

北祁连造山带东段查巴峡早寒武世蛇绿混杂岩带的确定及其构造意义

韩奎^{1,2}, 刘凯^{1,2}, 罗金海³, 贾忠胜^{1,2}, 王明志^{1,2}, 游军^{1,2}

HAN Kui^{1,2}, LIU Kai^{1,2}, LUO Jinhai³, JIA Zhongsheng^{1,2}, WANG Mingzhi^{1,2}, YOU Jun^{1,2}

1. 陕西省矿产地质调查中心, 陕西 西安 710068;

2. 陕西省地质调查院, 陕西 西安 710054;

3. 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069

1. Shaanxi Mineral Resources and Geological Survey Center, Xi'an 710068, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

3. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China

摘要:在北祁连造山带东段的青海省门源县南门峡镇查巴峡一带新识别出一条蛇绿混杂岩带,其物质组成复杂,构造岩块包括变质橄榄岩、基性岩墙、变质基性熔岩、中性侵入岩、变质中基性火山岩和外来地层。基性岩墙和变质基性熔岩具有向右缓倾、轻稀土元素略富集的稀土元素配分模式,富集大离子亲石元素Ba和U,高场强元素Nb、Ta、Zr、Ti基本不显示异常,总体地球化学特征与富集型洋中脊玄武岩(E-MORB)相似。对蚀变辉长岩进行LA-ICP-MS锆石U-Pb测年,获得²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值为522.6±9.7Ma。结合前人的研究成果,认为查巴峡蛇绿混杂岩形成于早寒武世北祁连洋盆扩张的构造环境。查巴峡蛇绿混杂岩的确定扩大了北祁连造山带蛇绿岩南带向东南方向的延伸范围,进而扩大了北祁连造山带早期洋盆向东南方向的分布范围。

关键词:北祁连造山带;蛇绿混杂岩带;早寒武世;北祁连洋盆;构造意义

中图分类号:P534.41 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2019)02/03-0295-13

Han K, Liu K, Luo J H, Jia Z S, Wang M Z, You J. The identification of Early Cambrian ophiolitic melange belt in Chabaxia area along the eastern section of North Qilian orogenic belt and its tectonic significance. *Geological Bulletin of China*, 2019,38(2/3):295-307

Abstract: The ophiolitic melange belt was identified in Chabaxia area, Menyuan County of Qinghai Province, along the North Qilian orogenic belt. Its physical composition is complex, and the tectonic blocks involved in the belt include metamorphic peridotite, mafic dyke, metamorphic basic lava, intermediate intrusive rock, metamorphic intermediate acid volcanic rock and exotic strata. The mafic dykes and metamorphic basic lava have the REE distribution patterns which are slightly right-inclined and slightly enriched in LREE. They also show enrichment of LILEs such as Ba and U, whereas HFSE such as Nb, Ta, Zr and Ti do not show anomalies. These geochemical characteristics are similar to features of E-MORB. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of alteration gabbro yielded ²⁰⁶Pb/²³⁸U weighted average age of 522.6±9.7Ma. In combination with the previous research results, the authors infer that Chabaxia ophiolite was formed in the tectonic environment of northern Qilian basin expansion in Early Cambrian. The identification of Chabaxia ophiolite melange suggests that south ophiolite belt of North Qilian orogenic belt expanded and extended southeastward, and thus early ocean basin of North Qilian orogenic belt expanded southeastward.

Key words: North Qilian orogenic belt; ophiolitic melange belt; Early Cambrian; North Qilian Ocean basin; tectonic significance

北祁连造山带夹持于阿拉善陆块与中祁连- 断裂,南缘为中祁连北缘断裂,东端为同心-固原
湟源地块之间,总体呈北西向展布,北界为龙首山 右行走滑断裂,西端被左行走滑的阿尔金断裂截

收稿日期:2017-12-20;修订日期:2018-05-16

资助项目:中国地质调查局项目《青海省大通县宝库地区1:5万三幅区域地质矿产调查》(编号:12120113033010)

作者简介:韩奎(1984-),男,硕士,工程师,从事区域地质调查与研究。E-mail:267267485@qq.com

切。北祁连造山带是中国蛇绿岩发育较好和研究程度较高的地区之一,蛇绿岩各岩石单元保存较完整。虽然前人对北祁连蛇绿岩带的划分有不同方案^[1-3],但按照 Pearce 等^[4]经典的蛇绿岩形成构造背景分类,可将其大致划分为南、北2条蛇绿(混杂)岩带(图1-a),南带自鹰嘴山经川刺沟至白银,包括熬油沟(祁青沟)^[5-9]、玉石沟-川刺沟^[10-16]、油葫芦沟^[17]、东沟^[18]、东草河^[19]、大红沟^[20]、大坂山^[21]、水洞峡(柏木峡)^[22-23]等蛇绿岩,多数研究者认为它们属寒武纪一早奥陶世的洋中脊型(MOR)蛇绿岩;北带自昌马经民乐童子坝、门源冷龙岭至景泰老虎山,包括卡瓦^[24]、九个泉(塔墩沟或塔洞沟)^[3, 10, 25-28]、大岔大坂^[3, 10, 29-32]、冷龙岭(直河)^[33-35]、乌鞘岭^[36]和老虎山^[3, 10, 37-38]等蛇绿岩,多数研究者认为它们属奥陶纪俯冲带上盘型(SSZ)蛇绿岩。近30年来,许多研究者对北祁连蛇绿(混杂)岩南带西段和中段的蛇绿(混杂)岩进行了较全面的研究,而对南带东段的蛇绿(混杂)岩的研究相对薄弱,同时南带东段蛇绿(混杂)岩已取得的少量研究成果与南带中段和西段存在显著差异。例如,郭通珍等^[21]认为,大坂山蛇绿岩是晚奥陶世在陆壳基底上裂隙而成的初始小洋盆,而非洋中脊的产物。拜永山等^①认为大坂山蛇绿岩形成于早奥陶世与俯冲作用相关的消减带之上的扩张环境,属SSZ型蛇绿岩。水洞峡蛇绿岩主要由辉石岩、辉长岩和玄武岩组成,缺少蛇绿岩的重要组成部分——超基性岩。黄增保等^[22]认为,水洞峡蛇绿岩可能形成于早奥陶世大陆裂谷环境。宋泰忠等^[23]对柏木峡蛇绿混杂岩中的辉长岩和玄武岩进行了LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,分别获得 $675 \pm 31\text{Ma}$ 和 $764.1 \pm 3.3\text{Ma}$ 的结果,并认为它们反映了新元古代与全球 Rodina 超大陆裂解事件有关的一次重要的岩浆活动。显然,这里的晚奥陶世初始小洋盆、早奥陶世弧后盆地和早奥陶世大陆裂谷都与北祁连造山带南带其他蛇绿岩的研究结果不一致。

最近笔者在青海省大通县宝库地区开展1:5万区域地质矿产调查时,在门源县南门峡镇查巴峡一带将1:25万门源县幅原划古元古界托赖岩群(Pt_1T)^①重新厘定为蛇绿混杂岩带。依据该蛇绿混杂岩带所处的大地构造位置(图1-a),认为其应位于北祁连蛇绿(混杂)岩南带东段。本文对查巴峡蛇绿混杂岩带的地质特征、物质组成、岩石地球化学、蚀变辉长岩年龄等开展研究,并与北祁连蛇绿

(混杂)岩南带西段玉石沟蛇绿岩(洋中脊型)进行对比,探讨查巴峡蛇绿混杂岩的形成时代和构造环境。此项研究成果将进一步深化对北祁连洋盆空间分布和北祁连造山带构造演化过程的认识,对构建北祁连早古生代板块构造格局具有十分重要的理论意义。

1 区域地质背景

研究区位于青藏高原东北缘的祁连山系,所处大地构造位置为北祁连造山带东段。据冯益民等^[1]的祁连造山带大地构造分区方案,研究区跨走廊南山岛弧带、玉石沟-野牛沟-清水沟结合带和中祁连-湟源地块3个构造单元(图1-a)。查巴峡蛇绿混杂岩带位于玉石沟-野牛沟-清水沟结合带东段,主要出露于大通县向化乡药水至套拉和门源县南门峡镇七塔尔峡至查巴峡一带,形态似不对称哑铃状呈北西向延伸(图1-b)。该蛇绿混杂岩带北西向延伸可与大坂山蛇绿岩相接^[21]①,南东向延伸可与水洞峡(柏木峡)蛇绿岩相连^[22-23](图1-a)。

查巴峡蛇绿混杂岩带北界以药水-查巴峡脆韧性断裂(区域上称大坂山南坡深断裂或中祁连北缘断裂)与下志留统肮脏沟组细碎屑岩建造接触,肮脏沟组砂岩局部动力变质为糜棱岩和千糜岩。南部边界断裂带仅在药水村一套拉口一线断续出露,在南雀山一带南北边界断裂复合为一条宽30~50m的断裂破碎带,破碎带南西侧为中祁连地块中元古界过渡型基底湟中群,北东侧为下志留统肮脏沟组。南部边界断裂向南东延伸至西沟一带,被第四系松散堆积物覆盖。该蛇绿混杂岩带在研究区出露长度约20km,宽度300~1600m,且在峡口村一带出露宽度最大。

2 蛇绿混杂岩带物质组成

查巴峡蛇绿混杂岩带内的地质体呈大小不一的构造岩块,岩块之间以脆韧性断层接触,形成典型的“网结”状构造(图1-b),变形总体具有“强带弱域”的特征。

查巴峡蛇绿混杂岩带物质组成复杂,由不同属性的弱变形构造岩块和相对强变形的基质组成。构造岩块由不同时代和不同三级构造单元的地质体组成。基质由强变形的变质火山岩、细碎屑岩及不同岩块改造而成的细粒物组成,岩性为破碎绿片

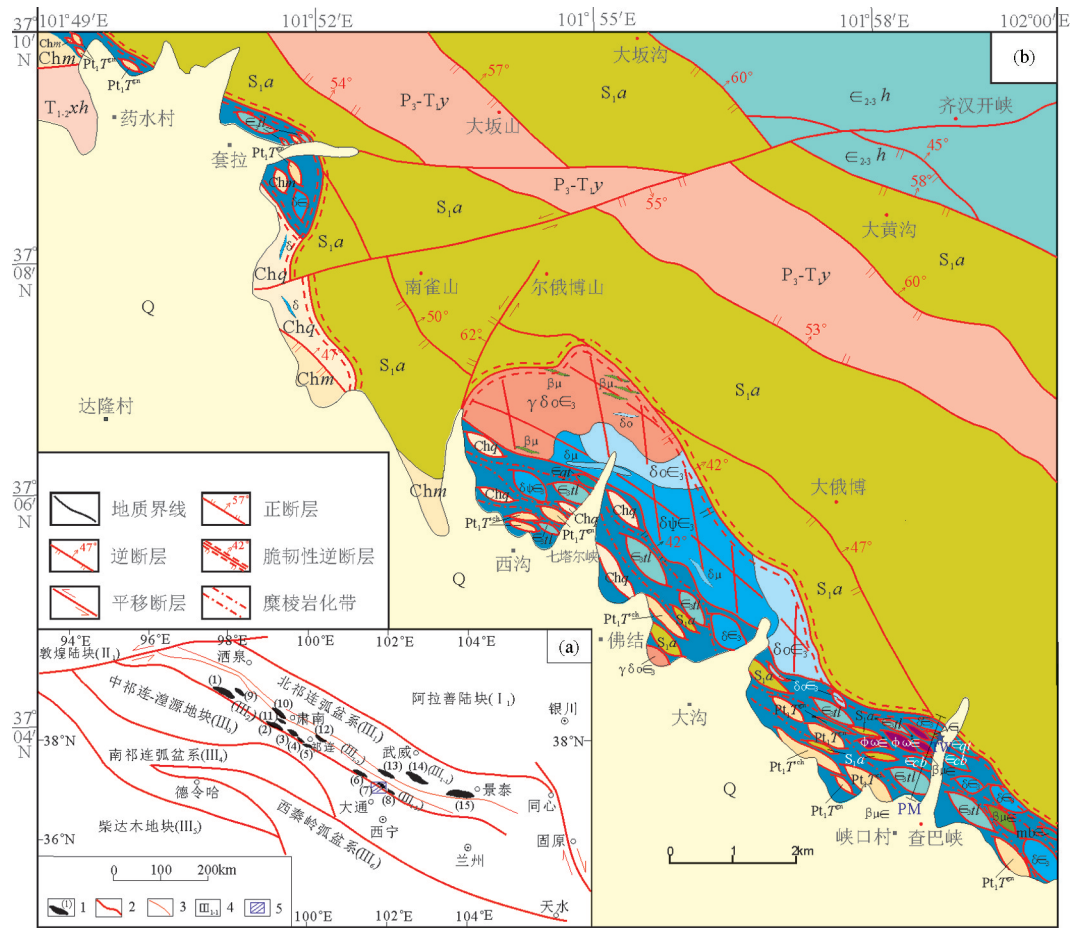


图 1 查巴峡蛇绿混杂岩带大地构造位置(a)(据参考文献[1,3]修改)与区域地质图(b)(据参考文献②简化)

Fig. 1 Tectonic location (a) and geological map (b) of ophiolitic melange in Chabaxia area

图 a 中 1—蛇绿岩及代号: (1)熬油沟(祁青沟); (2)玉石沟—川刺沟; (3)油葫芦沟; (4)东沟; (5); 东草河; (6)大坂山; (7)查巴峡; (8)水洞峡(柏木峡); (9)卡瓦; (10)九个泉(塔墩沟或塔洞沟); (11)大盆大坂; (12)大红沟; (13)冷龙岭(直河); (14)乌鞘岭; (15)老虎山; 2—二级构造单元界线; 3—三级构造单元界线; III₁₋₁—走廊弧后盆地; III₁₋₂—肃南—天祝蛇绿混杂岩带; III₁₋₃—走廊南山岛弧带; III₂—玉石沟—野牛沟—清水沟结合带; 图 b 中 Q—第四系; T₁₋₃xh—下中三叠统下环仓组; P_{3-T₁y}—上二叠—下三叠统窑沟组; S_{1a}—下志留统肮脏沟组; ε₃₃h—中上寒武统黑茨沟组; Ch_q—长城系青石坡组; Ch_m—长城系磨石沟组; Pt₁T^o—古元古界托赖岩群片麻岩岩组; Pt₁T^{ch}—古元古界托赖岩群片岩岩组; γδoε₃—英云闪长岩; δoε₃—石英闪长岩; ε₃—闪长岩; δμ—闪长玢岩脉; βμ—辉绿岩脉; ψωε—蛇纹岩岩块; vε₁—辉长岩岩块; βμε—辉绿岩岩块; mbe—大理岩岩块; ε₃h—套拉火山岩岩块; ε₃cb—查巴峡火山岩岩块; ε₃qt—七塔尔峡火山岩岩块; PM—图 2 剖面位置; TW—同位素测年样品位置

岩、千糜岩、初糜棱岩和糜棱岩。

2.1 蛇绿岩岩块

该类岩块包括变质橄榄岩、基性岩墙和变质基性熔岩,是经历了俯冲刮削、碰撞就位、后碰撞改造等过程的复杂构造移置体。蛇绿岩岩块间或蛇绿岩岩块与其他岩块间均以韧—脆韧性变形基质构造接触,不具典型蛇绿岩垂向分带特征,研究区出露总面积约为 0.5km²。

在互助县南门峡镇峡口村查巴峡剖面上(图 1-b、图 2),出露有变质橄榄岩(蛇纹岩)、基性岩墙(蚀

变辉长岩、辉绿岩)、变质基性熔岩等岩块。

变质橄榄岩岩块(ψωε)主要岩石类型有蛇纹岩(图版 I-a)、滑石蛇纹石岩和蛇纹石蚀变岩。蛇纹岩呈墨绿色,显微鳞片变晶结构,块状构造。主要矿物成分:蛇纹石(90%)、绢云母(5%)和金属矿物(5%)。蛇纹石呈显微鳞片状,分布较均匀。绢云母呈细小鳞片状,部分聚集定向分布,金属矿物为磁铁矿或钛铁矿,多呈粒状,少数呈方形,部分颗粒聚集定向分布(图版 I-b)。

基性岩墙岩块的岩石类型有蚀变辉长岩(vε₁)

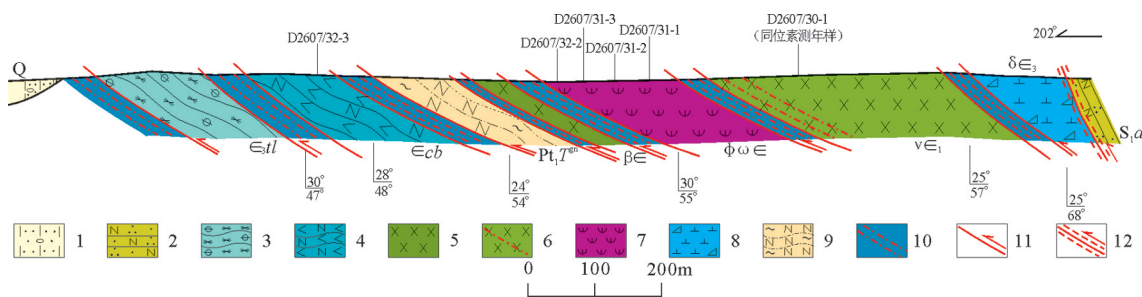


图2 查巴峡蛇绿混杂岩带地质剖面图(地质体代号同图1)

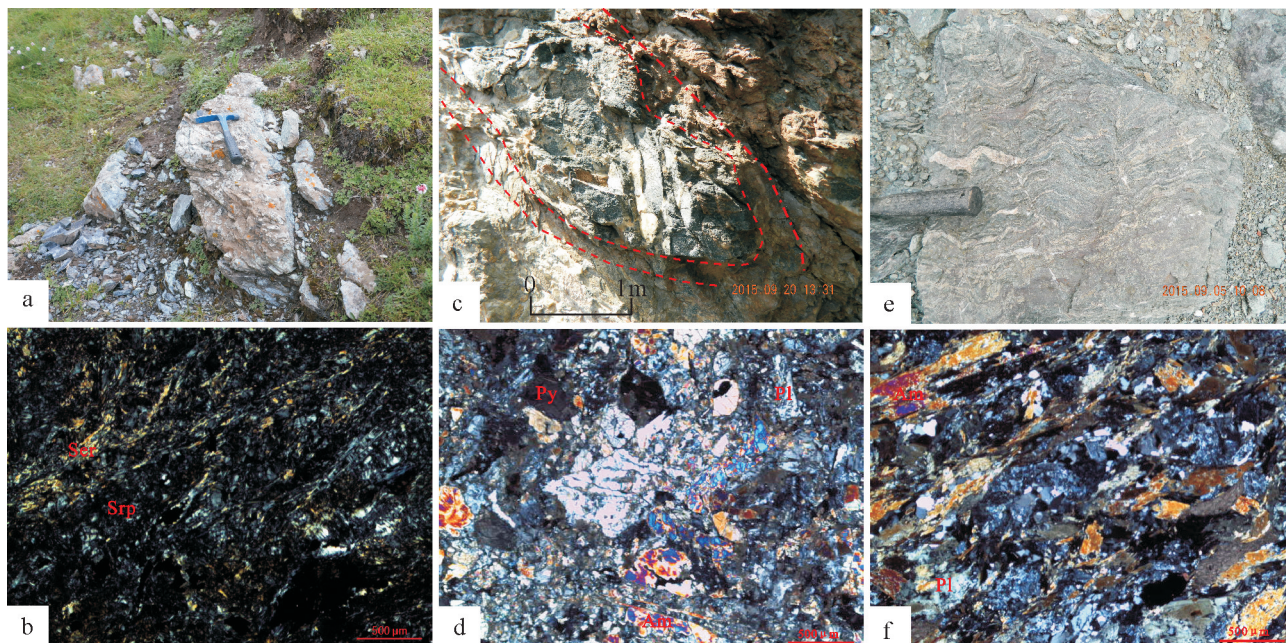
Fig. 2 Measured geological section of ophiolitic melange in Chabaxia area

1—含砾亚砂土;2—长石英砂岩;3—绿帘阳起片岩;4—斜长角闪片岩;5—蚀变辉绿岩;6—(糜棱岩化)蚀变辉长岩;7—蛇纹岩;
8—碎裂岩化闪长岩;9—绿泥斜长变粒岩;10—糜棱岩化带;11—逆断层;12—脆韧性逆断层

和辉绿岩脉(βμε),其中辉长岩变形强烈,局部糜棱岩化(图版 I -c),辉绿岩脉片理化较强,二者与其他构造块体之间呈构造面理接触。蚀变辉长岩呈深灰色,辉长结构,块状构造。主要矿物成分为辉石(45%)、斜长石(37%),次为绿泥石(7%)和绿帘石(5%)。辉石呈半自形-他形粒状,横切面可见2组近垂直解理,蚀变轻微。斜长石呈半自形-他形粒状,蚀变强烈,被绿帘石、绿泥石星点状交代而混浊。绿泥石呈他形填隙状或不规则状与绿帘石混合在一起,分布于辉石和斜长石粒间,由暗色矿物和斜长石蚀变而来(图版 I -d)。

变质基性熔岩岩块(εcb)主要岩石类型有绿帘斜长角闪岩和斜长角闪片岩(图版 I -e),原岩恢复为基性火山岩。斜长角闪片岩呈灰绿色,纤柱状粒状变晶结构,片状构造。主要矿物成分为角闪石(45%)、绢云母化斜长石(40%)、绿帘石(8%)、石英、方解石脉(4%)和楣石(3%)。角闪石为纤柱状,平行定向分布,光性特征显示为普通角闪石。斜长石多为他形粒状,较均匀地分布于角闪石粒间,沿角闪石延伸方向拉伸特征明显。斜长石绢云母化明显,大部分呈交代假象,个别可见少量残晶。绿帘石为粒状-微粒状,大部分聚集成断续条纹状沿角闪石

图版 I Plate I



a. 蛇纹岩露头; b. 蛇纹岩显微照片; c. 蚀变辉长岩露头; d. 蚀变辉长岩显微照片; e. 斜长角闪片岩露头; f. 斜长角闪片岩显微照片。

Srp—蛇纹石; Ser—绢云母; Py—辉石; Pl—斜长石; Am—角闪石

延伸方向定向分布,少数呈散染状。岩石中榴石较多,呈麦粒状、分散状分布(图版 I-f)。

2.2 中性侵入岩岩块

在查巴峡蛇绿混杂岩带内还识别出较多的中性侵入岩岩块,岩性有闪长岩($\delta\epsilon_3$)、石英闪长岩($\delta o\epsilon_3$)和少量英云闪长岩($\gamma\delta o\epsilon_3$)等。侵入岩岩块边部韧-脆性动力变质明显,表现为碎裂岩、碎斑岩、糜棱岩化等。这些侵入岩岩块的岩石地球化学特征与相邻的晚寒武世七塔尔峡中酸性杂岩体十分相似,LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $499.7\pm 4.0\sim 488.4\pm 3.3\text{Ma}$,属同一构造-岩浆事件的产物,代表晚寒武世洋陆俯冲构造事件中形成的火山弧型花岗岩(笔者未刊资料)。部分岩株和岩脉于碰撞造山和陆内造山作用过程中被卷入查巴峡蛇绿混杂岩带中。

2.3 变质中基性火山岩岩块

查巴峡蛇绿混杂岩带中构造卷入了大量不同成因的火山岩岩块,且大多数已变质为绿片岩类,其中以套拉火山岩岩块(ϵ_3tl)分布面积最大。套拉火山岩岩块原岩恢复为中基性火山岩,具俯冲构造环境的岛弧火山岩岩石地球化学特征,LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $495.7\pm 3.3\text{Ma}$ (笔者未刊资料)。七塔尔峡火山岩岩块(ϵ_3qt)原岩恢复为基性火山岩,具大洋板内环境洋岛玄武岩的岩石地球化学特征。这些火山岩岩块变形较强,常见碎裂岩化、糜棱岩化,以及多期构造叠加等现象。

2.4 外来地层岩块

该类岩块主要有古元古界托赖岩群、中元古界长城系湟中群和下志留统肮脏沟组。

古元古界托赖岩群外来岩块(Pt_1T^{m} 和 Pt_1T^{n})主要出露于查巴峡蛇绿混杂岩带南侧边界断裂附近的药水、西沟、峡口、查巴峡一带,均为中高级变质岩系,岩性有黑云母斜长片麻岩、二云石英片岩等。

中元古界湟中群外来岩块(Chm 和 Chq)主要出露于药水、套拉、七塔尔峡一带,为层状无序的中浅变质岩系,主要岩性有石英岩、绢云石英千枚岩、透闪石钙质千枚岩等。

下志留统肮脏沟组外来岩块(S_1a)主要出露于佛结、大沟一带,岩性主要为灰色岩屑砂岩、长石砂岩等。岩块多发生动力变质作用,岩性为长英质糜棱岩、千糜岩、糜棱岩化砂岩和碎裂化砂岩。

3 分析方法

本文对查巴峡蛇绿混杂岩带中的蛇绿岩岩块进行了系统的岩石地球化学及年代学研究。岩石地球化学样品采自互助县南门峡镇查巴峡实测地质剖面及相邻地质填图路线中。对 9 件岩石样品进行了主量和微量元素分析测试,其中变质橄榄岩 5 件,基性岩墙 2 件,变质基性熔岩 2 件。锆石 U-Pb 同位素测年样品采自查巴峡地质剖面蚀变辉长岩(图 2、图版 I-c)。

3.1 主量和微量元素测试方法

主量和微量元素分析测试在自然资源部西安矿产资源监督检测中心完成,测试结果列于表 1。主量元素测定采用 X 射线荧光光谱法(XRF),在 PANalytical X 荧光光谱仪上测定,分析误差小于 5%。经烧失量校正后借助 Geokit2012 程序^[39]计算了主要岩石地球化学指数。微量元素的测定采用 ICP-MS 法,在 Thermo Fisher IRIS Intrepid II XSP 电感耦合等离子体发射光谱仪上测定,分析误差一般小于 5%。借助 Geokit2012 程序^[39]对稀土元素采用球粒陨石数据^[40]进行标准化,并计算了主要稀土元素参数。

3.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年方法

锆石挑选由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。锆石 LA-ICP-MS 年代学分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。首先将挑选出的锆石放置于环氧树脂中进行打磨,使其露出中心面,并进行抛光,之后对处理好的样品进行反射光及阴极发光(CL)照相。阴极发光照相采用美国 Gatan 公司的 Mono CL3+X 型阴极荧光探头。锆石测试点的选择通过发射光照片和阴极发光照片反复对比,避开内部裂隙和包体,以期获得较准确的年龄数据。锆石 U-Pb 同位素测定在四极杆 ICP-MS Elan6100DRC 上进行。激光剥蚀系统采用德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M。激光束斑直径为 $30\mu\text{m}$,激光脉冲 10Hz,能量 $32\sim 36\text{mJ}$ 。同位素组成采用美国哈佛大学矿物博物馆的标准锆石 91500 进行外标校正。采用 Glitter 和 Isoplot 进行数据处理和作图。在进行年龄数据分析时,对于小于 1000Ma 的测点,采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值。同时,结合 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 计算锆石各测点数据的谐和性,剔除 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄相对于 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄偏差大于

表1 查巴峡蛇绿岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 1 Major, trace and rare earth element compositions of ophiolite in Chabaxia area

样号	D1210/2	D2607/31-1	D2607/31-2	D2607/31-3	D2607/32-2	D2607/30-1	D2869/2	D2607/32-3	D6500/6
蛇绿岩单元	变质橄榄岩				基性岩墙		变质基性熔岩		
岩性	滑石蛇纹石岩		蛇纹岩		蚀变辉长岩	蚀变辉绿岩	绿帘斜长角闪石岩	斜长角闪片岩	
SiO ₂	40.20	38.98	39.80	39.25	40.22	46.60	45.06	49.10	44.87
TiO ₂	0.03	0.02	0.02	0.04	0.04	2.42	1.85	2.57	1.25
Al ₂ O ₃	0.78	0.44	0.60	1.16	0.88	17.69	14.73	13.80	12.74
TFe ₂ O ₃	5.70	7.10	6.40	6.55	7.0	12.79	19.85	16.10	13.20
MnO	0.07	0.46	0.46	0.46	0.45	0.21	0.29	0.22	0.19
MgO	40.04	38.85	40.00	38.08	38.46	4.49	9.22	5.71	7.98
CaO	0.10	0.15	0.10	0.30	0.60	6.40	1.97	6.10	11.50
Na ₂ O	0.05	0.06	0.05	0.07	0.06	3.30	0.38	2.99	2.30
K ₂ O	0.02	0.03	0.02	0.09	0.02	0.54	0.78	0.60	0.61
P ₂ O ₅	0.001	0.004	0.001	0.003	0.001	0.67	0.17	0.36	0.33
烧失量	13.11	14.11	12.8	13.44	12.59	4.52	5.92	1.88	4.55
总计	100.40	100.19	100.25	99.45	100.32	99.63	100.22	99.43	99.52
Mg [#]	94.2	92.7	93.6	93.1	92.8	45.0	52.0	45.3	58.5
AR	1.16	1.35	1.20	1.25	1.12	1.38	1.15	1.44	1.27
ALK	0.07	0.10	0.07	0.19	0.09	4.04	1.22	3.68	3.06
Rb	6.92	3.60	4.28	3.35	4.43	15.20	24.60	7.21	34.60
Ba	48.4	36.7	33.2	36.2	24.6	282.0	139.0	136.0	275.0
Th	0.70	0.33	0.49	0.28	0.42	1.77	10.30	2.50	2.31
U	0.51	0.37	0.55	0.19	0.82	0.91	2.74	0.63	0.80
Nb	2.68	2.80	2.39	2.36	2.41	47.00	9.71	21.00	8.86
Ta	0.05	0.08	0.18	0.07	0.19	2.19	0.85	1.46	0.75
P	170.0	137.0	125.0	121.0	172.0	2923.8	741.9	1896.0	722.0
Zr	22	17	16	19	16	270	179	228	102
Sr	11	13	10	9	18	669	42	225	396
La	0.38	0.65	0.40	0.18	0.50	31.80	22.50	14.64	8.15
Ce	0.63	0.67	0.69	0.37	0.85	65.80	48.50	33.82	19.58
Pr	0.09	0.14	0.10	0.05	0.13	8.60	6.03	4.87	2.85
Nd	0.35	0.56	0.34	0.26	0.49	37.00	24.10	20.88	12.90
Sm	0.06	0.11	0.10	0.07	0.12	8.02	6.03	5.69	3.52
Eu	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	3.19	1.88	1.85	1.28
Gd	0.05	0.09	0.07	0.05	0.10	7.26	6.01	5.62	3.37
Tb	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	1.08	1.24	1.20	0.68
Dy	0.06	0.09	0.10	0.07	0.12	5.40	7.70	8.38	4.31
Ho	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	1.20	1.67	1.68	0.83
Er	0.04	0.05	0.05	0.04	0.07	2.81	4.53	4.91	2.22
Tm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.41	0.78	0.78	0.36
Yb	0.06	0.07	0.06	0.06	0.08	2.74	4.86	4.83	2.02
Lu	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.40	0.66	0.81	0.33
Y	0.42	0.61	0.53	0.40	0.74	32.20	46.60	48.49	22.99
ΣREE	2.22	3.11	2.49	1.61	3.29	207.91	158.44	183.09	85.39
ΣLREE/ΣHREE	2.26	2.22	1.93	1.46	1.80	2.89	1.07	1.47	1.30
(La/Yb) _N	4.63	6.72	4.66	2.32	4.38	8.32	3.32	2.18	2.89
(La/Sm) _N	3.90	3.83	2.53	1.65	2.60	2.56	2.41	1.66	1.49
(Gd/Yb) _N	0.76	1.11	0.92	0.68	1.01	2.19	1.02	0.96	1.38
δEu	0.84	0.82	0.70	1.05	0.91	1.28	0.95	1.00	1.14

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量为10⁻⁶

10%的测点数据。

4 分析结果

4.1 主量元素地球化学特征

从表 1 可以看出,除个别变质基性熔岩样品烧失量偏低外,其余样品烧失量均明显偏高(4.52%~14.11%),说明样品经历了强烈的蚀变,这与野外及镜下特征一致。故主量元素分析、计算和投图均使用经过烧失量校正后的数据。

变质橄榄岩的 SiO_2 含量为 45.28%~46.05%(平均 45.67%), TiO_2 含量偏低(0.02%~0.05%,平均 0.03%),与 MORB(洋中脊玄武岩)型变质橄榄岩的 TiO_2 含量(0.03%~0.04%)相当^[4];同时具有低 Al_2O_3 (0.51%~1.35%,平均 0.89%)、低 CaO (0.11%~0.69%,平均 0.29%)和极低的 K_2O (0.02%~0.11%,平均 0.04%)、 Na_2O (0.05%~0.08%,平均 0.06%)的特征。 MgO 含量较高(43.84%~45.87%,平均 44.97%),与变质橄榄岩类 MgO 变化范围(42.70%~45.00%)相当, $\text{Mg}^\#$ 值为 92.7~94.2(平均 93.3),与典型蛇绿岩中方辉橄榄岩(88.8~91.4)相当^[41]。

基性岩墙的 SiO_2 含量为 47.79%~49.00%(平均 48.39%),具硅不饱和特征,属基性岩类。在火山岩分类命名 TAS 图解^[42](图 3-a)中,样品点均落入玄武岩区,并位于亚碱性系列区。在 AFM 图解^[43](图 3-b)中,均投入拉斑玄武岩系列区。 TiO_2 含量(1.96%~2.54%,平均 2.25%)、 Al_2O_3 含量(15.62%~18.60%,平均 17.11%)和 MgO 含量(4.72%~9.78%,

平均 7.25%)均较高,总体表现为高钛、高铝和高镁特征。碱度率 AR 在 1.15~1.38 之间,总碱量 ALK 在 1.22%~4.04%之间, K_2O 和 Na_2O 含量低,显示贫碱特征。 $\text{Mg}^\#$ 值介于 45.0~51.98(平均 48.49)之间,低于原生玄武岩范围($\text{Mg}^\#=68\sim75$)^[44],表明岩浆在形成过程中经历了结晶分异作用。

变质基性熔岩的 SiO_2 含量为 47.25%~50.33%(平均 48.79%),具硅不饱和特征,属基性岩类。在火山岩分类命名 TAS 图解^[42](图 3-a)中,样品点均落入玄武岩区,并位于亚碱性系列区。在 AFM 图解^[43]中,均投入拉斑玄武岩系列区(图 3-b)。 TiO_2 含量较高(1.32%~2.63%,平均 1.98%),显示洋脊和洋岛玄武岩的特征, Al_2O_3 含量(13.41%~14.15%,平均 13.78%)和 MgO 含量(5.85%~8.40%,平均 7.13%)较高,表现为相对高钛、高铝和高镁特征,与富集型洋中脊玄武岩(E-MORB)特征相似。碱度率 AR 在 1.27~1.44 之间,总碱量 ALK 在 3.06%~3.68%之间, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 平均值均远大于 1,同时 K_2O 含量较低,具有高钠特征。 $\text{Mg}^\#$ 值在 45.3~58.5 之间(平均 51.9),低于原生玄武岩范畴($\text{Mg}^\#=68\sim75$)^[44],表明岩浆在形成过程中亦经历了结晶分异作用。

4.2 稀土和微量元素地球化学特征

变质橄榄岩的稀土元素总量 $\Sigma\text{REE}=1.61\times 10^{-6}\sim 3.29\times 10^{-6}$ (平均 2.54×10^{-6}),远低于原始地幔稀土元素总量(7.43×10^{-6})^[40],略低于亏损地幔稀土元素总量(4.25×10^{-6})^[45]; $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 平均值为 1.93,表明轻稀土元素(LREE)较重稀土元素略富

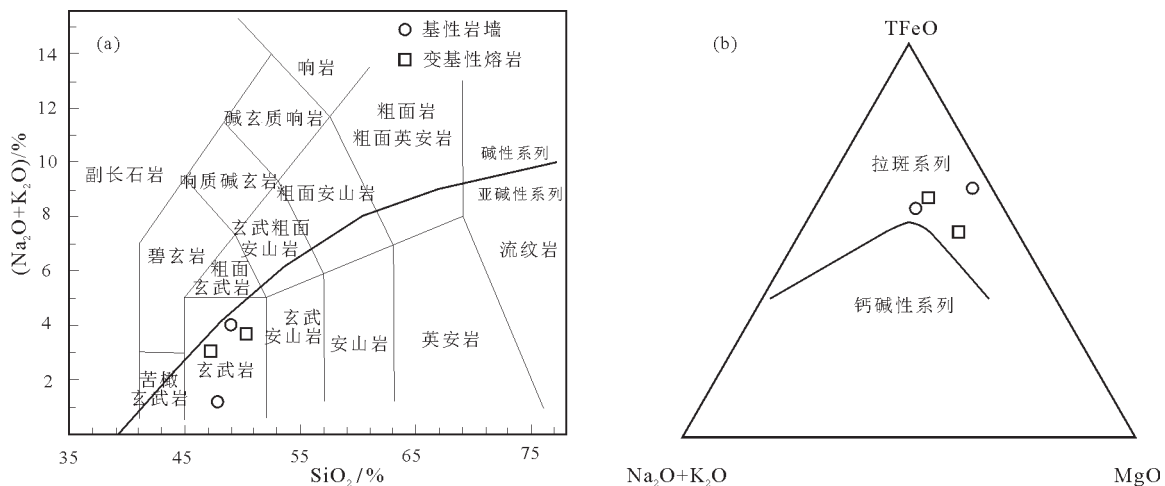


图 3 查巴峡蛇绿岩岩块 TAS 图解(a)和 AFM 图解(b)

Fig. 3 TAS diagram (a) and AFM diagram (b) of classification of ophiolite in Chabaxia area

集,与玉石沟地幔橄橄榄岩略富集LREE的特征类似^[13]; $(La/Yb)_N$ 、 $(La/Sm)_N$ 、 $(Gd/Lu)_N$ 平均值分别为4.5、2.9、0.9,说明稀土元素分馏明显,轻稀土元素有较明显分馏,而重稀土元素无分馏;球粒陨石标准化稀土元素配分模式图具有类似于王希斌等^[46]厘定的“烟斗形”稀土元素配分型的特征(图4-a),同时绝大部分稀土元素丰度(主要为重稀土元素)远低于相应元素在球粒陨石中的含量。基性岩墙的稀土元素总量 $\Sigma REE=183.09 \times 10^{-6} \sim 207.91 \times 10^{-6}$ (平均 195.5×10^{-6}), $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ 平均值为2.18,表明轻稀土元素较重稀土元素略富集; $(La/Yb)_N$ 、 $(La/Sm)_N$ 、 $(Gd/Lu)_N$ 平均值分别为5.82、2.48、1.61,说明稀土元素分馏明显,轻稀土元素有较明显分馏,而重稀土元素弱分馏;弱负—正Eu异常($\delta Eu=0.95 \sim 1.28$),反映岩浆源区无斜长石残留;球粒陨石标准化稀土元素配分模式图呈向右缓倾、轻稀土元素略富集型曲线(图4-a)。变质基性熔岩的稀土元素总量 $\Sigma REE=85.39 \times 10^{-6} \sim 158.44 \times 10^{-6}$ (平均 121.91×10^{-6}), $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ 平均值为1.18,表明轻、重稀土元素含量相当; $(La/Yb)_N$ 、 $(La/Sm)_N$ 、 $(Gd/Lu)_N$ 平均值分别为2.53、1.58、1.17,说明稀土元素分馏较明显,轻稀土元素弱分馏,而重稀土元素无分馏;无Eu异常至弱正Eu异常($\delta Eu=1.0 \sim 1.14$),反映岩浆源区无斜长石残留;球粒陨石稀土元素标准化配分模式图呈略向右倾的近平坦曲线(图4-a)。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图4-b)上,变质橄橄榄岩样品曲线形态具有较高的相似性,仅Rb、Ba、Th、U、Nb、Ta、P、Zr等元素含量相对于原始地幔富集,其中U强烈富集,而其他微量元素

含量均相对原始地幔中等—强烈亏损。基性岩墙和变质基性熔岩的蛛网图曲线显示较好的一致性,说明它们应来自同一岩浆源,均相对富集大离子亲石元素Ba和U,高场强元素Nb、Ta、Zr和Ti基本不显示异常,与玉石沟玄武岩微量元素特征类似^[13](图4-b)。总的来说,它们的微量元素蛛网图与富集型洋中脊玄武岩近似,大多数微量元素含量略高于玉石沟玄武岩,但均位于富集型洋中脊玄武岩(E-MORB)和洋岛玄武岩(OIB)参考曲线之间。

4.3 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

蚀变辉长岩(样号:D2607/30-1)中的锆石颗粒呈浅黄色—无色透明细小短柱状、粒状,长宽比为1:1~2:1,粒径为50~100 μm ,自形—半自形,阴极发光图像显示较明显的岩浆振荡环带结构(图5-a)。锆石的Th/U值较高,介于0.25~0.57之间(平均0.41)(表2),普遍大于变质成因锆石的Th/U值,总体显示岩浆成因锆石的特点。

对该样品选择了31颗完整锆石进行LA-ICP-MS U-Pb测年,通过校正后的有效测点为16个,分析结果见表2。这些有效测点给出的年龄数据基本都位于谐和线上(图5-b)。²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值为 $522.6 \pm 9.7 Ma$ (图5-c),说明查巴峡蚀变辉长岩的形成时代为早寒武世。

5 讨论

5.1 形成时代

查巴峡蛇绿混杂岩中蚀变辉长岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb测年结果为 $522.6 \pm 9.7 Ma$,该年龄代表蛇绿岩的形成年龄,因此查巴峡蛇绿混杂岩形成

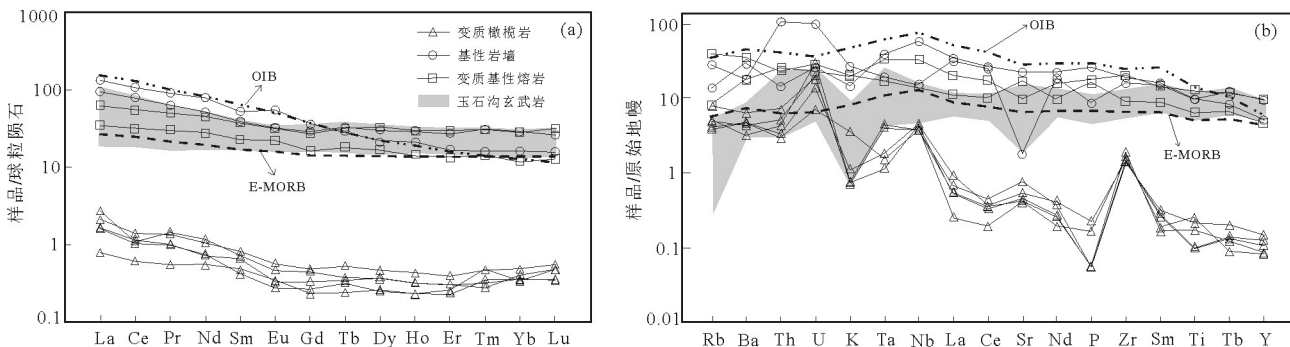


图4 查巴峡蛇绿岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

(球粒陨石数据据参考文献[40];原始地幔数据据参考文献[45];玉石沟玄武岩数据据参考文献[12-13,16,48])

Fig. 4 Chondrite normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized spider diagram (b) of ophiolite in Chabaxia area
OIB—洋岛玄武岩;E-MORB—富集型洋中脊玄武岩

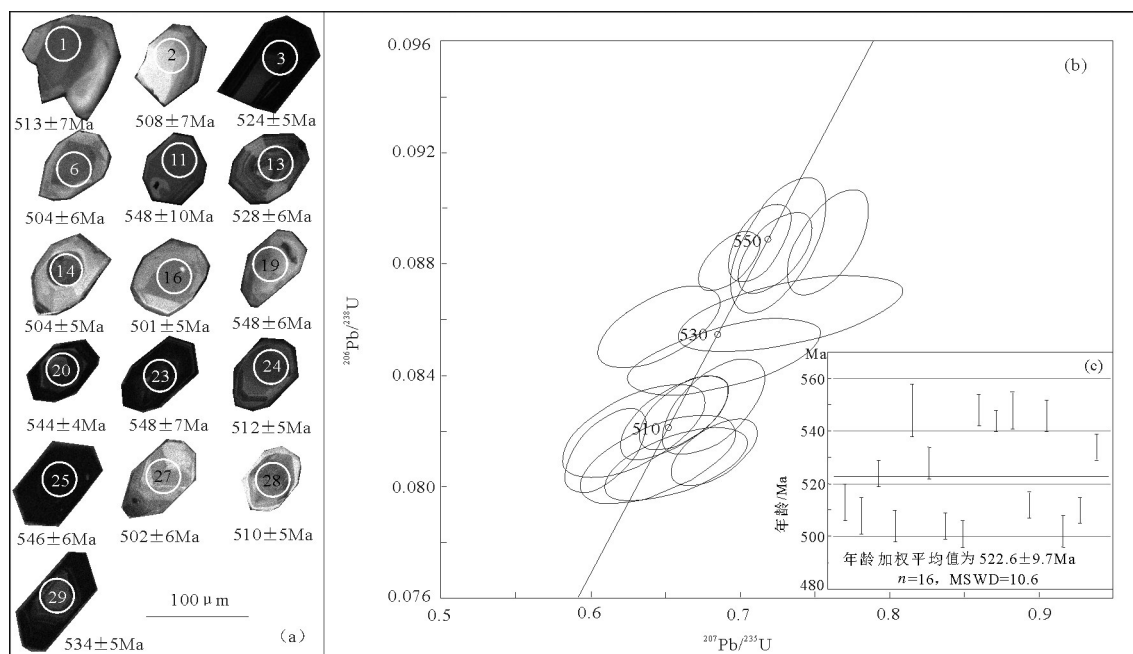


图5 查巴峡蚀变辉长岩锆石阴极发光(CL)图像(a)U-Pb谐和图(b)和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值图(c)

Fig. 5 CL images (a), U-Pb concordia diagram (b) and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ wighted average age diagram (c) of altered gabbro in Chabaxia area

于早寒武世。

近20年来,许多研究者对查巴峡蛇绿混杂岩所在的北祁连蛇绿(混杂)岩南带内的各蛇绿岩形成时代进行了同位素测年工作,积累了一些高精度测年结果。前人已发表的同位素测年结果表明,北祁连蛇绿(混杂)岩南带中辉长岩和辉绿岩测年结果变化范围在497~550Ma之间^[6-8,12,14-16,19,49],但多数集中在501~515Ma;而基性火山岩、玄武岩、粒玄岩测年结果变化范围在492~521Ma之间^[7,9,18,48]①,但多数集中在492~499Ma。这些同位素测年数据证明,区域上存在与查巴峡蛇绿混杂岩形成年龄相近的蛇绿(混杂)岩。

对查巴峡蛇绿混杂岩带中构造卷入的具岛弧地球化学特征的套拉火山岩块(斜长角闪片岩,原岩恢复为玄武安山岩)进行LA-ICP-MS锆石U-Pb测年,获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $495.7 \pm 3.3 \text{ Ma}$ 。本次工作获得的这2组高精度测年结果与北祁连蛇绿(混杂)岩南带内已有的测年结果较一致,说明本文对查巴峡蛇绿混杂岩的测年结果具有较高的可信度。

5.2 构造环境

查巴峡蛇绿混杂岩中变质橄榄岩的 TiO_2 含量

极低(0.02%~0.05%,平均0.03%),反映洋中脊型变质橄榄岩的特点。 Al_2O_3 和 CaO 平均含量分别为0.89%和0.29%,远低于大洋中脊二辉橄榄岩中的含量(3.47%和2.2%)^[50],表明研究区变质橄榄岩应为亏损地幔橄榄岩,主要岩石类型应为方辉橄榄岩或纯橄榄岩,二辉橄榄岩少量。 K_2O 和 Na_2O 含量极低($\text{ALK}=0.07\% \sim 0.19\%$,平均0.11%),极度贫碱(碱度率 $AR=1.12 \sim 1.35$,平均1.22)。在超基性岩中,尤其是上地幔橄榄岩一般枯竭 K_2O 和 Na_2O ,微量的碱可能存于辉石中。上述特征表明,查巴峡蛇绿混杂岩中的变质橄榄岩是地幔低度部分熔融后的残余固相物。

基性岩墙和变质基性熔岩表现为高钛、高铝和高镁特征,球粒陨石标准化稀土元素配分模式图呈向右缓倾、轻稀土元素略富集型曲线,其总体特征与以高稀土元素含量、轻稀土元素富集为特征的E-MORB配分曲线形态相似,而与岩浆起源于亏损地幔的轻稀土元素明显亏损的正常洋中脊玄武岩(N-MORB)和岩浆起源于富集地幔的高稀土元素含量、轻稀土元素强烈富集的OIB明显不同。稀土元素配分曲线均位于E-MORB和OIB参考曲线之间,稀土元素丰度均略高于E-MORB。原始地幔

表2 查巴峡蚀变辉长岩 LA-ICP-MS U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 2 LA-ICP-MS U-Th-Pb isotopic data of zircons from altered gabbro in Chabaxia area

测点	含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值										年龄值/Ma						
	Pb*	Th		U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ
1	87	335	588	0.57	0.0595	0.0020	0.6826	0.0228	0.0829	0.0012	0.0269	0.0007	585	48	528	14	513	7	537	14
2	19	48	153	0.32	0.0559	0.0029	0.6287	0.0313	0.0820	0.0011	0.0255	0.0009	449	87	495	20	508	7	510	17
3	726	1785	3978	0.45	0.0598	0.0037	0.6986	0.0426	0.0847	0.0009	0.0262	0.0003	597	138	538	25	524	5	522	5
6	74	297	606	0.49	0.0543	0.0015	0.6105	0.0179	0.0813	0.0010	0.0250	0.0006	383	44	484	11	504	6	500	12
11	126	420	947	0.44	0.0596	0.0016	0.7258	0.0212	0.0887	0.0016	0.0299	0.0009	590	33	554	12	548	10	596	17
13	49	163	412	0.40	0.0532	0.0023	0.6233	0.0270	0.0854	0.0010	0.0248	0.0006	335	77	492	17	528	6	496	12
14	59	185	521	0.36	0.0611	0.0017	0.6828	0.0192	0.0812	0.0008	0.0257	0.0006	641	43	528	12	504	5	512	11
16	50	143	368	0.39	0.0590	0.0029	0.6573	0.0317	0.0808	0.0009	0.0250	0.0002	567	110	513	19	501	5	499	4
19	210	714	1545	0.46	0.0583	0.0011	0.7130	0.0140	0.0887	0.0009	0.0292	0.0006	541	25	547	8	548	6	582	11
20	208	782	1452	0.54	0.0569	0.0011	0.6928	0.0138	0.0881	0.0007	0.0272	0.0004	488	30	534	8	544	4	543	9
23	786	2346	6115	0.38	0.0622	0.0012	0.7657	0.0178	0.0887	0.0013	0.0307	0.0007	680	27	577	10	548	7	612	13
24	56	130	521	0.25	0.0583	0.0018	0.6627	0.0200	0.0826	0.0009	0.0277	0.0007	542	47	516	12	512	5	552	14
25	1345	3732	10374	0.36	0.0590	0.0012	0.7232	0.0162	0.0884	0.0010	0.0315	0.0007	567	30	533	10	546	6	626	14
27	64	191	481	0.40	0.0578	0.0032	0.6448	0.0342	0.0810	0.0011	0.0251	0.0003	520	123	505	21	502	6	501	5
28	63	211	509	0.41	0.0573	0.0017	0.6484	0.0185	0.0823	0.0009	0.0256	0.0005	503	44	508	11	510	5	510	10
29	408	1090	2886	0.38	0.0615	0.0028	0.7490	0.0495	0.0864	0.0009	0.0332	0.0047	656	125	568	29	534	5	661	91

注: Pb* 代表放射成因铅

标准化微量元素蛛网图显示出类似 E-MORB 的微量元素地球化学特征,大离子亲石元素 Ba 和 U 相对富集,而高场强元素 Nb、Ta、Zr、Ti 基本不显示异常。绝大多数微量元素丰度略高于 E-MORB,同时又低于 OIB。类似的岩石地球化学特征在北祁连蛇绿(混杂)岩南带内的其他蛇绿岩也有报道。例如,夏林圻等^[48,51]先后发现,川刺沟、玉石沟(图 4-b)和扎马什东沟蛇绿岩中的基性火山岩在洋中脊玄武岩标准化或原始地幔标准化微量元素蛛网图中,均显示与 E-MORB 相似的配分型式。由于查巴峡蛇绿岩中的基性岩墙和变质基性熔岩均不同程度发生变质和蚀变,烧失量较高,故本文只应用具有较高稳定性的微量元素进行构造环境判别。在 3Tb-Th-2Ta 图解^[52](图 6-a)和 Y/15-La/10-Nb/8 图解^[53](图 6-b)中,样品点多位于 E-MORB 与大陆碱性玄武岩的重叠区域,个别投入大陆碱性玄武岩。

目前关于 E-MORB 的成因较流行的观点认为, E-MORB 不是独立的组分,而是富集的地幔柱与亏损的地幔组分不同程度混合的产物。王金荣等^[54]利用 PetDB 数据库 5 万多个洋中脊玄武岩数据进行投图,结果表明, E-MORB 可以由上地幔部分熔融直接形成,并非完全由 N-MORB 与 OIB 混合形成,洋脊玄武岩的源区成分可由亏损向富集过渡,部分甚至可与 OIB 源区类比。洋脊下地幔不均一性要比早先认识的更复杂,成分范围变化更大,仅少数强烈亏损的,部分可能相当富集,甚至可以与 OIB 源区类比。夏林圻等^[48]对川刺沟基性火山岩

之下的含金云母斜辉橄橄榄岩进行研究后认为,其经受了地幔交代富集作用,证明北祁连山早古生代洋壳火山岩的源区属富集地幔。侯青叶等^[13]对玉石沟蛇绿岩研究后发现,玄武岩不显示典型洋中脊玄武岩所具有明显亏损 LREE 的球粒陨石标准化稀土元素配分模式,同时地幔橄橄榄岩也富集 LREE,该蛇绿岩中的枕状玄武岩岩浆起源于软流圈地幔,但也有一定数量的深部地幔物质或地幔柱物质的加入。对比前人研究成果,笔者认为,查巴峡蛇绿岩岩浆起源于有少量富集地幔物质混入的亏损地幔源区,可能形成于扩张洋脊构造环境。

查巴峡蛇绿混杂岩反映的早寒武世扩张构造环境在北祁连蛇绿岩南带的其他蛇绿混杂岩中也有反映。与查巴峡蛇绿混杂岩中蚀变辉长岩近同时代形成的有南带西段熬油沟辉长岩^[6-8,49]、玉石沟-川刺沟辉长岩^[12,14-16]和南带中段祁连县附近的东草河辉长岩^[19],这些辉长岩的形成表明此次岩浆活动范围较大,可能为一次区域性的扩张事件,是北祁连造山带早期洋盆扩张的产物。而史仁灯等^[12]获得祁连县西北部玉石沟辉长岩形成于 550 ± 17 Ma, 可能代表初期洋盆扩张的产物。

5.3 构造意义

本文对查巴峡蛇绿混杂岩的岩石地球化学和年代学研究结果表明,该蛇绿混杂岩形成于早寒武世北祁连洋盆的扩张事件。查巴峡蛇绿混杂岩与熬油沟、玉石沟-川刺沟、油葫芦沟、东草河、东沟、大坂山、水洞峡等蛇绿(混杂)岩一起构成北祁连蛇

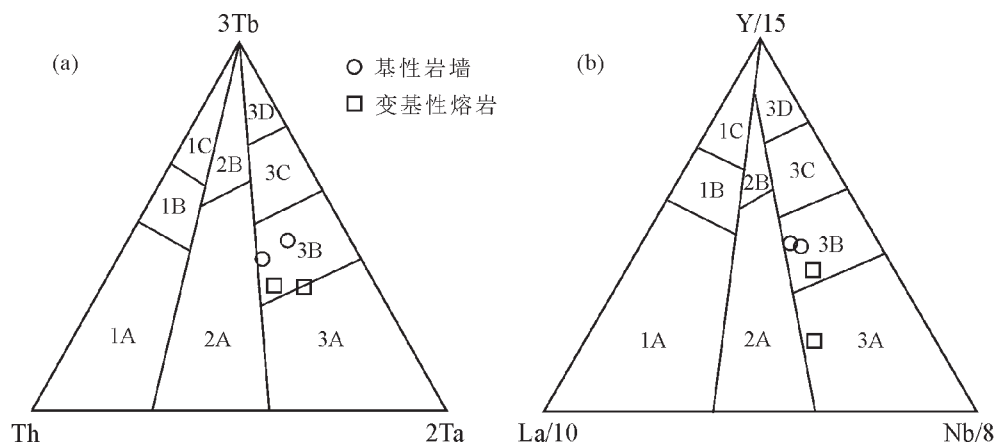


图 6 查巴峡蛇绿岩构造环境判别图解

Fig. 6 Tectonic discrimination diagrams for ophiolite in Chabaxia area

1A—火山弧钙碱性玄武岩;1B—1A 与 1C 的重叠区域;1C—火山弧拉斑玄武岩;2A—大陆拉斑玄武岩;2B—弧后盆地玄武岩;
3A—大陆碱性玄武岩;3B—3A 与 3C 的重叠区域;3C—富集型洋中脊玄武岩;3D—正常洋中脊玄武岩

绿岩南带大洋扩张脊型(MOR)蛇绿岩。查巴峡蛇绿混杂岩的确定,说明北祁连造山带蛇绿岩南带向南东方向的延伸可达大坂山—查巴峡—水洞峡一带,从而扩大了北祁连造山带早期洋盆向南东方向的分布范围,同时在一定程度上弥补了前人对大坂山和水洞峡蛇绿岩研究的不足。

6 结 论

(1)查巴峡蛇绿混杂岩带的物质组成复杂,构造岩块包括变质橄榄岩、基性岩墙、变质基性熔岩、中性侵入岩、变质中基性火山岩和外来地层。

(2)蚀变辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $522.6 \pm 9.7\text{Ma}$, 代表查巴峡蛇绿混杂岩的形成时代为早寒武世。

(3)查巴峡蛇绿混杂岩基性岩墙和变质基性熔岩具有类似 E-MORB 的地球化学特征,其岩浆起源于有少量富集地幔物质混入的亏损地幔源区,可能形成于洋中脊环境。

(4)查巴峡蛇绿混杂岩与熬油沟、玉石沟—川刺沟、油葫芦沟、东草河、东沟、大坂山、水洞峡等蛇绿岩一起构成北祁连蛇绿岩南带大洋扩张脊型(MOR)蛇绿岩,从而扩大了北祁连造山带早期洋盆向南东方向的分布范围。

致谢:陕西省矿产地质调查中心边小卫、张拴厚教授级高工,陕西省水工环地质调查中心李新林教授级高工,杜少喜、杨克俭高级工程师和中国地质调查局西安地质调查中心校培喜教授级高工对项目野外调查和室内研究工作给予热情指导;岩石显微镜下照片由陕西省地质调查规划中心郑婧工程师完成;审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见,在此一并表示感谢。

参考文献

[1]冯益民,何世平.祁连山大地构造与造山作用[M].北京:地质出版社,1996:12-110.
 [2]左国朝,张淑玲,程建生,等.祁连地区蛇绿岩带划分及其构造意义[C]//蛇绿岩与地球动力学研讨会论文集.北京:地质出版社,1996:129-133.
 [3]张旗,孙晓猛,周德进,等.北祁连蛇绿岩的特征、形成环境及其构造意义[J].地球科学进展,1997,12(4):366-385.
 [4]Pearce J A, Lippard S J, Roberts S. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites[C]//Kokelaar B P, Howells M F. Marginal Basin Geology: Volcanic and Associated Sedimentary and Tectonic Processes in Modern and Ancient

Marginal Basins. Geological Society of London Special Publication, 1984, 16: 77-94.
 [5]张招崇,毛景文,杨健民,等.北祁连熬油沟蛇绿岩岩石成因的地球化学证据[J].地质学报,1998,72(1):42-50.
 [6]相振群,陆松年,李怀坤,等.北祁连西段熬油沟辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义[J].地质通报,2007,26(12):1686-1691.
 [7]夏小洪,孙楠,宋述光,等.北祁连西段熬油沟—二只哈拉达坂蛇绿岩的形成环境和时代[J].北京大学学报(自然科学版),2012,48(5):757-767.
 [8]闫巧娟.甘肃省肃南县熬油沟火山岩地质地球化学和年代学研究[D].长安大学硕士学位论文,2014.
 [9]王建军.北祁连西段祁青构造混杂岩中的单颗粒锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].甘肃地质,2014,23(3):9-14.
 [10]冯益民,何世平.北祁连蛇绿岩的地质地球化学研究[J].岩石学报,1995,11(增刊):125-146.
 [11]夏林圻,夏祖春,任有祥,等.祁连山及邻区火山作用与成矿[M].北京:地质出版社,1998:4-55.
 [12]史仁灯,杨经绥,吴才来,等.北祁连玉石沟蛇绿岩形成于晚震旦世的 SHRIMP 年龄证据[J].地质学报,2004,78(5):649-657.
 [13]侯青叶,赵志丹,张宏飞,等.北祁连玉石沟蛇绿岩印度洋 MORB 型同位素组成特征及其地质意义[J].中国科学(D辑),2005,35(8):710-719.
 [14]Song S G, Niu Y L, Su L, et al. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China[J]. Gondwana Res., 2013, 23: 1378-1401.
 [15]剡晓旭.青海省玉石沟蛇绿岩套岩石学、年代学特征及其构造意义[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2014.
 [16]韩晓阳.北祁连玉石沟蛇绿混杂岩的组成、时代及成因[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2015.
 [17]李冰,张耀玲,王超群,等.北祁连缝合带油葫芦沟玄武岩地球化学特征[J].地质力学学报,2016,22(1):48-52.
 [18]武鹏,李向民,徐学义,等.北祁连山扎麻什地区东沟蛇绿岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地球化学特征[J].地质通报,2012,31(6):876-906.
 [19]曾建元,杨怀仁,杨宏仪,等.北祁连东草河蛇绿岩:一个早古生代的洋壳残片[J].科学通报,2007,52(7):825-835.
 [20]许荣科,柴世泽,梁积伟,等.青海祁连县大红沟蛇绿混杂岩特征及形成机制[J].华南地质与矿产,2001,4:28-35.
 [21]郭通珍,陈方本,赵凤清.大坂山蛇绿岩特征及其形成环境[J].青海地质,1999,2:14-24.
 [22]黄增保,张有奎,吕菊蕊,等.北祁连水洞峡蛇绿岩地球化学特征及构造环境[J].甘肃地质,2010,19(21):1-7.
 [23]宋泰忠,刘建栋,李杰,等.北祁连柏木峡地区辉长岩、玄武岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J].西北地质,2016,49(4):32-42.
 [24]边鹏,沙鑫,马骊,等.北祁连西段卡瓦蛇绿岩的发现及其构造意义[J].兰州大学学报(自然科学版),2016,51(1):142-143.
 [25]龚全胜.肃南塔洞沟早奥陶世蛇绿岩的成因和侵入[J].甘肃地质学报,1997,6(1):25-35.
 [26]钱青,孙晓猛,张旗.北祁连九个泉蛇绿岩及其上覆岩系的岩石

- 地球化学特征和地球动力学意义[J]. 地质论评, 1999, 45(增刊): 1038-1045.
- [27] 钱青, 张旗, 孙晓猛. 北祁连九个泉玄武岩的形成环境及地幔源区特征: 微量元素和 Nd 同位素地球化学制约[J]. 岩石学报, 2001, 17(3): 385-392.
- [28] 夏小洪, 宋述光. 北祁连山南九个泉蛇绿岩形成年龄和构造环境[J]. 科学通报, 2010, 55(15): 1465-1473.
- [29] 贾秀琴, 韩松, 周德进, 等. 北祁连大盆大坂蛇绿岩 REE 和 Sr-Nd 同位素地球化学[J]. 地球学报, 1997, 18(增刊): 55-57.
- [30] 张旗, Chen Yu, 周德进. 北祁连大盆大坂蛇绿岩的地球化学特征及其成因[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(1): 30-34.
- [31] 韩松, 贾秀琴, 钱青, 等. 北祁连大盆大坂两类辉长岩的地质地球化学特征及其构造环境[J]. 岩石矿物学杂志, 2000, 19(2): 106-111.
- [32] 孟繁聪, 张建新, 郭春满, 等. 大盆大坂 MOR 型和 SSZ 型蛇绿岩对北祁连洋演化的制约[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(5): 453-463.
- [33] 张翔, 张本旗, 芦青山, 等. 北祁连直河蛇绿岩的地质和地球化学特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2007, 43(3): 8-11.
- [34] 董想平, 杜占美, 管波, 等. 青海直河蛇绿岩地质特征及找矿前景[J]. 矿产勘查, 2010, 1(5): 463-467.
- [35] 罗增智. 北祁连冷龙岭蛇绿岩地质地球化学特征及构造意义[J]. 西北地质, 2015, 48(1): 47-53.
- [36] 汪双双, 刘明强, 柳益群, 等. 北祁连乌鞘岭蛇绿混杂岩地球化学特征及其构造环境[J]. 地质与勘探, 2012, 48(5): 1000-1006.
- [37] 何世平, 冯益明. 老虎山蛇绿岩的特征及其形成环境[C]//蛇绿岩与地球动力学研讨会论文集. 北京: 地质出版社, 1996: 143-145.
- [38] 张旗, 王岳明, 钱青, 等. 甘肃景泰县老虎山地区蛇绿岩及其上覆岩系中枕状熔岩的地球化学特征[J]. 岩石学报, 1997, 13(1): 92-99.
- [39] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004, 33(5): 459-464.
- [40] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]// Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publication, 1989, 42(2): 313-345.
- [41] Coleman R G. Ophiolite: Ancient oceanic lithosphere?[M]. Berlin: Springer Verlag, 1977: 1-229.
- [42] Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. Journal of Petrology, 1986, 27: 745-750.
- [43] Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1971, 8: 523-548.
- [44] Wilson M. Igneous Petrogenesis[M]. London: Unwin Hyman, 1989: 1-466.
- [45] Salters V J M, Stracke A. Composition of the depleted mantle[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2004, 5: Q05004, doi: 10.1029/2003GC000597.
- [46] 王希斌, 鲍佩声, 戎合. 中国蛇绿岩中变质橄榄岩的稀土地球化学[J]. 岩石学报, 1995, 11(增刊): 24-41.
- [47] Wood D A, Joron J L, Treuil M. A re-appraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic setting[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1979, 45: 326-336.
- [48] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山海相火山岩岩石成因[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 52-73.
- [49] 陆松年, 于海峰, 李怀坤, 等. “中央造山带”早古生代缝合带及构造分区概述[J]. 地质通报, 2006, 25(12): 1368-1379.
- [50] 张旗, 张魁武, 李达周. 横断山区镁铁-超镁铁岩石[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 9-100.
- [51] 夏林圻, 李向民, 余吉远, 等. 祁连山新元古代中-晚期至早古生代火山作用与构造演化[J]. 中国地质, 2016, 43(4): 1087-1138.
- [52] Cabanis B, Thieblemont D. Discrimination of continental tholeiites and back-arc basin basalts using a Th-Tb-Ta diagram[J]. Chemical Geology, 1988, 70(1/2): 5.
- [53] Cabanis B. Le diagramme La /10-Y/15-Nb /8: Un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de melange et /ou de contamination crustale[J]. Comptes Rendus de l'Academie des Sciences (Serie 2), 1989, 309: 2023-2029.
- [54] 王金荣, 陈万峰, 张旗, 等. N-MORB 和 E-MORB 数据挖掘——玄武岩判别图及洋中脊源区地幔性质的讨论[J]. 岩石学报, 2017, 33(3): 993-1003.
- ① 拜永山, 王秉章, 王永文, 等. 1:25 万门源县幅区域地质调查报告. 青海省地质调查院, 2007.
- ② 刘凯, 韩奎, 赵焕强, 等. 青海省大通县宝库地区三幅 1:5 万区域地质矿产调查报告. 陕西省地质调查院, 2016.