

DOI: 10.12401/j.nwg.2023183

东昆仑东段三叠纪岩浆岩 Nd-Hf 同位素组分特征、物源演变规律及其构造背景

任海东^{1,2}, 王涛^{3,*}, 潘彤⁴, 王建国¹

(1. 青海大学地质工程系, 青海 西宁 810016; 2. 青海省地质调查院, 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; 3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 4. 青海省地质矿产勘查开发局, 青海 西宁 810001)

摘要: 作为中央造山系西段的重要组成部分, 东昆仑造山带以大面积区域性展布的三叠纪岩浆岩为鲜明特色。依据收集的东昆仑东段三叠纪岩浆岩 96 件锆石 U-Pb 年代学数据, 限定三叠纪岩浆作用时间为 252~212 Ma。结合岩石组合, 将其进一步划分为早(252~238 Ma)、中(238~226 Ma)、晚(226~212 Ma)3 期, 其中岩浆活动峰值为早期(252~238 Ma)。Nd 同位素数据(106 件)统计结果表明: 东昆仑东段三叠纪岩浆岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -9.4~-1.7, 大多为 -6.5~-3.0; Nd 模式年龄 $T_{\text{DM(Nd)}}$ 为 0.72~1.88 Ga, 大多为 1.00~1.80 Ga。Hf 同位素数据(全岩、锆石; 41 件)统计结果表明: 东昆仑东段三叠纪岩浆岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化较大(-8.4~+12.4), 主要为 -4.5~+2.0; 地壳模式年龄 $T_{\text{DMC(Hf)}}$ 值为 0.49~1.80 Ga, 大多为 1.15~1.55 Ga。整体而言, 三叠纪岩浆岩物源以中元古代壳源物质的再造为主, 新生地壳(<1.0 Ga)和古元古代地壳有所参与, 但比例小。从岩浆活动早期(252~238 Ma)到中期(238~226 Ma)再到晚期(226~212 Ma), $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值在岩浆活动早期(特别是在早三叠世)较高, 正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值占据很大比例, 物源中存在较多的新生物质; 中期以较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为主, Hf 模式年龄显示出现古元古代物质; 晚期 Nd-Hf 模式年龄揭示较古老的壳源组分增多。这种岩浆岩物源演变趋势, 与东昆仑东段三叠纪具俯冲到同碰撞再到碰撞后的构造演化背景一致。

关键词: 岩浆岩; 锆石年代学; Nd-Hf 同位素; 新生地壳; 东昆仑东段

中图分类号: P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)06-0095-18

Nd-Hf Isotopic Characteristics, Evolution Trend and Tectonic Setting of Triassic Magmatic Rocks in the Eastern Segment of East Kunlun Orogeny

REN Haidong^{1,2}, WANG Tao^{3,*}, PAN Tong⁴, WANG Jianguo¹

(1. Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China; 2. Key Laboratory of the Northern Qinghai-Tibet Plateau Geological Process and Mineral Resources, Qinghai Geological Survey Institute, Xining 810012, Qinghai, China; 3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. Bureau of Geological Exploration and Development of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China)

收稿日期: 2023-08-16; 修回日期: 2023-10-10; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 中国博士后科学基金“东昆仑东段三叠纪花岗岩源区演变特征及其成矿制约”(2019M663959XB), 青海省地质矿产勘查开发局项目“东昆仑东段三叠纪花岗岩源区演变特征及其成矿制约”(青地矿[2019]8号)和自然资源部深地动力学重点实验室开放课题“东昆仑-西秦岭造山带对接处共和盆地两侧三叠纪花岗岩物源演变特征和基底属性对比”(J1901-19)联合资助。

作者简介: 任海东(1986-), 男, 副教授, 博士, 从事花岗岩与大陆生长研究。E-mail: mingqiangren@163.com。

***通讯作者:** 王涛(1959-), 男, 研究员, 博士, 从事花岗岩与大陆生长研究。E-mail: taowang@cags.ac.cn。

Abstract: As a major component of the western segment of the Central Orogenic System, the East Kunlun Orogeny is characterized by the largely exposed of Triassic magmatic rocks. Based on the collected zircon U–Pb geochronological data of 96 Triassic magmatic rocks in the eastern segment of the East Kunlun orogeny, the Triassic magmatic activity is limited to 212~252 Ma, and can be further divided into three stages: early – (238~252 Ma), middle– (226~238 Ma) and late–stage (212~226 Ma). Among them, the peak magmatic period is the early stage (238~252 Ma). The statistical results of 106 Nd isotopes of Triassic magmatite in the eastern segment of the East Kunlun Orogeny show that $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values range from –9.4 to –1.7, mainly concentrated between –6.5 and –3.0, and the Nd model ages ($T_{\text{DM(Nd)}}$) range from 0.72 to 1.88 Ga, mainly concentrated between 1.00 and 1.80 Ga. The statistical results of 41 Hf isotopes (whole rock, zircon) of Triassic magmatite show that $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values vary greatly (–8.4 to +12.4), mainly concentrated between –4.5 and +2.0, and the crustal model ages ($T_{\text{DMC(Hf)}}$) range from 0.49 to 1.80 Ga, mainly concentrated between 1.15 and 1.55 Ga. Overall, the Triassic magmatic rocks are mainly derived from the reworking of Mesoproterozoic crustal materials, with minor involvement of juvenile crust (< 1.0 Ga) and Paleoproterozoic crustal materials. From the early stage (237~250 Ma) to middle stage (226~238 Ma) and then to late stage (212~226 Ma), the Nd–Hf isotopic parameters seems exhibit a certain evolutionary trend. In the early stage especially in the early Triassic, the $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values are higher, and positive $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values occupy a large proportion, indicating the presence of more juvenile material in the source. In the middle stage, lower $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values and negative $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values dominate the major proportion, and Hf model ages ($T_{\text{DMC(Hf)}}$) reveals the presence of Paleoproterozoic crustal material. In the late stage, the Nd–Hf model ages reveal an increase in older crustal source components. This magmatic source evolutionary trend is consistent with the tectonic evolution setting of subduction to collision and then to post–collision in the eastern segment of the East Kunlun orogeny in Triassic period.

Keywords: magmatic rock; zircon geochronology; Nd–Hf isotopes; juvenile crust; the eastern part of East Kunlun

造山带位于大陆地壳构造最活跃的地段(钟大赟等, 2002), 是大陆地壳生长、演化和再造的主要场所(郑永飞等, 2015; 王涛等, 2018)。作为大陆地壳的标志性岩石, 花岗岩记录了大陆地壳形成与演化的全过程(翟明国等, 2016, 2017), 被喻为探索地壳深部物质组成的最佳对象——“岩石探针”(莫宣学, 2007)。目前研究中, 以大陆地壳生成与再循环过程中所形成的的大规模花岗岩类为构造载体, 了解造山带构造–岩浆演化过程, 认识大陆造山带多期增生–改造过程中壳–幔相互作用和陆壳生长与再造机制, 已成为当前国内外地学研究的前沿课题(Hawkesworth et al., 2013; 侯增谦等, 2020)。大陆地壳的生长是指幔源岩浆及其分异产物通过各种地质过程添加到陆壳中导致陆壳面积和体积的增加(王涛等, 2020), 包括由俯冲导致的岛弧岩浆活动和岛弧增生、地幔柱驱动的岩浆底侵(Taylor et al., 1983; Rudnick, 1995)以及碰撞造山所导致的岩浆作用等(Niu et al., 2013; Huang et al., 2014)。大陆地壳生长方式主要幔源岩浆物质的抽取和之后的壳内分异(再熔和或分离结晶)2种(Rudnick, 1995; Hawkesworth et al., 2006)。这2种生长方式与洋壳俯

冲阶段的侧向增生和碰撞后岩浆底侵或俯冲板片断裂(Slab break-off)导致的大陆地壳垂向生长密切相关(王涛等, 2018; 侯增谦等, 2020; Zhu et al., 2022, 2023)。

东昆仑造山带具有多岛洋、软碰撞和多旋回造山等特征(殷鸿福等, 1997; 潘裕生等, 2010), 在地质期间经历了前寒武纪、早古生代、晚古生代—早中生代和晚中生代—新生代等4期主要构造运动(田龙等, 2023), 发育有新元古代、古生代、早中生代和晚中生代等4期岩浆作用, 其中, 三叠纪岩浆活动在东昆仑地区保留最好, 出露面积最大(莫宣学等, 2007; 马昌前等, 2015; Dong et al., 2018; 吴树宽等, 2023)。同时, 已有研究中发现东昆仑三叠纪岩浆作用具备一个重要的特征: 侵入岩中普遍发育大量镁铁质暗色微粒包体(MME), 并有与花岗岩类同期的镁铁质–超镁铁质火成岩广泛出露, 表明显生宙时期发生过广泛的岩浆底侵作用及岩浆混合作用, 大量地幔物质以岩浆的形式进入地壳是显生宙东昆仑地壳生长的重要方式之一(谌宏伟等, 2005; 莫宣学等, 2007; 陈宣华等, 2011; Xiong et al., 2014; Huang et al., 2014)。在增生造山带,

新生物质(Juvenile materials), 或作为残余洋壳拼贴于造山带, 或作为幔源弧岩浆注入地壳内部, 导致陆壳的形成与生长(Hawkesworth et al., 2010; 侯增谦等, 2020)。那么, 在显生宙还有没有新生地壳(Juvenile crust)产生, 显生宙东昆仑造山带地壳演化主要表现为前寒武纪地壳的再循环, 还是新生地壳的生长? 这是一个普遍关注的重要科学问题(莫宣学等, 2007, 2011), 而大规模的东昆仑岩浆岩带, 则为回答这个问题提供了可靠的记录和研究场所。

针对东昆仑地区大面积展布的三叠纪岩浆岩, 目前研究阶段中发表有较多的锆石 U-Pb 年龄和 Nd-Hf 同位素数据。为了进一步深入认识东昆仑造山带三叠纪岩浆岩时空演化、物质组分和构造背景, 笔者在前人研究的基础上, 系统收集东昆仑东段已公开发表的岩浆岩(基性岩、MME(镁铁质暗色微粒包体)、花岗岩类)锆石 U-Pb 年龄数据, 限定三叠纪岩浆作用时限, 揭示岩浆活动迁移规律。在此基础上, 收集并分析东昆仑东段岩浆岩已发表的 Nd-Hf 同位素数据, 示踪东昆仑东段三叠纪岩浆岩物源演变特征, 为该区三叠纪构造演化提供年代学和同位素方面的约束。

1 东昆仑造山带基本特征

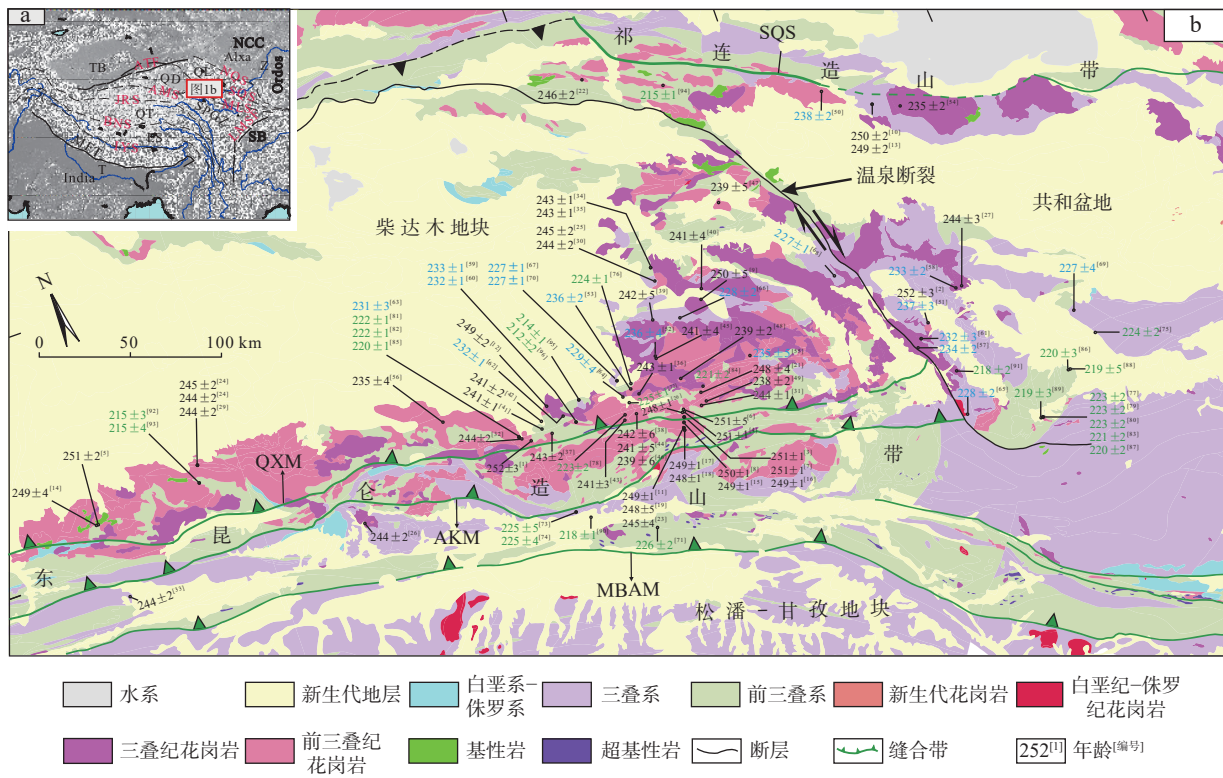
“中央造山系”或“昆仑-秦岭造山系”(张国伟等, 1998; 任纪舜, 2004), 长期处于以塔里木-华北为代表的北方陆块群与以扬子-羌塘为代表的南方陆块群相互作用的结合部, 也是古亚洲洋和特提斯洋两大构造域的交合处(姜春发, 2002)(图1)。作为中央造山系西段的重要组成部分, 东昆仑造山带近EW向横亘于青藏高原北部, 划分了北部柴达木盆地和南侧的高原腹地, 是青藏高原北缘特提斯造山带的重要组成部分(殷鸿福等, 1997; 张国伟等, 1998; 任纪舜, 2004; 莫宣学等, 2007)。其西部以库牙克断裂与西昆仑造山带相分割, 东部以温泉断裂与西秦岭造山带相接, 北部与柴达木地块相邻, 南部以麻扎-康西瓦-木孜塔格峰-昆南断裂与巴颜喀拉地块、喀喇昆仑造山带相接, 大致以乌图美仁一带为界, 东昆仑造山带又可以划分为东、西2段(莫宣学等, 2007)。从北到南, 东昆仑造山带中分布有祁漫塔格-香日德蛇绿岩混杂带、阿其克库勒-昆中蛇绿岩混杂带和木孜塔格-布青山-阿尼玛卿蛇绿岩混杂带, 将东昆仑划分为北祁漫塔格构造带、昆中构造带、昆南构造带和巴颜喀拉地

体(Dong et al., 2018)。

东昆仑造山带中侵入岩和火山岩广泛分布, 尤以侵入岩特别是花岗岩类最为发育(袁万明等, 2000)。研究认为, 东昆仑巨型岩浆带内花岗岩的形成划分为4个时段, 与4个造山旋回相对应, 分别是: 前寒武纪(元古宙)、早古生代(ϵ -D₃)、晚古生代—早中生代(D₃-T₃)和晚中生代—新生代(J₁-N)。在4期构造-岩浆事件中, 以晚古生代—早中生代(或称华力西期—印支期)旋回、特别是三叠纪的花岗岩, 规模宏大, 出露面积远远超过本区其他地质时代的侵入岩类(图1), 构成了东昆仑造山带火成岩的主体(郭正府等, 1998; 罗照华等, 1999; 袁万明等, 2000; 莫宣学等, 2007; 王新宇等, 2008)。自显生宙以来, 东昆仑造山带发生了早—中泥盆世(394~403 Ma)、中三叠世(239~242 Ma)2次显著的幔源岩浆底侵作用(莫宣学等, 2007)。这2次岩浆底侵作用在构造阶段上分别处于加里东造山旋回及晚华力西期—印支期旋回的俯冲结束—碰撞开始转变时期, 并与2个造山旋回的大规模岩浆混合作用大致同期(莫宣学等, 2007)。因此, 大量地幔物质以岩浆的形式进入地壳是显生宙东昆仑地壳生长的重要方式之一(莫宣学等, 2007; Huang et al., 2014; Xiong et al., 2014)。

2 东昆仑东段三叠纪岩浆岩研究现状

由于强烈的构造变动和隆升, 东昆仑造山带沉积记录和构造形迹遭到剥蚀破坏。因此, 区域地质演化的岩浆记录受到地学界的格外重视(谌宏伟等, 2005)。目前, 前人对东昆仑东段三叠纪花岗岩进行了大量研究工作(郭正府等, 1998; 罗照华等, 1999, 2002; 袁万明等, 2000; 谌宏伟等, 2005; 张宏飞等, 2006; 莫宣学等, 2007; Chen et al., 2012, 2015; Zhang et al., 2012; Huang et al., 2014; Xiong et al., 2014; Xia et al., 2015a, 2015b), 获得一大批锆石 U-Pb 年龄和 Nd-Hf 同位素组分特征等方面的多项研究成果(图2), 奠定了该区花岗岩研究的基础。例如, 确定研究区印支期中酸性侵入岩主要岩石类型为石英闪长岩+花岗闪长岩+二长花岗岩+正长花岗岩(莫宣学等, 2007; Zhang et al., 2012; Xiong et al., 2014), 且在寄主花岗岩类中发现有大量同时期的镁铁质暗色包体(罗照华等, 2002; 刘成东等, 2003; 谌宏伟等, 2005; 陈国超等, 2013a, 2013b; Huang et al., 2014), 一致认为东昆仑造山带晚古生代—早中生代花岗岩浆活动起始于晚二叠世(262 Ma), 一



AKM. 阿克其库勒-昆中蛇绿岩混杂带; MBAM. 木孜塔格-布青山-阿尼玛卿蛇绿岩混杂带;
QXM. 祁漫塔格-香日德蛇绿岩混杂带; SQS. 南祁连缝合带

图 1 东昆仑东段三叠纪岩浆岩时空分布图

Fig. 1 Distribution of the Triassic magmatite in the east part of East Kunlun orogeny

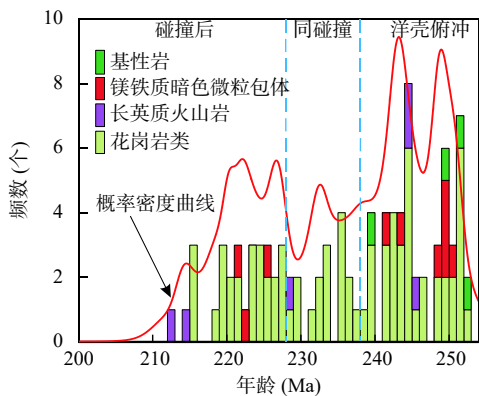


图 2 东昆仑东段三叠纪岩浆岩年代学直方统计图

Fig. 2 Histograms of geochronology for Triassic magmatite in the eastern part of East Kunlun orogeny

直持续至晚三叠世—早侏罗世(185~200 Ma)。

已有研究中发现东昆仑印支期花岗岩类均具备一个重要的特征:侵入岩中普遍发育大量镁铁质暗色微粒包体(MME),并有与花岗岩类同期的镁铁质-超镁铁质火成岩广泛出露(刘成东等, 2002; 谌宏伟等, 2005; 莫宣学等, 2007; Xiong et al., 2014; Huang et al., 2014),表明三叠纪东昆仑东段发生过广泛的岩浆底

侵作用和岩浆混合作用(Liu et al., 2005; 莫宣学等, 2007; Chen et al., 2012; 陈国超等, 2016),存在大量新生幔源组分添加到古老陆壳中。那么,东昆仑东段新生陆壳的生长机制是什么?是早—中三叠世古特提斯洋壳北向俯冲过程中岛弧侧向增生导致的大陆地壳水平生长,还是晚三叠世后碰撞岩浆底侵或俯冲板片断离(Slab break-off)导致的大陆地壳垂向生长(莫宣学等, 2007)?

3 东昆仑东段印支期岩浆作用时限和岩石类型

依据收集的东昆仑东段 96 件锆石 U-Pb 年龄建立三叠纪岩浆作用年代学格架(表 1)。东昆仑造山带东段三叠纪岩浆岩的年龄主要为 212~252 Ma,可划分为早(238~252 Ma)、中(226~238 Ma)、晚(212~226 Ma)3 个阶段,其中,年龄峰值为早期 238~252 Ma 阶段(图 2)。可以看出,三叠纪岩浆活动在东昆仑东段大规模发育,岩浆作用峰期以早中三叠世(238~252 Ma)为主,晚三叠世岩浆活动(200~

237 Ma)明显弱于早中三叠世(238~252 Ma)(图 1、图 2)。该年代学的建立和岩浆期次的划分与对比,为分析东昆仑三叠纪构造岩浆演化提供了年代学依据,同时也为系统开展同位素分析奠定了年代学基础。

在东昆仑东段,三叠纪岩体东西向岩浆活动迁移规律不存在或不明显(图 1),从北到南存在变年轻的趋势,但不明显。早期阶段(238~252 Ma)发育的花岗岩类,主要分布在东昆仑东段北部(如乌兰、黑马河和夏日哈等地区)、中部(哈图-香日德-香加)和东端的大河坝地区,出露的岩石类型复杂,花岗岩类以花岗闪长岩+二长花岗岩+花岗斑岩为主,火山岩主要为流纹岩和流纹斑岩。该期岩浆作用一个极重要的特征是出现大量镁铁质暗色微粒包体(以镁铁质和闪长质为主)(图 2),表明该阶段东昆仑地区存在大量的岩浆混合作用。除此之外,该期东昆仑地区出露较大规模的基性侵入岩如苏长辉长岩、角闪辉长岩和辉绿岩等,并且这些基性岩地球化学特征显示其源自富集地幔(熊富浩等, 2011)。中期阶段(226~238 Ma)发育的花岗岩类主要集中于东昆仑东段的中部(哈图-香日德-香加)和东端鄂拉山大河坝地区,花岗岩类主要为花岗闪长岩+闪长岩+正长花岗岩。晚期阶段(212~226 Ma)发育的花岗岩类出现在东昆仑东段中部(哈图-香日德一带)、南部(沙尔隆勒盖拜兴-羊场一带)和东端如花石峡、温泉一带,花岗岩类岩石类型主要为石英闪长岩+闪长岩+花岗闪长岩+正长花岗岩,火山岩为流纹岩,同时出现较多的闪长质包体。

4 东昆仑东段三叠纪岩浆岩 Nd-Hf 同位素组分特征、物源演变特征及构造演化

4.1 三叠纪岩浆岩 Nd-Hf 同位素组分特征

文中共收集东昆仑东段具明确锆石 U-Pb 年龄的三叠纪岩浆岩 Nd 同位素数据 106 套(表 1),其中,绝大部分 Nd 同位素数据源自花岗岩类,少量为中-基性侵入岩、火山岩和 MME 数据。Nd 模式年龄计算方法中,当 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} \leq 0.14$,或者 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 值为 $-0.6 \sim -0.2$,则采用一阶段模式年龄(T_{DM1}),其余 Nd 模式年龄计算采用二阶段模式年龄(T_{DM2})(Wang et al., 2009)。东昆仑东段岩浆岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值与 Nd 模式年龄 T_{DM} 呈较明确的线性关系(图 3a), $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 值大多为 $-0.6 \sim -0.2$ (图 3b)。因此, Nd 模式年龄 T_{DM} 主要采用单阶段计算方法。东昆仑东段三叠纪岩浆岩 Nd 同位素数据统计结果显示,

$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 均为负值, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-9.4 \sim -1.7$,大多为 $-6.5 \sim -3.0$ (图 4a)。Nd 模式年龄($T_{\text{DM}(\text{Nd})}$)值为 $1.88 \sim 0.72$ Ga,大多为 $1.8 \sim 1.0$ Ga(图 4b),表明东昆仑东段三叠纪岩浆岩物源以中元古代壳源物质的再造为主,存在少量的新生地壳和古元古代地壳。

东昆仑东段三叠纪岩浆岩锆石 Hf 同位素数据包括全岩样品 19 件、锆石样品 22 件(表 1),绝大部分 Hf 同位素数据源自花岗岩类,少量源自中-基性侵入岩和火山岩, MME 的 Hf 数据也收集用于物源分析。文中均采用 Hf 地壳模式年龄(T_{DMC})来代表岩浆源区从亏损地幔分离的时间。东昆仑造山带东段 41 件样品(锆石和全岩) Hf 同位素数据统计结果显示: $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值正负均有、主体为负, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-8.4 \sim +12.4$,大多为 $-4.5 \sim +2.0$ (图 5a),地壳模式年龄 $T_{\text{DMC}(\text{Hf})}$ 值为 $1.80 \sim 0.49$ Ga,大多为 $1.15 \sim 1.55$ Ga(图 5b),表明东昆仑东段三叠纪岩浆岩物源以中元古代壳源物质的重熔为主,存在少量的新生地壳和古元古代地壳。

4.2 三叠纪岩浆岩 Nd-Hf 同位素演变特征

东昆仑造山带东段三叠纪岩浆作用可划分为早(238~252 Ma)、中(226~238 Ma)、晚(212~226 Ma)3 期(图 2)。

早期阶段(238~252 Ma),东昆仑东段三叠纪岩浆岩一个重要的特征是存在与花岗岩类同期的镁铁质暗色微粒包体和镁铁质侵入岩,这意味着存在大规模的岩浆混合作用和幔源岩浆物质的加入。早三叠世(247~252 Ma) $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值显示较大的变化范围($-8.3 \sim -1.7$), Nd 模式年龄($T_{\text{DM}(\text{Nd})}$)为 $0.72 \sim 1.88$ Ga,反映该阶段弧岩浆具有明显的两元性(图 6a)。一部分母岩浆来源于流体交代的地幔楔的部分熔融(基性岩、镁铁质暗色微粒包体和少量花岗岩类),代表了新生地壳的加入;另一部分来自于古老地壳的重熔或混染。随着侵位年龄变年轻, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值整体逐渐降低, Nd 模式年龄($T_{\text{DM}(\text{Nd})}$)变老(图 6a),中三叠世末(244 Ma)出现古元古代物质。该期出露的白日其利镁铁质岩墙群中苏长辉长岩具富集地幔的同位素特征($\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -7.4 \sim -3.6$ 、 $T_{\text{DM}(\text{Nd})} = 1.32 \sim 1.62$ Ga),镁铁质暗色微粒包体(以镁铁质和闪长质为主)的同位素特征与寄主岩相近或相似,表明存在明显的岩浆混合作用(Xia et al., 2015a)。中期阶段(226~238 Ma), $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 均为负值、其值为 $-9.4 \sim -3.9$;模式年龄(T_{DM})变化范围较大,为 $1.09 \sim 1.67$ Ga。晚期阶段(212~226 Ma), $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 均为负值,随岩体侵位年龄变年轻, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值逐渐升高, Nd 模式年龄(T_{DM})略微变古老,以中元古代壳源物质

表 1 东昆仑东段三叠纪岩浆岩锆石 U-Pb 年代学数据、全岩 Nd 同位素数据和全岩与锆石 Hf 同位素数据表

Tab. 1 zircon U-Pb ages, whole rock Nd isotopes and Hf isotopes (whole and zircon) of the Triassic Magmatite from the eastern part of East Kunlun orogeny

年龄 编号	样品号	岩性	结晶		测年方法	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (均值)	Nd 模式年龄 T_{DM} (Ma) 值 (均值)	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (均值)	Hf 模式年龄 T_{DMC} (Ma) 值 (均值)	数据来源
			年龄 (Ma)	误差 (Ma)						
1	08BL08-1	花岗闪长岩	252	3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-5.30	1.58			Zhang et al., 2012
2	14-SST-37	花岗斑岩	252	3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb			1.56~12.41 (6.14)	0.49~1.183 (0.89)	Ren et al., 2016
3	DL09-21	花岗闪长岩	251	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-2.57	1.23	2.72	1.11	Huang et al., 2014
4	DL09-27	花岗闪长岩	251	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-2.63	1.19	2.11	1.15	Huang et al., 2014
5	10NM63-10	苏长辉长岩	251	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-7.36~-3.61 (-5.18)	1.32~1.62 (1.46)	-2.39~1.06 (-0.88)	1.21~1.43 (1.34)	熊富浩等, 2011
6	XH040916-6	花岗闪长岩	251	5	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-4.00	1.15			Chen et al., 2012
7	DL09-18	花岗闪长岩	251	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-2.82	1.13	3.35	1.07	Huang et al., 2014
8	DL09-15	花岗闪长岩	250	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-4.12~-3.14 (-3.63)	1.32~1.36 (1.34)	3.30	1.07	Huang et al., 2014
9	XH040915-4	花岗闪长岩	250	5	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-4.41	1.26			Chen et al., 2012
10	DL09-31	镁铁质暗色微粒包体	250	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-2.15~-2.07 (-2.11)	0.74~0.74 (0.74)	-3.08 1.54	1.47 1.18	Huang et al., 2014
11	DL09-13	花岗闪长岩	249	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-4.47~-2.15 (-3.31)	1.11~1.39 (1.25)	2.37	1.13	Huang et al., 2014
12	11BL03-1	granodiorite	249	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					Xiong et al., 2014
13	DL09-30	花岗闪长岩	249	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-1.67	0.72	2.09	1.15	Huang et al., 2014
14	br01-1	角闪辉长岩	249	4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					熊富浩等, 2011
15	DL09-17	镁铁质暗	249	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-3.92	1.61	4.35	1.00	Huang et al., 2014
16	DL09-22	镁铁质暗	249	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-2.95	1.27	4.44	1.00	Huang et al., 2014
17	DL09-07	镁铁质暗	249	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-2.19	1.31	3.89	1.03	Huang et al., 2014

续表 1

年龄 编号	样品号	岩性	结晶 年龄 (Ma)	误差 (Ma)	测年方法	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (均值)	Nd 模式年龄 T_{DM} (Ma) 值 (均值)	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (均值)	Hf 模式年龄 T_{DMC} (Ma) 值 (均值)	数据来源
18	DL09-08	花岗闪长岩	248	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-3.69	1.32	3.18 -1.38	1.08 1.37	Huang et al., 2014
19	XH040916-8B	花岗岩	248	5	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					Chen et al., 2012
20	DL09-24	镁铁质暗	248	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-4.03	1.57	3.93 1.74	1.03 1.17	Huang et al., 2014
21	09NM66-1	quartz diorite	248	4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					Xiong et al., 2014
22	ZW-14	二长花岗岩	246	2	ICP-MS 锆石 U-Pb					强娟, 2008
23	XH040916-8A	英云闪长岩	245	4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-4.73	1.45			Chen et al., 2012
24	BLGTC104-B1	granite	245	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-3.32 ~ -3.31 (-3.31)	1.08 ~ 1.16 (1.12)	-1.38 ~ 1.71 (0.23)	1.17 ~ 1.36 (1.26)	Ding et al., 2014
25	HSG5-1	流纹岩	245	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-4.75 ~ -4.17 (-4.49)	1.29 ~ 1.32 (1.31)	-4.18 ~ 0.19 (-1.48)	1.26 ~ 1.54 (1.37)	Li et al., 2015a
26	AK18	花岗斑岩	244	2	SIMS 锆石 U-Pb					刘建楠等, 2012
27	14-SST-51	花岗闪长岩	244	3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb			-3.72 ~ 1.01 (-1.77)	1.21 ~ 1.51 (1.39)	Ren et al., 2016
28	BLG-XJ-B8	granite	244	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-3.59	1.07	-3.68 ~ 1.33 (-0.16)	1.19 ~ 1.51 (1.28)	Ding et al., 2014
29	BLG-XJ-B9	granite	244	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-3.24 ~ -3.14 (-3.19)	0.99 ~ 1.16 (1.08)	-1.52 ~ 1.67 (0.29)	1.17 ~ 1.37 (1.26)	Ding et al., 2014
30	HSG1-2	流纹岩	244	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-5.93 ~ -4.56 (-5.22)	1.31 ~ 1.45 (1.37)	-2.94 ~ 1.37 (-0.79)	1.19 ~ 1.46 (1.32)	Li et al., 2015a
31	ASH-2#	闪长岩	244	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					李碧乐等, 2012
32	08BL10-1	花岗闪长岩	244	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-5.30 ~ -4.74 (-5.02)	1.42 ~ 1.63 (1.53)			Zhang et al., 2012
33	DG25-4	流纹质凝灰岩	244	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					吴芳, 2010

续表 1

年龄 编号	样品号	岩性	结晶 年龄		测年方法	$\epsilon_{\text{cd}}(t)$ 值 (均值)	Nd模式年龄 T_{DM} (Ma)值(均值)	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (均值)	Hf模式年龄 T_{DMC} (Ma) 值(均值)	数据来源
			(Ma)	误差 (Ma)						
34	13NGT-04-1	Host granodiorite	243	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-7.13 ~ -5.76 (-6.31)	1.44 ~ 1.8 (1.61)	-0.97 ~ 2.44 (0.4)	1.12 ~ 1.33 (1.25)	Xia et al., 2015a
35	(13NGT-04-2)	Dioritic enclave	243	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-8.30 ~ -5.76 (-6.86)	1.40 ~ 1.88 (1.58)	-3.51 ~ 1.67 (-1.02)	1.17 ~ 1.50 (1.34)	Xia et al., 2015a
36	09d36-1	quartz diorite	243	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-5.24	1.52	-3.69 ~ -2.38 (-2.99)	1.42 ~ 1.51 (1.46)	Xiong et al., 2014
37	08BL01-2	花岗闪长岩	243	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-7.46 ~ -5.22 (-6.10)	(1.23 ~ 1.77)/1.49			Zhang et al., 2012
38	QW1032	花岗闪长岩	242	6	SHRIMP II 锆石 U-Pb					Liu et al., 2004
39	XH040916-1	碱性花岗岩	242	5	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-4.62	1.69			Chen et al., 2012
40	XH040915-5	花岗闪长岩	241	4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-4.84	1.32			Chen et al., 2012
41	11BL01-2	granodiorite	241	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					Xiong et al., 2014
42	08BL01-03	石英闪长岩	241	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-6.44	1.54			Zhang et al., 2012
43	09NM52-1	granodiorite	241	3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-6.49	1.43			Xiong et al., 2014
44	Q1013	暗色微粒包体	241	5	SHRIMP II 锆石 U-Pb					Liu et al., 2004
45	XH040916-3	花岗闪长岩	241	4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-4.84	1.32			Chen et al., 2012
46	QW1160	角闪辉长岩	239	6	SHRIMP II 锆石 U-Pb					Liu et al., 2004
47	XH040914-5	钾长花岗岩	239	5	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-9.40	1.67			Chen et al., 2012
48	09NM73-1	syenogranite	239	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-4.78	1.41	-6.85 ~ -3.85 (-4.87)	1.51 ~ 1.7 (1.58)	Xiong et al., 2014
49	11ASY-008	石英闪长岩	238	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					李金超等, 2014
50	WSA-6	黑云母花岗岩	238	2	ICP-MS 锆石 U-Pb					强娟等, 2008

续表 1

年龄 编号	样品号	岩性	结晶 年龄 (Ma)	误差 (Ma)	测年方法	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (均值)	Nd 模式年龄 T_{DM} (Ma) 值 (均值)	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (均值)	Hf 模式年龄 T_{DMC} (Ma) 值 (均值)	数据来源
51	14-SST-74	花岗闪长岩	237	3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb			-8.39 ~ 0.51 (-2.80)	1.24 ~ 1.80 (1.45)	Ren et al., 2016
52	09DL31-1	syenogranite	236	4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-6.67	1.33			Xiong et al., 2014
53	09DL40-2	granitic porphyry	236	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-7.79 ~ -6.89 (-7.34)	1.36 ~ 1.53 (1.45)			Xiong et al., 2014
54	HMH-2	花岗闪长岩	235	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-4.40 ~ -3.85 (-4.12)	1.23 ~ 1.29 (1.25)			张宏飞等, 2006
55	11HR 07	花岗闪长斑岩	235	5	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					宋忠宝等, 2013
56	XH040917-1A	闪长岩	235	4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-5.38	1.48			Chen et al., 2012
57	14-SST-59	钾长花岗岩	234	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb			-3.79 ~ 3.82 (-0.14)	1.02 ~ 1.51 (1.27)	Ren et al., 2016
58	14-SST-44	钾长花岗岩	233	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb			-2.12 ~ 4.38 (-0.39)	0.99 ~ 1.40 (1.29)	Ren et al., 2016
59	B-006	花岗闪长斑岩	233	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					Xia et al., 2014
60	B-004	二长花岗斑岩	232	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					Xia et al., 2014
61	14-SST-42	钾长花岗岩	232	3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb			-2.46 ~ 4.96 (0.99)	0.95 ~ 1.42 (1.20)	Ren et al., 2016
62	11BL06-1	syenogranite	232	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-6.39 ~ -5.88 (-6.13)	1.09 ~ 1.19 (1.14)			Xiong et al., 2014
63	08BL09	正长花岗岩	231	3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-6.09	1.3			Zhang et al., 2012
64	XH040916-4	花岗闪长岩	229	4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-5.53	1.11			Chen et al., 2012
65	1 059	花岗岩	228	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					Dai et al., 2013
66	RSX12-48	rhyolite porphyry	228	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-5.10	1.42	-0.93 -1.45	1.32 1.35	Hu et al., 2016
67	SQ-04-1	斜长花岗岩	227	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb			-8.21 ~ 0.15 (-5.1)	1.25 ~ 1.78 (1.58)	Xia et al., 2015b

续表 1

年龄 编号	样品号	岩性	结晶 年龄		测年方法	ϵ_{Nd} (t) 值 (均值)	Nd模式年龄 T_{DM} (Ma) 值 (均值)	ϵ_{Hf} (t) 值 (均值)	Hf模式年龄 T_{DMC} (Ma) 值 (均值)	数据来源
			(Ma)	误差 (Ma)						
68	JDG-PD1-N22	granodiorite porphyry	227	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-8.29 ~ -7.88 (-8.12)	1.59 ~ 1.66 (1.63)			Li et al., 2015a
69	2 228-8	花岗闪长岩	227	4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					李小江等, 2015
70	SQ-04-2	斜长花岗岩	227	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb			-6.92 ~ 0.42 (-4.48)	1.23 ~ 1.7 (1.54)	Xia et al., 2015b
71	Jan-98	闪长岩	226	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					李佐臣等, 2013
72	12NM29-5	MMEs	225	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					Xiong et al., 2014
73	11 124/2	花岗闪长岩	225	5	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					陈国超等, 2013a
74	11 124/1	闪长质包体	225	4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					陈国超等, 2013a
75	DQ2-5	花岗闪长岩	224	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					杨拴海等, 2015
76	09DL40-1	porphyritic granodiorite	224	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-5.89	1.22	-3.41 ~ -1.05 (-2.53)	1.33 ~ 1.48 (1.42)	Xiong et al., 2014
77	Sd-2	石英闪长玢岩	223	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					刘建平等, 2012
78	XA30-1	二长花岗岩	223	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-5.72 ~ -3.82 (-4.91)	1.18 ~ 1.35 (1.26)			罗明非等, 2014
79	ST05	石英闪长岩	223	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb			-2.05 ~ 4.06 (1.13)	1.00 ~ 1.39 (1.19)	Wang et al., 2016
80	ZK2523B-02	石英闪长岩	223	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					Wang et al., 2016
81	NMHX-1-2	Granodiorites	222	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					Xia et al., 2014
82	NMHX-03	Gabbroic enclaves	222	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					Xia et al., 2014
83	14-SST-08	Granodiorites	221	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					Ren et al., 2016

续表 1

年龄 编号	样品号	岩性	结晶 年龄 (Ma)	误差 (Ma)	测年方法	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (均值)	Nd模式年龄 $T_{\text{DM}}(Ma)$ 值 (均值)	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (均值)	Hf模式年龄 $T_{\text{DMC}}(Ma)$ 值 (均值)	数据来源
84	XA-63-1	花岗闪长岩	221	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-6.44 ~ -5.23 (-5.83)	1.43 ~ 1.48 (1.46)			罗明非等, 2014
85	NMHX-02	Diorite enclaves	220	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					Xia et al., 2014
86	3 154—5	granodiorite	220	3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					Yang et al., 2015
87	Sg-1	花岗斑岩	220	3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					刘建平等, 2012
88	3 154-TW-5	花岗闪长岩	219	5	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					徐多勋等, 2015
89	14-SST-20	花岗斑岩	219	3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					Ren et al., 2016
90	11 136/3	石英闪长岩	218	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb					陈国超等, 2013a
91	WQ-4	花岗闪长岩	218	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-6.12 ~ -4.77 (-5.56)	1.32 ~ 1.7 (1.53)			张宏飞等, 2006
92	X101-B1	diorite	215	3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-5.06	1.32	-4.21 ~ -0.61 (-2.27)	1.29 ~ 1.52 (1.4)	Ding et al., 2014
93	X101-B2	diorite	215	4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-5.70 ~ -5.16 (-5.43)	1.4 ~ 1.45 (1.43)	-4.37 ~ -2.19 (-3.05)	1.39 ~ 1.53 (1.44)	Ding et al., 2014
94	ZW-06	二长花岗岩	215	1	ICP-MS 锆石 U-Pb					强娟, 2008
95	DL09-01	流纹岩	214	1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-2.96 ~ -2.96 (-2.96)	1.37 ~ 1.42 (1.4)	1.05	1.18	丁烁等, 2011
96	DL09-05	流纹岩	212	2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	-3.06 ~ -3.04 (-3.05)	1.41 ~ 1.51 (1.46)	0.50	1.22	丁烁等, 2011

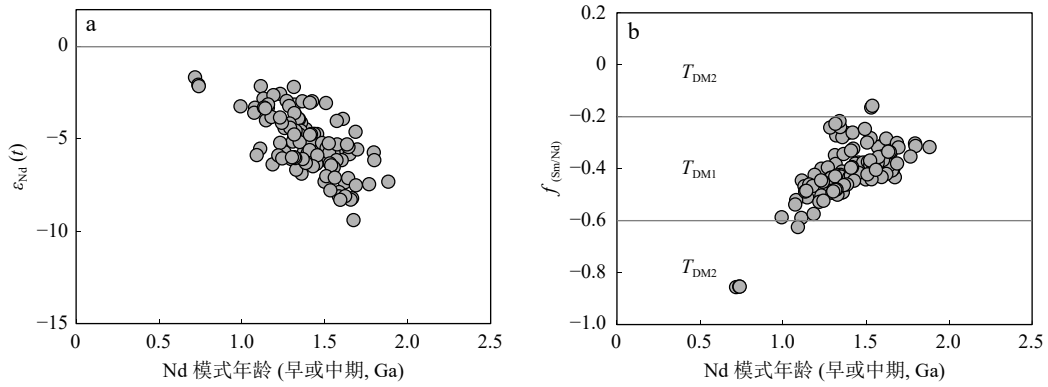


图3 东昆仑东段三叠纪岩浆岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - T_{DM} 图解(a)和 $f_{\text{Sm/Nd}}$ - T_{DM} 图解(b)

Fig. 3 (a) $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ vs. T_{DM} and (b) $f_{\text{Sm/Nd}}$ vs. T_{DM} for Triassic magmatic rocks in the eastern part of East Kunlun orogeny

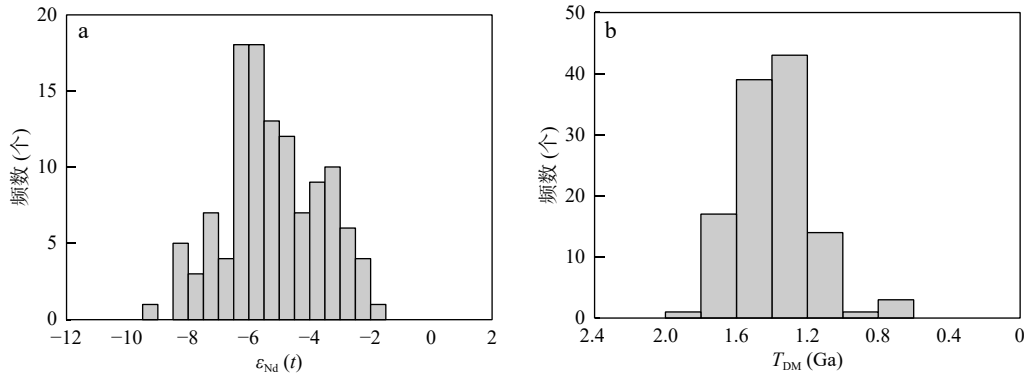


图4 东昆仑东段三叠纪岩浆岩 Nd 同位素组分特征 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (a)和 T_{DM} (b)直方统计图

Fig. 4 (a) $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ and (b) T_{DM} histograms for Triassic magmatite in the eastern part of East Kunlun orogeny

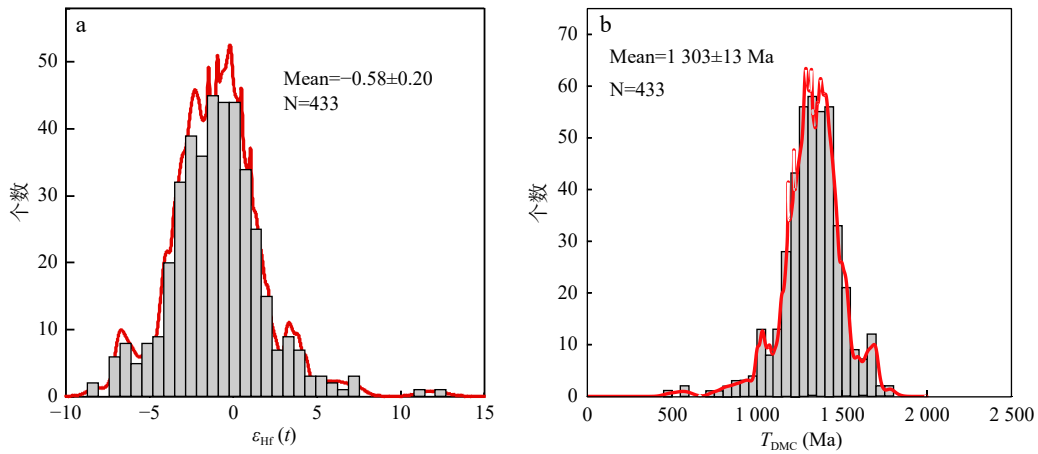


图5 东昆仑东段三叠纪岩浆岩 Hf 同位素组分 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (a)和 T_{DMC} (b)直方统计图

Fig. 5 (a) $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ and (b) T_{DMC} histograms for Triassic magmatite in the eastern part of East Kunlun orogeny

再造为主(图 6c)。

早期阶段(238~252 Ma), 东昆仑东段岩浆岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值以正负相混、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 >0 为主, 表明物源以年轻物源和古老壳源物质相混、年轻物源占绝大多数为特征($T_{\text{DMC(Hf)}}$)(图 6b、图 6d)。早三叠世(247~252 Ma), 花岗岩类和 MME 的全岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 >0 、物源以年轻

的新生地壳为主, 随着岩浆岩侵位年龄变年轻, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值逐渐变小, 模式年龄 $T_{\text{DMC(Hf)}}$ 逐渐增大。该期白日其利镁铁质岩墙群中苏长辉长岩 Hf 同位素特征显示富集地幔的特征($\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -2.4 \sim +3.6$), 绝大多数镁铁质暗色微粒包体(以镁铁质和闪长质为主)显示 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 >0 的同位素特征, 与寄主岩石花岗闪长岩相近或相

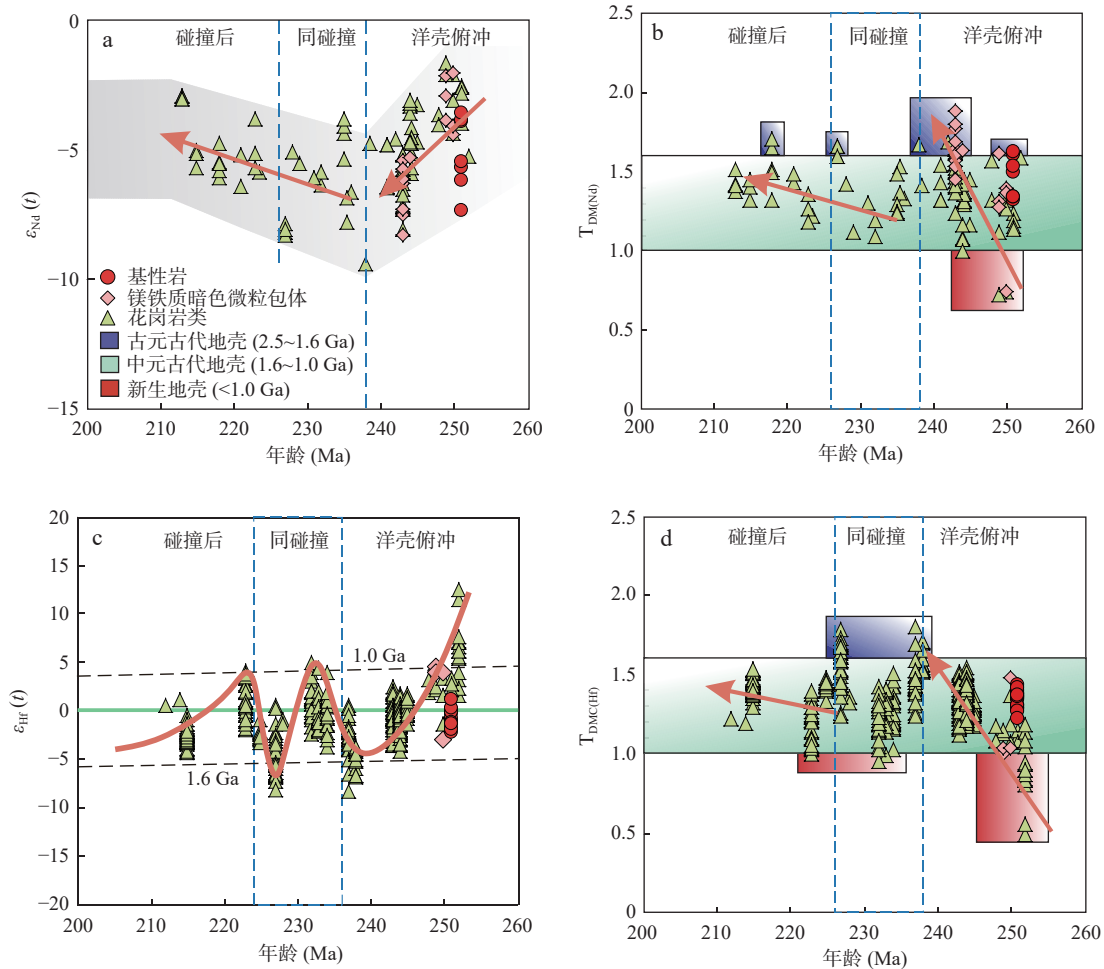


图6 东昆仑东段 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ -年龄(a)、 $T_{\text{DM}(\text{Nd})}$ -年龄(b)、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -年龄(c)和 $T_{\text{DM}(\text{Hf})}$ -年龄图(d)

Fig. 6 (a) $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ vs. age, (b) $T_{\text{DM}(\text{Nd})}$ vs. age, (c) $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. age and (d) $T_{\text{DM}(\text{Hf})}$ vs. age for Triassic magmatite rocks in the eastern part of East Kunlun orogeny

似, 表明其物源以新生壳源物质为主(Huang et al., 2014)。中期阶段(226~238 Ma), $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值以负值为主, 模式年龄 $T_{\text{DM}(\text{Hf})}$ 变老, 出现古元古代壳源物质。晚期阶段(212~226 Ma), $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化幅度较小, $T_{\text{DM}(\text{Hf})}$ 略微变老(图6d)。分析观察东昆仑东段三叠纪岩浆岩 Nd 与 Hf 同位素组分特征(图6a、图6c), 绝大部分样品中 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 存在正相关性, 以 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 沿同位素地球演化线($\epsilon_{\text{Hf}}=1.55\epsilon_{\text{Nd}}+1.21$)(Vervoort et al., 2011)分布为特征, 表明 Nd-Hf 同位素组分存在正相关的耦合变化。但是, 也有少量数据存在 Nd-Hf 解耦的现象, 如早三叠世镁铁质暗色微粒包体和寄主岩(花岗闪长岩)的 Hf 同位素组分和 Nd 同位素组分均存在解耦现象, 解耦的原因是镁铁质暗色微粒包体和寄主岩的 Nd-Hf 同位素组分反映了其岩浆源区的不均一性, 即岩浆物源区的差异性和地壳的混染导致源区本身存在非均质性(Huang et al., 2014)。

4.3 东昆仑东段三叠纪构造演化和陆壳生长方式

目前有关东昆仑造山带三叠纪岩浆岩形成的构造背景主要存在3种观点: ①古特提斯洋盆在晚二叠世已闭合, 三叠纪花岗岩为碰撞后构造环境下形成(罗照华等, 2002; 张宏飞等, 2006)。②早—中三叠世花岗岩形成于洋壳俯冲环境(Huang et al., 2014; Li et al., 2015a, 2015b; Xia et al., 2015a), 晚三叠世花岗岩形成于碰撞/碰撞后环境(Wang et al., 2016; 任海东等, 2017)。③晚三叠世古特提斯洋盆仍未闭合, 三叠纪岩浆作用均与洋壳持续俯冲有关(Liu, 2005; 马昌前等, 2015)。但是, 以上3种主要观点一致认为: 东昆仑造山带三叠纪岩浆岩均与南侧以阿尼玛卿—勉略蛇绿岩带为代表的古特提斯洋盆的俯冲增生/碰撞造山密切相关, 所有不同构造背景争议的核心, 关键在于古特提斯洋盆的具体闭合时限。

收集、分析东昆仑东段三叠纪岩浆岩 Nd-Hf 同

位素组分数据和物源演变特征,整体显示源岩以年轻新生地壳和古老壳源相混、古老地壳占绝大多数为特征($T_{DM(Nd)}/T_{DMC(Hf)}$),以负的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 <0 和 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值正负相间、 $\epsilon_{Hf}(t)<0$ 为主。进一步分析物源演变特征可以看出,早期(238~252 Ma)岩浆岩以 $\epsilon_{Hf}(t)>0$ 、 $\epsilon_{Nd}(t)$ 较年轻的负值为主,中期(226~238 Ma)以 $\epsilon_{Hf}(t)<0$ 、 $\epsilon_{Nd}(t)$ 较古老为主,晚期(201~226 Ma)呈现两者之间的特征(图6)。Nd-Hf同位素组分演变规律表明,东昆仑东段三期岩浆事件的 $\epsilon_{Hf}(t)/\epsilon_{Nd}(t)$ 均值呈现从早期的略高变为中期略低再到晚期略升高的变化趋势,并且,在早期物源($T_{DM(Nd)}/T_{DMC(Hf)}$)以中元古代壳源为主,存在较多的新生地壳和部分古元古代壳源物质,中期以中元古代壳源为主,存在少量古元古代壳源物质,晚期以中元古代壳源为主,古元古代壳源物质和新生地壳极少。

这种Nd-Hf同位素演化趋势与洋壳俯冲环境下较强烈的壳幔作用、到同碰撞阶段壳源成分较多,再到碰撞后拆沉阶段基性岩浆底侵导致的壳幔作用加强的构造演化过程一致,可进一步佐证陆壳生长方式在早期俯冲阶段以岛弧的侧向增生为主,碰撞后存在岩浆底侵导致或俯冲板片断离(Slab break-off)导致的大陆地壳垂向生长。例如,早期阶段(238~252 Ma), $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(锆石、全岩)多为正,可能反映了年轻壳源组分或幔源组分的贡献较大,与俯冲环境下的较强的壳幔相互作用相一致,该时期发育的镁铁质(苏长辉长岩)岩墙群为此认识提供了佐证(熊富浩等, 2011)。中期(226~238 Ma)花岗岩类的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值变化较大,出现极负的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值和 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值,显示古老壳源再造组分的增多,可能与同碰撞阶段壳源岩浆作用较强有关,这与东昆仑地区晚三叠世八宝山组与下伏地层间角度不整合所代表的主造山构造时限(中三叠世晚期—晚三叠早期)(李瑞保等, 2012)、昆秦接合部中高压变质带混杂岩中绢云母的变质/变形热事件年龄(220~230 Ma)(张智勇等, 2004)、晚三叠世开始的陆内盆地磨拉石建造(王永标等, 1997)等一致;晚期阶段(201~226 Ma), $\epsilon_{Nd}(t)$ 值/ $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(锆石、全岩)呈逐渐升高的趋势,可能反映了年轻幔源组分的逐步增加,可以解释为后碰撞拆沉作用和/或幔源岩浆底侵作用导致较强的壳幔相互作用所致,且东昆仑东段在该时期发育的镁铁质(辉绿岩)岩墙(Huang et al., 2014)为该认识提供了进一步证据。该研究为论证以阿尼玛卿蛇绿岩带为代表的古特提斯洋北向俯冲闭合(238~252 Ma)、松潘-甘孜地块与柴达木地块南缘碰

撞(226~238 Ma)以及碰撞后(210~226 Ma)3个构造演化阶段提供了新证据,也是一个深入分析岩浆演变特点来揭示构造背景及其演化的研究实例。

5 结论

(1) 东昆仑东段三叠纪岩浆作用时限为212~252 Ma,可划分为早(238~252 Ma)、中(226~238 Ma)、晚(212~226 Ma)3期。其中,年龄峰值为早期238~252 Ma,且早期存在与花岗岩类同期的镁铁质侵入岩和大量的镁铁质暗色微粒。

(2) 东昆仑东段三叠纪岩浆岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 均为负值,大多为-6.5~-3.0, Nd模式年龄($T_{DM(Nd)}$)大多为1.8~1.0 Ga; 锆石和全岩Hf同位素数据显示 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值正负均有、主体为负,大多为-4.5~+2.0, Hf地壳模式年龄($T_{DMC(Hf)}$)大多为1.15~1.55 Ga。Nd-Hf同位素特征表明,东昆仑东段三叠纪岩浆岩物源以中元古代壳源物质的再造为主,存在少量的新生地壳和古元古代地壳。新生地壳与三叠纪早期古特提斯洋壳的北向俯冲密切相关。

(3) Nd-Hf同位素组成与演变揭示其物源在早期存在较多的新生地壳,中期古老壳源再造组分增加,晚期年轻幔源物质又有所贡献,与东昆仑东段三叠纪具俯冲到同碰撞再到碰撞后的构造演化背景一致。

致谢:感谢匿名审稿专家提出的宝贵修改意见,在此表示诚挚的感谢!

参考文献(References):

- 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冈长岩体为例[J].中国地质, 2013a, 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, 2013a, 40(4): 1044-1065.
- 陈国超,裴先治,李瑞保,等.东昆仑洪水川地区科科鄂阿龙岩体锆石U-Pb年代学、地球化学及其地质意义[J].地质学报, 2013b, 87(02): 178-196.
- CHEN Guochao, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemical Characteristics and Geological Significance of Cocoe A'Long Quartz Diorites Body from the Hongshuichuan Area in East Kunlun[J]. Acta Geologica Sinica, 2013b, 87(02): 178-196.
- 陈国超,裴先治,李瑞保,等.东昆仑东段香加南山花岗岩基的

- 岩浆混合成因: 来自镁铁质微粒包体的证据[J]. 地学前缘, 2016, 23(4): 226–40.
- CHEN Guochao, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. Genesis of magma mixing and mingling of xiangjiananshan granite batholith in the eastern section of east kunlun orogen: evidence from mafic microgranular enclaves(mmes)[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(4): 226–40.
- 陈宣华, 尹安, George G, 等. 柴达木盆地东部基底花岗岩类岩浆活动的化学地球动力学[J]. 地质学报, 2011, 85(2): 157–171.
- CHEN Xuanhua, YIN An, George G, et al. Chemical Geodynamics of Granitic Magmatism in the Basement of the Eastern Qaidam Basin, Northern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Geological Sinica, 2011, 85(2): 157–171.
- 湛宏伟, 罗照华, 莫宣学, 等. 东昆仑造山带三叠纪岩浆混合成因花岗岩的岩浆底侵作用机制[J]. 中国地质, 2005, 32(3): 393–395.
- CHEN Hongwei, LUO Zhaozhua, MO Xuanxue, et al. Underplating mechanism of Triassic granite of magma mixing origin in the East Kunlun orogenic belt[J]. Geology in China, 2005, 32(3): 393–395.
- 丁烁, 黄慧, 牛耀龄, 等. 东昆仑高 Nb-Ta 流纹岩的年代学、地球化学及成因[J]. 岩石学报, 2011, 27(12): 3603–3614.
- DING Shuo, HUANG Hui, NIU Yaoling, et al. Geochemistry, geochronology and petrogenesis of East Kunlun high Nb-Ta rhyolites[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(12): 3603–3614.
- 郭正府, 邓晋福. 青藏东昆仑晚古生代末—中生代中酸性火成岩与陆内造山过程[J]. 现代地质, 1998, 12(3): 344–352.
- GUO Zhengfu, DENG Jinfu. Late palaeozoic mesozoic intracontinental orogenic process and intermediate acidic igneous rocks from the eastern kunlun mountains of northwestern china[J]. Geoscience, 1998, 12(3): 344–352.
- 侯增谦, 郑远川, 卢占武, 等. 青藏高原巨厚地壳: 生长、加厚与演化[J]. 地质学报, 2020, 94(10): 2797–2815.
- HOU Zengqian, ZHENG Yuanchuan, LU Zhanwu, et al. Growth, thickening and evolution of the thickened crust of the Tibet Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(10): 2797–2815.
- 姜春发. 中央造山带几个重要地质问题及其研究进展[J]. 地质通报, 2002, 21(8): 453–455.
- JIANG Chunfa. Several important geological problems about the Central Orogenic Belt and progress in its research[J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(8): 453–455.
- 李碧乐, 孙丰月, 于晓飞, 等. 东昆仑隆起带东段闪长岩 U-Pb 年代学和岩石地球化学研究[J]. 岩石学报, 2012, 28(4): 1163–1172.
- LI Bile, SUN Fengyue, YU Xiaofei, et al. U-Pb dating and geochemistry of diorite in the eastern section from eastern Kunlun middle uplifted basement and granitic belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(4): 1163–1172.
- 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 等. 东昆仑东段晚古生代—中生代若干不整合面特征及其对重大构造事件的响应[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 244–254.
- LI Ruibao, PEI Xianzhi, LI Zuochen, et al. Geological characteristics of Late Palaeozoic-Mesozoic unconformities and their response to some significant tectonic events in eastern part of Eastern Kunlun[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 244–254.
- 李金超, 贾群子, 杜玮, 等. 东昆仑东段阿斯哈矿床石英闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及岩石地球化学特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(4): 1188–1199.
- LI Jinchao, JIA Qunzi, DU Wei, et al. LA-ICP-MS zircon dating and geochemical characteristics of quartz diorite in Asaha gold deposit in east segment of the eastern Kunlun[J]. Journal of Jilin University, 2014, 44(4): 1188–1199.
- 李小江, 李佐臣, 杨拴海, 等. 西秦岭西段然果儿岗花岗闪长岩体锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 新疆地质, 2015, 33(3): 1–66.
- LI Xiaojiang, LI Zuochen, YANG Shuanhai, et al. Zircon U-Pb Dating of Ranguoergang Granodiorite in Western Section of West Qinling, and its Geological Significance[J]. Xinjiang Geology, 2015, 33(3): 1–66.
- 李佐臣, 裴先治, 刘成庆, 等. 东昆仑南缘布青山构造混杂岩带哥日卓托闪长岩体年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质学报, 2013, 87(8): 1089–1103.
- LI Zuochen, PEI Xianzhi, LIU Zhanqing, et al. Geochronology and geochemistry of the Gerizhuotuo diorites from the Buqingshan tectonic Melange belt in the Southern margin of East Kunlun and their geologic implications[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(8): 1089–1103.
- 刘成东, 莫宣学, 罗照华, 等. 东昆仑造山带花岗岩类 Pb-Sr-Nd-O 同位素特征[J]. 地球学报, 2003, 58(6): 584–588.
- LIU Chengdong, Mo Xuanxue, LUO Zhaozhua, et al. Pb-Sr-Nd-O isotope characteristics of granitoids in East Kunlun orogenic belt[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2003, 58(6): 584–588.
- 刘成东, 张文秦, 莫宣学, 等. 东昆仑约格鲁岩体暗色微粒包体特征及成因[J]. 地质通报, 2002, 21(11): 739–744.
- LIU Chengdong, ZHANG Wenqin, MO Xuanxue, et al. Features and origin of mafic microgranular enclaves in the Yuegelu granite in the Eastern Kunlun[J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(11): 739–744.
- 刘建楠, 丰成友, 亓锋, 等. 青海都兰县下得波利铜钼矿区锆石 U-Pb 测年及流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 2012, 28(2): 679–690.
- LIU Jiannan, FENG Chengyou, YUAN Feng, et al. SIMS zircon U-Pb dating and fluid inclusion studies of Xiadeboli Cu-Mo ore district in Dulan County, Qinghai Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(2): 679–690.
- 刘建平, 赖健清, 谷湘平, 等. 青海赛什塘铜矿区侵入岩体地球化学及锆石 LA-ICPMS U-Pb 年代学[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(3): 622–632.
- LIU Jianping, LAI Jianqing, GU Xiangping, et al. Geochemistry and

- zircon LA-ICPMS U-Pb geochronology of intrusive body in Saishitang copper deposit, Qinghai Province, China[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(3): 622–632.
- 罗明非, 莫宣学, 喻学惠, 等. 东昆仑香日德地区晚三叠世花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石成因和构造意义[J]. 岩石学报, 2014, 30(11): 3229–3241.
- LUO Mingfei, MO Xuanxue, YU Xuehui, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age dating, petrogenesis and tectonic implications of the Late Triassic granites from the Xiangride area, East Kunlun[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(11): 3229–3241.
- 罗照华, 曹永清. 东昆仑印支晚期幔源岩浆活动[J]. 地质通报, 2002, 21(6): 292–297.
- LUO Zhaohua, CAO Yongqing. Late Indosinian mantle-derived magmatism in the East Kunlun[J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(6): 292–297.
- 罗照华, 邓晋福, 曹永清, 等. 青海省东昆仑地区晚古生代—早中生代火山活动与区域构造演化[J]. 现代地质, 1999, 13(1): 51–56.
- LUO Zhaohua, DENG Jinfu, CAO Yongqing, et al. On late Paleozoic early Mesozoic volcanism and regional tectonic evolution of eastern kunlun, qinghai province[J]. Geoscience, 1999, 13(1): 51–56.
- 马昌前, 熊富浩, 尹烁, 等. 造山带岩浆作用的强度和旋回性: 以东昆仑古特提斯花岗岩类岩基为例[J]. 岩石学报, 2015, 31(12): 3555–3568.
- MA Changqian, XIONG Fuhao, YIN Shuo, et al. Intensity and cyclicity of orogenic magmatism: An example from a Paleo-Tethyan granitoid batholith, Eastern Kunlun, northern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(12): 3555–3568.
- 莫宣学. 岩浆作用与青藏高原演化[J]. 高校地质学报, 2011, 12(3): 351–67.
- MO Xuanxue. Magmatism and evolution of the Tibetan Plateau[J]. Geological Journal of China Universities, 2011, 12(3): 351–67.
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3): 1089–1103.
- MO Xuanxue, LUO Zhaohua, DENG Jinfu, et al. Granitoids and Crustal Growth in the East-Kunlun Orogenic Belt[J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(3): 1089–1103.
- 潘裕生, 方爱民. 中国青藏高原特提斯的形成与演化[J]. 地质科学, 2010, 45(1): 92–101.
- PAN Yusheng, FANG Aimin. Formation and evolution of the Tethys in the Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Geology, 2010, 45(1): 92–101.
- 强娟. 青藏高原东北缘宗务隆构造带花岗岩及其构造意义[D]. 西安: 西北大学, 2008: 1–64.
- QIANG Juan. The granitoids in zongwulong tectonic zone on the northeastern margin of the qinghai-Tibet plateau and its tectonic significance[D]. Xi'an: Northwest University, 2008: 1–64.
- 任海东, 王涛. 东昆仑—西秦岭造山带对接处三叠纪花岗岩岩石时空演化、物源特征对比及其大地构造意义[J]. 地球学报, 2017, 38(S1): 59–63.
- REN Haidong, WANG Tao. Temporal-spatial Variations, Sources and Tectonic Significances of the Triassic Granitic Rocks in the Junction Part of the East Kunlun and West Qinling Orogen, Central China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(S1): 59–63.
- 任纪舜. 昆仑—秦岭造山系的几个问题[J]. 西北地质, 2004, 37(1): 1–5.
- REN Jishun. Some problems on the Kunlun-Qinling orogenic system[J]. Northwestern Geology, 2004, 37(1): 1–5.
- 宋忠宝, 张雨莲, 陈向阳, 等. 东昆仑哈日扎含矿花岗岩闪长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 矿床地质, 2013, 32(1): 157–168.
- SONG Zhongbao, ZHANG Yulian, CHEN Xiangyang, et al. Geochemical characteristics of Harizha granite diorite -porphyry in East Kunlun and their geological implications[J]. Mineral Deposits, 2013, 32(1): 157–168.
- 田龙, 康磊, 刘良, 等. 东昆仑巴什尔希晚奥陶世二长花岗岩成因及其地质意义[J]. 西北地质, 2023, 56(2): 28–45.
- TIAN Long, KANG Lei, LIU Liang, et al. Petrogenesis and Geological Implications of Bashenerxi Monzogranite from East Kunlun Orogen Belt[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 28–45.
- 王涛, 黄河, 宋鹏, 等. 地壳生长及深部物质架构研究与问题: 以中亚造山带(北疆地区)为例[J]. 地球科学, 2020, 45(7): 2326–2344.
- WANG Tao, HUANG He, SONG Peng, et al. Studies of Crustal Growth and Deep Lithospheric Architecture and New Issues: Exemplified by the Central Asian Orogenic Belt (Northern Xinjiang)[J]. Earth Science, 2020, 45(7): 2326–2344.
- 王涛, 侯增谦. 同位素填图与深部物质探测 (I): 揭示岩石圈组成演变与地壳生长[J]. 地学前缘, 2018, 25: 1–19.
- WANG Tao, HOU Zengqian. Isotopic mapping and deep material probing (I): revealing the compositional evolution of the lithosphere and crustal growth processes[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25: 1–19.
- 王新宇, 陈能松, 陈海, 等. 柴达木周缘印支期花岗岩同位素地球化学特征及其对基底属性的制约[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(1): 13–19.
- WANG Xinyu, CHEN Nengsong, CHEN Hai, et al. Isotopic Geochemistry Characters of Indosinian Granites around Qaidam Basin and its Constraints on Basement Affinity[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2008, 27(1): 13–19.
- 王永标, 黄继春. 海西—印支早期东昆仑造山带南侧古海洋盆地的演化[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1997, 22(4): 33–36.
- WANG Yongbiao, HUANG Jichun. Paleo-ocean evolution of the southern Eastern Kunlun orogenic belt during Heacy-early Indosinian[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1997, 22(4): 33–36.
- 吴芳, 张绪教, 张永清, 等. 东昆仑闹仓坚沟组流纹质凝灰岩锆

- 石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质力学学报, 2010, 16(1): 44–50.
- WU Fang, ZHANG Xujiao, ZHANG Yongqing, et al. Zircon u-pb ages for rhyolitic tuffs of the naocangjiangou formation in the east kulun orogenic belt and their implication[J]. Journal of Geomechanics, 2010, 16(1): 44–50.
- 吴树宽, 陈国超, 李积清, 等. 东昆仑东段沟里地区战红山过铝质流纹斑岩年代学、岩石成因及构造意义[J]. 西北地质, 2023, 56(2): 92–108.
- WU Shukuan, CHEN Guochao, LI Jiqing, et al. Geochronology, Petrogenesis and Tectonic Significance of Zhanhongshan Peraluminous Rhyolite Porphyry in Gouli Area, Eastern Section of East Kunlun[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 92–108.
- 熊富浩, 马昌前, 张金阳, 等. 东昆仑造山带早中生代镁铁质岩墙群 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、元素和 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学[J]. 岩石学报, 2011, 27(11): 3350–3364.
- XIONG Fuhao, MA Changqian, ZHANG Jinyang, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, elements and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of the Early Mesozoic mafic dyke swarms in East Kunlun orogenic belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(11): 3350–3364.
- 徐多勋, 杨拴海, 李瑞保, 等. 西秦岭西段塔洞花岗闪长岩体年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37(3): 22–33.
- XU Duoxun, YANG Shuanhai, LI Ruibao, et al. Geochronological, geochemical characteristics and geological significance of tadong granodiorite pluton in the western section of West Qinling[J]. Journal of Earth Sciences & Environment, 2015, 37(3): 22–33.
- 杨拴海, 李瑞保, 王伟峰, 等. 西秦岭西段曲如沟花岗闪长岩年代学、地球化学特征及构造意义研究[J]. 西北地质, 2015, 48(2): 57–72.
- YANG Shuanhai, LI Ruibao, WANG Weifeng, et al. Geochronology, Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Qurugou Granodiorite in Western Section of West Qinling Orogen[J]. Northwestern Geology, 2015, 48(2): 57–72.
- 殷鸿福, 张克信. 东昆仑造山带的一些特点[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1997, 22(4): 3–6.
- YIN Hongfu, ZHANG Kexin. Characteristics of the Eastern Kunlun Orogenic belt[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1997, 22(4): 3–6.
- 袁万明, 莫宣学, 喻学惠, 等. 东昆仑印支期区域构造背景的花岗岩记录[J]. 地质论评, 2000, 46(2): 203–211.
- YUAN Wanming, MO Xuanxue, YU Xuehui, et al. The record of Indosinian tectonic setting from the granotoid of eastern Kunlun Mountains[J]. Geological Review, 2000, 46(2): 203–211.
- 翟明国. 花岗岩: 大陆地质研究的突破口以及若干关键科学问题——“岩石学报”花岗岩专辑代序[J]. 岩石学报, 2017, 33(1): 1–12.
- ZHAI Mingguo. Granites: Leading study issue for continental evolution[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(1): 1–12.
- 张国伟, 柳小明. 关于“中央造山带”几个问题的思考[J]. 地球科学, 1998: 9–14.
- ZHANG Guowei, LIU Xiaoming. Some remarks on china central orogenic system[J]. Geological Science, 1998: 9–14.
- 张宏飞, 陈岳龙, 徐旺春, 等. 青海共和盆地周缘印支期花岗岩类的成因及其构造意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(12): 2910–22.
- ZHANG Hongfei, CHEN Yuelong, XU Wangchun, et al. Granitoids around Gonghe basin in Qinghai province: petrogenesis and tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(12): 2910–22.
- 钟大赉, 丁林, 张进江, 等. 中国造山带研究的回顾和展望[J]. 地质论评, 2002, 48(2): 147–52.
- ZHONG Dalai, DING Lin, ZHANG Jinjiang, et al. Study of Orogenic Belts in China: Retrospects and Prospects[J]. Geological Review, 2002, 48(2): 147–52.
- 张智勇, 殷鸿福, 王秉璋, 等. 昆秦接合部海西期苦海-赛什塘分支洋的存在及其证据[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2004, 29(6): 691–696.
- ZHANG Zhiyong, YIN Hongfu, WANG Bingzhang, et al. Presence and Evidence of Kuhai-Saishitang Branching Ocean in Copulae between Kunlun-Qinling Mountains[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(6): 691–696.
- 翟明国, 张旗, 陈国能, 等. 大陆演化与花岗岩研究的变革[J]. 科学通报, 2016, 61(13): 1414–1420.
- ZHAI Mingguo, ZHANG Qi, CHEN Guoneng, et al. Adventure on the research of continental evolution and related granite geochemistry (in Chinese)[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(13): 1414–1420.
- 郑永飞, 陈伊翔, 戴立群, 等. 发展板块构造理论: 从洋壳俯冲带到碰撞造山带[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(6): 711–735.
- ZHENG Yongfei, CHEN Yixiang, DAI Liquan, et al. Developing plate tectonics theory from oceanic subduction zones to collisional orogens[J]. Science China: Earth Sciences, 2015, 45(6): 711–735.
- Chen X H, George G, Yin A, et al. Paleozoic and Mesozoic Basement Magmatism of Eastern Qaidam Basin, Northern Qinghai - Tibet Plateau: LA - ICP - MS Zircon U - Pb Geochronology and its Geological Significance[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2012, 86(2): 350–369.
- Chen X H, Gehrels G, Yin A, et al. Geochemical and Nd-Sr-Pb-O isotopic constrains on Permo-Triassic magmatism in eastern Qaidam Basin, northern Qinghai-Tibetan plateau: Implications for the evolution of the Paleo-Tethys[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 114: 674–692.
- Dai J G, Wang C, Hourigan J, et al. Multi-stage tectono- Mag Matic events of the Eastern Kunlun Range, northern Tibet: Insights from U-Pb geochronology and (U-Th)/He thermochronology

- [J]. *Tectonophysics*, 2013, 599: 97–106.
- Ding Q F, Jiang S Y, Sun F Y. Zircon U–Pb geochronology, geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic compositions of the Triassic granite and diorite dikes from the Wulonggou mining area in the Eastern Kunlun Orogen, NW China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Lithos*, 2014, 205: 266–283.
- Dong Y P, He D F, Sun S S, et al. Subduction and accretionary tectonics of the East Kunlun orogen, western segment of the Central China Orogenic System[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 231–261.
- Hawkesworth C J, Dhuime B, Pietranik A B, et al. The generation and evolution of the continental crust[J]. *Journal of the Geological Society*, 2010, 167(2): 229–248.
- Hawkesworth C, Cawood P, Dhuime B. Continental growth and the crustal record[J]. *Tectonophysics*, 2013, 609(1): 651–660.
- Hu Y, Niu Y L, Li J, et al. Petrogenesis and tectonic significance of the late Triassic Mafic dikes and felsic volcanic rocks in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibet Plateau[J]. *Lithos*, 2016, 245: 205–222.
- Hawkesworth C J, Kemp A I. The differentiation and rates of generation of the continental crust[J]. *Chemical Geology*, 2006, 226: 134–143.
- Huang H, Niu Y L, Nowell G, et al. Geochemical constraints on the petrogenesis of granitoids in the East Kunlun Orogenic belt, northern Tibetan Plateau: Implications for continental crust growth through syn-collisional felsic Magmatism[J]. *Chemical Geology*, 2014, 370: 1–18.
- Li B L, Zhi Y, Zhang L, et al. U–Pb dating, geochemistry, and Sr–Nd isotopic composition of a granodiorite porphyry from the Jiadangan Cu–(Mo) deposit in the Eastern Kunlun metallogenic belt, Qinghai Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015a, 67: 1–10.
- Li X W, Huang X, Luo M F, et al. Petrogenesis and geodynamic implications of the Mid-Triassic lavas from East Kunlun, northern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015b, 105(0): 32–47.
- Liu C, Mo X, Luo Z, et al. Mixing events between the crust- and Mantle-derived Mag Mas in eastern kunlun: Evidence from zircon SHRIMP II chronology[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(8): 828–834.
- Liu H. Petrology, geochemistry and geochronology of late Triassic volcanics, Kunlun orogenic belt, western China: Implications for tectonic setting and petrogenesis[J]. *Geochemical Journal*, 2005, 39(1): 1–20.
- Niu Y L, Zhao Z D, Zhu D C, et al. Continental Collision Zones are Primary Sites for Net Continental Crust Growth: A Testable Hypothesis[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 127: 96–110.
- Ren H D, Wang T, Zhang L, et al. Ages, Sources and Tectonic Settings of the Triassic Igneous Rocks in the Easternmost Segment of the East Kunlun Orogen, central China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2016, 90(2): 641–668.
- Rudnick R L. Making continental crust[J]. *Nature*, 1995, 378: 571–578.
- Taylor S R, McLennan S M, Mcculloch M T. Geochemistry of loess, continental crustal composition and crustal model ages[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1983, 47(11): 1897–1905.
- Vervoort J D, Plank T, Prytulak J. The Hf–Nd isotopic composition of marine sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75 (20), 5903–5926.
- Wang H, Feng C, Li D, et al. Geology, geochronology and geochemistry of the Saishitang Cu deposit, East Kunlun Mountains, NW China: Constraints on ore genesis and tectonic setting[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 72: 43–59.
- Wang T, Jahn B M, Kovach V P, et al. Nd–Sr isotopic mapping of the Chinese Altai and implications for continental growth in the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 2009, 110(1–4): 359–372.
- Xia R, Wang C M, Deng J, et al. Crustal thickening prior to 220 Ma in the East Kunlun Orogenic Belt: Insights from the Late Triassic granitoids in the Xiao-Nuomuhong pluton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 93: 193–210.
- Xia R, Wang C, Qing M, et al. Zircon U–Pb dating, geochemistry and Sr–Nd–Pb–Hf–O isotopes for the Nan'getan granodiorites and Mafic microgranular enclaves in the East Kunlun Orogen: Record of closure of the Paleo-Tethys[J]. *Lithos*, 2015a, 234–235(3): 47–60.
- Xia R, Wang C, Qing M, et al. Molybdenite Re–Os, zircon U–Pb dating and Hf isotopic analysis of the Shuangqing Fe–Pb–Zn–Cu skarn deposit, East Kunlun Mountains, Qinghai Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015b, 66: 114–131.
- Xiong F H, Ma C Q, Zhang J, et al. Reworking of old continental lithosphere: an important crustal evolution mechanism in orogenic belts, as evidenced by Triassic I-type granitoids in the East Kunlun orogen, Northern Tibetan Plateau[J]. *Journal of the Geological Society*, 2014, 171(6): 847–863.
- Yang G, Yang S, Wei L, et al. Petrogenesis and geodynamic significance of the Late Triassic Tadong adakitic pluton in West Qinling, central China[J]. *International Geology Review*, 2015, 57(13): 1755–1771.
- Zhang J Y, Ma C Q, Xiong F H, et al. Petrogenesis and tectonic significance of the Late Permian–Middle Triassic calc-alkaline granites in the Balong region, eastern Kunlun Orogen, China[J]. *Geological Magazine*, 2012, 149(5): 892–908.
- Zhu D C, Wang Q, Weinberg R F, et al. Interplay between oceanic subduction and continental collision in building continental crust[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 7141.
- Zhu D C, Wang Q, Weinberg R F, et al. Continental Crustal Growth Processes Recorded in the Gangdese Batholith, Southern Tibet[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2023, 51: 155–188.