

doi: 10.12029/gc20201203002

时超, 辜平阳, 彭璇, 潘晓萍, 田绒. 2024. 西秦岭天水地区龙王洞蛇绿混杂岩 U-Pb 年龄与俯冲-碰撞时限[J]. 中国地质, 51(6): 1960-1971.
Shi Chao, Gu Pingyang, Peng Xuan, Pan Xiaoping, Tian Rong. 2024. U-Pb isotopic age of Longwangdong ophiolitic mélange in the Tianshui Area, West Qinling Orogenic Belt and its time limit of subduction-collision[J]. Geology in China, 51(6): 1960-1971(in Chinese with English abstract).

西秦岭天水地区龙王洞蛇绿混杂岩 U-Pb 年龄 与俯冲-碰撞时限

时超^{1,2}, 辜平阳^{1,2}, 彭璇^{1,2}, 潘晓萍^{1,2}, 田绒³

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710119; 2. 中国地质调查局造山带地质研究中心, 陕西 西安 710119; 3. 中国地质科学院, 北京 100083)

摘要:【研究目的】西秦岭天水地区龙王洞蛇绿混杂岩是一套典型的蛇绿岩体, 是秦岭商丹缝合带西延的重要证据, 对其进行岩石学、年代学和地球化学的研究有助于更好地理解该地区的构造演化过程。【研究方法】本文通过岩石学、全岩地球化学对该套蛇绿岩进行分析, 确定其主要由变辉长岩、变玄武岩、辉石岩等组成。【研究结果】通过 LA-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 同位素测年, 获得变辉长岩的²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为(474.6±6.7)Ma, 指示该蛇绿混杂岩形成于早奥陶世。岩石地球化学分析表明, 变玄武岩属于高钛、富镁、富铁、拉斑系列; 稀土元素分布模式呈现稀土总量偏低、Eu 负异常不明显的平坦型曲线; 微量元素分布模式为 Cs、Th 和 Nb 相对亏损的平坦型曲线, Zr/Nb 比值低, 总体表现出与 E-MORB 相似的特征。【结论】变玄武岩地球化学特征指示龙王洞蛇绿混杂岩可能形成于岛弧区拉张环境, 结合区域资料进一步认为其形成于俯冲带上弧后盆地环境, 进一步暗示了西秦岭天水地区在早奥陶世处于商丹洋的大洋俯冲构造背景。

关键词: 蛇绿混杂岩; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年; 早奥陶世; 构造环境; 西秦岭; 地质调查工程; 商丹缝合带

创新点: 发现商丹缝合带西延证据, 对商丹缝合带俯冲-碰撞时限具有启示意义

中图分类号: P597.3; P548 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)06-1960-12

U-Pb isotopic age of Longwangdong ophiolitic mélange in the Tianshui Area, West Qinling Orogenic Belt and its time limit of subduction-collision

SHI Chao^{1,2}, GU Pingyang^{1,2}, PENG Xuan^{1,2}, PAN Xiaoping^{1,2}, TIAN Rong³

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Geosciences Innovation Center of Northwest China, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. Centre for Orogenic Belt Geology, China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 3. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100083, China)

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

[Objective] The newly discovered Longwangdong ophiolitic mélange as a typical ophiolite suit in the Tianshui area of West Qinling

收稿日期: 2020-12-03; 改回日期: 2021-04-19

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2023-JC-ZD-14, 2022JQ-286)和中国地质调查局项目(DD20190069, DD20221636, DD20243411, DD20240029)联合资助。

作者简介: 时超, 男, 1986 年生, 高级工程师, 主要从事岩石学研究; E-mail: fancyboy88@163.com。

通讯作者: 辜平阳, 男, 1982 年生, 正高级工程师, 主要从事构造地质学、地球化学研究; E-mail: pingyang-322@163.com。

Orogenic Belt witnessed the westward extension of Shangdan suture zone in Qinling Orogenic Belt. Studying its petrology, geochronology, and geochemistry will help improve our understanding of the tectonic evolution of this region. **[Methods]** This study demonstrates through petrological and whole-rock geochemical analyses that this ophiolite suite is mainly composed of amphibolite, metamorphosed basalt, and pyroxenite. **[Results]** LA-ICP-MS zircon U-Pb dating shows the meta-gabbro was formed at (474.6±6.7) Ma, constraining the formation time of the mélange. The whole-rock geochemical analysis reveals that the meta-basalts are subalkalic tholeiite in composition and rich in Ti, Mg and Fe. The total REE of the meta-basalts are low and characterized by flat type distribution pattern without obvious Eu anomalies. Their trace element distribution yields flat patterns with negative anomalies of Cs, Th, Nb, and lowed Zr/Nb ratios, consistent with that of the E-MORB. **[Conclusions]** The geochemical features of the meta-basalts suggest the Longwangdong ophiolitic mélange was potentially generated in the extended volcanic arc environment, which was considered to be the back-arc basin based on the regional geological data. It further implies that Shangdan Ocean experienced a period of subduction process in the Early Ordovician in the West Qinling region.

Key words: ophiolitic mélange; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; Early Ordovician; tectonic setting; West Qinling Orogenic Belt; geological survey engineering; Shangdan suture zone

Highlights: The discovery of evidence of the westward extension of the Shangdan suture zone has enlightening significance for the subduction collision time limit of the Shangdan suture zone.

About the first author: SHI Chao, male, born in 1986, senior engineer, mainly engaged in petrology; E-mail: fancyboy88@163.com.

About the corresponding author: GU Pingyang, male, born in 1982, professor level senior engineer, mainly engaged in tectonic geology and geochemistry; E-mail: pingyang-322@163.com.

Fund support: Supported by the Natural Basic Research Project of Shaanxi Province (No.2023-JC-ZD-14, No.2022JQ-286) and the projects of China Geological Survey (No.DD20190069, No.DD20221636, No.DD20243411, No.DD20240029).

1 引言

蛇绿岩通常被认为是古大洋岩石圈在造山带内的残留,是理解古大洋构造和岩浆演化历史的重要的镁铁质—超镁铁质岩石组合(Prinzhofer and Allègre, 1985; 徐德明等, 2008),它可以为古板块构造格局恢复、造山带演化、变形作用过程重建以及深源成矿作用等方面的研究提供重要信息,所以一直受到地学界的重视(Gass, 1968; 冯益民, 1986; 王希斌和郝梓国, 1994; 裴先治等, 2004; 史仁灯, 2005, 2007; 董云鹏等, 2008; 辜平阳等, 2009, 2011; Dilek and Furnes, 2011; Yang et al., 2015, 2020; Furnes and Safonova, 2019),被广泛应用于全球板块构造系统研究(Gass, 1968; Dew and Bird, 1971; Coleman and Keith, 1971; Moores and Vine, 1971; Kidd, 1977; Whattam and Stern, 2011; Stern et al., 2012)。前人研究认为绝大多数蛇绿岩形成于洋中脊环境(Moores and Jackson, 1974),之后随着地球化学技术的发展、世界各地蛇绿岩研究不断深入以及深海钻探计划(DSDP)和大洋钻探计划(ODP)的研究进

展,发现只有少数蛇绿岩是大洋扩张脊(MOR)的产物,而大多数蛇绿岩代表板块俯冲消减带上(SSZ)的岛弧和弧后盆地、大陆边缘盆地等小洋盆(Pearce et al., 1984; Stern and Bloomer, 1989; Robertson, 2002; 史仁灯, 2005, 2007)。Pearce et al. (1984)将蛇绿岩分为洋中脊 MOR(Mid-ocean ridge)型和俯冲带 SSZ(Supra-subduction zone)型。

秦岭商丹缝合带是分割中国南北大陆的主要边界构造结合带,该带向东延至郟庐断裂,向西与拉脊山、祁连山、柴达木盆地北缘的超镁铁质岩或蛇绿岩带相连(张旗等, 1995; 张国伟等, 2001; 张宗清等, 2006; Dong and Santosh, 2016; Song et al., 2017; Dong et al., 2018)。沿商丹带分布着一系列蛇绿混杂岩块和岛弧火山岩块,其中出露较好、研究程度较高的地段主要集中在东秦岭地区,即商南—丹凤一带,对该带的西延部分研究程度较低。由 1:25 万天水市幅在填图过程中发现的关子镇蛇绿混杂岩掀起了对商丹缝合带西延部分的研究工作(裴先治等, 2004, 2005, 2007; 杨钊等, 2006; 李王晔等, 2007; 董云鹏等, 2008)。随着研究的深入,

对关子镇蛇绿岩的认识也在进一步加深,杨钊等(2006)获得了关子镇蛇绿岩中变辉长岩的年龄为471 Ma,据此认为商丹古洋盆存在的时限可延续至470 Ma。裴先治等(2007)对关子镇蛇绿岩中的变质基性火山岩进行了岩石地球化学分析,认为其具有N-MORB的特征,显示关子镇蛇绿岩是洋脊型蛇绿岩残片,于蛇绿岩中的辉长岩获得(499.7±1.8) Ma年龄,认为是晚寒武世在西秦岭北缘李子园—关子镇—武山洋盆扩张过程中岩浆活动的产物,代表了东秦岭早古生代商丹古洋盆在西秦岭造山带北缘向西延伸的组成部分;李王晔等(2007)获得关子镇蛇绿岩中变辉长岩和闪长岩(该闪长岩属“大洋斜长花岗岩类”)样品的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分别为(534±9)Ma 和(517±8)Ma,认为关子镇蛇绿岩可能为早—中寒武世古洋壳残片;董云鹏等(2008)认为关子镇蛇绿岩残片属秦岭古洋盆洋壳残片,是商丹缝合带的西延部分;操雨森等(2020)认为关子镇蛇绿岩形成于洋盆的初始发育阶段,形成于小洋盆构造环境;以上研究表明,关子镇蛇绿岩可能形成于534~470 Ma,是西秦岭北缘李子园—关子镇—武山洋盆扩张过程中岩浆活动的产物,代表了商丹缝合带的西延部分。赵如意等(2015)对东秦岭丹凤地区分水岭蛇绿岩进行了详细的岩石学、年代学和岩石地球化学研究,认为其是与俯冲带相关的SSZ型蛇绿岩,形成于(499.7±6.1) Ma,而关子镇蛇绿岩是否具有相似的演化历史?在499~470 Ma期间是否具有SSZ型蛇绿岩的特征?这对于关子镇蛇绿岩代表商丹缝合带西延部分是一个重要的地质证据。

笔者在开展1:5万太阳寺幅区调中,于西秦岭天水地区龙王洞附近发现了一套保存相对较好的蛇绿岩组合(龙王洞蛇绿混杂岩),对蛇绿混杂岩中变辉长岩进行LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,同时进行地球化学研究,揭示其形成环境。此外,本文将龙王洞蛇绿混杂岩与其西的关子镇蛇绿岩进行对比,为商丹缝合带的西延提供新的证据。

2 区域地质背景

龙王洞蛇绿构造混杂岩带位于甘肃省天水市南东方向约80 km,地处秦岭地区“两带三块”中的

北带商丹带的西部,关子镇蛇绿岩以西。本次1:10000地质填图证实,该混杂岩带北侧为古元古代秦岭岩群,南侧为早古生代李子园群,两侧均为断裂接触关系。秦岭岩群主要岩石组合为条带状、眼球状(含石榴石)黑云母斜长/二长片麻岩、角闪黑云母斜长片麻岩、黑云母二长片麻岩夹(含石榴石)黑云母斜长变粒岩及少量斜长角闪片岩,前人获得的同位素年龄为840~1222 Ma(柏治安等,2020);李子园群主要岩石组合为黑云母石英片岩、绢云绿泥石英片岩、长英质片岩夹绿帘绿泥钠长片岩(变玄武岩、变玄武安山岩),局部夹少量结晶灰岩或大理岩、含石榴石黑云母石英片岩。

蛇绿构造混杂岩带主要由构造岩块和基质组成,其中构造岩块主要包括变辉长岩、变玄武岩、辉石岩、花岗岩、硅质岩、大理岩、大理岩化灰岩等,基质主要为绢云绿泥片岩、黑云(绢云)石英片岩。岩块变质变形相对较弱,原岩岩性可识别,为蛇绿构造混杂岩带中的弱应变域;基质变质变形相对较强,为蛇绿构造混杂岩带中的强变形带组成。该蛇绿构造混杂岩带是构造挤压、剪切作用的产物,带内岩块在挤压、剪切作用下的不断扁平化和透镜化、基质构造岩递增变形过程,造就了构造混杂带在平面和剖面图上均为“网结状”和“透镜状”的结构特征,构造混杂岩带具有强变形带(基质)、弱变形域(岩块)构成的“网结状”结构特征的根本原因是其变形过程所决定的(图1)。

露头上,岩块(弱变形域)与基质(强变形带)相间出露,岩块多呈大小不等的透镜状或布丁构造,构成混杂岩带中的“网目”,基质往往表现为韧性剪切带、片理化带等,构成了带中的“网绳”,基质内部包绕不同尺度的构造岩块,二者呈构造片理或断层接触。平面上为“网结状”,同样剖面上也显示同样的特征。在构造混杂岩带“网结状”平面分布特征中可见多个增生岩片构成弱应变岩块,构造岩块内部常发生塑性变形,构造岩块被剪切基质“包绕”,构造岩块的尾平行于基质糜棱面理,用来体现岩块边界应力最终消失于强变形带基质之中的客观事实。

3 岩石学特征

变辉长岩呈灰黑—黑绿色,块状构造,中细粒—中粒变余辉长结构(图2a),主要由普通辉石

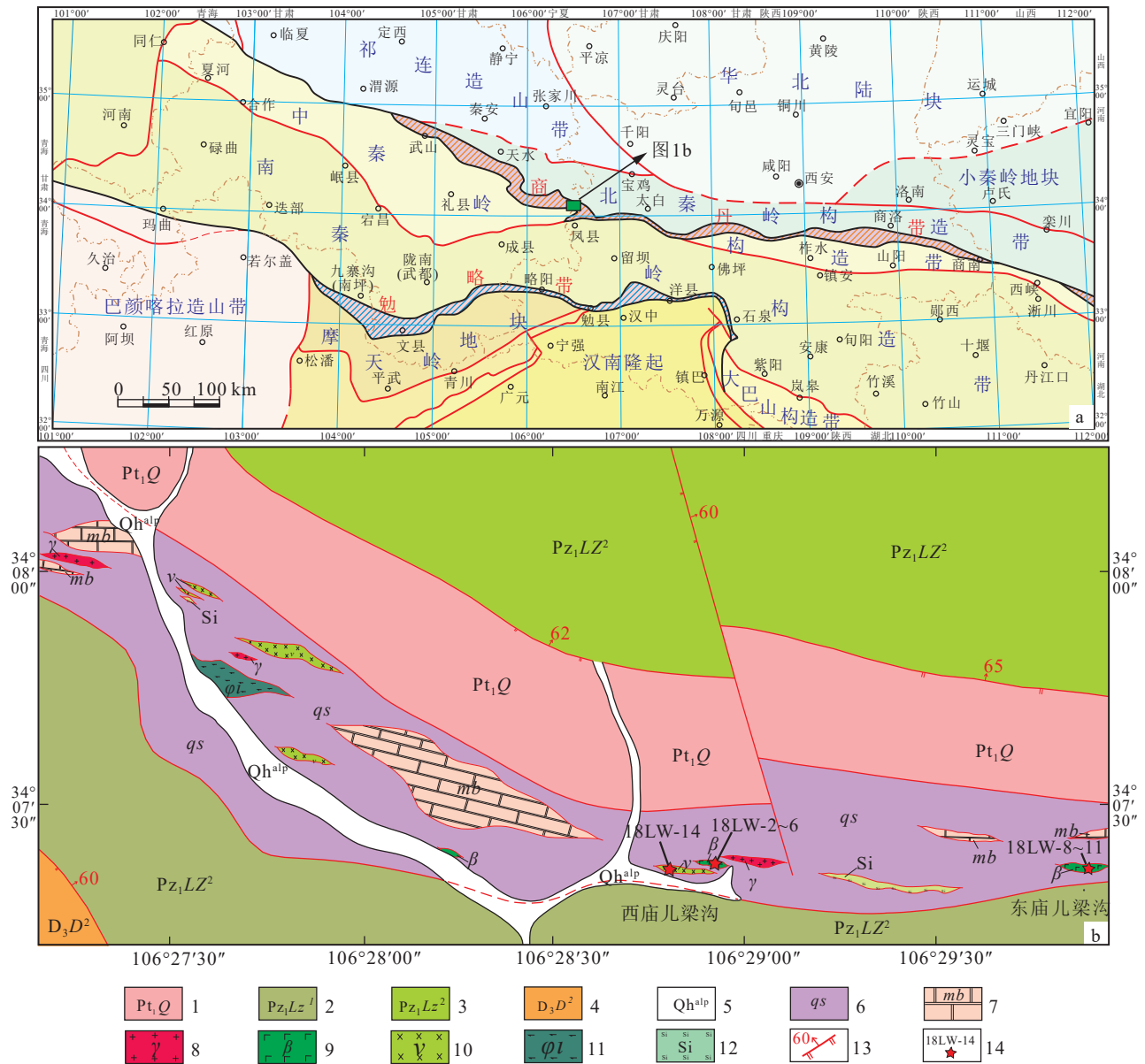


图 1 秦岭及邻区地质简图(a)和西秦岭天水地区龙王洞一带地质略图(b)

1—早元古代秦岭岩群; 2—早古生代李子园群第一岩性段; 3—早古生代李子园群第二岩性段; 14—晚泥盆世大草滩群第二岩性段; 5—第四系冲洪积物; 6—石英片岩(基质); 7—大理岩、大理岩化灰岩(岩块); 8—花岗岩(岩块); 9—玄武岩(岩块); 10—辉长岩(岩块); 11—辉石岩(岩块); 12—硅质岩(岩块); 13—断层; 14—采样位置及编号

Fig.1 Skeleton map of Qinling Orogenic Belt and its adjacent regions (a) and skeleton map of Longwangdong in Tianshui area, West Qinling Orogenic Belt (b)

1—Early Proterozoic Qinling Group; 2—First lithologic member of Liziyuan Group in Early Paleozoic; 3—Second lithologic member of Liziyuan Group in Early Paleozoic; 4—Second lithologic member of Dachaotan Group in Late Devonian; 5—Quaternary; 6—Quartz Schist (Matrix); 7—Marble, marbleization—limestone (Rock block); 8—Granite (Rock block); 9—Basalt (Rock block); 10—Gabbro (Rock block); 11—Pyroxenite (Rock block); 12—Silicalite (Rock block); 13—Fault; 14—Sampling position and number

(35%~45%)、普通角闪石(25%~35%)和中基性斜长石(30%~40%)组成, 含有少量绿泥石、绢云母、楣石等, 其中辉石多蚀变为角闪石, 但其保留有辉石假像(图 2c)。

变玄武岩呈暗绿—黑绿色, 块状构造, 隐晶质结构(图 2b), 主要由普通角闪石(60%~65%)和基性斜长石(35%~40%)组成, 含有少量绿帘石、阳起石等, 可见角闪石和斜长石斑晶(图 2d)。

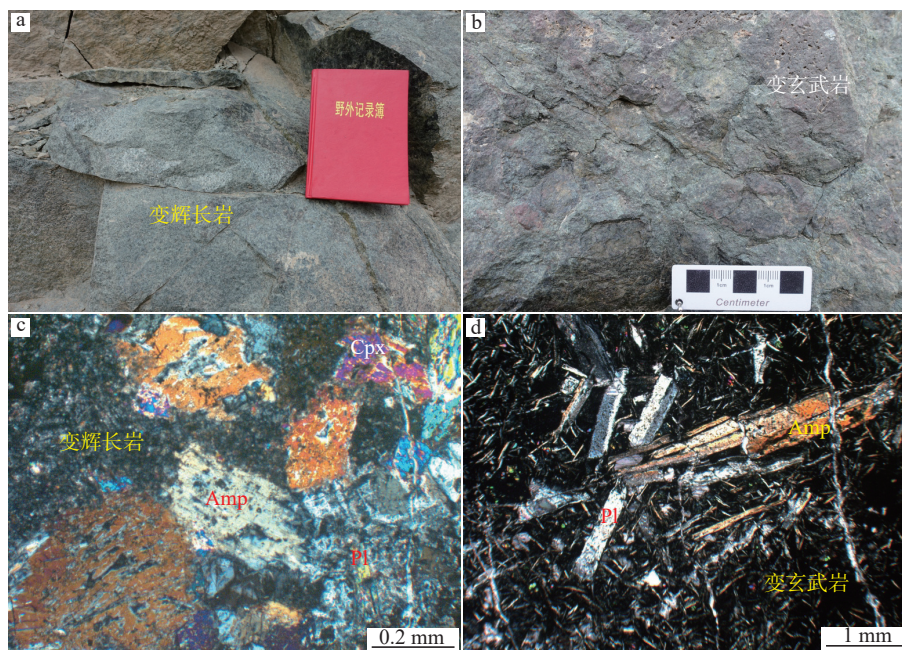


图 2 西秦岭天水地区龙王洞蛇绿混杂岩中变辉长岩和变玄武岩野外露头及岩相学特征

Pl—斜长石; Amp—角闪石; Cpx—斜方辉石

Fig.2 Field outcrops and petrographic characteristics of meta-gabbro and meta-basalt of Longwangdong ophiolitic mélange in the Tianshui Area, West Qinling Orogenic Belt

Pl—Plagioclase; Amp—Amphibole; Cpx—Clinopyroxene

4 变辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

4.1 采样

测年样品(18LW-14)采自西秦岭天水地区龙王洞蛇绿混杂岩带中的变辉长岩,采样位置如图 1 所示,位于西庙儿梁沟口,样品重量约 15 kg。由河北省地质矿产局廊坊实验室完成锆石的破碎、挑选工作。在锆石单矿物分选时,将岩石破碎至全部通过 20~30 目筛网,人工淘洗岩石粉末,将得到的重砂部分用电磁选分选后得到约 500 粒锆石。然后在双目镜下挑选形态较为完整、无裂痕、无包裹体的锆石颗粒制作成样品靶用于 U-Pb 同位素测定。

4.2 测试方法

锆石的透射光、反射光和阴极发光(CL)图像在自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成,采用 JSM-6510A 钨灯丝扫描电镜和 Gatan Chromal 阴极发光仪进行锆石内部结构显微照相分析。优选表面平整、无包裹体或裂隙的锆石作为 LA-ICP-MS 的测试点位。

LA-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 年龄测定在自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成,采用德国 Coherent 公司生产的 Geolas Pro 型 ArF 准分子激光剥蚀系统和美国 Agilent 公司生产的 7700x 型四级杆等离子质谱仪联合构成的激光剥蚀等离子体质谱仪分析系统(LA-ICP-MS)。激光束斑直径为 30 μm ,激光剥蚀深度为 20~40 μm 。详细分析步骤和数据处理方法见相关文献(袁洪林等, 2003; 李艳广等, 2015)。采用 Glitter(ver4.0, Macquarie University)程序对锆石的同位素比值及元素含量进行计算,并按照 Andersen Tom 的方法(Andersen, 2002),用 LAICPMS Common Lead Correction(ver3.15)对其进行了普通铅校正,年龄计算及谐和图采用 Isoplot(ver3.0)完成(Ludwig, 2003)。

4.3 锆石特征

变辉长岩中获得的锆石呈无色—黄色透明柱状,多数呈半自形,粒径多在 50 μm ×120 μm 至 80 μm ×150 μm ,多数锆石粒径较大。锆石阴极发光图像显示(图 3),多数锆石内部发育宽缓的环带结构或条带结构,表现出岩浆成因锆石特征。

变辉长岩中的锆石经普通铅校正后, U-Pb 测

试结果见表 1。由于测试原因,本次测试仅获得有效点共 5 个,锆石测点有一个集中区,²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄介于 470~479 Ma,在 U-Pb 谐和图上集中于谐和线上(图 4a),谐和年龄为(480±17)Ma (MSWD=0.014),²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为(474.6±6.7)Ma (MSWD=0.24)(图 4b),加权平均年龄与谐和年龄在误差范围内基本一致。这些测点所对应的锆石 Th/U 比值较高(介于 0.12~0.89),表明这些锆石应该为同期岩浆结晶成因。因此,本次研究获得的²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄(474.6±6.7)Ma 代表变辉长岩的原岩形成年龄,相当于早奥陶世,认为龙王洞蛇绿构造混杂岩带形成于早奥陶世。

5 变玄武岩地球化学特征

5.1 样品特征

用于岩石地球化学分析的样品为变玄武岩,采

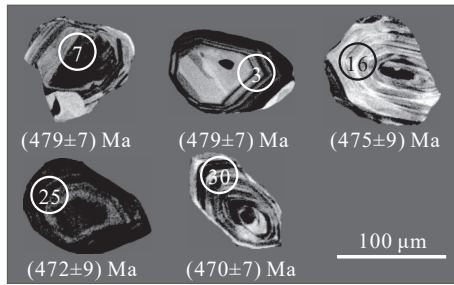


图 3 西秦岭天水地区龙王洞蛇绿混杂岩中变辉长岩锆石 CL 图像(圆圈为同位素测年激光剥蚀的示意范围,相应编号为测点号,数字为²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄)

Fig.3 CL images of zircon in meta-gabbro of Longwangdong ophiolitic mélange in the Tianshui Area, West Qinling Orogenic Belt (The circles represent the range of laser ablation for isotopic dating, with the corresponding numbers indicating sample points, and the numbers reflecting the ²⁰⁶Pb/²³⁸U ages)

自西秦岭天水地区龙王洞蛇绿构造混杂岩带内(图 1),编号 18LW-2~18LW-6 等 6 个样品采于西庙儿梁沟,编号 18LW-7~18LW-12 等 7 个样品采自东庙儿梁沟。主量、稀土及微量元素含量均由自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室分析,主元素采用 X 荧光光谱仪(Xios4.0 kw)分析,稀土元素和微量元素采用等离子体质谱仪 ICP-MS(美国 Thermo 公司 Xseries II)分析。分析结果见表 2。

5.2 主量元素

变玄武岩全岩地球化学分析数据列于表 2,大部分样品 SiO₂ 含量为 45.58%~49.27%,具有高 TiO₂ (0.60%~1.09%)、富 MgO(4.66%~9.18%)、富 TFeO (8.86%~12.53%)、偏碱(Na₂O+K₂O=3.64%~5.74%)的特征,Al₂O₃ 含量为 12.77%~18.25%,CaO 含量为 7.26%~12.54%。在 Nb/Y-Zr/TiO₂ 图解(图 5a)中,样品点位于玄武岩区;在 SiO₂-TFeO/MgO 图解(图 5b)中,样品点大部分位于拉斑系列范围。

5.3 稀土和微量元素

变玄武岩的稀土元素总量偏低(∑REE=35.62×10⁻⁶~66.10×10⁻⁶)(18LW-7 样品除外),样品稀土配分特征一致,总体呈轻稀土(LREE)略具富集的平坦型曲线(图 6a),反映样品具有相同源区,轻重稀土间分异不明显,(La/Sm)_N 为 0.89~1.72(18LW-7 样品除外),(La/Yb)_N 为 1.24~3.59(18LW-7 样品除外),Eu 异常不明显(δEu=0.82~1.03),与 E-MORB 的稀土元素分配模式较为相近。

变玄武岩经原始地幔标准化后微量元素分布模式总体为平坦型曲线(图 6b),表现为部分强不相容大离子亲石元素(LILE)相对亏损,如 Cs 和 Th,

表 1 西秦岭天水地区龙王洞蛇绿混杂岩带中变辉长岩(18LW-14) LA-ICP-MS 单颗粒锆石 U-Pb 同位素测年结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analyses of meta-gabbro in the Longwangdong ophiolitic mélange in Tianshui area, West Qinling Orogenic Belt

样号	同位素比值						同位素年龄/Ma						含量/10 ⁻⁶				
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	Th	U	Pb*	Th/U 谐和度/%	
18LW-14-3	0.0582	0.0021	0.6151	0.0223	0.0767	0.0012	536	51	487	14	476	7	10.84	93.81	70.79	0.12	102
18LW-14-7	0.0569	0.0016	0.6048	0.0179	0.0771	0.0012	488	39	480	11	479	7	287.57	459.2	41.23	0.63	100
18LW-14-16	0.0583	0.0037	0.6145	0.0387	0.0764	0.0016	541	102	486	24	475	9	73.88	172.68	14.51	0.43	102
18LW-14-25	0.0583	0.0039	0.6112	0.0403	0.0760	0.0016	541	108	484	25	472	9	114.52	169.65	15.03	0.68	103
18LW-14-30	0.059	0.0016	0.6191	0.0173	0.0757	0.0011	579	35	489	11	470	7	608.23	680.6	64.03	0.89	104

注: Pb*=0.241×²⁰⁶Pb+0.221×²⁰⁷Pb+0.524×²⁰⁸Pb; 谐和度=(²⁰⁷Pb/²³⁵U)/(²⁰⁶Pb/²³⁸U)×100。

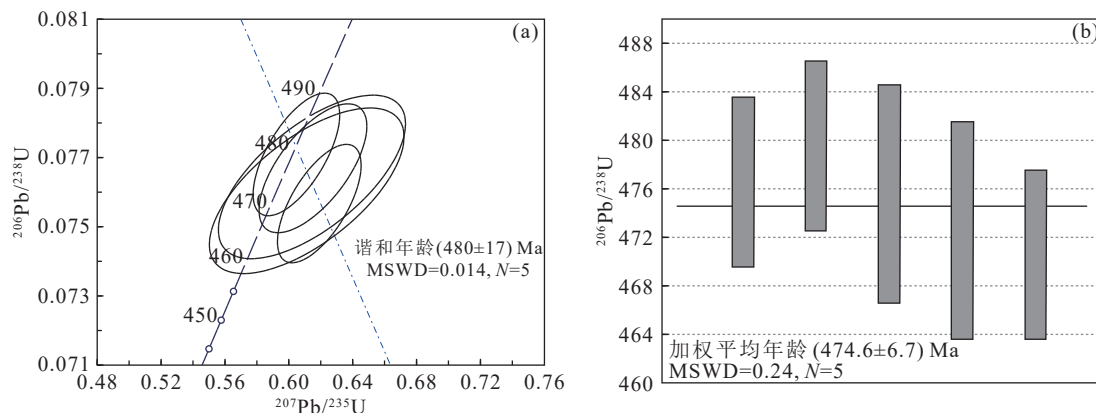


图4 西秦岭天水地区龙王洞蛇绿混杂岩中变辉长岩锆石 U-Pb 谐和图(a)及加权平均年龄图(b)
Fig.4 Zircon U-Pb concordia diagram (a) and weighted mean ages diagram (b) of meta-gabbro in the Longwangdong ophiolitic mélangé, Tianshui Area, West Qinling Orogenic Belt

高场强元素 (HFSE) 中 Nb 相对亏损, 总体与 E-MORB 的微量元素分布模式相似。Zr/Nb 比值较高 (为 12.70~21.02, 平均 17.95), 介于 N-MORB 和 E-MORB 之间 (N-MORB 为 31.76, E-MORB 为 8.80, 洋岛玄武岩为 5.83, Sun and McDonough, 1989)。

6 构造环境讨论

根据野外地质和岩相学特征, 龙王洞蛇绿混杂岩呈构造岩块或叠瓦状构造岩片产出, 分割秦岭岩群 (Pt₁Q) 和李子园群 (Pz₁Lz₁), 岩石地球化学特征显示, 变玄武岩属于高钛、富镁、富铁、偏碱的拉斑系列。稀土元素分布模式呈现稀土总量偏低、Eu 异

常不明显的平坦型曲线, 微量元素分布模式为 Cs、Th 和 Nb 相对亏损的平坦型曲线, Zr/Nb 比值低, 总体表现出与 E-MORB 相似的特征。在 Zr/Y-Zr 判别图 (图 7a) 中, 龙王洞变玄武岩样点落入洋中脊和岛弧玄武岩区; 在 Ti-Zr-Y 判别图 (图 7b) 中, 变玄武岩样点主要落入洋底玄武岩和低钾拉斑玄武岩区; 在 Ti-Zr 判别图 (图 7c) 中, 变玄武岩样点主要落入低钾拉斑玄武岩区。结合其主量元素具有拉斑系列特征, 微量和稀土元素显示与 E-MORB 相似, 以及区域地质特征综合判断认为, 龙王洞蛇绿混杂岩具备 SSZ 型蛇绿岩的特征, 可能形成于岛弧区部分拉张环境。

龙王洞蛇绿混杂岩产于商丹带蛇绿混杂岩、秦

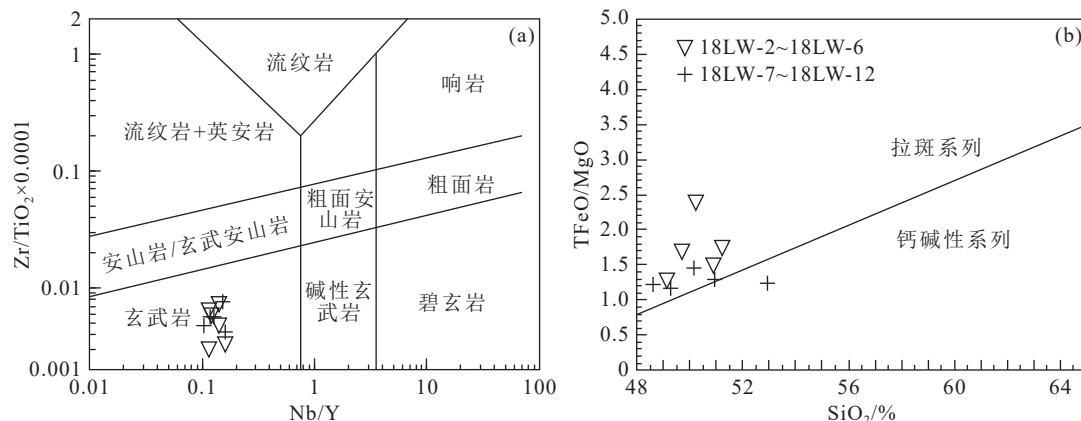


图5 西秦岭天水地区龙王洞蛇绿混杂岩中变玄武岩 Nb/Y-Zr/TiO₂ (a, 据 Winchester and Floyd, 1977) 和 SiO₂-TFeO/MgO (b, 据 Miyashiro, 1975) 图解

Fig.5 Nb/Y-Zr/TiO₂ (a, after Winchester and Floyd, 1977) and SiO₂-TFeO/MgO (b, after Miyashiro, 1975) diagrams of meta-basalts of the Longwangdong ophiolitic mélangé in the Tianshui Area, West Qinling Orogenic Belt

表 2 西秦岭天水地区龙王洞蛇绿混杂岩带中变玄武岩主量 (%)、微量和稀土元素含量 (10^{-6})
Table 2 Major (%), REE and trace element (10^{-6}) composition of meta-basalts in the Longwangdong ophiolitic mélange in Tianshui area, West Qinling Orogenic Belt

样号	18-LW-2	18-LW-3	18-LW-4	18-LW-5	18-LW-6	18-LW-7	18-LW-9	18-LW-10	18-LW-11	18-LW-12
岩性	变玄武岩	变玄武岩	变玄武岩	变玄武岩	变玄武岩	变玄武岩	变玄武岩	变玄武岩	变玄武岩	变玄武岩
SiO ₂	47.03	44.58	49.27	49.08	48.86	47.13	47.40	48.24	49.18	47.04
TiO ₂	0.76	1.09	0.85	0.89	0.90	0.86	0.86	0.71	0.60	1.09
Al ₂ O ₃	12.77	14.82	16.31	16.50	17.63	15.35	14.58	16.59	17.84	18.25
Fe ₂ O ₃	4.58	6.39	4.61	6.59	3.64	4.67	2.83	2.92	3.06	3.22
FeO	7.55	6.78	5.45	5.15	5.58	6.00	8.10	6.70	6.19	7.10
MnO	0.24	0.45	0.28	0.19	0.21	0.20	0.19	0.18	0.22	0.17
MgO	9.12	5.58	5.49	4.66	5.97	6.06	9.18	6.84	6.90	8.15
CaO	12.54	9.87	8.74	9.92	7.26	10.10	8.83	9.05	7.87	7.78
Na ₂ O	0.72	3.02	4.39	3.96	4.64	3.48	1.66	3.25	3.70	3.48
K ₂ O	0.37	0.62	0.68	0.64	1.10	0.74	2.48	1.51	0.84	0.36
P ₂ O ₅	0.06	0.19	0.14	0.12	0.19	0.22	0.12	0.11	0.11	0.16
LOI	4.04	6.39	3.61	2.12	3.88	5.07	3.51	3.69	3.34	3.02
TFeO	11.67	12.53	9.60	11.08	8.86	10.20	10.65	9.33	8.94	10.00
Total	99.78	99.78	99.82	99.82	99.86	99.88	99.74	99.79	99.85	99.82
La	3.15	5.30	6.02	8.10	6.25	20.0	5.55	5.62	5.29	7.51
Ce	9.25	13.1	13.8	17.0	14.8	56.2	13.2	12.6	11.4	18.5
Pr	1.64	2.52	2.66	2.84	2.65	6.79	2.28	2.21	2.00	3.06
Nd	8.49	12.5	12.4	12.7	13.4	25.1	11.4	10.1	8.71	14.2
Sm	2.22	3.54	3.35	2.96	3.52	5.42	3.09	2.60	2.22	3.28
Eu	0.741	1.20	1.12	0.988	1.08	1.41	1.05	0.901	0.712	1.04
Gd	2.34	3.71	3.53	2.82	3.72	4.91	3.29	2.72	2.22	3.33
Tb	0.431	0.642	0.635	0.464	0.659	0.768	0.579	0.471	0.400	0.572
Dy	2.81	4.38	4.20	2.89	4.44	4.48	3.75	3.06	2.71	3.51
Ho	0.605	0.953	0.929	0.593	0.977	0.912	0.797	0.675	0.598	0.731
Er	1.71	2.64	2.62	1.62	2.81	2.68	2.28	1.91	1.75	2.00
Tm	0.265	0.405	0.421	0.241	0.451	0.398	0.356	0.294	0.278	0.312
Yb	1.71	2.68	2.76	1.52	2.93	2.58	2.34	1.93	1.84	1.99
Lu	0.262	0.412	0.420	0.231	0.461	0.381	0.357	0.288	0.278	0.300
LREE	25.49	38.16	39.35	44.59	41.70	114.92	36.57	34.03	30.33	47.59
HREE	10.13	15.82	15.52	10.38	16.45	17.11	13.75	11.35	10.07	12.75
ΣREE	35.62	53.98	54.87	54.97	58.15	132.03	50.32	45.38	40.41	60.34
(La/Sm) _N	0.89	0.94	1.13	1.72	1.12	2.32	1.13	1.36	1.50	1.44
(La/Yb) _N	1.24	1.33	1.47	3.59	1.44	5.23	1.60	1.96	1.94	2.54
δEu	0.99	1.01	0.99	1.03	0.91	0.82	1.00	1.03	0.97	0.95
Ba	108	150	219	316	221	215	445	1210	254	182
Rb	9.39	10.0	9.35	7.42	12.5	15.7	32.1	21.4	9.22	4.54
Sr	569	362	488	752	449	640	186	376	357	646
Co	63.2	45.7	40.7	35.0	27.9	41.9	47.2	41.0	29.7	34.7
V	478	396	421	476	310	393	398	360	314	449
Cr	586	59.0	255	25.0	128	52.3	170	142	137	30.5
Ni	156	27.0	62.2	11.5	35.6	30.6	48.0	45.6	55.2	17.0
Nb	1.77	3.40	2.78	2.37	3.46	2.75	2.46	2.12	1.55	2.93
Ta	0.151	0.236	0.200	0.154	0.232	0.180	0.173	0.149	0.109	0.188
Zr	23.8	55.2	51.5	30.1	68.3	57.8	50.9	41.8	29.4	47.9
Hf	0.880	1.72	1.76	1.07	2.02	1.82	1.70	1.37	1.02	1.62
Y	15.6	24.4	22.9	14.8	24.4	23.8	20.8	16.7	14.9	18.3
Cs	0.220	0.565	0.430	0.210	0.460	1.16	0.690	0.590	0.475	0.260
Th	1.27	1.16	1.56	3.49	1.83	14.3	2.36	2.51	2.03	3.06
U	0.338	1.66	0.463	0.749	0.831	2.09	0.448	0.531	0.433	0.500
Pb	8.89	29.4	4.73	9.71	5.21	10.7	7.31	29.5	3.20	22.6
Li	15.3	22.7	16.3	11.0	23.5	21.9	26.0	13.3	13.0	21.5
Be	0.257	0.502	0.688	0.665	0.482	0.542	0.472	0.812	0.302	0.660
Sc	48.4	37.6	36.5	36.1	29.7	32.8	41.1	34.4	28.1	40.0
Ga	14.7	14.6	16.4	18.4	14.1	17.5	15.3	15.8	13.2	16.8
Ti	4580	6560	5080	5320	5400	5140	5180	4240	3630	6520

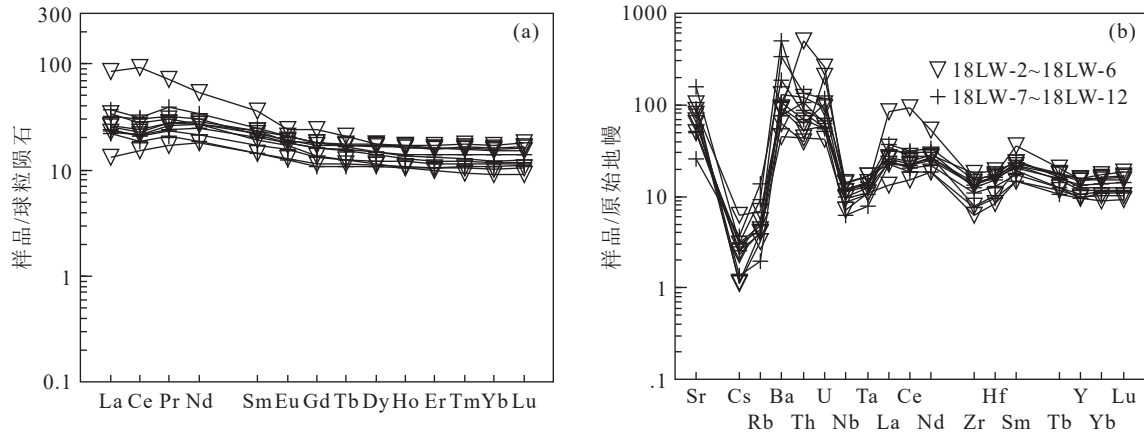


图6 西秦岭天水地区龙王洞蛇绿混杂岩中变玄武岩稀土元素球粒陨石标准化分布模式(a)和微量元素原始地幔标准化分布模式(b)(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace elements pattern (b) of meta-basalts in the Longwangdong ophiolitic mélange in the Tianshui Area, West Qinling Orogenic Belt (normalized values from Sun and McDonough, 1989)

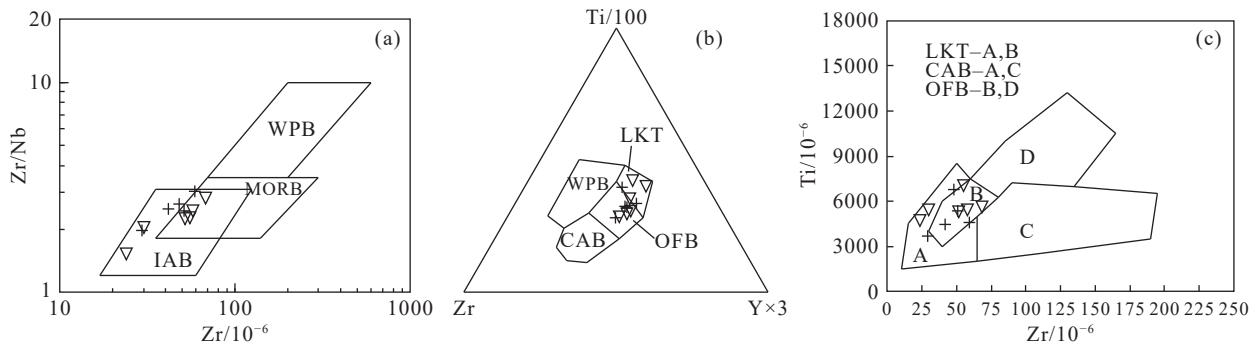


图7 西秦岭天水地区龙王洞蛇绿混杂岩中变玄武岩 Zr/Y-Zr、Ti-Zr-Y 和 Ti-Zr(据 Pearce and Cann, 1973)图解

WPB—板内玄武岩; MORB—洋中脊玄武岩; IAB—岛弧玄武岩; LKT—低钾拉斑玄武岩; OFB—洋底玄武岩; CAB—钙碱性玄武岩

Fig.7 Zr/Y-Zr, Ti-Zr-Y, Ti-Zr diagrams of meta-basalts in the Longwangdong ophiolitic mélange in the Tianshui Area, West Qinling Orogenic Belt (after Pearce and Cann, 1973)

WPB—Within plate basalts; MORB—Mid-ocean ridge basalts; IAB—Island arc basalts; LKT—Low-potassium tholeiites; OFB—Ocean floor basalts; CAB—Calc-alkali basalts

岭岛弧杂岩和二郎坪弧后蛇绿岩带为代表的早古生代沟-弧-盆体系内(董云鹏等, 2008), 其地球化学特征显示 SSZ 型蛇绿岩特征, 可能代表商丹洋西延主洋盆开始消减, 大陆板块开始汇聚拼合的前奏, 是威尔逊旋回的后期阶段产物(王希斌等, 1995; Graham et al., 1996; 史仁灯, 2005)。龙王洞蛇绿岩的形成与洋盆主体消减时间基本相当, 是商丹洋向北秦岭板块俯冲的产物(陈隽璐等, 2008)。其过程可能是: 受消减带流体作用, 幔源区发生低程度部分熔融之后由于洋壳俯冲使弧后拉张, 引起新的地幔对流, 使得周围相对富集的地幔向处于引

张状态的俯冲带之上(SSZ 环境)运移和上涌, 弧后盆地被进一步打开导致新的洋壳(蛇绿岩)生成, 最终在挤压机制下向陆一侧仰冲拼贴就位, 因此, 其可能形成于弧后盆地环境。(474.6±6.7) Ma 年龄佐证西秦岭天水地区龙王洞一带在早奥陶世主洋盆已开始进入消减和板块汇聚的演化进程。这与前人认为古商丹洋在 534~499 Ma 处于洋盆发展阶段, 499~470 Ma 进入主洋盆消减阶段相印证。本次西秦岭龙王洞 SSZ 型蛇绿岩的发现则预示着在 474 Ma 古商丹洋也进入了向北俯冲的阶段。

7 结 论

(1) 龙王洞蛇绿混杂岩主要由构造岩块和剪切基质组成, 其中构造岩块主要包括变辉长岩、变玄武岩、花岗岩、辉石岩、硅质岩、大理岩、大理岩化灰岩等, 剪切基质主要为绢云绿泥片岩、黑云(绢云)石英片岩。岩块变质变形相对较弱, 原岩岩性可识别, 为蛇绿混杂岩中的弱应变域; 基质变质变形相对较强, 为蛇绿混杂岩中的强变形带。

(2) 龙王洞蛇绿混杂岩中的变辉长岩岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $(474.6 \pm 6.7) \text{Ma}$ (MSWD=0.24), 锆石多数具有宽缓的环带结构或条带结构, Th/U 比值较高(介于 0.12~0.89), 该年龄可以代表蛇绿混杂岩形成时代早奥陶世。龙王洞蛇绿混杂岩属于商丹缝合带的西延构造带。

(3) 龙王洞蛇绿混杂岩中的变玄武岩属于高 TiO_2 (0.74%~1.17%)、富 MgO (5.71%~9.54%)、富 TFeO (9.23%~13.42%)、偏碱 ($\text{NaO}_2 + \text{KO}_2 = 3.90\% \sim 5.98\%$) 的拉斑系列, 稀土元素分布模式呈现稀土总量偏低、Eu 异常不明显的平坦型曲线, 微量元素分布模式为 Cs、Th 和 Nb 相对亏损的平坦型曲线, Zr/Nb 比值低, 总体显示 SSZ 型蛇绿岩的特征, 表明其可能形成于弧后盆地环境, 与商丹洋早奥陶世向北俯冲有关, 暗示西秦岭天水地区在 474 Ma 处于俯冲-碰撞大地构造背景。

致谢: 本文在撰写过程中得到了何世平研究员的热心指导, 文中 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试及地球化学测试得到西安地质调查中心实验测试中心魏小燕、李艳广和汪双双的指导 and 帮助, 在投稿过程中得到李永军教授的指导, 同时在野外地质工作中得到自然资源部中志留统底界层型剖面-陕西紫阳野外科学观测基地和自然资源部中志留统底界层型剖面-陕西紫阳科普基地的帮助, 在此表示衷心的感谢!

References

Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1/2): 59-79.

Bai Zhi'an, Shi Yu, Liu Xijun, Liu Lei, Zhao Zengxia, Huang Qianwen. 2020. Geochronology and geochemical characteristics of the amphibolite from the Qinling Group of Qinling orogenic belt and

their geological implications[J]. *Geology and Exploration*, 56(2): 372-386 (in Chinese with English abstract).

Cao Yusen, Huang Shiqi, Zhou Weijian, Lu Yang, Liu Zhiqiang, Huang Dezhi. 2020. Geochemical characteristics and tectonic environment of meta basalts in Guanzizhen, Tianshui, western Qinling[J]. *Geological Review*, 66(3): 625-636 (in Chinese with English abstract).

Chen Junlu, Xu Xueyi, Wang Hongliang, Wang Zongqi, Zeng Zuoxun, Li Ping, Wang Chao. 2008. Geochemical characteristics and petrogenesis of Early Paleozoic adakitic rock in the west segment of North Qinling[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 476-484 (in Chinese with English abstract).

Coleman R G, Keith T E. 1971. A chemical study of serpentinization-Burro Mountain, California[J]. *Journal of Petrology*, 12: 311-328.

Dewey J F, Bird J. 1971. Origin and emplacement of the ophiolite suite: Appalachian ophiolites in Newfoundland[J]. *Journal of Geophysical Research*, 76: 3179-3206.

Dilek Y, Furnes H. 2011. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 123(3/4): 387-411.

Dong Y P, Neubauer F, Genser J, Sun S S, Yang Z Q, Liu X M, Zhang G W. 2018. Timing of orogenic exhumation processes of the Qinling orogen: Evidence from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating[J]. *Tectonics*, 37: 4037-4067.

Dong Y P, Santosh M. 2016. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. *Gondwana Research*, 29: 1-40.

Dong Yunpeng, Yang Zhao, Zhang Guowei, Zhao Xia, Xu Jinggang, Yao Anping. 2008. Geochemistry of the ophiolite in the Guanzizhen area, West Qinling and its tectonic implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(9): 1186-1194 (in Chinese with English abstract).

Feng Yimin. 1986. Genetic environments and original types of ophiolites in west Junggar[J]. *Bulletin of the Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, the Chinese Academy of Geological Sciences*, (13): 37-44 (in Chinese).

Furnes H, Safonova I. 2019. Ophiolites of the Central Asian Orogenic Belt: Geochemical and petrological characterization and tectonic settings[J]. *Geoscience Frontiers*, 10: 1255-1284.

Gass I G. 1968. Is the Troodos massif of Cyprus a fragment of Mesozoic oceanic floor?[J]. *Nature*, 220: 39-42.

Graham I T, Franklin B J, Marshall B. 1996. Tectonic significance of 400 Ma zircon ages for ophiolitic rocks from the Lachlan fold belt[J]. *Geology*, 24(12): 1111-1114.

Gu Pingyang, Li Yongjun, Wang Xiaogang, Zhang Hongwei, Wang Junnian. 2011. Geochemical evidences and tectonic significances of Dalabute SSZ-type Ophiolitic Mélange, Western Junggar Basin[J]. *Geological Review*, 57(1): 36-44 (in Chinese with English abstract).

- Gu Pingyang, Li Yongjun, Zhang Bin, Tong Lili, Wang Junnian. 2009. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of gabbro in the Darbut ophiolite, western Junggar, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1364-1372 (in Chinese with English abstract).
- Kidd R G W. 1977. A model for the process of formation of the upper oceanic crust[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 50: 149-183.
- Li Wangye, Li Shuguang, Pei Xianzhi, Zhang Guowei. 2007. Geochemistry and zircon SHRIMP U-Pb ages of the Guanzizhen ophiolite complex, the Western Qinling Orogen, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2836-2844 (in Chinese with English abstract).
- Li Y, Yang J S, Yildirim D, Zhang J, Pei X Z, Chen S Y, Xu X Z, Li J Y. 2015. Crustal architecture of the Shangdan suture zone in the early Paleozoic Qinling orogenic belt, China: Record of subduction initiation and back arc basin development[J]. *Gondwana Research*, 27: 733-744.
- Li Yanguang, Wang Shuangshuang, Liu Minwu, Meng En, Wei Xiaoyan, Zhao Huibo, Jin Mengqi. 2015. U-Pb dating study of baddeleyite by LA-ICP-MS: Technique and application[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(12): 2400-2418 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. Isoplot 3.0: A geochronological toolkit for microsoft excel[J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, (4): 1-70.
- Miyashiro A. 1975. Classification, characteristics, and origin of ophiolites[J]. *Journal of Geology*, 83(2): 249-281.
- Moore E M, Jackson E D. 1974. Ophiolites and oceanic crust[J]. *Nature*, 250(5462): 136-139.
- Moore E M, Vine F J. 1971. The Troodos massif, Cyprus and other ophiolites as oceanic crust: Evaluation and implications[J]. *Royal Society*, A268: 433-466.
- Pearce J A, Lippard S J, Roberts S. 1984. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites[C]//Kokelaar B P and Howells M F (eds.). *Marginal Basin Geology*. London: Special Publication, 77-94.
- Pearce J A, Cann J R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace elements analyses[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290-300.
- Pei Xianzhi, Ding Saping, Hu Bo, Li Yong, Zhang Guowei, Guo Junfeng. 2004. Definition of the Guanzizhen ophiolite in Tianshui area, Western Qinling, and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*. 23(12): 1202-1208 (in Chinese with English abstract).
- Pei Xianzhi, Ding Saping, Li Zuochen, Liu Zhanqing, Li Gaoyang, Li Ruibao, Wang Fei, Li Fujie. 2007. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the gabbro from the Guanzizhen ophiolite in the northern margin of the Western Qinling and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1550-1561 (in Chinese with English abstract).
- Pei Xianzhi, Li Yong, Lu Songnian, Chen Zhihong, Ding Saping, Hu Bo, Li Zuochen, Liu Hhuibin. 2005. U-Pb ages of the Guanzizhen inter-mediate-basic igneous complex in Tianshui area, West Qinling, and their geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 24(1): 23-29 (in Chinese with English abstract).
- Prinzhofer A, Allègre C J. 1985. Residual peridotites and the mechanisms of partial melting[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 74(2/3): 251-265.
- Robertson A H F. 2002. Overview of the genesis and emplacement of Mesozoic ophiolites in the Eastern Mediterranean Tethyan region[J]. *Lithos*, 65(1): 1-67.
- Shi Rendeng. 2005. Comment on the progress in and problems on ophiolite study[J]. *Geological Review*, 51(6): 681-693 (in Chinese with English abstract).
- Shi Rendeng. 2007. SHRIMP dating of the Bangong Lake SSZ-type ophiolite: Constraints on the closure time of ocean in the Bangong Lake-Nujiang River, Northwestern Tibet[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(7): 936-941 (in Chinese with English abstract).
- Song, S G, Yang, L M, Zhang, Y Q, Niu, Y L, Wang, C, Su, L, Gao, Y L. 2017. Qi-Qin accretionary belt in Central China Orogen: Accretion by trench jam of oceanic plateau and formation of intra-oceanic arc in the Early Paleozoic Qin-Qi-Kun Ocean[J]. *Science Bulletin*, 62: 1035-1038.
- Stern R I, Bloomer S H. 1989. Submarine arc volcanism in the southern Mariana arc as an ophiolite analogue[J]. *Tectonophysics*, 168: 151-170.
- Stern R J, Reagan M, Ishizuka O, Ohara Y, Whattam S. 2012. To understand subduction initiation, study forearc crust: To understand forearc crust, study ophiolites[J]. *Lithosphere*, 4: 469-483.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: Implication for mantle composition and processes, in magmatism in the Ocean Basins[J]. *Geological Society London Special Publication*, 423: 13-345.
- Wang Xibin, Bao Peisheng, Rong He. 1995. Rare earth elements geochemistry of the mantle peridotite in the ophiolite suites of China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11: 24-41 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xibin, Hao Zigu. 1994. Temporal-spatial distribution and tectonic types of ophiolites in orogenic belts of China[J]. *Regional Geology of China*, 3: 193-204 (in Chinese with English abstract).
- Whattam S A, Stern R J. 2011. The 'subduction initiation rule': A key for linking ophiolites, intra-oceanic forearcs and subduction initiation[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 162(5): 1031-1045.
- Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation of products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 20: 325-343.
- Xu Deming, Huang Guicheng, Lei Yijun. 2008. Geochemistry and tectonic significance of mantle peridotites from the Laangcuo ophiolite massif, southwest Tibet[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(1): 1-13 (in Chinese with English abstract).
- Yang G X, Li Y J, Tong L L, Wang Z P. 2020. An Early Cambrian

- plume-induced subduction initiation event within the Junggar Ocean: Insights from ophiolitic mélanges, arc magmatism, and metamorphic rocks[J]. *Gondwana Research*, 88: 45–66.
- Yang G X, Li Y J, Xiao W J, Tong L L. 2015. OIB-type rocks within West Junggar ophiolitic mélanges: Evidence for the accretion of seamounts[J]. *Earth Science Reviews*, 150: 477–496.
- Yang Zhao, Dong Yunpeng, Liu Xiaomin, Zhang Jinhai. 2006. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of gabbro in the Guanzizhen ophiolite, Tianshui, West Qinling, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(11): 1321–1325 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Honglin, Wu Fuyuan, Gao Shan, Liu Xiaoming, Xu Ping, Sun Deyou. 2003. Zircon laser probe U-Pb age determination and REE component analysis of Cenozoic magmatic intrusion in Northeast China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(14): 1511–1520 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Yuan Xuecheng, Zhang Benren. 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 1–855 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Zhang Zongqin, Sun Yong, Han Song. 1995. Trace element and isotopic geochemistry of meta basalts from Danfeng Group in Shanxian-Danfeng area, Shaanxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11(1): 43–54 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zongqin, Zhang Guowei, Liu Dunyi, Wang Zongqi, Tang Suohan, Wang Jinhui. 2006. Isotopic Geochronology and Geochemistry of Ophiolites, Granites and Clastic Sedimentary Rocks in the Qinling Orogenic Belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 9–55 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Ruyi, Jiang Changyi, Li Weihong, Wang Jiangbo, Wang Bangyao, Hui Zhenbu. 2015. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, petro-geochemical characteristics and geological significance of Fenshuiling ophiolite in Danfeng area of eastern Qinling Mountains[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(4): 473–482 (in Chinese with English abstract).
- 院西安地质矿产研究所刊, (13): 37–44.
- 辜平阳, 李永军, 王晓刚, 张洪伟, 王军年. 2011. 西准噶尔达尔布特 SSZ 型蛇绿杂岩的地球化学证据及构造意义[J]. *地质论评*, 57(1): 36–44.
- 辜平阳, 李永军, 张兵, 佟丽莉, 王军年. 2009. 西准达尔布特蛇绿岩中辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年[J]. *岩石学报*, 25(6): 1364–1372.
- 李王晔, 李曙光, 裴先治, 张国伟. 2007. 西秦岭关子镇蛇绿混杂岩的地球化学和锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. *岩石学报*, 23(11): 2836–2844.
- 李艳广, 汪双双, 刘民武, 孟恩, 魏小燕, 赵慧博, 靳梦琪. 2015. 斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法及应用[J]. *地质学报*, 89(12): 2400–2418.
- 裴先治, 丁仁平, 胡波, 李勇, 张国伟, 郭军锋. 2004. 西秦岭天水地区关子镇蛇绿岩的厘定及其地质意义[J]. *地质通报*, 23(12): 1202–1208.
- 裴先治, 丁仁平, 李佐臣, 刘战庆, 李高阳, 李瑞保, 王飞, 李夫杰. 2007. 西秦岭北缘关子镇蛇绿岩的形成时代: 来自辉长岩中 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的证据[J]. *地质学报*, 81(11): 1550–1561.
- 裴先治, 李勇, 陆松年, 陈志宏, 丁仁平, 胡波, 李佐臣, 刘会彬. 2005. 西秦岭天水地区关子镇中基性岩浆杂岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 24(1): 23–29.
- 史仁灯. 2005. 蛇绿岩研究进展、存在问题及思考[J]. *地质论评*, 51(6): 681–693.
- 史仁灯. 2007. 班公湖 SSZ 型蛇绿岩年龄对班—怒洋时限的制约[J]. *科学通报*, 52(2): 223–227.
- 王希斌, 鲍佩声, 戎合. 1995. 中国蛇绿岩中变质橄榄岩的稀土元素地球化学[J]. *岩石学报*, 11(S1): 24–41.
- 王希斌, 郝梓国. 1994. 中国造山带蛇绿岩的时空分布及构造类型[J]. *中国区域地质*, (3): 193–204.
- 徐德明, 黄圭成, 雷义均. 2008. 西藏西南部拉昂错地幔橄榄岩的地球化学特征及其构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 27(1): 1–13.
- 杨钊, 董云鹏, 柳小明, 张津海. 2006. 西秦岭关子镇蛇绿岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年[J]. *地质通报*, 25(11): 1321–1325.
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 柳小明, 徐平, 孙德有. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J]. *科学通报*, 48(14): 1511–1520.
- 张国伟, 袁学诚, 张本仁. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1–855.
- 张旗, 张宗清, 孙勇, 韩松. 1995. 陕西商县丹凤地区丹凤群变质玄武岩的微量元素和同位素地球化学[J]. *岩石学报*, 11(1): 43–54.
- 张宗清, 张国伟, 刘敦一, 王宗起, 唐索寒, 王进辉. 2006. 秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 9–55.
- 赵如意, 姜常义, 李卫红, 王江波, 汪帮耀, 惠争卜. 2015. 东秦岭丹凤地区分水岭蛇绿岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学特征及其构造意义[J]. *地球学报*, 36(4): 473–482.

附中文参考文献

- 柏治安, 时毓, 刘希军, 刘磊, 赵增霞, 黄倩雯. 2020. 秦岭造山带秦岭岩群斜长角闪岩的年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *地质与勘探*, 56(2): 372–386.
- 操雨森, 黄始琪, 周炜鉴, 卢洋, 刘志强, 黄德志. 2020. 西秦岭天水关子镇变玄武岩的地球化学特征及大地构造环境[J]. *地质论评*, 66(3): 625–636.
- 陈隽璐, 徐学义, 王洪亮, 王宗起, 曾佐勋, 李平, 王超. 2008. 北秦岭西段早古生代埃达克岩地球化学特征及岩石成因[J]. *地质学报*, 82(4): 475–484.
- 董云鹏, 杨钊, 张国伟, 赵霞, 徐静刚, 姚安平. 2008. 西秦岭关子镇蛇绿岩地球化学及其大地构造意义[J]. *地质学报*, 82(9): 1186–1194.
- 冯益民. 1986. 西准噶尔蛇绿岩生成环境及其成因类型[J]. *中国科学*