

# 南祁连化隆地区下什堂含铜镍矿基性-超基性岩体成因研究: 锆石年代学、地球化学和 Sr-Nd 同位素约束\*

张照伟 李文渊 王亚磊 高永宝

ZHANG ZhaoWei, LI WenYuan, WANG YaLei and GAO YongBao

国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 西安 710054

Key Laboratory for the study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MLR, Xi'an 710054, China

2013-12-15 收稿, 2014-12-15 改回.

Zhang ZW, Li WY, Wang YL and Gao YB. 2015. The genesis study on Xiashentang basic-ultrabasic intrusion associated with Ni-Cu mineralization in Hualong, southern Qilian Mountains: Zircon geochronology, geochemistry and Sr-Nd isotopic constraints. *Acta Petrologica Sinica*, 31(9):2539–2548

**Abstract** The Xiashentang basic-ultrabasic intrusion which mainly composed of peridotites and pyroxenite was intruded into Hualong rocks group in the southern margin of the Qilian Block, sulfide mineralization in the intrusion is dominated by disseminated sulfides of pyrrhotite, pentlandite and chalcopyrite. Precise LA-ICP-MS zircon U-Pb dating reveals that the ages of the Xiashentang intrusion is  $449.8 \pm 2.4$  Ma. The Xiashentang intrusion was characterized by light REE enrichments relative to heavy REE and pronounced negative Nb-Ta anomalies, consistent with the products of arc magmatism. The  $\epsilon_{Nd}$  values from  $-2.62$  to  $-2.52$  and elevated  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$  ratios from 0.709012 to 0.714682. Sr-Nd isotopic compositions show that the parent magma of Xiashentang in Hualong originated from ever metasomatic enriched mantle source. The isotope data collectively suggest that silicification was involved in ore genesis at Xiashentang, and played a significant controlling role. Our results show that the Hualong region of southern Qilian Mountains may host the post-collisional extension type, small Ni-Cu sulfide deposits. Our main focuses are the ages of the intrusions, the style of magmatism and sulfide mineralization, which have practical significance for the future of mineral exploration and mineralization theories study on Ni-Cu deposits in this region.

**Key words** Zircon U-Pb dating; Sr-Nd isotopes; Basic-ultrabasic intrusions; Genesis; Xiashentang; Southern Qilian Mountains

**摘要** 主要由橄榄岩相、辉石岩相组成的下什堂基性-超基性岩体侵位于南祁连造山带化隆岩群中, 且伴有磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿等的硫化物矿化。精确的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年获得了下什堂岩体的形成年龄为  $449.8 \pm 2.4$  Ma。地球化学表现为轻稀土富集和明显的 Nb-Ta 负异常特征,  $\epsilon_{Nd}$  值在  $-2.62 \sim -2.52$  之间,  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$  比值集中在 0.709012 ~ 0.714682 之间。Sr-Nd 同位素表明, 下什堂基性-超基性岩体的母岩浆来自一个曾经被交代富集的地幔源区。地壳富硅组成的同化混染在成矿过程中起了很重要的控制作用。结合区域构造演化背景与成矿认识, 认为南祁连化隆地区的成岩成矿可能与俯冲结束后, 后碰撞伸展环境密切相关, 这对于指导区域找矿实践和成矿理论研究均具有重要的地质意义。

**关键词** 锆石 U-Pb 定年; Sr-Nd 同位素组成; 基性-超基性岩体; 成因; 下什堂; 南祁连

**中图法分类号** P588.125; P597.3; P618.41; P618.63

内已发现的几处铜镍矿床(点)均赋存于基性-超基性岩体中(李文渊, 2004; 梁光河等, 2007), 其中拉水峡基性-超基性岩体铜镍矿化率高达 90% 以上, 岩体延伸不过百米, 宽仅十几米, 就产出 Ni 金属量 2 万多吨(高永宝等, 2012a)。但与拉水峡岩体同一岩带的其余岩体的含矿性尚不清楚, 严重制约

## 1 引言

位于南祁连山东段的化隆基性-超基性岩带, 是青海省重要的铜镍成矿和找矿潜力区带之一(张照伟等, 2009)。带

\* 本文受国家自然科学基金项目(41102050)和中国地质调查局地质科研项目(121201112092、1212011121088、1212011120183)联合资助。

第一作者简介: 张照伟, 男, 1976 年生, 副研究员, 博士, 主要从事岩浆作用矿床及区域成矿研究, E-mail: zhaoweiz@126.com

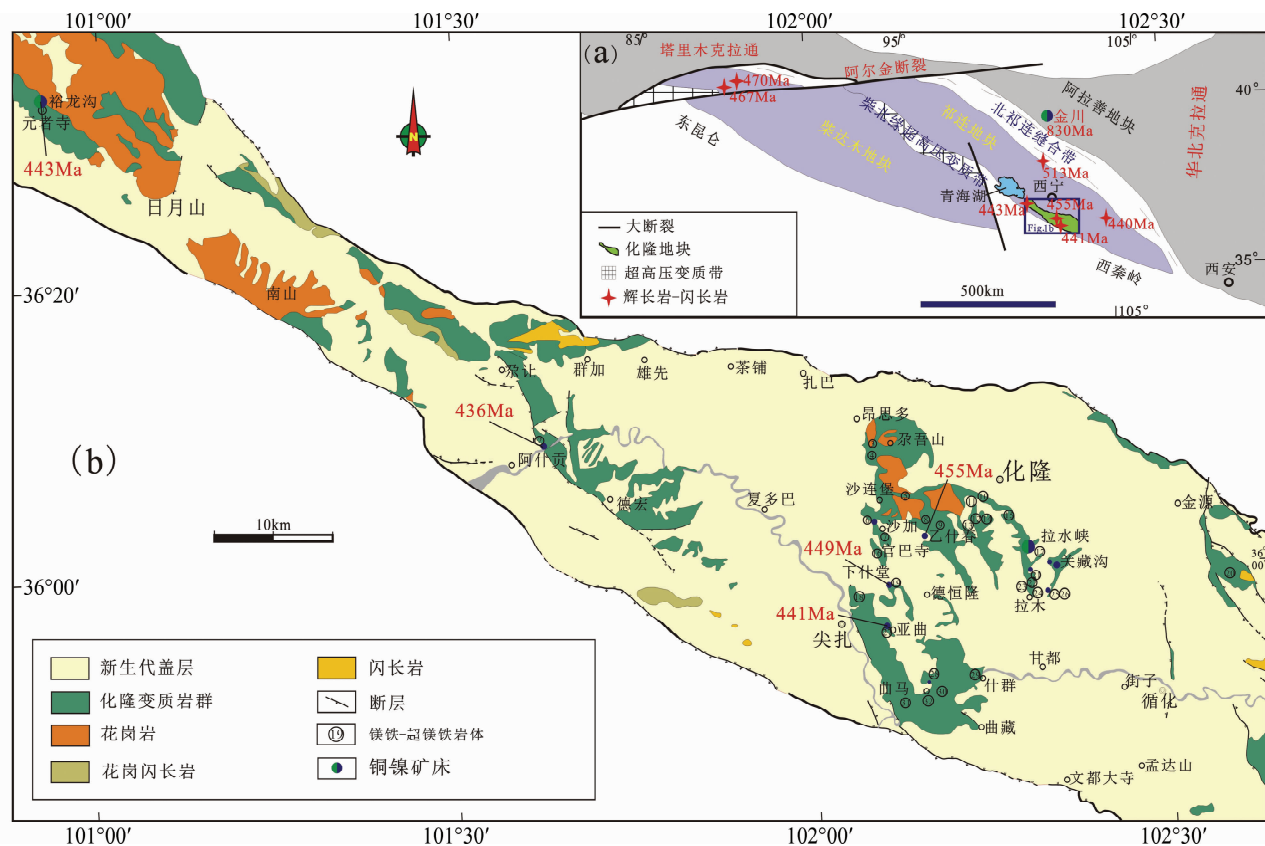


图1 青海化隆基性-超基性岩带地质分布简图(据 Song *et al.*, 2009;徐旺春等,2007 修编)

Fig. 1 The sketch geological map of Hualong basic-ultrabasic rocks belt in Qinghai (after Song *et al.*, 2009 and Xu *et al.*, 2007)

了区域找矿工作和成矿研究认识。前人对这些岩体和矿床已进行了一些简单工作,尽管对其形成过程还存在不同的看法(张旺生等,2003;李文渊,2004;陆松年等,2006;赵恒川等,2007;高永宝等,2012a),但归结起来主要认为铜镍硫化物的形成与岩浆的熔离作用以及结晶分异作用相关,很少从岩体的岩石地球化学角度探讨岩体的成因进而研究其成矿过程。下什堂岩体是一个基性程度较高的岩体,同时也有超基性岩的产出,并且伴有铜镍矿化,在化隆岩带具有一定的代表性。本文试图通过对化隆地区下什堂岩体测年和地球化学特征的研究,初步探讨其岩浆的形成和演化过程,通过岩石成因探索成矿机理,并为矿床成因研究提供线索。

## 2 区域地质背景

化隆基性-超基性岩带位于化隆微陆块内,区域上恰处于南祁连-东昆仑与西秦岭造山带的结合部位(图 1a)。北以拉脊山南缘深大断裂为界与拉脊山接触,南以青海湖-天水断裂为界与西秦岭造山带毗邻,呈西窄东宽的楔形,长约 160km,平均宽 20km(图 1a)(张照伟等,2011)。Zhang *et al.* (2014) 研究化隆岩带的裕龙沟和亚区基性-超基性岩体,并认为成岩成矿作用与弧岩浆作用密切相关。岩带北侧依次

是拉脊山、中祁连地块、北祁连缝合带及华北地台西南缘的阿拉善地块,在拉脊山、中祁连及北祁连均发育有早古生代的基性-超基性侵入岩,且年龄大多集中在 440~460Ma 之间(图 1a)(Tseng *et al.*, 2009;陈隽璐等,2006; Song *et al.*, 2006, 2012)。夏林圻等(2001)认为,拉脊山是一早古生代的小洋盆,产出有同时代的基性-超基性岩体,而北祁连洋约在 450Ma 就已完全闭合(Song *et al.*, 2009, 2013)。岩带南侧为西秦岭造山带和柴北缘高压-超高压变质带,约在 450Ma 柴北缘高压-超高压变质带就已经完成了俯冲后的折返,并发育了基性-超基性岩体(Song *et al.*, 2012)。在阿尔金山南缘发现了 467Ma(马中平等,2011)和 470Ma(杨经绥等,2008)的基性-超基性侵入岩,并且前者伴有铜镍矿化。

化隆岩带所属区域内主要有两套地层:上覆盖层以渐近系红层为主,由砖红色砾岩、含砾砂岩、含石膏泥质砂岩、含砂粘土岩组成,不整合覆盖于元古界变质岩之上,厚度大于 200m(徐旺春等,2007);下伏化隆群构成结晶基底,为一套中-深变质岩系,主要由片岩、片麻岩、大理岩及石英岩组成,混合岩化显著(张照伟等,2012a),总厚度大于 2665m,与拉脊山以北湟源群可以对比(图 1b)。化隆群自下而上分为智尕昂、关藏沟和鲁满山三个岩组,智尕昂岩组以石英岩为主夹少量钾长石英岩;关藏沟岩组可分上、中、下三个岩性段,主要岩性为薄层石英岩、黑云斜长片麻岩、黑云石英片岩与

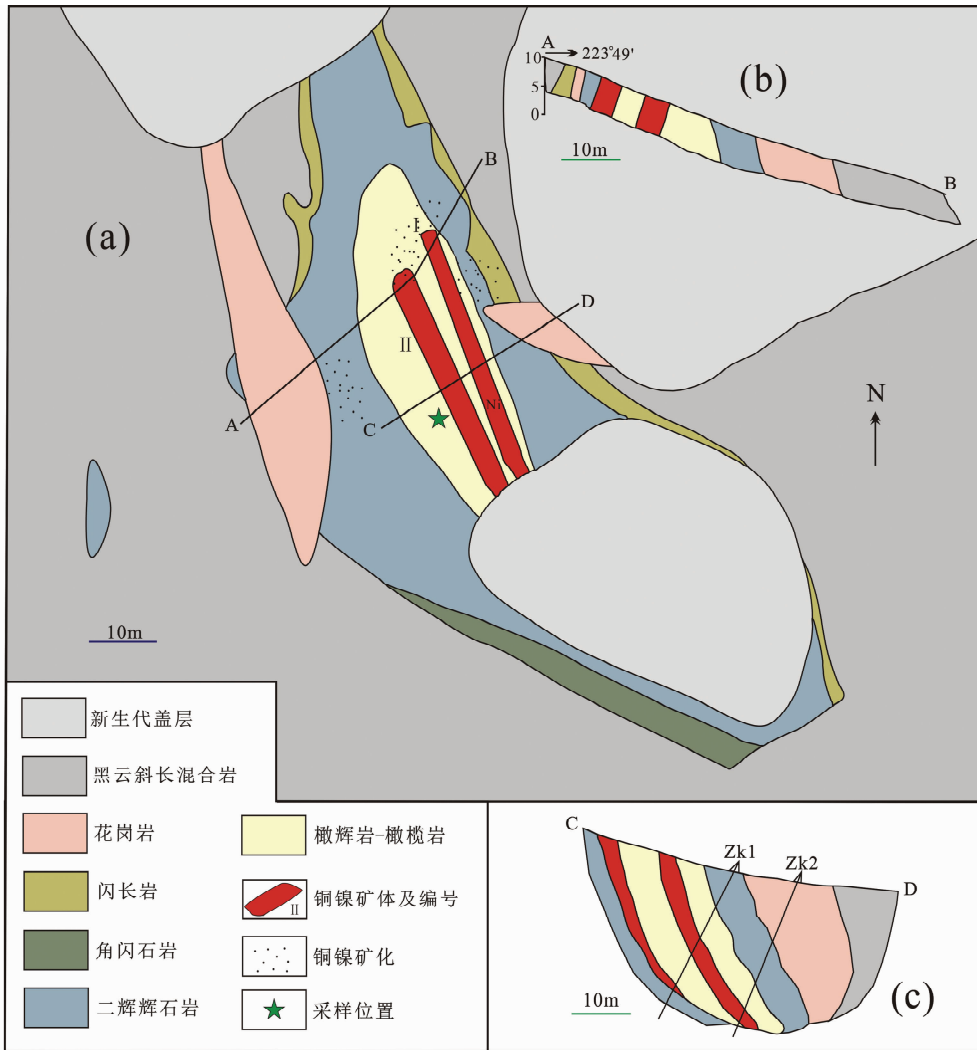


图2 下什堂含铜镍矿橄榄岩平面(a)及剖面(b,c)图(据青海省第九地质队,1992<sup>①</sup>)

Fig.2 Plan view (a) and cross sections (b, c) of the Xiashentang sulfide-bearing peridotite intrusion

长英质黑云条纹状混合岩,局部夹斜长角闪片岩、混合岩化黑云斜长片麻岩、均质混合岩;鲁满山岩组也分上下两个岩性段,为条纹状混合岩、斑纹状混合片麻岩。带内岩浆活动强烈,侵入岩广泛分布,既有化隆基性-超基性岩带的侵位,也有酸性岩的产出。区内断裂构造多分布于化隆地块的边部,往往是大地构造单元的分界线,属区域性大断裂(图1b)(张照伟等,2011)。次级断裂和褶皱是区内的主要构造表现,化隆地区基性-超基性侵入岩体的就位,可能受隆起带内的次级断裂构造所控制(夏林圻等,2001;许志琴等,2006)。

### 3 下什堂岩体地质与岩石学特征

下什堂岩体顺层侵入在化隆群关藏沟岩组中岩段的条纹-条痕状黑云二长混合岩内,岩体与围岩产状基本一致。

总体走向 $320^{\circ}$ ,北西和南东两端略偏北为 $340^{\circ}$ ,地表呈一“S”型透镜体状,长约120m,宽16~45m,北东倾斜,倾角较陡(图2a)。岩性包括二辉橄榄岩、二辉辉石岩、角闪辉长岩和闪长岩等,为一个超基性-基性-中性岩类型的杂岩体。总体具明显的对称分异现象,中心为橄榄岩和部分橄辉岩相,向外依次为辉石岩、角闪石岩和闪长岩相,各岩石(相)间均呈渐变过渡关系(图2a, c)。结构上也有从中心粗粒-伟晶状向边部的粗粒-中细粒变化趋势(张照伟等,2009)。岩体与围岩界线清楚,局部可见混合岩受烘烤蚀变呈暗绿色出现绿泥石化、孔雀石化和岩石中Ni含量增高的现象。此外,在岩体边缘相中可见鳞片状石墨、石榴石及石英包体等捕虏晶,反映岩体与围岩之间有不同程度的同化混染(图3b)。

下什堂岩体中已发现两条铜镍矿体,主要产于岩体中心的橄榄岩相内(图2a, b),其中I号矿体已控制长度34m,厚

① 青海省第九地质队,1992. 青海省化隆县南部地区铜镍找矿综合研究工作总结

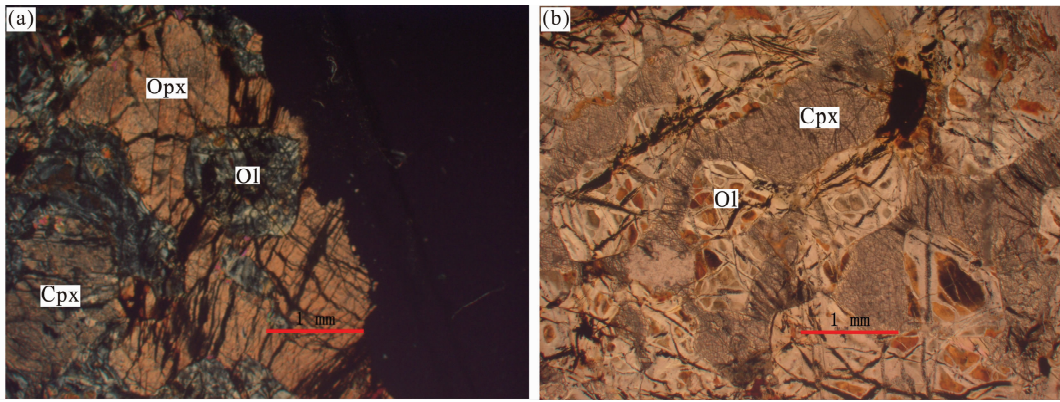


图3 化隆地区下什堂岩体岩矿石显微照片

(a)二辉橄榄岩;(b)单辉橄榄岩. Ol-橄榄石; Cpx-单斜辉石; Opx-斜方辉石

Fig.3 Microphotographs showing Iherzolite (a) and clinopyroxene peridotite (b) samples from the Xiashentang intrusion

度西部 2.58m, 东部 3.10m, 平均厚度 3.02m。矿体走向 340°, 北东倾斜, 倾角大于 60°, 产状与岩体基本一致。II 号矿体位于 I 号矿体西侧, 二者近于平行产出。控制长度 30m, 北部厚 3.34m, 南部 1.81m, 平均厚度 2.58m, 走向 335°。据钻孔资料, 矿体向深部有所增厚, 产状变缓, 并同围岩呈渐变过渡关系。含矿岩石(或矿石)为各类橄榄岩、橄辉岩和辉石岩, 可见典型的包橄结构(图 3a)。岩石存在弱蚀变, 局部较新鲜。

金属硫化物主要呈他形粒状星散分布于硅酸盐矿物之间, 局部可见条带状和细脉状。主要为磁黄铁矿(12%)、紫硫镍矿(1%)、少量镍黄铁矿、黄铜矿等。氧化物有孔雀石、蓝铜矿、褐铁矿、矾类和镍华等。据钻孔资料(图 2c), 深部金属硫化物含量均较地表明显增高, 可达 8%, 其中磁黄铁矿可占 5%, 紫硫镍矿和辉镍矿约占 3%。矿石有益组分主要为 Ni, 次为 Cu、Co、S。Ni 品位一般在 0.25% ~ 1.38%, Cu 品位在 0.04% ~ 0.29% 之间, Co 为 0.022% ~ 0.075%, S 含量为 0.27% ~ 3.95%。其中, Ni 含量有随矿体向北西侧伏和深部厚度增大品位增高的特点。在岩体边缘相的橄榄角闪石岩中, 局部含金属硫化物达 2% ~ 3%, 光片鉴定主要为磁黄铁矿和少量辉镍矿。矿物粒度可达 4 ~ 5mm, 预示深部矿体有变大变好的趋势(图 2c)。

#### 4 样品采集与分析方法

下什堂含矿岩体的样品均在含矿岩相内采集, 主要集中在平硐、钻孔及地表出露较好的位置(图 2a), 并且沿勘探线方向等距离分布。硅酸盐分析由中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室应用 X 荧光光谱仪(XRF-1500)完成。稀土、微量元素由长安大学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 分析完成。锆石的 CL 图像在西北大学大陆动力学国家重点实验室电子探针仪加载的阴极发光仪上完成。LA-MC-ICP-MS 锆石

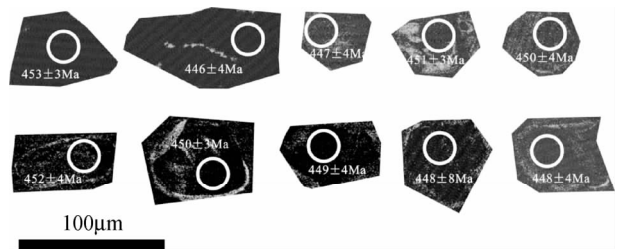


图4 下什堂岩体辉橄岩锆石 CL 图像

Fig.4 CL images of zircon from pyroxene peridotite in Xiashentang intrusion

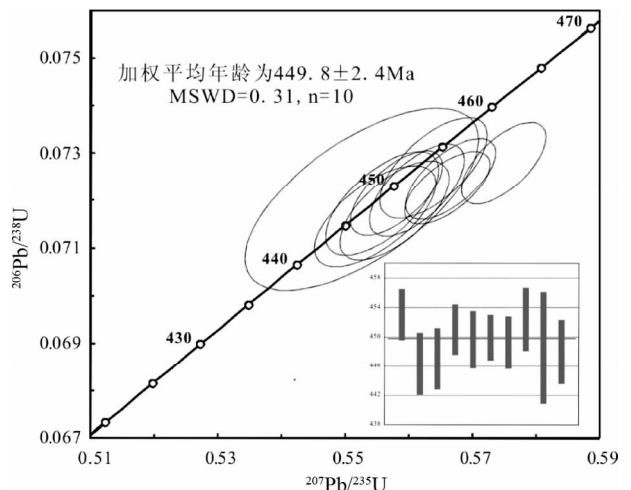


图5 下什堂岩体锆石 U-Pb 谐和图

Fig.5 Concordia diagrams showing U-Pb analyses of zircons from Xiashentang intrusion

U-Pb 定年测试分析在中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室完成, 分析仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。详细实验测试过程可参见侯可军等(2009)。Sr-Nd 同位素在天津

表 1 化隆下什堂岩体锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果

Table 1 U-Th-Pb isotopic data for zircon grains from the Xiashentang intrusion, Hualong

测点号	含量 ( $\times 10^{-6}$ )			同位素比值						同位素年龄 (Ma)					
	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$1\sigma$
1	363.5	765.5	0.47	0.05730	0.00015	0.57480	0.00437	0.07281	0.00057	502	6	461	3	453	3
2	40.18	145.0	0.28	0.05610	0.00029	0.55465	0.00630	0.07169	0.00070	457	11	448	4	446	4
5	51.53	186.5	0.28	0.05635	0.00024	0.55766	0.00565	0.07181	0.00069	465	9	450	4	447	4
6	170.7	568.7	0.30	0.05669	0.00017	0.56644	0.00469	0.07247	0.00056	480	7	456	3	451	3
7	142.6	389.7	0.37	0.05637	0.00019	0.56115	0.00496	0.07224	0.00065	478	7	452	3	450	4
8	375.8	153.4	2.45	0.05680	0.00024	0.56591	0.00446	0.07229	0.00051	483	9	455	3	450	3
9	79.70	411.9	0.19	0.05607	0.00016	0.55796	0.00476	0.07218	0.00059	454	6	450	3	449	4
12	163.7	238.1	0.69	0.05626	0.00019	0.56371	0.00557	0.07270	0.00071	461	12	454	4	452	4
14	59.88	106.3	0.56	0.05556	0.00060	0.55249	0.01208	0.07205	0.00126	435	24	447	8	448	8
15	123.5	298.1	0.41	0.05600	0.00019	0.55564	0.00590	0.07196	0.00072	454	3	449	4	448	4

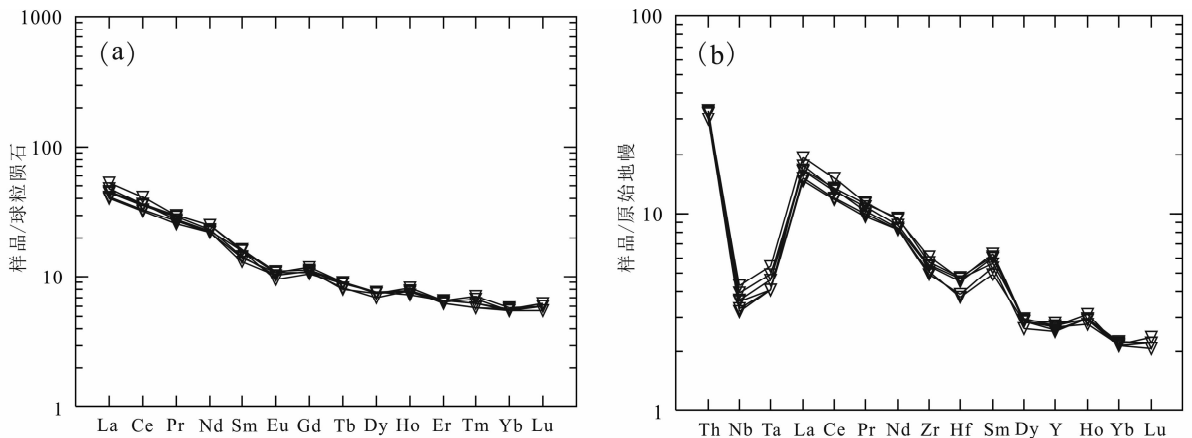


图 6 下什堂岩体二辉橄榄岩稀土元素配分图(a, 标准化值据 Anders and Grevesse, 1989)和微量元素蛛网图(b, 标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized rare earth element patterns (a, normalization values after Anders and Grevesse, 1989) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b, normalization values after Sun and McDonough, 1989) of the Xiashentang intrusive rocks

地质矿产研究所完成,样品的化学制样工作在百级空气净化实验室中进行,全流程空白本底稳定在  $\text{Rb} = 5.6 \times 10^{-10} \text{g}$ ;  $\text{Sr} = 3.8 \times 10^{-10} \text{g}$ ;  $\text{Sm} = 3.0 \times 10^{-11} \text{g}$ ;  $\text{Nd} = 5.4 \times 10^{-11} \text{g}$ 。Rb-Sr 和 Sm-Nd 法均采用双流程的分析测试工艺。

## 5 锆石 U-Pb 年代学

下什堂橄榄辉石岩(XST-01)中的锆石绝大多数为烟灰-浅烟灰色及浅黄色半自形柱状特征(部分残缺锆石属于碎样时机械破损,或者碎样目数较细所致),少数为浅玫瑰色,浑圆状,粒径多在  $80 \times 60 \mu\text{m} \sim 120 \times 90 \mu\text{m}$ 。锆石 CL 图像(图 4)显示,色调呈现浅灰-深灰色,少数具有内核,多数发育环带结构,并且打点集中在边部和核部进行, Th/U 比值一般在 0.28 ~ 0.69 之间(表 1),具岩浆结晶锆石特征。

下什堂(XST-01)样品通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测

定(表 1、图 5),获得锆石 U-Pb 年龄为  $449.8 \pm 2.4 \text{Ma}$  (MSWD = 0.31),属晚奥陶世。此结果与裕龙沟岩体中辉石岩和亚曲辉长岩利用 ID-TIMS 方法所获得的锆石 U-Pb 年龄  $442.4 \pm 1.6 \text{Ma}$  (MSWD = 0.59) (张照伟等, 2012a) 和  $440.74 \pm 0.33 \text{Ma}$  (MSWD = 1.1) (张照伟等, 2012b) 较为接近。

## 6 岩石地球化学特征

### 6.1 主量、微量元素特征

下什堂岩体的主量、微量元素分析如表 2 所示。下什堂样品硅酸盐全分析的  $\text{SiO}_2$  介于 40.26% ~ 41.06% 之间,属基性-超基性岩类。与岩相学特征变化相对应,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  含量变化大。绝大部分橄榄岩有较高的  $\text{MgO}$  (27.83% ~ 28.33%) 含量,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (5.35% ~ 5.85%)、 $\text{CaO}$  (2.76% ~ 3.45%) 和  $\text{Na}_2\text{O}$  含量 (0.29% ~

表2 化隆地区下什堂岩体主量(wt%)及微量( $\times 10^{-6}$ )元素分析结果表

Table 2 Whole rock major (wt%) and trace ( $\times 10^{-6}$ ) element compositions of the Xiashentang intrusive rocks, Hualong area

样品号	XST-1	XST-2	XST-3	XST-4	XST-5	XST-6
岩性	辉橄岩					
SiO <sub>2</sub>	40.32	40.26	40.98	41.06	40.85	41.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.85	5.83	5.35	5.35	5.51	5.48
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	13.61	13.42	13.04	13.24	13.15	12.95
CaO	2.87	2.76	3.41	3.45	3.38	3.43
MgO	27.96	28.14	28.21	28.06	28.33	27.83
K <sub>2</sub> O	0.54	0.51	0.4	0.41	0.49	0.38
Na <sub>2</sub> O	0.52	0.52	0.34	0.41	0.5	0.29
TiO <sub>2</sub>	0.46	0.52	0.47	0.47	0.46	0.48
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.15	0.14	0.12	0.13	0.13	0.13
MnO	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15	0.15
LOI	8.24	8.43	8.21	7.94	7.7	8.54
Total	99.98	99.98	99.98	99.98	99.97	99.99
Cu	92	81.6	68.3	83.4	76.1	68.9
Ni	1070	1060	989	1070	1010	980
Co	110	112	109	108	107	105
Rb	23.8	20.6	16.6	16.8	19.2	16.8
As	1.85	1.32	1.92	1.34	1.10	1.45
Sr	121	115	83.3	97.2	107	95.2
Ba	188	187	156	166	192	153
Nb	2.82	2.59	2.34	2.39	2.17	2.10
Ta	0.20	0.18	0.15	0.17	0.15	0.15
Zr	63.2	59.8	53.4	58.0	51.2	56.4
Hf	1.31	1.34	1.06	1.31	1.10	1.28
Ga	7.42	7.02	6.44	6.09	6.32	6.46
U	0.81	0.74	0.65	0.74	0.68	0.65
Th	2.54	2.58	2.38	2.64	2.62	2.40
La	12.5	10.8	9.41	10.5	9.73	11.2
Ce	25.1	22.4	19.6	21.7	20	22.1
Pr	2.86	2.84	2.42	2.74	2.54	2.61
Nd	11.7	11.8	10.3	10.9	10.4	10.5
Sm	2.53	2.46	1.99	2.25	2.16	2.43
Eu	0.64	0.62	0.59	0.60	0.62	0.56
Gd	2.35	2.44	2.27	2.30	2.22	2.19
Tb	0.34	0.34	0.30	0.33	0.31	0.33
Dy	1.94	1.90	1.90	1.96	1.77	1.92
Ho	0.43	0.46	0.44	0.44	0.44	0.41
Er	1.05	1.10	1.03	1.09	1.03	1.08
Tm	0.17	0.16	0.15	0.18	0.15	0.16
Yb	0.94	0.95	0.97	1.00	0.95	0.96
Lu	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	0.16
Y	11.9	11.6	11.1	11.6	10.9	11.4

表3 南祁连化隆下什堂、裕龙沟和亚曲岩体Rb-Sr、Sm-Nd同位素组成

Table 3 Rb-Sr and Sm-Nd isotopes of intrusions from the Yulongou, Yagu and Xiashentang

样品号	岩性	Rb ( $\times 10^{-6}$ )	Sr ( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{87}{86}\text{Sr}$	$\pm 2\sigma$	$\left(\frac{87}{86}\text{Sr}\right)_i$	Sm ( $\times 10^{-6}$ )	Nd ( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{147}{144}\text{Sm}$ $\frac{147}{144}\text{Nd}$	$\frac{143}{144}\text{Nd}$ $\frac{143}{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$\left(\frac{143}{144}\text{Nd}\right)_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
裕龙沟													
YL-7	辉石角闪石岩	47.80	87.79	1.5766	0.00011	0.713884	4.10	17.38	0.1436	0.512134	0.00005	0.511718	-6.84
YL-11	辉石角闪石岩	16.13	56.43	0.8274	0.00021	0.711447	1.60	6.01	0.1624	0.512247	0.00006	0.511776	-5.70
YL-8	辉石角闪石岩	68.07	134.88	1.4613	0.00003	0.713520	3.06	14.29	0.1303	0.512049	0.00011	0.511672	-7.74
YL-9	角闪辉石岩	57.40	172.67	0.9625	0.00009	0.711848	4.63	21.29	0.1324	0.512061	0.00007	0.511677	-7.63
亚曲													
YQ-1	辉长闪长岩	37.21	365.61	0.2947	0.00011	0.709690	2.39	10.76	0.1352	0.512238	0.00005	0.511848	-4.34
YQ-9	辉长闪长岩	40.37	403.78	0.2895	0.00005	0.707724	3.17	14.16	0.1362	0.512252	0.00007	0.511859	-4.13
YQ-5	辉长岩	9.06	262.17	0.1000	0.00012	0.705650	5.37	18.16	0.1395	0.512901	0.00015	0.512498	8.36
YQ-10	辉长岩	14.33	301.24	0.1378	0.00010	0.706706	3.90	13.64	0.1739	0.512797	0.00011	0.512295	4.39
下什堂													
XST-1	辉橄岩	16.90	90.16	0.5425	0.00014	0.709590	2.34	9.89	0.1438	0.512348	0.00001	0.511924	-2.62
XST-2	辉橄岩	15.27	103.24	0.4279	0.00009	0.709012	2.48	10.12	0.1492	0.512367	0.00006	0.511927	-2.56
XST-3	辉橄岩	15.46	103.28	0.4332	0.00027	0.709018	2.40	9.75	0.1499	0.512371	0.00006	0.511929	-2.52
XST-4	辉橄岩	216.8	259.22	2.4202	0.00005	0.714682	11.41	47.29	0.1469	0.512359	0.00004	0.511926	-2.58

注: ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 和  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  计算是采用 CHUR  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512638$ ,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1967$ ,  $t = 449\text{Ma}$ . 裕龙沟、亚曲数据来自 Zhang *et al.*, 2014

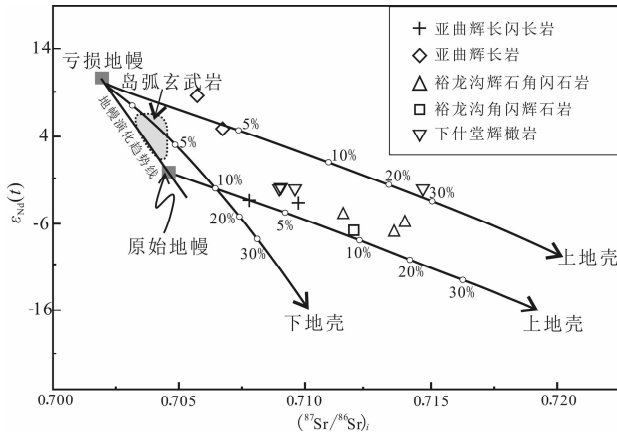


图7 化隆地区下什堂岩体 Sr-Nd 同位素组成投图

Fig. 7 Sr-Nd isotopes of intrusions from the Yulonggou, Yaqu and Xiashentang

0.52%) 较低。岩石  $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$  含量变化大, 介于 (12.95% ~ 13.61%), 平均 13.23%。稀土元素的球粒陨石和微量元素的原始地幔蛛网图如图 6a, b) 所示。表现出轻稀土元素相对富集、负 Eu 异常及 Nb-Ta 负异常, 几乎所有样品都有 Zr-Hf 负异常。

## 6.2 Sr-Nd 同位素特征

下什堂岩体的全岩 Sr-Nd 同位素组成如表 3 所示。 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  和  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值根据锆石 U-Pb 年龄计算, 下什堂岩体的  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值集中在  $-2.62 \sim -2.52$  之间,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值在  $0.709012 \sim 0.714682$  之间(图 7)。裕龙沟样品的  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值变化在  $-7.74 \sim -5.70$  之间,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值 ( $0.711447 \sim 0.713884$ ) 较高点。亚曲岩体的样品具有较高的  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值, 且变化较大, 主要在  $-4.34 \sim +8.36$  之间;  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值集中在  $0.705650 \sim 0.709690$  之间。亚曲辉长岩相对于辉长闪长岩具有较高的  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值和较低的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  比值 (Zhang *et al.*, 2014)。

# 7 讨论

## 7.1 同化混染

岩浆铜镍硫化物矿床的成矿物质因普遍含铂族元素而认为来源于地幔的证据之一 (Naldrett 1981), 近年来通过对世界上主要铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素研究表明: 岩浆铜镍硫化物矿床的成矿物质既可以来源于地幔 (具有类似于球粒陨石和地幔的  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  比值), 如 Kambalda 矿床 (Foster *et al.*, 1996); 也可以来源于地壳 (具有高放射成因的  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  比值), 如加拿大的 Sudbury 矿床 (Li *et al.*, 2005); 但大多数矿床成矿物质来源具有壳幔混合特征 (Lambert *et al.*, 1998; Foster *et al.*, 1996), 如俄罗斯的 Noril'sk (Li *et al.*, 2009)、中国的金川 (杨经绥等, 2008)、黄山东、香山、葫芦

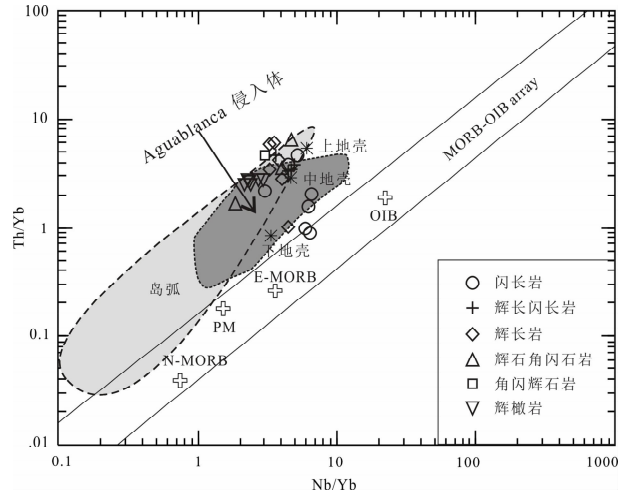


图8 化隆地区下什堂岩体 Th/Yb 对 Nb/Yb 图解

Fig. 8 Plot of Th/Yb vs. Nb/Yb in whole rocks of intrusions from the Yulonggou, Yaqu and Xiashentang

(胡克兵等, 2008)、白马寨 (石贵勇等, 2006)、力马河 (陶琰等, 2008) 等。

化隆地区下什堂基性-超基性岩体的 Nd 和 Sr 同位素组成变化较小, 这暗示岩浆体系在演化过程中可能是封闭的。化隆地区下什堂岩体微量元素普遍存在的 Nb、Ta 亏损, 说明可能也与地壳混染有关。化隆地区基性-超基性岩的高放射性 Os 同位素比值反映了其母岩浆在侵位过程中 (而不是在地幔源区) 被地壳物质强烈混染 (Zhang *et al.*, 2014)。可见下什堂基性-超基性岩体存在不同程度的同化混染, 从与围岩片麻岩接触部位可见少量捕虏体同样可以说明这一点。

## 7.2 岩浆源区

如前所述, 化隆地区下什堂岩体适度演化的岩浆具有轻稀土元素富集型配分曲线, 同时富集大离子亲石元素 (Rb、Th、Ba、Sr 等), 亏损高场强元素 (Nb、Ti 等), 这些特征表明该岩体的母岩浆来自一个曾被交代富集的地幔源区。虽然 Nd-Sr 同位素数据一致表明其母岩浆在侵位过程中受到了不同程度的地壳混染, 但下什堂的两件样品基本未遭受地壳物质的混染, 其 Nd-Sr 同位素组成应该最接近其地幔源区的 Nd-Sr 同位素组成。化隆地区基性-超基性岩体的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -7.74 \sim +8.36$  (表 3), 这与化隆地区基性-超基性岩体富集 LREE 和大离子亲石元素的不一致特征说明其母岩浆应该来自一个在岩浆生成前不久被交代富集的岩石圈地幔。这些证据从不同侧面证明, 其岩浆源区应该位于软流圈地幔, 并混有一部分被俯冲板片交代的地幔楔物质 (姜常义等, 2009; 焦建刚等, 2012)。而这种交代富集事件可能与祁连、柴北缘在早古生代期间大规模的板片俯冲有关。由于俯冲带熔/流体对地幔楔交代富集事件的时间与该富集地幔发生熔融的时间相隔较近, 致使化隆地区下什堂岩体虽然具有富集的微量元素特征, 但未遭受同化混染的样品却基本保持了亏损地

幔的同位素性质。

### 7.3 构造背景

在 Th/Yb 对 Nb/Yb 的协变图中(图 8), 裕龙沟、亚曲(Zhang *et al.*, 2014) 和下什堂岩体位于 MORB-OIB 线的上方, 落入现代岛弧玄武岩(数据来源 <http://www.petdb.org>) 和形成于岛弧背景的西班牙 Aguablanca 含矿基性-超基性岩体区域(Tornos *et al.*, 2001; Piña *et al.*, 2006)。化隆基性-超基性岩带内的同位素年代学研究表明, 裕龙沟岩体、亚曲岩体利用 ID-TIMS 方法获得的锆石 U-Pb 年龄分别为  $442.4 \pm 1.6$  Ma (MSWD = 0.59) (张照伟等, 2012a) 和  $440.74 \pm 0.33$  Ma (MSWD = 1.1) (张照伟等, 2012b)。而下什堂岩体样品通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定, 则获得了锆石 U-Pb 年龄为  $449.8 \pm 2.4$  Ma (MSWD = 0.31), 属晚奥陶世。Song *et al.* (2012) 认为, 450Ma 北祁连大洋已俯冲消亡完全闭合而成为祁连地块与华北地台的缝合带, 此时柴北缘洋也已俯冲但还未最终消亡, 至 430Ma 完成了大洋俯冲消亡和折返的超高压-高压变质带, 随后进入陆陆碰撞阶段(Song *et al.*, 2012)。化隆岩带北邻的拉脊山, 同样产出有 440 ~ 450Ma 的基性-超基性侵入体和同时期花岗岩, 进一步揭示拉脊山小洋盆最终于 450Ma 闭合(夏林圻等, 2001)。此时的化隆微地块, 处于拉脊山小洋盆和柴北缘洋完全俯冲闭合转为碰撞造山阶段, 岩浆在后碰撞的伸展部位上侵而形成了化隆地区的基性-超基性岩体。

下什堂基性-超基性岩体整体侵位于化隆岩群富硅地层的片麻岩、片岩中, 这些富硅地层也为硫化物的不混溶创造了同化混染的条件。岩体基本特征表明岩浆分异充分, 同时富含挥发分, 且遭受了一定的同化混染作用, 最终导致富硅物质的加入, 致使岩浆中硫化物的不混溶作用发生, 从而可形成不同品位不同类型的岩浆铜镍硫化物矿床。

### 7.4 找矿指向意义

包括下什堂在内, 化隆地区基性-超基性岩体及铜镍矿化整体与主碰撞后的局部伸展构造背景密切相关, 但岩浆遭受了俯冲物质的交代作用而表现出了弧岩浆作用的地球化学特点。从岩体地质特征与成矿特点来看, 在裕龙沟和亚曲岩体内仅有少量的橄榄石, 这对于铜镍成矿及矿产资源勘查显然不太有利。而下什堂岩体是富含橄榄石岩相的, 并且矿体都集中在橄榄岩相和辉石岩相内, 表现了较好的成矿条件与找矿潜力。化隆基性-超基性岩带产出有上百个岩体, 下什堂只是其中的一个, 大部分未做过地质工作, 不排除异常富集体的存在, 拉水峡就是很好的例子, 全岩矿化且伴有特富矿的产出。最为关键的不在于下什堂等岩体研究的本身, 而是透过此项研究给我们指明了找矿方向, 并非只有稳定地台和地幔柱能形成岩浆铜镍硫化物矿床, 在造山带的后碰撞局部伸展环境同样可以形成岩浆铜镍硫化物矿床, 进一步拓展了铜镍矿找矿空间和潜力。除此之外, 区域上有大量的同

时代同构造背景的基性-超基性岩体, 无疑是下一步工作的主要方向。不仅如此, 近两年在柴北缘牛鼻子梁(赵双喜等, 2012) 和柴南缘夏日哈木都有很好的铜镍找矿发现和重要突破, 可能与后碰撞伸展的构造背景相关(李世金等, 2012), 进一步指明了区域上的找矿意义。

## 8 结论

(1) 化隆地区下什堂岩体属铁质系列的基性-超基性岩体, 岩浆分异充分, 岩石类型多样。其地球化学特征如 Nb、Ta 等的亏损, 所有岩石均属于钙碱性系列, 且轻稀土(LREE) 和大离子亲石元素(LILE) 相对富集, 适度亏损高场强元素, 形成时代为  $449.8 \pm 2.4$  Ma。

(2) 下什堂基性-超基性岩体的母岩浆, 在上升过程中遭受了不同地壳物质的同化混染作用, 围岩地层片麻岩等富硅物质的加入, 致使硫达到饱和进而发生了硫化物的不混溶作用, 所形成的岩浆于局部伸展的构造薄弱部位上涌侵位并最终成岩成矿。

**致谢** 野外地质工作得到西安地质矿产研究所樊钧教授级高工、徐学义研究员、贾群子研究员、李智明教授级高工和谢燮、臧遇时等的关心与帮助; 在研究和成文过程中得到了长安大学姜常义教授、美国印第安纳大学李楚思教授及西安地质矿产研究所陈隽璐研究员的指导与帮助; 论文评审专家及编辑部老师给予了很好的建议和具体修改意见; 在此一致深表感谢。

## References

- Anders E and Grevesse N. 1989. Abundances of the elements: Meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(1): 197–214
- Chen JL, He SP, Wang HL, Xu XY, Zeng ZX, Wang ZQ and Yan QR. 2006. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age of mafic dykes in the area between the Qinling and Qilian orogenic belts and its geological implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(6): 455–462 (in Chinese with English abstract)
- Foster JG, Lambert DD, Frick LR and Maas R. 1996. Re-Os isotopic evidence for genesis of Archaean nickel ores from uncontaminated komatiites. *Nature*, 382(6593): 703–706
- Gao YB, Li WY, Xie X, Zhang ZW, Guo ZP, Zhang JW and Li K. 2012a. Geology, geochemistry and genesis of the Lashuixia Ni-Cu deposit in Hualong area, Qinghai Province. *Geological Bulletin of China*, 31(5): 763–772 (in Chinese with English abstract)
- Gao YB, Li WY, Zhang ZW, Li C, Zhou LM, Guo ZP, Zhang JW, Li K, Qian B, Wang YL and Tan WJ. 2012b. Re-Os isotopic analysis of the Yulonggou Cu-Ni sulfide deposit in the South Qilian Mountain. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(6): 899–906 (in Chinese with English abstract)
- Hou KJ, Li YH and Tian YR. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS. *Mineral Deposits*, 28(4): 481–492 (in Chinese with English abstract)
- Hu KB, Yao SZ, Qu WJ, Du AD and Ao SJ. 2008. Re-Os isotopic analysis of the Hulu Cu-Ni sulfide deposit magmatic ore system, East Tianshan, Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 24(10):



- 2359–2370 (in Chinese with English abstract)
- Jiang CY, Xia MZ, Qian ZZ, Yu X, Lu RH and Guo FF. 2009. Petrogenesis of Kalatongke mafic rock intrusions, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 749–764 (in Chinese with English abstract)
- Jiao JG, Tang ZL, Qian ZZ, Sun T, Duan J and Jiang C. 2012. Genesis and metallogenic process of Tulargen large scale Cu-Ni sulfide deposit in eastern Tianshan area, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3772–3786 (in Chinese with English abstract)
- Lambert DD, Foster JG, Frick LR, Ripley EM and Zientek ML. 1998. Geodynamics of magmatic Cu-Ni-PGE sulfide deposits: New insights from the Re-Os isotope system. *Economic Geology*, 93(2): 121–136
- Li C and Ripley EM. 2005. Empirical equations to predict the sulfur content of mafic magma at sulfide saturation and applications to magmatic sulfide deposits. *Mineralium Deposita*, 40(2): 218–230
- Li C and Ripley EM. 2009. Sulfur contents at sulfide-liquid or anhydrite saturation in silicate melts: Empirical equations and example applications. *Economic Geology*, 104(3): 405–412
- Li SJ, Sun FY, Gao YW, Zhao JW, Li LS and Yang QA. 2012. The theoretical guidance and the practice of small intrusions forming large deposits: The enlightenment and significance for searching breakthrough of Cu-Ni sulfide deposit in Xiarihamu, East Kunlun, Qinghai. *Northwestern Geology*, 45(4): 185–191 (in Chinese with English abstract)
- Li WY. 2004. Main mineral deposit associations in the Qilian Mountains and their metallogenic dynamics. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(3): 313–320 (in Chinese with English abstract)
- Liang GH, Xu XW, Xiao QB, Cai XP, Qin KZ, Zhang BL, San JZ, Hui WD and Peng XM. 2007. Application of magnetotelluric method to Cu-Ni ore exploration: A case study of Tulargen Cu-Ni deposit in Xinjiang. *Mineral Deposits*, 26(1): 120–127 (in Chinese with English abstract)
- Lu SN, Yu HF, Li HK, Chen ZH, Wang HC, Zhang CL and Xiang ZQ. 2006. Early Paleozoic suture zones and tectonic divisions in the “Central China Orogen”. *Geological Bulletin of China*, 25(12): 1368–1380 (in Chinese with English abstract)
- Ma ZP, Li XM, Xu XY, Sun JM, Tang Z and Du T. 2011. Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic dating for Qingshuiquan layered mafic-ultramafic intrusion southern Altun orogen, in northwestern China and its implication. *Geology in China*, 38(4): 1071–1078 (in Chinese with English abstract)
- Naldrett AJ. 1981. Nickel sulfide deposits: Classification, composition, and genesis. *Economic Geology*, 75<sup>th</sup> Anniversary Volume: 628–685
- Piña R, Lunar R, Ortega L, Gervilla F, Alapieti T and Martínez C. 2006. Petrology and geochemistry of mafic-ultramafic fragments from the Aguablanca Ni-Cu ore breccia, Southwest Spain. *Economic Geology*, 101(4): 865–881
- Shi GY, Sun XM, Wang SW, Xiong DX, Qu WJ and Du AD. 2006. Re-Os isotopic dating and its geological implication of Baimazhai Cu-Ni sulphide deposit, Yunnan province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2451–2456 (in Chinese with English abstract)
- Song SG, Zhang LF, Niu YL, Su L, Song B and Liu DY. 2006. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study from the northern Tibetan Plateau based on geochemical and geochronological data. *Journal of Petrology*, 47(3): 435–455
- Song SG, Niu YL, Zhang LF, Wei CJ, Liou JG and Su L. 2009. Tectonic evolution of Early Paleozoic HP metamorphic rocks in the North Qilian Mountains, NW China: New perspectives. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(3–4): 334–353
- Song SG, Su L, Li XH, Niu YL and Zhang LF. 2012. Grenville-age orogenesis in the Qaidam-Qilian block: The link between South China and Tarim. *Precambrian Research*, 220–221: 9–22
- Song SG, Niu YL, Su L and Xia XH. 2013. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China. *Gondwana Research*, 23(4): 1378–1401
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345
- Tao Y, Hu RZ, Qu WJ and Du AD. 2008. Re-Os isotope study of sulfide and olivine pyroxenite in the Limahe nickle deposit, Sichuan Province. *Acta Geologica Sinica*, 82(9): 1292–1304 (in Chinese with English abstract)
- Tornos F, Casquet C, Galindo C, Velasco F and Canales A. 2001. A new style of Ni-Cu mineralization related to magmatic breccia pipes in a transpressional magmatic arc, Aguablanca, Spain. *Mineralium Deposita*, 36(7): 700–706
- Tseng CY, Zuo GC, Yang HJ, Yang HY, Tung KA, Liu DY and Wu HQ. 2009. Occurrence of Alaskan-type mafic-ultramafic intrusions in the North Qilian Mountains, Northwest China: Evidence of Cambrian arc magmatism on the Qilian block. *Island Arc*, 18(3): 526–549
- Tung KA, Yang HY, Liu DY, Zhang JX, Tseng CY and Wan YS. 2007. SHRIMP U-Pb geochronology of the detrital zircons from the Longshoushan Group and its tectonic significance. *Chinese Science Bulletin*, 52(10): 1414–1425
- Xia LQ, Xia ZC and Ren YX. 2001. *Tectonic-Volcanic Magma-Metallogenetic Dynamics*. Beijing: China Earth Publishing House (in Chinese)
- Xu WC, Zhang HF and Liu XM. 2007. U-Pb zircon dating constraints on formation time of Qilian high-grade metamorphic rock and its tectonic implications. *Chinese Science Bulletin*, 52(4): 531–538
- Xu ZQ, Yang JS, Li HB and Yao JX. 2006. The Early Palaeozoic terrane framework and the formation of the high-pressure (HP) and ultra-high pressure (UHP) metamorphic belts at the Central Orogenic Belt (COB). *Acta Geologica Sinica*, 80(12): 1793–1806 (in Chinese with English abstract)
- Yang JS, Shi RD, Wu CL, Su DC, Chen SY, Wang XB and Wooden J. 2008. Petrology and SHRIMP age of the Hongliugou ophiolite at Milan, North Altun, at the northern margin of the Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1567–1584 (in Chinese with English abstract)
- Zhang WS, Feng GS, Gao S and Sun LH. 2003. Metamorphic core complex structure and uplifting mechanism in Lajishan-Hualong area. *Earth Science*, 28(4): 407–413 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZW, Li WY, Gao YB, Guo ZP, Tan WJ and Jiang HB. 2009. Metallogenic geological conditions of Hualong Dome-Like Massif, South Qilian Mountain and prospecting direction. *Acta Geologica Sinica*, 83(10): 1483–1489 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZW, Li WY, Gao YB, Zhang JW, Guo ZP and Li K. 2011. Geology and geochemistry characteristics and ore-bearing potential of the Xiashentang intrusive rocks in Hualong County, Qinghai Province. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(4): 596–602 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZW, Li WY, Gao YB, Zhang JW, Guo ZP and Li K. 2012a. ID-TIMS zircon U-Pb age of Yulonggou intrusive rocks in southern Qilian Mountain and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 31(2–3): 455–462 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZW, Li WY, Gao YB, Zhang JW, Guo ZP, Li K, Wang YL and Qian B. 2012b. The formation age of the Yaqu Ni-Cu bearing basic complex in southern Qilian Mountain and a discussion on its mechanism. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(6): 925–935 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZW, Li WY, Gao YB, Li CS, Ripley EM and Kamo S. 2014. Sulfide mineralization associated with arc magmatism in the Qilian Block, western China: Zircon U-Pb age and Sr-Nd-Os-S isotope constraints from the Yulonggou and Yaqu gabbroic intrusions. *Mineralium Deposita*, 49(2): 279–292
- Zhao HC, Wang MQ and Li MK. 2007. The Geogas anomaly characteristics of Lashuixia nickel-copper deposit and its significance. *Qinghai Science and Technology*, 14(6): 28–33 (in Chinese)

Zhao SX, Wang YG, Li CL, Zhuang Y, Geng AQ and Wang XP. 2012. The copper-nickel mine features of Niubiziliang in north-west margin of Chaidamu basin, and discoverable significance. *Northwestern Geology*, 45(1): 202–210 (in Chinese with English abstract)

### 附中文参考文献

- 陈隽璐, 何世平, 王洪亮, 徐学义, 曾佐勋, 王宗起, 闫全人. 2006. 秦岭-祁连造山带接合部位基性岩墙的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义. *岩石矿物学杂志*, 25(6): 455–462
- 高永宝, 李文渊, 谢燮, 张照伟, 郭周平, 张江伟, 李侃. 2012a. 青海化隆地区拉水峡铜镍矿床地质、地球化学特征及成因. *地质通报*, 31(5): 763–772
- 高永宝, 李文渊, 张照伟, 李超, 周利敏, 郭周平, 张江伟, 李侃, 钱兵, 王亚磊, 谭文娟. 2012b. 南祁连裕龙沟铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素物质来源示踪研究. *地球学报*, 33(6): 899–906
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术. *矿床地质*, 28(4): 481–492
- 胡克兵, 姚书振, 屈文俊, 杜安道, 敖松坚. 2008. 新疆东天山葫芦铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素物质来源示踪研究. *岩石学报*, 24(10): 2359–2370
- 姜常义, 夏明哲, 钱壮志, 余旭, 卢荣辉, 郭芳放. 2009. 新疆喀拉通克镁铁质岩体群的岩石成因研究. *岩石学报*, 25(4): 749–764
- 焦建刚, 汤中立, 钱壮志, 孙涛, 段俊, 姜超. 2012. 东天山地区图拉尔根铜镍硫化物矿床成因及成矿过程. *岩石学报*, 28(11): 3772–3786
- 李世金, 孙丰月, 高永旺, 赵俊伟, 李连松, 杨启安. 2012. 小岩体成大矿理论指导与实践——青海东昆仑夏日哈木铜镍矿找矿突破的启示及意义. *西北地质*, 45(4): 185–191
- 李文渊. 2004. 祁连山主要矿床组合及其成矿动力学分析. *地球学报*, 25(3): 313–320
- 梁光河, 徐兴旺, 肖骑彬, 蔡新平, 秦克章, 张宝林, 三金柱, 惠卫东, 彭晓明. 2007. 大地电磁测深法在铜镍矿勘查中的应用——以与超镁铁质岩有关的新疆图拉尔根铜镍矿为例. *矿床地质*, 26(1): 120–127
- 陆松年, 于海峰, 李怀坤, 陈志宏, 王惠初, 张传林, 相振群. 2006. “中央造山带”早古生代缝合带及构造分区概述. *地质通报*, 25(12): 1368–1380
- 马中平, 李向民, 徐学义, 孙吉明, 唐卓, 杜涛. 2011. 南阿尔金山

- 清水泉镁铁-超镁铁质侵入体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年及其意义. *中国地质*, 38(4): 1071–1078
- 石贵勇, 孙晓明, 王生伟, 熊德兴, 屈文俊, 杜安道. 2006. 云南白马寨铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素定年及其地质意义. *岩石学报*, 22(10): 2451–2456
- 陶琰, 胡瑞忠, 屈文俊, 杜安道. 2008. 力马河镍矿 Re-Os 同位素研究. *地质学报*, 82(9): 1292–1304
- 夏林圻, 夏祖春, 任有祥. 2001. 北祁连山构造-火山岩浆-成矿动力学. 北京: 中国大地出版社
- 徐旺春, 张宏飞, 柳小明. 2007. 锆石 U-Pb 定年限制祁连山高级变质岩系的形成时代及其构造意义. *科学通报*, 52(10): 1174–1180
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 姚建新. 2006. 中央造山带早古生代地体构架与高压/超高压变质带的形成. *地质学报*, 80(12): 1793–1806
- 杨经绥, 史仁灯, 吴才来, 苏德辰, 陈松永, 王希斌, Wooden J. 2008. 北阿尔金山地区米兰红柳沟蛇绿岩的岩石学特征和 SHRIMP 定年. *岩石学报*, 24(7): 1567–1584
- 张旺生, 冯光胜, 高山, 孙林华. 2003. 拉脊山-化隆变质核杂岩构造及其隆升机制探讨. *地球科学*, 28(4): 407–413
- 张照伟, 李文渊, 高永宝, 郭周平, 谭文娟, 姜寒冰. 2009. 南祁连化隆微地块铜镍成矿地质条件及找矿方向. *地质学报*, 83(10): 1483–1489
- 张照伟, 李文渊, 高永宝, 张江伟, 郭周平, 李侃. 2011. 青海省化隆县下什堂岩体地质-地球化学特征及其含矿性研究. *大地构造与成矿学*, 35(4): 596–602
- 张照伟, 李文渊, 高永宝, 张江伟, 郭周平, 李侃. 2012a. 南祁连裕龙沟岩体 ID-TIMS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地质通报*, 31(2–3): 455–462
- 张照伟, 李文渊, 高永宝, 张江伟, 郭周平, 李侃, 王亚磊, 钱兵. 2012b. 南祁连亚曲含镍铜矿基性杂岩体形成年龄及机制探讨. *地球学报*, 33(6): 925–935
- 赵恒川, 汪明启, 李明奎. 2007. 拉水峡铜镍矿地气异常特征及其意义. *青海科技*, 14(6): 28–33
- 赵双喜, 王永刚, 黎存林, 庄勇, 耿阿乔, 王雪萍. 2012. 柴达木盆地西北缘牛鼻子梁铜镍矿床特征及其发现意义. *西北地质*, 45(1): 202–210