新疆天山地区榆树沟-铜花山蛇绿岩特征和构造背景*

徐向珍[1] 杨经绥[1] 郭国林[2] 李天福[1] 任玉峰[1] 陈松永[1]

XU XiangZhen[1], YANG JingSui[1], GUO GuoLin[2], LI TianFu[1], REN YuFeng[1] and CHEN SongYong[1]

1. 中国地质科学院地质研究所,国土资源部大陆动力学重点实验室,北京 100037
2. 东华理工大学核资源与环境教育部重点实验室,南昌 330013

1. *Key Laboratory for Continental Dynamics of Ministry of Land and Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*
2. *Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, Ministry of Education, East China Institute of Technology, NanChang* 330013, *China*

2010-08-05 收稿, 2010-12-09 改回.

Xu XZ, Yang JS, Guo GL, Li TF, Ren YF and Chen SY. 2011. The Yushugou-Tonghuashan ophiolites in Tianshan, Xinjiang, and their tectonic setting. ***Acta Petrologica Sinica*****, 27(1):96 – 120**

Abstract The Yushugou-Tonghuashan ophiolite, outcropped in the northern part of the southern Tianshan between Yili plate and Tarim plate, has tectonically broken into ultramafic rocks, cumulates and volcanic lavas. The ophiolite is chiefly composed of harzburgite, one kind of typical depleted peridotite. The olivines are forsterite (Fo is about 90), enstatite (En is about 90) and a few clinopyroxene. The accessory mineral chrome spinel bears the $Cr^{\#} = Cr/(Cr + Al) \times 100$ value of 16 ~ 28, the $Mg^{\#} = (Mg + Fe) \times 100$ value of 63 ~ 75, suggesting a low chromium and abyssal peridotite features. After the anhydration, the contents of MgO (38.84% ~ 44.53%), Al_2O_3 (1.51% ~ 3.63%) and CaO (0.42% ~ 5.77%) of Yushugou ultramafic rocks are similar to the oceanic lherzolite. The Tonghuashan ultramafic rocks occurred in carbonatite bearing the LREE enrichment might be produced by certain subduction fluid alteration. The volcanic lavas occur widely here, in Yushugou is mainly basalt while in Tonghuashan is andesite and dacite. Most of the volcanic lavas have undergone the moderate greenschist seafloor hydrothermal alteration. REE contents of Tonghuashan basalt are higher that of Yushugou, REE patterns are LREE enrichment type. The trace element compositions of basalt indicate they may suffer from the fluid influence. There are three high-Mg volcanic rock samples, according to the various features like the extreme low SiO_2 content (32% ~ 36%), high MgO content (20.12% ~ 28.50%) and the value of $K_2O + Na_2O$ (0.06% ~ 0.46%) less than 2%, which can be judged as picrite. The cumulate, generally locates in the ultramafic rocks or mafic lavas as small blocks, is mostly gabbro with less olivine pyroxenite and with significant alteration and structural deformation, which is similar to the basalt in composition and with two type LREE patterns including enriched and slightly depleted. According to the geochemical features, the Yushugou-Tonghuashan ophiolite was produced in Mid-Ocean Ridge (MOR) environment, with certain subduction fluid alteration and was associated with the generation of island-arc volcanic rocks.

Key words Ultramafic rocks; Ophiolite; Yushugou; Tonghuashan; Tianshan Mountain

摘 要 榆树沟-铜花山蛇绿岩出露于南天山北缘,属哈萨克斯坦-伊犁板块和塔里木板块之间的缝合带。蛇绿岩已被构造肢解,主要由超镁铁岩、堆晶岩、熔岩类组成。超镁铁岩以方辉橄榄岩为主,显示典型的亏损地幔岩特征,橄榄石为富镁型,Fo为90;斜方辉石为顽火辉石,En为90,单斜辉石含量少;副矿物铬尖晶石属低铬型,$Cr^{\#}$值(=Cr/(Cr+Al)×100)16~28,$Mg^{\#}$值(=Mg/(Mg+Fe)×100)63~75,反映了深海橄榄岩特征。归一化后榆树沟超镁铁岩MgO含量38.84%~44.53%,Al_2O_3为1.51%~3.63%,CaO为0.42%~5.77%,成分近于大洋二辉橄榄岩;铜花山的超镁铁岩叠加碳酸岩化,LREE强烈富集,可能经历了俯冲洋壳流体改造。熔岩类在榆树沟和铜花山均有较大规模产出,其中榆树沟玄武岩为主,铜花山安山岩和英安岩较多。熔岩多已遭受绿片岩相海底热液蚀变。榆树沟玄武岩的REE含量总体比铜花山的低,稀土配分模式均为轻稀土富集型;

* 本文受国家自然科学基金创新群体项目(40921001)、中石化集团前瞻性研究项目(YPH08110)以及中国地质调查局基础研究项目(1212010610105)联合资助.

第一作者简介: 徐向珍,女,1980年生,助研,矿物学、岩石学、矿床学专业,E-mail:xuxiangzhensjl@yahoo.com.cn

玄武岩的微量元素特征表明其源区可能遭受过流体作用影响。铜花山三个高镁火山岩化学成份具有 SiO_2(32% ~36%)含量很低、MgO(20.12% ~28.50%)含量高、$K_2O + Na_2O$(0.06% ~0.46%)含量小于 2% 的特征,综合分析可归为苦橄岩类。堆晶岩通常以构造小岩块产在超镁铁岩块中或基性熔岩中,以辉长岩为主,有少量橄榄辉石岩等,岩石蚀变、构造变形强烈。堆晶岩的成分接近玄武岩,存在 LREE 富集和略亏损平坦两种类型。岩石地球化学特征表明榆树沟和铜花山的蛇绿岩形成于 MOR 构造环境,但具有受俯冲带流体改造特征,并伴生有岛弧火山岩。

关键词 超镁铁岩;蛇绿岩;榆树沟;铜花山;天山

中图法分类号 P588.12

1 引言

新疆境内蛇绿岩比较发育,现已知有蛇绿岩带 20 余条,主要围绕塔里木地台及准噶尔、伊犁等地块分布(新疆维吾尔自治区地质矿产局,1993)。就已有资料看,新疆各古板块间的蛇绿岩套均遭严重破坏,已成为蛇绿混杂带,层序恢复后的主要岩性单元有地幔橄榄岩、基性熔岩以及其上部盖层放射虫硅质岩等,堆积岩较少,岩墙群很不发育。

南天山是哈萨克斯坦-伊犁板块和塔里木板块及其间的南天山微地块长期相互作用而成的碰撞造山带。因其发育有多条蛇绿岩带而受到广泛的关注(王作勋等,1990;肖序常等,1992;郝杰和刘小汉,1993;郭召杰等,1993;高俊等,1994;汤耀庆等,1995)。研究表明,南天山主要出露南北两条蛇绿岩带,南带沿哈尔克山南坡的梅斯布拉克、色日克牙依拉克、科克铁克达坂南坡、库勒湖呈东西向带状展布,认为是南天山地块与塔里木板块在晚古生代拼接的缝合带(汤耀庆等,1995);北带分布于中天山南缘断裂带南侧,代表了伊犁板块(中天山)与南天山地块拼接的缝合带。北带呈东西向展布于哈尔克山北坡、库米什榆树沟、铜花山、硫磺山一带。沿该带出露大量的超镁铁-镁铁质岩块,记录了区域构造的演化过程。

吴文奎等(1992a)较早对上述的北带库米什榆树沟、铜花山、硫磺山一带的蛇绿岩做过一些工作,认为榆树沟-铜花山是由不同规模的外来和原地岩块组成的构造混杂体,蛇绿岩组合被强烈地混杂在变质基质中,由上而下的层序为沉积岩、火山岩、火成堆积岩和地幔橄榄岩。但对蛇绿岩单元组合的岩石学和地球化学的研究十分不够。

相反,前人对榆树沟地区出露高压变质麻粒岩岩块做了较多研究,并将其视作蛇绿岩组合(王润三等,1999a)。这些麻粒岩被当做一般的“火成堆晶岩”,与绿片岩相的中-上泥盆统围岩中的细碧岩和硅质岩合看成是一套蛇绿岩(Windley *et al.*,1990;吴文奎,1992b;马瑞士,1993)。王润三等(1999a,b)认为该麻粒岩是独立的蛇绿岩地体,原岩主要由变质橄榄岩、超镁铁质-镁铁质堆晶岩、下部洋脊拉斑玄武岩、以及上部洋脊拉斑玄武岩等四个岩石单元构成。董云鹏等(2001)对榆树沟麻粒岩相的基性-超基性岩开展了地球化学研究,它们被认为与相关沉积岩构成麻粒岩相地体(王润三等,1999a)。但舒良树等(1996,1998)认为榆树沟蛇绿岩混杂岩带中的麻粒岩和超镁铁岩碎块是以构造岩片形式分布于从南向北推覆的韧性剪切混杂岩带中。这些麻粒岩或被认为是构造抬升剥露于地表的深地壳麻粒岩地体(王居里等,1999;王焰等,1999)。

总的来看,前人在榆树沟地区做过相对较多的研究,但将该地区的麻粒岩当作蛇绿岩来研究,开展了岩石学、矿物学、地球化学和年代学的系列研究。但我们的研究表明(杨经绥等,2011),这些麻粒岩可能不属蛇绿岩组合。因此榆树沟地区真正的蛇绿岩组合前人并没有做工作,或做了很少工作。而铜花山地区的蛇绿岩前人几乎没有开展工作,自然也没有有关该地区蛇绿岩的文章。

本文将展现榆树沟和铜花山地区的蛇绿岩组合特征,它们究竟都有哪些蛇绿岩单元?它们的野外产出和显微镜下岩相学特征?矿物学和岩石地球化学特征?最后,探讨它们形成的地质构造背景。

2 区域地质背景和蛇绿岩产出特征

按照肖序常等(1992)的划分,榆树沟蛇绿岩带位于南天山早-中古生代活动大陆边缘。该地体北邻库米什中-新生界断陷盆地;南侧以剪切带与中-上泥盆统(吴文奎等,1992b)呈构造接触。中-上泥盆统由绿片岩相变质火山-沉积岩组成,包括绢云石英片岩、透闪大理岩、变质砾岩、变质中酸性火山碎屑岩、细碧岩、石英角斑岩和硅质岩等不同岩类。

榆树沟蛇绿岩带位于库米什凹地之南(图 1),北距天山拱拜子深断裂 15 ~20km,呈北西向延展,与拱拜子断裂有一交角。岩带长 75km,宽 3 ~15km,主要有榆树沟、铜花山、大黑山和硫磺山四个岩体(群)。超镁铁岩体的直接围岩为变质成千枚岩的凝灰岩、凝灰质粉砂岩、厚层硅质岩(部分含放射虫)、少量基性熔岩。东南段硫磺山、大黑山等地基性熔岩增多(新疆维吾尔自治区地质矿产局,1993)。

野外观察表明,榆树沟-铜花山蛇绿岩的超镁铁岩呈构造透镜体与周围地层以断层叠置。超镁铁质岩石普遍发生蛇纹石化、石棉化、滑石化,在剪切作用下,形成糜棱岩化辉长岩。榆树沟-铜花山蛇绿岩套由超镁铁岩、超镁铁质-镁铁质堆晶岩、熔岩类等岩石单元组成,在铜花山地区可见晚期辉石岩的基性岩脉侵入到蛇绿岩单元中,全岩分析辉石岩的 K_2O 含量达 6.27%,可能属于大陆物质来源。

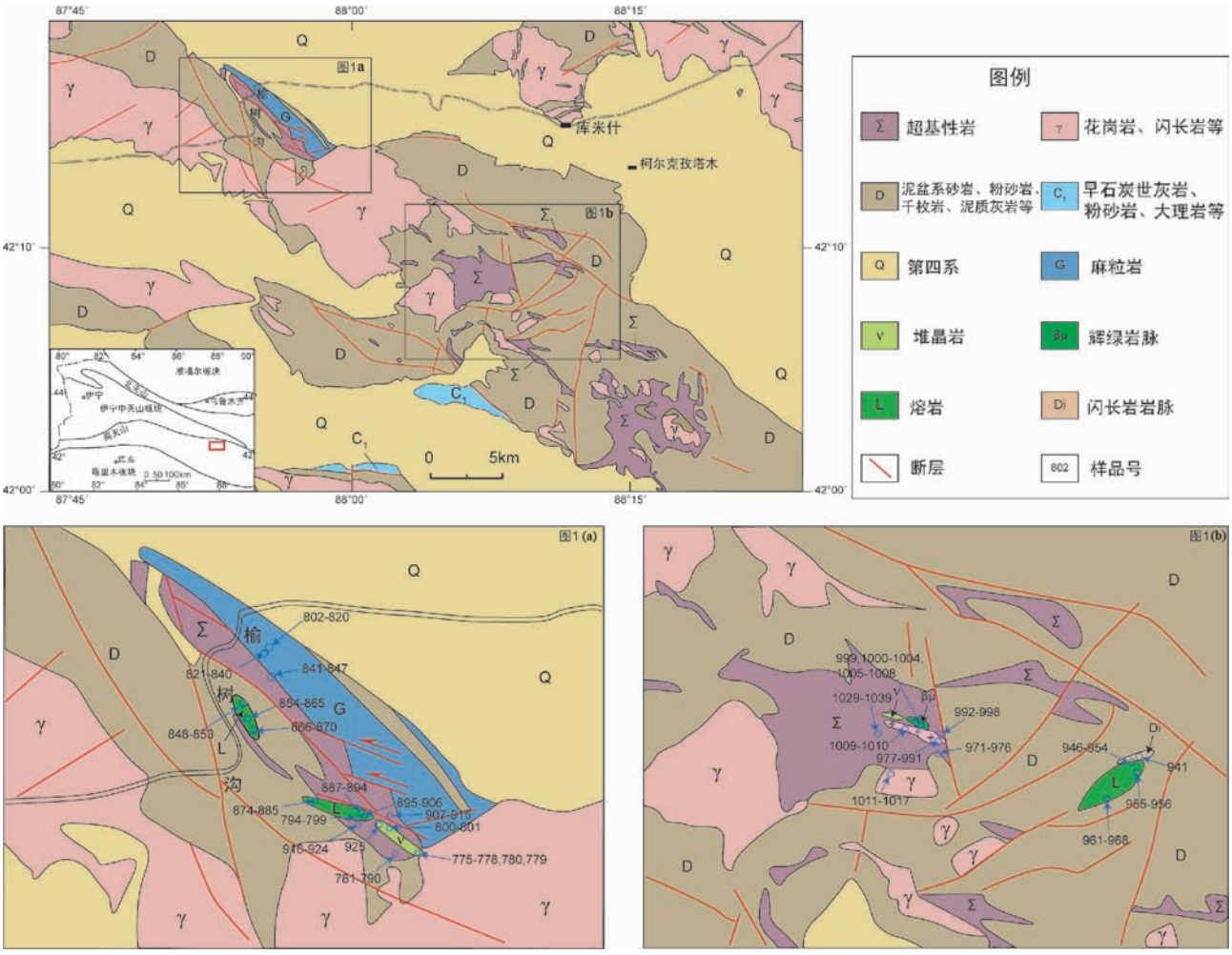


图 1 新疆天山库米什地区榆树沟-铜花山蛇绿岩的地质简图(据新疆维吾尔自治区地质局,1965①,1976②; Gao *et al.*, 1998 修改)

(a)-榆树沟采样位置图;(b)-铜花山采样位置图

Fig. 1 Geological sketch of Kumishi of Xinjiang Tianshan Mountains (revised after Gao *et al.*, 1998)

(a)-Yushugou sampling site; (b)-Tonghuashan sampling site

3 蛇绿岩的岩石学特征

3.1 榆树沟蛇绿岩的岩石学特征

3.1.1 超镁铁岩

榆树沟超镁铁-镁铁杂岩由方辉橄榄岩、少量纯橄岩及较多的堆积辉长岩组成,岩体呈层状向北东倾。下部为堆积异剥橄榄岩,厚度 700 ~ 1100m,上部逐渐夹辉石岩、辉长岩。堆积橄榄岩之上整合叠置着厚度达 2200m 的堆积辉长岩,后者条带状构造清楚。超镁铁岩深度蛇纹石化,富含蛇纹石石棉,辉长岩强烈糜棱化(新疆维吾尔自治区地质矿产局,1993)。

榆树沟超镁铁岩具有较强的蛇纹石化,少数几个样品保留橄榄石、斜方辉石及尖晶石类新鲜矿物。显微镜下观察,保留新鲜矿物的方辉橄榄岩在组构上已强烈糜棱岩化。粗粒橄榄石边部圆滑,经过构造改造,有轻微晚期蛇纹石化(图 2a),细粒矿物普遍错碎发生重结晶,并有一定的方向性(图 2b)。8 个方辉橄榄岩样品的 30 个橄榄石的电子探针成分分析显示橄榄石成分非常稳定,为镁橄榄石,Fo 在 89.25 ~ 91.50 之间,平均为 90.35(表 1)。

斜方辉石被拉长,经过变质变形也有一定的方向性(图 2c),粗粒斜方辉石粒度可达 5mm,边部有细粒重结晶的斜方辉石和橄榄石(图 2b)。8 个方辉橄榄岩样品的 29 个斜方辉

① 新疆维吾尔自治区地质局(第二区域地质测量大队). 1965. 库米什地质图(1/20 万)

② 疆维吾尔自治区地质局(第二区域地质测量大队). 1976. 包尔地质图(1/20 万)

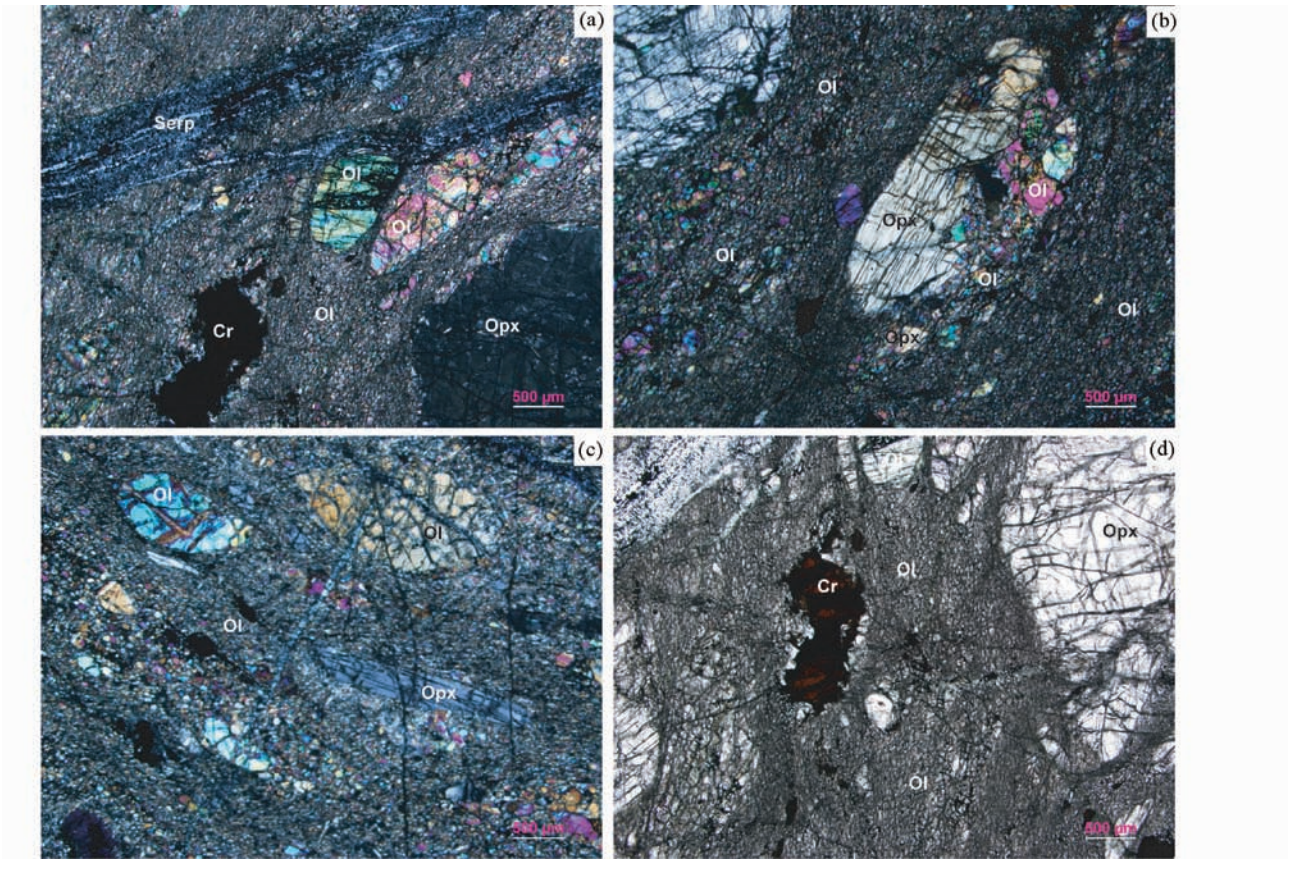


图 2　榆树沟超镁铁岩的显微镜下照片

(a)-粗粒橄榄石边部圆滑，经过熔融改造，有轻微晚期蛇纹石化；(b)-细粒橄榄石普遍错碎发生重结晶，并有一定的方向性；(c)-斜方辉石被拉长，并有一定的方向性；(d)-铬尖晶石呈港湾状或骸晶状，分布在糜棱岩化重结晶的橄榄石中. Ol-橄榄石；Opx-斜方辉石；Cr-铬尖晶石；Serp-蛇纹石

Fig. 2　Photomicrographs of the ultramafic rocks in Yushugou ophiolite

(a)-Coarse olivine grains have smooth edge, molten alteration and slight later serpentinization; (b)-Fine olivine grains are generally crashed, recrystallized and have certain directionality; (c)-Orthorpyroxene grains are elongated and slightly directional; (d)-Chrome spinel grains occur in the mylonitized and recrystallized olivine grains as harbor or skeletal shape. Ol-Olivine; Opx-Orthopyroxene; Cr-Chrome spinel; Sep-Serpentine

表 1　榆树沟蛇绿岩超镁铁岩矿物的平均成分(wt%)

Table 1　The composition of minerals from the ultramafic rocks in Yushugou ophiolite (wt%)

矿物	橄榄石	斜方辉石	单斜辉石	铬尖晶石
点数	30	29	28	100
SiO_2	41.24	56.70	54.01	0.04
TiO_2	0.01	0.04	0.16	0.04
Al_2O_3	0.01	2.49	2.80	48.38
Cr_2O_3	0.01	0.33	0.54	19.56
FeO	9.23	6.37	2.05	14.50
MnO	0.14	0.15	0.08	0.16
MgO	49.23	33.92	16.83	17.50
CaO	0.01	0.30	22.80	0.00
Na_2O	0.01	0.01	0.62	0.02
K_2O	0.01	0.01	0.01	0.01
P_2O_5	0.01	0.01	0.02	0.01
NiO	0.42	0.08	0.04	0.24
Total	100.33	100.42	99.97	100.46
	$Fo_{90.4}$	$En_{89.7}$	$En_{47.8}$	$Cr^{\#}$ 21.4

注：实验数据在东华理工大学核资源与环境教育部重点实验室测试获取，仪器型号为日本电子公司 JXA-8100、能谱仪 Inca Energy 型电子探针，探针束流 20nA，加速电压 15.0kV，电子束斑 2μm

石的电子探针成分分析显示一个较小变化的稳定区域(图 3a)：SiO_2 含量在 54.92% ~ 58.35% 之间，平均为 56.7%，Cr_2O_3 含量在 0.12% ~ 0.47% 之间，平均为 0.33%，MgO 含量在 32.41% ~ 36.39 之间，平均 33.92%，而 $Mg^{\#}$ 值在 89.6 ~ 90.9 之间，平均为 90.5，Al_2O_3 含量较高，在 1.31% ~ 4.01% 之间，平均为 2.49%，其端元组分 Wo = 0.28 ~ 1.07，En = 88.9 ~ 90.2，Fs = 9.22 ~ 10.5，属顽火辉石。

单斜辉石数量较少，含量普遍小于 5%，8 个方辉橄榄岩样品的 28 个单斜辉石的电子探针成分分析(表 1)表明，成分很稳定(图 3a)，除两粒为普通辉石外，其余均为透辉石。其矿物端元组分 Wo = 26.5 ~ 48.7，En = 44.1 ~ 65.1，Fs = 2.82 ~ 5.33。

铬尖晶石在少数几个样品中新鲜可见，含量一般为 1% ~ 2%，自形程度差，呈港湾状或骸晶状，分布在糜棱岩化重结晶的橄榄石中(图 2d)。8 个方辉橄榄岩样品的 100 个铬尖晶石的电子探针成分分析表明，Cr_2O_3 含量变化于 14.58% ~ 24.98% 之间，MgO 含量的变化区间为 15.39% ~ 18.91%

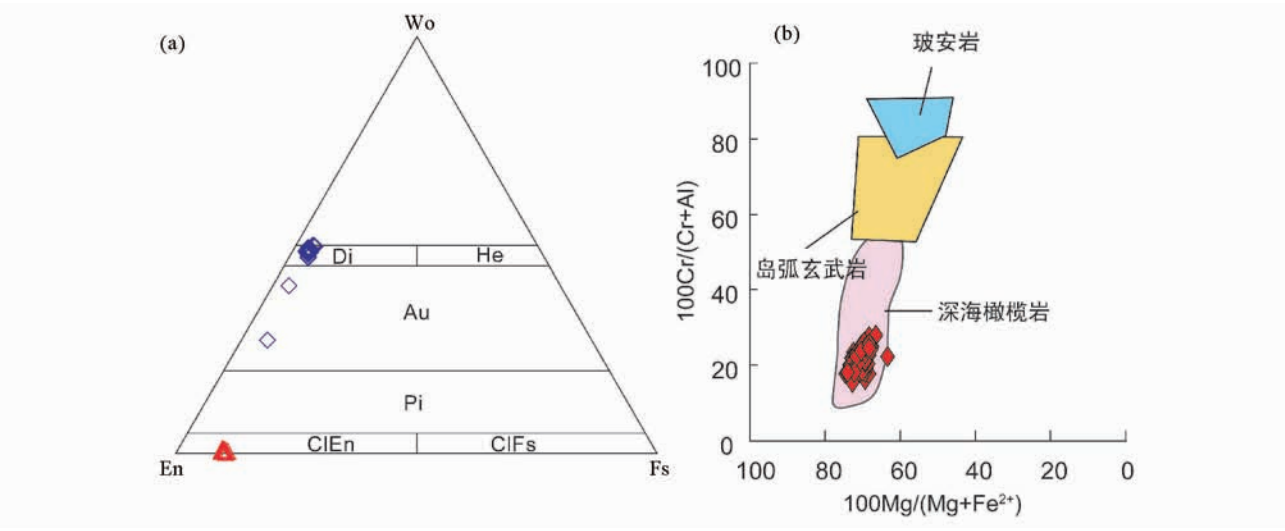


图 3 榆树沟超镁铁岩的辉石和铬尖晶石电子探针成分图解

(a)-辉石电子探针成分图解(据 Morimoto,1988);(b)-尖晶石成分显示深海橄榄岩的橄榄岩特征(据 Dick and Bullen,1984). Di-透辉石;He-钙铁辉石;Au-普通辉石;Pi-易变辉石;ClEn-斜顽辉石;ClFs-斜铁辉石

Fig. 3 Composition diagram basing on the pyroxene and chrome spinel EPMA analyses of Yushugou ultramafic rocks

(a)-Diagram of pyroxene (after Morimoto, 1988); (b)-Diagram of spinel showing the abyssal peridotite feature (after Dick and Bullen, 1984). Di-Diopside; He-Hedenbergite; Au-Augite; Pi-Pigeonite; ClEn-Clinoenstatite; ClFs-Clinoferosilite

之间。在 $Mg^{\#}$(Mg/(Mg + Fe) × 100)与 $Cr^{\#}$(Cr/(Cr + Al) × 100)的变异图中(图 3b),铬尖晶石属于低铬型,$Cr^{\#}$值变化于 15.6 ~ 27.9 之间,$Mg^{\#}$值变化于 63.4 ~ 74.6 之间,反映了深海橄榄岩特征(Dick and Bullen,1984)。

3.1.2 堆晶岩-辉长岩

榆树沟堆晶岩类型有橄榄辉石岩、辉长岩等。橄榄辉石岩:假斑晶结构,斑晶为残余的单斜辉石,占 10% 左右,粒度较粗,可达 0.5mm;基质为细粒矿物,主要为单斜辉石和橄榄石,围绕斑晶生长。细粒矿物大量重结晶,含量占 55%,分布不均匀。岩石晚期发生了蛇纹石化,占 30% 左右,主要以脉状产出,呈他形的尖晶石已蚀变成磁铁矿,占 1%。而辉长岩为粗粒结构,后期由于蚀变作用发生变形,辉石主要闪石化,长石皂化。

3.1.3 熔岩类

榆树沟的熔岩类主要包括玄武岩、安山岩和英安岩。玄武岩发生糜棱岩化,矿物粒度细小,定向排列,有一定的闪石化蚀变,基质为全晶质,为斜长石和角闪石,发生了重结晶,斑晶少。

安山岩也已脱玻成全晶质,基质细粒,主要矿物为石英和斜长石。部分样品中有少量的气孔。岩石发生了糜棱岩化,矿物被剪切破碎,呈定向排列。局部发生强烈碳酸盐化叠加,碳酸盐脉发育;长石基质普遍发生绢云母化。斑晶为粗粒宽板状长石,岩石中后期石英交代现象普遍,蚀变强,发生绢云母化。英安岩变形强烈,斑晶为碱性长石,很多细粒重结晶石英,暗色矿物为黑云母。

3.2 铜花山蛇绿岩的岩石学特征

3.2.1 超镁铁岩

铜花山超镁铁岩与榆树沟的差别在于它已强烈蛇纹石化,未见新鲜矿物,但可见到挤压变形形成的定向条带。由于蛇纹石化去铁作用形成了暗色矿物磁铁矿,一些磁铁矿颗粒保留了尖晶石的假象(图 4a)。铜花山可见角砾状蛇纹岩,半自形,棱角状,角砾边部清晰,无磨圆,可能为原地胶结,胶结物为碳酸盐矿物,碳酸盐化可能叠加在蛇纹石化之上(图 4b)。根据成分(见下文),铜花山超镁铁岩主要由方辉橄榄岩组成。

3.2.2 堆晶岩-辉长岩

铜花山堆晶岩类主要为辉长岩。辉长岩中的斑晶主要为单斜辉石,粒状,有反应边;基质为杂乱分布的长条状斜长石微晶,无斑填间结构,已全部发生沸石化和绿泥石化,气孔呈不规则状,大量蚀变析出的细小矿物为磁铁矿,可见黑云母次要矿物,磷灰石、榍石等副矿物。

3.2.3 熔岩类

本区熔岩岩石中包括玄武岩类和安山岩、英安岩类等中酸性火山岩。铜花山玄武岩斑晶主要为单斜辉石,但多已透闪石化,岩石为绿片岩相变质。浅色矿物占 60% 左右,粒度普遍细小,约 0.1mm 左右,有少量粗粒长石斑晶,可达 1mm 大小;暗色矿物含量占 40% 左右,主要为角闪石和云母,可能为热液蚀变的产物。显微镜下观察到,玄武岩的辉石和斜长石呈镶嵌结构,有少量气孔,充填有碳酸盐化矿物,长石呈短柱状,长宽比为 3∶1 到 4∶1 之间。

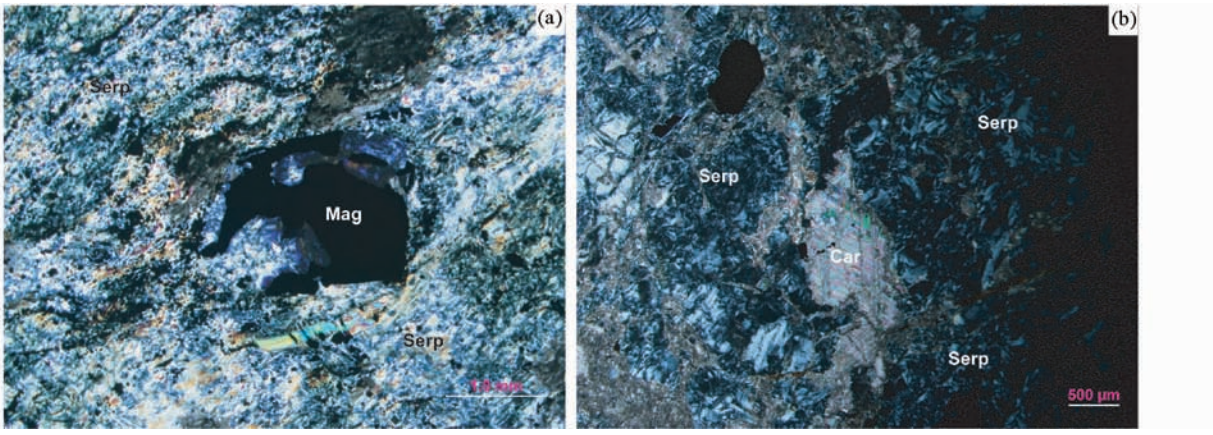


图 4 铜花山超镁铁岩的显微镜下照片

(a)-磁铁矿保留了尖晶石的假象；(b)-碳酸盐化叠加在蛇纹石化之上. Serp-蛇纹石；Mag-磁铁矿；Car-碳酸盐

Fig. 4 Photomicrographs of the ultramafic rocks in Tonghuashan ophiolite

(a)-Magnetite grains with pseudomorphous spinel; (b)-Carbonatization superposed on serpentinization. Serp-Serpentine; Mag-Magnetite; Car-Carbonate

铜花山安山岩为粗粒状，可见少量斜长石和角闪石斑晶，斑晶斜长石为宽板状。暗色矿物以角闪石为主，保留了辉石假象。细粒状角闪石呈聚集状替换了早先的辉石。斜长石含量 70% 左右，粒度可达 5mm，聚片双晶，牌号为 30 左右，为更长石，在岩石中具有定向排列。更长石表面蚀变，普遍发生了绢云母化、碳酸盐化和硅化，并出现大量细粒石英。暗色矿物已绿泥石化，虽然未见变形，但总体蚀变严重。浅色矿物：暗色矿物为 7：3。

4 分析方法

本研究共完成了 75 件岩石样品的全岩分析，包括主元素、微量元素和稀土元素。其中榆树沟样品 33 件，包括 12 件超镁铁岩、3 件堆晶岩类、9 件玄武岩、9 件中酸性火山岩；铜花山样品 42 件，包括超镁铁岩 20 件、堆晶岩 2 件、晚期辉石岩侵入体 2 件、玄武岩熔岩 9 件、中酸性火山岩 9 件。测试分析在国家地质测试中心完成，其中主量元素用熔片 X-射线荧光光谱法(XRF)测定，并采用等离子光谱和化学法测定进行互相检测，微量元素中的 V、Cr、Co、Ni、Sr、Zr、Nb、Ta、Hf、Ba、Th、U 等元素用熔片 XRF 和酸溶等离子质谱(ICP-MS)法测定，稀土元素用 ICP-MS 法测定，其中的 Nb、Ta、Zr、Hf 是用碱溶法、沉淀酸提取、用等离子质谱法测定，同时分析 2 个国家标准样(GSR3 和 GSR5)和 3 个平行样品，以保证分析质量。

由于本地区的岩石普遍受强弱不等的蚀变作用，岩石化学全分析数据中都含有数量不等的 H_2O^+，CO_2 及其他挥发份等，烧失量较高，所以，对这些样品的主元素分析结果在扣除烧失量之后再进行归一化，下面的讨论和作图均按照归一化后的“干”成分进行。

5 分析结果

5.1 榆树沟-铜花山超镁铁岩化学成分

榆树沟 12 件超镁铁岩的成分中挥发分含量达 10% ~ 15%，反映岩石的蛇纹石化程度较高。归一化后，榆树沟超镁铁岩的 SiO_2 含量 43.95% ~ 46.14%，MgO 为 38.84% ~ 44.53%(表 2)。在 MgO 与其它氧化物的变异图中(图 5)，超镁铁岩的 MgO 与 Al_2O_3、CaO 和 TiO_2 显示了较好的负相关。榆树沟超镁铁岩的 Al_2O_3 含量 1.51% ~ 3.63%，CaO 为 0.42% ~ 5.77%，TiO_2 为 0.01% ~ 0.14%。总体特征类似于大洋二辉橄榄岩(69 件样品平均值：SiO_2 = 45.99%、TiO_2 = 0.16%、Al_2O_3 = 3.47%、CaO = 2.26%、MgO = 38.63%，Dmitriev，1975)的化学组成。

与榆树沟超镁铁岩相比，铜花山超镁铁岩具有更强的蛇纹石化现象，岩石的挥发分含量达 12% ~ 20%，有少数几个样品还叠加了碳酸盐化。铜花山的超镁铁岩 MgO 含量比榆树沟的稍低，变化于 27.15% ~ 42.39%，Al_2O_3 为 0.83% ~ 4.75%，TiO_2 为 0.02% ~ 0.83%，CaO 为 0.37% ~ 26.36%(表 3)，成分特征显示岩石主要为方辉橄榄岩。在 MgO 与其它氧化物的变异图中(图 5)，超镁铁岩的 MgO 与 Al_2O_3、CaO 和 TiO_2 同样也显示了一个较好的负相关，显示了与榆树沟超镁铁岩相似的特征。

两地相比，榆树沟的 MgO、CaO 和 TiO_2 含量成分相对集中(图 5)，岩石成分比较均一；而 Al_2O_3 含量变化较大，其原因可能是辉石含量的变化所造成。铜花山岩石中的 SiO_2 的含量跨度比较大，而 CaO 含量相对比榆树沟的超镁铁岩高很多(图 5d)，这与铜花山超镁铁岩遭受蚀变流体改造和碳酸盐化有关。铜花山的 Al_2O_3 和 TiO_2 主体比较稳定，且含量较

表 2 南天山榆树沟蛇绿岩的岩石化学成份(主量元素:wt%;微量和稀土元素:$\times 10^{-6}$)

Table 2 Chemical composition of Yushugou ophiolite in South Tianshan (Major elements: wt%; trace elements: $\times 10^{-6}$)

样品号	07Y-777	07Y-782	07Y-784	07Y-790	07Y-801	07Y-843	07Y-845	07Y-897	07Y-902	07Y-914	07Y-917
岩性	超镁铁岩										
SiO_2	39.73	42.99	41.63	43.03	39.76	38.00	38.86	37.39	39.32	41.34	38.05
TiO_2	0.04	0.03	0.06	0.08	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.01	0.02
Al_2O_3	2.45	2.16	2.56	3.43	1.45	1.30	1.54	1.35	1.46	1.77	1.39
Fe_2O_3	3.11	2.61	3.64	2.81	4.98	6.48	5.70	4.14	3.11	3.82	5.05
FeO	2.87	4.69	3.50	4.36	2.03	1.41	2.07	2.82	3.05	4.36	2.19
MnO	0.12	0.12	0.13	0.12	0.10	0.11	0.12	0.10	0.09	0.13	0.05
MgO	37.96	39.23	37.80	36.70	38.60	38.36	38.23	35.00	33.19	40.80	34.52
CaO	2.03	2.26	1.91	3.80	0.62	0.36	0.54	3.90	4.92	1.08	3.65
Na_2O	0.10	0.18	0.09	0.10	0.05	0.09	0.10	0.31	0.02	0.06	0.09
K_2O	0.01	0.02	0.05	0.06	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.01
P_2O_5	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	<0.01	0.01	0.01
H_2O^+	9.96	4.96	8.00	5.24	11.34	13.16	12.58	9.96	10.54	6.24	11.14
CO_2	0.65	0.30	0.07	0.14	0.25	0.09	0.09	4.16	4.61	0.21	3.29
Total	99.04	99.57	99.45	99.88	99.22	99.40	99.88	99.19	100.36	99.86	99.46
La	0.38	0.30	0.85	0.72	0.14	0.08	0.08	0.19	0.19	0.12	0.37
Ce	0.80	0.67	1.51	1.28	0.18	0.13	0.16	0.38	0.54	0.19	0.61
Pr	0.09	0.07	0.21	0.18	0.02	0.02	0.02	0.08	0.05	0.02	0.10
Nd	0.34	0.25	0.86	0.78	0.08	0.08	0.11	0.20	0.20	0.09	0.40
Sm	0.07	0.06	0.16	0.17	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.02	0.07
Eu	0.05	0.02	0.07	0.08	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03
Gd	0.14	0.09	0.21	0.33	0.05	0.04	0.05	0.07	0.05	0.07	0.09
Tb	0.03	0.02	0.04	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
Dy	0.19	0.14	0.28	0.39	0.08	0.07	0.08	0.07	0.06	0.09	0.11
Ho	0.04	0.04	0.06	0.08	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
Er	0.14	0.12	0.21	0.25	0.07	0.06	0.07	0.05	0.04	0.09	0.09
Tm	0.02	0.02	0.03	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Yb	0.17	0.15	0.24	0.28	0.10	0.09	0.10	0.06	0.04	0.12	0.11
Lu	0.03	0.02	0.04	0.04	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
∑REE	2.49	1.96	4.75	4.70	0.80	0.63	0.77	1.21	1.27	0.88	2.05
LR/HR	2.28	2.26	3.32	2.18	1.17	1.08	1.15	3.04	4.79	1.00	3.38
δEu	1.54	0.89	1.12	1.07	0.96	0.62	1.02	1.16	0.95	1.20	1.05
Y	1.87	1.04	1.77	2.44	0.63	0.55	0.66	0.67	0.36	0.70	0.76
Rb	0.03	1.11	1.99	2.69	0.79	0.59	0.58	0.05	0.91	1.02	0.52
Sr	9.28	5.58	20.1	79.7	8.76	2.04	4.09	87.3	75.0	2.87	39.9
Ba	7.03	5.50	22.78	82.17	3.90	1.11	3.01	5.32	5.01	20.02	3.54
Zr	2.24	2.12	3.41	3.62	0.75	0.39	0.80	1.38	0.60	0.99	1.59
Nb	0.27	0.22	1.76	0.63	0.04	0.04	0.05	0.18	0.13	0.03	0.08
Ta	0.04	0.03	0.11	0.05	0.02	0.01	0.02	0.08	0.05	0.02	0.01
U	0.02	0.03	0.03	0.03	0.17	0.01	0.00	0.09	1.03	0.01	1.70
Th	0.04	0.28	0.06	0.10	0.03	0.06	0.01	0.05	0.05	0.02	0.08
Hf	0.07	0.06	0.11	0.12	0.02	0.01	0.02	0.04	0.02	0.03	0.04
V	58.6	60.1	59.9	78.6	45.9	41.5	42.6	41.7	38.6	3.09	45.2
Cr	2431	2880	2776	2738	2638	2439	2612	2430	2440	189	2589
Co	111	114	102	107	113	109	110	96.9		54.2	114
Ni	2553	2065	2017	1849	2114	1993	1971	2375	1895	1971	2174
Cu	23.9	5.79	6.52	13.3	17.7	9.86	6.05	4.26		4.42	2.41
Zn	57.4	58.1	70.3	83.3	50.1	38.3	48.9	39.7		146	35.4

样品号	07Y-923	07Y-779	07Y-868	07Y-869	07Y-857	07Y-864	07Y-864	07Y-887	07Y-889	07Y-894	07Y-891
岩性	超镁铁岩		堆晶岩					玄武岩			
SiO_2	39.42	44.32	48.12	50.63	48.69	50.85	51.95	51.08	50.14	49.09	49.71
TiO_2	0.12	0.81	0.15	0.16	1.11	0.76	0.77	0.74	1.15	1.56	0.54
Al_2O_3	2.24	6.98	18.81	18.18	15.83	15.92	15.95	15.73	14.79	16.04	16.73
Fe_2O_3	4.79	1.87	1.24	1.63	2.54	1.76	1.86	1.46	2.37	2.72	1.16
FeO	2.59	6.61	3.34	2.75	7.60	6.09	5.44	6.70	7.92	7.42	6.14

续表 2

Continued Table 2

样品号	07Y-923	07Y-779	07Y-868	07Y-869	07Y-857	07Y-864	07Y-864	07Y-887	07Y-889	07Y-894	07Y-891
岩性	超镁铁岩		堆晶岩					玄武岩			
MnO	0.11	0.13	0.11	0.10	0.18	0.16	0.16	0.17	0.19	0.24	0.15
MgO	36.07	29.16	10.18	9.00	8.54	8.33	7.66	8.61	7.84	7.63	9.90
CaO	1.97	3.94	13.00	12.47	8.40	8.67	9.30	9.99	10.47	9.73	10.98
Na_2O	0.05	1.16	2.08	2.74	3.03	3.33	3.44	2.48	2.37	2.36	1.62
K_2O	0.16	0.60	0.17	0.13	0.34	0.52	0.61	0.31	0.37	0.41	0.38
P_2O_5	<0.01	0.19	0.01	<0.01	0.20	0.12	0.10	0.10	0.17	0.31	0.10
H_2O^+	11.54	4.00	2.12	1.38	2.86	2.66	2.26	1.90	1.58	1.62	1.96
CO_2	0.71	0.39	0.54	0.46	0.28	0.52	0.75	0.52	0.41	0.47	0.37
Total	99.77	100.16	99.87	99.63	99.60	99.69	100.25	99.79	99.77	99.60	99.74
La	0.72	9.81	0.34	0.41	8.17	12.84	12.20	8.19	5.89	12.70	8.99
Ce	1.54	23.00	0.86	0.97	15.91	25.25	26.00	17.87	13.39	27.10	16.69
Pr	0.17	2.92	0.13	0.17	2.54	3.87	3.17	2.56	2.47	3.55	2.55
Nd	0.83	12.60	0.72	0.82	11.23	16.56	13.50	11.32	12.40	15.90	11.23
Sm	0.20	2.77	0.28	0.33	2.69	3.84	3.46	2.80	3.51	4.08	2.48
Eu	0.05	0.90	0.38	0.22	1.02	1.04	1.10	1.05	1.22	1.70	0.89
Gd	0.22	2.63	0.47	0.69	3.19	4.64	4.30	3.51	4.44	4.24	2.90
Tb	0.04	0.44	0.10	0.12	0.52	0.78	0.66	0.58	0.74	0.73	0.45
Dy	0.22	2.49	0.66	0.94	3.36	5.08	4.18	3.82	4.93	4.44	2.91
Ho	0.05	0.48	0.16	0.19	0.70	1.03	0.89	0.78	1.00	0.90	0.57
Er	0.15	1.35	0.40	0.61	2.07	3.00	2.68	2.31	2.83	2.48	1.66
Tm	0.02	0.19	0.06	0.07	0.31	0.44	0.37	0.34	0.42	0.36	0.25
Yb	0.14	1.21	0.45	0.50	2.07	2.89	2.41	2.23	2.67	2.34	1.64
Lu	0.02	0.17	0.07	0.07	0.31	0.40	0.35	0.32	0.39	0.36	0.25
∑REE	4.37	60.96	5.08	6.11	54.09	81.64	75.27	57.68	56.28	80.88	53.44
LR/HR	4.10	5.80	1.14	0.92	3.32	3.47	3.75	3.15	2.23	4.10	4.04
δEu	0.73	1.02	3.20	1.41	1.07	0.75	0.87	1.02	0.94	1.25	1.01
Y	1.31	17.20	3.11	4.56	21.10	29.19	19.60	24.22	29.55	34.40	17.06
Rb	2.42	23.1	4.25	2.67	9.62	18.4	20.0	12.5	11.2	15.3	14.8
Sr	37.5	245	252	208	268	374	299	320	297	302	283
Ba	47.0	198	100	97.2	145	126	124	187	185	234	158
Zr	2.99	90.4	2.79	2.67	75.2	81.8	95.3	23.6	30.4	32.8	19.0
Nb	1.37	3.68	0.24	0.25	7.51	5.94	5.62	4.35	5.58	10.0	3.30
Ta	0.11	0.24	0.12	0.11	0.42	0.33	0.47	0.25	0.32	0.62	0.21
U	0.91	0.19	<0.05	<0.05	0.16	0.57	0.34	0.21	0.11	0.13	0.08
Th	0.25	1.05	0.05	0.06	0.30	1.44	2.45	2.04	0.19	0.40	0.33
Hf	0.11	1.91	0.13	0.15	2.19	2.24	2.42	0.84	1.03	0.90	0.73
V	56.8	121	77.3	127	243	196	172	222	271	288	178
Cr	2398	1906	643	544	284	308	205	419	66.0	147	410
Co		93.4			39.9	38.0		48.4	45.7	45.8	42.0
Ni	1720	1686	204	172	89.4	99.2	71.5	122	45.3	69.8	137
Cu		6.10			37.6	26.3		45.8	49.0	68.4	65.7
Zn		65.0			89.9	106		95.6	78.5	81.1	78.2

样品号	07Y-893	07Y-911	07Y-795	07Y-796	07Y-798	07Y-799	07Y-851	07Y-852	07Y-853	07Y-860	07Y-880
岩性	玄武岩		中酸性火山岩								
SiO_2	51.16	49.79	61.40	62.07	66.25	61.96	60.62	71.92	66.52	66.31	60.13
TiO_2	0.47	0.98	1.09	0.84	0.97	0.79	0.93	0.62	0.95	0.72	0.86
Al_2O_3	14.31	13.92	17.23	14.92	13.82	14.99	15.59	11.51	12.54	14.45	15.75
Fe_2O_3	1.65	1.46	1.16	1.41	1.89	1.57	2.76	1.86	2.44	1.56	2.31
FeO	7.60	6.66	3.32	5.35	3.72	5.30	5.08	3.09	4.01	3.83	5.01
MnO	0.20	0.17	0.14	0.08	0.08	0.12	0.08	0.08	0.07	0.06	0.11
MgO	10.62	12.18	2.57	4.02	3.00	3.74	4.04	2.45	3.60	3.18	4.60
CaO	9.50	5.79	2.50	2.34	2.39	2.98	3.14	1.91	2.85	1.90	2.12
Na_2O	1.88	3.28	0.64	3.00	3.05	1.74	2.38	2.24	1.87	3.07	3.63
K_2O	0.35	1.10	6.15	1.64	2.10	3.92	2.80	2.06	2.27	1.71	2.93

续表 2

Continued Table 2

样品号	07Y-893	07Y-911	07Y-795	07Y-796	07Y-798	07Y-799	07Y-851	07Y-852	07Y-853	07Y-860	07Y-880
岩性	玄武岩		中酸性火山岩								
P_2O_5	0.05	0.24	0.25	0.18	0.24	0.19	0.19	0.10	0.20	0.21	0.27
H_2O^+	2.22	3.78	2.67	3.14	2.08	1.60	2.14	1.36	2.16	2.92	2.14
CO_2	0.41	0.39	1.04	0.63	0.96	0.54	0.20	0.63	0.20	0.46	0.34
Total	100.42	99.74	100.16	99.62	100.55	99.44	99.95	99.83	99.68	100.38	100.20
La	4.61	24.18	20.64	27.60	27.70	28.80	30.30	17.40	23.90	19.67	10.36
Ce	8.70	47.01	29.86	53.50	55.80	58.40	64.70	36.70	60.20	31.14	17.20
Pr	1.38	6.65	5.78	6.36	6.96	6.68	7.12	4.16	5.64	5.33	3.69
Nd	6.24	26.51	22.84	24.10	27.20	25.90	28.50	16.40	22.80	20.92	16.83
Sm	1.60	4.60	4.15	4.81	5.64	5.46	5.76	3.26	4.76	3.99	4.12
Eu	0.73	1.35	1.06	1.28	1.37	1.34	1.62	0.88	1.25	1.06	1.06
Gd	2.14	4.46	3.63	4.57	5.27	5.45	5.69	2.96	4.74	3.78	4.83
Tb	0.35	0.60	0.51	0.63	0.79	0.78	0.79	0.43	0.74	0.57	0.73
Dy	2.39	3.65	3.03	4.05	4.85	4.68	4.82	2.64	4.62	3.48	4.61
Ho	0.51	0.69	0.57	0.81	0.97	0.94	0.97	0.53	0.93	0.67	0.86
Er	1.48	1.98	1.59	2.33	2.86	2.64	2.79	1.51	2.75	2.02	2.45
Tm	0.22	0.29	0.23	0.33	0.40	0.35	0.37	0.23	0.38	0.30	0.34
Yb	1.54	1.87	1.47	2.22	2.67	2.33	2.41	1.51	2.57	2.07	2.05
Lu	0.23	0.26	0.21	0.32	0.39	0.37	0.36	0.23	0.35	0.31	0.27
∑REE	32.10	124.09	95.58	132.91	142.87	144.12	156.20	88.84	135.63	95.30	69.37
LR/HR	2.63	8.00	7.50	7.71	6.85	7.22	7.58	7.85	6.94	6.22	3.30
δEu	1.20	0.91	0.84	0.83	0.77	0.75	0.86	0.87	0.80	0.83	0.73
Y	15.88	22.19	17.42	16.50	21.70	20.00	26.80	14.80	26.30	20.86	24.91
Rb	11.9	30.6	137	56.3	76.8	175	107	67.4	87.5	35.8	73.0
Sr	206	915	75.3	247	252	145	320	192	271	235	221
Ba	143	1041	410	390	420	520	506	504	467	414	415
Zr	15.9	111	164	163	141	161	179	130	142	162	117
Nb	1.43	5.55	10.51	10.10	12.70	11.00	11.50	11.20	14.20	10.51	9.76
Ta	0.11	0.33	0.63	0.94	1.17	0.97	0.75	0.67	0.89	0.76	0.55
U	0.11	0.76	1.19	1.93	3.12	2.13	1.58	1.29	1.44	1.63	0.05
Th	0.29	4.14	4.93	14.80	9.41	12.90	9.57	11.40	9.77	8.74	1.37
Hf	0.55	2.71	3.98	5.00	4.19	4.65	5.35	4.05	4.45	4.08	3.07
V	233	170	180	136	140	105	161	95.6	139	108	<0.05
Cr	213	686	126	79.6	86.4	72.5	85.1	63.3	99.2	100	4.90
Co	53.3	50.9	10.6							15.7	17.0
Ni	110	194	39.7	43.6	74.8	52.7	61.7	40.8	62.1	55.5	50.6
Cu	69.4	182	11.1							43.3	115
Zn	79.5	282	43.5							39.4	126

表 3 南天山铜花山蛇绿岩的岩石化学成份(主量元素:wt%;微量和稀土元素:$\times 10^{-6}$)

Table 3 Chemical compositions of Tonghuashan ophiolite in South Tianshan (Major elements: wt%; trace elements: $\times 10^{-6}$)

样品号	07Y-971	07Y-972	07Y-973	07Y-974	07Y-975	07Y-976	07Y-977	07Y-979	07Y-980	07Y-981	07Y-989
岩性	超镁铁岩										
SiO_2	38.56	37.79	36.28	36.20	37.90	36.89	31.04	33.94	40.94	35.24	40.36
TiO_2	0.11	0.05	0.05	0.04	0.08	0.02	0.08	0.05	0.02	0.23	0.09
Al_2O_3	1.71	1.35	1.63	1.20	1.42	1.21	0.88	1.38	1.49	1.59	1.65
Fe_2O_3	2.76	2.15	3.35	1.68	2.01	3.40	1.15	2.63	4.13	1.55	4.08
FeO	4.10	4.96	3.81	5.28	5.42	3.36	4.83	5.12	3.84	4.90	3.74
MnO	0.11	0.12	0.20	0.14	0.13	0.21	0.18	0.15	0.18	0.18	0.07
MgO	34.06	32.65	34.70	32.65	33.85	34.45	24.04	28.00	36.50	24.41	35.86
CaO	3.72	5.49	4.94	6.47	4.45	4.92	17.00	10.51	0.42	14.28	0.32
Na_2O	0.06	0.10	0.03	0.11	0.09	0.02	<0.01	0.07	0.06	0.25	0.17
K_2O	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	<0.01	0.03	0.04	0.04	0.06
P_2O_5	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	0.03	0.05	0.01	0.08	0.02

续表 3

Continued Table 3

样品号	07Y-971	07Y-972	07Y-973	07Y-974	07Y-975	07Y-976	07Y-977	07Y-979	07Y-980	07Y-981	07Y-989
岩性	超镁铁岩										
H_2O^+	12.68	11.42	11.48	10.98	11.96	11.56	8.06	10.14	12.04	8.22	12.26
CO_2	2.07	4.27	3.59	5.20	3.08	3.79	11.86	7.60	0.43	8.15	0.39
Total	99.98	100.37	100.08	99.96	100.40	99.86	99.15	99.67	100.10	99.12	99.07
La	4.66	2.91	1.53	1.37	1.10	2.23	2.62	2.14	3.61	4.06	1.86
Ce	9.95	5.87	2.65	3.12	2.61	3.60	4.27	3.93	6.37	7.70	4.24
Pr	1.19	0.68	0.30	0.44	0.38	0.53	0.48	0.62	0.87	0.92	0.59
Nd	4.87	2.85	1.39	1.94	1.79	2.34	1.86	2.70	3.54	3.42	2.78
Sm	0.89	0.58	0.27	0.43	0.43	0.47	0.39	0.50	0.68	0.73	0.71
Eu	0.28	0.16	0.10	0.23	0.17	0.08	0.19	0.20	0.17	0.23	0.34
Gd	0.84	0.49	0.31	0.48	0.47	0.47	0.32	0.48	0.78	0.68	0.76
Tb	0.10	0.06	0.04	0.06	0.06	0.07	0.05	0.06	0.10	0.10	0.11
Dy	0.60	0.35	0.21	0.35	0.36	0.36	0.24	0.38	0.54	0.49	0.63
Ho	0.10	0.06	0.04	0.06	0.07	0.07	0.04	0.07	0.10	0.09	0.11
Er	0.29	0.16	0.09	0.15	0.19	0.18	0.11	0.18	0.24	0.26	0.27
Tm	0.04	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03
Yb	0.23	0.13	0.09	0.10	0.15	0.14	0.10	0.15	0.17	0.20	0.21
Lu	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
∑REE	24.07	14.34	7.04	8.76	7.83	10.57	10.70	11.45	17.21	18.94	12.67
LR/HR	9.82	10.10	7.79	6.11	4.80	6.96	11.02	7.40	7.73	9.07	4.89
δEu	0.99	0.92	1.06	1.55	1.16	0.50	1.64	1.25	0.70	1.00	1.41
Y	2.99	1.91	1.14	2.07	2.20	2.17	1.80	1.94	3.70	3.76	4.95
Rb	1.41	0.46	0.34	0.46	0.41	0.54	0.35	0.88	1.11	2.33	0.93
Sr	72.5	76.0	55.5	85.2	70.4	143	276	165	11.4	193	31.6
Ba	9.19	7.72	7.97	7.16	9.91	16.7	12.7	6.22	27.4	12.1	12.0
Zr	4.86	4.70	2.16	1.31	2.65	3.76	3.49	2.30	4.29	9.71	6.57
Nb	2.12	1.04	0.75	0.47	0.61	0.49	0.86	0.75	1.00	2.33	0.85
Ta	0.11	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.09	0.06	0.06	0.15	0.09
U	0.27	0.27	0.15	0.15	0.14	0.08	0.17	0.16	0.31	0.27	0.06
Th	0.12	0.34	0.08	0.09	0.05	0.14	0.21	0.07	0.16	0.38	0.13
Hf	0.18	0.15	0.06	0.02	0.08	0.10	0.10	0.07	0.12	0.30	0.17
V	35.4	30.9	27.1	29.2	35.9	25.3	40.9	33.8	30.8	62.3	40.1
Cr	2445	2100	2557	2608	2073	2429	2349	1713	2626	1964	2207
Co						98.5	91.8	77.4	119	84.4	112
Ni	2135	2285	1673	2248	1944	1737	1945	1383	2104	1939	2537
Cu						6.88	6.40	10.2	2.90	6.01	5.75
Zn						47.0	48.6	54.6	90.4	39.4	52.2

样品号	07Y-992	07Y-993	07Y-995	07Y-997	07Y-1029	07Y-1033	07Y-1034	07Y-1035	07Y-1037	07Y-1006	07Y-1008
岩性	超镁铁岩									堆晶岩	
SiO_2	40.17	40.20	39.92	40.71	37.34	38.16	34.48	37.85	28.07	38.78	43.20
TiO_2	0.03	0.04	0.02	0.05	0.72	0.10	0.04	0.40	0.08	1.33	1.14
Al_2O_3	0.72	0.98	0.77	1.04	4.13	1.79	1.12	1.52	1.62	16.23	12.98
Fe_2O_3	2.17	2.49	2.04	2.84	2.48	2.38	2.76	3.46	2.40	1.73	2.18
FeO	5.33	5.07	5.08	5.03	5.19	4.22	3.86	4.01	3.50	6.70	4.89
MnO	0.10	0.11	0.10	0.10	0.24	0.18	0.21	0.17	0.21	0.14	0.12
MgO	36.40	35.91	36.40	35.88	29.28	30.98	29.75	31.40	21.25	12.15	11.45
CaO	1.21	1.43	1.35	0.83	7.28	6.61	9.66	6.22	20.63	15.29	17.65
Na_2O	0.11	0.10	0.18	0.01	0.16	0.14	0.02	0.02	0.45	0.06	0.22
K_2O	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.15
P_2O_5	0.02	<0.01	0.01	0.01	0.08	0.04	<0.01	0.05	0.03	0.61	0.53
H_2O^+	11.40	11.52	11.56	11.60	9.74	10.28	10.88	10.76	7.84	6.42	4.74
CO_2	1.79	2.19	1.70	1.45	3.02	4.28	7.23	3.76	14.16	0.25	0.68
Total	99.45	100.04	99.13	99.55	99.69	99.18	100.03	99.63	100.26	99.72	99.93
La	2.01	1.83	2.07	1.44	2.71	2.15	1.24	1.33	1.55	53.70	44.63
Ce	4.57	4.00	4.76	3.15	6.30	4.77	2.66	3.37	3.58	105.20	86.53

续表 3

Continued Table 3

样品号	07Y-992	07Y-993	07Y-995	07Y-997	07Y-1029	07Y-1033	07Y-1034	07Y-1035	07Y-1037	07Y-1006	07Y-1008
岩性	超镁铁岩									堆晶岩	
Pr	0.58	0.53	0.58	0.38	0.84	0.62	0.37	0.46	0.51	14.53	11.83
Nd	2.33	2.46	2.49	1.65	3.88	2.68	1.65	2.26	2.30	56.84	46.40
Sm	0.56	0.59	0.59	0.45	0.95	0.65	0.39	0.51	0.56	9.76	7.92
Eu	0.08	0.06	0.07	0.06	0.28	0.25	0.27	0.25	0.29	2.45	2.01
Gd	0.49	0.56	0.58	0.41	1.07	0.69	0.31	0.57	0.71	7.56	6.09
Tb	0.07	0.06	0.09	0.06	0.16	0.10	<0.05	0.08	0.09	0.99	0.82
Dy	0.36	0.40	0.43	0.37	0.96	0.63	0.28	0.45	0.54	5.41	4.41
Ho	0.06	0.08	0.08	0.08	0.19	0.12	0.06	0.09	0.11	0.92	0.77
Er	0.16	0.19	0.20	0.19	0.52	0.31	0.12	0.23	0.29	2.57	2.10
Tm	0.02	<0.05	0.02	<0.05	0.07	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.35	0.29
Yb	0.12	0.15	0.15	0.15	0.46	0.28	0.12	0.20	0.21	2.20	1.87
Lu	0.02	<0.05	0.02	<0.05	0.06	0.04	<0.05	<0.05	<0.05	0.32	0.25
∑REE	11.43	10.91	12.13	8.39	18.45	13.34	7.47	9.80	10.74	262.8	215.9
LR/HR	7.79	6.58	6.73	5.66	4.29	5.01	7.39	5.05	4.51	11.93	12.00
δEu	0.47	0.32	0.37	0.43	0.85	1.14	2.37	1.42	1.41	0.87	0.88
Y	3.00	1.90	3.32	1.64	6.66	4.50	1.28	2.01	2.32	28.95	24.67
Rb	0.12	0.21	<0.05	0.14	0.94	0.49	0.45	0.46	0.40	3.17	8.44
Sr	22.3	18.5	21.6	14.8	99.4	166	249	93.1	306	221	125
Ba	3.86	4.83	1.94	9.60	39.9	22.1	14.9	21.6	17.6	35.8	157
Zr	4.89	2.16	3.34	4.25	28.1	11.8	2.27	4.47	3.67	372	309
Nb	0.55	0.67	0.59	0.82	5.95	1.44	0.71	1.09	0.84	17.40	14.02
Ta	0.05	0.14	0.04	0.14	0.37	0.10	0.11	0.15	0.12	0.94	0.76
U	0.05	<0.05	0.04	0.08	0.27	0.24	0.18	0.22	0.24	3.17	2.52
Th	0.14	0.29	0.08	0.11	0.33	0.28	0.05	0.10	0.07	16.17	12.61
Hf	0.09	0.09	0.07	0.10	0.89	0.28	<0.05	0.14	0.12	8.35	6.65
V	31.6	26.1	34.1	29.2	86.0	44.1	19.7	36.7	27.3	183.80	154.40
Cr	2497	2620	2589	2514	1406	2091	2266	2209	1589	761	624
Co	106		104		78.4	94.8				55.2	47.5
Ni	2452	2103	2474	1905	1447	2082	1869	1317	1423	311.30	245
Cu	13.4		13.7		6.01	8.70				70.5	44.4
Zn	67.7		61.6		49.9	50.1				96.3	65.9

样品号	07Y-941	07Y-946	07Y-951	07Y-954	07Y-955	07Y-956	07Y-961	07Y-964	07Y-968	07Y-987
岩性	基性岩脉		中酸性火山岩							
SiO_2	43.80	51.09	74.56	61.77	55.28	57.62	67.27	56.88	64.04	60.95
TiO_2	1.11	0.96	0.45	0.68	0.73	0.76	0.49	0.55	0.55	0.34
Al_2O_3	14.67	12.60	10.42	13.82	13.58	13.54	14.37	13.71	14.25	8.01
Fe_2O_3	4.54	2.08	1.49	3.65	2.24	2.21	1.66	1.87	2.36	0.81
FeO	3.61	5.19	2.32	4.53	3.14	3.16	1.96	2.95	2.55	1.89
MnO	0.15	0.11	0.08	0.11	0.10	0.08	0.06	0.14	0.10	0.12
MgO	9.45	11.24	2.32	3.57	10.50	8.44	2.69	3.92	3.61	2.38
CaO	9.75	6.73	0.46	2.22	4.41	3.53	1.09	6.40	2.44	11.26
Na_2O	0.96	2.48	1.26	0.03	5.28	5.72	3.94	4.17	3.88	1.78
K_2O	6.27	4.13	2.93	6.44	2.67	2.27	3.15	2.61	2.26	1.46
P_2O_5	1.02	0.76	0.06	0.15	0.29	0.29	0.32	0.17	0.19	0.12
H_2O^+	1.76	1.92	2.30	1.92	1.38	1.56	2.08	3.08	2.54	2.26
CO_2	2.35	0.80	0.87	0.83	0.73	0.30	0.25	3.91	0.65	8.27
Total	99.44	100.09	99.52	99.72	100.33	99.48	99.33	100.36	99.42	99.65
La	86.79	59.52	22.20	27.70	40.94	44.50	70.50	25.38	43.40	15.42
Ce	161.20	110.20	51.80	67.90	73.64	83.60	150.00	49.66	90.20	28.01
Pr	22.23	15.51	5.27	6.53	9.67	9.24	15.50	6.67	9.69	3.77
Nd	87.92	61.92	19.60	25.80	35.53	34.00	58.00	25.43	33.10	14.60
Sm	15.02	10.45	3.87	5.13	5.55	5.92	11.30	4.99	5.68	2.66
Eu	3.45	2.66	0.90	1.21	1.41	1.48	1.53	1.22	1.10	0.99
Gd	11.62	9.31	3.85	5.03	4.68	4.27	8.52	4.94	3.84	2.67

续表 3

Continued Table 3

样品号	07Y-941	07Y-946	07Y-951	07Y-954	07Y-955	07Y-956	07Y-961	07Y-964	07Y-968	07Y-987
岩性	基性岩脉		中酸性火山岩							
Tb	1. 25	1. 03	0. 54	0. 70	0. 62	0. 71	1. 37	0. 74	0. 66	0. 37
Dy	6. 26	5. 38	3. 28	4. 26	3. 62	3. 63	6. 82	4. 49	3. 33	2. 37
Ho	1. 08	0. 92	0. 68	0. 86	0. 66	0. 68	1. 18	0. 86	0. 60	0. 48
Er	2. 90	2. 47	1. 95	2. 53	1. 91	1. 91	3. 05	2. 42	1. 60	1. 41
Tm	0. 38	0. 32	0. 29	0. 37	0. 25	0. 27	0. 41	0. 34	0. 22	0. 21
Yb	2. 37	2. 07	2. 04	2. 54	1. 70	1. 72	2. 61	2. 25	1. 35	1. 42
Lu	0. 33	0. 29	0. 29	0. 36	0. 25	0. 25	0. 40	0. 31	0. 21	0. 22
∑REE	402. 8	282. 1	116. 6	150. 9	180. 4	192. 2	331. 2	129. 7	195. 0	74. 60
LR/HR	14. 39	11. 94	8. 02	8. 06	12. 18	13. 30	12. 60	6. 94	15. 51	7. 15
δEu	0. 80	0. 82	0. 71	0. 73	0. 85	0. 90	0. 48	0. 75	0. 72	1. 13
Y	32. 49	26. 77	14. 60	24. 80	19. 51	27. 20	53. 00	25. 66	22. 00	15. 17
Rb	331	163	109	244	206	199	90. 1	95. 0	62. 7	66. 4
Sr	2430	1019	20. 6	372	216	187	68. 8	198	230	315
Ba	3264	2512	714	1109	613	386	422	194	133	320
Zr	264	225	102	119	194	208	255	174	123	93. 3
Nb	14. 90	9. 93	7. 73	10. 20	8. 70	9. 62	9. 56	9. 34	11. 60	5. 78
Ta	0. 77	0. 55	0. 71	0. 62	0. 58	0. 64	0. 70	0. 75	0. 76	0. 39
U	8. 29	3. 96	1. 22	1. 64	4. 31	3. 51	2. 47	1. 61	1. 15	1. 00
Th	38. 23	19. 58	9. 34	9. 19	20. 65	20. 70	60. 90	13. 56	24. 20	5. 48
Hf	6. 19	5. 48	3. 24	3. 67	4. 98	5. 31	7. 27	4. 56	3. 13	2. 62
V	231	182	65. 2	92. 3	107	119	58. 7	87. 1	95. 2	52. 0
Cr	568	676	41. 7	67. 3	504	519	61. 9	149	165	104
Co	41. 8	42. 9			35. 2	33. 6	10. 6	19. 8	30. 4	9. 55
Ni	140	303	33. 6	80. 9	308	355	43. 8	82. 3	107	39. 2
Cu	101	44. 2			32. 4	33. 9	20. 2	18. 4	4. 91	10. 0
Zn	77. 9	73. 0			58. 5	59. 7	57. 1	73. 2	77. 7	42. 0

样品号	07Y-988	07Y-948	07Y-950	07Y-952	07Y-953	07Y-985	07Y-986	07Y-1001	07Y-1003	07Y-1004
岩性	中酸性火山岩		玄武岩					苦橄岩		
SiO_2	68. 92	47. 75	48. 62	49. 66	51. 47	51. 96	51. 65	32. 71	35. 58	34. 15
TiO_2	0. 49	1. 78	1. 71	1. 94	2. 18	0. 64	0. 68	1. 12	1. 10	1. 90
Al_2O_3	9. 82	15. 60	15. 58	14. 95	15. 75	12. 64	12. 36	13. 09	12. 90	11. 87
Fe_2O_3	0. 88	3. 65	3. 30	4. 17	3. 66	1. 96	2. 57	2. 03	2. 42	1. 78
FeO	2. 75	6. 27	5. 87	6. 09	5. 50	3. 81	3. 43	6. 14	5. 82	9. 83
MnO	0. 07	0. 15	0. 15	0. 16	0. 14	0. 09	0. 10	0. 40	0. 27	0. 27
MgO	2. 94	7. 97	7. 23	6. 71	5. 35	10. 22	9. 46	28. 50	26. 88	20. 12
CaO	4. 28	9. 62	9. 80	7. 66	6. 22	5. 27	5. 37	2. 24	3. 76	9. 28
Na_2O	1. 72	3. 15	3. 57	4. 10	4. 72	2. 92	2. 47	0. 26	0. 30	0. 03
K_2O	2. 20	0. 62	0. 53	0. 85	0. 76	1. 05	2. 91	0. 10	0. 16	0. 03
P_2O_5	0. 16	0. 31	0. 30	0. 33	0. 41	0. 26	0. 27	0. 40	0. 40	0. 86
H_2O^+	2. 28	2. 78	2. 60	3. 38	2. 62	4. 44	3. 40	11. 32	9. 68	8. 28
CO_2	3. 02	0. 21	0. 55	0. 13	0. 54	4. 07	5. 61	1. 00	0. 07	1. 09
Total	99. 53	99. 86	99. 81	100. 13	99. 32	99. 33	100. 28	99. 31	99. 34	99. 49
La	17. 20	22. 20	18. 45	25. 30	27. 70	46. 20	25. 97	36. 80	39. 85	79. 20
Ce	34. 90	44. 50	35. 35	53. 30	58. 40	85. 70	46. 89	75. 00	125. 0	156. 0
Pr	3. 92	5. 34	5. 19	6. 39	6. 77	9. 35	6. 37	8. 90	10. 98	19. 10
Nd	14. 80	21. 90	21. 59	25. 90	28. 20	34. 50	24. 65	35. 30	42. 91	75. 00
Sm	3. 07	4. 89	4. 57	5. 47	6. 15	6. 20	4. 52	6. 80	7. 63	14. 40
Eu	0. 94	1. 65	1. 57	1. 80	1. 86	1. 46	1. 08	1. 35	1. 78	3. 22
Gd	2. 70	5. 08	5. 12	6. 18	6. 45	4. 52	4. 41	5. 44	6. 62	10. 00
Tb	0. 44	0. 83	0. 76	0. 92	0. 97	0. 69	0. 59	0. 86	0. 94	1. 61
Dy	2. 56	4. 96	4. 70	5. 81	5. 94	3. 47	3. 47	4. 50	5. 46	7. 86
Ho	0. 51	0. 98	0. 93	1. 18	1. 25	0. 64	0. 64	0. 83	1. 03	1. 38
Er	1. 54	2. 68	2. 60	3. 21	3. 62	1. 80	1. 87	2. 28	2. 94	3. 67
Tm	0. 23	0. 38	0. 37	0. 46	0. 49	0. 25	0. 27	0. 32	0. 41	0. 51

续表 3

Continued Table 3

样品号	07Y-988	07Y-948	07Y-950	07Y-952	07Y-953	07Y-985	07Y-986	07Y-1001	07Y-1003	07Y-1004
岩性	中酸性火山岩	玄武岩						苦橄岩		
Yb	1.58	2.45	2.32	3.03	3.38	1.60	1.74	1.96	2.82	3.14
Lu	0.25	0.36	0.34	0.46	0.48	0.23	0.25	0.30	0.41	0.43
∑REE	84.64	118.2	103.9	139.4	151.7	196.6	122.7	180.6	248.8	375.5
LR/HR	7.63	5.67	5.06	5.56	5.72	13.89	8.27	9.95	11.06	12.13
δEu	1.00	1.01	0.99	0.95	0.90	0.84	0.74	0.68	0.77	0.82
Y	19.20	35.50	25.69	23.70	34.30	25.50	21.52	29.90	30.70	54.90
Rb	95.6	18.9	15.3	16.3	16.6	53.9	125	3.63	10.4	1.57
Sr	125	308	406	418	226	1875	454	85.2	265	191
Ba	517	176	181	251	184	951	1100	71.8	191	31.1
Zr	116	131	109	139	158	151	132	203	207	446
Nb	7.99	23.60	20.62	27.90	35.40	7.87	7.13	11.40	10.77	24.50
Ta	0.55	1.40	1.26	2.11	1.95	0.54	0.47	0.68	0.64	1.38
U	1.14	0.57	0.65	0.78	0.89	3.45	3.39	1.87	2.89	4.14
Th	7.55	2.72	3.23	3.61	3.70	16.50	11.99	12.30	19.45	24.70
Hf	2.97	3.16	2.95	4.12	4.40	3.79	3.23	4.61	4.49	12.10
V	77.5	284	<0.05	349	346	128	126	168	159	238
Cr	123	198	<0.05	95.3	89.0	579	833	875	525	1106
Co	11.5	40.5	2.25			39.4	37.8	55.3	42.4	73.2
Ni	65.6	97.4	59.4	52.4	52.0	420	267	604	244	547
Cu	17.2	34.2	59.3			40.1	16.5	67.4	18.0	89.6
Zn	56.8	79.7	75.7			58.6	54.0	123	99.5	137

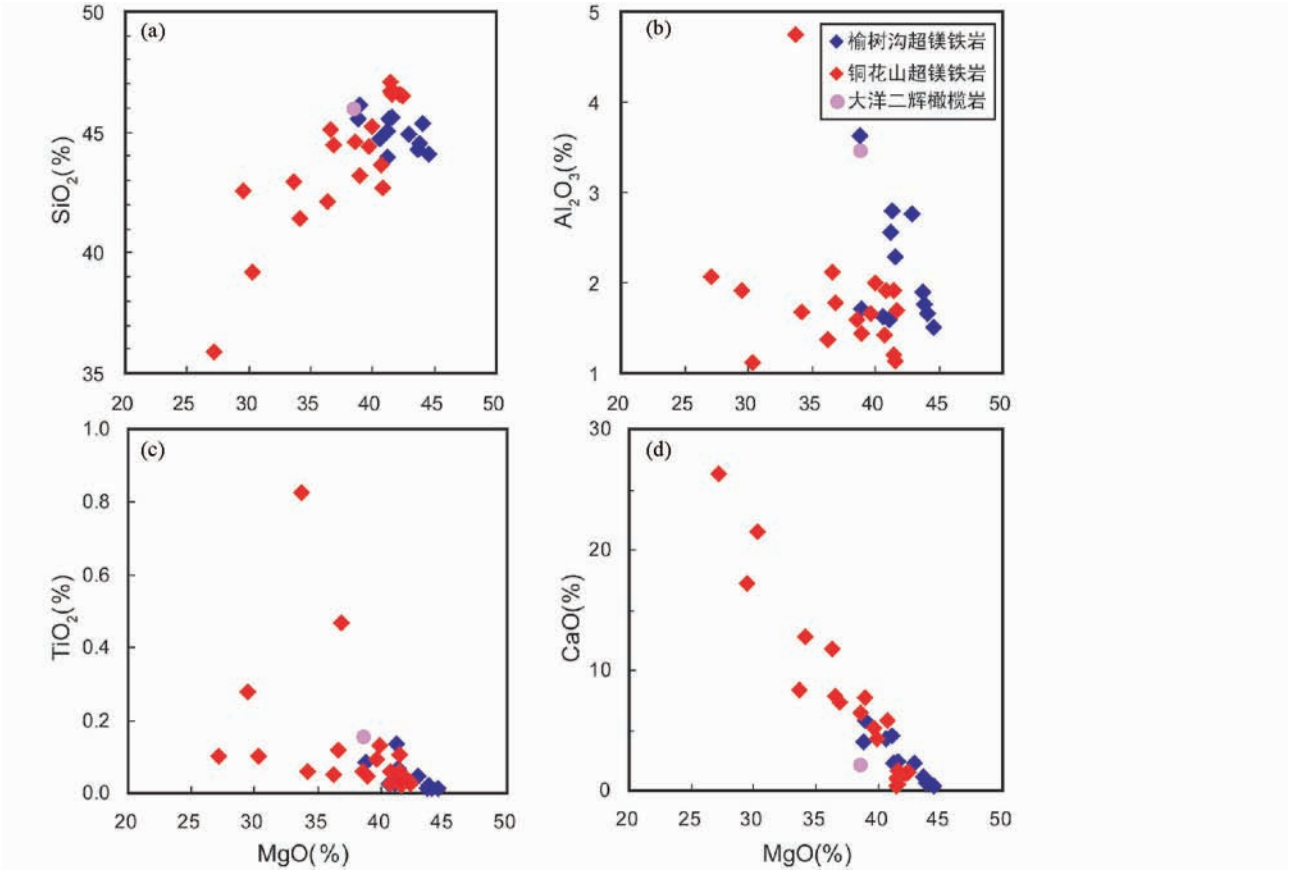


图 5 榆树沟-铜花山蛇绿岩中超镁铁岩的主元素成分特征

Fig. 5 MgO vs. SiO_2, Al_2O_3, TiO_2 and CaO diagrams of ultramafic rocks from Yushugou-Tonghuashan ophiolite

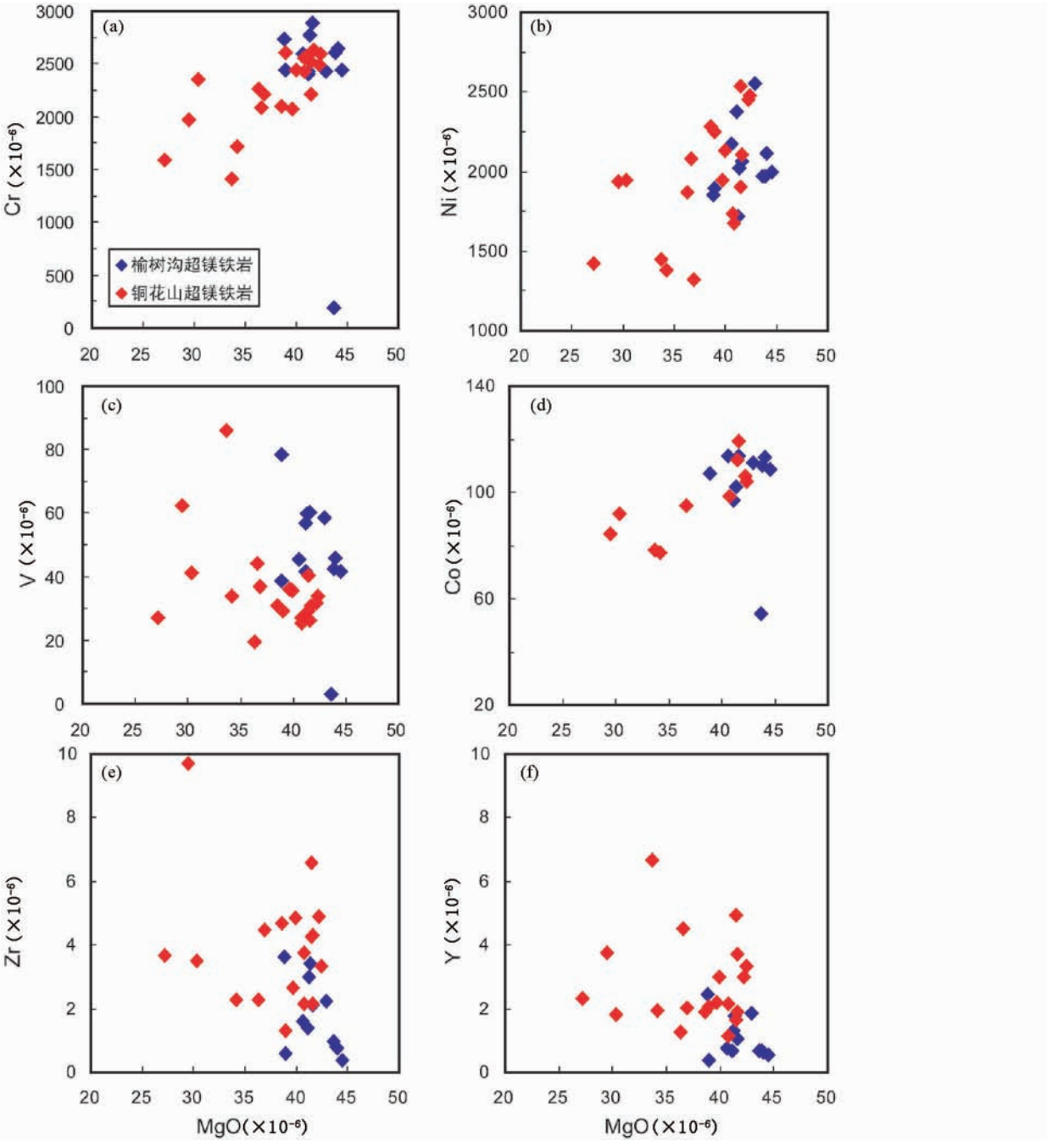


图 6　榆树沟-铜花山蛇绿岩超镁铁岩的微量元素特征

Fig. 6　MgO vs. Cr, Ni, V, Co, Zr and Y diagrams of ultramafic rocks from Yushugou-Tonghuashan ophiolite

低，个别岩石的 TiO_2 含量高，则可能与来自镁铁质岩石的流体有关。

对于微量元素说来，蛇纹石化作用通常会影响 Rb、Sr、Ba 和 U 含量的变化，而 Nb、Ta、Th、Hf 的低含量会影响分析的精度（杨经绥等，2008），因此，这里选择含量相对较高的微量元素 Cr、Ni、V、Co、Zr 和 Y 进行讨论。在 MgO 与它们的丰度变异图上（图 6），Cr、Ni 和 Co 与 MgO 的正相关及 V 与 MgO 的负相关，说明与岩石中尖晶石及橄榄石含量的变化有关（Dick and Bullen，1984）。Zr、Y 不仅仅含量低，并且十分集中，反映了经部分熔融后残余地幔岩岩石的不相容元素变化程度小。

榆树沟超镁铁岩中的相容元素如 Cr、Ni 含量普遍高，除样品 07Y-914 外，分别为 $2398\times10^{-6}\sim2880\times10^{-6}$ 和 $1720\times10^{-6}\sim2553\times10^{-6}$（表 2、图 6a，b）；铜花山超镁铁岩中的 Cr、Ni 含量分别为 $1406\times10^{-6}\sim2626\times10^{-6}$ 和 $1317\times10^{-6}\sim2537\times10^{-6}$，也相对比较集中，说明这些元素不受蛇纹石化

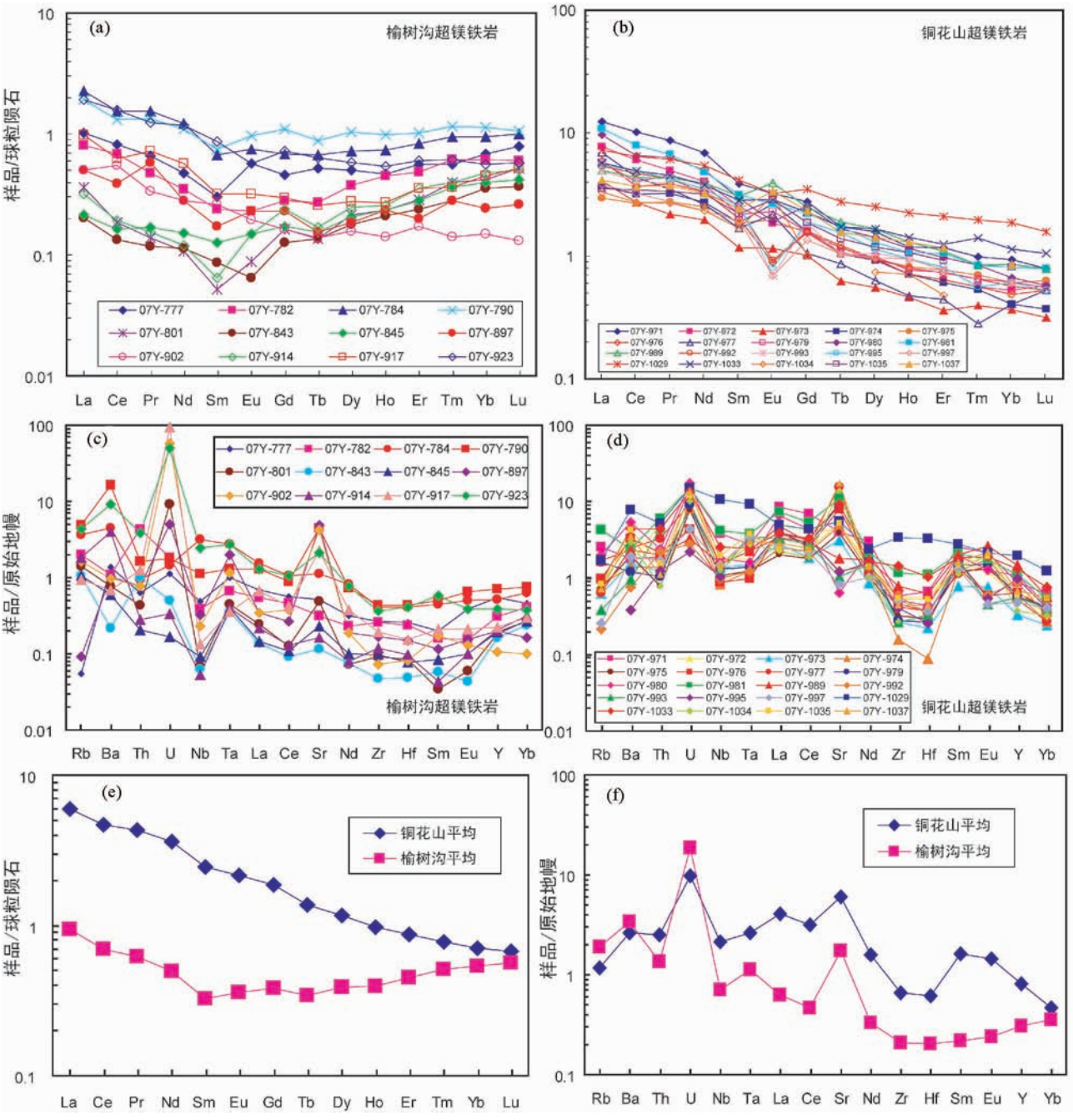


图 7 榆树沟-铜花山蛇绿岩中超镁铁岩稀土元素球粒陨石标准化模式图和微量元素原始地幔蛛网图

(a)、(b)-榆树沟、铜花山超镁铁岩稀土元素球粒陨石标准化模式图;(c)、(d)-榆树沟、铜花山超镁铁岩微量元素原始地幔蛛网图;(e)-榆树沟和铜花山超镁铁岩稀土元素平均值的球粒陨石标准化模式图;(f)-榆树沟和铜花山超镁铁岩微量元素平均值的原始地幔蛛网图

Fig. 7 Chondrited REE patterns and primitive mantle normalized trace elements spidergrams for the ultramafic rocks from Yushugou-Tonghuashan ophiolite

(a), (b)-Chondrited REE patterns for ultramafic rocks from Yushugou and Tonghuashan respectively; (c), (d)-Primitive mantle normalized trace elements spidergrams for ultramafic rocks from Yushugou and Tonghuashan respectively; (e)-Chondrited average REE patterns for Yushugou and Tonghuashan ultramafic rocks; (f)-Primitive mantle normalized average trace elements spidergrams for Tonghuashan and Tonghuashan ultramafic rocks

的影响;大离子亲石元素 Ba(大部分为 1.11×10^{-6} ~ 22.78×10^{-6})、Rb($<2.69\times10^{-6}$)含量较低(表 2),与世界典型蛇绿岩相似,反映了地幔残留岩石的特征(张旗等,1992)。

榆树沟超镁铁岩球粒陨石(Taylor and McLennan,1985)标准化的稀土元素配分模式为 LREE 弱富集型(图 7a),LREE/HREE = 1 ~ 4.79,稀土元素含量总体不高,丰度变化

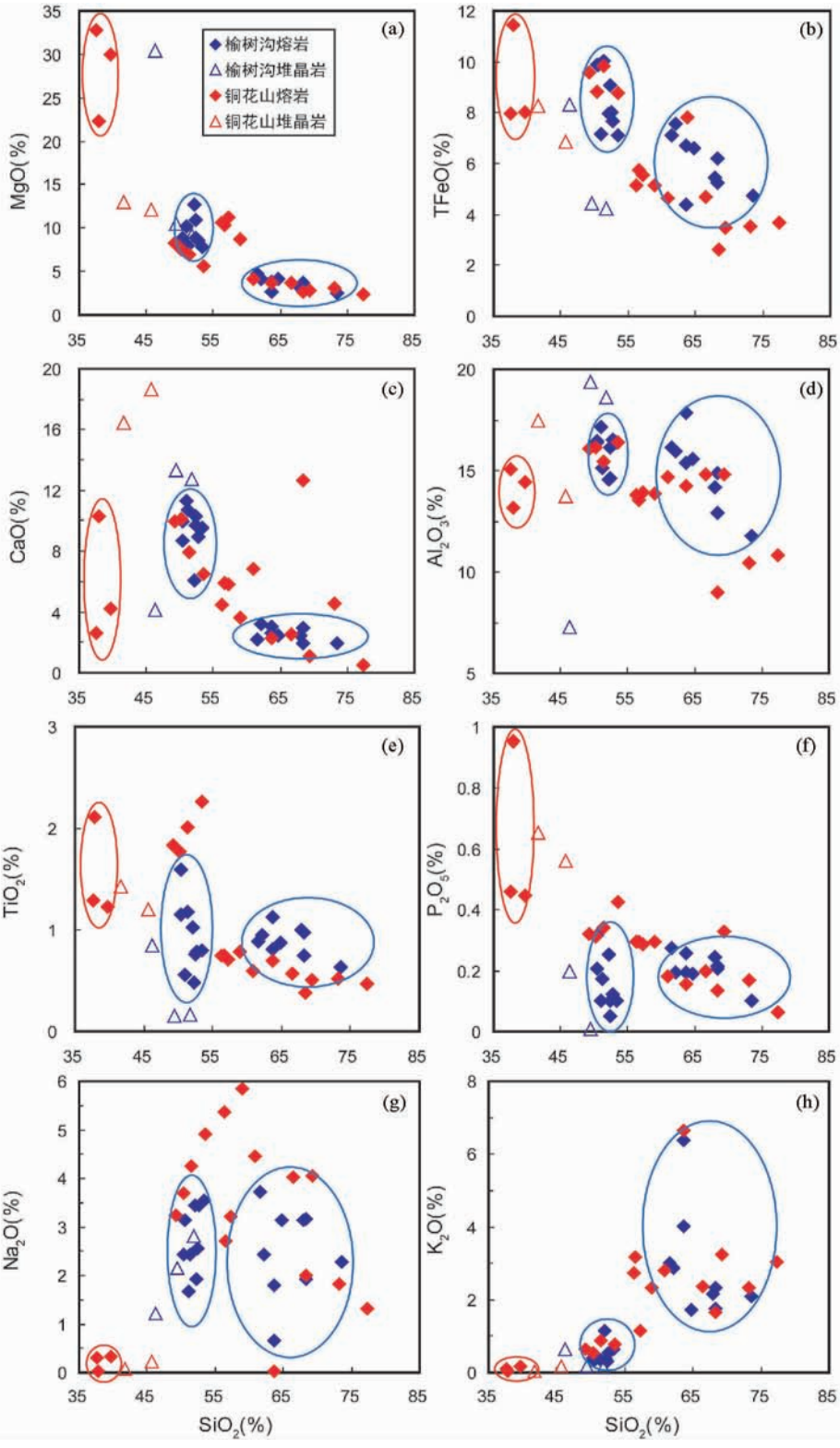


图 8　榆树沟-铜花山蛇绿岩堆晶岩和熔岩的主元素 Hark 图解

Fig. 8　Hark diagrams of major elements for cumulates and lavas from Yushugou-Tonghuashan ophiolite

于 0.63×10^{-6} ~ 4.75×10^{-6}，与球粒陨石相近，δEu = 0.62 ~ 1.54，轻重稀土分馏程度不明显。相比之下，铜花山超镁铁岩的稀土元素总体含量高于榆树沟，丰度变化于 7.04×10^{-6} ~ 24.07×10^{-6}，稀土配分模式为 LREE 强烈富集型，LREE/HREE = 4.29 ~ 11.02。两地超镁铁岩稀土元素的差别与岩石本身的蛇纹石化强度相一致，强蛇纹石化的铜花山超镁铁

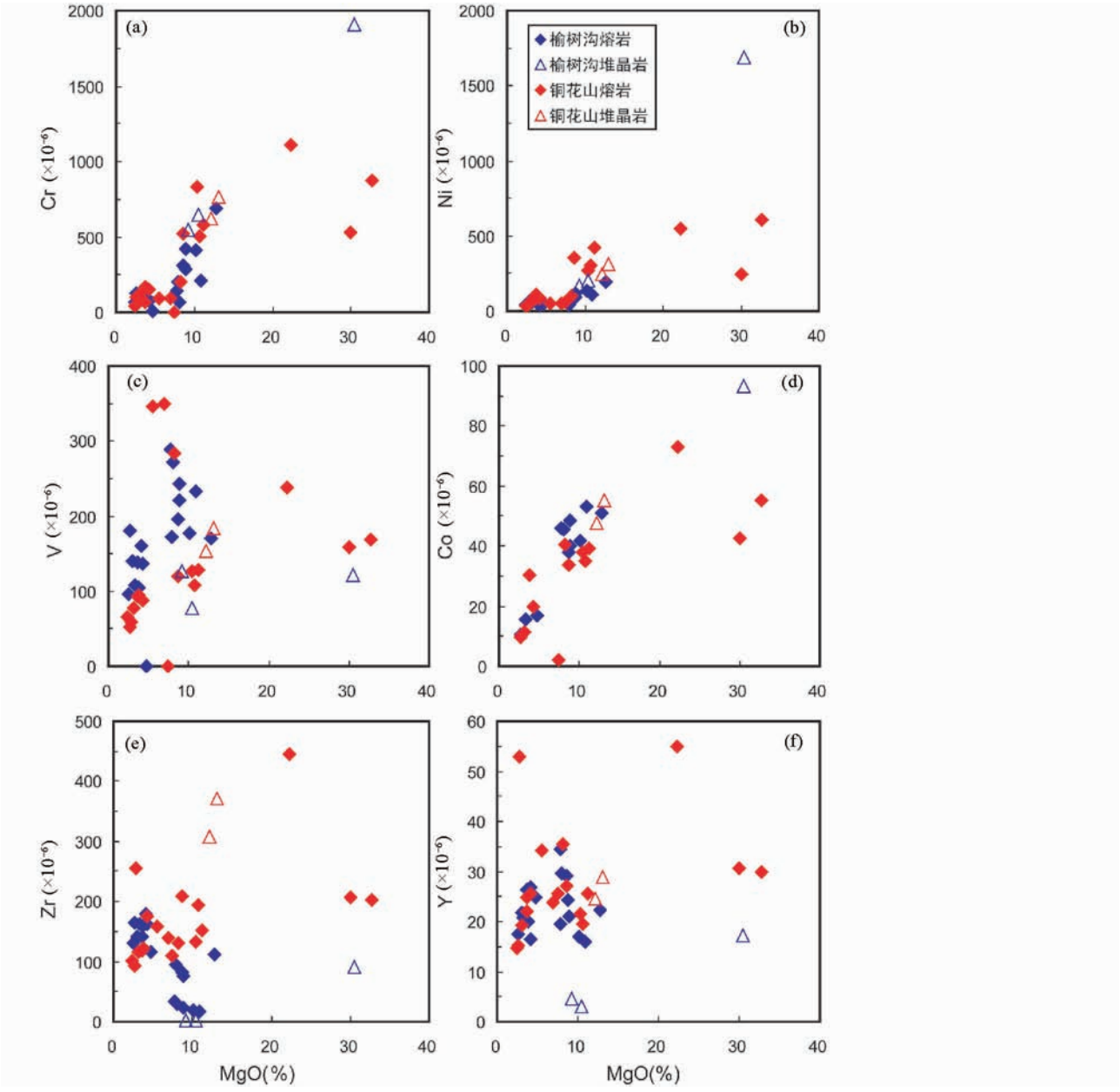


图 9 榆树沟-铜花山蛇绿岩堆晶岩和熔岩的微量元素特征

Fig. 9 MgO vs. Cr, Ni, V, Co, Zr and Y diagrams of cumulates and lavas from Yushugou-Tonghuashan ophiolite

岩有高富集的 LREE,可能经历了较强的俯冲洋壳流体的改造,而不是早期的地幔交代作用所致。该特征与北阿尔金地区米兰红柳沟蛇绿岩中的全蛇纹石化橄榄岩的稀土元素可以对比(杨经绥等,2008)。δEu = 0.32 ~ 2.37,Eu 从强烈亏损到强烈富集均有(图 7b),说明受后期改造影响。两个地区的稀土元素配分型式总体来说与中国造山带中蛇绿岩变质橄榄岩(包括二辉橄榄岩、方辉橄榄岩和纯橄岩)稀土元素配分型式以 U 或 V 形和 LREE 富集型式为主要特征的情况十分相似(王希斌等,1995)。

在不相容元素原始地幔标准化(Thompson,1982)分布图中(图 7c),榆树沟超镁铁岩显示一个左高右低的斜坡,这种富集大离子亲石元素(LILE)的特征同样反映了俯冲带壳源的流体作用。此外,榆树沟多数高场强元素(HFSE),如 Nb、Zr、Hf 出现了负异常,并且有明显的 U、Sr 正异常。铜花山在不相容元素原始地幔标准化(Thompson,1982)分布图(图 7d)中,除了 Nb、Ta 相对于 U 强烈亏损以外,也出现了 Zr、Hf 负异常,说明这些特征既反映了亏损地幔源区的特征,也反映了源区曾遭受不同程度的俯冲带流体交代。

对榆树沟和铜花山的稀土元素和微量元素进行平均标准化作图(图 7e, f),显示铜花山稀土元素总量和 LREE 的富集程度均高于榆树沟,可能与铜花山后期流体的加入有关,而榆树沟后期流体改造可能相对比较小,更多地可能代表了

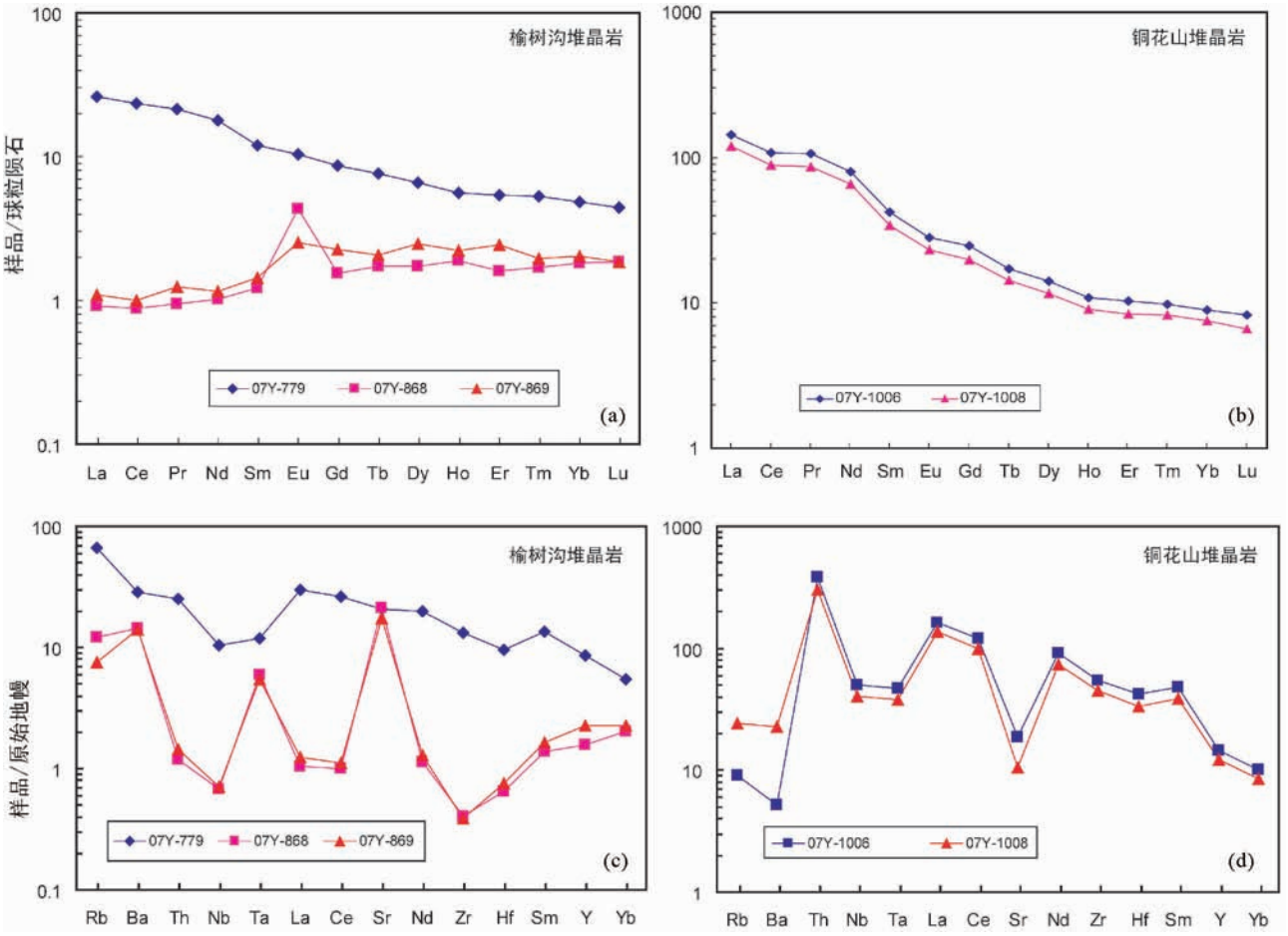


图 10 榆树沟-铜花山蛇绿岩中堆晶岩 REE 球粒陨石标准化模式图(a, b)和微量元素原始地幔蛛网图(c, d)

Fig. 10 Chondrited REE patterns (a, b) and primitive mantle normalized trace elements spidergrams (c, d) for cumulates in Yushugou-Tonghuashan ophiolite

原来岩石的特征。图 7(f)中可以看出,铜花山的微量元素原始地幔标准化蛛网图与榆树沟的类似,但多数微量元素含量普遍高于榆树沟,同时出现了 Zr、Hf 的负异常。

5.2 榆树沟-铜花山的堆晶岩类化学成分

榆树沟堆晶岩样品比较少,仅分析了三个样品。主元素有一个很大的变化区间,其中 SiO_2 变化于 46.28% ~ 51.77%,MgO 为 9.2% ~30.45%,CaO 为 4.11% ~13.37%,Al_2O_3 为 7.29% ~ 19.35%(图 8)。堆晶岩中高 MgO 与高 Cr、Co 和 Ni 一致,显示一定的正相关关系;而不相容元素 Y、Zr 和 Nb 的丰度较低(图 9、表 2)。因此,从成分上可能存在两类:一类为高镁和铁、低钙和硅,靠近苦橄岩成分(图 8 红圈部分);第二类为低镁、铁和钛,高钙和铝,成分整体上类似于玄武岩,但其中钛含量很低,反映原辉长岩特点。

与主元素变化相一致,榆树沟堆晶岩的稀土元素配分模式也有两种类型(图 10a):LREE 富集型和 LREE 略亏损的平坦型,前者的 REE 含量为球粒陨石的 16 倍,而后者的 REE 含量近似于球粒陨石,且具显著的 Eu 正异常,δEu = 1.41 ~3.2。

铜花山堆晶岩主元素的 SiO_2 在 41.68% ~45.71% 之间,Al_2O_3 为 13.73% ~17.44%,CaO 为 16.43% ~18.68%,MgO 为 12.12% ~13.06%,除个别元素外,成分整体上接近于玄武岩(图 8)。球粒陨石标准化的稀土元素配分模式(图 10b)显示为 LREE 富集型,且 REE 总量比榆树沟堆晶岩的高,为球粒陨石的 55 ~67 倍,δEu 为 0.87 ~0.88,为弱亏损型。

与本区超镁铁岩和其他各类熔岩相比,堆晶岩的不相容元素含量要比超镁铁岩高,但与熔岩类接近(表 2、表 3)。榆树沟堆晶岩的 Cr、Ni 含量分别为 $544 \times 10^{-6} \sim 1906 \times 10^{-6}$ 和 $172 \times 10^{-6} \sim 1686 \times 10^{-6}$,而铜花山堆晶岩的分别为 $624 \times 10^{-6} \sim 760 \times 10^{-6}$ 和 $245 \times 10^{-6} \sim 311 \times 10^{-6}$,两个地区堆晶岩的 Cr、Ni 含量均比超镁铁岩的低,接近熔岩类中高含量部分。这些特征进一步表明堆晶岩与熔岩可能来自同一岩浆,堆晶岩系分离结晶作用形成,这说明深部存在岩浆房。

在球粒陨石标准化微量元素比值蛛网图上(图 10c, d),榆树沟堆晶岩以轻微富集大离子亲石元素 Sr、Rb、Ba,高场强元素(Nb、Zr、Hf、Y)丰度低为特征;铜花山堆晶岩以富集大

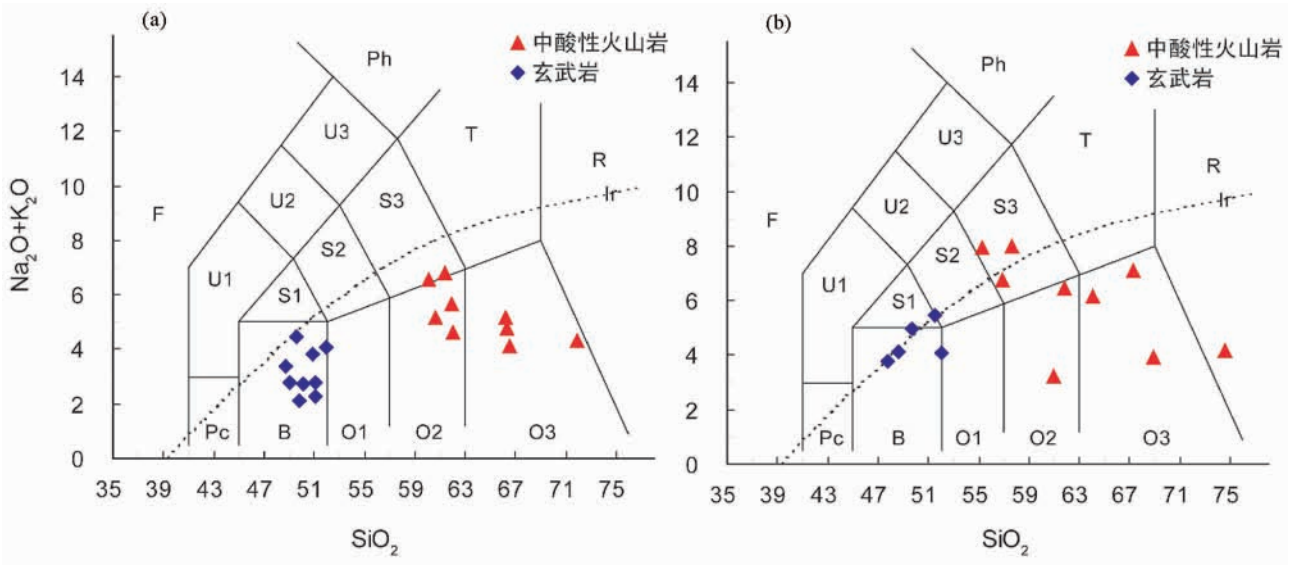


图 11 榆树沟蛇绿岩中熔岩的火山岩全碱-硅(TAS)图解(据 Le Maitre *et al.*,1989)

(a)-榆树沟;(b)-铜花山. Pc-苦橄玄武岩;B-玄武岩;O1-玄武安山岩;O2-安山岩;O3-英安岩;R-流纹岩;S1-粗面玄武岩;S2-玄武质粗面安山岩;S3-粗面安山岩;T-粗面岩、粗面英安岩;F-副长石岩;U1-碱玄岩、碧玄岩;U2-响岩质碱玄岩;U3-碱玄质响岩;Ph-响岩;Ir-Irvine 分界线,上方为碱性,下方为亚碱性

Fig. 11 TAS diagrams of lavas from Yushugou-Tonghuashan ophiolite (after Le Maitre *et al.*, 1989)

(a)-Yushugou; (b)-Tonghuashan. Pc-Picarbasalt; B-Basalt; O1-Basalt andesite; O2-Andesite; O3-Dacite; R-Rhyolite; S1-Trachybasalt; S2-Basalt trachyandedsite; S3-Trachyandedsite; T-Trachyandedsite, toscanite; F-Feldspathoidite; U1-Tephrite, basanite; U2-Phonotephrite; U3-tephriphonolite; Ph-Phonolite; Ir-Irvine is the dividing line between alkaline (up) and sub-alkaline (down)

离子亲石元素 Th 和 LREE,亏损 Nb、Ta 为特征,类似于岛弧火山岩地球化学特征(Sun and McDonough,1989)。

5.3 榆树沟-铜花山的熔岩类化学成分

榆树沟的熔岩主要为亚碱性系列(图 11a),玄武岩为拉斑玄武岩,中酸性火山岩分别为安山岩和英安岩。全岩化学分析表明,榆树沟的玄武岩和中酸性火山岩成分不连续,有一个比较大 SiO_2 含量的间断(图 8 篮色圆圈)。

玄武岩分析数据共有 9 个,其总体特征是 H_2O^+ 和 CO_2 的含量达 2% ~4% 之间,属中度蚀变,与显微镜下观察一致。经去掉挥发分重新计算,SiO_2 含量 50.34% ~53.42%,变化区间较小;其 MgO 含量变化于 7.82% ~12.74% 之间;Al_2O_3 含量在 14.57% ~17.17%,TiO_2 含量 0.48% ~1.6%。K_2O 含量多为 0.3% ~0.6%,但有一个样品含 K_2O 高(1.10%),但其挥发分含量达 4%,可能与蚀变较强有关。

根据岩石中相对稳定元素(TiO_2、P_2O_5、Cr 和 Zr),可将榆树沟玄武岩分为两种类型,即中 TiO_2(0.7 ~1.6)和低 TiO_2(<0.7)型,其 REE 总量为 32.10×10^{-6} ~ 124.1×10^{-6};其中中 Ti 型和低 Ti 型 REE 总量分别为:54.09×10^{-6} ~ 124.1×10^{-6} 和 32.10×10^{-6} ~ 53.44×10^{-6};而 LREE/HREE = 2.23 ~8.00。从球粒陨石 REE 标准化模式图中可以看出(图 12a),两种类型的玄武岩为 LREE 富集、HREE 亏损型,总趋势向右倾斜,其 REE 含量均为球粒陨石含量的 10 倍以上,Eu = 0.87 ~1.25,为轻微负异常和正异常两种类型。

中酸性火山岩的挥发分含量也达 2% ~4% 之间,属于中等蚀变。SiO_2 含量集中在 61.53% ~73.51% 之间。中酸性火山岩的 MgO 含量集中在 2.5% ~4.71%;Al_2O_3 含量在 11.76% ~17.86%。K_2O 和 Na_2O 含量变化较大,分别在 1.71% ~6.38% 和 0.66% ~3.71% 之间,其中高 K_2O(6.15%)样品的 Al_2O_3 含量也最高(17.23%);CaO 含量稳定,在 2% ~3% 之间。

同样,铜花山的熔岩也达中等程度蚀变,挥发分中 H_2O^+ 含量 2.6% ~4.4% 之间,个别样品(07Y-986)的 CO_2 含量近 6%,已强烈碳酸岩化。岩石主要为亚碱性系列,个别为碱性系列(图 11b)。岩石有玄武岩、安山岩和英安岩等组成。另有三个高镁火山岩岩石由于过低的 SiO_2(32% ~36% 之间)没有包括在 TAS 图解中,据其岩相学和岩石化学特征确定其为苦橄岩类:SiO_2 <53%,MgO >18%,Na_2O+K_2O <2%。

铜花山玄武岩(6 个分析样品)的成分特征与榆树沟的十分相近(图 8),SiO_2、Al_2O_3 的含量分别在 48% ~52%、13.17% ~16.38% 之间,而 MgO 含量为 5.56% ~10.22%;但 K_2O、Na_2O 和 P_2O_5 含量均高于榆树沟玄武岩,分别为 0.5% ~2.5%、2.5% ~4.2% 和 0.3% ~0.4%(图 8、表 3)。根据岩石中相对稳定元素(TiO_2、P_2O_5、Cr 和 Zr)将铜花山玄武岩分为两种类型,即高 TiO_2(1.71% ~2.18%)和低 TiO_2(<0.7%)型。其中高 TiO_2 玄武岩 Eu = 0.9 ~1.01,大部分

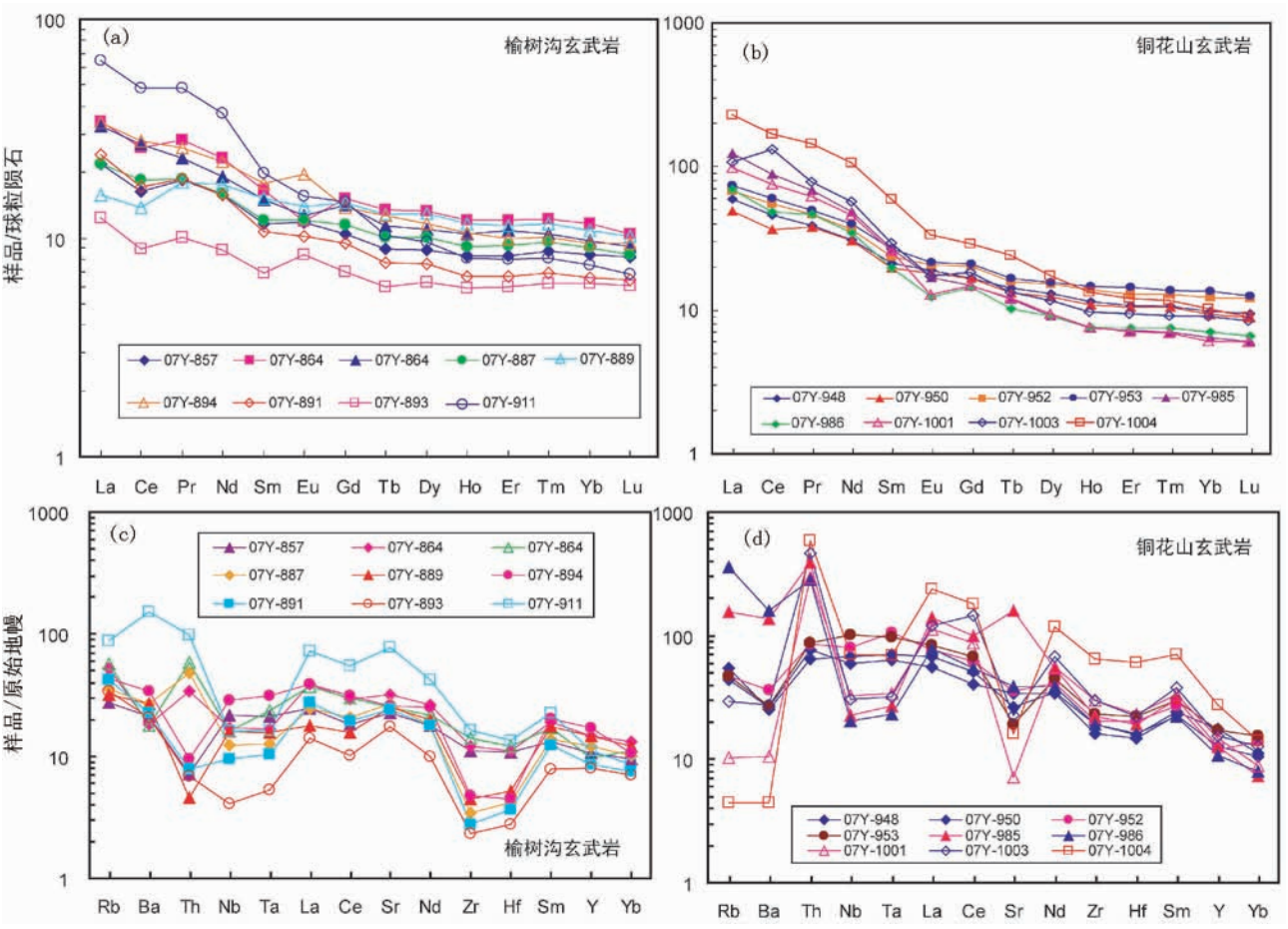


图 12　榆树沟-铜花山蛇绿岩中玄武岩 REE 球粒陨石标准化模式图(a, b)和微量元素原始地幔蛛网图(c, d)

Fig. 12　Chondrited REE patterns (a, b) and primitive mantle normalized trace elements spidergrams (c, d) for basalt from Yushugou-Tonghuashan ophiolite

均无明显 Eu 异常，LREE/HREE = 5.06 ~ 5.72；低 TiO_2 玄武岩的 Eu = 0.74 ~ 0.84，为弱的负 Eu 异常，LREE/HREE = 8.27 ~ 13.89，轻稀土富集程度比高 TiO_2 玄武岩型的高(图 12b)。属高 TiO_2 型的 4 个样品的 TiO_2 含量高于榆树沟玄武岩(图 8)。

铜花山中酸性火山岩的 9 个分析样品的 H_2O^+ 含量 1.5% ~3% 之间，属中低度蚀变，两个样品的 CO_2 含量 4% ~ 8%，表明强烈碳酸岩化。岩石成分普遍较均匀，TiO_2 含量 0.38% ~ 0.78%，Al_2O_3 含量主要在在 11% ~ 14% 之间，而 MgO 含量主要在 2.5% ~4% 之间；但有 2 个样品 MgO 较高(07Y-955 和 07Y-956)，分别为 10.5 和 8.5，并且高 Na_2O，5.3% ~5.8%。

榆树沟玄武岩的 REE 总量为 32.10×10^{-6} ~ 124.1×10^{-6}，明显高于本区超镁铁岩和堆晶岩的 REE 总量，LREE/HREE = 2.23 ~ 8.00。从球粒陨石 REE 标准化模式图中可以看出(图 12a)，榆树沟玄武岩为 LREE 富集、HREE 平坦型，总趋势向右倾斜，其 REE 含量均为球粒陨石含量的 10 倍以上，δEu = 0.75 ~ 1.25，分轻微负异常和正异常两种类型。榆树沟中酸性火山岩的稀土元素总含量为 69.37×10^{-6} ~ 156.2×10^{-6}，LREE/HREE = 3.3 ~ 7.85，稀土配分型式为轻稀土富集型(图 13A)，δEu = 0.77 ~ 0.87，为弱负异常。

铜花山玄武岩的 REE 总量为 103.9×10^{-6} ~ 196.6×10^{-6}，总体比榆树沟 REE 总量高。其中高 TiO_2 的玄武岩的 LREE/HREE = 5.06 ~ 5.72，大部分均无 Eu 明显异常 δEu = 0.9 ~ 1.01。而低 TiO_2 的玄武岩的 Eu = 0.74 ~ 0.84，为 Eu 弱负异常，LREE/HREE = 8.27 ~ 13.89，轻稀土富集程度总体上比高 TiO_2 玄武岩型的高(图 12b)。三个高镁苦橄岩的 δEu = 0.68 ~ 0.82，为 Eu 负异常型，LREE/HREE = 9.95 ~ 12.13。中酸性火山岩的 REE 含量为 74.6×10^{-6} ~ 331.2×10^{-6}，LREE/HREE = 6.94 ~ 15.51，稀土配分型式为轻稀土富集型(图 13b)，Eu = 0.48 ~ 1.13，随着 REE 总含量的降低，Eu 从强负异常型转变到无明显 Eu 异常型(表 3)。

球粒陨石标准化微量元素比值蛛网图上(图 12c, d；图 13c, d)，大部分样品的强不相容元素，如大离子亲石元素(LILE)富集，高场强元素(HFSE)出现明显的负异常，尤其是 Nb 和 Ta 的亏损，表明其源区可能受到消减带流体的作用

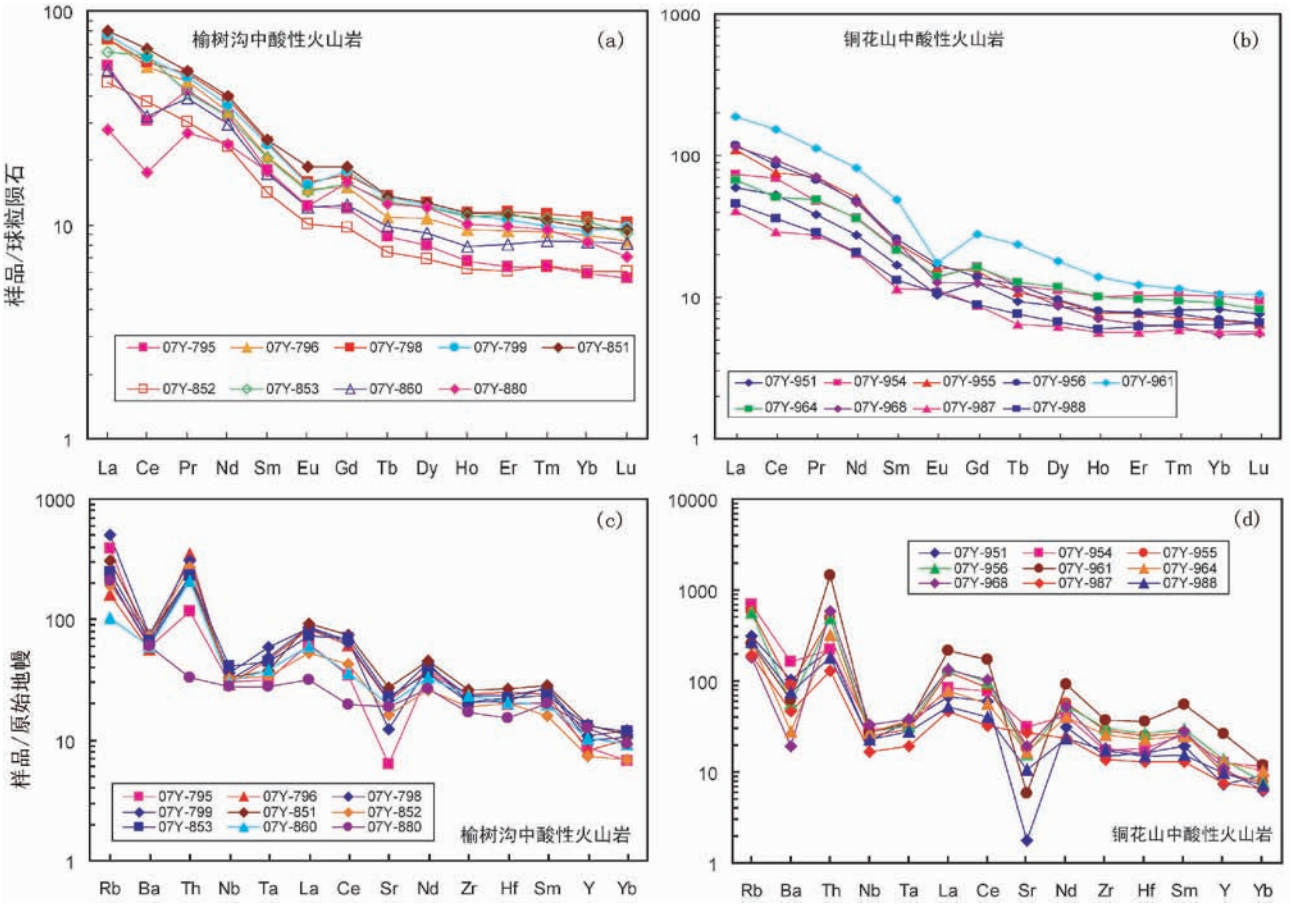


图 13 榆树沟-铜花山蛇绿岩中的中酸性火山岩 REE 球粒陨石标准化模式图(a, b)和微量元素原始地幔蛛网图(c, d)

Fig. 13 Chondrited REE patterns (a, b) and primitive mantle normalized trace elements spidergrams (c, d) for intermediate-acidic volcanic rocks from Yushugou-Tonghuashan ophiolite

(董云鹏等,2005)。

6 讨论

6.1 榆树沟-铜花山蛇绿岩的形成环境

微量元素 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Y 属于非活动性元素,其含量一般不会因为风化、蚀变和一定的交代作用而改变。而且,其含量不因地幔岩石的部分熔融程度和玄武质熔浆的分离结晶程度而变化(李昌年,1992)。一般岛弧玄武岩和部分亏损型洋中脊玄武岩(N-MORB)的 Ta、Nb 丰度分别不大于 0.7×10^{-6} 和 12×10^{-6},Nb/La < 1,Hf/Ta > 5,La/Ta > 15,Ti/Y < 350;而板内玄武岩(WPB)、过渡型洋中脊玄武岩(T-MORB)和富集型洋中脊玄武岩(E-MORB)则正好相反(Condie, 1989)。榆树沟玄武岩的 Ta 丰度($0.11\times10^{-6}\sim0.62\times10^{-6}$)和 Nb 丰度($1.43\times10^{-6}\sim10\times10^{-6}$)较低,Nb/La 比值为 0.23 ~ 0.95,Hf/Ta 比值为 1.45 ~ 8.3,La/Ta 比值为 18.69 ~ 74.17,Ti/Y 比值为 156.1 ~ 315.4。除了个别 Hf/Ta 比值比较低以外,榆树沟玄武岩的其它元素丰度和相关比值均表明类似于 Condie(1989)的岛弧玄武岩或洋中脊玄武岩。

从表 3 可以看出,铜花山玄武岩可以分为两组:一组玄武岩成分相当于岛弧和部分亏损型洋中脊(N-MORB)玄武岩,除一个样品 Ta 和 Nb 丰度分别为 1.38×10^{-6} 和 24.5×10^{-6} 外,其余样品的 Ta 丰度 $0.47\times10^{-6}\sim0.68\times10^{-6}$,Nb 丰度为 $7.13\times10^{-6}\sim11.4\times10^{-6}$,其 Nb/La = 0.17 ~ 0.31,Hf/Ta = 6.78 ~ 8.77,La/Ta = 54.12 ~ 85.56,Ti/Y = 150.5 ~ 224.6;而另外一组玄武岩成分却和板内玄武岩(WPB)、过渡型洋中脊玄武岩(T-MORB)和富集型洋中脊玄武岩(E-MORB)成分相当,Ta、Nb 丰度分别为 $1.26\times10^{-6}\sim2.11\times10^{-6}$ 和 $20.62\times10^{-6}\sim35.4\times10^{-6}$,Nb/La = 1.06 ~ 1.28,Hf/Ta = 1.95 ~ 2.34,La/Ta = 11.99 ~ 15.86,Ti/Y = 300.6 ~ 490.7。因此,铜花山玄武岩的元素丰度和相关比值表明,这些岩石可能具有复杂的形成环境。

玄武质岩石的 Nb、Zr 和 Y 的含量基本上能代表岩浆源区的成分特点。原始地幔的 Zr/Nb 比值为 18,过渡型地幔和富集型地幔的 Zr/Nb 比值小于 18,亏损地幔的 Zr/Nb 比值大于 18(Le Roex *et al.*, 1983;李献华等,1997)。榆树沟岩石样品的 Zr/Nb 比值除一个样品为 20 外,其余为 3.28 ~ 17.0,显然具有来自过渡型地幔和富集型地幔玄武岩的特点;铜花山

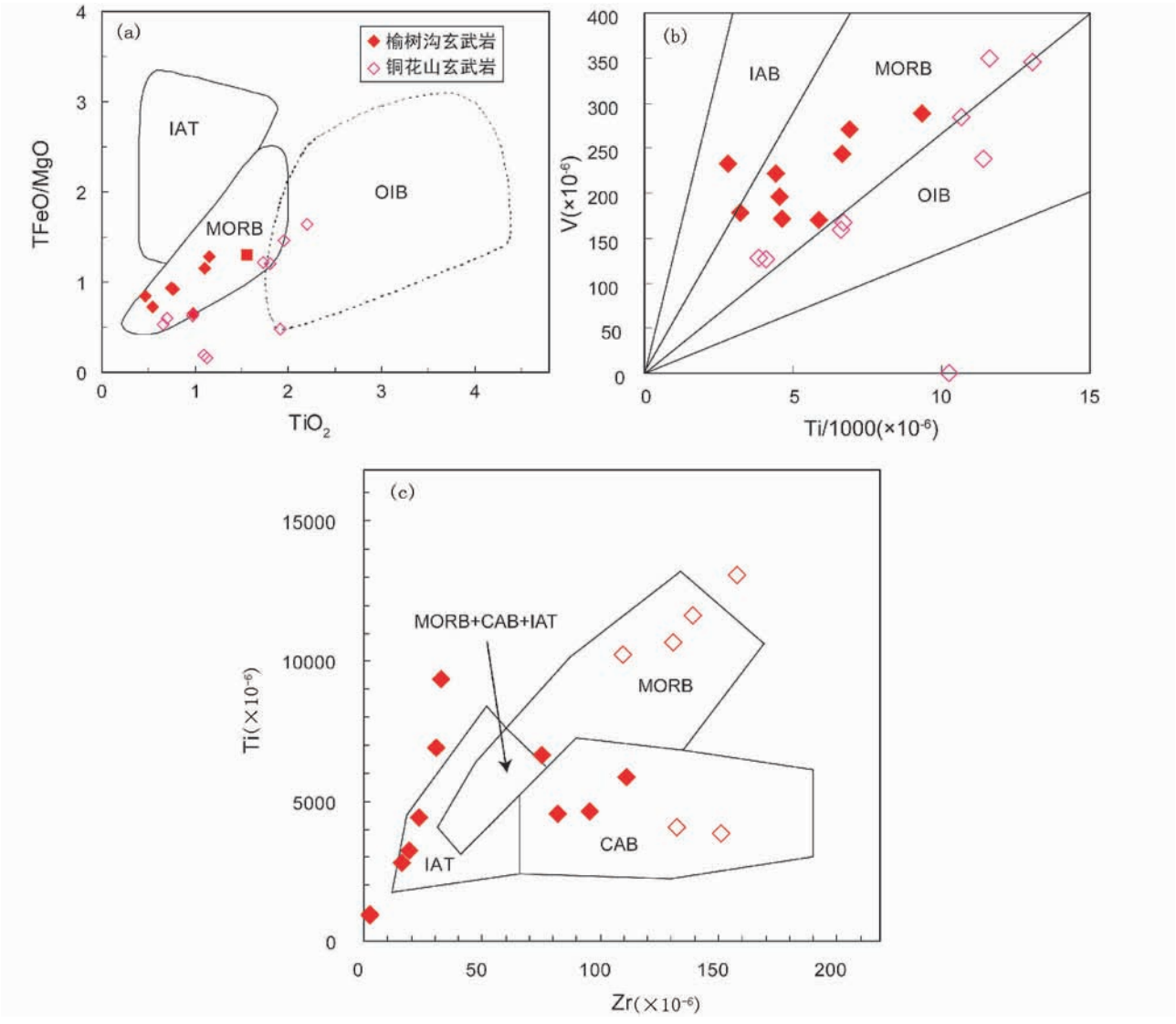


图 14　榆树沟-铜花山玄武岩 $FeO^T/MgO-TiO_2$ 成因图解(a,据 Glassley,1974)、Ti/1000-V 成因图解(b,据 Shervais,1982)和 Ti-Zr 变化的判别图解(c,据 Pearce and Cann,1973)

IAT-岛弧拉斑玄武岩;MORB-洋脊玄武岩;OIB-洋岛玄武岩;IAB-岛弧玄武岩;CAB-钙碱性玄武岩

Fig. 14　$FeO^T/MgO-TiO_2$ diagram (a, after Glassley, 1974), Ti/1000-V diagram (b, after Shervais, 1982) and Ti-Zr diagram (c, after Pearce and Cann, 1973) of basalt from Yushugou-Tonghuashan

IAT- Island arc basalt; MORB-Mid-ocean ridge basalt; OIB-Ocean island basalt; CAB-Calc-alkaline basalt

岩石的 Zr/Nb 相应地分为两组,一组比值为 4.46 ~ 5.55,具过渡性地幔和富集型地幔玄武岩的特点,而另一组比值为 17.81 ~ 19.19,为亏损型地幔玄武岩的特征。

在玄武岩的 $FeO^T/Mg-TiO_2$ 构造背景判别图解上(图 14a)(Glassley,1974),榆树沟和铜花山的玄武岩绝大多数落入 MORB 范围,铜花山的少量样品落入 MORB 和 OIB 重叠区。Ti 和 V 在热液蚀变作用和中等到高级变质作用过程中为不活泼元素,按照 Ti/V 比值可以对不同类型玄武岩分布区进行划分(图 14b)(Shervais,1982)。在 Ti 与 V 的变异图中,榆树沟的玄武岩主要落在 MORB 区间,个别样品落在岛弧玄武岩区间;而铜花山的玄武岩主要也是落在 MORB 区间,有少量玄武岩落在洋岛玄武岩区(图 14b)。

Pearce and Cann(1973)提出的 Zr-Ti 判别图解可应用于 12% < CaO + MgO < 20% 的拉斑玄武岩。在 Zr-Ti 变异图解中,榆树沟的部分玄武岩(主要为低 Ti 型)投在岛弧拉斑玄武岩区间,而另外的玄武岩(主要为中 Ti 型)投在钙碱性玄武岩区间。同样铜花山的部分玄武岩(主要为低 Ti 型)投在钙碱性玄武岩区间,而其他玄武岩(高 Ti 型)投在 MORB 区间(图 14c)。

以上特征,结合地幔橄榄岩尖晶石给出的深海地幔橄榄

岩证据,以及两地都产出中酸性的岛弧火山岩(杨经绥等,2011),认为榆树沟和铜花山的蛇绿岩包括了 MORB 和岛弧环境产出的岩石单元。

6.2 榆树沟-铜花山蛇绿岩的构造意义

前人沿中天山南缘西段的长阿吾子-古洛沟、以及库米什、乌瓦门等地均发现了蛇绿混杂岩,并有榴辉岩、蓝片岩及高压麻粒岩相伴(肖序常等,1992;汤耀庆等,1995;高俊,1997;Gao *et al.*,1998;李向民等,2002),并认为与榆树沟和铜花山蛇绿岩为一个带(董云鹏等,2005),共同构成了中天山南缘晚古生代具有板块缝合带性质的海沟俯冲杂岩带,与西段境外中亚地区的尼古拉耶夫线应大致相当,代表了乌拉尔-南天山古生代洋盆的俯冲消减位置(夏林圻等,2007)。但对南天山蛇绿岩的形成环境前人认识各异,曾提出南天山洋的性质可能为一陆间的宽阔大洋盆(郝杰和刘小汉,1993)、有限洋盆(王作勋等,1990;肖序常等,1992;高俊等,1995;王学潮等,1995)或弧后洋盆(郭召杰等,1993;高长林等,1995;Chen *et al.*,1999;姜常义和李良辰,1999;董云鹏等,2005)等不同认识。例如,姜常义和李良辰(1990)对榆树沟蛇绿岩的层状堆积岩进行地球化学研究后,认为其形成于弧后盆地。吴文奎等(1992a)根据岩石学特征,提出榆树沟-铜花山蛇绿岩套形成于弧-盆和活动大陆边缘环境。王润三等(1999a,b)根据其岩石学及其 REE 与相对惰性微量元素的地球化学特征认为榆树沟蛇绿岩中的玄武岩属洋脊型,并初步认为可能形成于具相当规模的洋盆构造环境。

本文研究的结果表明,榆树沟和铜花山的蛇绿岩成分复杂,包括可能来自岛弧和 MORB 多种构造背景的岩石单元。最近完成的单颗粒锆石的 SHRIMP U-Pb 和 LA-ICP-MS 两种方法定年,获得榆树沟蛇绿岩组合中的斜长花岗岩和斜长岩的年龄分别为 439.3±1.8Ma 和 435.1±2.8Ma,由此认为洋盆的形成时代为早古生代(杨经绥等,2011)。该年龄值虽然与前人通过麻粒岩获得的年龄(440Ma)相同(王润三等,1998),但认为两者年龄代表的意义完全不同(杨经绥等,2011)。

7 结论

(1)榆树沟和铜花山蛇绿岩岩石单元由超镁铁岩、超镁铁质-镁铁质堆晶岩、熔岩类等岩石单元组成,它们组成蛇绿混杂带。两个地区的超镁铁岩均有较强的蛇纹石化,但榆树沟可见橄榄石(Fo = 89.3 ~ 91.3)、斜方辉石(Wo = 0.28 ~ 1.07,En = 88.9 ~ 90.2,Fs = 9.22 ~ 10.5)、单斜辉石(Wo = 26.5 ~ 48.7,En = 44.1 ~ 65.1,Fs = 2.82 ~ 5.33)和尖晶石类新鲜矿物。其中铬尖晶石属于低铬型,$Cr^{\#}$值变化于 15.6 ~ 27.9 之间,$Mg^{\#}$值变化于 63.4 ~ 74.6 之间,反映了深海橄榄岩特征(Dick and Bullen,1984)。

(2)榆树沟堆晶岩以轻微富集大离子亲石元素 Sr、Rb、Ba,高场强元素(Nb、Zr、Hf、Y)丰度低为特征;铜花山堆晶岩以富集大离子亲石元素 Th 和 LREE,亏损 Nb、Ta 为特征,具有岛弧蛇绿岩的地球化学特征(Sun and McDonough,1989)。

(3)榆树沟和铜花山的熔岩包括玄武岩、安山岩和英安岩类。榆树沟玄武岩的元素丰度和相关比值兼有岛弧玄武岩或洋中脊玄武岩特点(Condie, 1989)。铜花山玄武岩的元素丰度和相关比值表明岩石可能具有复杂的形成环境。结合地幔橄榄岩尖晶石给出的深海地幔橄榄岩证据,以及两地都产出中酸性岩为主的岛弧火山岩(杨经绥等,2011),认为榆树沟和铜花山的蛇绿岩包括了 MORB 和岛弧环境产出的岩石单元。

总的来看,蛇绿岩岩石构造背景的复杂性制约了地球化学的差异性。本研究虽然在榆树沟和铜花山的地幔橄榄岩的成因和熔岩的成因方面取得了一些新的资料,但要对中天山南缘蛇绿岩的形成构造背景和大地构造意义作出评价,显然有待于更多的工作。

致谢 甘肃地质研究所左国朝研究员协助野外调查,东华理工大学核资源与环境教育部重点实验室的刘成东教授协助完成电子探针分析,吴才来研究员和孟繁聪研究员两位审稿人对本文提出很好的修改意见,对他们的热心帮助和辛勤付出表示衷心感谢。

References

Bureau of Geology and Mineral Resouces of Xinjiang Province. 1993. Regional Geology of Xinjiang Province. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 488 (in Chinese)

Chen CM, Lu HF, Jia D, Cai DS and Wu SM. 1999. Closing history of the southern Tianshan oceanic basin, western China: An oblique collisional orogeny. Tectonophysics, 302: 23 – 40

Condie KC. 1989. Geochemical changes in basalts and andsites across the Archaena-Proterozoic boundary: Identification and significance. Lithos, 23: 1 – 18

Dick HJB and Bullen T. 1984. Chromium spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. Contr. Miner. Petrol., 86(1):54 – 76

Dmitriev LV. 1975. Serpentinization of oceanic hyperbasites. In: Recent contributions to geochemistry and analytical chemistry, Tugarinov. New York: John Wiley & Sons, 243 – 250

Dong YP, Wang RS and Zhou DW. 2001. Geochemistry and genesis of meta-mafic-ultramafic rocks from Yushugou region, north margin of the South Tianshan tectonic belt, western China. Geochimica, 30(6):559 – 568 (in Chinese with English abstract)

Dong YP, Zhou DW, Zhang GW, Zhang CL, Xia LQ, Xu XY and Li XM. 2005. Tectonic setting of the Wuwamen ophiolite at the southern margin of Middle Tianshan Belt. Acta Petrologica Sinica, 21(1):37 – 44 (in Chinese with English abstract)

Gao CL, Cui KR, Qian YX, Liu B, Ding DG and Yin Y. 1995. Macroplate Tectonics in the Tianshan and the Northerna Tarim Basin. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 284 (in Chinese)

Gao J, Xiao XC, Tang YQ, Zhao M and Wang J. 1994. The metamorphic *PTDt* path of blueschists and tectonic evolution in the southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang. Geol. Rev., 40(6): 544 – 553 (in Chinese with English abstract)

Gao J, Tang YQ, Zhao M and Wang J. 1995. The preliminary studies on

tectonic environment of formation and geological and geochemical characters of ophiolites, South Tianshan Mountains, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 11(Suppl.): 85 – 97 (in Chinese with English abstract)

Gao J. 1997. Discovery of eclogite and its geological significance in southwestern Tianshan. Chinese Science Bulletin, 42(7): 737 – 739 (in Chinese)

Gao J, Li MS, Xiao XC, Tang YQ and He GQ. 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Oregen, northwestern China. Tectonophysics, 287

Glassley W. 1974. Geochemistry and tectonics of the Grescent volcanic rocks, Olympic Peninsula, Washington. Geol. Soc. Am. Bull., 85: 785 – 794

Guo ZJ, Ma RS, Guo LZ and Shi YS. 1993. A comparative study on three ophiolitic melange belts in eastern Xinjiang. Geol. Rev., 39(3): 236 – 247 (in Chinese with English abstract)

Hao J and Liu XH. 1993. Ophiolite melange time and tectonic evolutional model in South Tianshan area. Scientia Geologica Sinica, 28(1): 93 – 95 (in Chinese with English abstract)

Jiang CY and Li LC. 1999. Petrology and geochemistry of layered cumulation rocks in Yushugou, Xinjiang. Journal of Mineralogy and Petrology, 10(2): 31 – 36 (in Chinese with English abstract)

Le Maitre RW. 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. Oxford: Blackwell, 1 – 193

Le Roex AP, Dick HJB, Brlank AJ *et al.* 1983. Geochemistry, mineralogy and petrogenesis of lava erupted along the southwest Indian Ridge between the Bouvet triple junction and 11 degree east. J. Petrol., 24: 267 – 318

Li CN. 1992. Trace Element Petrology of Igneous. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1 – 195 (in Chinese with English abstract)

Li XH, Hu RZ and Rao B. 1997. Geochronology and geochemistry of Cretaceous mafic dikes from northern Guangdong, SE China. Geochimica, 26(2): 14 – 31 (in Chinese with English abstract)

Li XM, Dong YP, Xu XY, Xia LQ, Zhang GW and Ma ZP. 2002. Discovery of ophiolitic mélange in the Wuwamen area on the southern margin of the Central Tianshan Mountains. Geological Bulletin of China, 21(6): 304 – 307 (in Chinese with English abstract)

Ma RS, Wang CY, Ye SF *et al.* 1993. The Tectonic Framework and Crustal Structure of Eastern Tianshan, China. Nanjing: Nanjing University Publishing House, 11 – 61 (in Chinese)

Morimoto N. 1988. Nomenclature of pyroxene. Acta Mineralogica, 8(4): 289 – 305

Pearce JA and Cann JR. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. Earth and Planetary Science Letters, 19: 290 – 300

Shervais JW. 1982. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. Earth Planet. Sci. Lett., 59: 101 – 118

Shu LS, Wang CY and Ma RS. 1996. Granulite relics and pyroxene-facies ductile deformation in the northern boundary of the southern Tianshan. Scientia Geologica Sinica, 31(4): 375 – 383 (in Chinese with English abstract)

Shu LS, Wang CY and Ma RS. 1998. Further study on some problems of "the Yushugou granulite, Kumishi, Xinjiang": Reply to the Wang RS *et al.*'s suspicion. Scientia Geologica Sinica, 33(4): 505 – 508 (in Chinese with English abstract)

Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle compositional and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in the Ocean Basis. Geological Society Special Publication, 42: 313 – 345

Tang YQ, Gao J, Zhao M, Li JY and Wang J. 1995. The Ophiolites and Blueschists in the Southwestern Tianshan Orogenic Belt, Xinjiang, Northwestern China. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 133 (in Chinese)

Taylor SR and McLennan SM. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Oxford: Blackwell, 1 – 312

Thompson RN. 1982. British Tertiary volcanic province. Scott. J. Geol., 18: 59 – 107

Wang JL, Wang RS, Zhou DW, Wang Y and Liu YJ. 1999. A study of tectonites of granulite facies in Yushugou, South Tianshan, China. Acta Petrologica Sinica, 15(4): 539 – 547 (in Chinese with English abstract)

Wang RS, Wang Y, Li HM, Zhou DW and Wang JL. 1998. Zircon U-Pb age and its geological significance of high-pressure terrane of granulite facies in Yushugou area, southern Tianshan Mountain. Geochimica, 27(6): 517 – 522 (in Chinese with English abstract)

Wang RS, Zhou DW, Wang JL, Wang Y and Liu YJ. 1999a. Variscan terrane of deep-crustal granulite facies in Yushugou area, southern Tianshan. Science in China (Series D), 42(5): 482 – 490

Wang RS, Wang JL. Zhou DW, Wang Y and Liu YJ. 1999b. Study on Yushugou ophiolite suite modified with the metamorphism of granulite facies in southern Tianshan. Scientia Geologica Sinica, 34(2): 166 – 176 (in Chinese with English abstract)

Wang XB, Bao PS and Rong H. 1995. Rare earth elements geochemistry of the mantle peridotite in the ophiolite suites of China. Acta Petrologica Sinica, 11(Suppl.): 24 – 41 (in Chinese with English abstract)

Wang XC, He GQ, Li MS, Gao J and Lu SN. 1995. Petrochemical characteristics and isotopic age of ophiolite in southern part of South Tianshan. Journal of Hebei College of Geology, 18(4): 295 – 302 (in Chinese with English abstract)

Wang Y, Wang RS, Zhou DW and Liu YJ. 1999. The uplifting process of a high-pressure terrain of granulite facies in Yushugou area of southern Tianshan, Xinjiang. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 29(6): 565 – 568 (in Chinese with English abstract)

Wang ZX, Wu JJ, Lü XC, Zhang JG and Liu DC. 1990. Polycyclic Tectonic Evolution and Metallogeny of the Tianshan Mountains. Beijing: Science Press, 1 – 217 (in Chinese)

Windley BF, Allen MB, Zhang C *et al.* 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic redeformation of the Chinese Tian Shan range, Central Asia. Geology, 18: 128 – 131

Wu WK, Jiang CY, Yang F and Li LC. 1992a. The Yushugou-Tonghuashan structural mixtite in Xijiang. Journal of Xi'an College of Geology, 14(1): 8 – 13 (in Chinese with English abstract)

Wu WK, Jiang CY and Yang F. 1992b. Paleozoic Era Crustal and Mineralization Law in Kumishi Region. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Publishing House, 69 – 83 (in Chinese)

Xia LQ, Xia ZC, Xu XY, Li XM, Ma ZP and Wang LS. 2007. Magmatism in Tianshan Mountian. Beijing: China Land Press, 1 – 350 (in Chinese)

Xiao XC, Tang YQ, Feng YM, Zhu BQ, Li JY and Zhao M. 1992. Tectonic Evolution of Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 169 (in Chinese)

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 – 1684 (in Chinese with English abstract)

Yang JS, Xu XZ, Li TF, Chen SY, Ren YF, Li JY and Liu Z. 2011. U-Pb ages of zircons from ophiolite and related rocks in the Kumishi region at the southern margin of Middle Tianshan, Xinjiang: Evidence of Early Paleozoic oceanic basin. Acta Petrologica Sinica, 27(1): 77 – 95 (in Chinese with English abstract)

Zhang Q, Zhang KW and Li DZ. 1992. Mafic-Ultramafic Rocks in Hengduan Mountains Region. Beijing: Science Press, 1 – 216 (in Chinese)

附中文参考文献

董云鹏，王润三，周鼎武. 2001. 南天山北缘榆树沟变质基性-超基性岩的地球化学及其成因机制. 地球化学，30(6)：559 – 568

董云鹏，周鼎武，张国伟，张成立，夏林圻，徐学义，李向民. 2005. 中天山南缘乌瓦门蛇绿岩形成构造环境. 岩石学报，21(1)：37 – 44

高长林,崔可锐,钱一雄,刘斌,丁道桂,殷勇. 1995. 天山微板块构造与塔北盆地. 北京:地质出版社,1 – 284

高俊,肖序常,汤耀庆,赵民,王军. 1994. 新疆西南天山蓝片岩的变质作用 PTDt 轨迹及构造演化. 地质论评,40(6):544 – 553

高俊,汤耀庆,赵民,王军. 1995. 新疆南天山蛇绿岩的地质地球化学特征及形成环境初探. 岩石学报,11(增刊):85 – 97

高俊. 1997. 西南天山榴辉岩的发现及其大地构造意义. 科学通报,42(7):737 – 739

郭召杰,马瑞士,郭令智,施央申. 1993. 新疆东部三条蛇绿混杂岩带的比较研究. 地质论评,39(3):236 – 247

郝杰,刘小汉. 1993. 南天山蛇绿混杂岩形成时代及其大地构造意义. 地质科学,28(1):93 – 95

姜常义,李良辰. 1990. 榆树沟层状堆积岩的岩石学与地球化学. 矿物岩石,10(2):31 – 36

李昌年. 1992. 火成岩微量元素岩石学. 武汉:中国地质大学出版社,1 – 195

李献华,胡瑞忠,饶冰. 1997. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学. 地球化学,26(2):14 – 31

李向民,董云鹏,徐学义,夏林圻,张国伟,马中平. 2002. 中天山南缘乌瓦门地区发现蛇绿混杂岩. 地质通报,21(6):304 – 307

马瑞士,王赐银,叶尚夫等. 1993. 东天山构造格架及地壳演化. 南京:南京大学出版社,11 – 61

舒良树,王赐银,马瑞士. 1996. 南天山北缘麻粒岩残迹与辉石相韧性变形研究. 地质科学,31(4):375 – 383

舒良树,王赐银,马瑞士. 1998. 对"榆树沟麻粒岩"问题的补充说明——答王润三等质疑. 地质科学,33(4):505 – 508

汤耀庆,高俊,赵民,李锦轶,王军. 1995. 西南天山蛇绿岩和蓝片岩. 北京:地质出版社,1 – 133

王居里,王润三,周鼎武,王焰,刘养杰. 1999. 天山榆树沟麻粒岩相构造岩研究. 岩石学报,15(04):539 – 547

王润三,王焰,李惠民,周鼎武,王居里. 1998. 南天山榆树沟高压麻粒岩地体锆石 U-Pb 定及其地质意义. 地球化学,27(6):517 – 522

王润三,周鼎武,王居里,王焰,刘养杰. 1999a. 南天山榆树沟华力西期深地壳麻粒岩地体研究. 中国科学(D 辑),29(4):306 – 313

王润三,王居里,周鼎武,王焰,刘养杰. 1999b. 南天山榆树沟遭受麻粒岩相变质改造的蛇绿岩套研究. 地质科学,34(2):166 – 176

王希斌,鲍佩声,戎合. 1995. 中国蛇绿岩中变质橄榄岩的稀土元素地球化学. 岩石学报,11(增刊):24 – 41

王学潮,何国琦,李茂松,高俊,陆书宁. 1995. 南天山南缘蛇绿岩岩石化学特征及同位素年龄. 河北地质学院学报,18(4):295 – 302

王焰,王润三,周鼎武,刘养杰. 1999. 南天山榆树沟麻粒岩相高压地体的抬升过程——角闪石提供的信息. 西北大学报(自科学版),29(6):565 – 568

王作勋,邬继易,吕喜朝,张经国,刘德成. 1990. 天山多旋回构造演化及成矿. 北京:科学出版社,1 – 217

吴文奎,姜常义,杨复,李良辰. 1992a. 南天山榆树沟-铜花山构造混杂体雏议. 西安地质学院学报,14(1):8 – 13

吴文奎,姜常义,杨复. 1992b. 库米什地区古生代地壳演化及成矿规律. 西安:陕西科学技术出版社,69 – 83

夏林圻,夏祖春,徐学义,李向民,马中平,王立社. 2007. 天山岩浆作用. 北京:中国大地出版社,1 – 350

肖序常,汤耀庆,冯益民,朱宝清,李锦轶,赵民. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京:地质出版社,1 – 169

新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京:地质出版社,1 – 488

杨经绥,史仁灯,吴才来,苏德辰,陈松永,王希斌, Joseph WOODEN. 2008. 北阿尔金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

杨经绥,徐向珍,李天福,陈松永,任玉峰,李金阳,刘钊. 2011. 新疆中天山南缘库米什地区蛇绿岩的锆石 U-Pb 同位素定年:早古生代洋盆的证据. 岩石学报,27(1):77 – 95

张旗,张魁武,李达周. 1992. 横断山区镁铁-超镁铁岩. 北京:科学出版社,1 – 216