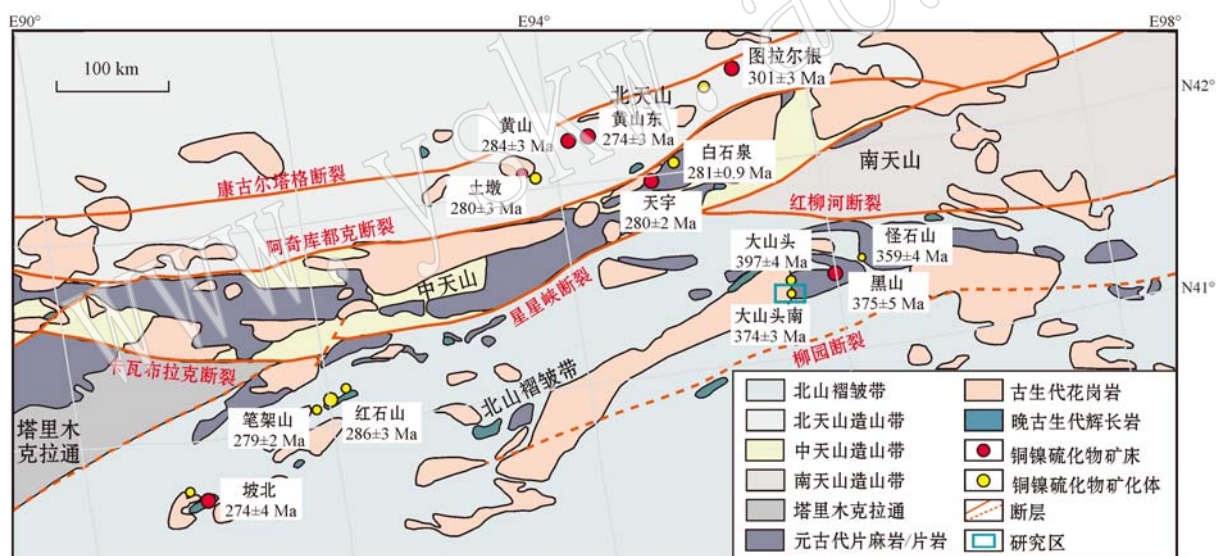


图 1 北山褶皱带及邻区地质简图(据 Xie 等, 2013)

Fig. 1 Sketch geological map of the Beishan fold belt and adjacent areas (after Xie *et al.*, 2013)

1 地质背景

北山褶皱带位于中亚造山带最南缘,东西横跨新疆、甘肃、内蒙古,呈 NE-SW 向,南面与塔里木-敦煌克拉通连接,并向西南方向延伸到塔里木-敦煌克拉通中,西北与天山地块相连,并以星星峡大断裂和红柳河大断裂为界,其东南界代表性断裂尚不明确(颜伟等,2013)。北山主要经历了震旦纪-奥陶纪古陆裂解及洋盆扩张、志留纪-泥盆纪板块俯冲及碰撞

造山、石炭纪-二叠纪陆内裂谷 3 个阶段,主要存在 3 个构造岩浆事件,即:早中生代(460~370 Ma)、晚古生代(330~260 Ma)、早中生代(250~200 Ma)3 期构造岩浆事件(杨合群等,2008)。大山头南岩体(又名三个井岩体)位于北山褶皱带东部,距黑山铜镍矿约 20 km,其周围发育有大山头、炭山子、大泉东等多个超基性岩体。大山头南岩体南部侵位于长城系古铜井群绢云绿泥石英片岩、斜长角闪片岩、石英片岩、绢云石英岩等变质岩中,北部被第四系所覆盖。在其外围出露有勒巴泉花岗闪长质片麻岩。杂

岩体南侧约 1 km 处庙庙井深大断裂, 地表以出露敦煌群条带状大理岩、黑云二长混合岩、黑云斜长片麻岩夹石英岩、片岩等为标志。

2 岩体岩相学及铜镍矿化特征

2.1 岩体地质特征

大山头南基性-超基性杂岩体呈近东西向带(脉)状展布(图 2), 长约 2.5 km, 南北宽约 0.3 km。

其中岩相分异复杂, 通过剖面测量及结合光薄片观察, 岩石类型主要有: 花岗闪长岩、闪长岩、辉长岩、苏长辉长岩、橄榄苏长辉长岩、橄榄二辉岩、二辉橄榄岩、方辉辉橄岩、单斜辉橄岩、纯橄岩等。岩相分带明显, 主要划分为花岗闪长岩-闪长岩相、辉长岩-橄榄苏长辉长岩相、橄榄二辉岩-纯橄岩相。

花岗闪长岩-闪长岩相主要位于杂岩体北侧, 与辉长岩为渐变过渡关系。岩石类型有花岗岩闪长岩、石英闪长岩、石英辉长闪长岩等。

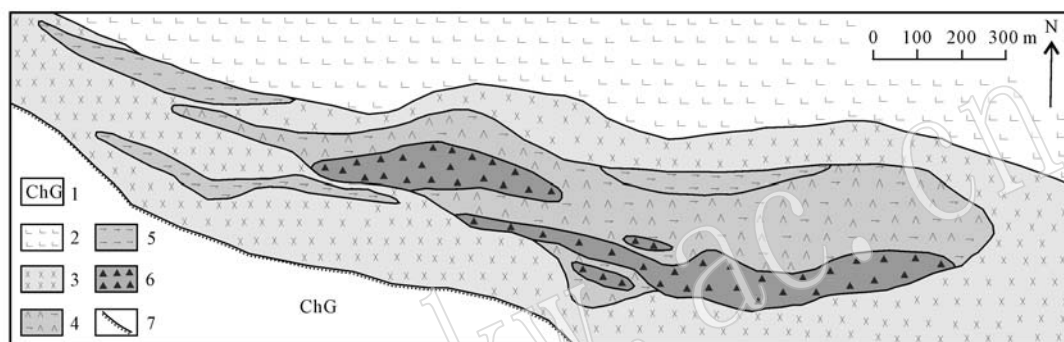


图 2 大山头南铜镍矿化基性-超基性岩岩体地质图

Fig. 2 Geological map of the Dashantounan intrusion

1—长城系古铜井群: 云母石英片岩、石英变粒岩、斜长角闪片岩; 2—花岗闪长岩-闪长岩相; 3—辉长岩-橄榄苏长辉长岩相; 4—辉橄岩相; 5—橄辉岩相; 6—纯橄岩相; 7—不整合界面

1—Gudongjing Group of Changcheng System: mica quartz schist, quartz granulite, plagioclase amphibole schist; 2—granodiorite-diorite lithofacies; 3—gabbro-olivine gabbro lithofacies; 4—eulysite lithofacies; 5—olivine pyroxenites lithofacies; 6—dunite lithofacies; 7—unconformity

辉长岩-橄榄苏长辉长岩相呈东西向带状分布, 与橄榄二辉岩-纯橄岩相呈渐变过渡关系, 岩石类型主要有辉长岩和橄榄苏长辉长岩, 其中, 辉长岩出露面积较大, 约占整个岩体面积的 1/3, 其粒度大小不一, 局部呈伟晶状辉长岩, 次生蚀变强烈, 多被钠黝帘石、绿泥石、绢云母交代, 斜长石矿物晶体呈半自形板状或粒状, 晶体中普遍发育卡纳复合双晶。辉石晶体形态多呈柱状或粒状, 粒径大小不等。沿晶体边缘常形成角闪石的次生边。

橄榄二辉岩-纯橄岩相分布于岩体中部和南部, 由多个分异的小岩体组成, 单个小岩体形态多呈东西带状分布, 岩石普遍蚀变强烈, 橄榄石大部分被蛇纹石交代, 但保留了原生矿物的晶体形态, 蛇纹石主要为纤维蛇纹石和叶蛇纹石, 局部出现水镁石、菱镁矿等。辉石为单斜辉石(透辉石和易剥石)和斜方辉

石(紫苏辉石), 两种辉石均以填隙方式出现, 显示堆晶结构(图 3c)特征, 辉石多包裹橄榄石晶体形成包橄结构(图 3d)。

2.2 铜镍矿化特征

大山头南基性-超基性杂岩体全岩铜镍矿化, 其中基性程度较高的方辉橄岩、单辉橄岩铜镍含量相对较高。地表褐铁矿化强烈, 局部可见孔雀石化(图 2c)。原生金属矿物为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿、黄铁矿及少量尖晶石。Ni、Cu 的平均品位分别在 0.1%~0.2% 之间, 最高达 0.6%。具有 Ni、Cu 紧密伴生, Cu 品位相对较低的特征。Ni 主要以镍黄铁矿形式存在, Cu 主要以黄铜矿单矿物的形式存在。镍黄铁矿呈细的包体被包含于磁黄铁矿的晶粒中, 或产于磁黄铁矿的裂隙中与其共生, 黄铜矿产出特征与镍黄铁矿类似。

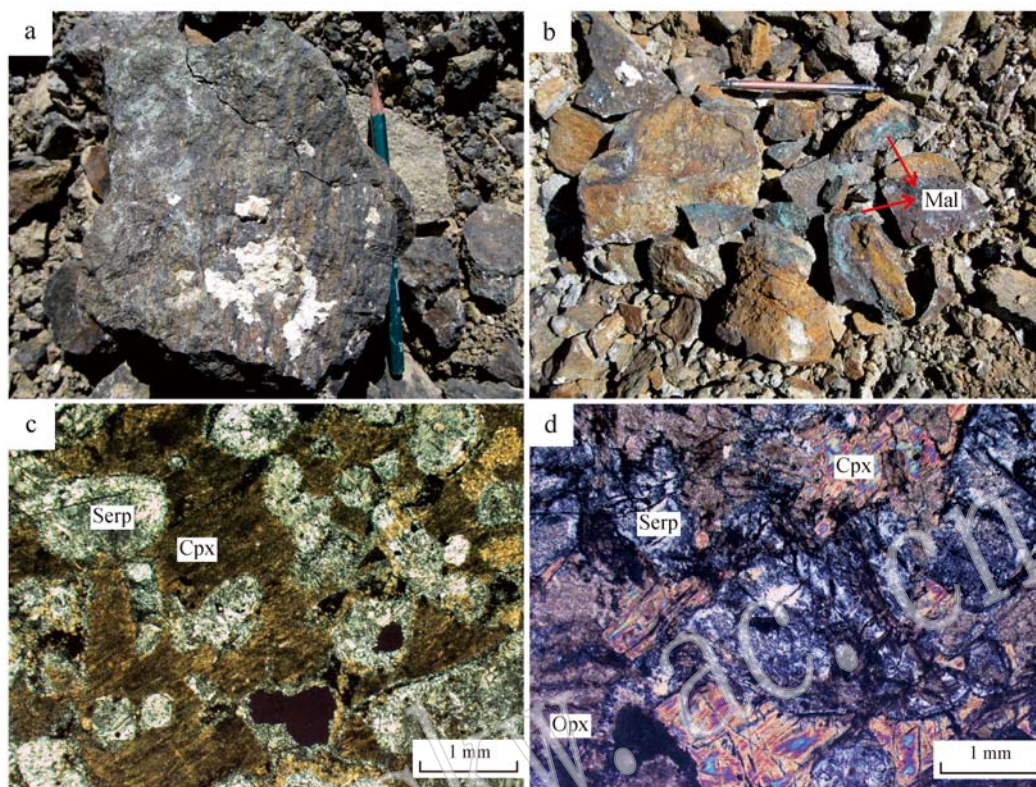


图 3 大山头南岩体野外露头相片及显微相片(正交偏光)

Fig. 3 Outcrop photographs (a, b) and representative microphotographs (c, d) of Dashantounan intrusion (crossed nicols)

a—条带状构造; b—孔雀石化及镍华; c—二辉橄榄岩(堆晶结构); d—二辉橄榄岩(包橄结构);

Mal—孔雀石; Ol—橄榄石; Serp—蛇纹石; Cpx—单斜辉石; Opx—斜方辉石

a—banded structure; b—malachite mineralization; c—cumulative texture; d—package throws structure; Mal—malachite; Ol—olivine;

Serp—serpentine; Cpx—clinopyroxene; Opx—orthopyroxene

3 样品选择及测试分析方法

本次研究主要选择不同岩相的样品进行了测试,选择的岩石类型有单辉橄榄岩(11Q-1)、二辉橄榄岩(11Q-2)、方辉橄榄岩(11Q-3)、二辉岩(12Q-13)、辉长岩(11S-Q1)5件样品。5件样品全部进行岩石化学全分析,其中的辉长岩进行锆石 SHRIMP U-Pb 定年研究。所有硅酸盐岩样品的分析检测全部在中国地质调查局西安地质调查中心测试中心完成,岩石的常量元素测定采用 X-荧光光谱仪(仪器型号: Xios4.0)完成, XRF 熔片法按国家标准 GB/T 14506.28-1993,其中 FeO 采用容量滴定法,微量元素和稀土元素采用等离子质谱仪(ICP-MS)检测。分析结果见表 1。稀土配分曲线及微量元素蛛网图采用 Geokit(路远发,2004)软件绘制。

锆石挑选在河北省区域地质矿产研究所由专业技术人员在无污染条件下,经过手工破碎、淘洗、磁选、重液分离选出,并在双目镜下认真挑选。锆石制靶和阴极发光(CL)扫描电镜照及反射透射照是在中国地质科学院地质研究所离子探针中心完成。锆石离子探针分析样品的制备按照宋彪等(2002)的方法进行。样品分析在北京离子探针中心的 SHRIMP II 离子探针上完成,数据处理按 Williams (1998)程序进行。衰变常数使用 Steiger 等(1977)等推荐值,普通铅用直接测定的 ^{204}Pb 校正。因为年轻锆石($<1\,000\text{ Ma}$)中放射成因 ^{207}Pb 量较少,分析中容易产生较大的误差,所以对年轻锆石($<1\,000\text{ Ma}$)均使用其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,对较老锆石($>1\,000\text{ Ma}$)使用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄。给出数据均为同一测点连续 5 次分析的平均值,误差为 1σ ,最终年龄的加权平均值的误差则为 2σ 。分析结果见表 2。

表1 大山头南岩体主量($w_B/\%$)、微量元素($w_B/10^{-6}$)

分析结果表

Table 1 Data of major elements ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) content

样品号	11Q-1	11Q-2	11Q-3	11S-Q1	12Q-13
岩性	单辉 橄榄岩	二辉 橄榄岩	方辉 橄榄岩	辉长岩	二辉岩
SiO ₂	40.03	41.66	37.29	50.02	46.77
TiO ₂	0.26	0.53	0.13	0.45	0.7
Al ₂ O ₃	5.34	5.28	1.25	14.91	7.18
Fe ₂ O ₃	3.01	3.44	9.53	0.8	0.98
FeO	8.02	0.28	3.07	6.68	11.37
MnO	0.15	0.18	0.11	0.14	0.2
MgO	29.05	26.28	36.28	11.69	20.94
CaO	2.86	2.5	0.08	9.36	5.52
Na ₂ O	0.24	0.4	0.1	1.61	0.6
K ₂ O	0.08	0.15	0.02	0.61	0.19
P ₂ O ₅	0.03	0.12	0.03	0.05	0.05
灼失	10.95	9.13	12.12	3.66	5.47
Total	100.02	99.95	100.01	99.98	99.97
Cu	64.6	80.6	163	27.3	145
Pb	11.2	6.34	2.14	911	17.2
Zn	99.2	94.3	96.3	57.7	116
Cr	1 414	724	2 184	108	1 210
Ni	2 696	1 546	1 553	363	625
Co	112	114	140	43.6	105
Li	13.5	6.38	1.07	25.2	9.76
Rb	3.32	4.12	0.5	38.9	7.25
Cs	1.01	0.96	0.056	1.38	1.24
Sr	44.5	52	9.3	274	119
Ba	76.2	35.6	3.28	69.8	52.8
V	74.9	81.4	29.4	191	137
Sc	13.9	13.4	6.7	20.6	23
Nb	1.62	2.62	0.75	0.96	2.42
Ta	0.63	0.54	0.47	0.27	0.26
Zr	16.6	47.6	9.21	18	34.1
Hf	0.55	1.24	0.29	0.58	1.24
Be	0.33	0.4	0.09	0.54	0.53
Ga	5.37	6.28	1.76	12.2	9.35
U	0.18	0.16	0.27	0.16	0.35
Th	0.48	0.64	0.11	0.21	0.98
La	2.18	4.14	0.89	2.82	4.03
Ce	4.73	10.2	1.97	6.63	11.3
Pr	0.64	1.43	0.27	0.98	1.68
Nd	3.02	6.36	1.36	4.52	8.33
Sm	0.8	1.46	0.32	1.15	2.27
Eu	0.26	0.48	0.1	0.54	0.6
Gd	0.88	1.56	0.41	1.38	2.53
Tb	0.12	0.24	0.05	0.22	0.41
Dy	0.92	1.66	0.39	1.47	2.46
Ho	0.21	0.34	0.08	0.32	0.52
Er	0.55	0.92	0.23	0.81	1.51
Tm	0.08	0.14	0.04	0.14	0.23
Yb	0.48	0.85	0.23	0.85	1.44
Lu	0.07	0.14	0.03	0.14	0.2
Y	5.21	9.12	2.33	7.99	14.2
ΣREE	14.94	29.92	6.37	21.97	37.51
LREE	11.63	24.07	4.91	16.64	28.21
HREE	3.31	5.85	1.46	5.33	9.3
LREE/HREE	3.51	4.11	3.36	3.12	3.03
La _N /Yb _N	3.26	3.49	2.78	2.38	2.01
δEu	0.94	0.97	0.84	1.31	0.76
δCe	0.97	1.02	0.98	0.98	1.06

4 岩石地球化学特征

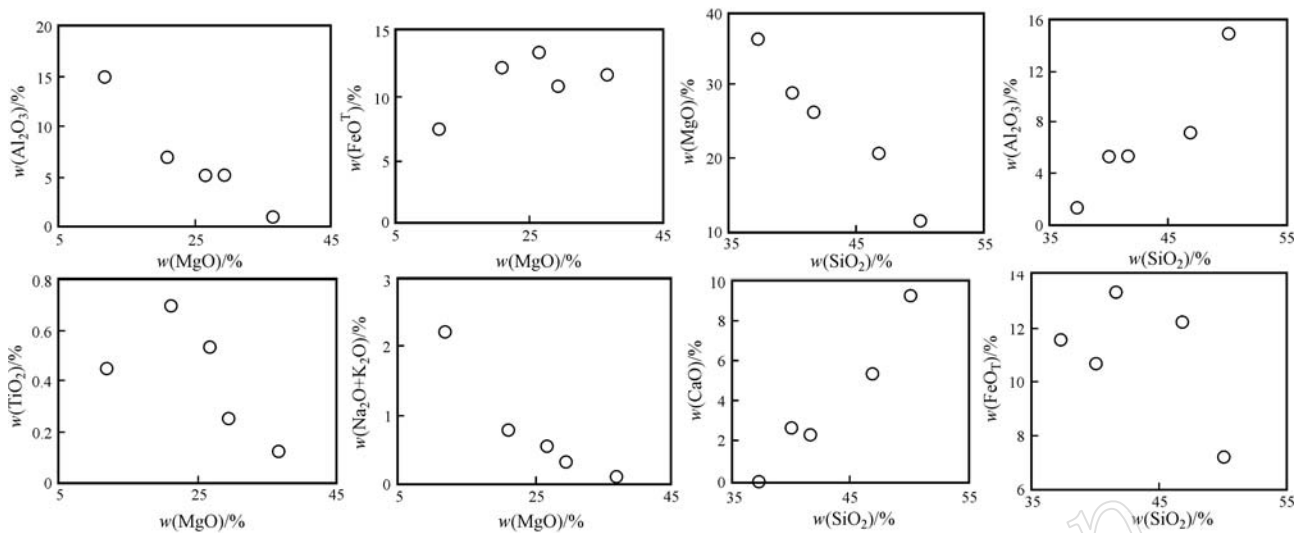
4.1 主量元素

大山头南基性-超基性岩岩体的 SiO₂ 含量总体较低,为 37.29%~50.02%,两件样品 SiO₂ 含量大于 45%(分别为 46.77%和 50.02%),其余 3 件样品 SiO₂ 含量介于 37.29%~41.66%之间;TiO₂ 含量较低,为 0.13%~0.70%;K₂O 与 Na₂O 总体含量较低,分别为 0.02%~0.61%和 0.10%~1.61%;CaO 含量较低,介于 0.08%~9.36%之间;Al₂O₃ 含量变化较大,这主要与岩石中斜长石含量有关。MgO 含量较高,介于 20.94%~36.28%之间;FeO^T 含量介于 7.4%~13.4%之间, $Mg^{\#} [Mg^{\#} = Mg/(Mg + Fe)]$ 值介于 0.74~0.85 之间,低于蛇绿岩中变质橄榄岩的值($Mg^{\#}$ 值 = 0.89~0.91)(Sun and McDonough *et al.*, 1989; 张旗, 1995),这主要是与橄榄石、斜方辉石的堆晶作用有关,相对高的 $Mg^{\#}$ 表明岩石中有相当数量的早期堆晶相(橄榄石、辉石)存在。MgO/FeO^T 的值介于 1.6~3.1 之间,属于铁质镁铁-超镁铁岩。高的 FeO^T 含量往往代表了低氧逸度环境,有利于铜镍硫化物富集(孙赫等, 2007),大山头南岩体的 FeO^T 含量与北山地区的黑山、东天山地区的天宇(唐冬梅等, 2009)、白石泉(柴凤梅等, 2007; 李金祥等, 2007)、图拉尔根(孙赫等, 2007)等以及阿尔泰地区的喀拉通克(张招崇等, 2003; Zhang *et al.*, 2009)铜镍矿化岩体相似,都表现为富铁质的超基性岩特征,有利于铜镍成矿。图 4 反映了 SiO₂ 和 MgO 与各主要氧化物之间的相关关系,其中 MgO 与 SiO₂、Al₂O₃、TiO₂、Na₂O + K₂O 含量呈负相关性。SiO₂ 与 Al₂O₃、CaO 呈正相关性。MgO 和 FeO^T 的含量随着 SiO₂ 含量的增加而增加,表明存在橄榄石和尖晶石的分离和堆晶作用;CaO 和 Al₂O₃ 的含量与 SiO₂ 含量呈正相关性,表明发生了单斜辉石和斜长石的分离和堆晶作用;K₂O 和 TiO₂ 含量与 SiO₂ 含量呈正相关性,反映了岩浆系统中没有钛铁矿物的析出。同样, MgO 与各氧化物之间也存在一定的相关性,也表明岩浆在岩浆房和(或)侵位过程中存在分离结晶作用。MgO 与 SiO₂、Al₂O₃、K₂O + Na₂O 的负相关关系表明了单斜辉石和斜长石的分离结晶作用;MgO 与 FeO^T 的正相关性,说明橄榄石和斜方辉石的部分分离结晶作用。

表 2 大山头南岩体 SHRIMP U-Pb 同位素分析结果表
Table 2 SHRIMP zircon U-Pb isotope dating of the Dashantouan intrusion

Spot	$\epsilon_{\text{U}}(^{206}\text{Pb}_{\text{c}})/\epsilon_{\text{U}}(\text{U})/\epsilon_{\text{U}}(\text{Th})/$		$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$		10^{-6}		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}^1$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}^2$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}^3$		年龄(±1σ)		比值				误差相	
	%	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	$^{206}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	± %	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	± %	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	± %	关系数
11STW1-1	1.20	104	43	0.42	5.3	371 ± 5	374 ± 5	373 ± 5	373 ± 5	43.1 ± 197	348 ± 27	0.050 3	3.4	0.413	3.6	0.059 5	1.5	0.37		
11STW1-2	1.15	86	45	0.55	4.4	372 ± 8	374 ± 8	372 ± 8	372 ± 8	148 ± 210	365 ± 25	0.050 3	4.5	0.412	4.9	0.059 4	2.3	0.40		
11STW1-3	—	112	30	0.27	5.8	378 ± 5	377 ± 5	377 ± 5	377 ± 5	429 ± 113	393 ± 23	0.054 0	5.1	0.449	5.4	0.060 3	1.4	0.31		
11STW1-4	0.57	84	53	0.65	4.4	380 ± 5	381 ± 5	380 ± 6	380 ± 6	275 ± 144	385 ± 17	0.050 6	4.5	0.423	4.8	0.060 7	1.6	0.37		
11STW1-5	1.42	114	52	0.47	5.8	372 ± 5	376 ± 5	376 ± 5	376 ± 5	143 ± 231	316 ± 25	0.052 6	3.1	0.436	3.4	0.060 0	1.4	0.38		
11STW1-6	0.49	95	59	0.64	5.0	381 ± 5	382 ± 5	382 ± 6	382 ± 6	316 ± 158	377 ± 15	0.053 6	5.6	0.451	5.8	0.061 0	1.5	0.30		
11STW1-7	1.09	73	46	0.66	3.7	376 ± 6	378 ± 6	378 ± 6	378 ± 6	208 ± 207	353 ± 22	0.055 7	4.1	0.464	4.5	0.060 4	1.7	0.38		
11STW1-8	2.14	70	28	0.41	3.6	376 ± 6	381 ± 6	380 ± 6	380 ± 6	−153 ± 363	311 ± 45	0.052 6	4.2	0.440	4.5	0.060 7	1.7	0.36		
11STW1-9	0.12	142	102	0.74	7.3	376 ± 5	374 ± 5	373 ± 5	373 ± 5	499 ± 67	393 ± 10	0.052 6	3.7	0.432	4.0	0.059 6	1.5	0.39		
11STW1-10	2.09	79	50	0.66	3.9	361 ± 6	364 ± 5	362 ± 6	362 ± 6	82.0 ± 297	346 ± 27	0.051 2	5.2	0.408	5.5	0.057 8	1.7	0.36		
11STW1-11	0.47	210	158	0.78	10.7	373 ± 4	372 ± 4	372 ± 5	372 ± 5	400 ± 80	374 ± 9	0.054 2	2.9	0.444	3.2	0.059 5	1.3	0.41		
11STW1-12	0.49	130	86	0.69	6.7	375 ± 7	376 ± 7	376 ± 8	376 ± 8	345 ± 106	374 ± 14	0.053 6	3.4	0.443	3.8	0.060 0	2.2	0.46		

注：1. 以实测²⁰⁴Pb校正的普通 Pb；2. 假设²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U 年龄一致的普通 Pb；3. 假设²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁸Pb/²³²Th 年龄一致校正的普通 Pb；^{Pb_c}和 ^{Pb_u} 分别指普通 Pb 和放射成因 Pb。

图4 大山头南岩体 SiO_2 、 MgO 和主要氧化物变化图解Fig. 4 Diagrams of SiO_2 and MgO versus some major oxides of Dashantounan complex

4.2 微量元素、稀土元素

大山头南岩体样品的过渡金属元素含量变化较大,其中超基性岩 Ni 含量介于 $1.553 \times 10^{-6} \sim 2.696 \times 10^{-6}$ 之间, Cu 介于 $64.6 \times 10^{-6} \sim 163.0 \times 10^{-6}$ 之间, Co 介于 $112 \times 10^{-6} \sim 140 \times 10^{-6}$ 之间,基性岩 Cu、Ni、Co 的含量明显较低(表1)。一般来说,部分熔融程度越大,岩浆中 Ni/Cu 值越大(Garuti *et al.*, 1997),大山头南岩体中 Ni/Cu 值介于 4~42 之间,平均为 18。在微量元素原始地幔标准化图解(图 5a)上,总体富集 Rb、Ba、Th、U、Ta,相对亏损 Nb、P、Hf、Zr、Y、Ti,尤其亏损 Nb 元素, Nb 的亏损是大陆拉斑玄武岩普遍的特征,这可能是陆壳混染作用的结果(Arndt and Christensen, 1992)。辉长岩中 Sr 正异常,超镁铁岩中表现出负异常或弱负异常,是受岩石中斜长石的堆积作用影响的。含矿岩体具有岛弧和 MORB 的双重性质,明显不同于塔里木大陆溢流玄武岩以及相关侵入岩的特征,表明与塔里木地幔柱无关,其原始岩浆应来自于受俯冲流体交代的地幔楔,与洋壳俯冲或碰撞造山后伸展俯冲板片拆离、软流圈地幔上涌有关(Zhang *et al.*, 2009; Song *et al.*, 2011; 邓宇峰等, 2011; Xie *et al.*, 2012)。

大山头南岩体稀土元素球粒陨石标准化配分曲线表现为轻稀土元素稍富集的右倾型(图 5b),暗示岩浆演化过程中可能存在着辉石的分离结晶,明显不同于蛇绿岩套中岩石的 LREE 亏损的分布模式,

同时也表明了这些样品的同源性。所有样品的稀土元素总量介于 $6.37 \times 10^{-6} \sim 37.51 \times 10^{-6}$ 之间, LREE/HREE 为 3.03~4.11, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 和 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 分别介于 2.01~3.49 和 1.78~2.84 之间,轻重稀土元素发生了明显的分馏,较为富集轻稀土元素,与大陆裂谷拉斑玄武岩稀土元素分布模式相似。除辉长岩(11S-Q1)外, Eu 具有弱负异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.76 \sim 0.97$),样品的 δCe 值的变化范围为 0.97~1.06,基本未显示铈异常。Nb/U 值介于 2.78~16.38,平均为 8.21,其中 4 件样品的 Nb/U 值接近于大陆地壳的 Nb/U 值(约 9.7)(Campbell and Griffiths, 1993), Ce/Pb 值为 0.01~1.61,平均值为 0.72,与典型地幔的 $\text{Ce}/\text{Pb} = 25 \pm 5$ 值相差甚远(Furman *et al.*, 2004),暗示岩体在侵位过程中受到强烈的地壳物质混染;

5 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄

5.1 锆石特征

根据锆石镜下特征和阴极发光图像(图 6),大山头南辉长岩中锆石具半透明,多呈短柱状及不规则状,其晶棱锐、清晰,呈自形晶-半自形,粒径为 80~150 μm ,大部分锆石具扇形分带结构,可能是锆石结晶时外部环境的变化导致各晶面的生长速率不一致造成的,少量具典型振荡环带结构,振荡环带相对较宽,这与中基性岩形成温度较高,微量元素扩散快

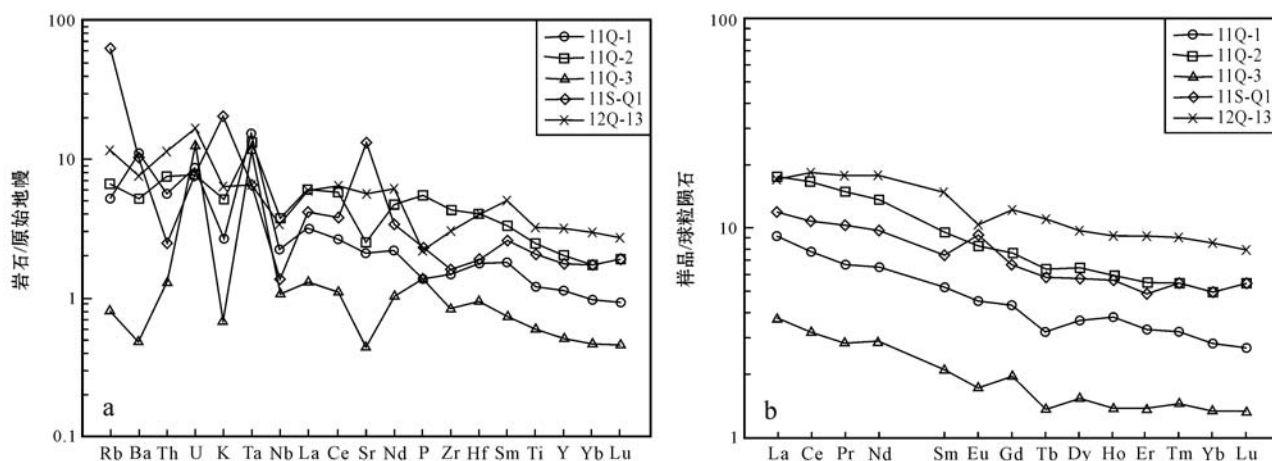


图5 大山头南岩体稀土元素球粒陨石标准化分布模式图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spidergram of the Dashantounan intrusion (b) (after Sun and McDonough, 1989)

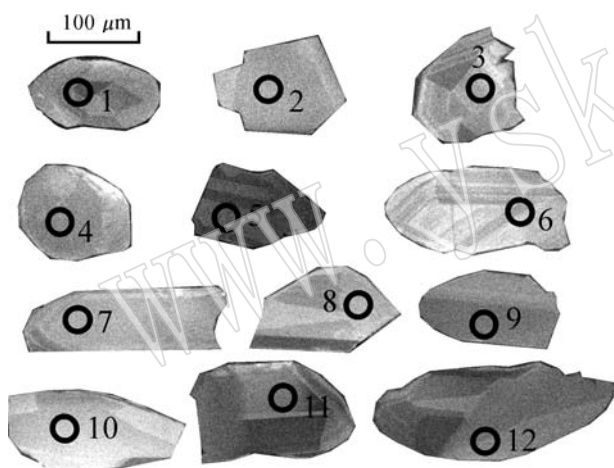


图6 大山头南辉长岩锆石阴极发光图像

Fig. 6 CL images of zircons from Dashantounan gabbro

有关。大部分锆石的内部结构相似,无明显的核幔结构,具有典型的基性岩浆成因锆石的特征。 Th/U 比值(除 11STW1-3)为 0.41~0.78,平均 0.61,并显示出良好的正相关关系,表明所测定的锆石都是从岩浆中结晶形成的。

5.2 同位素年龄

本次共选取了 12 颗锆石进行 SHRIMP U-Pb 测年,测点分布于锆石的不同部位,锆石环带清晰,所有测点年龄均分布于谐和线附近,形成密集的一簇(图 7a)。12 个测点计算得到 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值的加权平均年龄及谐和年龄为 $374.3 \pm 3.0 \text{ Ma}$ (MSWD = 0.92)(图 7b),这个年龄代表锆石的结晶年龄,代表

该岩体的形成年龄,即该辉长岩体形成于中泥盆世。

6 讨论

6.1 侵入年龄对岩石成因的指示意义

本次测试大山头南岩体辉长岩样品锆石年龄为 $374.3 \pm 3.0 \text{ Ma}$, 与其东部的黑山岩体、怪石山岩体、大山头岩体(杨建国等, 2012; Xie *et al.*, 2012; 闫海卿等, 2012; 徐刚, 2013)成岩年龄基本一致(表 3)。这一系列锆石 U-Pb 年龄的获得,对黑山-大山头一带镁铁-超镁铁质岩体的形成时代进行了很好的限定,同时这一年龄也代表了该地区铜镍矿床的成矿时代,即该地区岩体为泥盆纪镁铁-超镁铁质岩浆活动的产物,且活动时限持续相对较长(353~397 Ma),具多期活动的特点。

北山褶皱带中西部还存在坡北、红石山、旋窝岭和罗东等镁铁-超镁铁质岩体,其形成年龄大多为早二叠世(李华芹等, 2006; 陈疆等, 2013),与东天山地区镁铁-超镁铁质岩体(黄山、黄山东、香山、图拉尔根、天宇、白石泉等)形成年龄一致(表 3),说明北山地区不仅存在早二叠世镁铁-超镁铁岩体,也存在泥盆纪镁铁-超镁铁岩体,西部以早二叠世为主,中部大山头-黑山一带以泥盆纪为主,两个时代的岩体都存在铜镍矿化,均具有形成铜镍矿的潜力,这已经被发现(红石山铜镍矿、坡一铜镍矿、罗东铜镍矿和黑山铜镍矿、大山头、大山头南铜镍矿)的铜镍矿

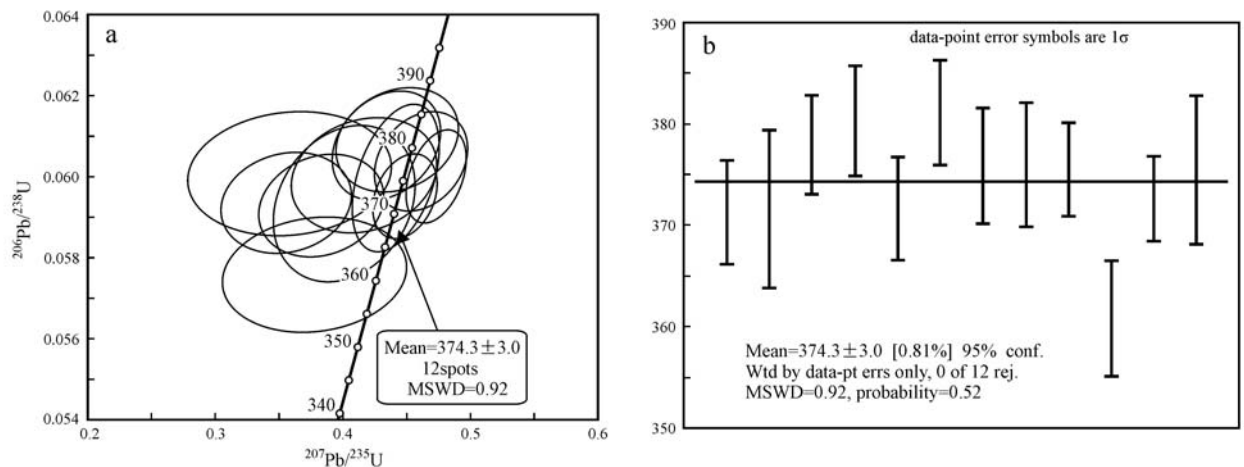


图 7 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)和²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄图解(b)
Fig. 7 Concordia diagram of SHRIMP zircon U-Pb dating age (a) and ²⁰⁶Pb/²³⁸U weighted average age (b) diagram

表 3 东天山与北山黑山-大山头一带含铜镍矿基性-超基性岩体成岩年龄对比
Table 3 Petrogenetic age of mafic-ultramafic rock in the East Tianshan and Beishan area

地区名称	岩体名称	岩石类型	测试方法	成岩年龄/Ma	资料来源
甘肃北山	黑山岩体	角闪辉长岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	367.4 ± 5.4	徐刚, 2013
	黑山岩体	闪长岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	377.0 ± 5.6	徐刚, 2013
	黑山岩体	辉长岩	ID-TIMS	356.40 ± 0.6	Xie <i>et al.</i> , 2012
	黑山岩体	辉长岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	374.6 ± 5.2	杨建国等, 2012
	黑山岩体	辉长岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	358 ± 5	Xie <i>et al.</i> , 2012
	怪石山岩体	辉长岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	358.6 ± 3.9	未发表
	大山头岩体	辉长岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	359.3 ± 5.7	闫海卿等, 2012
	大山头岩体	辉长岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	396.7 ± 3.8	未发表
	大山头南岩体	辉长岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	374.3 ± 3	未发表
东天山	黄山东铜镍矿	矿石	Re-Os	282 ± 20	毛景文等, 2002
	黄山东	黑云母橄榄苏长岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	274.3 ± 3	韩宝福等, 2004
	黄山	辉长岩	LA-LCP-MS U-Pb	284.5 ± 2.5	张小连等, 2012
	香山西	钛铁辉长岩	SIMS 锆石 U-Pb	278.6 ± 1.8	肖庆华等, 2010
	香山	淡色辉长岩	锆石 U-Pb	283.2 ± 2.1	李德东等, 2012
	土墩南	橄榄辉长岩	SIMS 锆石 U-Pb	274.2 ± 5.7	李德东等, 2012
	牛毛泉	角闪石	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	289.7	李德东等, 2012
	红梁子	辉长岩	SIMS 锆石 U-Pb	309.7 ± 1.5	李德东等, 2012
	葫芦	基性-超基性岩	Re-Os	283 ± 13	陈世平等, 2005
	图拉尔根	辉长岩	锆石 U-Pb	300.5 ± 3.2	三金柱等, 2010

床所证实。前人认为北山及东天山地区早二叠世镁铁-超镁铁质岩体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; 夏明哲等, 2008; 唐冬梅等, 2009; 徐刚, 2013)。结合北山地区构造演化(杨合群等, 2008), 大山头南、大山头及黑山岩体形成于北山中带志留纪-泥盆纪板块俯冲及碰撞造山阶段, 其岩体地球化学特征与北山中带中晚泥盆世火山岩特征相吻合(Xie *et al.*, 2012), 大山头岩体地球化学特征也显

示其岩浆源区为富集岩石圈地幔, 并受到强烈的洋壳俯冲流体交代和地壳物质的同化混染(闫海卿等, 2012), 均显示了与板块俯冲作用有关的岩浆机制; 在大山头南岩体南部及西部发育大量花岗岩类, 其形成时代介于 350~436 Ma 之间(毛启贵等, 2006; 李舳等, 2011), 与大山头南岩体侵位时间相近, 推测它们形成时具有相同的构造背景, 前人对这一地区的花岗岩类成因进行了研究, 认为其形成于由同造山挤压环境向后造山伸展环境的转化阶段(李舳等,

2009, 2011), 与古大洋俯冲板片断离有关(赵泽辉等, 2007; 李舳等, 2011); 依据前人对该地区镁铁超镁铁岩体及同时代花岗岩类的研究成果(王亚磊, 2011; Xie *et al.*, 2012; 徐刚等, 2012, 2013), 认为大山头南岩体形成于活动大陆边缘或(被动)大陆边缘裂谷背景下, 由于俯冲板块的拆离作用造成软流圈部分熔融上涌, 形成高镁玄武质原生岩浆, 上涌过程中交代被俯冲物质(岩石圈地幔), 并在上侵就位过程中发生地壳物质同化混染。

6.2 成矿潜力

大山头南岩体的 $Mg^\#$ 值介于 0.74~0.85 之间, MgO/FeO^T 的值介于 1.6~3.1 之间, 与黑山岩体相近, 属铁质镁铁-超镁铁岩, 并与含铜镍矿的黑山岩体位于同一成矿带上。1:20 万化探在出露区存在较好 Cu-Ni-Co 化探异常, 异常分带明显; 1:1 万高精度磁法测量, 在含矿岩体上中心地段圈出面积约 2 km² 的强磁异常, 正、负相伴, 磁场强度最大值 720 nT, 最小值 -520 nT; 激电测深反演剖面圈出一个高阻高极化率异常, 异常位于 200 m 以下至 600 m 未封闭, 极化率 5%~8%, 电阻率 900~1 800 $\Omega \cdot m$, 与地表橄榄辉长岩及其中的星点状铜镍矿化超基性岩对应。大山头南含铜镍矿岩体中圈出多个铜镍矿化体和 1 个铜镍矿体, 矿体厚约 5 m, 铜含量 0.1×10^{-2} ~ 0.3×10^{-2} , Ni 含量 0.42×10^{-2} 。综合以上因素, 认为该岩体具有良好的铜镍找矿潜力。

7 结论

(1) 大山头南杂岩体岩石类型主要有花岗闪长岩、闪长岩、辉长岩、苏长辉长岩、橄榄苏长辉长岩、橄榄二辉岩、二辉橄榄岩、方辉辉橄岩、单斜辉橄岩、纯橄岩等; 岩石化学特征显示 K_2O 、 Na_2O 、 TiO_2 含量较低, $Mg^\#$ 值介于 0.74~0.85 之间, MgO/FeO^T 的值介于 1.6~3.1 之间, 属于铁质镁铁-超镁铁岩; AFM 图解显示该岩体具拉斑玄武岩的演化趋势; 稀土元素总量较低, 介于 6.37×10^{-6} ~ 37.51×10^{-6} 之间; 稀土元素标准化配分曲线表现为轻稀土元素稍富集的右倾型, LREE/HREE 比值介于 3.03~4.11, 轻重稀土发生了明显的分馏。

(2) 采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 方法, 获得大山头南杂岩体中辉长岩中锆石平均年龄为 374.3 ± 3 Ma (MSWD=0.92), 证明大山头南岩体形成于中晚泥盆世, 与形成大型镍矿床的黑山岩体年龄一致; 大山

头南岩体及黑山岩体成岩年龄与新疆北部及北山西段含铜镍硫化物矿床多形成于早二叠世(270~290 Ma)明显不同; 大山头南岩体年龄的获得也说明北山褶皱带除存在与东天山相同的含铜镍硫化物的岩体外, 还存在着一个重要的铜镍成矿期, 这为今后该地区铜镍找矿提供了新的找矿空间。

致谢 感谢北京离子探针中心在 SHRIMP 测年工作中给予的支持与帮助, 并对各位审稿专家对本文提出的宝贵意见表示衷心感谢。

References

- Arndt N T and Christensen U. 1992. The role of lithospheric mantle in continental flood volcanism: Thermal and geochemical constraints [J]. *Geophysical Research*, 97: 10 967~10 981.
- Campbell I H and Griffiths R W. 1993. The evolution of mantle's chemical structure[J]. *Lithos*, 30: 389~399.
- Chai Fengmei, Zhang Zhaochong, Dong Lianhui, *et al.* 2007. Geochemistry and petrogenesis of the Baishiquan Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion in the Central Tianshan, Xinjiang, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2 366~2 378(in Chinese with English abstract).
- Chen Jiang, Xu Yongbo, Wang Fang, *et al.* 2013. Mafic-ultramafic nickel-copper metallogenic regularity of Xinjiang Pobei-Beacon hill [J]. *Xinjiang Geology*, 31(2): 184~189(in Chinese with English abstract).
- Chen Shiping, Wang Denghong, Qu Wenjun, *et al.* 2005. Geological features and Ore formation of the Hulu Cu-Ni sulfide deposit, eastern Tianshan, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 23(3): 230~233 (in Chinese with English abstract).
- Deng Yufeng, Song Xieyan, Chen Liemeng, *et al.* 2011. Features of the mantle source of the Huangshanxi Ni-Cu sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion, eastern Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3 640~3 652(in Chinese with English abstract).
- Furman T, Bryce J G, Karson J, *et al.* 2004. East African rift system plume structure: Insights from quaternary mafic lavas of Turkana, Kenya[J]. *Journal of Petrology*, 45: 1 069~1 088.
- Garuti G, Fershtater G, Bea F, *et al.* 1997. Platinum-group elements as petrological indications in mafic-ultramafic complexes of the central and southern Urals: preliminary results[J]. *Tectonophysics*, 276: 181~194.

- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, *et al.* 2004. SHRIMP zircon U-Pb ages of Kalatongke No.1 and Huangshandong Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic complexes, North Xinjiang, and geological implications [J]. Chinese Sciences Bulletin, 49(22): 2 324~2 328(in Chinese).
- Li Dedong, Wang Yuwang, Long Lingli, *et al.* 2012. Chronology and geochemistry of the transitional mineralized mafic-ultramafic rock bodies in the Eastern Tianshan Mountains[J]. Geological Review, 58(6): 1 145~1 160(in Chinese with English abstract).
- Li Huaqin, Chen Fuwen, Mei Yuping, *et al.* 2006. Isotopic ages of No.1 intrusive body in Pobei mafic-ultramafic belt of Xinjiang and their geological significance[J]. Mineral Deposits, 25(4): 463~469(in Chinese with English abstract).
- Li Jinxiang, Qin Kezhang, Xu Xingwang, *et al.* 2007. Geochemistry of Baishiquan Cu-Ni bearing mafic-ultramafic complex in East Tianshan, Xinjiang: Constraints on ore genesis and tectonic setting[J]. Mineral Deposits, 26(1): 43~57(in Chinese with English abstract).
- Li Shan, Wang Tao, Tongying, *et al.* 2009. Identification of the Early Devonian Shuangfengshan A-type granites in Liuyuan area of Beishan and its implications to tectonic evolution[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 28(5): 407~422(in Chinese with English abstract).
- Li Shan, Wang Tao, Tongying, *et al.* 2011. Zircon U-Pb age, origin and its tectonic significances of Huitongshan Devonian K-feldspar granites from Beishan orogen, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(10): 3 055~3 070(in Chinese with English abstract).
- Lu Yuanfa. 2004. Geokit-A geochemical toolkit for Microsoft Excel[J]. Geochimica, 33(5): 459~464(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Yang Jianmin, Qu Wenjun, *et al.* 2002. Re-Os dating of Cu-Ni sulfide ores from Huangshandong deposit in Xinjiang and its geodynamic significance[J]. Mineral Deposits, 21(4): 323~330(in Chinese with English abstract).
- Mao Qigui, Xiao Wenjiao, Han Chunming, *et al.* 2006. Zircon U-Pb age and the geochemistry of the Baishiquan mafic-ultramafic complex in the Eastern Tianshan, Xinjiang province: constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(1): 153~162(in Chinese with English abstract).
- San Jinzhu, Qin Kezhang, Tang Zhongli, *et al.* 2010. 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, 26(10): 3 027~3 035(in Chinese with English abstract).
- Shao Xiaoyang, Sun Bainian, Li Xiangchuan, *et al.* 2010. Geological features and metallogenesis of Heishan copper-nickel deposit in Subei county of Gansu Province[J]. Gansu Geology, 19(3): 19~25(in Chinese with English abstract).
- Song Biao, Zhang Yuhai and Liu Dunyi. 2002. Introduction to the naissance of SHRIMP and its contribution to isotope geology[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 23(1): 58~62(in Chinese with English abstract).
- Song Xieyan, Xie Wei, Deng Yufeng, *et al.* 2011. Slab break-off and the formation of Permian mafic-ultramafic intrusions in southern margin of Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang, NW China[J]. Lithos, 127(1~2): 128~143.
- Steiger R H and Jdger E. 1977. Subcommittee on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cos-mochronology [J]. Earth Planet Sci Lett, 36(3): 359~362.
- Sun He, Qin Kezhang, Xu Xingwang, *et al.* 2007. Petrological Characteristics and copper-nickel Ore-forming processes of Early Permian mafic-ultramafic intrusion belt in East Tianshan[J]. Mineral Deposits, 26(1): 98~108(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes[A]. Saunders A D and Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins[C]. Geological Society London Special Publication, 42: 313~345.
- Tang Dongmei, Qin Kezhang, Sun He, *et al.* 2009. Lithological, Chronological and geochemical characteristics of Tianyu Cu-Ni deposit: Constraints on source and genesis of mafic-ultramafic intrusions in eastern Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(4): 817~831(in Chinese with English abstract).
- Wang Lei, Yang Jianguo, Wang Xiaohong, *et al.* 2013. Comparison of Geochemistry Characteristics and Analysis on the Metallogenic Potential of Ultrabasic Rocks in Shijintan of Beishan Area, Gansu Province[J]. Xinjiang Geology, 31(1): 65~71(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaohong, Yang Jianguo, Wanglei, *et al.* 2014. Metallogenic Potential of Copper and Nickel Mineralization in the Mafic-Ultramafic Rocks in Dashantou, Beishan, Gansu Province[J]. Geological Journal of China Universities, 20(2): 222~229(in Chinese with English abstract).
- Wang Yalei. 2011. Petrogenesis and Mineralization of Heishan Intrusion in Beishan Area, Gansu, Province, China[M]. Xian: Chang'an University(in Chinese with English abstract).
- Williams I S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe[A]. McKibben M A, Shanks III W C and Ridley W I. Applications of

- Microanalytical, Techniques to Understanding Mineralizing Processes[C]. Reviews in Economic Geology, 7: 1~35.
- Xia Mingzhe, Jiang Changyi, Qian Zhuangzhi, *et al.* 2008. Geochemistry and petrogenesis for Hulu intrusion in East Tianshan, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(12): 2 749~2 760(in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghua, Qin Kezhang, Tang Dongmei, *et al.* 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[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(2): 503~522(in Chinese with English abstract).
- Xie Wei, Song Xieyan, Deng Yufeng, *et al.* 2012. Geochemistry and petrogenetic implications of a late Devonian mafic-ultramafic intrusion at the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Lithos, 144~145: 209~230.
- Xie Wei, Song Xieyan, Deng Yufeng, *et al.* 2013. Geology and olivine geochemistry of the Heishan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, Gansu, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(10): 3 487~3 502(in Chinese with English abstract).
- Xu Gang. 2013. The Minerogenesis of Heishan Nickel-Copper Sulfide Deposit, Gansu Beishan, China[D]. Chang'an University.
- Xu Gang, Tang Zhongli, Wang Yali, *et al.* 2012. Features and genetic significance of olivine from Heishan magmatic sulfide ore-bearing intrusion in Beishan area, Gansu Province[J]. Mineral Deposits, 31(5): 1 075~1 086(in Chinese with English abstract).
- Yan Haiqing, Zhao Huanqiang, Ding Ruiying, *et al.* 2012. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of the Dashantou Basic Complex and Its Geological Significance in Beishan Area, Gansu Province[J]. Northwestern Geology, 45(4): 216~228(in Chinese with English abstract).
- Yang Hequn, Li Ying, Li Wenming, *et al.* 2008. General discussion on metallogenic tectonic setting of Beishan Mountain, Northwestern China[J]. Northwestern Geology, 41(1): 22~27(in Chinese with English abstract).
- Yang Jianguo, Wang Lei, Wang Xiaohong, *et al.* 2012. Zircon SHRIMP U-Pb dating of Heishan mafic-ultramafic complex in the Beishan area of Gansu Province and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 31(2/3): 448~454(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi. 1995. Some problems concerning the ophiolite study[J]. Acta Petrologica Sinica, 11(Suppl): 228~240(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaolian, Wu Changzhi, Huang Jianhua, *et al.* 2012. Geochronology and its geological significance of the Huangshan intrusion in Eastern Tianshan, Xianjiang[J]. Geological Science and Technology Information, 31(1): 22~26(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Mao Jingwen, Chai Fengmei, *et al.* 2009. Geochemistry of the Permian Kalatongke mafic intrusions, Northern Xinjiang, NW China: Implications for the Genesis of the Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposit[J]. Economic Geology, 104(2): 185~203.
- Zhang Zhaochong, Yan Shenghao, Chen Bailin, *et al.* 2003. Geochemistry of the Kalatongke 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).
- Zhao Zehui, Guo Zhaojie and Wang Yi. 2007. Geochronology, geochemical characteristics and tectonic implications of the granitoids from Liuyuan area, Beishan, Gansu province, northwest China[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(8): 1 847~1 860(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 柴凤梅, 张招崇, 董连慧, 等. 2007. 新疆中天山白石泉含铜镍矿镁铁-超镁铁岩体地球化学特征与岩石成因[J]. 岩石学报, 23(10): 2 366~2 378.
- 陈疆, 徐永波, 王芳, 等. 2013. 新疆坡北-笔架山地区基性-超基性岩铜镍矿成矿规律[J]. 新疆地质, 31(2): 184~189.
- 陈世平, 王登红, 屈文俊, 等. 2005. 新疆葫芦铜镍硫化物矿床的地质特征与成矿时代[J]. 新疆地质, 23(3): 230~233.
- 邓宇峰, 宋谢炎, 陈列锰, 等. 2011. 东天山黄山西含铜镍矿镁铁-超镁铁岩体岩浆地幔源区特征研究[J]. 岩石学报, 27(12): 3 640~3 652.
- 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(22): 2 324~2 328.
- 李德东, 王玉往, 龙灵利, 等. 2012. 东天山过渡型矿化镁铁-超镁铁岩年代学和地球化学特征[J]. 地质评论, 58(6): 1 145~1 160.
- 李华芹, 陈富文, 梅玉萍, 等. 2006. 新疆坡北基性-超基性岩带 I 号岩体 Sm-Nd 和 SHRIMP U-Pb 同位素年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 25(4): 463~469.
- 李金祥, 秦克章, 徐兴旺, 等. 2007. 新疆东天山白石泉 Cu-Ni 硫化物矿床杂岩体的地球化学特征及其对矿床成因和构造背景的制约[J]. 矿床地质, 26(1): 43~57.
- 李舳, 王涛, 童英, 等. 2009. 北山柳园地区双峰山早泥盆世

- A型花岗岩的确定及其构造演化意义[J]. 岩石矿物学杂志, 28(5): 407~422.
- 李 舫, 王 涛, 童 英, 等. 2011. 北山辉铜山泥盆纪钾长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、成因及构造意义[J]. 岩石学报, 27(10): 3 055~3 070.
- 路远发. 2004. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 33(5): 459~464.
- 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.
- 毛启贵, 肖文交, 韩春明, 等. 2006. 新疆东天山白石泉铜镍矿床基性-超基性岩体锆石 U-Pb 同位素年龄, 地球化学特征及其对古亚洲洋闭合时限的制约[J]. 岩石学报, 22(1): 153~162.
- 三金柱, 秦克章, 汤中立, 等. 2010. 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, 26(10): 3 027~3 035.
- 邵小阳, 孙柏年, 李相传, 等. 2010. 甘肃北黑山铜镍矿成矿地质特征及成因探讨[J]. 甘肃地质, 19(3): 19~25.
- 宋 彪, 张玉海, 刘敦一. 2002. 微量原位分析仪器 SHRIMP 的产生与锆石同位素地质年代学[J]. 质谱学报, 23(1): 58~62.
- 孙 赫, 秦克章, 徐兴旺, 等. 2007. 东天山镁铁质-超镁铁质岩带岩石特征及铜镍成矿作用[J]. 矿床地质, 26(1): 98~108.
- 唐冬梅, 秦克章, 孙 赫, 等. 2009. 天字铜镍矿床的岩相学、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[J]. 岩石学报, 25(4): 817~831.
- 王 磊, 杨建国, 王小红, 等. 2013. 甘肃北山拾金滩岩体与邻区超基性岩体岩石地球化学特征对比及成矿潜力浅析[J]. 新疆地质, 31(1): 66~71.
- 王小红, 杨建国, 王 磊, 等. 2014. 甘肃北山大山头铜镍矿化基性-超基性岩成矿潜力研究[J]. 高校地质学报, 20(2): 222~229.
- 王亚磊. 2011. 甘肃北山地区黑山岩体岩石成因及成矿作用[D]. 西安: 长安大学.
- 夏明哲, 姜常义, 钱壮志, 等. 2008. 新疆东天山葫芦岩体岩石学与地球化学研究[J]. 岩石学报, 24(12): 2 749~2 760.
- 肖庆华, 秦克章, 唐冬梅, 等. 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[J]. 岩石学报, 26(2): 503~522.
- 颜 炜, 宋谢炎, 邓宇峰, 等. 2013. 甘肃黑山铜镍硫化物含矿岩体的地质特征及橄榄石成因探讨[J]. 岩石学报, 29(10): 3 487~3 502.
- 徐 刚. 2013. 甘肃北山地区黑山铜镍硫化物矿床成矿作用研究[D]. 长安大学.
- 徐 刚, 汤中立, 王亚磊, 等. 2012. 甘肃北山黑山岩浆铜镍硫化物矿床橄榄石特征及成因意义[J]. 矿床地质, 31(5): 1 075~1 086.
- 闫海卿, 赵焕强, 丁瑞颖, 等. 2012. 甘肃北山大山头基性杂岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 西北地质, 45(4): 216~228.
- 杨合群, 李 英, 李文明, 等. 2008. 北山成矿构造背景概论[J]. 西北地质, 41(1): 22~27.
- 杨建国, 王 磊, 王小红, 等. 2012. 甘肃北山地区黑山铜镍矿化基性-超基性杂岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质通报, 31(2/3): 448~454.
- 张 旗. 1995. 蛇绿岩研究中的几个问题[J]. 岩石学报, 11(增刊): 228~240.
- 张小连, 吴昌志, 黄建华, 等. 2012. 东天山黄山岩体的侵位时代及其地质意义[J]. 地质科技情报, 31(1): 22~26.
- 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.
- 赵泽辉, 郭召杰, 王 毅. 2007. 甘肃北山柳园地区花岗岩类的年代学、地球化学特征及构造意义[J]. 岩石学报, 23(8): 1 847~1 860.