

阿尔金北缘沟口泉古元古代蛇绿 混杂岩(绿岩)地质特征及意义

曹福根,董富荣

(新疆地矿局第一区域地质调查大队,新疆 乌鲁木齐 830013)

摘 要:近年经过区域地质调查,在阿尔金北缘沟口泉地区新识别出一套古元古代蛇绿混杂岩,其由洋壳岩块、上覆岩系及外来岩块等组成,洋壳岩块包括变质橄榄岩-堆晶超镁铁质岩、辉长质杂岩、斜长岩、斜长花岗岩、辉绿岩和镁铁质火山熔岩等,为一层序较完整的蛇绿岩套。根据对其各组成单元分布、岩石组合、岩石学、地球化学、同位素年代学等方面的研究以及在变质辉橄岩、斜长岩、辉长岩和玄武岩等岩石中获得锆石 U-Pb SHRIMP 定年加权平均值年龄($1\ 889\pm 27$)Ma、($1\ 869\pm 27$)Ma、($1\ 836\pm 40$)Ma、($1\ 818\pm 25$)Ma 及数个 2 200~2 600 Ma 单点年龄数据,证实了阿尔金北缘地区新太古宙末—古元古代存在一洋盆,并于古元古代末俯冲碰撞闭合形成了沟口泉蛇绿混杂岩,初步判定其为地幔柱型(P 型)蛇绿岩。该发现为塔里木南缘阿北-敦煌地块与阿尔金造山带新太古宙末—古元古代构造演化提供了充分依据,对早前寒武纪地壳演化研究具有重要的地质意义。

关键词:蛇绿混杂岩;古元古代;地幔柱型(P 型);沟口泉

中图分类号:P588.35

文献标识码:A

文章编号:1009-6248(2014)04-0047-14

Geology and Tectonic Significance of the Paleoproterozoic Ophiolitic Melange in Goukouquan, Northern Margin of Altun

CAO Fu-gen, DONG Fu-rong

(No. 1 Regional Geological Survey Team, Bureau of Geology and Mineral Resources, Urumqi 830013, China)

Abstract: After regional geological surveys in recent years, a new ophiolitic melange of Paleoproterozoic Era was identified in Goukouquan, northern margin of Altun, which consists of oceanic crust block, overlying rock series and exotic blocks. The oceanic crust rock is a complete sequence of ophiolite including metamorphic peridotite-ultramafic cumulates, gabbroic complex rock, anorthosite, plagiogranite, diabase, mafic volcanic lava and other components. Studies of the rock combination, petrology, geochemistry, isotopic geochronology and Zircon U-Pb SHRIMP dating on metamorphic ilmenite, anorthosite, gabbro, basalt specify their average ages as ($1\ 889\pm 27$) Ma, ($1\ 869\pm 27$) Ma, ($1\ 836\pm 40$) Ma, ($1\ 818\pm 25$) Ma and several 2 200 Ma-2 600 Ma age data as isolated points, confirming that there is an ocean basin from late Neoarchean Era to Paleoproterozoic Era in northern Altun area, which then dived, collided and closed to form the ophiolitic melange of Goukouquan, which can be speculated as mantle plume (P-Type) origin. This discovery provided a sufficient basis for tectonic evolution from late Neoarchean Era to Paleoproterozoic Era in Dunhuang block and Altun orogenic belt and will be of great significance

收稿日期:2014-07-18;修回日期:2014-10-19

基金项目:中国地质调查局项目“新疆 1:5 万若羌县阿尔金山沟口泉等四幅区域地质调查”(1212010781050)

作者简介:曹福根(1975-),男,四川荣县人,高级地质矿产工程师,从事区域地质矿产调查。E-mail:925537452@qq.com

for the research on Cambrian crustal evolution.

Key words: ophiolitic mélange; Paleoproterozoic Era; mantle plume origin; Goukouquan

阿尔金构造带北东向展布在青藏高原北缘, 延绵约 1 000 km, 北西接塔里木地块, 南东与柴达木地块相接, 北东连祁连山构造带, 南西端与西昆仑构造带相连, 构造位置十分重要, 历来为地质学界所关注(李荣社等, 2008; 陆松年等, 2003~2009; 王永和等, 2002; 校培喜等, 2003)。阿尔金构造带发育多条蛇绿混杂岩, 其中, 阿尔金北缘蛇绿(混杂)岩一般指红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩, 前人对其进行了较多研究(郭召杰等, 1998; 吴俊等, 2001, 2002; 杨经绥等, 2008), 认为时代为南华纪—早古生代。但是近年, 笔者及项目组成员在红柳沟、阔什布拉克及沟口泉东一带进行了 1:5 万区域地质调查研究, 在阿尔金北缘沟口泉地区新识别出一套古元古代沟口泉蛇绿混杂岩, 该套蛇绿混杂岩的发现与确定, 对恢复塔里木南缘及阿尔金地区构造演化具有重要意义。

1 沟口泉蛇绿混杂岩地质特征及岩石学特征

1.1 基本地质特征

沟口泉古元古代蛇绿混杂岩带西起红柳沟, 向东至大平沟以东, 断续出露长大于 200 km, 呈近东

西向展布, 其主要分布于红柳沟-拉配泉新元古代—早古生代(南华—早奥陶世)蛇绿混杂岩的北侧, 少量位于南侧, 其北侧为阿北古微地块, 南侧为阿中微地块(图 1), 带中同时发育较多的古元古代片麻状英云闪长岩、斜长花岗岩、花岗闪长岩, 与蛇绿混杂岩共同组成一个花岗-绿岩带, 蛇绿岩岩块在沟口泉东一带出露较齐全(图 2)。蛇绿混杂岩带内主要由蛇绿岩(洋壳)岩块、蛇绿岩上覆岩系、外来岩块 3 部分组成, 其中蛇绿岩下洋壳地幔岩石由变质橄榄岩-超镁铁质岩、镁铁质辉长杂岩(块状辉长岩和堆晶辉长岩)、斜长花岗岩(斜长岩)等单元组成, 岩石经变质后主要为蛇纹石(片)岩、滑石(片岩)、含菱镁滑石岩、变橄榄岩、蛇纹石化金云母片岩、变橄榄辉石岩、紫苏辉石岩、变质块状辉长岩及堆晶层状辉长岩(多数变质为斜长角闪岩、绿帘石(片)岩、(绿帘)阳起石(片)岩、阳起石绿帘石(片)岩等), 其内层状堆晶构造发育, 并出露少量斜长岩、斜长花岗岩, 其为层状堆晶辉长岩浅色分异体。上洋壳由主要岩性为镁铁质火山岩及少量辉绿岩岩石单元组成; 主要岩性为玄武岩、枕状玄武岩、杏仁状玄武岩及少量辉绿岩; 岩石经变质为斜长角闪岩、阳起石(片岩)、阳起绿帘石(片)岩, 部分地段玄武岩还保留较完整的枕状构

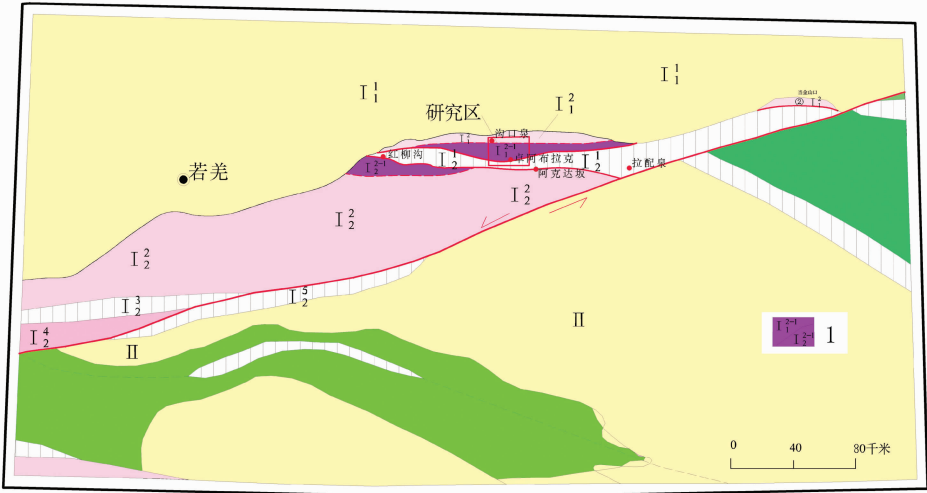


图 1 研究区大地构造位置及沟口泉蛇绿混杂岩分布图

Fig. 1 Tectonic locatin and the distribution of the Goukouquan ophiolitic melange in north Altun
I1. 塔里木盆地; I2. 阿北微地块; I3. 红柳沟-拉配泉南华纪—早古生代结合带; I4. 阿中微地块; I5. 西南阿尔金结合带; I6. 阿尔金南缘陆块; I7. 阿帕-茫崖早古生代结合带; II. 柴达木陆块; 1. 沟口泉蛇绿混杂岩带出露区

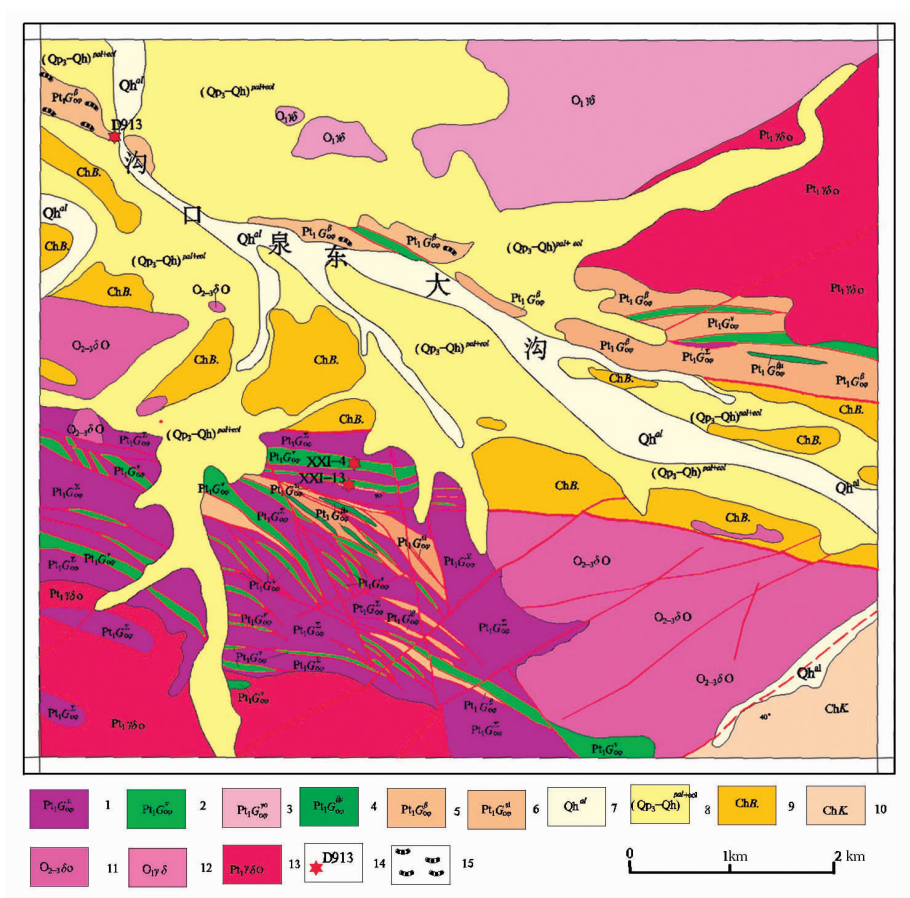


图 2 沟口泉蛇绿混杂岩地质简图(沟口泉东大沟一带)

Fig. 2 Geological sketch map of the Goukouquan ophiolitic melange

1. 蛇绿岩橄榄岩及堆晶超镁铁质岩单元;2. 蛇绿岩辉长杂岩(堆晶辉长岩、块状辉长岩)单元;3. 蛇绿岩斜长花岗岩(斜长岩)单元;4. 蛇绿岩辉绿岩单元;5. 蛇绿岩火山熔岩单元;6. 蛇绿岩上覆岩系及混杂岩基质单元;7. 全新统冲积;8. 上更新统-全新统冲洪积、风积物;9. 长城系巴什库尔干岩群;10. 长城系克孜布拉克岩群;11. 中晚奥陶纪石英闪长岩等;12. 早奥陶世花岗闪长岩等;13. 古元古代英云闪长岩等;14. 同位素样品采样位置及编号;15. 枕状玄武岩

造特征(图 3、图 4)。蛇绿岩上覆岩系主要由与蛇绿岩紧密伴生的洋岛火山岩及深水远洋硅质岩、碳酸盐岩等组成,岩石经变质后为斜长角闪岩、绿帘阳起石岩及石英(片)岩、磁石英(片)岩、白云质大理岩、钙质糜棱岩和长英质糜棱岩等。

蛇绿混杂岩中外来岩块指成因和构造环境与蛇绿岩无关,是洋壳俯冲就位或后期构造变动中卷入蛇绿岩带的外来物质;本区外来岩块主要有中一新太古宇米兰岩群($Ar_{2-3}M$)的片麻岩、变粒岩等中深变质岩岩块以及长城系的克孜布拉克岩群(ChK)、巴什库尔干岩群(ChB)的石英片岩、大理岩、斜长角闪岩、绿泥石绿帘石片岩、石英岩(片岩)等中浅变质岩岩块;岩块一般规模不大,长城纪岩块早期部分可能覆盖于蛇绿岩之上,呈断块夹于蛇绿混杂岩中。



图 3 变质玄武岩中变余枕状构造图(远景)

Fig. 3 Photo of the blastopillow structure in basalt of the Goukouquan ophiolitic melange (distant shot)

由于古元古代末俯冲造山以及后来变质变形的改造



图4 变质玄武岩中变余枕状构造(近景)图

Fig. 4 Photo of the blastopillow structure in basalt of the Goukouquan ophiolitic melange (close shot)

和再造,各蛇绿岩混杂岩由断块岩片叠加堆砌形成,各岩片间均为构造接触,为局部有序,总体无序的蛇绿混杂岩。其与古元古代的大面积变质侵入岩片麻状闪长岩-石英二长闪长岩及片麻状英云闪长岩-斜长花岗岩-花岗闪长岩(TTG)等构成一花岗绿岩带,该带是阿尔金重要的金铜及铁矿的重要赋矿层位,在该带,前人已经发现大平沟金矿、白尖山中型铁矿等,近年新发现库木苏南金铜矿点、卓阿布拉克北东金铜矿点及万荣铁矿点等,展现出寻找与绿岩有关的金铜(铁)的巨大潜力。

1.2 蛇绿岩组成单元岩石学特征

蛇绿混杂岩由超镁铁质杂岩、辉长质杂岩、斜长花岗岩和镁铁质火山杂岩、辉绿岩(席状岩墙群)单元及上覆岩系等组成,各单元岩石组合及岩石学特征如下。

1.2.1 超镁铁质杂岩单元

其原岩多为堆晶(层状)超镁铁质杂岩,夹少数辉长岩、斜长岩等,其下部有少量变质橄榄岩,与其伴生的有辉长质杂岩、基性火山及上覆岩系变硅质岩(火山灰尘凝灰岩)等,岩石多已变质,现见到的超镁铁质岩石种类较多,主要有:(含)菱镁滑石岩、变(辉石)橄榄岩、变橄榄辉石岩、(滑石)蛇纹石岩、(蛇纹石、透闪、透辉)滑石岩、蛇纹石岩及角闪岩、滑石蛇纹石化金云母片岩等夹少数辉长岩和斜长岩等,其局部显示一定层序,并为互层产出,具较为典型的层状堆晶超镁铁质岩特征,与其他伴生岩石为构造接触。

(1)菱镁滑石岩。主要分布在卓阿布拉克西北,风化色多为灰白色、黄白色,新鲜面色为浅黄色、灰绿色等;岩石具显微鳞片变晶结构,块状构造;岩石

由滑石和菱镁矿组成,滑石(65%~90%):显微鳞片状,片径<0.1 mm,无色杂乱分布;菱镁矿(10%~35%),为0.2~0.4 mm的细粒,半自形-自形,表面干净,机械双晶发育;另有少量磁铁矿:粒状,粒径0.1~0.7 mm。

(2)变(辉石)橄榄岩。风化色为深灰(绿)色、灰黑色,新鲜面色为灰色;残余粒状自形粒状结构,块状构造;岩石主要由橄榄石组成,有辉石分布。橄榄石(60%~100%),自形粒状,粒径0.4~1.2 mm,裂理发育,部分变为蛇纹石、滑石集合体,少量有铁质析出;辉石(0%~40%):多变为滑石、蛇纹石集合体,残留形态,粒径0.8~1.2 mm;另有少量磁铁矿:粒状,粒径0.08~0.3 mm。

(3)变质橄榄辉石岩。风化色为深灰色、灰黑色,新鲜面色为灰色、深灰色等;岩石具残余自形粒状结构,块状构造;辉石(80~95%):粒状,粒径0.6~3.3 mm,淡黄绿色,具辉石式节理,部分平行消光,为紫苏辉石,部分斜消光,为透辉石,为变质矿物,其原矿物可能为紫苏辉石或普通辉石,部分为普通辉石,有些辉石岩中含橄榄石(5~20%),自形粒状,粒径0.5~1.6 mm,裂理发育,沿裂隙分布铁质,常见蛇纹石化、滑石化。岩石还见滑石、透闪石交代变质;另有少量磁铁矿:粒状,粒径0.03~0.4 mm。

(4)(滑石)蛇纹石岩。岩石为灰绿色-墨绿色,岩石较致密,硬度也较大;岩石具鳞片变晶结构,块状构造;主要由蛇纹石组成,常含滑石,蛇纹石(78%~95%),呈鳞片状集合体,集聚分布,有少量尘状铁质分布,局部残留矿物形态,也有些蛇纹石为淡黄绿色,呈纤维状集合体杂乱分布,滑石(5%~20%):呈鳞片状集合体,无色,不均匀;磁铁矿(少量约2%):粒状,粒径0.1~0.4 mm;个别还见少量白云石:自形粒状,粒径0.03~0.6 mm。

综上所述,该单元岩石普遍变质,变质程度较低,多数为绿片岩相,但是部分地区见变质矿物紫苏辉石+透辉石、滑石+镁橄榄石+透闪石+透辉石等组合,并见角闪岩,故而推测测区沟口泉蛇绿岩变质达到过角闪岩-麻粒相,只是多数已经蜕变为绿片岩相。

1.2.2 辉长质杂岩单元

主要为层状堆晶辉长岩,其还常夹有辉石岩、斜长岩层及少量斜长花岗岩等岩石,岩石现多变质为

(绿帘)阳起石岩或(阳起石、绿泥石)绿帘石(片)岩、绿帘绿泥石岩、斜长角闪岩等,变质为绿片岩相,部分为角闪岩相。只有少数保留原有结构。例如,变辉石岩、辉长岩等。

(1)(绿帘)阳起石岩。岩石灰色、灰绿色,具粒状变晶结构,块状构造;岩石主要由阳起石、绿帘石组成;阳起石(70%~80%):呈粒状,粒径0.4~1.2 mm,黄绿色,闪石式节理完全;绿帘石(10%~30%):呈粒状,粒径0.4~0.8 mm,均匀分布;部分岩石中含少量~15%的斜长石;他形粒状,粒径0.1~0.4 mm,轻微黝帘石化;另外含少量榍石:粒状,粒径0.04~0.1 mm,原岩可能为辉石岩。

(2)(阳起、绿泥石)绿帘石岩。岩石呈深灰绿色,具柱粒状变晶结构,块状构造,部分具定向构造;岩石由绿帘石、阳起石组成,绿帘石(60%):粒状,粒径0.1~0.3 mm,均匀分布;阳起石(40%):呈纤维状、柱状,粒径0.4~1.2 mm,浅黄绿-绿色,闪石式节理完全;榍石少量:粒状粒径0.04~0.2 mm;另外,部分绿帘石岩中含绿泥石(少量约35%):呈鳞片状集合体分布,轻微塑变拉长,长轴定向排列。个别还含少量石英、磁铁矿、磷灰石及碳酸盐等矿物,原岩可能为辉长岩。

(3)斜长角闪岩。灰黑色,岩石具粒柱状变晶结构,块状构造(定向构造);岩石主要由长石、石英、角闪石组成;长石(30%)、石英(10%):他形粒状,粒径0.1~0.2 mm,长石为斜长石,双晶不发育,轻度泥化,石英波状消光;普通角闪石:柱状、粒径0.1~0.4 mm,黄-绿色,具辉石式,故为辉石蜕变而来,略具定向排列。磁铁矿少量:粒状,粒径0.1~0.2 mm,榍石微量,粒径0.1~0.2 mm,原岩为辉长岩。

上述岩石学特征也说明测区辉长岩发生过至少角闪岩相变质,现多数褪变为绿片岩相。

1.2.3 斜长花岗岩单元

其不同于大面积出露的斜长花岗岩,其与辉长岩紧密伴生,具极低的 K_2O 含量、稀土和微量含量,是大洋拉斑玄武岩岩浆分异的浅色体;其主要岩石为斜长花岗岩、英云闪长岩,但是部分地方变质较深,为斜长浅色片麻岩或角闪斜长片麻岩。

(1)变质英云闪长岩。灰绿色,具变余中细粒花岗岩结构,定向构造;岩石由斜长石、石英、暗色矿物组成;斜长石(48%):呈半自形板状,粒度为2.6 mm $\times$ 1.4 mm~1.0 mm $\times$ 0.5 mm,集片双晶不发育,

轻微绢云母化、绿帘石化;石英(40%):均细粒花重结晶呈石英集合体,单颗粒多在0.8~0.2 mm,具波状消光,后期受动力作用定向分布;暗色矿物(12%)均已变为绿泥石、绿帘石集合体,少量残留片状形态和半自形粒状形态,粒经1.4~0.4 mm,原矿物可能多数是黑云母和辉石。

(2)碎裂岩化(角闪)斜长浅色片麻岩。呈深灰色-青灰色,岩石具粒状变晶结构,片麻状构造;岩石经变质作用由斜长石、石英组成;斜长石(55%~85%):他形粒状,粒径1.6~3.2 mm,双晶发育,轻微绢云母化、泥化,受后期应力作用破碎强,微裂纹发育,沿裂纹分布磨细的岩石成分,少部分碎粒化,并塑变拉长;石英:受应力作用,多碎粒化粒状集合体,粒径0.4~0.8 mm,表面干净,强波状消光,残留片麻状条带;部分岩石普通角闪石较多,可达15%;受糜棱岩化作用,拉长透镜状,粒径0.4~0.8 mm,浅黄-深绿色,闪石式解理完全,呈条带状定向分布,轻微绿帘石化、细粒化;黑云母少量:他形片状,片径0.1~0.08 mm,浅黄褐色。磁铁矿少量:粒状,粒径0.04~0.1 mm。

1.2.4 镁铁质火山杂岩单元

岩石主要为变质玄武岩及少量枕状玄武岩,现多变质为(绿帘)阳起石片岩或(阳起石、绿泥石)绿帘石(片)岩、绿帘绿泥石岩和斜长角闪片岩等,达到绿片岩相,部分为角闪岩相。只有少数保留原有结构。例如,变枕状玄武岩。其主要岩石学特征如下。

(1)灰绿色阳起石片岩。柱状变晶结构,片状构造;岩石由变质矿物阳起石、绿帘石、石英组成;阳起石(87%),粒径0.1~0.8 mm,黄绿色弱多色性,具闪石式解理,受应力作用长轴定向排列;绿帘石(3%)粒状,粒径0.02~0.08 mm,定向分布;石英(10%)他形微粒状,粒径0.02~0.08 mm,呈条带状定向分布。

(2)灰绿色阳起石绿帘石片岩。柱粒状变晶结构,片状定向构造;由变质矿物阳起石、绿泥石、绿帘石及石英组成。阳起石(25%)呈针状柱状,粒径0.2~0.6 mm,浅黄绿-深绿色,闪石式解理,长轴平行定向分布;绿泥石(2%)片状,片径0.2~0.6 mm,拉长定向分布;绿帘石(70%)呈粒状,粒径0.02~0.2 mm,呈集合体定向分布;石英(3%)条带状定向分布。

(3)灰绿色变质枕状玄武岩。柱粒状变晶结构,

块状构造、变余枕状构造、变余杏仁状构造;岩石已变质,由变质矿物阳起石、绿泥石、绿帘石组成,在地质点 913 处枕状构造发育,枕状构造由于变质变形已压扁拉长,长轴长约 1 m,短轴 0.5 m±(图 3、图 4),枕状构造具明显的外壳,并见有杏仁,杏仁为白色石英和方解石。

(4)灰绿色斜长角闪(片)岩。柱粒状变晶结构,片状构造、块状构造;岩石由斜长石和普通角闪石组成;斜长石他形粒状,粒径 0.2~1.5 mm,聚片双晶发育,普遍轻度泥化、绢云母化、绿帘石化;普通角闪石他形柱状,粒径 0.2~1.2 mm,黄-绿色,具闪石式解理,少数绿帘石化。斜长石 45%,普通角闪石 55%。

1.2.5 辉绿岩、辉长辉绿岩脉(岩墙)单元

该单元分布较少,其多与玄武岩一起产出,加之多数变质为斜长角闪岩、灰绿色阳起石绿帘石片岩等。因此,不能从玄武岩中划分出来。

1.2.6 蛇绿岩上覆岩系残片

主要由硅质岩等远洋深水火山碎屑沉积岩和深水沉积碳酸盐岩组成,其岩石多已变质,以石英(片)岩、磁铁石英(片)岩为主,变质较深,为绢云千糜岩、白云质大理岩、钙质糜棱岩和长英质糜棱岩等,其原岩可能由硅质岩、铁质硅质岩、火山灰尘凝灰岩岩、凝灰质粉砂岩及深水沉积碳酸盐岩组成;主要岩石类型岩石学特征如下。

(1)深灰色糜棱岩化白云母石英岩。鳞片粒状变晶结构,定向构造;岩石由石英、绢白云母组成;石英呈他形粒状,粒径 0.1~0.5 mm,强波状消光,晶面不干净,后经糜棱岩化作用塑变拉长,长轴定向;绢白云母呈显微片状,片径 0.02~0.1 mm,多呈条带状集合体平行定向排列,另有微量锆石、磁铁矿。石英含量为 90%,绢白云母含量为 10%。原岩可能为硅质岩。

(2)灰色片状石英岩。粒状变晶结构,定向构造;岩石由石英、黑云母、磁铁矿组成,石英经强动力作用压扁拉长呈长透镜状,沿长轴方向平行定向排列,粒径 0.1~0.5 mm,长短轴之比 4:1 左右,表面干净,强波状消光;黑云母细片状,片径 0.02~0.06 mm,浅黄褐色,呈细条带状分布;磁铁矿微粒状,粒径 0.02~0.1 mm。石英含量为 93%,黑云母含量为 2%,磁铁矿含量为 5%,原岩可能为硅质岩。

(3)深灰色糜棱岩化磁铁石英岩。粒状变晶结

构,定向构造;岩石由石英、绿泥石、磁铁矿组成;石英呈他形粒状,粒径 0.02~0.06 mm,表面干净、波状消光,受糜棱岩化作用塑变拉长平行定向排列;绿泥石细片状,片径 0.02~0.1 mm,沿长轴平行定向排列,磁铁矿微粒状,粒径 0.02~0.1 mm,呈条带状分布;绿帘石微粒状,粒径 0.01~0.03 mm。石英含量为 79%,绿泥石含量为 3%,绿帘石含量为 3%,磁铁矿含量为 15%。原岩可能为含铁硅质岩。

(4)白色白云石大理岩。粒状变晶结构,块状构造条带状构造;岩石由白云石组成,白云石呈他形粒状,粒径 0.2~0.7 mm,双晶发育,双晶纹平行菱形解理的短对角线,加茜素红不染色。原岩可能为白云岩。

上述硅质岩、含铁硅质岩已经变质为石英岩、磁体石英岩,也说明其经历了较长变质过程。

综合以上各单元岩石学特征,蛇绿混杂岩岩石普遍经历了角闪岩相变质,局部达麻粒岩相变质,但是受后期构造影响发生褪变,多数表现为低角闪岩相-高绿片岩相,与世界典型绿岩特征相似。

2 沟口泉蛇蛇绿岩各岩石单元地球化学特征

本次在研究区内蛇绿岩的变质橄榄岩-超镁铁质岩、镁铁质辉长杂岩、斜长花岗岩(斜长岩)、镁铁质火山岩等 4 类岩石单元中,共采集岩石地球化学样品 20 件;将样品粉碎至 200 目后,分选 50 g 作为测试样品,送至国土资源部武汉矿产资源监督中心完成测试;其中常量元素采用硼酸锂熔片-XRF 分析法,在 X 射线荧光光谱仪(XFR)完成;微量元素采用四酸溶矿-ICP-MS 分析法,在质谱仪 ThermeolentalX7 完成;稀土元素采用氧化钠熔融-ICP-MS 分析法,在 ThermeolentalX7 完成。分析成果见表 1,各岩石单元地球化学特征如下。

2.1 变质橄榄岩-堆晶超镁铁质岩

5 件分析成果见表 1,主量元素具低 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 K_2O ,高 MgO (34.74%~37.64%)特征, $\text{Mg}^\#$ 为 90.91~93.29,与世界典型蛇绿岩中变质橄榄岩、方辉橄榄岩、二辉橄榄岩等 $\text{Mg}^\#$ 值相当,具阿尔卑斯型超镁铁质岩特征,在蛇绿岩的 Al_2O_3 - CaO - MgO 图解中,显示超镁铁质岩 5 件样品为变质橄榄岩或堆晶超镁铁质岩。

表 1 沟口泉蛇绿混杂岩中蛇绿岩各岩石单元岩石化学($w_B(\%)$)和微量稀土元素($w_B(10^{-6})$)分析结果表
Tab. 1 Major and trace elements composition of the Goukouquan ophiolitic melange

岩石 单元	变质橄榄岩 - 堆晶超镁铁质岩										镁铁质辉长杂岩(变质块状辉长岩、堆晶辉长岩)					斜长花岗岩 (斜长岩)				铁铁质火山熔岩(变质玄武岩、枕状玄武岩、玄武岩等)			
	1524	XIV-40	XX-4	XXI-13	XXI-16	IV-53	IV-54	V-5	XIV-37	XV-15	XVI-20	XVI-10	XVI-11	XX-11	XIII-17	V-15	913	VII-2	XVI-46	XX-33			
岩性	菱铁滑石岩、蛇纹滑石片岩、蛇纹片岩 (变质橄榄岩、辉橄岩等)										绿帘绿 泥石 片岩					斜长浅 色片 花岗岩 麻岩 (斜长岩?)				斜长 角闪 片岩			
SiO ₂	42.1	39.96	41.88	35.19	31.7	46.99	41.16	41.16	50.47	45.32	46.02	46.72	46.89	50.82	62.67	68.89	50.6	49.71	49.08	49.66			
TiO ₂	0.03	0.06	0.02	0.01	0.01	0.69	1	1.13	0.27	0.42	0.81	1.03	1.33	1.02	0.61	0.33	0.95	2.38	2.5	1.47			
Al ₂ O ₃	1.5	2.47	1.37	0.87	0.83	14.7	15.58	18.84	5.83	13	15.75	16.54	14.78	14.39	14.89	13.21	17.03	12.93	14.37	15.37			
Fe ₂ O ₃	4.42	4.76	5.37	0.84	1.89	2.91	5.71	4.32	2.01	3.99	2.81	2.57	3.02	3.24	2.28	0.9	5.47	4.01	4	2.42			
FeO	2.5	1.25	1.6	3.7	4.55	4.85	10.25	10.15	4.85	9.1	4.4	6.6	7.9	7.3	5.55	4.05	7.9	9.8	8.1	9.25			
MnO	0.09	0.06	0.1	0.08	0.12	0.17	0.25	0.25	0.17	0.26	0.19	0.62	0.25	0.2	0.18	0.13	0.16	0.23	0.21	0.22			
MgO	36.36	37.64	35.31	34.74	36.84	11.37	8.95	7.05	16.65	11.61	9.35	11.08	10.44	7.58	2.14	1.77	4.43	5.8	6.01	6.13			
CaO	0.73	1.12	2.58	0.73	0.95	13.52	11.66	12.39	16.09	11.78	16.04	8.13	8.92	9.37	5.72	5.66	2.52	8.92	9.7	8.47			
Na ₂ O	0.1	0.04	0.05	0.06	0.03	1.04	0.54	0.26	0.55	0.57	0.96	3.23	3.06	4.01	3.74	2.61	6.33	3.3	3.17	4.69			
K ₂ O	0.07	0.05	0.09	0.08	0.09	0.45	0.06	0.1	0.13	0.06	0.18	0.44	0.49	0.21	0.26	0.26	0.28	0.3	0.74	0.4			
P ₂ O ₅	0.01	0.04	0.01	0.01	0.01	0.05	0.08	0.05	0.05	0.05	0.09	0.11	0.28	0.14	0.13	0.08	0.09	0.29	0.34	0.17			
烧失量	11.45	12.34	11.29	23.49	22.56	3.16	4.09	4.19	2.32	3.25	2.81	2.33	1.95	1.14	1.8	2.6	3.63	2.25	2.32	1.74			
总量	99.36	99.79	99.67	99.8	99.58	99.9	99.33	99.89	99.39	99.41	99.41	99.4	99.31	99.42	99.97	100.49	99.92	99.92	100.54	99.99			
MC#	90.91	92.38	90.73	93.29	91.31	73.07	50.90	47.24	81.68	61.99	70.64	68.90	63.67	56.94	33.41	39.36	38.11	43.54	47.80	48.88			
Sr	47.6	20.77	159.7	54.64	85.7	283	307	334	101	97	341	406	297	184	218	232	92.5	201	368	198			
K	580.85	414.89	746.81	663.83	746.81	3734.04	497.87	829.79	1078.72	497.87	1493.62	3651.06	4065.96	1742.55	2157.45	2157.45	2323.40	2489.36	6140.43	3319.15			
Rb	3.70	3.22	3.50	2.72	4.94	21.30	3.58	3.61	7.01	2.20	7.84	17.56	23.76	5.81	9.60	9.02	10.80	6.82	25.98	9.84			
Ba	83.40	38.06	36.40	808.00	529.00	186.10	47.58	51.81	111.00	46.70	65.20	248.00	313.00	109.00	284.00	108.00	106.20	330.00	238.00	120.00			
Th	0.91	1.06	0.77	1.82	0.44	1.46	0.54	0.34	1.14	0.40	0.98	1.09	2.44	1.76	1.30	0.56	0.58	1.67	3.42	2.38			
Ta	0.73	0.12	0.02	0.04	0.46	0.40	0.15	0.07	0.12	0.69	0.10	0.40	0.75	1.95	0.38	0.34	0.51	1.14	1.96	0.78			
Nb	3.21	0.76	1.39	0.85	0.79	4.24	2.76	0.86	1.77	3.52	1.51	6.08	10.94	25.04	4.24	2.88	3.48	14.62	26.67	7.68			
Zr	8.80	23.72	9.10	31.61	6.64	47.60	36.83	22.60	17.66	9.90	31.92	66.28	100.00	70.27	68.46	18.50	55.40	190.00	224.00	118.00			
Hf	0.20	0.58	0.20	0.30	0.13	1.80	0.25	0.02	0.68	0.60	1.02	2.10	3.30	2.37	2.74	0.59	1.40	5.46	6.52	3.50			
U	0.25	0.56	0.87	0.70	0.37	0.44	0.59	0.44	0.42	0.08	0.41	0.37	0.72	0.32	0.66	0.29	0.71	0.83	1.00	0.46			

岩石稀土总量(ΣREE)低为 $3.67 \times 10^{-6} \sim 11.69 \times 10^{-6}$,略低于或略高于球粒陨石稀土含量(Leedy,1979, $\Sigma\text{REE}=5.95$), $\text{LR}/\text{HRGd}-\text{Y}=1.58 \sim 3.93$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=2.88 \sim 4.13$,球粒陨石标准化稀土元素型式图(图 5)总体呈宽缓“U”字型,与阿尔卑斯型橄榄岩相似,只是轻稀土略富集,说明其遭受了后期蚀变,也可能为早期地幔 REE 特征的反映。

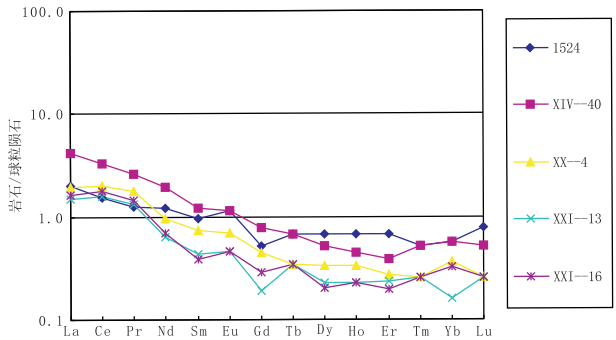


图 5 超镁铁质岩稀土元素配分型式图
Fig. 5 The REE chondrite-normalized distribution patterns in ultramafic rock of the Goukouquan ophiolitic melange
(标准化数据:球粒陨石 Leedy,1973;李昌年,1992)

岩石微量元素丰度经原始地幔标准化后作比值蛛网图(图 6),除 Ba、U、Sr 普遍相对富集外, Hf、Ti 等元素亏损,与地幔橄榄岩蛛网图曲线特征相似,故测区超镁铁质岩属蛇绿岩组合。

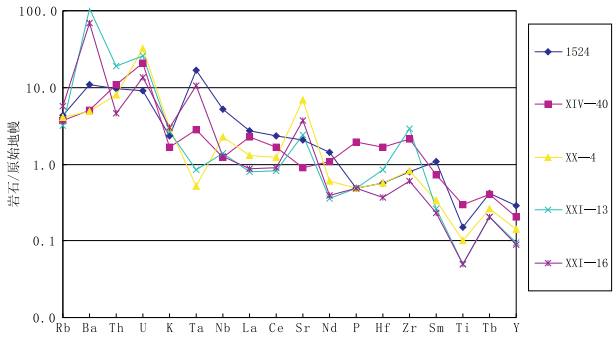


图 6 超镁铁质岩微量元素蛛网图
Fig. 6 The Primitive-mantle spidergrams trace element patterns of ultramafic rock of the Goukouquan ophiolitic melange
(标准化数据:原始地幔 Wood,1979;李昌年,1992)

2.2 镁铁质辉长杂岩(块状辉长岩、堆晶辉长岩)

9 件样品分析成果(表 1)显示,岩石化学表现为低 SiO_2 ($41.16\% \sim 50.47\%$)、 K_2O ($0.06\% \sim 0.49\%$)、 TiO_2 ($0.27\% \sim 1.34\%$),高 MgO ($7.06\% \sim$

16.75%)、 CaO ($7.06\% \sim 16.75\%$)。 Al_2O_3 具低—高 ($5.83\% \sim 18.84\%$)基性岩特征。其中,XIV-37 号样 Al_2O_3 含量为 5.83% , MgO 含量与 16.75% ,具超镁质堆晶岩特征。IV-53、XVI-20 号样, CaO 含量与 Al_2O_3 相当,而低 K_2O ($<0.9\%$),与玄武质科马提岩特征相似。其余与大洋拉斑玄武岩相似,将样品投在 Al_2O_3 - CaO - MgO 、 AFM 、 Al_2O_3 - FeO^* / ($\text{MgO}+\text{FeO}^*$)等图解中得到相似结论。总之,辉长质杂岩岩石化学成分显示为拉斑玄武岩,但是玄武质科马提岩较发育,正好说明该蛇绿岩与太古宙—古元古代绿岩相似,也说明其古老性。

该类岩石稀土总量(ΣREE)范围较宽,总体比超镁铁质岩高得多,为 $13.42 \times 10^{-6} \sim 133.33 \times 10^{-6}$,但是多数低于 70×10^{-6} ,只有 1 件高于 100×10^{-6} ;轻重稀土比值 $\text{LR}/\text{HRGd}-\text{Y}=0.97 \sim 1.99$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=1.41 \sim 2.38$,说明轻稀土为略亏损到略富集型。经球粒陨石标准化后,作稀土元素配分型式图(图 7),其稀土型式绝大多数为平坦型-轻稀土略富集,部分样品具 Eu 正异常,与典型层状堆晶辉长岩稀土特征基本相似(李昌年,1992)。因此,辉长杂岩多数为层状堆晶辉长岩。

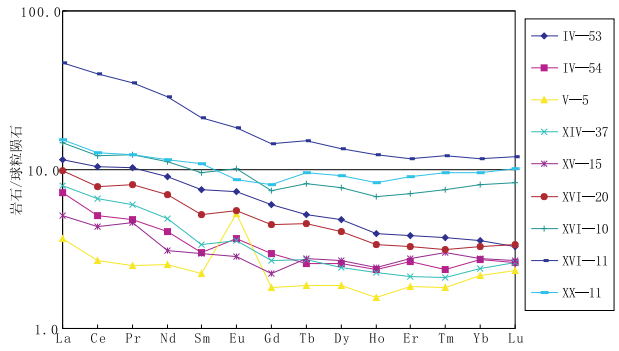


图 7 镁铁质辉长杂岩稀土元素配分型式图
Fig. 7 The REE chondrite-normalized distribution patterns in mafic gabbro of the Goukouquan ophiolitic melange
(标准化数据:球粒陨石 Leedy,1973;李昌年,1992)

辉长质杂岩微量元素经原始地幔标准化后,作比值蛛网图(图 8),形式与大洋大洋拉斑玄武岩(MORB)基本一致,但是部分样品 U、Sr 等元素出现相对正异常。经 N-MORB 标准化后,作微量元素比值蛛网图(图 9),显示 Rb、Ba、Rb、Ba、Th 元素富集,图形总体与过渡型(富集型)洋脊玄武岩(E-MORB)相似。综上所述,该区镁铁质辉长杂岩轻稀土和 Rb、Ba、Th 等元素略富集,可能与岩石变质蚀

变强烈有关,但是更可能是古元古代时地幔分异差,总体较富集型真实反映,这是早期地幔的一个重要特征(万渝生等,1997)。也说明当时幔柱构造可能较发育,大洋扩张脊常靠近地幔柱(张进等,2012)。

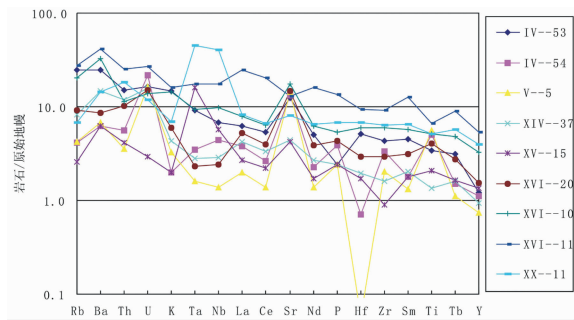


图 8 镁铁质辉长杂岩微量元素蛛网图
Fig. 8 The Primitive-mantle spidergrams trace element patterns of tramatfic gabbro of the Goukouquan ophiolitic melange
(标准化数据: 原始地幔 Wood, 1979; 李昌年, 1992)

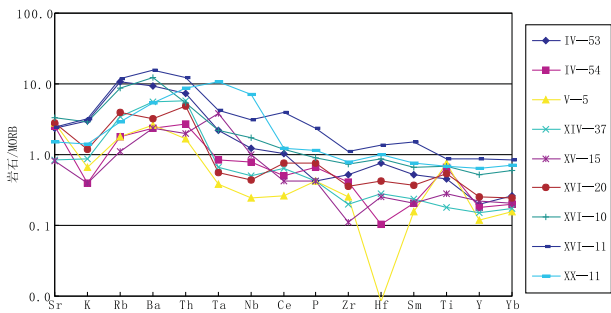


图 9 镁铁质辉长杂岩微量元素蛛网图
Fig. 9 The MORB spidergrams trace element patterns of tramatfic gabbro of the Goukouquan ophiolitic melange
(标准化数据: MORB, Pearce, 1983; 李昌年, 1992)

2.3 斜长花岗岩(斜长岩)单元

2 件样品分析成果(表 1)显示,岩石化学表现为相对高的 SiO₂ (62.67%~68.89%)、CaO(5.16%~5.66%)、Na₂O (2.61%~3.74%), 而低 K₂O (0.26%~0.44%)、MgO (1.49%~1.77%)。在 Al₂O₃-CaO-MgO 图解中,投在镁铁质堆积岩上方,与 Skaegaard 液体趋势线演化一致;在蛇绿岩的 AFM 图解中,投在 MAR 左上方,也与 Skaegaard 液体趋势线演化一致,总体显示其具蛇绿岩套地幔堆晶岩浅色分异体(斜长岩、斜长花岗岩)特征。斜长花岗岩稀土总量(ΣREE)较低。V-15 号样品仅为 21.79×10⁻⁶,轻重稀土比值 LR/HRGd-Y=

1.35~2.42, (La/Sm)_N = 2.47~3.33,说明轻稀土为略富集型。稀土元素丰度值经球粒陨石标准化后,作稀土配分型式图(图 10),稀土型式为较标准的平坦型。且 V-15 号样品稀土总体较低,具 Eu 正异常,与典型层状堆晶辉长岩特征相似,说明斜长岩、斜长花岗岩与堆晶辉长岩同源,也说明其没受到壳源物质污染。

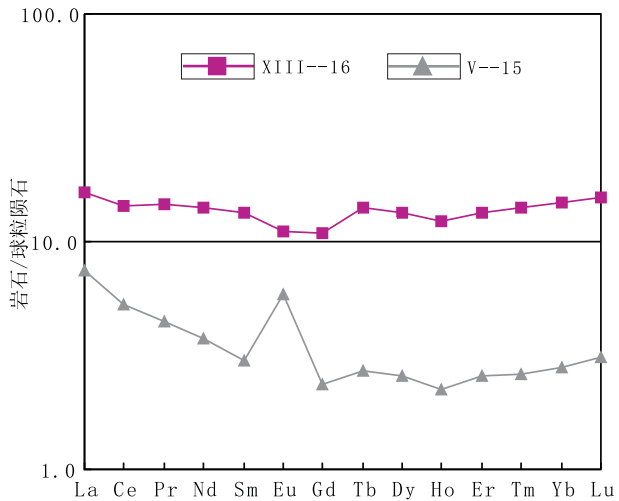


图 10 斜长花岗岩(斜长岩)稀土元素配分型式图
Fig. 10 The REE chondrite-normalized distribution patterns in plagiogranite(anorthosite) of the Goukouquan ophiolitic melange
(标准化数据: 球粒陨石 Leedy, 1973; 李昌年, 1992)

微量元素经原始地幔标准化后,作比值蛛网图(图 11),总体与拉斑玄武岩相似,故应是大洋拉斑玄武岩岩浆演化后期产物,Ba、U 相对富集,可能受后期蚀变所致。

2.4 镁铁质火山熔岩

在该类岩石中采集了 4 件样品(表 1),岩石化学显示高 Na 低 K 的拉斑玄武岩系列特征。其中,913、XX-33 号样品 TiO₂: 0.95%~1.34%,为洋脊拉斑玄武岩。VII-2、XVI-46 号样 TiO₂: 2.38%~2.50%,但是<3%,显示其受到地幔柱富集型岩浆混染,在蛇绿岩套的 Al₂O₃-CaO-MgO 及 AFM 图解中,均投在洋脊玄武岩(MAR)区中及周围,显示大洋构造环境。

其稀土总量(ΣREE)为 79.38×10⁻⁶~161.18×10⁻⁶。其中,913 号样品 ΣREE<100×10⁻⁶,2、3、4 号样品 ΣREE>100×10⁻⁶,说明其丰度值高于辉长杂岩,轻重稀土比值 LR/HRGd-Y=0.84~

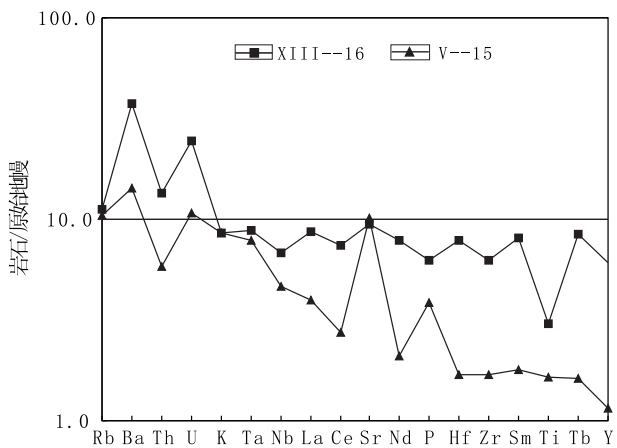


图 11 斜长花岗岩(斜长岩)微量元素蛛网图

Fig. 11 The Primitive-mantle spidergrams trace element patterns of plagiogranite(anorthosite) of the Goukouquan ophiolitic melange

(标准化数据: 原始地幔 Wood, 1979; 李昌年, 1992)

2.42, $(La/Yb)_N = 1.26 \sim 6.83$, 显示玄武岩轻稀土略亏损到略富集; 稀土元素丰度值经球粒陨石(Leedy, 1979)标准化后, 作稀土配分型式图(图 12), 913 号样品轻稀土略亏损, 与标准洋中脊拉斑玄武岩(N-MORB)稀土配分型式相似, 其余稀土略富集, 与过渡洋中脊玄武岩(T-MORB)及富集型洋中脊玄武岩(E-MORB)稀土配分型式相似, 这与在前寒武纪洋中脊多数为轻稀土富集型玄武岩相符(王永和等, 2002)。

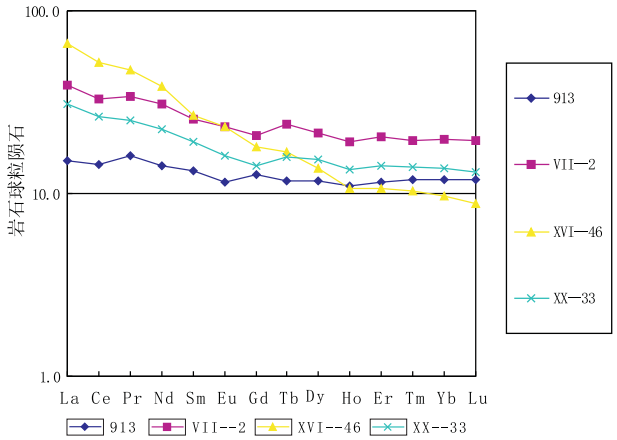


图 12 镁铁质火山熔岩稀土元素配分型式图

Fig. 12 The REE chondrite-normalized distribution patterns in tramatific basalts of the Goukouquan ophiolitic melange

(标准化数据: 球粒陨石 Leedy, 1973; 李昌年, 1992)

将镁铁质火山熔岩微量元素经标准洋中脊玄武岩标准化后, 作微量元素比值蛛网图(图 13), 其不相容元素(Rb-Ta)均微弱富集, 但基本没有超过标准化值 10 倍, 且 Sr、K、Ti 相对低。因此, 其与富集型洋中脊玄武岩(E-MORB)相似, 说明其产于靠近地幔柱的扩张脊上, 该特征与辉长杂岩的图形也十分相似, 说明二者为同源岩浆产物, 也可以初步判断沟口泉蛇绿岩地幔柱型(P)蛇绿岩(张进等, 2012)。

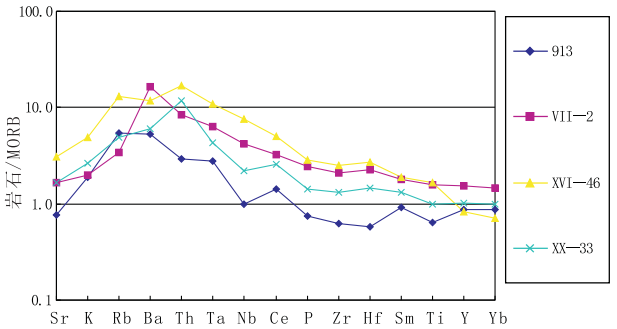


图 13 镁铁质火山熔岩微量元素蛛网图

Fig. 13 The MORB spidergrams trace element patterns of tramatific basalts of the Goukouquan ophiolitic melange

(标准化数据: MORB, Pearce, 1983 李昌年 1992)

3 沟口泉蛇绿混杂岩时代讨论

沟口泉古元古代蛇绿混杂岩的确定除了详细的野外区域地质调查及岩石学、岩石地球化学特征提供的基础证据外, 另一个重要的证据就是年代学的证据, 本次研究分别在不同地方的变质辉橄岩(菱镁滑石岩)、变质辉长岩、枕状玄武岩中共采集 5 个同位素样品, 样品经粉碎挑选锆石送北京离子探针中心进行了高精度锆石 SHRIMP 定年测试, 在菱镁滑石岩中(X XI-13)获得加权平均年龄为 $(1\,889 \pm 27)$ Ma。其中, 在变质辉长岩(深灰绿色阳起石片岩)3 个样品中, X XI-4 为 $(1\,869 \pm 27)$ Ma、X IV-37 为 $(1\,836 \pm 40)$ Ma、XVII-11 为 $(1\,761 \pm 350)$ & $(2\,533 \pm 220)$ Ma; 变余枕状玄武岩 913 号样品为 $(1\,818 \pm 25)$ Ma, 年龄多数锆石时代在 $1\,800 \sim 1\,900$ Ma。古元古代晚期, 从所有锆石年龄看, 还存在 $2\,579 \sim 2\,594$ Ma(晚太古宙晚期)、 $2\,099 \sim 2\,271$ Ma(古元古代中期)、 435 ± 4 Ma(早志留世)、 $271 \sim 300$ Ma(晚石炭世—早二叠世)等数据。本次同位素样品多

数采自下洋壳的地幔岩石,其上升不经过老基底,故捕获锆石的机会极少,其内锆石特征与典型岩浆锆石或变质锆石相似(吴保元等,2004;简平等,2001),经分析认为新太古宙—古元古代数据年龄应为锆石结晶年龄,也即蛇绿岩最初生成年龄。野外调查也见到古元古代片麻状英云闪长岩及早奥陶世石英闪长岩(482 ± 4 Ma)等岩体侵入蛇绿岩。因此,其时代不可能低于(482 ± 4)Ma。因此, (435 ± 4)Ma(早志留世)及 $271 \sim 300$ Ma(晚石炭世—早二叠世)等年龄应为变质年龄。

2000~2009 年,陆松年等对该区阿北中新太古宙米兰岩群及变质英云闪长岩中的辉绿岩脉等基性岩墙进行了研究,其单颗粒锆石 U-Pb 不一致线上交点年龄为($2\ 351 \pm 21$)Ma,认为其产生与早期裂解活动有关(陆松年等,2003,2006),也说明沟口泉洋盆在新太古宙末—古元古代早期时已经裂解形成。

另外,在阿北(-敦煌)微地块发育大量古元古代侵入岩,岩石类型表现为钙碱性中酸岩体-碱性正长岩演化系列,岩石类型主要为片麻状闪长岩-石英二长闪长岩(单颗粒锆石年龄($2\ 140 \pm 9.5$)Ma~($2\ 135 \pm 110$)Ma)、片麻状英云闪长岩-斜长花岗岩-花岗闪长岩(TTG)、片麻状石英正长岩(锆石 SHRIMP 年龄 1866 ± 20 Ma)和碳酸盐岩等。如果按照板块理论的推演,这些中酸性岩体代表了一次古元古代的碰撞-造山后过程,闪长质岩石及 TTG 岩石很可能为古岩浆弧(岛弧)产物。而正长岩为造山后伸展环境早期地壳物质熔融的产物(校培喜等,2012),说明该区新太古宙—古元古代存在过大洋,并且在古元古代晚期发生过俯冲造山,并于古元古代末期碰撞闭合。

其次,蛇绿岩岩块岩石普遍经历了角闪岩相变质,局部达麻粒岩相变质,但是受后期构造影响发生退变,现在多数表现为低角闪岩相-高绿片岩相,与世界典型绿岩特征相似,其变质程度明显高于其南侧的红柳沟-拉配泉新元古代—早古生代(南华—早奥陶世)蛇绿岩,故其时代较老,至少为前南华纪。

综上所述,笔者认为沟口泉有限洋盆在新太古宙末—古元古代早期时已经裂解形成,在古元古代中期已经具相当规模,在古元古代末期俯冲造山闭合,大洋残片和古老岩块及陆缘沉积碎屑岩等一起形成沟口泉蛇绿混杂岩,这可能是阿中-阿北地块最

早的一次洋陆构造转换事件的地质记录。

4 结论及意义

(1)沟口泉蛇绿混杂岩具有较完整的蛇绿岩层序:变质橄榄岩、堆晶超镁铁质岩、变质辉长岩、变质层状堆晶辉长岩、变质斜长花岗岩(英云闪长岩)、变质辉绿岩、变质火山岩熔岩,并发现了具变余枕状结构的变质玄武岩。

(2)根据岩石化学、地球化学特研究,表明沟口泉蛇绿混杂岩蛇绿岩岩块具有洋壳特征,但是与显生宙典型的洋脊岩石的岩石化学(常量元素)、稀土、微量元素均存在一定差异,其辉长岩、玄武岩轻稀土元素相对轻微富集,微量元素中不相容元素 Rb、Ba、Th 等微弱富集,但是 Sr、K、Ti 元素偏低,因此其属于富集型洋中脊玄武岩(E-MORB),这与在早前寒武纪洋中脊多数为富集型玄武质岩石相符(万渝生等,1997),这可能是新太古宙—古元古代时地幔分异差总体还富集的反映,也可能说明其产于靠近地幔柱的扩张脊上,即沟口泉古元古代蛇绿岩为地幔柱型(P)蛇绿岩(张进,2012)。

(3)沟口泉蛇绿混杂岩经历了多期次变质变形,现为一绿片岩系,加上其中古元古代变质侵入岩片麻状闪长岩-石英二长闪长岩及片麻状英云闪长岩-斜长花岗岩-花岗闪长岩(TTG)等构成一花岗绿岩带,只不过为古元古代的花岗绿岩带,比世界典型的太古宙的绿岩时代较晚,但其仍是阿尔金地区重要金铜(铁)的赋矿层位。

(4)在变质辉橄岩、辉长岩、斜长岩和玄武岩等岩石中采集 5 件同位素样品,获得锆石 U-Pb SHRIMP 高精度定年平均加权年龄为 $1\ 818 \sim 2\ 533$ Ma,充分的年代依据证实沟口泉蛇绿岩形成时代为新太古宙末—古元古代,最后构造定位时代为古元古代末,与吕梁运动事件时限相吻合,这可能是阿中-阿北地块最早的一次洋陆转换事件的地质记录。

根据岩石学、岩石地球化学、同位素研究,初步认为沟口泉蛇绿岩为古元古代地幔柱型(P)蛇绿岩,这一发现给塔里木南缘阿北-敦煌地块与阿尔金造山带新太古宙—古元古代构造演化提供充分依据,对早前寒武纪地壳演化研究也具有重要的地质意义。

致谢:本文写作过程得到中国地科院北京离子探针中心宋彪研究员有益帮助;锆石样品制备和分析得到北京离子探针中心杨之青研究员指导,由新疆第一区调队李丽群、李艳等完成。感谢匿名审稿人提出的有益建议。

参考文献(References):

李荣社,计文化,杨永成,等. 昆仑山及邻区地质[M]. 北京:地质出版社,2008.

Li Rongshe, Ji Wenhua, Yang Yongcheng, et al. Geology of Kunlun Orogenic Belt and Neighbouring[M]. Geological Publishing House, Beijing, 2008.

董连慧,朱志新,王克卓,等. 新疆蛇绿岩带的分布、特征及研究新进展[J]. 岩石学报, 2010, 26(10):2894-2904.

Dong L H, Zhu X Z, Wang K Z, et al. Spatial distribution, geological features and latest research progress of the main ophiolite zones in Xinjiang, NW • China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(10):2894-2904.

张进, 邓晋福, 肖庆辉, 等. 蛇绿岩研究最新进展[J]. 地质通报, 2012, 31(1):1-12.

Zhang Jin, Deng Jinfu, Xiao Qinghui, et al. New advances in the study of ophiolite[J]. Geological Bulletin China, 2012, 31(1):1-12.

张旗, 周国订. 中国蛇绿岩[M]. 北京:科学出版社, 2001.

Zhang Q, Zhou G Q. Ophiolites of China[M]. Science Press, Beijing, 2001.

郭召杰, 张志诚, 王建君. 阿尔金山北缘蛇绿岩带的 Sm-Nd 等时线年龄及其大地构造意义[J]. 科学通报, 1998 (18).

校培喜. 阿尔金山中段清水泉—茫崖蛇绿构造混杂岩带地质特征[J]. 西北地质, 2003, 36(2):20-29.

Xiao Peixi. The geological features of ophiolite tectonic mixture belt from Qingshuiquan to Mangnai in the middle section of Altyn Tagh [J]. Northwestern Geology, 2003, 36(2):20-29.

吴峻, 兰朝利, 李继亮, 等. 阿尔金山红柳沟蛇绿岩研究进展[J]. 地质科学, 2001, 36(3):342-349.

Wu Jun, Li Jiliang, Lan Chaoli, et al. New Knowledge on Hongliugou Ophiolite Along Altun Fault, NW China [J]. Chinese Journal of Geology, 2001, 36(3):

342-349.

吴峻, 兰朝利, 李继亮, 等. 阿尔金红柳沟蛇绿混杂岩中 MORB 型 OIB 组合的地球化学证据[J]. 岩石矿物学杂志, 2002, 21(1):24-30.

Wu Jun, Lan Chaoli, Li Jiliang, et al. Geochemical evidence of MORB and OIB combination in Hongliugou Ophiolite melanges, Altun Fault, belt [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2002, 21(1):24-30.

杨经绥, 史仁灯, 吴才来, 等. 北阿尔金地区米兰红柳沟蛇绿岩岩石学特征和 SHRIMP 定年[J]. 岩石学报, 2008, 24:1567-1584.

Yang Jingsui, Shi Rendeng, Wu Cailai, et al. Petrology and SHRIMP age of the Hongliugou ophiolite at Milan-north Altun, at the northern margin of the Tibetan plateau [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(7):1567-1584.

陆松年, 于海峰, 金巍, 等. 塔里木古大陆东缘的微大陆块体群[J]. 岩石矿物学杂志, 2002, 21(4):317-326.

Lu Songnian, Yu Haifeng, Jin Wei, et al. Microcontinents on the eastern Margin of Tarim paleocontinent [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2002, 21(4):317-326.

陆松年, 袁桂邦. 阿尔金山阿克塔什塔格早前寒武纪岩浆活动的年代学证据[J]. 地质学报, 2003, 77(1):62-68.

Lu Songnian, Yuan Guibang. Geochronology of Early Precambrian Magmatic Activities in Aketashitage, East Altyn Tagh [J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(1):62-68.

陆松年. 中国西部前寒武纪重大地质事件及构造演化结题报告[R]. 2006.

郭召杰, 张志诚, 贾承造, 等. 塔里木克拉通前寒武纪基底构造格架[J]. 中国科学(D辑), 2000, 30(6):568-575.

郭召杰, 张志诚, 刘树文, 等. 塔里木克拉通早前寒武纪基岩粒锆石 U-Pb 年龄新证据[J]. 岩石学报, 2003, 19(3):

刘永顺, 于海峰, 辛后田, 等. 阿尔金地区构造单元划分和早前寒武纪重要地质事件[J]. 地质通报, 2009, 28(10):1430-1438.

Liu Yongshun, Yu Haifeng, Xin Houtian, et al. Tectonic units division and Precambrian significant geological events in Altyn Tagh Mountain, China [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(10):1430-1438.

张建新, 李怀坤, 孟繁聪, 等. 塔里木盆地东南缘(阿尔金山)“变质基底”记录的多期构造热事件: 锆石 U-Pb 年代学

- 的制约[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 23-46.
- Zhang J X, Li H K, Meng F C, et al. Polyphase tectonothermal events recorded in "metamorphic basement" from the Altyn Tagh. the southeastern margin of the Tarim basin, western China: Constraint from U-Pb zircon geochronology[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1): 23-46.
- 唐卓, 马中平, 李向民, 等. 阿尔金南缘清水泉地区斜长角闪岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年及其地质意义 [J]. 地质通报, 2011, 30(1): 51-57.
- Tang Zhuo, Ma Zhongping, Li Xiangmin, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of amphibolite in the southern Margin of Altyn Tagh, China and its geological implication[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(1): 51-57.
- 马中平, 孙吉明, 唐卓, 等. 阿尔金山南缘长沙沟—清水泉一带镁铁—超镁质杂岩体 Cu-Ni-PGE 含矿性讨论[J]. 西北地质, 2010, 43(4): 18-24.
- Ma Zhongping, Sun Jiming, Tang Zhuo, et al. Discussions on the Magmatic Cu-Ni-PGE Sulfides Mineralization Potential of the Changshagou—Qingshuiquan Layered Mafic-Ultramafic Intrusions, Altyn Tagh [J]. Northwestern Geology, 2010, 43(4): 18-24.
- 王永和, 校培喜, 潘长利, 等. 阿尔金群的解体与阿尔金杂岩特征[J]. 西北地质, 2002, 35(4): 21-30.
- Wang Yonghe, Xiao Peixi, Pan Changli, et al. The First Disintegration of Altyn Tagh rock group and characteristics of Altyn Tagh complexes[J]. Northwestern Geology, 2002, 35(4): 21-30.
- 吴保元, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1590-1603.
- Wu YB, Zheng Y F. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U. Pb age[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16): 1590-1603.
- 万渝生, 吴澄宇. 稀土元素地球化学与玄武质岩石的成因—应用与问题[A]. 岩石圈研究的现代方法[C]. P215-228 北京: 原子能出版社, 1997.
- 简平, 程裕淇, 刘敦一. 变质锆石成因的岩相学研究—高级变质岩 U-Pb 年龄解释的基本依据[J]. 地学前缘, 2001, 8(3): 183-191.
- Jian Ping, Cheng Yuqi, Liu Dunyi. Petrographical study of Metamorphic Zircon: Basic roles in interpretation of U-Pb age of high grade Metamorphic rocks[J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(3): 183-191.
- 邱家骧, 林景仟. 岩石化学[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- Qiu Jiaxiang, Lin Jingqian. Petrochemistry[M]. Geological Publishing House, Beijing, 1993 (in Chinese).
- 李昌年. 火山岩微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992.
- Li Changnian. Trace Element Petrology of Igneous[M]. China University of Geosciences Press, Wuhan, 1992 (in Chinese).
- Hugh R. Rollison 著, 杨学明, 杨晓勇, 陈双喜译. 岩石地球化学[M]. 合肥: 中国科学技术出版社, 2000.
- Hugh R. Rollison 著; 杨学明, 杨晓勇, 陈双喜译. 岩石地球化学[M]. 合肥: 中国科学技术出版社, 2000 (in Chinese).