

doi: 10.12029/gc20160308

祁晓鹏, 杨杰, 范显刚, 等. 东昆仑东段东昆中构造混杂岩带长石山蛇绿岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. 中国地质, 2016, 43(3): 797–816.

Qi Xiaopeng, Yang Jie, Fan Xiangang, et al. Age, geochemical characteristics and tectonic significance of Changshishan ophiolite in central East Kunlun tectonic mélange belt along the east section of East Kunlun Mountains[J]. Geology in China, 2016, 43(3): 797–816(in Chinese with English abstract).

东昆仑东段东昆中构造混杂岩带长石山蛇绿岩 年代学、地球化学特征及其构造意义

祁晓鹏 杨 杰 范显刚 崔建堂 蔡振锋 曾献文 魏 伟 屈小相 翟黎明

(中陕核工业集团地质调查院有限公司, 陕西 西安 710199)

摘要: 东昆仑东段东昆中构造混杂岩带长石山地区新发现一套蛇绿岩, 主要由蛇纹岩、辉长岩、辉绿岩、玄武岩、含泥碳硅质岩组成。通过对蛇绿岩中辉长岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素研究, 获得年龄为 (537.2 ± 3.5) Ma, 表明蛇绿岩形成于早寒武世。岩石地球化学研究显示, 蛇纹岩的原岩为橄榄岩类, 稀土元素配分曲线具开阔 U 型特征; 辉长岩发育明显的堆晶结构, 具不同程度的 Eu 正异常, 轻稀土较重稀土富集, 但稀土总量较低; 玄武岩轻稀土相对重稀土富集, 富集大离子亲石元素, 高场强元素不分异, Nb 轻微亏损, 具 E-MORB 与 IAB 的双重特征。长石山蛇绿岩形成于弧后盆地环境, 指示布青山—阿尼玛卿原特提斯洋在早寒武世 $((537.2 \pm 3.5)$ Ma) 前已经开始向北俯冲, 并在东昆中地区拉张形成弧后盆地。

关键词: 东昆仑; 蛇绿岩; E-MORB; 原特提斯洋; 弧后盆地

中图分类号: P588.12⁵ 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)03-0797-20

Age, geochemical characteristics and tectonic significance of Changshishan ophiolite in central East Kunlun tectonic mélange belt along the east section of East Kunlun Mountains

QI Xiao-peng, YANG Jie, FAN Xian-gang, CUI Jian-tang, CAI Zhen-feng, ZENG Xian-wen, WEI Wei, QU Xiao-xiang, ZHAI Li-ming

(Sino Shannxi Nuclear Industry Group Geological Survey Co., Ltd., Xi'an 710199, Shaanxi, China)

Abstract: The ophiolite in central East Kunlun tectonic mélange belt along the east section of East Kunlun Mountains is mainly composed of serpentines, gabbro, diabase, basalt and peat siliceous rock. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the gabbro in ophiolite shows that the age is (537.2 ± 3.5) Ma, which indicates that the ophiolite was formed in the Early Cambrian. Detailed petrogeochemical studies show that the protolith of serpentines is peridotite and the rare earth element distribution curve has wide U-type characteristics. The gabbro displays obvious accumulate texture with varying degrees of Eu anomalies. The light rare earth

收稿日期: 2016-02-14; 改回日期: 2016-04-08

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120113028500)资助。

作者简介: 祁晓鹏, 男, 1985 年生, 工程师, 主要从事区域地质调查工作; E-mail: qxphsm@163.com。

is relatively high but the total rare earth is low. The light rare earth of basalt is relatively higher than heavy rare earth. And it shows systematic enrichment of LILE, no differences of HFSE and slight depletion of Nb and it also has double features of E-MORB and IAB. The ophiolite originated in back-arc basin which had been formed by the subduction of Proto-Tethys Ocean in Buqingshan-Anyemaqen before the Early Cambrian and then eventually formed a basin in East Kunlun region after extension.

Key words: East Kunlun Mountains; ophiolite; E-MORB ; Proto-Tethys Ocean; back-arc basins

About the first author: QI Xiao-peng, male, born in 1985, engineer, majors in regional geological survey; E-mail: qxphsm@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. 12120113028500).

东昆仑造山带是中央造山系的重要组成部分^[1-6],由北向南可以划分为东昆北构造带、东昆中构造带、东昆南构造带以及布青山—阿尼玛卿构造带4个构造单元^[7-13]。东昆中构造带位于东昆北构造带和东昆南构造带之间,近东西向展布,以出露大量的蛇绿岩块为特征,沿该带断续出露有乌妥蛇绿岩、清水泉蛇绿岩、塔妥蛇绿岩等,其中清水泉蛇绿岩研究程度相对较高。高延林等^[14]首次发现并报道了清水泉蛇绿岩,认为清水泉蛇绿岩是在新元古代晚期或早古生代早期秦—祁—昆古大洋扩张初期邻近陆壳部位不远的环境和快速扩张的条件下形成的洋壳,但是也不排除弧后扩张作用形成的可能性。其后,不同研究者对清水泉蛇绿岩的时代和性质进行了研究,如郑健康^[15]、Yang et al.^[16]、朱云海等^[9]、陆松年等^[17]相继获得清水泉蛇绿岩的同位素年龄为1279 Ma (Sm-Nd 等时线)、(518±3) Ma (TIMS 锆石 U-Pb)、(1372±85) Ma (Sm-Nd 等时线)、(522.3±4.1) Ma (TIMS 锆石 U-Pb); 王国灿等^[18]认为清水泉地区蛇绿岩主要形成于中元古代,不排除有部分早古生代蛇绿岩的构造侵位,而李怀坤等^[19]认为 Sm-Nd 等时线年龄可靠性较低,清水泉蛇绿岩年龄应该在 520 Ma 左右; Yang et al.^[16]和殷鸿福等^[7]认为清水泉蛇绿岩形成于拉张的小洋盆环境,但是也有研究者认为清水泉地区镁铁质—超镁铁质岩并不是蛇绿岩组合,可能是大陆之下的岩石圈地幔单元组分^[20]。冯建赞等^[11]在都兰可可沙地区发现一套镁铁质—超镁铁质杂岩,研究认为其是清水泉蛇绿岩的延伸,并获得镁铁质杂岩中辉长岩的锆石 U-Pb 年龄为(509.4±6.8) Ma; Li et al.^[21]获得科科可特镁铁质岩锆石 U-Pb 年龄为(501±7) Ma,代表弧后盆地或小洋盆构造环境。上述资料表明对于东昆中构造带蛇绿岩的时代、构造属性等还存在较大争议,这也影响了对东昆中地区古洋盆属性

的判断。

笔者在东昆仑东段都兰县沟里地区进行 1:5 万区域地质调查时,在清水泉以东约 25 km 处的长石山一带新填绘出一条构造混杂岩带,并在混杂岩带中发现了蛇绿岩岩块(包括玄武岩、辉长岩、辉绿岩、蛇纹岩等)。本文通过对长石山地区新发现的蛇绿岩的年代学、地球化学研究,讨论其形成时代、性质和构造环境,以期为研究东昆中构造带乃至东昆仑造山带的构造演化提供基础地质资料。

1 区域地质

研究区位于东昆仑造山带东段东昆中构造混杂岩带内,该带呈 NW—NWW 向展布,是划分东昆北构造带与东昆南构造带的重要边界(图 1-a),也是一条多旋回复合的碰撞缝合带^[22]。东昆中构造混杂岩带具有复杂的物质组成和构造变形。区域上,卷入东昆中构造混杂岩带的地层单元主要包括变质基底岩系(古元古界白沙河岩组、中元古界小庙岩组、中元古界苦海岩群)、下古生界纳赤台岩群(Pz₁N)、下泥盆统契盖苏组(D₁qg)、下石炭统哈拉郭勒组(C₁hl)、上石炭统浩特洛洼组(C₂ht)、下三叠统洪水川组(T₁h)。古元古界白沙河岩组(Pt₁b.)主要岩性为黑云斜长片麻岩、白云质大理岩、钙硅酸粒岩、含橄榄石大理岩、大理岩,夹含黑云(角闪)变粒岩、石榴石黑云(角闪)斜长片麻岩、石英岩、云母石英片岩、长石石英岩等。中元古界小庙岩组(Pt₂x.)以石英质岩石为主,夹有斜长角闪岩、长英质片麻岩等,为浅海陆源碎屑沉积,代表了较为稳定环境的沉积产物。中元古界苦海岩群(Pt₂K.)主要由黑云石英片岩、条带状大理岩、变粒岩、斜长角闪片岩、黑云斜长片麻岩等岩石组成。下古生界纳赤台岩群(Pz₁N.)在长石山混杂岩带北侧出露岩性主要为变砂岩、千枚岩和碳酸盐岩,在乌妥—科科可特

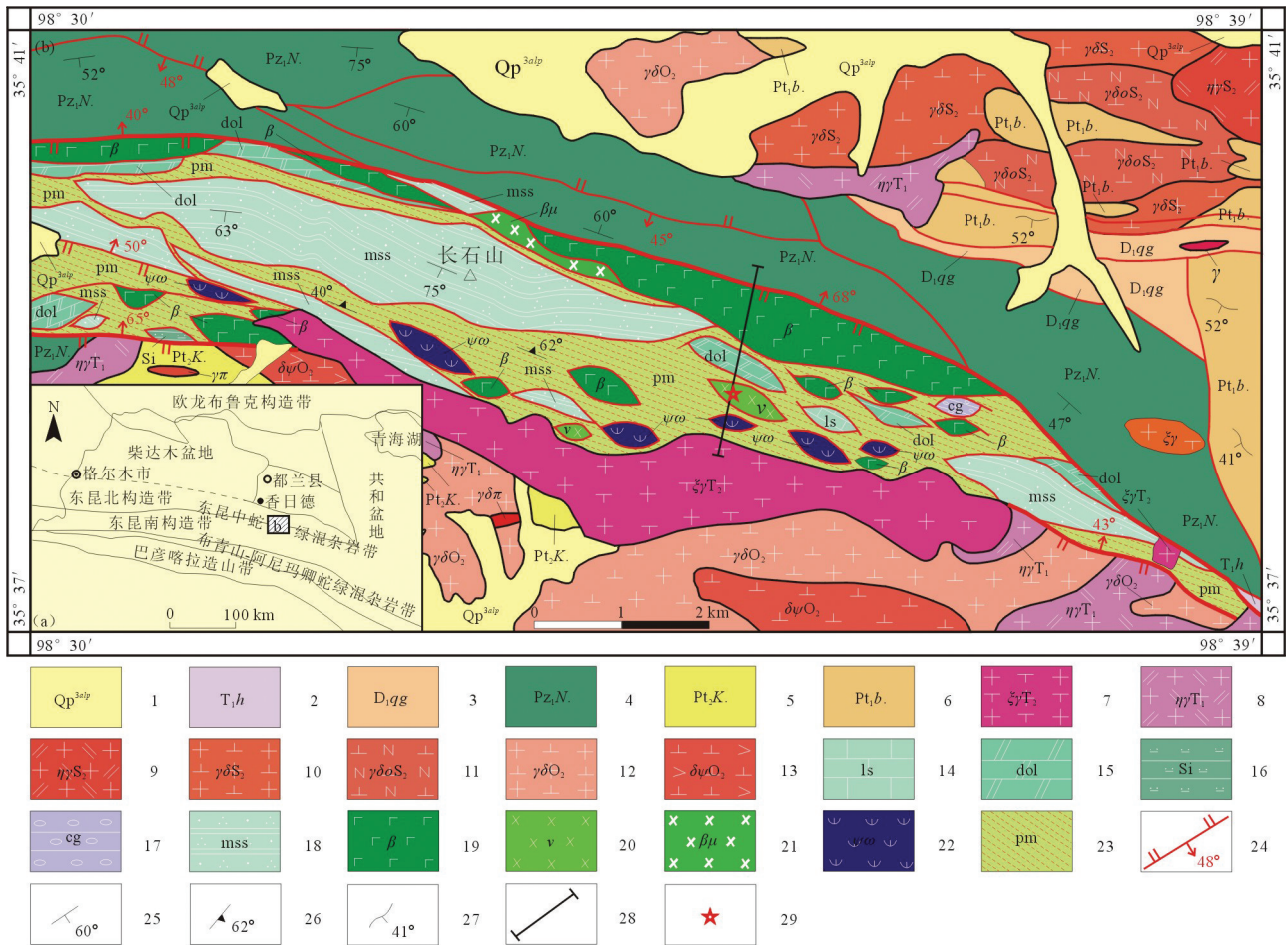


图1 长石山地区地质简图

- 1—第四系; 2—下三叠统洪水川组; 3—下泥盆统契盖苏组; 4—下古生界纳赤台岩群; 5—中元古界苦海岩群; 6—古元古界白沙河岩组; 7—中三叠世正长花岗岩; 8—早三叠世二长花岗岩; 9—中志留世二长花岗岩; 10—中志留世花岗闪长岩; 11—中志留世英云闪长岩; 12—中奥陶世花岗闪长岩; 13—中奥陶世角闪闪长岩; 14—灰岩岩块; 15—白云岩岩块; 16—硅质岩岩块; 17—砾岩岩块; 18—变石英砂岩岩块; 19—玄武岩岩块; 20—辉长岩岩块; 21—辉绿岩岩块; 22—蛇纹岩岩块; 23—千糜岩; 24—断层及产状; 25—层理; 26—面理; 27—片麻理; 28—剖面位置; 29—同位素样品采样位置

Fig.1 Simplified geological map of Changshishan area

- 1—Quaternary; 2—Lower Triassic Hongshuichuan Formation; 3—Lower Devonian Qigaisu Formation; 4—Lower Paleozoic Nachitai Rock Group; 5—Mesoproterozoic Kuhai Rock Group; 6—Paleo-Proterozoic Baishahe Rock Formation; 7—Middle Triassic syenogranite; 8—Early Triassic monzonitic granite; 9—Middle Silurian monzonitic granite; 10—Middle Silurian granodiorite; 11—Middle Silurian tonalite; 12—Middle Ordovician granodiorite; 13—Middle Ordovician amphibolite; 14—Limestone; 15—Dolomite; 16—Chert; 17—Conglomerate; 18—Variable quartz sandstone; 19—Basalt; 20—Gabbro; 21—Diabase; 22—Serpentinite; 23—Phyllonite; 24—Fault and attitude; 25—Stratification; 26—Foliation; 27—Gneissosity; 28—Location of profile; 29—Sampling position

—达瓦特沟—一带及各纳各热—肯地岗—一带出露岩性主要为石英片岩和绿片岩, 陈有炘等^[23]获得变火山岩(绿片岩)的LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(474±7.9) Ma, 代表弧后盆地产物。下泥盆统契盖苏组(D₁qg)为一套磨拉石建造, 主要分布于长石山西侧, 下部以碎屑岩为主夹火山岩, 上部为火山岩夹碎屑岩, 下部流纹岩的锆石 U-Pb 年龄为(414±15) Ma (项目未刊资料)。下石炭统哈拉郭勒组

(C₁hl) 主要分布于清水泉—塔妥—曲什昂一带, 岩石类型主要为海陆交互相碳酸盐岩及碎屑岩, 自下而上可以分为砂岩夹灰岩段、钙质细砂岩段以及生物碎屑碳酸盐岩段。上石炭统浩特洛洼组(C₂ht)主要分布于东昆南构造带的哈嘎诺尔沟和瑙木浑牙马托一带, 主要岩性为灰岩、钙质粉砂岩、粉砂岩、砂岩等。下三叠统洪水川组(T₁h)为一套弧前盆地沉积^[24], 在东昆中构造带零星出露。此外沿该带断

续出露有乌妥蛇绿岩、清水泉蛇绿岩、塔妥蛇绿岩、吉日迈蛇绿岩以及岛弧型岩块、碳酸盐岩块等,各岩石单元均呈断块形式构造混杂叠置在一起。东昆中构造混杂岩带还发育断续分布的韧性剪切带,在带内形成糜棱岩、千糜岩等动力变质岩,李小兵等^[25]研究认为该带至少经历2期韧性剪切作用。东昆中构造混杂岩带两侧地质特征具有明显差异性,北侧出露前寒武纪变质基底,以发育大量的弧岩浆岩为特征,该带的岛弧型岩浆岩主要与东昆中古洋盆的向北俯冲相关;南侧为东昆南构造带,出露地层有前寒武纪变质基底、中元古代狼牙山组、早古生代纳赤台岩群及未变质的晚古生代—新生代沉积地层,发育与布青山—阿尼玛卿原特提斯洋、古特提斯洋演化相关的加里东期、晚华力西期—印支期构造—岩浆活动。

2 蛇绿岩地质特征

长石山地区蛇绿岩遭受多期构造活动的破坏,已被构造“肢解”成为混杂岩块,以大小不一的构造岩块或透镜体形式产于构造混杂岩带中,长轴方向为NWW向,与区域构造线一致(图1-b)。蛇绿岩岩石组合包括蛇纹岩、辉长岩、辉绿岩、玄武岩、含泥炭硅质岩等(图2)。各蛇绿岩组分之间为断层接触或被混杂岩带基质分隔,混杂岩带基质为强变形的千糜岩,岩块与基质亦为断层接触。与典型蛇绿岩套(底部为变质橄榄岩和堆积橄榄岩,上部为层

状辉长岩、席状辉绿岩墙和枕状熔岩以及顶部覆盖的含放射虫远洋硅质岩等沉积岩系)的完整层序虽然存在一定程度的差距,但从野外分布及岩石组合整体特征上来看,仍然是一个岩石组合较为完整的蛇绿岩套。

长石山地区蛇绿岩中蛇纹岩蛇纹石化强烈,原岩的矿物成分、结构等特征肉眼已经无法辨别,蛇纹岩表面常见不同方向的擦痕(图3-a),暗示蛇绿岩在构造侵位过程及以后可能发生过多次不同方向的构造运动。辉长岩大都呈块状,局部可见堆晶结构(图3-b)和弱片麻状构造。辉绿岩为块状(图3-c),发育典型辉绿结构。玄武岩出露面积相对较大,有块状玄武岩和枕状玄武岩(图3-d),枕状玄武岩的岩枕大小一般在30 cm左右,岩石普遍发生强蚀变,局部碎裂化。含泥炭硅质岩出露规模较小。

3 岩相学特征

通过野外宏观特征和室内显微特征观察,长石山地区蛇绿岩岩石类型包括蛇纹岩、辉长岩、辉绿岩、玄武岩以及含泥炭硅质岩等。

蛇纹岩呈墨绿—灰黑色,块状构造,具纤维状晶结构,基本都由蛇纹石组成,蛇纹石含量在96%以上,此外还含有少量磁铁矿、滑石细脉、菱镁矿细脉。

辉长岩有细粒辉长岩和中粗粒辉长岩。细粒辉长岩发生强蚀变,呈深灰色,具残余细粒辉长结构、碎裂化结构,块状构造,主要由纤闪石(54%~

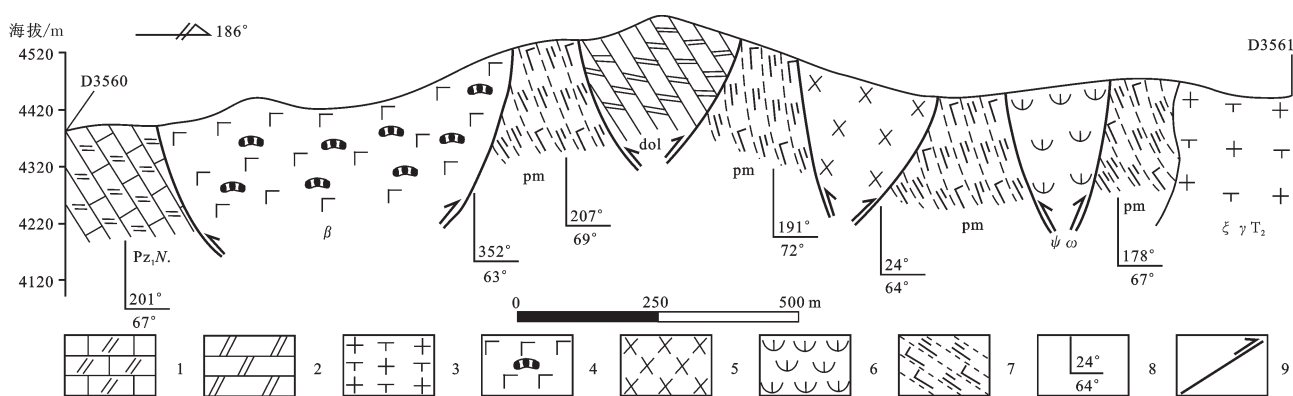


图2 长石山地区蛇绿岩剖面图

1—纳赤台岩群白云质灰岩; 2—白云岩岩块; 3—中三叠世正长花岗岩; 4—枕状玄武岩岩块; 5—辉长岩岩块; 6—蛇纹岩岩块;
7—钙质绢云千糜岩; 8—产状; 9—逆断层

Fig.2 Geological section of ophiolite in Changshishan area

1—Dolomite limestone of Nachitai Rock Group; 2—Dolomite; 3—Middle Triassic syenogranite; 4—Pillow basalt; 5—Gabbro; 6—Serpentinite;
7—Phyllonite; 8—Attitude; 9—Reverse fault

55%) 和斜长石(45%~46%) 组成, 矿物粒径大多在 1.5~2 mm, 纤闪石是由辉石纤闪石化形成, 纤闪石还残留有辉石特征, 斜长石和辉石的自形程度相似, 都呈半自形-他形粒状, 构成辉长结构。中粗粒辉长岩具辉长结构, 发育明显的堆晶结构和堆晶条带, 堆晶晶体主要为斜长石, 次为辉石。斜长石呈自形一半自形板柱状, 具有聚片双晶, 部分绢云母化, 表面浑浊。辉石呈自形一半自形短柱状, 无色或浅绿色, 部分表面色不均匀, 正高突起, 具辉石式解理, I~II级干涉色, 部分绿帘石、角闪石化(显示角闪石式解理), 但保留辉石假象。

辉绿岩具细粒辉绿结构(图3-e), 块状构造, 主要由斜长石(47%~48%)、透辉石(37%~38%)、绿帘石(11%~12%) 组成, 此外还含有少量方解石、磁铁矿、绿帘石等。岩石中长石呈细小的半自形板状, 表面浑浊, 发生高岭土化、绿帘石化, 隐约显示钠氏双晶, 晶体杂乱排列, 形成的三角形间隙中充填透辉石等, 构成辉绿结构。

辉绿玢岩呈灰绿色, 具斑状结构, 基质具含长嵌晶结构, 块状构造。岩石斑晶含量在5%~10%, 斑

晶以斜长石为主, 个别为纤闪石, 斜长石斑晶呈半自形板状, 已发生钠长石化, 粒径大小0.5~2 mm, 纤闪石斑晶含量较低, 大小在0.5 mm左右, 为暗色矿物蚀变形成, 斑晶杂乱分布。基质矿物含量约在90%以上, 基质主要由斜长石(>50%)、透辉石(30%~35%) 组成, 基质中斜长石呈细板条状杂乱分布, 其间分布有暗色矿物, 呈含长结构。暗色矿物是透辉石, 呈等轴粒状, 粒径小于0.1 mm, 均匀分布于斜长石之间。岩石中还见少量次生绿泥石脉和褐铁矿细脉。

玄武岩呈灰-灰绿色, 具间隐结构(图3-f), 显微嵌晶含长结构, 块状构造或枕状构造, 岩石主要由斜长石(60%~70%) 和透辉石(30%~40%) 组成。斜长石呈细小的板条状杂乱分布, 其间分布有暗色矿物透辉石, 有些较大的透辉石中有细小的板条状斜长石嵌晶, 呈嵌晶含长结构。透辉石粒度较细, 大小在0.05 mm~0.1 mm×0.2 mm~0.5 mm, 与斜长石混杂, 均匀分布, 已发生蚀变。岩石中还发育次生绿帘石脉体, 脉体中绿帘石结晶粗大, 脉宽3~8 mm, 切穿玄武岩分布。

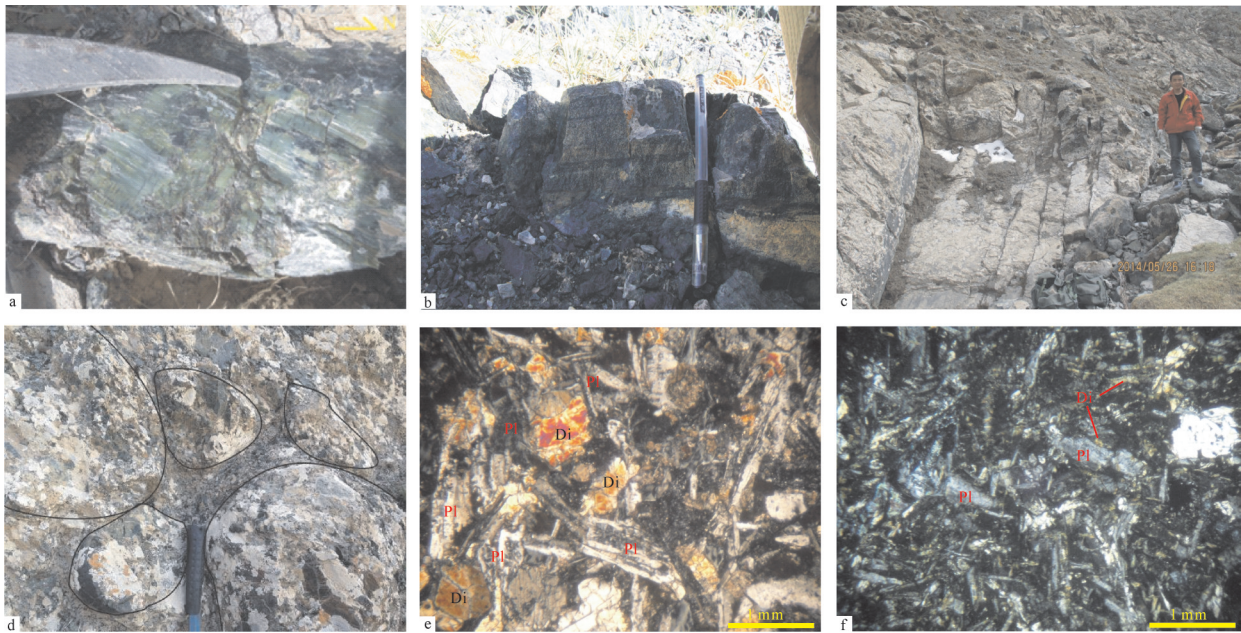


图3 长石山蛇绿岩野外和镜下照片

a—蛇纹岩野外露头及擦痕; b—辉长岩堆晶结构; c—辉绿岩野外露头; d—枕状玄武岩野外露头; e—辉绿岩显微照片; f—枕状玄武岩显微照片; Di—透辉石; Pl—斜长石

Fig.3 Field and microscopic features of the Changshishan ophiolite

a—Outcrop and scratches of serpentinite; b—Cumulative texture of gabbro; c—Outcrop of diabase; d—Outcrop of pillow basalt; e—Microphotograph of diabase; f—Microphotograph of pillow basalt; Di—Diopside; Pl—Plagioclase

含泥炭硅质岩呈深灰色,含泥隐晶结构,层状构造,岩石成分主要为隐晶石英(87%~88%),其次为炭泥质(12%~13%),隐晶石英颗粒细小,粒径一般都小于0.004 mm,炭泥质成分均匀分布,并明显定排列,形成层状构造,岩石中还发育细小的石英脉,杂乱贯入。

4 同位素年代学

在详细野外地质调查和镜下观察的基础上,选择从长石山地区蛇绿岩中采集新鲜无脉体贯入的中粗粒堆晶辉长岩样品(3573-2)进行测年,样品采集重量大于30 kg,采样坐标为N: 35°38'35.39", E: 98°35'07.67"。

4.1 测试方法

岩石样品在河北省地勘局廊坊实验室经过破碎、常规重力和磁选方法分选出约1000粒锆石,然后在双目镜下挑选晶型较好、干净透明的锆石制作样靶。锆石制靶在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,阴极发光在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室扫描电镜加载阴极发光仪上完成。锆石U-Pb同位素测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)上完成,测试数据处理采用GLITTER程序,并用Andersen软件对测试数据进行铅校正,年龄计算以及协和图绘制采用ISOPLOT软件完成。详细的实验流程、原理、仪器

参数等见文献[26-27]。

4.2 锆石特征

选自辉长岩样品(3573-2)的锆石晶粒呈无色透明至浅黄色,多数为短柱状、半截锥状晶体,晶体颗粒自形程度较高,长度介于70~120 μm ,宽度介于50~110 μm ,晶体长宽比大多为2:1。阴极发光(CL)图像(图4-a)显示大多数锆石具有典型的岩浆韵律环带,无明显的残留核,表明锆石为岩浆结晶产物。从表1可以看出只有一个锆石的Th/U比值为0.02,其他锆石的Th/U比值(0.26~0.64)均大于0.1;锆石的轻稀土总量较低($3.68 \times 10^{-6} \sim 31.47 \times 10^{-6}$),重稀土总量较高($161.97 \times 10^{-6} \sim 1379.80 \times 10^{-6}$), $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 比值均小于1(表2),具有轻稀土亏损,重稀土明显富集的曲线特征(图4-b),曲线还显示明显的Ce正异常和Eu负异常,这些特征均指示锆石为岩浆成因[28-29]。为了保证数据的准确和可靠性,测点位置都选在岩浆成因的明暗相间的震荡环带上。

4.3 锆石U-Pb年龄

样品3573-2中锆石共测试了30个点,有6个锆石打穿,测点数据明显偏离谐和线,去除这6个测点剩余24个测点为有效点,24个有效测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和性较好,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(537.2 \pm 3.5) Ma (MSWD=0.0023)(图5),代表了蛇绿岩中辉长岩的结晶年龄。因此,本文认为长石山地区蛇绿岩的形成年龄为(537.2 \pm 3.5) Ma,其形成时代属于早寒武世。

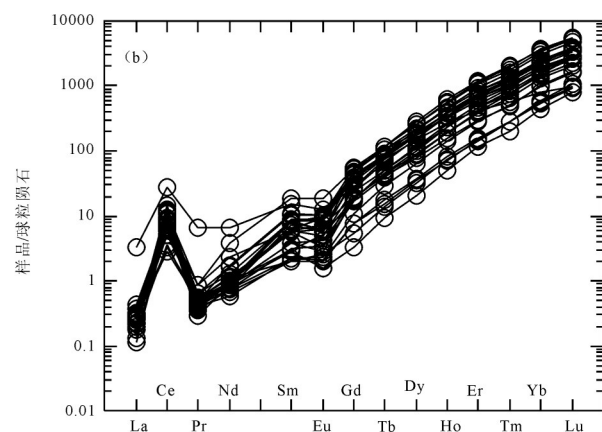
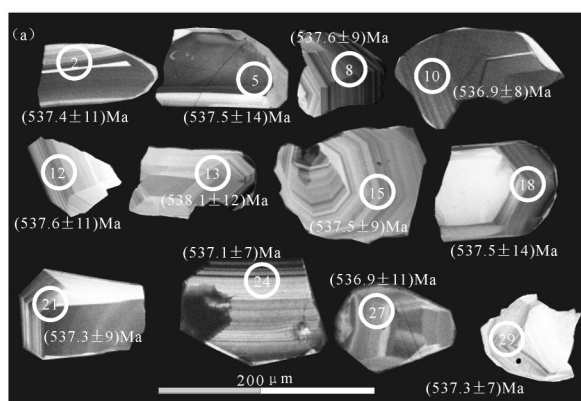


图4 长石山蛇绿岩中辉长岩(3573-2)代表性锆石CL图像、年龄值及锆石REE配分图(球粒陨石标准化值据[30])
Fig. 4 Representative zircon CL images, ages and REE abundances of zircons (chondrite data for normalization after reference [30]) for gabbro (3573-2) from Changshishan ophiolite

表1 长石山蛇绿岩中辉长岩(3573-2)的LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素测试结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope data of gabbro (3573-2) from Changshishan ophiolite

测试 点号	元素含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值			表面年龄/Ma										
	^{206}Pb	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ				
1	57.6	84.1	162.9	0.52	0.05802	0.00429	0.69587	0.04905	0.08696	0.00180	0.02597	0.00116	530.0	155	536.3	29	537.5	11
2	29.2	32.1	82.6	0.39	0.05870	0.00468	0.70395	0.05367	0.08694	0.00188	0.02944	0.00153	556.1	165	541.2	32	537.4	11
4	108.0	180.7	305.6	0.59	0.05872	0.00271	0.70365	0.02925	0.08689	0.00125	0.02738	0.00068	556.7	98	541.0	17	537.1	7
5	40.0	44.2	113.3	0.39	0.05875	0.00589	0.70458	0.06837	0.08696	0.00234	0.02683	0.00184	557.8	205	541.5	41	537.5	14
7	45.0	48.9	127.9	0.38	0.05601	0.00252	0.67108	0.02700	0.08688	0.00117	0.02830	0.00077	452.5	97	521.4	16	537.0	7
8	55.0	76.7	156.1	0.49	0.05806	0.00352	0.69633	0.03949	0.08697	0.00150	0.02868	0.00099	531.4	128	536.6	24	537.6	9
9	65.2	55.4	185.3	0.30	0.05745	0.00372	0.68838	0.04198	0.08689	0.00158	0.03042	0.00140	508.4	137	531.8	25	537.1	9
10	32.3	49.9	91.8	0.54	0.05622	0.00319	0.67337	0.03560	0.08686	0.00136	0.02706	0.00081	460.3	122	522.8	22	536.9	8
12	69.2	80.8	196.9	0.41	0.05851	0.00447	0.70173	0.05120	0.08698	0.00184	0.02942	0.00142	548.8	159	539.8	31	537.6	11
13	21.4	16.4	60.9	0.27	0.05831	0.00517	0.69988	0.05971	0.08705	0.00203	0.02733	0.00197	540.8	183	538.7	36	538.1	12
14	29.5	29.1	84.1	0.35	0.05809	0.00418	0.69638	0.04768	0.08695	0.00171	0.02908	0.00143	532.6	151	536.6	29	537.5	10
15	23.4	22.7	66.9	0.34	0.05806	0.00417	0.69612	0.04771	0.08696	0.00160	0.02685	0.00133	531.6	151	536.5	29	537.5	9
16	46.0	69.7	131.4	0.53	0.05796	0.00366	0.69492	0.04130	0.08695	0.00154	0.02796	0.00098	528.1	133	535.7	25	537.5	9
17	33.4	50.0	95.6	0.52	0.05837	0.00322	0.69982	0.03583	0.08696	0.00135	0.02864	0.00085	543.6	116	538.7	21	537.5	8
18	46.1	84.8	132.0	0.64	0.05916	0.00578	0.70921	0.06686	0.08695	0.00231	0.02926	0.00148	573.1	199	544.3	40	537.5	14
20	71.2	99.1	204.4	0.48	0.05829	0.00263	0.69813	0.02824	0.08688	0.00121	0.02730	0.00070	539.9	97	537.7	17	537.1	7
21	41.2	42.8	118.2	0.36	0.05850	0.00343	0.70095	0.03834	0.08692	0.00146	0.02837	0.00112	548.4	123	539.4	23	537.3	9
23	262.0	14.3	752.8	0.02	0.05957	0.00264	0.71367	0.02815	0.08690	0.00122	0.02603	0.000350	588.0	93	546.9	17	537.2	7
24	82.0	84.7	236.0	0.36	0.05810	0.00232	0.69590	0.02410	0.08688	0.00112	0.02825	0.00072	533.0	86	536.3	14	537.1	7
26	66.4	99.9	191.7	0.52	0.05854	0.00377	0.70044	0.04250	0.08680	0.00160	0.02597	0.00099	549.8	135	539.1	25	536.6	9
27	24.4	28.0	70.4	0.40	0.05753	0.00487	0.68889	0.05612	0.08686	0.00187	0.02896	0.00151	511.7	176	532.1	34	536.9	11
28	50.1	38.1	144.9	0.26	0.05892	0.00298	0.70560	0.03259	0.08688	0.00132	0.02766	0.00110	564.1	106	542.1	19	537.0	8
29	44.1	66.2	127.4	0.52	0.05884	0.00279	0.70503	0.03020	0.08692	0.00124	0.02841	0.00074	561.2	100	541.8	18	537.3	7
30	43.8	40.9	126.7	0.32	0.05892	0.00475	0.70579	0.05448	0.08690	0.00192	0.02545	0.00156	564.1	167	542.2	32	537.2	11

表 2 长石山蛇绿岩中辉长岩(3573-2) 锆石稀土元素含量(10^{-6})测试结果
 Table 2 Rare earth element composition of gabbro (3573-2) zircon from Changshishan ophiolite/ 10^{-6}

点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ LREE	Σ HREE	(Gd/Yb) _y	
1	0.06	9.16	0.11	2.34	3.58	1.38	13.94	5.06	62.19	27.96	152.15	37.53	443.42	106.76	865.64	16.63	849.01	0.03
2	0.09	5.23	0.05	0.53	0.73	0.21	4.83	2.05	28.79	13.76	79.28	21.28	270.10	65.80	492.73	6.84	485.89	0.01
4	0.07	6.22	0.11	1.41	1.15	0.54	5.09	1.97	25.50	11.31	61.53	16.14	211.98	54.26	397.28	9.50	387.78	0.02
5	0.08	11.46	0.05	0.61	1.65	0.44	12.10	5.39	81.17	41.37	239.28	63.16	757.74	178.07	1392.56	14.28	1378.28	0.01
7	0.07	8.86	0.07	0.69	1.11	0.47	8.88	3.78	56.46	28.03	158.49	41.32	490.69	115.60	914.51	11.26	903.25	0.01
8	0.07	4.99	0.05	0.44	0.43	0.16	1.96	0.74	11.23	5.13	31.49	9.10	111.82	29.98	207.59	6.14	201.45	0.01
9	0.08	2.34	0.06	0.53	0.55	0.12	0.87	0.45	6.69	3.59	23.82	6.58	93.65	26.32	165.65	3.68	161.97	0.01
10	0.04	6.05	0.06	1.03	2.10	0.76	11.23	4.11	54.99	25.05	134.50	34.07	401.55	94.38	769.92	10.04	759.88	0.02
12	0.11	7.05	0.08	0.77	1.61	0.41	9.75	4.20	57.33	27.03	135.99	33.58	375.27	86.28	739.46	10.03	729.43	0.02
13	0.06	2.90	0.05	0.35	0.44	0.17	2.81	1.39	20.87	9.97	59.31	16.31	203.83	50.64	369.10	3.97	365.13	0.01
14	0.04	5.87	0.05	0.57	1.08	0.24	6.13	2.36	37.83	18.64	109.64	30.37	378.58	94.72	686.12	7.85	678.27	0.01
15	0.09	4.88	0.05	0.57	0.59	0.39	4.78	2.17	32.38	16.88	97.72	26.58	332.52	82.58	602.17	6.56	595.61	0.01
16	0.07	8.66	0.08	0.99	2.04	0.74	14.07	5.43	81.59	39.48	221.61	57.81	692.12	165.54	1290.23	12.58	1277.65	0.02
17	0.09	6.26	0.04	0.45	0.61	0.26	4.26	1.82	27.43	13.96	85.71	25.00	323.26	87.24	576.39	7.71	568.68	0.01
18	0.07	10.34	0.05	0.57	1.66	0.61	10.08	4.20	66.85	31.35	173.35	43.66	520.70	122.49	985.98	13.30	972.68	0.02
20	0.08	9.53	0.05	0.54	1.53	0.71	12.21	4.89	69.63	32.19	172.55	43.13	494.94	118.12	960.10	12.44	947.66	0.02
21	0.08	7.61	0.07	0.56	1.17	0.36	6.79	3.17	49.79	24.71	143.86	39.38	482.80	118.87	879.22	9.85	869.37	0.01
23	1.03	21.80	0.79	3.92	3.03	0.90	7.18	3.58	47.53	19.26	86.57	18.74	165.67	30.58	410.58	31.47	379.11	0.03
24	0.08	6.05	0.04	0.51	0.76	0.31	4.55	2.32	35.03	16.92	95.34	25.13	298.53	72.81	558.37	7.74	550.63	0.01
26	0.07	4.08	0.07	0.68	0.39	0.15	1.99	0.85	12.02	5.97	33.16	9.02	115.28	30.82	214.54	5.43	209.11	0.01
27	0.10	8.74	0.06	0.60	1.70	0.66	11.59	5.41	89.33	45.23	251.97	65.49	739.28	171.50	1391.66	11.86	1379.80	0.01
28	0.08	2.67	0.07	0.41	0.39	0.19	1.40	0.65	10.39	5.22	30.39	9.20	123.20	34.96	219.22	3.81	215.41	0.01
29	0.14	6.82	0.05	0.60	1.22	0.67	9.53	3.82	54.48	23.79	125.73	31.66	363.04	88.19	709.74	9.50	700.24	0.02
30	0.07	9.01	0.07	0.48	1.40	0.42	9.09	4.19	66.73	33.63	194.10	52.41	620.67	150.41	1142.68	11.45	1131.23	0.01

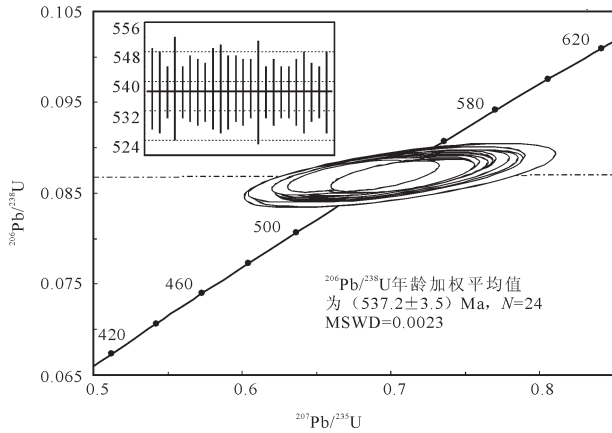


图5 长石山蛇绿岩中辉长岩(3573-2) 锆石U-Pb谐和图
Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagram of gabbro (3573-2) from Changshishan ophiolite

5 岩石地球化学特征

本研究用于岩石地球化学测试的样品均采自长石山地区, 其中蛇纹岩采集4件, 辉长岩采集5件, 玄武岩采集7件, 分析测试在咸阳市核工业203研究所分析测试中心完成, 分析项目包括主量元素、稀土元素和微量元素, 分析结果见表3。由于本区岩石普遍遭受不同程度的蚀变, 烧失量较大, 蛇纹岩的烧失量均大于12%, 辉长岩和玄武岩的烧失量基本都大于2%, 所以, 对这些样品的主量元素在去除烧失量后进行归一化, 下面的讨论和作图均按照归一化后的数据进行。

5.1 主量元素特征

蛇纹岩的烧失量普遍较大, 均大于12%, 去掉烧失量重新计算, 岩石的SiO₂含量为43.90%~45.92%, 平均为45.18%; TiO₂含量非常低, 为0.01%~0.06%, 平均为0.03%, 低于大洋中脊地幔的TiO₂含量(0.1%~0.4%), 而符合消减带之上的蛇绿岩中相应岩石的TiO₂含量(<0.1%)^[31]; MgO含量较高, 为43.83%~45.13%, 平均为44.24%, 在世界典型蛇绿岩中地幔方辉橄榄范围内(MgO=39.6%~48.4%), 而高于典型二辉橄榄岩(MgO=38.98%)^[32]; Na₂O和K₂O含量较低且变化大, 分别为0.08%~0.46%(平均为0.18%)和0.03%~1.13%(平均为0.31%); Al₂O₃含量变化较大, 为0.58%~2.69%, 平均1.19%; CaO含量较低, 为0.06%~0.25%, 平均为0.13%; TFe₂O₃含量在7.63%~9.59%, 平均为8.66%。

五件辉长岩样品的主量元素含量较稳定, 归一化后, 辉长岩的SiO₂含量为48.70%~50.70%, 在基性岩范围内, TiO₂=0.17%~0.21%, MgO=9.06%~10.89%, Na₂O=2.40%~3.55%, K₂O=0.23%~0.27%, Al₂O₃=15.72%~16.77%, CaO=10.49%~11.97%, 岩石整体具有低TiO₂(平均为0.19%)、贫K₂O(平均为0.25%)、富Na₂O(平均为3.02%)、高Al₂O₃(平均为16.33%)的特征, 而高Al是消减带典型的岩石类型^[33]。

玄武岩样品主量元素归一化后, SiO₂含量为48.95%~54.24%, 平均为51.13%, 属于基性岩类; TiO₂含量为0.75%~1.30%, 平均为1.04%, 类似于弧后盆地玄武岩(TiO₂为0.7%~2.0%)^[34]; MgO含量较高, 为4.46%~8.76%, 平均为7.02%; Na₂O含量为2.24%~3.65%, 平均为2.99%; K₂O含量变化较大, 为0.17%~1.95%, 平均为0.89%; Al₂O₃含量变化较大, 在13.11%~17.95%, 较高的Al含量暗示岩石可能形成于消减带环境; CaO含量为7.11%~11.29%, 平均为9.01%; TFe₂O₃含量为9.69%~14.90%, 平均为12.75%; P₂O₅含量为0.07%~0.26%, 平均为0.13%。

在Al₂O₃-CaO-MgO图解(图6-a)中, 蛇纹岩样品均落在变质橄榄岩区域内, 表明本区蛇纹岩的原岩为橄榄岩类, 所有辉长岩样品均落入镁铁堆积岩区域内, 反映了岩石的堆晶成因, 与野外特征相符。在Nb/Y-Zr/TiO₂×10⁻⁴图解(图6-b)中, 所有玄武岩样品点都落入亚碱性玄武岩区域, AFM图解(图6-c)显示样品主体为拉斑系列。

5.2 稀土、微量元素特征

蛇纹岩的稀土元素总量较低, ΣREE=5.01×10⁻⁶~11.67×10⁻⁶, 平均为7.31×10⁻⁶; ΣLREE=4.51×10⁻⁶~10.07×10⁻⁶, ΣHREE=0.29×10⁻⁶~1.60×10⁻⁶, ΣLREE/ΣHREE=6.31×10⁻⁶~18.94×10⁻⁶, (La/Yb)_N=13.14~49.44, (La/Sm)_N=3.25~7.55, (Gd/Yb)_N=1.76~5.38, 表明岩石的稀土元素分馏明显, 轻稀土较重稀土富集, 且重稀土元素含量变化较大。4个蛇纹岩样品中, 有2个样品的δEu分别为0.32和0.35, 具有明显的Eu负异常, 2个样品的δEu分别为1.01和1.11, 无异常或略具正异常。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图中(图7-a), 配分曲线具开阔U形特征, 显示中稀土略微亏损, 轻稀土较重稀土略微富集。原始地幔标准化微量元素蛛网图(图7-b)总体具有左高右低的特征, 其中Cs、Rb、Ba等大离子亲石元

表3 长石山蛇绿岩的主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析数据
Table 3 Major element (%) and trace element (10^{-6}) data for Changshishan ophiolite

分析	1107-2-1	1107-2-2	1107-2-3	3573-1	3573-2	3573-3	3573-4	3573-5	3573-6	1099-1	1100-1	1101-1	3494-1	3494-2	3566-1	3566-2
项目	玄武岩															
	辉长岩															
	蛇纹岩															
SiO ₂	39.71	39.67	40.13	38.08	49.36	47.59	47.37	48.57	47.52	49.61	48.64	47.50	52.96	52.91	47.58	47.45
TiO ₂	0.02	0.02	0.01	0.05	0.17	0.20	0.18	0.18	0.17	1.24	1.07	0.99	0.74	0.76	1.12	1.13
Al ₂ O ₃	0.63	0.68	0.51	2.33	16.33	15.70	15.95	16.22	15.27	12.83	13.23	14.47	17.60	17.13	12.68	12.75
TFe ₂ O ₃	8.15	8.38	7.08	6.62	8.59	9.50	9.44	8.99	9.67	13.39	13.73	11.74	9.50	9.68	13.85	14.44
MnO	0.05	0.06	0.04	0.03	0.16	0.17	0.17	0.16	0.17	0.18	0.20	0.17	0.16	0.18	0.21	0.20
MgO	38.54	38.33	39.44	38.02	8.82	9.65	9.95	9.51	10.58	7.53	7.72	8.46	4.37	5.00	6.84	7.60
CaO	0.09	0.08	0.05	0.22	10.21	11.14	11.64	10.55	10.69	8.14	9.21	10.06	6.97	6.91	10.92	8.84
Na ₂ O	0.09	0.07	0.08	0.40	3.46	2.88	2.33	3.18	2.82	2.13	2.60	3.00	3.58	3.14	2.43	3.39
K ₂ O	0.03	0.04	0.03	0.98	0.24	0.25	0.22	0.26	0.25	0.16	0.20	0.15	1.91	1.59	1.02	1.05
P ₂ O ₅	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.09	0.08	0.07	0.25	0.25	0.08	0.08
LOI	12.43	12.18	12.46	12.87	2.32	2.61	2.42	2.08	2.56	4.44	3.00	3.07	1.81	2.67	3.07	3.25
TOTAL	99.76	99.52	99.85	99.62	99.67	99.70	99.69	99.72	99.71	99.74	99.68	99.68	99.85	100.22	99.80	100.18
FeO	1.85	2.53	1.66	3.46	7.17	7.91	7.85	7.21	7.87	8.72	9.60	9.01	4.58	5.20	10.60	11.08
Fe ₂ O ₃	7.00	6.50	6.02	3.51	1.58	1.77	1.77	1.98	2.00	5.19	4.59	3.03	5.47	4.98	3.61	3.73
La	1.32	1.52	1.35	3.05	4.73	5.29	3.98	16.80	10.30	8.04	4.91	4.73	6.10	5.56	5.50	6.01
Ce	2.44	2.96	2.01	3.60	8.61	9.55	7.58	31.10	18.80	17.60	12.10	11.00	13.50	12.30	11.00	11.70
Pr	0.26	0.29	0.17	0.43	0.91	0.98	0.72	3.32	1.89	2.16	1.69	1.43	1.67	1.61	1.72	1.76
Nd	1.23	1.43	0.74	2.34	3.29	3.72	2.97	10.60	6.39	9.54	7.98	6.93	8.05	7.09	8.95	9.56
Sm	0.11	0.15	0.22	0.59	0.63	0.77	0.70	1.26	0.76	3.28	2.48	2.02	2.26	2.22	2.38	2.71
Eu	0.04	0.06	0.02	0.06	0.28	0.34	0.32	0.47	0.25	0.81	0.68	0.67	0.71	0.71	0.82	1.02
Gd	0.12	0.17	0.20	0.43	0.78	0.92	0.82	1.35	0.90	3.62	2.69	2.66	2.43	2.75	2.99	3.27
Tb	0.01	0.02	0.02	0.06	0.12	0.15	0.12	0.14	0.13	0.58	0.44	0.38	0.44	0.43	0.44	0.46
Dy	0.04	0.02	0.14	0.53	0.98	1.06	1.12	1.10	0.88	4.51	3.35	3.06	3.27	3.42	3.91	3.76
Ho	0.02	0.02	0.02	0.05	0.18	0.19	0.19	0.19	0.17	0.91	0.62	0.60	0.54	0.60	0.68	0.69

续表3

分析项目	蛇纹岩										辉长岩										玄武岩											
	1107-2-1	1107-2-2	1107-2-3	3573-1	3573-2	3573-3	3573-4	3573-5	3573-6	1099-1	1100-1	1101-1	3494-1	3494-2	3566-1	3566-2	1107-2-1	1107-2-2	1107-2-3	3573-1	3573-2	3573-3	3573-4	3573-5	3573-6	1099-1	1100-1	1101-1	3494-1	3494-2	3566-1	3566-2
Er	0.05	0.14	0.03	0.29	0.63	0.70	0.69	0.61	0.55	3.03	1.83	1.76	1.93	1.98	2.13	2.32	0.05	0.14	0.03	0.29	0.63	0.70	0.69	0.61	0.55	3.03	1.83	1.76	1.93	1.98	2.13	2.32
Tm	0.02	0.01	0.01	0.07	0.08	0.10	0.09	0.09	0.07	0.43	0.26	0.26	0.28	0.26	0.31	0.37	0.02	0.01	0.01	0.07	0.08	0.10	0.09	0.09	0.07	0.43	0.26	0.26	0.28	0.26	0.31	0.37
Yb	0.02	0.08	0.07	0.13	0.62	0.58	0.71	0.75	0.58	2.47	1.92	1.62	1.89	1.83	1.85	2.33	0.02	0.08	0.07	0.13	0.62	0.58	0.71	0.75	0.58	2.47	1.92	1.62	1.89	1.83	1.85	2.33
Lu	0.02	0.03	0.02	0.04	0.09	0.11	0.10	0.10	0.08	0.32	0.27	0.22	0.20	0.23	0.27	0.29	0.02	0.03	0.02	0.04	0.09	0.11	0.10	0.10	0.08	0.32	0.27	0.22	0.20	0.23	0.27	0.29
δEu	1.01	1.11	0.32	0.35	1.22	1.23	1.29	1.10	0.92	0.72	0.80	0.88	0.92	0.88	0.94	1.05	1.01	1.11	0.32	0.35	1.22	1.23	1.29	1.10	0.92	0.72	0.80	0.88	0.92	0.88	0.94	1.05
δCe	0.95	1.01	0.87	0.67	0.94	0.94	1.00	0.95	0.96	1.00	1.01	1.01	1.00	0.98	0.86	0.86	0.95	1.01	0.87	0.67	0.94	0.94	1.00	0.95	0.96	1.00	1.01	1.01	1.00	0.98	0.86	0.86
(La/Yb) _N	49.44	13.14	13.38	15.82	5.14	6.15	3.78	15.10	11.97	2.19	1.72	1.97	2.18	2.05	2.00	1.74	49.44	13.14	13.38	15.82	5.14	6.15	3.78	15.10	11.97	2.19	1.72	1.97	2.18	2.05	2.00	1.74
(La/Sm) _N	7.55	6.37	3.86	3.25	4.72	4.32	3.58	8.39	8.53	1.54	1.25	1.47	1.70	1.58	1.45	1.40	7.55	6.37	3.86	3.25	4.72	4.32	3.58	8.39	8.53	1.54	1.25	1.47	1.70	1.58	1.45	1.40
(Gd/Yb) _N	5.38	1.76	2.37	2.67	1.02	1.28	0.93	1.45	1.25	1.18	1.13	1.32	1.04	1.21	1.30	1.13	5.38	1.76	2.37	2.67	1.02	1.28	0.93	1.45	1.25	1.18	1.13	1.32	1.04	1.21	1.30	1.13
Ba	17.70	25.80	18.70	25.40	117.90	157.00	181.80	131.60	131.00	329.90	380.70	100.40	250.50	86.50	72.70	138.70	17.70	25.80	18.70	25.40	117.90	157.00	181.80	131.60	131.00	329.90	380.70	100.40	250.50	86.50	72.70	138.70
Cs	0.40	0.98	0.24	0.74	2.37	4.66	2.24	3.23	3.00	0.81	0.91	1.18	0.94	0.81	0.96	0.99	0.40	0.98	0.24	0.74	2.37	4.66	2.24	3.23	3.00	0.81	0.91	1.18	0.94	0.81	0.96	0.99
Cr	3409.60	3224.00	2620.50	2255.80	21.00	25.00	22.60	21.30	21.30	181.60	208.20	325.00	205.80	237.60	132.00	133.10	3409.60	3224.00	2620.50	2255.80	21.00	25.00	22.60	21.30	21.30	181.60	208.20	325.00	205.80	237.60	132.00	133.10
Hf	0.18	0.25	0.26	2.94	0.56	0.42	0.42	0.54	0.35	2.05	1.75	1.77	1.22	1.41	2.02	1.47	0.18	0.25	0.26	2.94	0.56	0.42	0.42	0.54	0.35	2.05	1.75	1.77	1.22	1.41	2.02	1.47
Ni	854.90	1293.60	1712.00	1655.80	26.60	33.20	30.90	32.00	32.80	82.30	97.60	124.10	68.60	86.40	73.20	83.80	854.90	1293.60	1712.00	1655.80	26.60	33.20	30.90	32.00	32.80	82.30	97.60	124.10	68.60	86.40	73.20	83.80
Ga	6.20	6.50	7.30	6.80	12.90	13.00	13.30	13.00	12.70	21.50	19.60	20.70	17.40	19.10	17.40	14.20	6.20	6.50	7.30	6.80	12.90	13.00	13.30	13.00	12.70	21.50	19.60	20.70	17.40	19.10	17.40	14.20
Rb	17.40	15.60	19.40	17.10	11.60	8.90	8.50	9.80	7.90	4.80	4.60	5.30	9.60	0.40	2.50	3.10	17.40	15.60	19.40	17.10	11.60	8.90	8.50	9.80	7.90	4.80	4.60	5.30	9.60	0.40	2.50	3.10
Sr	11.80	15.90	10.20	20.80	471.70	494.30	450.80	508.80	417.50	70.80	151.40	206.30	313.90	385.20	82.20	111.30	11.80	15.90	10.20	20.80	471.70	494.30	450.80	508.80	417.50	70.80	151.40	206.30	313.90	385.20	82.20	111.30
Y	0.67	0.77	0.97	3.18	5.12	5.83	5.28	5.24	4.42	37.35	22.90	22.30	19.30	19.70	19.40	21.20	0.67	0.77	0.97	3.18	5.12	5.83	5.28	5.24	4.42	37.35	22.90	22.30	19.30	19.70	19.40	21.20
Nb	0.89	2.63	1.54	13.20	7.43	9.00	37.70	27.90	8.20	11.20	6.69	5.92	8.52	7.96	3.93	3.06	0.89	2.63	1.54	13.20	7.43	9.00	37.70	27.90	8.20	11.20	6.69	5.92	8.52	7.96	3.93	3.06
Ta	0.52	0.93	1.28	2.95	1.01	0.96	0.38	1.04	0.87	2.43	1.76	1.15	2.24	0.93	0.67	0.50	0.52	0.93	1.28	2.95	1.01	0.96	0.38	1.04	0.87	2.43	1.76	1.15	2.24	0.93	0.67	0.50
W	0.73	1.22	1.51	0.55	2.50	1.51	1.22	1.31	0.91	2.11	0.54	0.47	0.71	0.64	0.45	0.45	0.73	1.22	1.51	0.55	2.50	1.51	1.22	1.31	0.91	2.11	0.54	0.47	0.71	0.64	0.45	0.45
Pb	3.40	6.60	5.90	5.40	201.00	132.00	96.80	89.40	71.60	11.80	11.60	15.40	13.40	27.60	8.20	3.80	3.40	6.60	5.90	5.40	201.00	132.00	96.80	89.40	71.60	11.80	11.60	15.40	13.40	27.60	8.20	3.80
Th	0.62	8.30	4.77	0.92	19.00	15.80	11.00	14.40	11.70	5.28	4.31	1.71	3.14	2.22	1.37	0.97	0.62	8.30	4.77	0.92	19.00	15.80	11.00	14.40	11.70	5.28	4.31	1.71	3.14	2.22	1.37	0.97
Zr	8.20	9.00	8.20	14.80	3.13	4.92	2.25	2.34	1.66	88.40	79.30	69.50	58.80	74.90	64.80	61.00	8.20	9.00	8.20	14.80	3.13	4.92	2.25	2.34	1.66	88.40	79.30	69.50	58.80	74.90	64.80	61.00

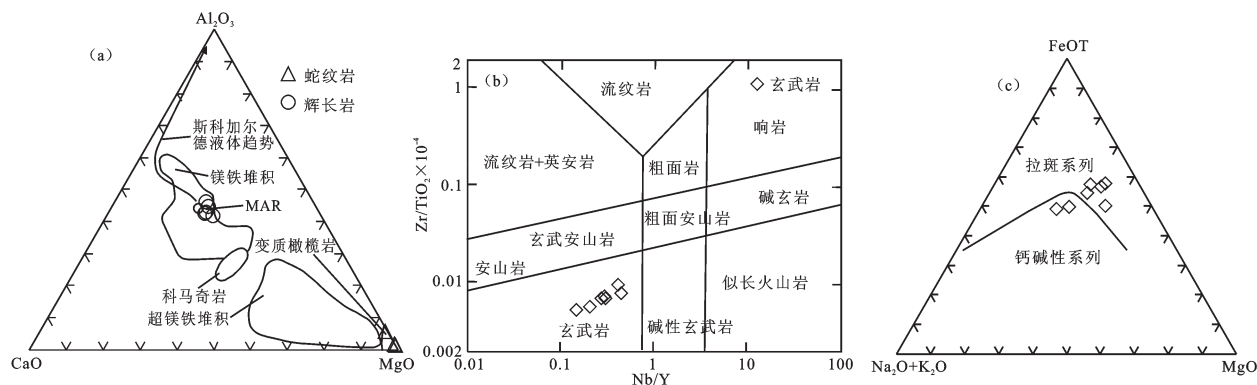


图6 长石山蛇绿岩 Al_2O_3 - CaO - MgO 图解(据[32])、 $\text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 10^{-4}$ - Nb/Y 图解(据[35])、AFM图解(据[36])
Fig.6 Al_2O_3 - CaO - MgO diagram (after reference [32]), $\text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 10^{-4}$ - Nb/Y diagram (after reference [35]) and AFM diagram (after reference [36]) of Changshishan ophiolite

素明显富集, K、Ti、P 亏损。

辉长岩的稀土元素总量相对低, 轻稀土含量变化范围大, $\sum \text{REE} = 21.93 \times 10^{-6} \sim 67.88 \times 10^{-6}$, $\sum \text{LREE} = 16.27 \times 10^{-6} \sim 63.55 \times 10^{-6}$, $\sum \text{HREE} = 3.36 \times 10^{-6} \sim 4.33 \times 10^{-6}$, $\sum \text{LREE} / \sum \text{HREE} = 4.24 \times 10^{-6} \sim 14.69 \times 10^{-6}$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 3.78 \sim 15.10$, $(\text{La}/\text{Sm})_N = 3.58 \sim 8.53$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 0.93 \sim 1.45$ 。球粒陨石标准化稀土元素配分曲线呈明显的右倾型(图7-c), 显示轻稀土较重稀土富集, 稀土含量较E-MORB稍低。5个样品中有4个样品的 δEu 值大于1.1, 显示Eu正异常, 1个样品基本无Eu异常。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图7-d)上可以看出, 整体呈左高右低的斜坡, Cs、Ba、Th、Sr等元素较富集, K、Rb、P、Ti相对亏损。

玄武岩的稀土总量偏低, $\sum \text{REE} = 37.34 \times 10^{-6} \sim 57.30 \times 10^{-6}$, 平均值为 44.19×10^{-6} ; 轻稀土 $\sum \text{LREE} = 26.78 \times 10^{-6} \sim 41.43 \times 10^{-6}$, 平均为 31.85×10^{-6} , 重稀土 $\sum \text{HREE} = 10.56 \times 10^{-6} \sim 15.87 \times 10^{-6}$, $\sum \text{LREE} / \sum \text{HREE} = 2.41 \sim 2.94$, 平均为 2.59, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 1.72 \sim 2.19$, $(\text{La}/\text{Sm})_N = 1.25 \sim 1.70$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.04 \sim 1.32$, 表明轻重稀土分异不太明显, 但轻稀土较重稀土略微富集。 $\delta\text{Eu} = 0.72 \sim 1.05$, 平均为 0.88, 总体具有微弱的负铕异常。球粒陨石标准化稀土配分曲线显示总体为轻稀土略有富集的右倾曲线(图7-e), 与N-MORB明显不同, 而与E-MORB极为相似。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图7-f), Cs、Rb、Ba、Th等大离子亲石元素相对富集, K相对亏损, 且变化较大; 高场强元素含量变化较小, 是原始地幔的10倍左右, Nb轻度亏损, P具有明显负异常。微量元素

含量整体高于原始地幔, 表现为略向右倾的近平坦型。

6 讨论

6.1 形成环境

玄武岩是蛇绿岩地球化学研究的最佳对象^[38], 因此更适合用来判别蛇绿岩的形成环境。本文根据长石山蛇绿岩中玄武岩的地球化学特征, 并结合构造环境判别图和区域地质资料, 综合讨论长石山蛇绿岩的形成构造环境。

长石山蛇绿岩中玄武岩具有轻稀土较重稀土富集的特征, 稀土含量与Sun et al.^[37]给出的E-MORB相当, 在球粒陨石标准化稀土配分图(图7-e)中, 玄武岩的配分曲线也与E-MORB一致。岩石的Ce/Zr(0.15~0.23, 平均为0.18)和Zr/Y(2.34~3.80, 平均3.14)比值与E-MORB的特征(Ce/Zr为0.21, Zr/Y为3.32)^[37]相似。在Ti/100-Zr-Y×3图解(图8-a)中, 样品点都落入B区, 即洋脊玄武岩区域内, 在Nb×2-Zr/4-Y×3图解(图8-b)中, 样品点亦落入洋脊玄武岩(P-MORB和N-MORB)区域内; 在La/Yb、Sm/Y、Zr/Y、Y/Yb与Nb/Yb的关系图解(图9)中, 所有玄武岩样品点都落入地幔序列, 且靠近E-MORB区域, 显示E-MORB特征, 表明岩石可能起源于E-MORB型富集地幔。

然而, 微量元素蛛网图(图7-f)显示, 岩石相对富集Cs、Rb、Ba、Th等大离子亲石元素, 高场强元素呈平坦型分布, Nb轻度亏损, P明显亏损, 指示成岩过程中可能有消减带流体或地壳物质参与^[42], 且Hf/

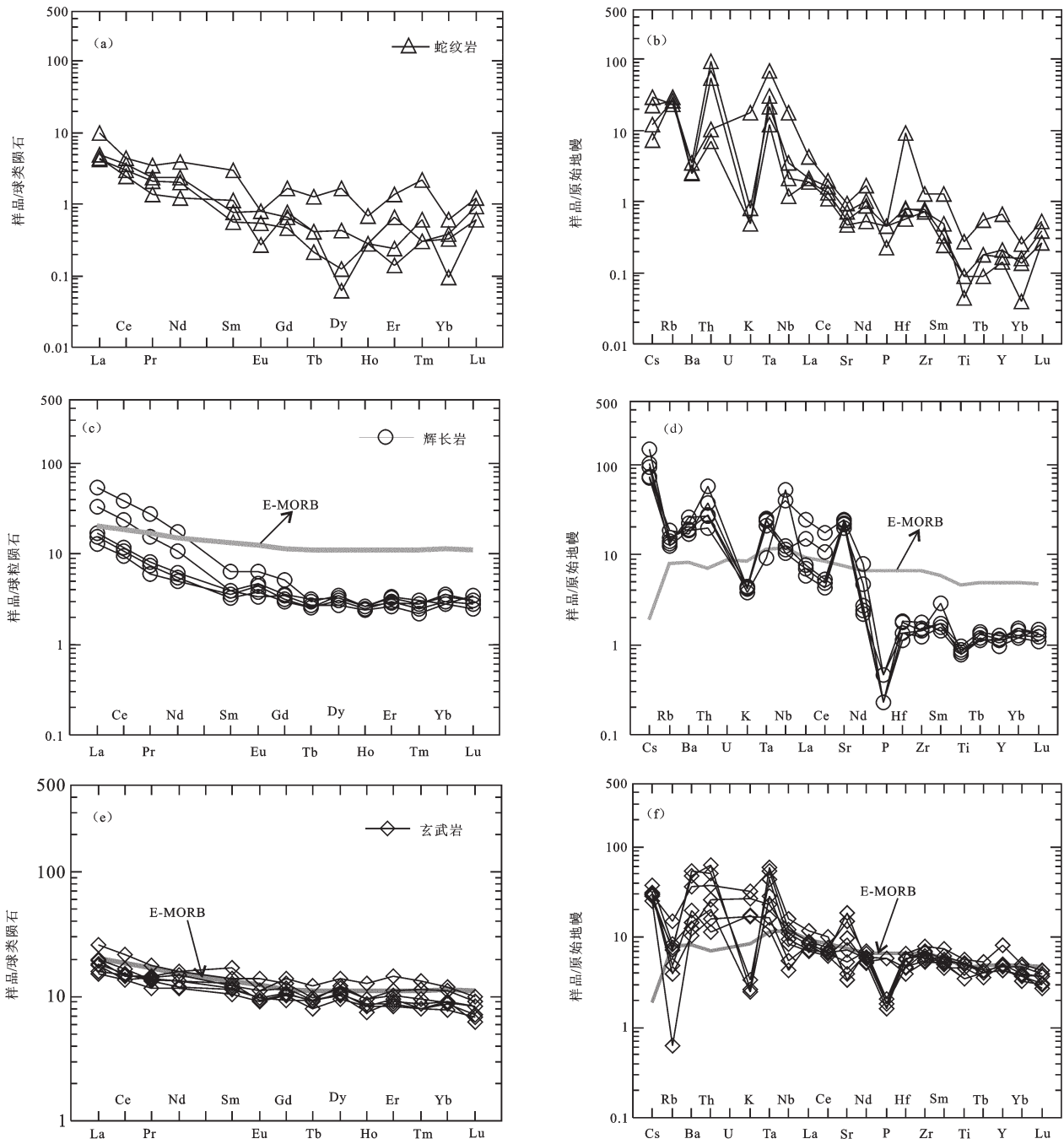


图7长石山蛇绿岩的球粒陨石标准化REE配分模式图(球粒陨石标准化值据[30])和原始地幔标准化微量元素蛛网图(原始地幔标准化值及E-MORB值据[37])

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns (chondrite data for normalization after reference [30]) and trace element spider diagram (values of primitive mantle and E-MORB after reference [37]) of Changshishan ophiolite

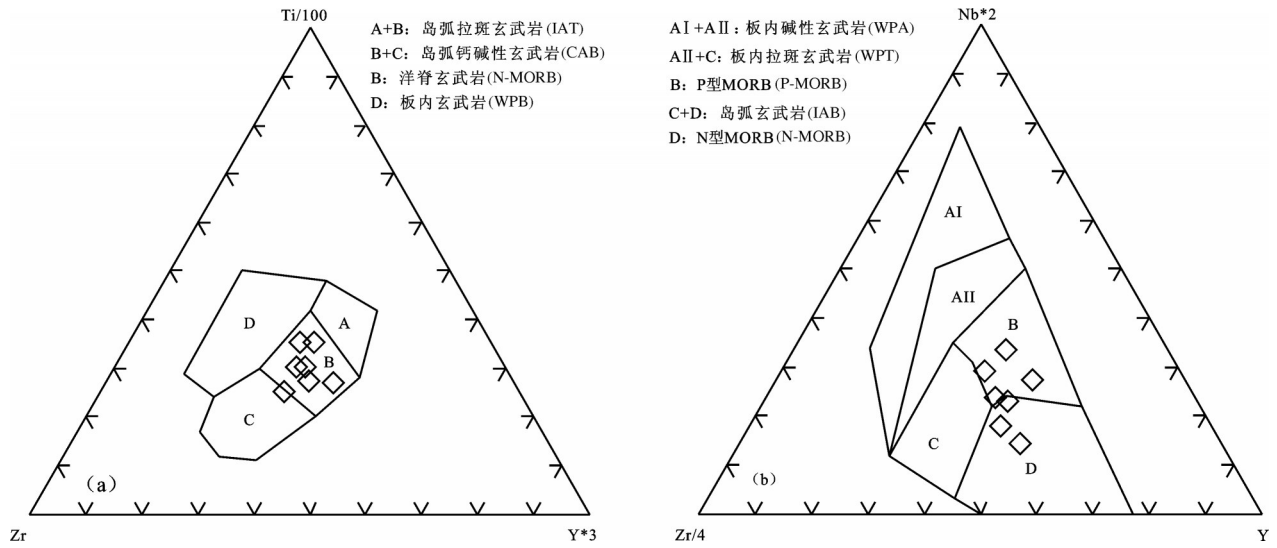


图8 长石山蛇绿岩中玄武岩的Ti/100-Zr-Y×3图解(a, 据[39])和Nb×2-Zr/4-Y×3图解(b, 据[40])
 Fig. 8 Ti/100-Zr-Y×3 diagram (after reference [39]) and Nb×2-Zr/4-Y×3 diagram (after reference [40]) of basalt from Changshishan ophiolite

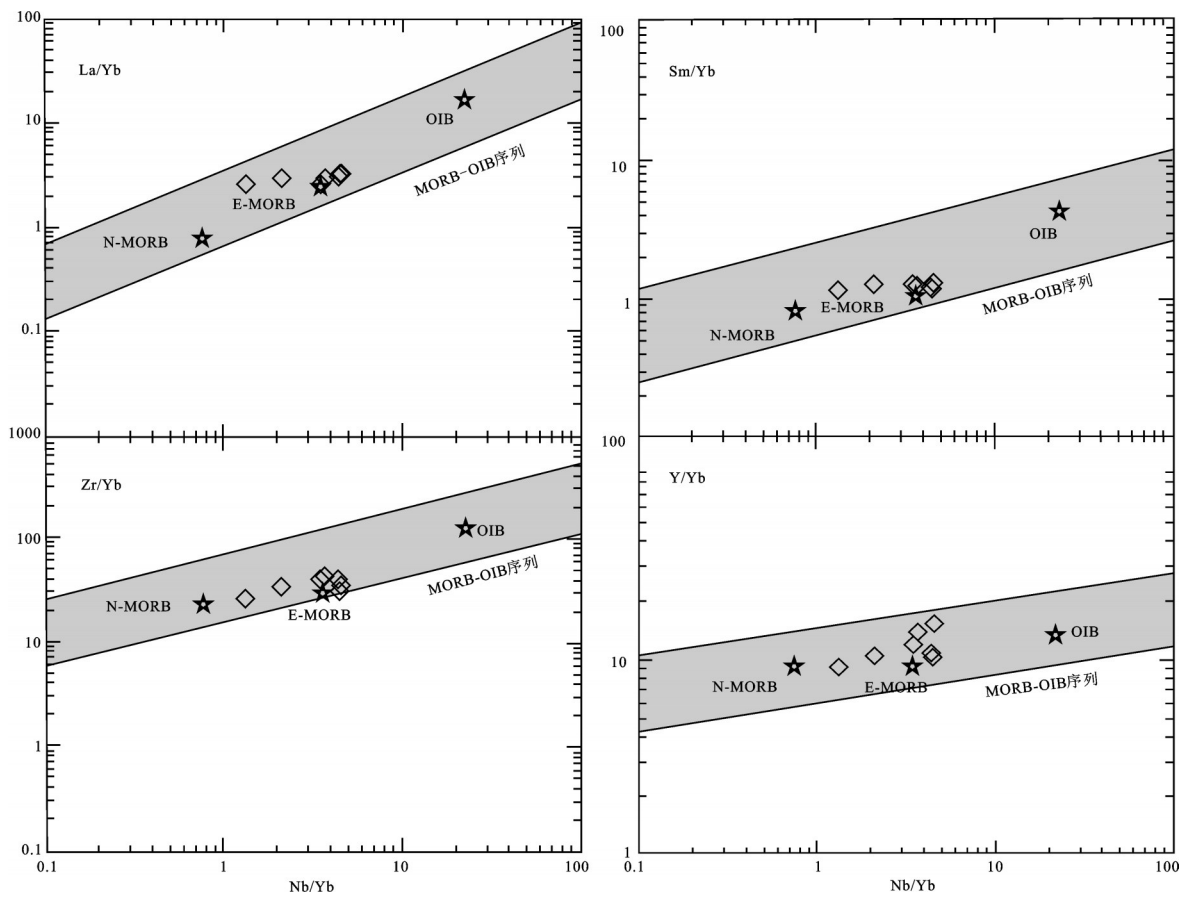


图9 长石山蛇绿岩中玄武岩的源区判别图解(据[41])
 Fig. 9 Magma derivation plots of basalt from the Changshishan ophiolite (after reference [41])

Th=0.39~1.52(<8), Th/Yb=0.42~2.24(>0.1), Th/Nb 均大于 0.07(0.28~0.64), Nb/La 均小于 0.8(0.02~0.09), 显示出岛弧钙碱性玄武岩特征^[43]。在 TiO₂-FeO^T/MgO 图解(图 10-a) 中, 样品点主要落入岛弧玄武岩区域内, 且具有与 MORB 过渡的特征; 在 Hf/3-Th-Nb/16 图解(图 10-b) 中, 样品点落入岛弧玄武岩区域内; 在 V-Ti 图解(图 11-a) 中, 样品点主要投于 MORB 与岛弧拉斑玄武岩的重合区域或界线附近, 暗示岩石具 MORB 与岛弧的双重特征。

上述地球化学特征表明长石山蛇绿岩中玄武岩兼具 E-MORB 和 IAB 特征, 而这种既有 MORB

特征又有岛弧玄武岩特征的岩石, 通常为消减带之上的弧后盆地次级扩张形成的弧后盆地玄武岩所特有^[46-47], 在 Zr-V/Ti 图解(图 11-b) 中, 样品基本都落入弧后盆地玄武岩区域内, 进一步指示长石山蛇绿岩中玄武岩形成于弧后盆地环境。

另外, 位于东昆中构造带南部的布青山—阿尼玛卿构造带中发育早古生代 MOR 型蛇绿岩, 是原特提斯洋洋壳的残迹^[48]; 都兰可可沙地区镁铁质—超镁铁质杂岩、科科可特镁铁质岩年龄分别为 (509.4±6.8) Ma^[8]和(501±7) Ma^[21], 均形成于弧后盆地或小洋盆环境; 与长石山蛇绿岩同属于东昆中构

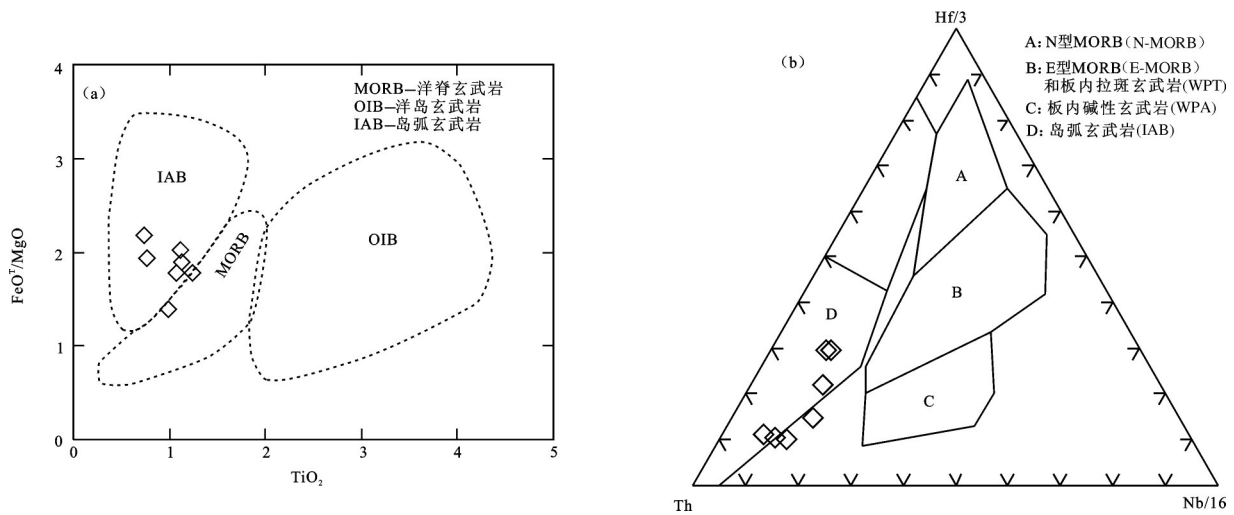


图 10 长石山蛇绿岩中玄武岩的 FeO^T/MgO-TiO₂ 图解(据[39]) 和 Hf/3-Th-Nb/16 图解(据[44])
Fig. 10 FeO^T/MgO-TiO₂ diagram (after reference [39]) and Hf/3-Th-Nb/16 diagram (after reference [44]) of basalt from the Changshishan ophiolite

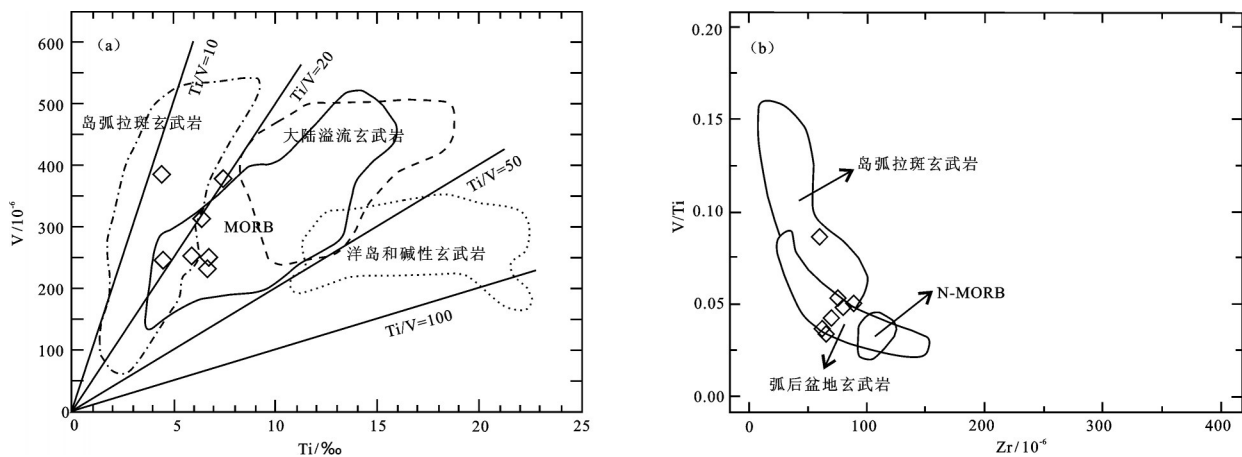


图 11 长石山蛇绿岩中玄武岩的 V-Ti 图解(据[45]) 和 V/Ti-Zr 图解(据[44])
Fig. 11 V-Ti diagram (after reference [45]) and V/Ti-Zr diagram (after reference [44]) of basalt from the Changshishan ophiolite

造带的清水泉蛇绿岩、乌妥蛇绿岩以及曲什昂蛇绿岩都为早古生代弧后盆地型蛇绿岩(裴先治, 未刊), 这些区域地质资料也印证了长石山蛇绿岩的构造属性。

综上所述, 长石山蛇绿岩形成于弧后盆地环境, 是位于俯冲消减带之上的弧后盆地扩张的产物, 为SSZ型蛇绿岩, 与布青山—阿尼玛卿原特提斯洋的向北俯冲密切相关。

6.2 构造意义

新元古代末期, 受控于Rodinia超大陆裂解事件下的全球统一构造和动力学机制, 东昆仑地区整体处于离散状态。东昆仑金水口南形成于大陆裂谷环境的变余辉长岩((796±41) Ma)^[49]、小庙地区形成于大陆拉张带或裂谷初期环境的基性岩脉((733.6±6.6) Ma)^[50]就是对Rodinia超大陆裂解事件的响应, 表明至少从(796±41) Ma开始, 东昆仑地区已经开始裂解。随着东昆仑地区进一步拉张裂解和成洋, 形成了以苦海地区洋岛型辉长岩((555±9) Ma)^[51]、阿尼玛卿玛积雪山地区早古生代洋脊型辉长岩((535±10) Ma)^[51]、布青山地区得力斯坦MOR型蛇绿岩((516.4±6.3) Ma)^[48]、布青山地区得力斯坦东可可尔塔MOR型蛇绿岩(452~467 Ma, 裴先治, 未刊)为代表的原特提斯洋壳, 洋壳扩张时间可能较长(持续至452 Ma左右)。

在洋壳扩张的同时, 布青山—阿尼玛卿原特提斯洋的北缘在早寒武世时已经开始向北俯冲消减, 在东昆中地区出现拉张的局限小洋盆或弧后盆地。本文研究的长石山蛇绿岩中辉长岩的锆石U-Pb年龄为(537.2±3.5) Ma, 蛇绿岩形成环境为弧后盆地, 表明在537 Ma左右, 原特提斯洋向北俯冲, 导致东昆中长石山一带已出现弧后拉张的小洋盆。伴随俯冲作用, 东昆中地区持续拉张形成了清水泉蛇绿岩((522.3±4.1) Ma; (518±3) Ma)^[16-17]、塔妥蛇绿岩((521.9±3.2) Ma, 裴先治, 未刊)、曲什昂蛇绿岩((504.5±5.5) Ma, 裴先治, 未刊)等洋壳物质, 代表了弧后洋盆的持续扩张。分布于东昆仑东段的纳赤台岩群为一套变沉积—火山岩, 其变基性火山岩的锆石U-Pb年龄为(474.0±7.9) Ma, 形成环境为弧后盆地, 也很好地印证了东昆仑地区原特提斯洋洋壳向北俯冲导致的弧后扩张作用^[23]。

晚奥陶世—早志留世, 原特提斯主洋盆以及以

清水泉蛇绿岩、长石山蛇绿岩为代表的弧后盆地以俯冲消减为主。布青山白日切特地区发育一套中酸性岩浆岩, 其中岛弧型花岗闪长岩锆石U-Pb年龄为(441±6) Ma, 岛弧型流纹斑岩的锆石U-Pb年龄为(438±3) Ma^[52], 布青山地区亿可哈拉尔花岗闪长岩具有典型埃达克岩地球化学特征, 锆石U-Pb年龄为(436.9±5.7) Ma^[53], 香日德南部已发生变形变质的岛弧型闪长岩的锆石U-Pb年龄为(446.5±9.1) Ma^[54], 清水泉地区辉绿岩脉的锆石U-Pb年龄为(436.4±1.2) Ma^[55], 本项目在长石山混杂岩带以北的克和特地区获得岛弧型花岗闪长岩的锆石U-Pb年龄为(454.3±3.6) Ma(未刊资料), 这些均为洋壳俯冲阶段的构造岩浆响应。洋壳的俯冲削刮作用将蛇绿岩与弧后盆地中发育的沉积—火山岩混杂堆积在一起。

中一晚志留世以后东昆仑地区进入碰撞造山和陆内演化阶段, 碰撞造山作用使蛇绿岩等构造侵位, 在长石山地区形成了长石山蛇绿构造混杂岩带。长石山混杂岩带北部拉龙一带同碰撞花岗岩体的锆石U-Pb年龄为(423±4.6) Ma(项目未刊资料), 东昆仑东段和勒冈那仁A型碱长花岗岩的锆石U-Pb年龄为(425Ma±6.7) Ma^[56], 东昆仑东段跃进山岩体中花岗闪长岩和辉长岩的锆石U-Pb年龄分别为(407±3) Ma和(406±3) Ma^[57], 东昆仑冰沟A型花岗岩的锆石U-Pb年龄为(391±3) Ma^[58], 东昆中断裂带高角度逆冲变形年龄为426~408 Ma^[59], 都是东昆仑地区在早古生代碰撞造山的有力证据。陆露等^[60]报道的昆中断裂带两个同构造花岗斑岩的锆石U-Pb年龄分别为(408.5±2.3) Ma和(391.2±3.4) Ma, 是东昆仑造山带在加里东造山晚期陆内构造变形阶段的产物。早泥盆世契盖苏组伸展型磨拉石组合标志着早古生代构造旋回的结束和晚古生代构造旋回的开始。

7 结 论

(1) 新发现的长石山蛇绿岩主要由蛇纹岩、辉长岩、辉绿岩、玄武岩以及含泥炭硅质岩组成。

(2) 锆石U-Pb年代学研究结果表明, 长石山蛇绿岩中辉长岩的结晶年龄为(537.2±3.5) Ma, 代表了长石山蛇绿岩的形成时代, 即早寒武世。

(3) 岩石地球化学研究显示, 长石山蛇绿岩中蛇

纹岩、辉长岩以及玄武岩均不同程度的具有俯冲消减带岩石特征,尤其是玄武岩具有E-MORB与IAB的双重特征。长石山蛇绿岩形成于弧后盆地环境,为SSZ型蛇绿岩,与布青山—阿尼玛卿原特提斯洋壳的向北俯冲密切相关。

致谢:审稿专家及责任编辑杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见,在此一并致以诚挚的谢意!

参考文献(References):

- [1] 许志琴,杨经绥,李海兵,等.中央造山带早古生代地体构架与高压/超高压变质带的形成[J].地质学报,2006,80(12):1793-1806.
Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, et al. The Early Palaeozoic terrane framework and the formation of the high-pressure (HP) and ultra-high pressure (UHP) metamorphic belts at the Central Orogenic Belt (COB) [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(12): 1793-1806 (in Chinese with English abstract).
- [2] 杨经绥,许志琴,马昌前,等.复合造山作用和中国中央造山带的科学问题[J].中国地质,2010,37(1):1-11.
Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Ma Changqian, et al. Compound orogeny and scientific problems concerning the Central Orogenic Belt of China [J]. *Geology in China*, 2010, 37(1): 1-11 (in Chinese with English abstract).
- [3] 刘彬,马昌前,蒋红安,等.东昆仑早古生代洋壳俯冲与碰撞造山作用的转换:来自胡晓钦镁铁质岩石的证据[J].岩石学报,2013,29(6):2093-2106.
Liu Bin, Ma Changqian, Jiang Hongan, et al. Early Paleozoic tectonic transition from ocean subduction to collisional orogeny in the Eastern Kunlun region: Evidence from Huxiaoqin mafic rocks [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(6): 2093-2106 (in Chinese with English abstract).
- [4] 杨杰,裴先治,李瑞保,等.东昆仑南缘布青山地区哈尔郭勒玄武岩地球化学特征及其地质意义[J].中国地质,2014,41(2):335-350.
Yang Jie, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. Geochemical characteristics and geological implications of Haerguole basalt in Buqingshan area on the southern margin of East Kunlun Mountains [J]. *Geology in China*, 2014, 41(2): 335-350 (in Chinese with English abstract).
- [5] 孔会磊,李金超,黄军,等.东昆仑小圆山铁多金属矿区斜长花岗岩锆石U-Pb测年、岩石地球化学及找矿意义[J].中国地质,2015,42(3):521-532.
Kong Huilei, Li Jinchao, Huang Jun, et al. Zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of the plagiogranite porphyry from the Xiaoyuanshan iron-polymetallic ore district in East Kunlun Mountains [J]. *Geology in China*, 2015, 42(3): 521-532 (in Chinese with English abstract).
- [6] 张勇,苏生顺,白生龙,等.东昆仑别里赛北铁矿床石英闪长岩LA-ICP-MS锆石U-Pb测年、地球化学及其地质意义[J].中国地质,2015,42(3):663-676.
Zhang Yong, Su Shengshun, Bai Shenglong, et al. Geochemistry, LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geological significance of quartz diorite in the Bielisaibe iron ore deposit, East Kunlun Mountains, Qinghai Province [J]. *Geology in China*, 2015, 42(3): 663-676 (in Chinese with English abstract).
- [7] 殷鸿福,张克信,陈能松,等.中华人民共和国区域地质调查报告:冬给措纳湖幅(I47C001002),1:250000 [R].武汉:中国地质大学出版社,2003:1-457.
Yin Hongfu, Zhang Kexin, Chen Nengsong, et al. The People's Republic of China Regional Geological Report: Donggi Congang Hu Map (I47C001002), Scale: 1: 250000 [R]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2003: 1-457 (in Chinese).
- [8] 王国灿,张克信,梁斌,等.东昆仑造山带结构及构造岩片组合[J].地球科学——中国地质大学学报,1997,23(4):352-356.
Wang Guocan, Zhang Kexin, Liang Bin, et al. Texture and tectonic slices of the Eastern Kunlun Orogenic Belt [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1997, 23(4): 352-356 (in Chinese with English abstract).
- [9] 朱云海,张克信,王国灿,等.东昆仑复合造山带蛇绿岩、岩浆岩及构造岩浆演化[M].武汉:中国地质大学出版社,2002:104-105.
Zhu Yunhai, Zhang Kexin, Wang Guocan, et al. Evolution of Ophiolite, Magma and Tectonic Magma in Eastern Kunlun Compound Orogenic Belt [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2002: 104-105 (in Chinese).
- [10] 张亚峰,裴先治,丁仁平,等.东昆仑都兰县可可沙地区加里东期石英闪长岩锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄及其意义[J].地质通报,2010,29(1):79-85.
Zhang Yafeng, Pei Xianzhi, Ding Saping, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of quartz diorite at the Kekesha area of Dulan County, eastern section of the East Kunlun orogenic belt, China and its significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(1): 79-85 (in Chinese with English abstract).
- [11] 冯建赞,裴先治,于书伦,等.东昆仑都兰可可沙地区镁铁-超镁铁质杂岩的发现及其LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄[J].中国地质,2010,37(1):28-37.
Feng Jianyan, Pei Xianzhi, Yu Shulun, et al. The discovery of the mafic-ultramafic mélange in Kekesha area of Dulan County, East Kunlun region, and its LA-ICP-MS zircon U-Pb age [J]. *Geology in China*, 2010, 37(1): 28-37 (in Chinese with English abstract).
- [12] 刘战庆,裴先治,李瑞保,等.东昆仑南缘布青山构造混杂岩带的地质特征及大地构造意义[J].地质通报,2011,30(8):1182-1195.
Liu Zhanqing, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. Geological characteristics of the Buqingshan tectonic mélange belt in the southern margin of East Kunlun and its tectonic implications [J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(8): 1182-1195 (in Chinese with English abstract).

- Chinese with English abstract).
- [13] 陈国超, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑造山带晚三叠世岩浆混合作用: 以和勒冈希里克特花岗岩闪长岩体为例[J]. 中国地质, 2013, 40(4): 1044–1065.
Chen Guochao, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. Late Triassic magma mixing in the East Kunlun orogenic belt: A case study of Helegang Xilikete granodiorites [J]. *Geology in China*, 2013, 40(4): 1044–1065 (in Chinese with English abstract).
- [14] 高延林, 吴向农, 左国朝. 东昆仑山清水泉蛇绿岩特征及其大地构造意义[J]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 1988, (21): 17–28.
Gao Yanlin, Wu Xiangnong, Zuo Guochao. The characters and tectonic significance of ophiolite first discovered in the East Kunlun area [J]. *The Journal of Xi'an Institute of Geology and Minerals Resources of Chinese Academy of Geological Sciences*, 1988, (21): 17–28 (in Chinese with English abstract).
- [15] 郑健康. 东昆仑区域构造的发展演化[J]. 青海地质, 1992, 1: 15–25.
Zheng Jiankang. Tectonic development and evolution in Eastern Kunlun area[J]. *Qinghai Geology*, 1992, 1: 15–25 (in Chinese).
- [16] Yang Jingsui, Robinson P T, Jiang Chunfa, et al. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and their tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 1996, 258: 299–305.
- [17] 陆松年, 于海峰, 赵凤清, 等. 青藏高原北部前寒武纪地质初探[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 1–125.
Lu Songnian, Yu Haifeng, Zhao Fengqing, et al. A Preliminary Study of Pre-Cambrian Geology in the North of Qinghai-Tibetan Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 1–125 (in Chinese).
- [18] 王国灿, 王青海, 简平, 等. 东昆仑前寒武纪基底变质岩系的锆石 SHRIMP 年龄及其构造意义[J]. 地学前缘, 2004, 11(4): 481–490.
Wang Guocan, Wang Qinghai, Jian Ping, et al. Zircon SHRIMP ages of Precambrian metamorphic basement rocks and their tectonic significance in the eastern Kunlun Mountains, Qinghai Province, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(4): 481–490 (in Chinese with English abstract).
- [19] 李怀坤, 陆松年, 相振群, 等. 东昆仑中部缝合带清水泉麻粒岩锆石 SHRIMP U–Pb 年代学研究[J]. 地学前缘, 2006, 13(6): 311–321.
Li Huaikun, Lu Songnian, Xiang Zhenqun, et al. SHRIMP U–Pb zircon age of the granulite from the Qingshuiquan area, central eastern Kunlun suture zone[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(6): 311–321 (in Chinese with English abstract).
- [20] 龙晓平, 王立社, 余能. 东昆仑山清水泉镁铁质-超镁铁质岩的地球化学特征[J]. 地质通报, 2004, 23(7): 664–669.
Long Xiaoping, Wang Lishe, Yu Neng. Geochemical characteristics of the Qingshuiquan mafic-ultramafic rocks, East Kunlun[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(7): 664–669 (in Chinese with English abstract).
- [21] Li Ruibao, Pei Xianzhi, Li Zuochen, et al. Geochemical features, age, and tectonic significance of the Kekekete mafic-ultramafic rocks, East Kunlun Orogen, China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2013, 87(5): 1319–1333.
- [22] 王国灿, 张天平, 梁斌, 等. 东昆仑造山带东段昆中复合蛇绿混杂岩带及“东昆中断裂带”地质涵义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1999, 24(2): 129–133.
Wang Guocan, Zhang Tianping, Liang Bin, et al. Composite ophiolitic mélange zone in central part of eastern section of eastern Kunlun orogenic zone and geological significance of “fault belt in central part of eastern section of eastern Kunlun orogenic zone” [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1999, 24(2): 129–133 (in Chinese with English abstract).
- [23] 陈有炳, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑东段纳赤台岩群变火山岩锆石 U–Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. 地学前缘, 2013, 20(6): 240–254.
Chen Youxin, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. Zircon U–Pb age, geochemical characteristics and tectonic significance of meta-volcanic rocks from Naij Tal Group, east section of East Kunlun[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(6): 240–254 (in Chinese with English abstract).
- [24] 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 等. 东昆仑东段下三叠统洪水川组沉积序列与盆地构造原型恢复[J]. 地质通报, 2015, 34(12): 2302–2314.
Li Ruibao, Pei Xianzhi, Li Zuochen, et al. The depositional sequence and prototype basin for Lower Triassic Hongshuichuan Formation in the eastern segment of East Kunlun Mountains [J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(12): 2302–2314 (in Chinese with English abstract).
- [25] 李小兵, 裴先治, 刘成军, 等. 东昆仑东段东昆中构造带韧性剪切作用及其地质意义[J]. 中国地质, 2014, 41(2): 419–436.
Li Xiaobing, Pei Xianzhi, Liu Chengjun, et al. Ductile shearing in the eastern segment of Central Kunlun tectonic belt and its geological significance[J]. *Geology in China*, 2014, 41(2): 419–436 (in Chinese with English abstract).
- [26] 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 东北地区新生代侵入岩的激光锆石探针 U–Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J]. 科学通报, 2003, 48(4): 1511–1520.
Yuan Honglin, Wu Fuyuan, Gao Shan, et al. Determination of U–Pb age and rare earth element concentration of zircon from Cenozoic intrusions in Northeastern China by Laser ablation ICP–MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(22): 2411–2421.
- [27] Yuan Honglin, Gao Shan, Liu Xiaoming, et al. Accurate U–Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation–inductively coupled plasma–mass spectrometry[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2004, 28(3): 353–370.
- [28] Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon:

- Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contrib, Mineral Petrol.*, 2002, 143(5): 602–622.
- [29] 吴元保, 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): 1589–1604.
Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. Genesis of zircon and its constraints on intertation of U–Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(15): 1554–1569.
- [30] Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[C]//Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, 1984: 63–114.
- [31] Pearce J A, Lippard S J, Roberts S. Characteristics and tectonic significance of supra–subduction zone ophiolites[C]//Kokelaar B P, Howells M F.(eds.). *Marginal Basin Geology*. Geological Society of London Special Publication, 1984, 16(1): 77–94.
- [32] Coleman R G. Ophiolite: Ancient Oceanic Lithosphere?[M]. New York: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1977: 1–229.
- [33] 张旗, 周国庆. 中国蛇绿岩[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1–182.
Zhang Qi, Zhou Guoqing. *Ophiolite of China*[M]. Beijing: Science Press, 2001: 1–182 (in Chinese).
- [34] Pearce J A, Peate D W. Tectonic implications of the composition of volcanic ARC magmas[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1995, 23(1): 251–285.
- [35] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 1977, 20: 325–343.
- [36] Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Can. J. Earth Sci.*, 1971, 8: 523–548.
- [37] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society London Special Publications, 1989, 42(1): 313–345.
- [38] 张旗, 钱青, 王焰, 等. 蛇绿岩的地球化学研究[J]. *地质论评*, 1999, 45(增刊): 101–345.
Zhang Qi, Qian Qing, Wang Yan, et al. Geochemistry of ophiolites[J]. *Geological Review*, 1999, 45(Supp.): 101–345 (in Chinese with English abstract).
- [39] Pearce J A, Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, 19(2): 290–300.
- [40] Meschede M. A method of discriminating between different types of mid–ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb–Zr–Y diagram[J]. *Chemical Geology*, 1986, 56(3): 207–218.
- [41] Maurice A E, Basta F F, Khiamy A A. Neoproterozoic nascent island arc volcanism from the Nubian Shield of Egypt: Magma genesis and generation of continental crust in intra–oceanic arcs[J]. *Lithos*, 2012, 132–133: 1–20.
- [42] Rollinson H R. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc, 1993: 1–352.
- [43] Condie K C. Geochemical changes in basalts and sites across the Archaean Proterozoic boundary: identification and significance[J]. *Lithos*, 1989, 23: 1–18.
- [44] Wood D A. 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*, 1980, 50(1): 11–30.
- [45] Shervais J W. Ti–V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1982, 31: 457–484.
- [46] Xu Jifeng, Castillo P R, Chen Fanrong, et al. Geochemistry of late Paleozoic mafic igneous rocks from the Kuerti area, Xinjiang, northwest China: implications for backarc mantle evolution[J]. *Chemical Geology*, 2003, 193: 137–154.
- [47] 朱小辉, 陈丹玲, 刘良, 等. 柴北缘绿梁山地区早古生代弧后盆地型蛇绿岩的年代学、地球化学及大地构造意义[J]. *岩石学报*, 2014, 30(3): 822–834.
Zhu Xiaohui, Chen Danling, Liu Liang, et al. Geochronology, geochemistry and significance of the Early Paleozoic back–arc type ophiolite in Lvliangshan area, North Qaidam[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(3): 822–834 (in Chinese with English abstract).
- [48] 刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑南缘阿尼玛卿构造带布青山地区两期蛇绿岩的LA–ICP–MS锆石U–Pb定年及其构造意义[J]. *地质学报*, 2011, 85(2): 185–194.
Liu Zhanqing, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. LA–ICP–MS zircon U–Pb geochronology of the two suites of ophiolites at the Buqingshan area of the A’nyemaqen orogenic belt in the southern margin of East Kunlun and its tectonic implication[J]. *Acta Geological Sinica*, 2011, 85(2): 185–194 (in Chinese with English abstract).
- [49] 任军虎, 张琨, 柳益群, 等. 东昆仑金水口南变余辉长岩地球化学及锆石定年[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2011, 41(1): 100–106.
Ren Junhu, Zhang Kun, Liu Yiqun, et al. Geochemical characteristics and zircon dating of blasto–gabbro from the South Jinshuikou area, Easten Kunlun[J]. *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*, 2011, 41(1): 100–106 (in Chinese with English abstract).
- [50] 任军虎, 柳益群, 周鼎武, 等. 东昆仑小庙基性岩脉地球化学及LA–ICP–MS锆石U–Pb定年[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2010, 40(4): 859–868.
Ren Junhu, Liu Yiqun, Zhou Dingwu, et al. Geochemical characteristics and LA–ICP–MS zircon U–Pb dating of basic dykes in the Xiaomiao area, Eastern Kunlun[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2010, 40(4): 859–868 (in

- Chinese with English abstract).
- [51] 李王晔. 西秦岭-东昆仑造山带蛇绿岩及岛弧型岩浆岩的年代学和地球化学研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008: 1-154.
Li Wangye. Geochronology and Geochemistry of the Ophiolites and Island-arc-type Igneous in the Western Qinling Orogen and the Eastern Kunlun Orogen: Implication for the Evolution of the Tethyan Ocean[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008: 1-154 (in Chinese with English abstract).
- [52] 刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑南缘布青山构造混杂岩带早古生代白日切特中酸性岩浆活动: 来自锆石 U-Pb 测年及岩石地球化学证据[J]. 中国地质, 2011, 38(5): 1150-1167.
Liu Zhanqing, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. Early Paleozoic intermediate-acid magmatic activity in Bairiqiete area along the Buqingshan tectonic mélange belt on the southern margin of East Kunlun: Constraints from zircon U-Pb dating and geochemistry[J]. Geology in China, 2011, 38(5): 1150-1167 (in Chinese with English abstract).
- [53] 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 等. 东昆仑南缘布青山构造混杂带亿可哈拉花岗岩闪长岩年代学、地球化学特征及构造意义研究[J]. 地球学报, 2014, 35(4): 434-444.
Li Ruibao, Pei Xianzhi, Li Zuochen, et al. Age, geochemical characteristics and tectonic significance of Ykehalaer granodiorite in Buqingshan tectonic mélange belt, southern margin of East Kunlun[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 35(4): 434-444 (in Chinese with English abstract).
- [54] 陈能松, 孙敏, 张克信, 等. 东昆仑变闪长岩体的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 和 U-Pb 年龄: 角闪石过剩 Ar 和东昆仑早古生代岩浆岩带证据[J]. 科学通报, 2000, 45(21): 2337-2342.
Chen Nengsong, Sun Min, Zhang Kexin, et al. Epidiorite $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ and U-Pb geochronology of East Kunlun: the proof of remaining Hornblende and Early Paleozoic magmatic Belt of East Kunlun[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(21): 2337-2342 (in Chinese).
- [55] 任军虎, 柳益群, 冯乔, 等. 东昆仑清水泉辉绿岩脉地球化学及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年[J]. 岩石学报, 2009, 25(5): 1135-1145.
Ren Junhu, Liu Yiqun, Feng Qiao, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon dating and geochemical characteristics of diabase-dykes from the Qingshuiquan area, eastern Kunlun orogenic belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(5): 1135-1145 (in Chinese with English abstract).
- [56] Li Ruibao, Pei Xianzhi, Li Zuochen, et al. Regional Tectonic Transformation in East Kunlun Orogenic Belt in Early Paleozoic: Constraints from the Geochronology and Geochemistry of Helegangnaren Alkali-feldspar Granite[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(2): 333-345.
- [57] 刘彬, 马昌前, 张金阳, 等. 东昆仑造山带东段早泥盆世侵入岩的成因及其对早古生代造山作用的指示[J]. 岩石学报, 2012, 28(6): 1785-1807.
Liu Bin, Ma Changqian, Zhang Jinyang, et al. Petrogenesis of Early Devonian intrusive rocks in the east part of East Kunlun Orogen and implication for Early Palaeozoic orogenic processes[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(6): 1785-1807 (in Chinese with English abstract).
- [58] 刘彬, 马昌前, 郭盼, 等. 东昆仑中泥盆世 A 型花岗岩的确定及其构造意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2013, 38(5): 947-962.
Liu Bin, Ma Changqian, Guo Pan, et al. Discovery of the Middle Devonian A-type granite from the Eastern Kunlun Orogen and its tectonic implications[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2013, 38(5): 947-962 (in Chinese with English abstract).
- [59] Wang G C, Chen N S, Zhu Y H, et al. Late Caledonian ductile thrusting deformation in the Central East Kunlun Belt, Qinghai, China and its significance: evidence from geochronology[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2003, 77(3): 311-319.
- [60] 陆露, 胡道功, 张永清, 等. 昆中断裂带同构造花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地质力学学报, 2010, 16(1): 36-43.
Lu Lu, Hu Daogong, Zhang Yongqing, et al. Zircon U-Pb age from syntectonic granitic porphyry in the Middle Kunlun Fault Belt and its tectonic significance[J]. Journal of Geomechanics, 2010, 16(1): 36-43 (in Chinese with English abstract).