

doi: 10.12029/gc20200416002

张金明, 陈光庭, 才航加, 田成秀, 雷晓清. 2023. 青海扎巧合蛇绿混杂岩中辉长岩地球化学、锆石 U-Pb 年龄及对洋脊环境的限定[J]. 中国地质, 50(6): 1837-1847.

Zhang Jinming, Chen Guangting, Cai Hangjia, Tian Chengxiu, Lei Xiaoqing. 2023. Geochemical characteristics and zircon U-Pb age of gabbros in the Zhaqiaohe ophiolite mélange, and its limitation on the ocean ridge environment[J]. *Geology in China*, 50(6): 1837-1847(in Chinese with English abstract).

青海扎巧合蛇绿混杂岩中辉长岩地球化学、 锆石 U-Pb 年龄及对洋脊环境的限定

张金明, 陈光庭, 才航加, 田成秀, 雷晓清

(青海省地质调查院/青海省青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室, 青海 西宁 810012)

摘要:【研究目的】扎巧合蛇绿岩处于中祁连和南祁连构造带的结合部位, 带内蛇绿岩组分由蛇纹岩、蛇纹石化辉橄岩、辉长岩、辉绿岩、块层状蚀变玄武岩, 少量枕状玄武岩、透镜状硅质岩等组成, 为拉脊山蛇绿混杂岩带在青海省内的西延部分。【研究方法】本文对扎巧合蛇绿岩中的辉长岩进行了年代学、岩石地球化学研究。【研究结果】辉长岩以主化学成分 SiO_2 、 Na_2O 、 K_2O 、 $(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})$ 及 MgO 等的特征判断, 为拉斑系列的辉长岩。从其 REE 分布模式看, 钕无异常或弱负异常, 说明岩石在熔融过程中经历了斜长石的分离结晶作用, 稀土配分曲线为一条近似平直曲线; 微量元素具明显的 Ta 和 Sr 正异常特征, 表明本区蛇绿岩中辉长岩具有与 E-MORB 类似的特征。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果显示辉长岩结晶年龄为 $(524.0 \pm 2.5)\text{Ma}$ 。【结论】这些辉长岩起源于未发生大规模熔融的初始地幔, 认为扎巧合蛇绿岩可能形成于古洋盆初始裂解阶段的洋脊环境。

关键词: 蛇绿岩; 辉长岩; 锆石 U-Pb 年龄; E-MORB; 中祁连山; 地质调查工程; 扎巧合; 青海省

创 新 点: 扎巧合蛇绿混杂岩带为拉脊山蛇绿混杂岩带在青海省内的西延部分, 带内蚀变辉长岩的形成年龄为 $(524.0 \pm 2.5)\text{Ma}$, 为 MOR 型蛇绿岩, 形成于古洋盆初始裂解阶段的洋脊环境。

中图分类号: P597; P588.12¹; P588.124 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)06-1837-11

Geochemical characteristics and zircon U-Pb age of gabbros in the Zhaqiaohe ophiolite mélange, and its limitation on the ocean ridge environment

ZHANG Jinming, CHEN Guangting, CAI Hangjia, TIAN Chengxiu, LEI Xiaoqing

(*Qinghai Institute of Geological Survey/Qinghai Province Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources of Northern Qinghai-Tibet Plateau, Xining 810012, Qinghai, China*)

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

[Objective] Zhaqiaohe ophiolite is located at the junction of the Middle Qilian and South Qilian tectonic belt. The ophiolite in the

收稿日期: 2020-04-16; 改回日期: 2020-06-02

基金项目: 青海学者专项(QHS201802)和青海省天峻县苏里地区五幅 1:5 万区域地质调查(1212011140088) 联合资助。

作者简介: 张金明, 男, 1982 年生, 硕士, 高级工程师, 矿物学和岩石学专业; E-mail: 271883992@qq.com。

belt is composed of serpentinite, serpentinized pyroxene peridotite, gabbro, diabase, block bedded altered basalt, a small amount of pillow basalt and lenticular silicite. It is the west extension of the Lachishan ophiolite melange belt in Qinghai Province. **[Methods]** In this paper, the study on the chronology and petrogeochemistry of gabbro in Zhaqiaohe ophiolite has been carried out. **[Results]** According to the characteristic judgment of the main chemical components of the gabbro, such as SiO_2 , Na_2O , K_2O , $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$ and MgO , the gabbro is tholeiitic series, belonging to tholeiite. According to the REE distribution pattern, there is no Eu anomaly or weak negative anomaly, indicating that the rock experienced the separation and crystallization of plagioclase in the melting process, and the REE distribution curve is approximately flat; the trace elements have obvious Ta and Sr positive anomaly characteristics, indicating that gabbro in ophiolite in this area has similar characteristics with E-MORB. The results of LA-ICP-MS zircon U-Pb dating show that the gabbro crystallization age is (524.0 ± 2.5) Ma. **[Conclusions]** It is suggested that these gabbros originated from the initial slowness without large-scale melting. It is suggested that the Zhaqiaohe ophiolite may have formed in the oceanic ridge environment during the initial cracking stage of the paleo ocean basin.

Key words: ophiolite belt; gabbro; zircon U-Pb dating; E-MORB; Central Qilian; geological survey engineering; Zhaqiaohe; Qinghai Province

Highlights: Zhaqiaohe ophiolitic melange belt is the western extension of Lachishan ophiolitic melange belt in Qinghai Province. The altered gabbro in this belt, with an age of (524.0 ± 2.5) Ma, is an MOR-type ophiolite formed in the ocean ridge environment during the initial pyrolysis stage of the ancient ocean basin.

About the first author: ZHANG Jinming, male, born in 1982, master, senior engineer, majors in mineralogy and petrology; E-mail: 271883992@qq.com.

Fund support: Supported by the Qinghai Scholars Project (No.QHS201802) and the 1:50000 Regional Geological Survey of Suli Area, Tianjun County, Qinghai Province (No.1212011140088).

1 引 言

祁连造山带位于青藏高原的北缘,是原特提斯洋闭合过程中阿拉善和柴达木地块拼合的产物,从北到南划分为:北祁连、中祁连和南祁连3个构造单元(冯益民等,2002)(图1)。祁连造山带中存在多条蛇绿混杂岩带(李春昱等,1978;肖序常等,1978;许志琴等,1994;张建新等,1995;邱家骧等,1997; Tseng et al., 2007; 张雪亭和杨生德, 2007; Xiao et al., 2009; 闫臻等, 2012; 付长垒等, 2014)。蛇绿岩是大陆造山带中残存的古大洋岩石圈残片,记录了大洋岩石圈的岩浆演化、变质作用、构造过程,提供了有关古洋盆形成、发展和消亡等方面的重要信息(Coleman, 1977; Nicolas, 1989)。在以往的地质研究中,研究区内从未发现有蛇绿岩特征的残片。近来,随着新一轮地质调查的展开,通过1:5万区调工作在研究区发现了具蛇绿岩特征的超镁铁-镁铁岩带,以逆冲剪切构造分布在前人划分的新元古代绿片岩相变质地层中,走向上被上古生界、中生界覆盖;通过调查认为扎巧合蛇绿混杂岩空间上整体呈构造块体分布于拉脊山蛇绿混杂岩带内,为拉脊

山蛇绿岩带在青海省内的西延部分,是中祁连和南祁连构造带之间蛇绿混杂带的组成部分。拉脊山蛇绿混杂岩的形成环境一直存在较大争议,有形成于裂隙槽或裂谷环境(左国朝等,1996;邱家骧等,1997)、洋岛环境(夏林圻等,1991;侯青叶等,2005)、多阶段抬升构造窗(王二七等,2000),研究拉脊山蛇绿混杂岩的形成时间构造背景对祁连造山带演化具有重要地质意义。

本文在对扎巧合蛇绿混杂岩的空间展布特征研究基础上,对蛇绿混杂岩中的辉长岩进行了岩石学、地球化学分析研究和LA-ICP-MS锆石U-Pb测年,探讨扎巧合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祁连洋盆空间分布和祁连造山带构造演化过程的认识,对构建祁连早古生代板块构造格局具有十分重要的理论意义。

2 地质背景及岩石特征

2.1 地质背景

研究区位于青海省天峻县苏里乡以西的扎巧合地区,大地构造位于中祁连和南祁连两大构造单元的结合部。中祁连和南祁连是具有前寒武纪结

晶基底的地块,称为祁连地块,在中一新元古代处于相对稳定的构造演化环境,自早古生代发生了强烈的构造岩浆活动,形成有与洋壳俯冲有关的岛弧岩浆组合和碰撞及后碰撞的岩浆岩以及弧后盆地闭合的岩石组合(李建锋等,2010;王金荣等,2012;赵文津等,2014;陈宣华等,2019)。研究区内地层出露较为齐全有:青白口系五个山组为一套中—浅变质的碎屑岩、碳酸盐岩组合;上寒武统六道沟组为一套以中性火山碎屑岩为主夹火山熔岩的岩石组合;下奥陶统吾力沟组以玄武岩、玄武安山岩、火山碎屑岩为主夹少量碎屑岩;石炭系臭牛沟组和羊

虎沟组为一套海相碎屑岩、碳酸盐岩沉积组合;二叠系—三叠系为一套连续的海陆交互沉积组合,由勒门沟组、草地沟组、哈吉尔组、忠什公组、切尔玛沟组组成。区内构造发育,以北西向断裂为主构成研究区的基本构造格架,控制本区岩浆活动、沉积建造。侵入岩少量分布,仅见少量辉绿岩呈岩脉状或岩墙状产出,侵位于元古代地层中。

扎巧合蛇绿混杂岩带呈北西—南东向带状展布,西侧最宽处约2.5 km 向东逐渐尖灭,延伸长7.3 km,北侧与青白口系五个山组呈断层接触,南侧与下奥陶统吾力沟组组成的火山弧呈断层相接,西侧

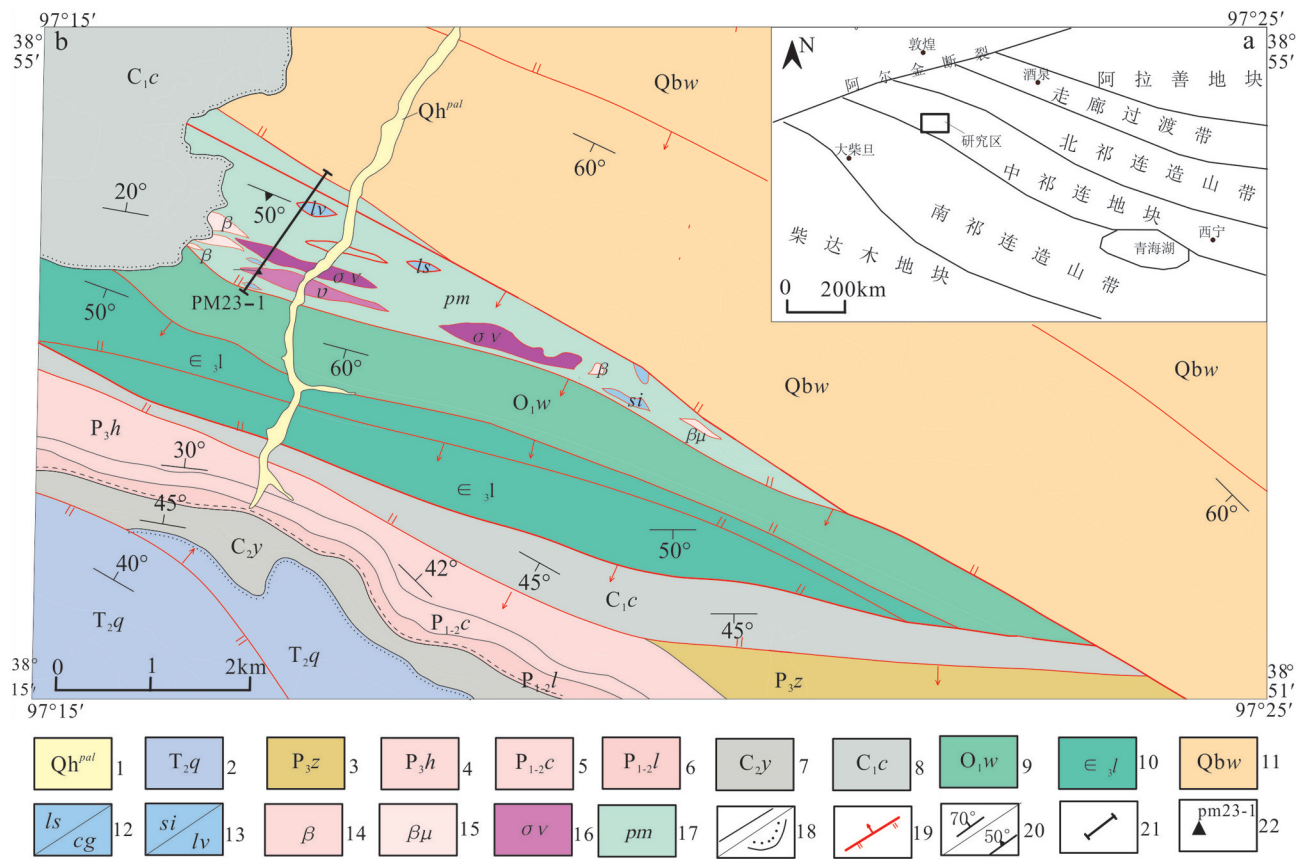


图1 扎巧合地区大地构造位置图(a)和地质简图(b)

1—全新世冲洪积;2—中三叠统切尔玛沟组;3—上二叠统忠什公组;4—上三叠统哈吉尔组;5—下—中二叠统草地沟组;6—下—中二叠统勒门沟组;7—上石炭统羊虎沟组;8—下石炭统臭牛沟组;9—下奥陶统吾力沟组;10—上寒武统六道沟组;11—青白口系五个山组;12—灰岩岩块/砾岩岩块;13—硅质岩岩块/凝灰岩岩块;14—玄武岩岩块;15—辉绿岩岩块;16—辉长岩岩块;17—千糜岩;18—整合/不整合界线;19—断层界线;20—层理/面理;21—剖面位置;22—采样位置及编号

Fig.1 Tectonic location map (a) and regional tectonic map of Zhaqiaohe area (b)

1—Holocene alluvium; 2—Middle Triassic Chermagou Formation; 3—Late Permian Zhongshigong Formation; 4—Late Triassic Hajir Formation; 5—Early and Middle Permian Caodigou Formation; 6—Early and Middle Permian Lemengou Formation; 7—Late Carboniferous Yanghugou Formation; 8—Early Carboniferous Chouniugou Formation; 9— Early Ordovician Wuligou Formation; 10—Late Cambrian Liudaogou Formation; 11—Qingbaikouji Wugesan Formation; 12— Limestone blocks/conglomerate blocks; 13—Siliceous rock block/tuff rock block; 14—Basalt blocks; 15—Diabase blocks; 16—Gabbro rocks; 17—Phyllite; 18— Conformity/unconformity boundary; 19—Fault boundaries; 20—Bedding/foliation; 21—Profile position; 22—Sampling location and number

被下石炭统臭牛沟组超伏掩盖(图1)。混杂岩带内不同成因的地质体呈大小不等构造块或构造透镜形态产出;构造块体之间由断层或韧性剪切带或强劈理化带分隔,整体上构成了网状结构。综合野外调查资料,混杂带内岩块由蛇纹岩、蛇纹石化辉橄岩、辉长岩、块层状蚀变玄武岩,少量枕状玄武岩、透镜状硅质岩、复成分砾岩和发育浊积构造的碎屑岩等组成,基质主要为千糜棱岩,构造变形主要显示NW—NWW向展布的自北而南多层次多期次叠瓦状复合逆冲推覆构造。

2.2 岩石学特征

蛇绿岩岩石组合包括辉橄岩、辉长岩、玄武岩、硅质岩等,各蛇绿岩组分之间为断层接触或被混杂岩带基质(千糜岩)分隔(图2a)。辉橄岩在整个蛇绿混杂岩中所占比例较小,通常与辉长岩相伴产出,单体规模较小,而且大部分岩石蛇纹石化强烈,原岩的矿物成分、结构等特征肉眼已经无法辨别;辉长岩大都呈块状,局部可见堆晶结构和弱片麻状构造,岩石表面常见不同方向的擦痕,说明后期发生过多构造运动(图2b);辉绿岩为块状,发育典型辉绿结构;玄武岩出露面积相对较大,局部见枕状构造,岩枕大小在40 cm左右,岩石普遍发生强蚀变,局部碎裂化;硅质岩多呈零星透镜状、小构造块体产出,为深海产物。本文对扎巧合蛇绿岩中的

辉长岩进行了年代学、岩石地球化学研究;辉长岩岩性特征描述如下:

灰色条带状糜棱岩化辉长岩:岩石为糜棱结构,条带状构造。由条带状碎斑和碎基组成。碎斑成分为斜长石含量30%,呈条带状,条带宽1~2 mm,具定向排列,长轴方向与岩石构造方向一致,在岩石中分布均匀。碎基由暗色矿物组成,具绿泥石化蚀变。受压力作用,岩石破碎。岩石中发育各种不协调剪切褶皱,“σ”碎斑,显示左形特征,以及石香肠构造,岩石中发育强弱变形域,弱变形域中岩石呈透镜状,原岩特征较为完整。

辉长岩质糜棱岩,糜棱结构,流动构造。由碎斑和基质组成。碎斑成分为辉石。碎斑形态呈边界光滑的串珠状,不规则状,透镜状,长短轴大小在1.08 mm×0.41 mm~5.67 mm×2.37 mm,长轴排列方向一致,显示良好的定向性。辉石发育硬矿物内斜列剪切微裂隙,不规则块状消光等应变结构,沿破裂缝具绿泥石化现象。基质由原岩碎粒化物质,重结晶绢云母,绿泥石,隐晶状长英质,石英组成。它们的集合体在碎斑间或绕过碎斑定向排列分布,显示良好的流动构造。原岩碎细物质具强烈的帘石化蚀变,主要成分为斜长石,部分碎粒物质中显钠长石聚片双晶。绢云母呈细小鳞片状变晶,局部形成绢云母“鱼状”集合体。绿泥石片状,显多色异常干涉色,隐晶状

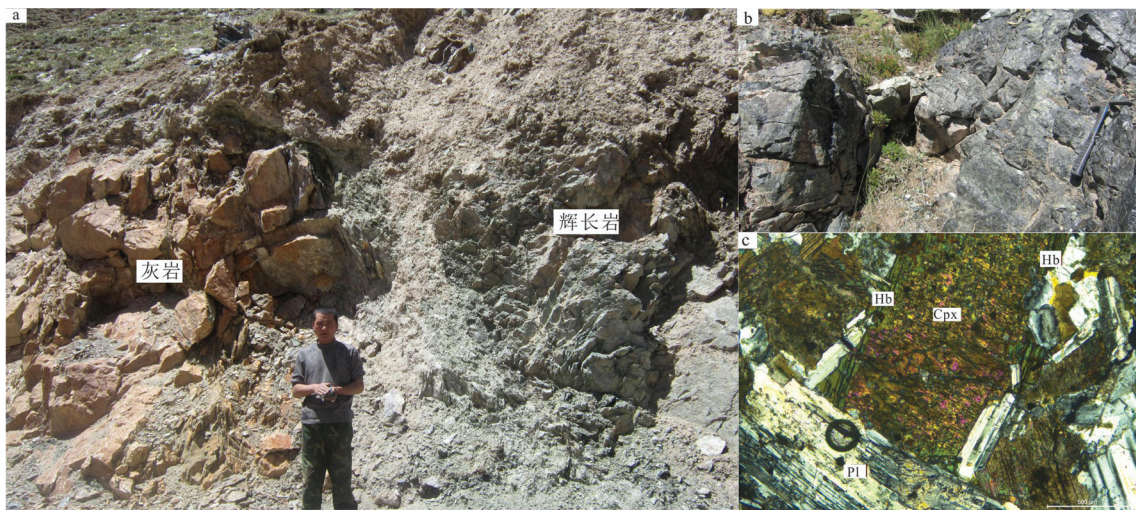


图2 扎巧合辉长岩野外露头及镜下照片

a—混杂岩产出特征;b—蚀变辉长岩露头;c—蚀变辉长岩显微照片;P1—斜长石;Cpx—单斜辉石;Hb—普通角闪石

Fig.2 Field and microscopic features of the Zhaqiaohe gabbro

a—Melange production characteristics; B—Altered gabbro outcrop; C—Altered gabbro micrograph; P1—Plagioclase; Cpx—Clinopyroxene; Hb—Hornblende

长英质不均匀定向分布在其他矿物间。石英呈细小粒状集合体,大小在0.13~0.26 mm。碎斑46%:辉石46%。基质54%:原岩碎细物质34%、绢云母4%、绿泥石3%、隐晶状长英质11%、石英2%(图2c)。

3 测试方法

3.1 地球化学分析测试

对蚀变辉长岩样品分别进行了主量元素、微量及稀土元素测试,测试均在湖北省地质实验测试中心完成,主元素分析测试采用X荧光光谱法(XRF)完成,分析仪器是菲利普PW2440型波长色散X-射线荧光光谱仪,精度为2%~3%。微量及稀土元素采用等离子体质谱法(ICP-MS)和等离子体发射光谱法(ICP-OES),测试仪器采用热电公司X2型电感耦合等离子体质谱仪和ICAP7400型电感耦合等离子体原子发射光谱仪。各元素的分析精度按照GSR-1~GSR-12国家标准物质进行12次测量,确定分析方法的准确度和精密度,当元素含量大于 10×10^{-6} 时,其精度优于5%,当元素含量小于 10×10^{-6} 时,精度优于10%。

3.2 锆石 U-Pb 年龄测试

在详细野外地质调查和镜下观察的基础上,选择采集新鲜无脉体贯入的辉长岩样品(PM112U-

Pb23-1)进行测年,采集样品重量约为60 kg。分选是由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,在显微镜下选择具有代表性的锆石制作成样品靶,并用扫描电镜拍摄阴极发光(CL)图像。微区原位U-Pb年龄测定是由天津地质矿产研究所同位素实验室采用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)完成。采用中国地质大学研发的ICPMSDataCal程序和Kenneth R. Ludwig的Isplot程序进行数据处理,采用 ^{208}Pb 对普通铅进行校正。利用NIST612作为外标计算锆石样品的Pb、U、Th含量(李怀坤等,2009)。

4 测试结果

4.1 岩石地球化学特征

在详细的野外调查基础上,采集新鲜的辉长岩进行岩石地球化学分析,样品共计5件,每件样品重约5 kg,具体采样位置见图1,测试结果见表1。

4.1.1 主量元素

辉长岩 SiO_2 含量变化稳定,一般在45.26%~49.90%,平均含量47.54%, K_2O (0.05%~0.41%), TiO_2 (0.36%~1.47%)平均含量为1.03%, Al_2O_3 (13.30%~16.41%)平均含量15.64%, MgO (6.49%~11.13%)平均含量为9.35%, $\text{Mg}^\#$ (61.23~65.75)平均

表1 扎巧合蚀变辉长岩主量元素(%),微量元素(10^{-6})分析结果
Table 1 Major element (%) and trace element (10^{-6}) compositions of the samples from Zhaqiaohe area

样号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	CO_2	H_2O^+	Σ
23-1	47.58	0.41	14.58	1.95	5.23	0.16	11.13	13.51	1.76	0.37	0.04	0.04	3.06	99.82
23-2	47.91	0.36	14.33	2.05	4.97	0.17	11.11	13.68	1.74	0.41	0.03	0.08	2.96	99.80
23-3	47.68	0.38	14.57	2.08	4.97	0.16	10.94	13.76	1.72	0.38	0.04	0.08	3.06	99.82
7-1	47.07	1.11	16.41	3.24	5.78	0.17	7.08	13.53	2.34	0.05	0.12	0.20	2.66	99.76
8-1	45.88	1.47	13.30	3.80	6.60	0.18	6.49	12.81	2.55	0.37	0.18	3.11	2.98	99.72
样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
23-1	4.57	6.97	1.21	5.33	1.38	0.37	1.54	0.29	1.94	0.39	1.15	0.18	1.10	0.19
23-2	11.57	18.06	2.91	11.89	2.46	0.54	2.11	0.37	2.32	0.47	1.29	0.19	1.15	0.20
23-3	3.23	5.96	0.92	4.29	1.23	0.29	1.53	0.27	1.90	0.40	1.16	0.18	1.12	0.17
7-1	9.21	18.63	2.45	10.69	2.92	0.89	3.58	0.66	4.04	0.86	2.34	0.36	2.28	0.32
8-1	11.80	24.73	3.45	15.16	4.25	1.07	5.02	0.92	5.59	1.18	3.29	0.50	2.96	0.42
样号	Sr	Rb	Ba	Th	Ta	Nb	Zr	Hf	P	U	Y	Sc	Ti	K
23-1	147.42	6.15	194.70	1.55	0.95	9.82	98.9	2.8	575	0.25	20.01	53.41	6458	3071
23-2	154.01	6.87	195.30	1.60	0.95	8.19	86.3	2.6	631	0.33	31.44	54.78	7158	3403
23-3	154.90	6.18	189.90	1.44	0.82	8.90	87.9	3.7	575	0.24	29.84	58.69	7278	3154
7-1	197.32	4.32	143.87	1.29	0.93	8.06	67.30	2.44	524	0.26	21.51	45.62	6654	3415
8-1	165.18	5.83	182.90	1.38	1.40	13.77	101.80	3.52	786	0.60	30.73	39.58	8813	3071

值为62.33,具有原始岩浆的特征;辉长岩中CaO含量12.81%~13.76%,平均含量13.46%,含量比较高,Na₂O(1.72%~2.55%),(Na₂O+K₂O)总含量平均值为2.38%。在TAS(图3a)中岩石落入亚碱性玄武岩类区域,在SiO₂-FeO⁷/MgO图解中落入拉斑系列区域(图3b)。

4.1.2 稀土及微量元素特征

辉长岩稀土总量 Σ REE较低,介于 22.95×10^{-6} ~ 80.74×10^{-6} ,平均为 48.33×10^{-6} ,与据Sun and McDonough(1989)给出的E-MORB(49.09×10^{-6})可以对比。 $(La/Yb)_N$ 介于2.07~7.22,LREE/HREE变化于2.41~5.39,轻稀土弱富集; δEu 介于0.97~1.31,大部分岩石显示铕无异常或弱负异常,少部分显示铕弱正异常特征;在球粒陨石标准化图解上显示出弱的轻稀土富集及弱的正Eu异常,为一条近似平直曲线(图4a),具有与E-MORB类似的特征。辉长岩所有岩石样品 $(La/Yb)_N > 1$,反映多数岩石形成于富集地幔源的低度部分熔融和较高程度分离结晶,在原始地幔标准化图解上(图4b),除了明显的Ta和Sr正异常,其余高场强元素(HFSE)总体富集程度与E-MORB相当,明显不同于N-MORB和OIB。

4.2 锆石U-Pb定年

所测样点经校正后的有效数据共23个(表2),测试的锆石(图5)多呈无色透明,金刚光泽,颗粒较为粗大,多在 $50 \mu m \times 100 \mu m$ 左右,通常为自形一半自形,以柱状锆石居多,锆石显示出明显的岩浆锆石

的形态特征,其震荡环带发育,岩浆环带宽窄不一。偶见球粒状锆石具无分带或弱分带结构(1,10,17,18),可能是由于U含量过高,锆石发生蜕晶化而引起结构被破坏。锆石中Pb,U含量分别介于 17×10^{-6} ~ 51×10^{-6} , 181.68×10^{-6} ~ 561.33×10^{-6} 变化范围不大,分析数据后获得23颗锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄加权平均值为 (524.0 ± 2.5) Ma(MSWD=0.43),年龄见图6,为早寒武世,代表了辉长岩的形成年龄。

5 地质意义

5.1 构造环境

对于蛇绿岩的形成环境,有人提出只有少数蛇绿岩是大洋中脊扩张的产物(MOR),多数蛇绿岩形成于板块俯冲消减带之上(SSZ)的构造环境(Pearce et al.,1984)。研究表明,蛇绿岩中的辉长岩是地幔(大洋地幔或大陆地幔)部分熔融后又经历了岩浆结晶分异作用的产物。因此,对蛇绿混杂岩内辉长岩的研究,可为鉴别造山带内蛇绿混杂岩组成特征和蛇绿岩形成构造环境提供直接证据。

扎巧合蛇绿岩中辉长岩为拉斑系列的辉长岩。从其REE分布模式看,铕无异常或弱负异常,说明岩石在熔融过程中经历了斜长石的分离结晶作用,稀土配分曲线为一条近似平直曲线;结合微量元素具明显的Ta和Sr正异常特征,表明本区蛇绿岩中辉长岩具有与E-MORB类似的特征。在Zr-Zr/Y(图7a)和Hf/3-Th-Ta(图7b)构造环境判别图

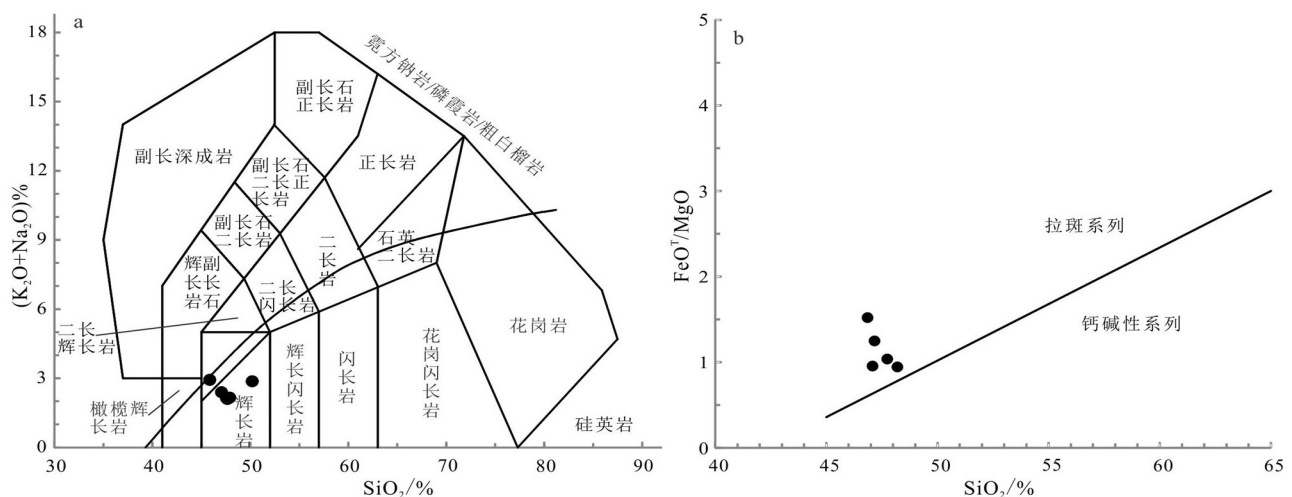


图3 扎巧合蚀变辉长岩TAS图解(a,据Middlemost,1994)和SiO₂-FeO⁷/MgO图解(b,据Miyashiro and Shido,1975)
Fig.3 TAS diagram (a, after Middlemost, 1994) and SiO₂-FeO⁷/MgO diagram (b, after Miyashiro and Shido, 1975) of altered gabbro from Zhaqiaohe area

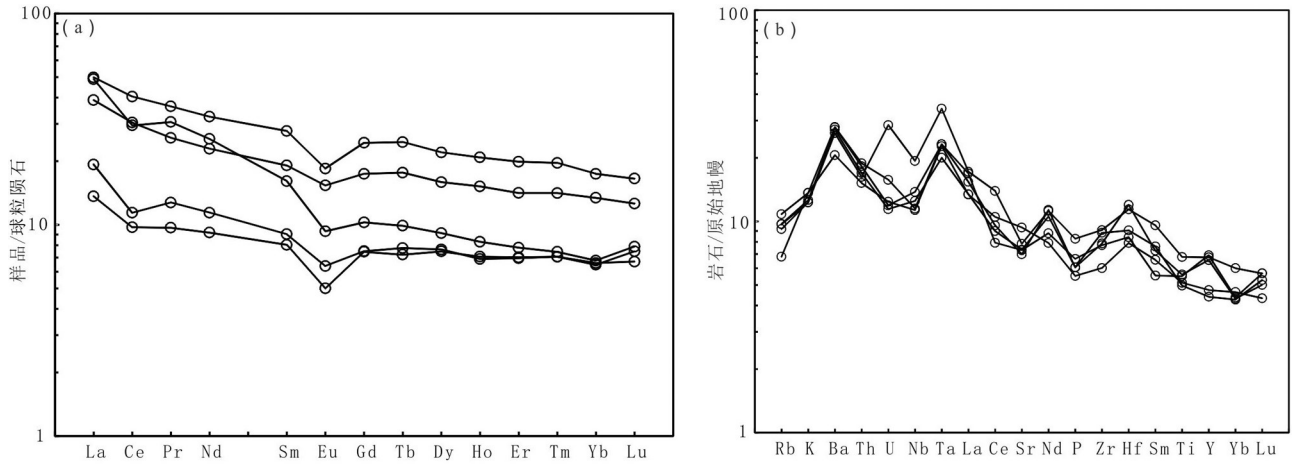


图4 扎巧合蚀变辉长岩的稀土元素配分模式(a)和原始地幔标准化蛛网图解(b)(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)
 Fig.4 Chondrite normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized trace elements patterns (b) of the samples from Zhaqiaohe area (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

表2 扎巧合辉长岩 U-Pb 同位素参数特征
 Table 2 U-Pb isotope parameter determine result of the samples from Zhaqiaohe area

点号	含量/ 10^{-6}			Tu/U	同位素比值				表明年龄/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	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
1	30.88	125.4	327.3	0.38	0.05724	0.00245	0.66890	0.05819	0.08474	0.0021	501	10	520	12	524	19
2	23.53	116.8	257.9	0.45	0.05733	0.00131	0.66921	0.02926	0.08464	0.0018	504	11	520	29	524	93
3	23.01	103.5	248.1	0.42	0.0573	0.00133	0.66966	0.02951	0.08474	0.0018	503	10	521	11	524	19
4	22.34	86.3	240.8	0.36	0.05725	0.00141	0.66767	0.03102	0.08457	0.0019	501	10	519	12	523	20
5	17.82	85.6	175.4	0.49	0.05889	0.00136	0.76597	0.03013	0.09432	0.0018	563	11	577	12	581	22
6	51.51	206.2	561.3	0.37	0.05734	0.00178	0.67221	0.05983	0.08501	0.0029	505	10	522	12	526	20
7	30.08	153.2	320.5	0.48	0.05751	0.00134	0.67173	0.02976	0.08469	0.0018	511	15	522	15	524	20
8	17.84	96.3	196.1	0.49	0.05746	0.00137	0.67151	0.03246	0.08474	0.0020	509	10	522	12	524	20
9	21.25	103.2	233.0	0.44	0.05748	0.00144	0.67233	0.03206	0.08481	0.0018	510	11	522	12	525	22
10	20.59	157.3	227.3	0.69	0.05745	0.00256	0.67279	0.06107	0.08492	0.0020	509	11	522	16	525	57
11	18.44	113.6	204.1	0.56	0.05733	0.00174	0.67062	0.05898	0.08483	0.0028	504	12	521	32	525	98
12	21.77	97.6	237.5	0.41	0.05731	0.00144	0.67319	0.03204	0.08518	0.0018	503	15	523	14	527	18
13	28.22	65.3	304.9	0.21	0.05729	0.00136	0.66866	0.03007	0.08464	0.0019	503	10	520	12	524	19
14	33.30	203.1	362.5	0.56	0.05736	0.00135	0.67143	0.03011	0.08488	0.0018	505	11	522	12	525	21
15	18.44	124.3	203.9	0.61	0.05728	0.00131	0.67344	0.03110	0.08526	0.0020	502	10	523	12	527	19
16	16.74	56.3	181.6	0.31	0.05717	0.00132	0.66997	0.03082	0.08498	0.0020	498	11	521	12	526	20
17	40.83	258.3	436.5	0.59	0.05735	0.00132	0.67319	0.03119	0.08513	0.0020	505	11	523	12	527	20
18	37.60	157.1	397.2	0.40	0.05741	0.00158	0.67089	0.03526	0.08474	0.0018	507	11	521	12	524	20
19	24.30	122.4	266.6	0.46	0.05698	0.00153	0.65170	0.03213	0.08294	0.0021	491	11	510	11	514	21
20	44.23	246.2	470.0	0.52	0.05681	0.00222	0.64642	0.05421	0.08252	0.0013	484	12	506	12	511	19
21	41.87	257.6	467.4	0.55	0.05717	0.00165	0.67134	0.04356	0.08516	0.0014	498	10	522	13	527	32
22	20.75	158.6	230.0	0.69	0.05718	0.00132	0.66974	0.03543	0.08495	0.0015	498	11	521	12	526	22
23	20.85	185.1	224.6	0.82	0.05712	0.00136	0.67071	0.03210	0.08516	0.0020	496	14	521	12	527	20

注:测试单位:天津地质矿产研究所。

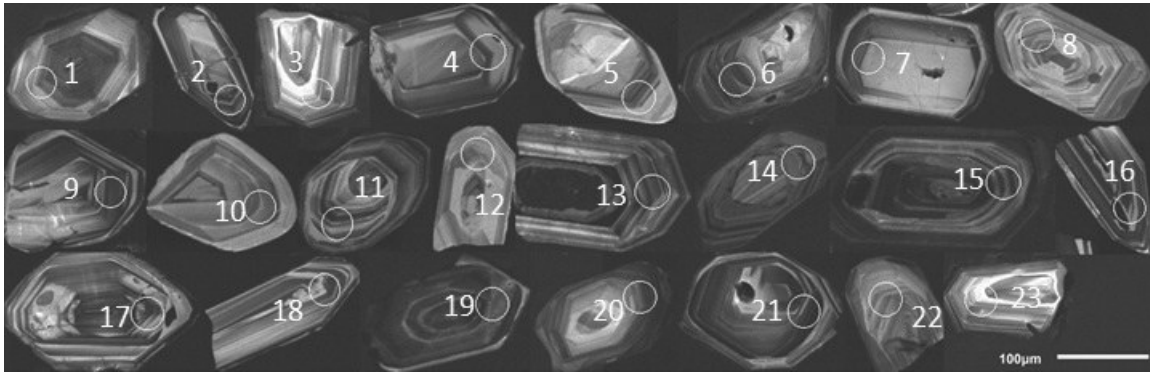


图5 扎巧合地区辉长岩锆石阴极发光图像
Fig.5 CL images of the zircons from Zhaqiaohe area

解中,辉长岩均位于富集型洋中脊玄武岩(E-MORB)区域内,这与其地球化学性质表现为E-MORB的特征也较为一致。

这些地球化学特征表明,扎巧合辉长岩来自于一个未发生过大规模熔融的初始地幔,或者是来源于被富集组分交代过的亏损软流圈地幔。由于扎巧合辉长岩相对富集的Nb、Ta、Sr与岛弧玄武岩特征明显不同,不存在板块俯冲所导致的流体交代富集作用,辉长岩的 $Mg^\#$ (54.2~66.1)与初始的MORB及岛弧玄武岩浆接近,苏里地区与俯冲作用密切相关的埃达克石英闪长岩(474 ± 2.5) Ma (郑英等, 2017)形成年龄明显小于辉长岩年龄等原因,认为本次研究的辉长岩起源于未发生大规模熔融的初始地幔,意味着扎巧合蛇绿岩的辉长岩可能形成于

初始扩张阶段的洋脊环境,为MOR型蛇绿岩。

5.2 形成时代

研究表明,混杂岩中辉长岩的锆石组成相对比较简单,同位素体系封闭较好,往往是组成单一的岩浆锆石,因而其同位素年龄的地质意义单一而明确,即辉长岩的结晶年龄可以直接反映岩浆从地幔中部分熔融分离出来的时代,也即蛇绿岩或洋壳的形成时代。扎巧合蛇绿混杂岩中蚀变辉长岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb测年结果为(524 ± 2.5) Ma。截至目前,许多研究者对拉脊山蛇绿混杂岩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;拉脊山口蛇绿岩中辉绿岩块(491.0 ± 5.1) Ma (付长垒等, 2014),复理石杂砂岩基质碎屑锆石主年龄峰值(462 ± 6) Ma (闫臻等, 2012);

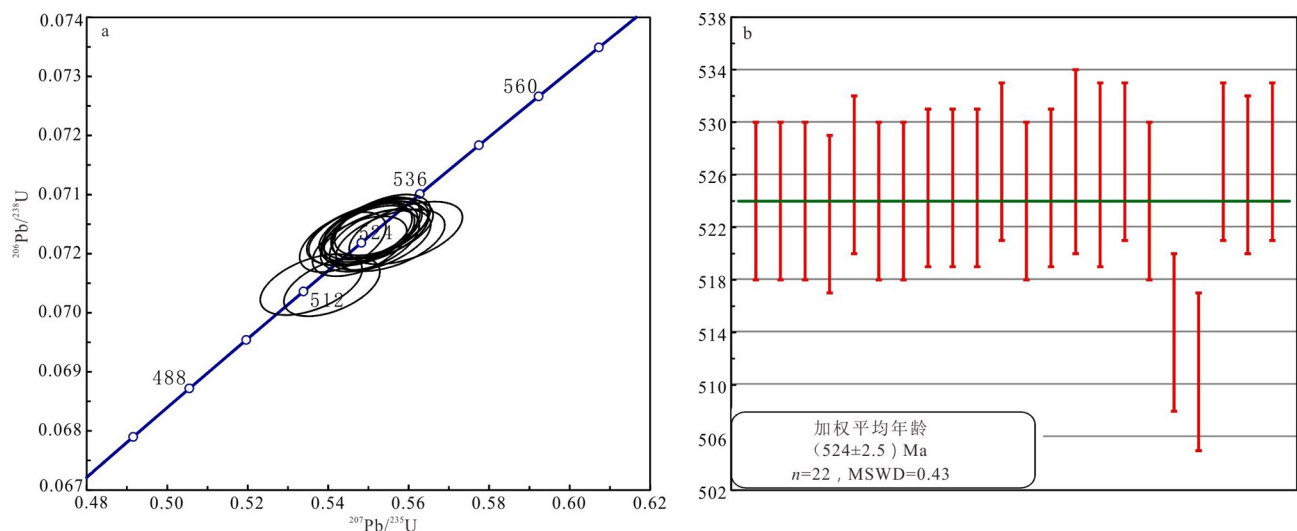


图6 扎巧合辉长岩锆石U-Pb年龄谐和图(a)和加权年龄图(b)
Fig.6 Zircon U-Pb age harmonic diagram (a) and weighted diagram (b) of gabbros from Zhaqiaohe area

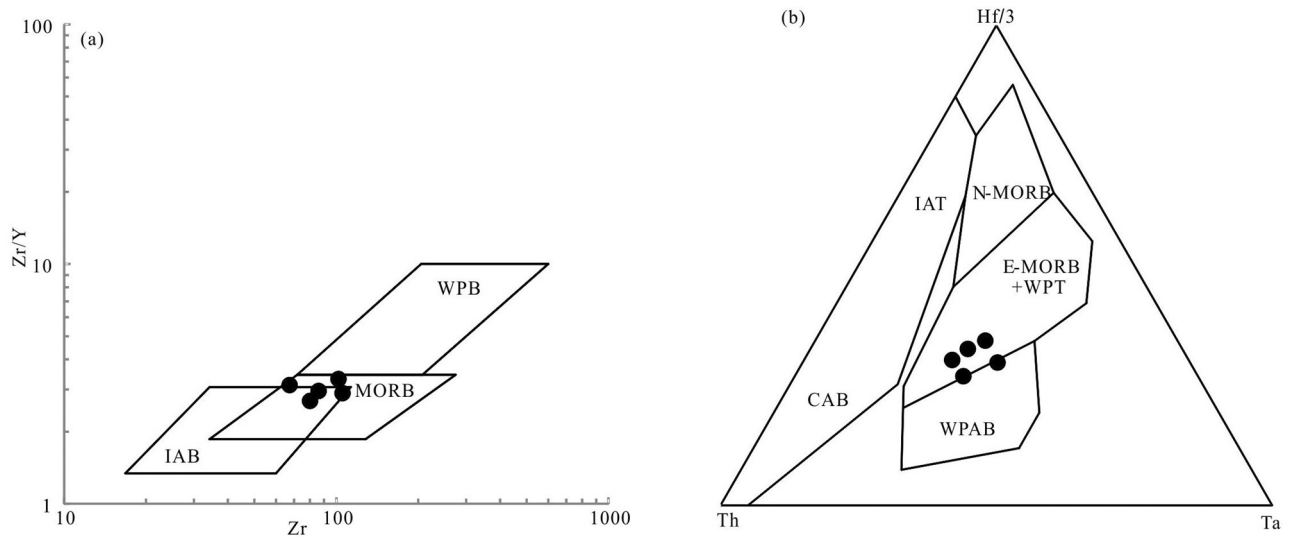


图7 扎巧合辉长岩 Zr-Zr/Y 图解(a, 据 Pearce and Norry, 1979)和 Hf/3-Th-Ta 图解(b, 据 Wood, 1980)
 MORB—洋中脊玄武岩; WPB—板内玄武岩; IAB—岛弧玄武岩; CAB—钙碱性玄武岩; N-MORB—正常洋中脊玄武岩; E-MORB+WPT—富集洋中脊和板内拉板玄武岩; IAT—岛弧拉斑玄武岩; WPAB—板内碱性玄武岩

Fig.7 Zr-Zr/Y diagram (a, after Pearce and Norry, 1979) and Hf/3-Th-Ta diagram (b, after Wood, 1980) of gabbros from Zhaqiaohe area

MORB—Mid-ocean ridge basalt; WPB—Intraplate basalt; IAB—Island arc basalt; CAB—Calc alkaline basalt; N-MORB—Normal mid-ocean ridge basalt; E-MORB+WPT—Enriched mid-ocean ridge and intraplate tholeiite; IAT—Island arc tholeiite; WPAB—Intraplate alkaline basalt

刚察地区辉石岩(513.4±2.1)Ma, 玄武岩(500±6)Ma^①; 峡门地区辉长岩(519.9±3.9)Ma, 灰岩透镜体中寒武纪三叶虫化石(钟明杰, 1994), 均存在一致性。因此, 本次获得的(524±2.5)Ma 年龄值反映扎巧合蛇绿岩形成于早寒武世。

5.3 构造意义

冯益民和何世平(1996)通过对祁连山大地构造与造山作用的研究认为: 祁连山的板块构造体制是在大陆裂谷体制的基础上发展演化而成的。大陆裂谷体制经历了一个相当长的时期才演化成具有沟弧盆体系的成熟大洋, 形成完整的板块构造体制。许志琴等(1994)研究认为: 中祁连从统一的华北板块裂开, 形成有限的古祁连洋。寒武纪区域上沿托莱南山—拉脊山一带形成小洋盆系(丘家骥等, 1995)。

如前所述, 扎巧合蛇绿岩中辉长岩形成年龄为 524 Ma, 形成于初始扩张阶段的洋脊环境。另外, 混杂岩带内卷入的上寒武统六道沟组((496±5)Ma)和下奥陶统吾力沟组((481±4)Ma)中的中基性火山岩属于中—低钾钙碱性系列^②, 绝大多数具有弧火山岩的特征; 在扎巧合东南部约 40 km 的南阿布斗尔地区首次发现俯冲板片(洋壳)部分融熔壳幔岩

浆混合成因的埃达克质石英闪长岩(474±3)Ma(郑英等, 2017); 和区域上 498~501 Ma 与俯冲有关的强过铝花岗岩组合, 说明从晚寒武世开始拉脊山洋盆洋壳局部开始向南俯冲。扎巧合蛇绿岩的辉长岩代表了古大洋扩张早期(~524 Ma)的产物, 并经历了造山初期(~496 Ma)的洋壳俯冲过程, 扎巧合蛇绿岩是 MOR 型蛇绿岩并经历了后期的洋壳俯冲(SSZ)过程, 是从大洋扩张到俯冲造山过程中不同阶段的产物。

6 结论

(1) 扎巧合蛇绿混杂岩带的物质组成复杂, 构造岩块包括变质超基性岩、变质辉长岩、玄武岩、硅质岩、灰岩、砾岩。

(2) 蚀变辉长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果为(524±2.5)Ma, 该年龄代表蛇绿岩的形成年龄, 扎巧合蛇绿混杂岩形成于早寒武世。

(3) 扎巧合蛇绿混杂岩中辉长岩具有类似 E-MORB 的地球化学特征, 表明扎巧合蛇绿岩可能起源于未发生大规模熔融的初始地幔。

(4) 扎巧合蛇绿岩可能形成于初始扩张阶段的洋脊环境, 即扎巧合蛇绿岩为 MOR 型蛇绿岩, 代表

了古大洋扩张早期(~524 Ma)的产物,后期(~496 Ma)经历了洋壳俯冲过程。

注释

①青海省地质调查院. 2013. 青海省刚察地区四幅1:5万区域地质调查报告[R]. 1-432.

②青海省地质调查院. 2015. 青海省天峻县苏里地区五幅1:5万区域地质调查报告[R]. 1-453.

References

- Chen Xuanhua, Shao Zhaogang, Xiong Xiaosong, Gao Rui, Liu Xuejun, Wang Caifu, Li Bing, Wang Zengzhen, Zhang Yiping. 2019. Fault system, deep structure and tectonic evolution of the Qilian Orogenic Belt, Northwest China[J]. *Geology in China*, 46(5): 995-1020 (in Chinese with English abstract).
- Coleman R G. 1977. Ophiolites: Ancient oceanic lithosphere?[J]. *Mineralogical Magazine*, 42(322): 308-308.
- Feng Yimin, Cao Xuanduo, Zhang Erpeng, Hu Yunxu, Yang Junlu, Pan Xiaoping, Jia Qunzi, Li Wenming. 2002. Structural Orogenic Process and Dynamics of the West Qinling Orogenic Belt[M]. Xi'an: Xi'an Map Publishing House, 263(in Chinese with English abstract).
- Feng Yimin, He Shiping. 1996. Geotectonics and Orogeny in Qilian Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-135(in Chinese with English abstract).
- Fu Changlei, Yan Zhen, Guo Xiaoqin, Niu Manlan. 2014. Geochemistry and SHRIMP zircon U-Pb age of diabases in the Lajishankou ophiolitic melange, South Qilian terrane[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1695-1706
- Hou Qingye, Zhang Hongfei, Zhang Benren, Zhao Zhidan, Zhu Yunhai. 2005. Paleogeochronicity of the Laji Mountain in the middle Qilian orogenic belt and its attribution: Geochemical evidence from basic volcanic rocks[J]. *Earth Science*, 30(1): 61-70 (in Chinese with English abstract).
- Li Chunyu, Liu Yangwen, Zhu Baoqing, Feng Yimin, Wu Hanquan. 1978. Tectonic History of Qinling and Qilian Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House, 174-187(in Chinese with English abstract).
- Li Jianfeng, Zhang Zhicheng, Han Baofu. 2010. Geochronology and geochemistry of Early Paleozoic plutons from Subei and Shibaocheng areas, the western segment of Central Qilian and their geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2431-2344(in Chinese with English abstract).
- Li Huaikun, Geng Jianzhen, Hao Shuang, Zhang Yongqing, Li Huiming. 2009. Determination of zircon U-Pb isotope ages by laser Ablation Multi-receiver Plasma Mass Spectrometer (LA-MC-ICPMS)[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(S1): 600-601 (in Chinese with English abstract).

- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-science Reviews*, 37(3-4): 215-224.
- Miyashiro A, Shido F. 1975. Tholeiitic and calc-alkalic series in relation to the behaviors of titanium, vanadium, chromium, and nickel[J]. *American Journal of Science*, 275(3): 265-277.
- Nicolas A. 1989. Structures of Ophiolites and Dynamics of Oceanic Lithosphere[M]. Dordrecht:Kluwer. 1-367.
- Pearce J A, Lippard S J, Roberts S. 1984. Characteristics and tectonic significance of super-subduction zone ophiolites[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 16(1): 74-94.
- Qiu Jiaxiang, Zeng Guangce, Wang Siyuan, Zhu Yunhai. 1997. Early Paleozoic Marine Volcanic Rocks and Mineralization in Laji Mountain[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1-118(in Chinese with English abstract).
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313-345
- Tseng C Y, Yang H J, Yang H Y, Liu D Y, Tsai C L, Wu H Q, Zuo G C. 2007. The Dongcaohe ophiolite from the North Qilian Mountains: A fossil oceanic crust of the Paleo-Qilian Ocean[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(7): 2390-2401
- Wang Erqi, Zhang Qi, Burchfiel C B. 2000. Laji Mountain, Qinghai Province: A tectonic window of multi-stage uplift [J]. *Chinese Journal of Geology*, 35(4): 393-500(in Chinese with English abstract).
- Wang Jinrong, Zhang Xinqu, Zhang Xiang, Hui Xinwei, Zhang Benqi, Zhao Lei. 2021. Rock association, genesis and tectonic significance of Mustangshan structure in the western part of Middle Qilian[C]// *Abstracts of the National Symposium on Petrology and Geodynamics*, 466-468(in Chinese with English abstract).
- Wood D A. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 50(1): 1-30.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Ren Youxiang, Peng Ligui, Zhang Cheng, Yang Jinghua, Wang Xingan, Li Zhipei, Han Song, Huang Zhongxiang. 1991. Marine Volcanic Rocks from Qilian and Qinling Mountains[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1-304 (in Chinese with English abstract)
- Xiao Xuechang, Chen Guoming, Zhu Zhizhi. 1978. Geological tectonic significance of the ancient ophiolite belt in Qilian Mountains[J]. *Acta Geologica Sinica*, 52(4): 281-295 (in Chinese with English abstract).
- Xiao W, Windley B F, Yong Y, Yan Z, Yuan C, Liu C, Li J. 2009. Early Paleozoic to Devonian multiple-accretionary model for the Qilian Shan, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35: 323-333.
- Xu Zhiqin, Xu Huifen, Zhang Jianxin, Li Haibing, Zhu Zhizhi, Qu

- Jingchuan, Chen Daizhang, Chen Jinlu, Yang Kaichun. 1994. The proliferative terrane of Caledonian subduction complex in Nanshan of North Qilian Corridor and its dynamics[J]. *Acta Geologica Sinica*, 68 (1): 1-15 (in Chinese with English abstract).
- Yan Zhen, Wang Zongqi, Li Jiliang, Xu Zhiqin, Deng Jinfu. 2012. Tectonic properties and accretionary orogeny of West Qinling wedge[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6): 1808-1828(in Chinese with English abstract)
- Zhang Jianxin, Xu Zhiqin, Chen Wen, Xu Huifen. 1995. Discussion on the age of subduction-accretion complex/volcanic arc in the middle part of North Qilian [J]. *Journal of Rock and Minerals*, 16 (2): 112-119 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Xueting, Yang Shengde. 2007. Qinghai Province Plate Tectonics Research 1/1 Million Qinghai Province Geotectonic Map Description [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-221 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Wenjin, Mechie J, Feng Mei, Shi Danian, Xue Guangqi, Shu Heping, Song Yang, Yang Hongwei, Liu Zhiwei. 2014. Orogeny in Qilian Mountains and the characteristic structure of the lithospheric mantle[J]. *Geology in China*, 41(5): 1411-1423(in Chinese with English abstract).
- Zheng Ying, Chen Guangting, Zhang Xiaoyong, Song Taizhong, Liang Kunxian. 2017. Geochemical characteristics and chronological significance of Ordovician quartz diorite in Suli area, Middle Qilian [J]. *Northwest Geology*, 50(4): 588-597 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Mingjie. 1994. Discovery of Paleozoic in Laji Mountain, Qinghai Province[J]. *Geological Review*, 22(5): 347-347 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Guochao, Zhang Shuling, Cheng Jiansheng, Gong Yanxue, Wang Yanbin, Wu Hanquan. 1996. Division of ophiolite belt in Qilian area and its tectonic significance [C]//Proceedings of the Symposium on Ophiolite and Geodynamics, 129-134(in Chinese with English abstract).
- 陈宣华, 邵兆刚, 熊小松, 高锐, 刘雪军, 王财富, 李冰, 王增振, 张义平. 2019. 祁连造山带断裂构造体系、深部结构与构造演化[J]. *中国地质*, 46(5): 995-1020.
- 冯益民, 曹宣铎, 张二朋, 胡云绪, 杨军禄, 潘晓萍, 贾群子, 李文明. 2002. 西秦岭造山带结构构造山过程及动力学[M]. 西安: 西安地图出版社, 263.
- 冯益民, 何世平. 1996. 祁连山大地构造与造山作用[M]. 北京: 地质出版社, 1-135.
- 付长垒, 闰臻, 郭现轻, 牛漫兰. 2014. 拉脊山口蛇绿混杂岩中辉绿岩的地球化学特征及 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. *岩石学报*, 30 (6): 1695-1706.
- 侯青叶, 张宏飞, 张本仁, 赵志丹, 朱云海. 2005. 祁连造山带中部拉脊山古地幔特征及其归属:来自基性火山岩的地球化学证据[J]. *地球科学*, 30(1): 61-70.
- 李春昱, 刘仰文, 朱宝清, 冯益民, 吴汉泉. 1978. 秦岭及祁连山构造发展史[M]. 北京: 地质出版社, 174-187.
- 李建锋, 张志诚, 韩宝福. 2010. 中祁连西段肃北、石包城地区早古生代花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 26(8): 2431-2444.
- 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 张永清, 李惠民. 2009. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究[J]. *矿物学报*, 29(增刊): 600-601.
- 丘家骧, 曾广策, 王思源, 朱云海. 1997. 拉脊山早古生代海相火山岩与成矿[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1-118.
- 王二七, 张旗, Burchfiel C B. 2000. 青海拉鸡山:一个多阶段抬升的构造窗[J]. *地质科学*, 35(4): 393-500.
- 王金荣, 张新虎, 张翔, 翟新伟, 张本旗, 赵磊. 2012. 中祁连西段野马南山构造岩石组合、成因及其构造意义[C]//全国岩石学与地球动力学研讨会论文集摘要集, 466-468.
- 夏林圻, 夏祖春, 任有祥, 彭礼贵, 张诚, 杨静华, 王兴安, 李智佩, 韩松, 黄忠祥. 1991. 祁连-秦岭山系海相火山岩[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1-304.
- 肖序常, 陈国铭, 朱志直. 1978. 祁连山古蛇绿岩带的地质构造意义[J]. *地质学报*, 52(4): 281-295.
- 许志琴, 徐惠芬, 张建新, 李海兵, 朱志直, 曲景川, 陈代璋, 陈金禄, 杨开春. 1994. 北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体及其动力学[J]. *地质学报*, 68(1): 1-15.
- 闫臻, 王宗起, 李继亮, 许志琴, 邓晋福. 2012. 西秦岭楔的构造属性及其增生造山过程[J]. *岩石学报*, 28(6): 1808-1828.
- 张建新, 许志琴, 陈文, 徐惠芬. 1995. 北祁连中段俯冲-增生杂岩/火山弧的时代探讨[J]. *岩石矿物杂志*, 16(2): 112-119.
- 张雪亭, 杨生德. 2007. 青海省板块构造研究 1/100 万青海省大地构造图说明书[M]. 北京:地质出版社, 1-221.
- 赵文津, Mechie J, 冯梅, 史大年, 薛光琪, 宿和平, 宋洋, 杨宏伟, 刘志伟. 2014. 祁连山造山作用与岩石圈地幔的特型结构构造[J]. *中国地质*, 41(5): 1411-1423.
- 郑英, 陈光庭, 张小永, 宋泰忠, 梁坤先. 2017. 中祁连苏里地区奥陶纪石英闪长岩地球化学特征及年代学意义[J]. *西北地质*, 50(4): 588-597.
- 钟明杰. 1994. 青海拉脊山下古生界的发现[J]. *地质论评*, 22(5): 347-347.
- 左国朝, 张淑玲, 程建生, 巩彦学, 王彦斌, 吴汉泉. 1996. 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, 129-134.

附中文参考文献

- 陈宣华, 邵兆刚, 熊小松, 高锐, 刘雪军, 王财富, 李冰, 王增振, 张义平. 2019. 祁连造山带断裂构造体系、深部结构与构造演化[J]. *中国地质*, 46(5): 995-1020.
- 冯益民, 曹宣铎, 张二朋, 胡云绪, 杨军禄, 潘晓萍, 贾群子, 李文明. 2002. 西秦岭造山带结构构造山过程及动力学[M]. 西安: 西安地图出版社, 263.
- 冯益民, 何世平. 1996. 祁连山大地构造与造山作用[M]. 北京: 地质出版社, 1-135.
- 付长垒, 闰臻, 郭现轻, 牛漫兰. 2014. 拉脊山口蛇绿混杂岩中辉绿岩