

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.270>



东昆仑造山带海德乌拉辉绿岩成因及其地质意义

孙立强^{1,2}, 王凯兴^{1,2}, 戴佳文³, 刘晓东², 刘文恒¹, 余驰达², 雷勇亮¹, 陈耀新¹, 林俊杰¹

1. 东华理工大学地球科学学院,江西南昌 330013
2. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室,江西南昌 330013
3. 青海省核工业地质局,青海西宁 810001

摘要:古特提斯洋在东昆仑造山带的闭合时间仍存在争议。对东昆仑东段海德乌拉地区产出的辉绿岩开展了系统的研究工作。LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素定年的结果显示,海德乌拉辉绿岩形成于238±2 Ma。在地球化学组成上,该辉绿岩具有较高的TiO₂(1.75%~2.46%)、Fe₂O₃^T(8.88%~12.30%)含量和较低的MgO含量(2.76%~6.34%);富集不相容元素,相对亏损Nb、Ta、Sr、Ti;Sr-Nd同位素组成较为富集且均一,(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i为0.711 61~0.712 95,ε_{Nd}(t)为-3.2~-2.8。上述特征表明海德乌拉辉绿岩形成于板片俯冲环境,其源区为由俯冲板片释放的流体交代所形成的富集地幔。结合前人的研究成果,认为古特提斯阿尼玛卿洋的北向俯冲至少持续到中三叠世末期;随后,洋盆在晚三叠世早期闭合;在不晚于228 Ma时,东昆仑东段地区进入后碰撞伸展的环境。

关键词:东昆仑造山带;构造演化;三叠纪;辉绿岩;岩石成因;岩石学。

中图分类号: P581 文章编号: 1000-2383(2024)04-1261-16 收稿日期: 2022-04-21

Petrogenesis of Haidewula Diabase, Eastern Kunlun Orogenic Belt and Its Geological Implications

Sun Liqiang^{1,2}, Wang Kaixing^{1,2}, Dai Jiawen³, Liu Xiaodong², Liu Wenheng¹, Yu Chida², Lei Yongliang¹, Chen Yaoxin¹, Lin Junjie¹

1. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China
2. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China
3. Qinghai Nuclear Industry Geological Bureau, Xining 810001, China

Abstract: The timing of the closure of the A'nyemaque ocean, which was a branch of Paleo-Tethys ocean at the East Kunlun orogenic belt (EKOB), is still a subject of debate. In this study, it presents zircon U-Pb geochronology, whole-rock elemental geochemistry and Sr-Nd isotopic data on the Haidewula diabase in the eastern section of the EKOB. Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotope dating reveals that the Haidewula diabase formed at 238±2 Ma. The diabase is characterized by low MgO (2.76%~6.34%) contents, as well as relatively high TiO₂ (1.75%~2.46%) and Fe₂O₃^T (8.88%~12.30%) contents. The diabase shows enrichment in incompatible elements, but is relatively depleted in Nb, Ta, Sr, and Ti. All these geochemical characteristics imply

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 42072095);青海省科学技术厅重点研发与转化计划(No. 2021-SF-157);东华理工大学博士启动基金(No. DHBK2018024)。

作者简介:孙立强(1986—),男,讲师,博士,主要从事岩浆岩成因和铀矿床成因的研究。ORCID: 0000-0002-4809-6043. E-mail: sunlq@ecut.edu.cn

引用格式:孙立强,王凯兴,戴佳文,刘晓东,刘文恒,余驰达,雷勇亮,陈耀新,林俊杰,2024.东昆仑造山带海德乌拉辉绿岩成因及其地质意义。地球科学,49(4):1261~1276.

Citation: Sun Liqiang, Wang Kaixing, Dai Jiawen, Liu Xiaodong, Liu Wenheng, Yu Chida, Lei Yongliang, Chen Yaoxin, Lin Junjie, 2024. Petrogenesis of Haidewula Diabase, Eastern Kunlun Orogenic Belt and Its Geological Implications. *Earth Science*, 49(4): 1261~1276.

that the diabase is a production of island arc magmatic activity. Additionally, the diabase displays enriched and uniform Sr-Nd isotopic compositions ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) = 0.711 61–0.712 95, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -3.2$ to -2.8). Based on the geochemical characteristics and isotopic compositions, it suggests that the Haidewula diabase was derived from partial melting of an enriched mantle, which had undergone metasomatism induced by the fluid released from the subducting slab, and had experienced some degree of crustal contamination during migration through continental crust. Combing our results and previous studies on Middle Permian-Triassic basic igneous rocks in the EKOB, it proposes that the northward subduction of the A'nyemaqen ocean lasted to the end of the Middle Triassic (238 Ma); the closure of the A'nyemaqen ocean happened during early Late Triassic; then, the tectonic environment of the eastern section of the EKOB transited into post-collisional extension no later than 228 Ma.

Key words: East Kunlun orogenic belt; tectonic evolution; Triassic; diabase; petrogenesis; petrology.

东昆仑造山带位于青藏高原北缘(图1a).自显生宙以来,该造山带经历了复杂的地质作用和构造演化历史,记录了关于原特提斯洋和古特提斯洋演化历程的丰富信息,因而,长久以来备受学界关注(郭正府等, 1998; 莫宣学等, 2007; 许志琴等, 2012; Dong *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2020).

受古特提斯洋演化的影响,东昆仑造山带在晚古生代至早中生代时期发育了大量的与板片俯冲—碰撞造山有关的构造—岩浆活动(郭正府等, 1998; 莫宣学等, 2007; 许志琴等, 2012; Dong *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2020).已有研究指出,作为古特提斯洋分支的阿尼玛卿洋,在石炭纪时期已经形成,在二叠纪期间,大洋板片开始北向俯冲,随后,东昆仑地区由俯冲环境转入同碰撞阶段(郭正府等, 1998; 刘战庆等, 2011; Yu *et al.*, 2020).不过,对构造转换,即阿尼玛卿洋洋盆闭合的时间,研究者们仍存在分歧.一种观点认为,阿尼玛卿洋洋盆于晚二叠世期间闭合,东昆仑造山带广泛出露的三叠纪岩浆岩均产出于同碰撞和后碰撞的构造环境(Huang *et al.*, 2014; Kong *et al.*, 2020; Zhu *et al.*, 2022).另一种观点则认为,晚二叠世—中三叠世岩浆岩的形成均与俯冲作用有关,洋盆的闭合应发生在中三叠世期间(莫宣学等, 2007; Xiong *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2020; 陈国超等, 2020; 王巍等, 2021).最近,一些研究则进一步将闭合时限限定在中三叠世末到晚三叠世初期(黄啸坤等, 2021; 封铿等, 2022).除上述观点外,一些学者指出部分晚三叠世岩浆岩也显示了弧岩浆岩的特征,并据此将洋盆闭合的时间推移至晚三叠世中晚期(Yu *et al.*, 2020; 徐博等, 2020a, 2020b).

基性岩浆往往起源自地幔的部分熔融.不同构造环境下所形成的基性岩浆,由于其地幔源区成分,以及所经历的壳幔相互作用过程的不同,常常具有不同的地球化学特征(Kepezhinskas *et al.*,

1997; Kuritani *et al.*, 2011; Khan *et al.*, 2023).例如,俯冲环境下,地幔楔受到俯冲板片的交代而发生富集,因而,由其部分熔融所形成的基性岩浆,相比于大洋中脊玄武岩(MORB),常常具有富集的Sr-Nd同位素组成和较高的不相容元素含量(Kepezhinskas *et al.*, 1997; Rawson *et al.*, 2016).因此,对基性岩的源区组成和岩石成因开展详尽的研究,可以为反演区域构造演化过程提供有力的依据.

东昆仑造山带内出露有中二叠世—三叠纪的基性岩(图1).这些基性岩具有不同的地球化学特征(Zhao *et al.*, 2019; 陈国超等, 2019),为探究东昆仑造山带的构造演化历史提供了抓手.本文选取东昆仑造山带东段海德乌拉地区产出的辉绿岩为研究对象,通过锆石年代学、元素地球化学和Sr-Nd同位素组成的研究,厘定其成岩时代,揭示其岩石成因.在此基础之上,结合以往对东昆仑造山带中二叠世—三叠纪基性岩的研究成果,探讨区域构造环境,从而为限定东昆仑地区晚古生代—早中生代时期的构造演化历史提供新的依据.

1 区域地质背景

东昆仑造山带位于青藏高原北缘,北邻柴达木盆地,东接秦岭造山带,西以阿尔金断裂带为界,东西延伸约1 500 km(图1).以祁漫塔格—香日德蛇绿岩带、昆中缝合带和昆南缝合带为界,东昆仑造山带自北向南被划分为北祁漫塔格带、昆北地体(也称昆仑带)、昆南地体(也称南昆仑带)和巴颜喀拉地体(Dong *et al.*, 2018).海德乌拉地区位于昆南地体内(图1).

昆南地体内出露的主要地层包括:古元古界金水口群为一套角闪岩相变质岩系,岩性主要为片麻岩、片岩、角闪岩和大理岩;中—新元古界万宝沟群则主要为玄武岩、安山岩、碳酸盐岩与碎屑岩,变质程度较低;志留系赛什腾组主要由砾岩、砂岩、火山

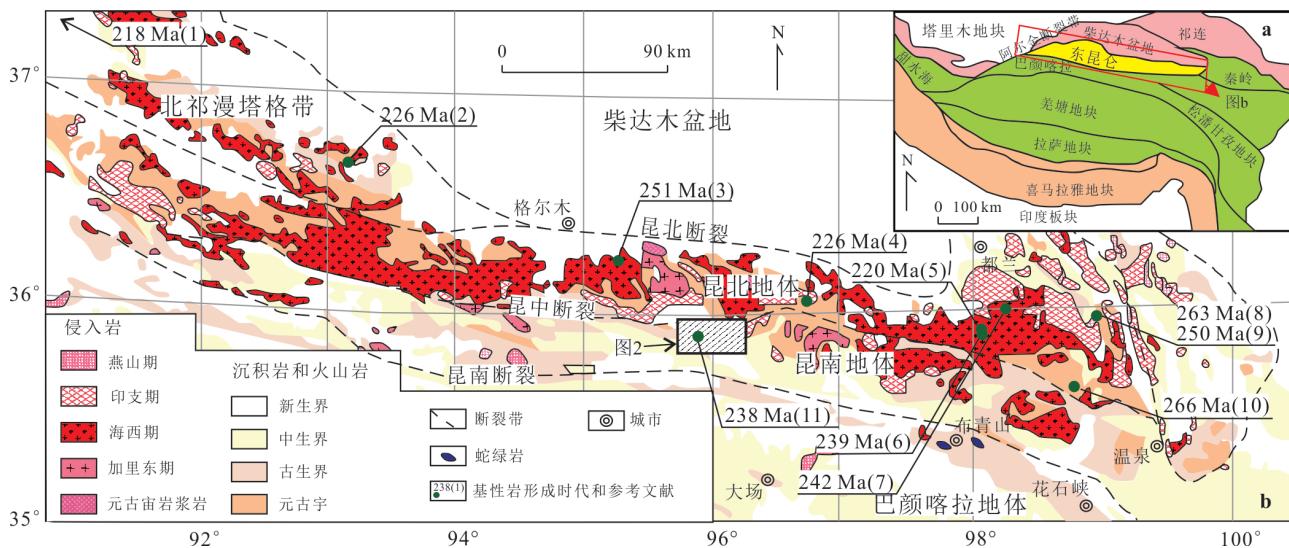


图1 东昆仑造山带区域地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of the East Kunlun orogenic belt (EKOB)

图据赵旭等, 2018修改. 基性岩数据来自:(1) Hu *et al.* (2016); (2) 奥琮等(2015); (3) 熊富浩等(2011); (4) Liu *et al.* (2017); (5) 陈国超等(2017); (6) Liu *et al.* (2004); (7) 赵旭等(2018); (8) 孔会磊等(2018); (9) 孔会磊等(2017); (10) Zhao *et al.* (2019); (11) 本文数据

岩和凝灰岩构成; 中一上泥盆统则包含火山碎屑岩、碳酸盐岩、砂岩和粉砂岩等岩石; 石炭纪和二叠纪地层均由砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩和灰岩构成, 部分地区见火山岩出露, 其中, 上二叠统格曲组为一套滨浅海相磨拉石建造; 三叠系角度不整合覆盖于下伏的古生界岩层之上, 其中, 下三叠统洪水川组的岩性由底部的砾岩、砂岩, 向上转变为砾岩、凝灰岩、玄武质安山岩与粉砂岩和泥岩互层; 中三叠统包括闹仓坚沟组和希里科特组, 前者主要由灰岩、火山岩夹砂岩构成, 而后者的岩性则为砾岩夹砂岩; 上三叠统八宝山组为典型的磨拉石建造, 岩性主要为砾岩、砂岩、粉砂岩, 夹有少量凝灰岩(刘战庆, 2011; 杨森等, 2016).

自古生代到中生代期间, 东昆仑造山带内的岩浆作用可大致分为两段, 即早古生代岩浆作用和晚古生代—早中生代岩浆作用(莫宣学等, 2007; Yu *et al.*, 2020). 前者可能与原特提斯洋的演化有关, 而后者则是在古特提斯洋演化的作用下形成的(Yu *et al.*, 2020). 东昆仑造山带内出露的岩浆岩主要为花岗质岩石, 少量为基性岩(图1).

2 研究区概况和岩石学特征

海德乌拉火山盆地整体呈狭长型, 东西长约30 km, 南北最宽处约7 km(图2a). 盆地以北, 出露有古生代花岗岩(图2a), 这些花岗岩可能形成于奥

陶纪和石炭纪(青海省地质局, 1996, 海德郭勒等8幅1:5万联测填图资料). 盆地内发育一套中—酸性火山岩一次火山岩组合. 火山作用具有多次喷发的特点, 岩性主要包括粗面岩、流纹岩、火山角砾岩等, 夹有砂岩、粉砂岩. 该套火山岩北侧与中新元古代地层呈断层接触, 南侧被新生代沉积物覆盖或与石炭系和侏罗系呈断层接触, 局部被侏罗系覆盖, 二者呈不整合接触. 该套火山岩早期被认为形成于晚三叠世—早侏罗世(朱云海等, 2003). 不过, 最近对其中流纹岩的研究显示, 其形成于志留纪罗得洛世, 并具有A型岩浆岩特征(雷勇亮等, 2021). 盆地内发育花岗斑岩岩脉、辉绿岩脉, 局部见玄武岩.

辉绿岩呈脉状侵入砂岩或粗面岩岩层(图2c), 走向近东西向, 产状与砂岩岩层相近, 宽度从约0.5米到数十米不等(图2a~2c). 岩石呈细粒等粒结构, 主要矿物组成为斜长石和单斜辉石(图2d). 斜长石, 含量60%~70%, 大多为板状自形, 长轴长0.06~0.30 mm; 辉石, 含量25%~35%, 常呈粒状, 粒径多在0.05~0.08 mm, 与斜长石构成辉绿结构. 在一些样品中, 可见辉石发生绿泥石化、绿帘石化等蚀变.

3 实验方法

本文的锆石U-Pb同位素定年工作在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室

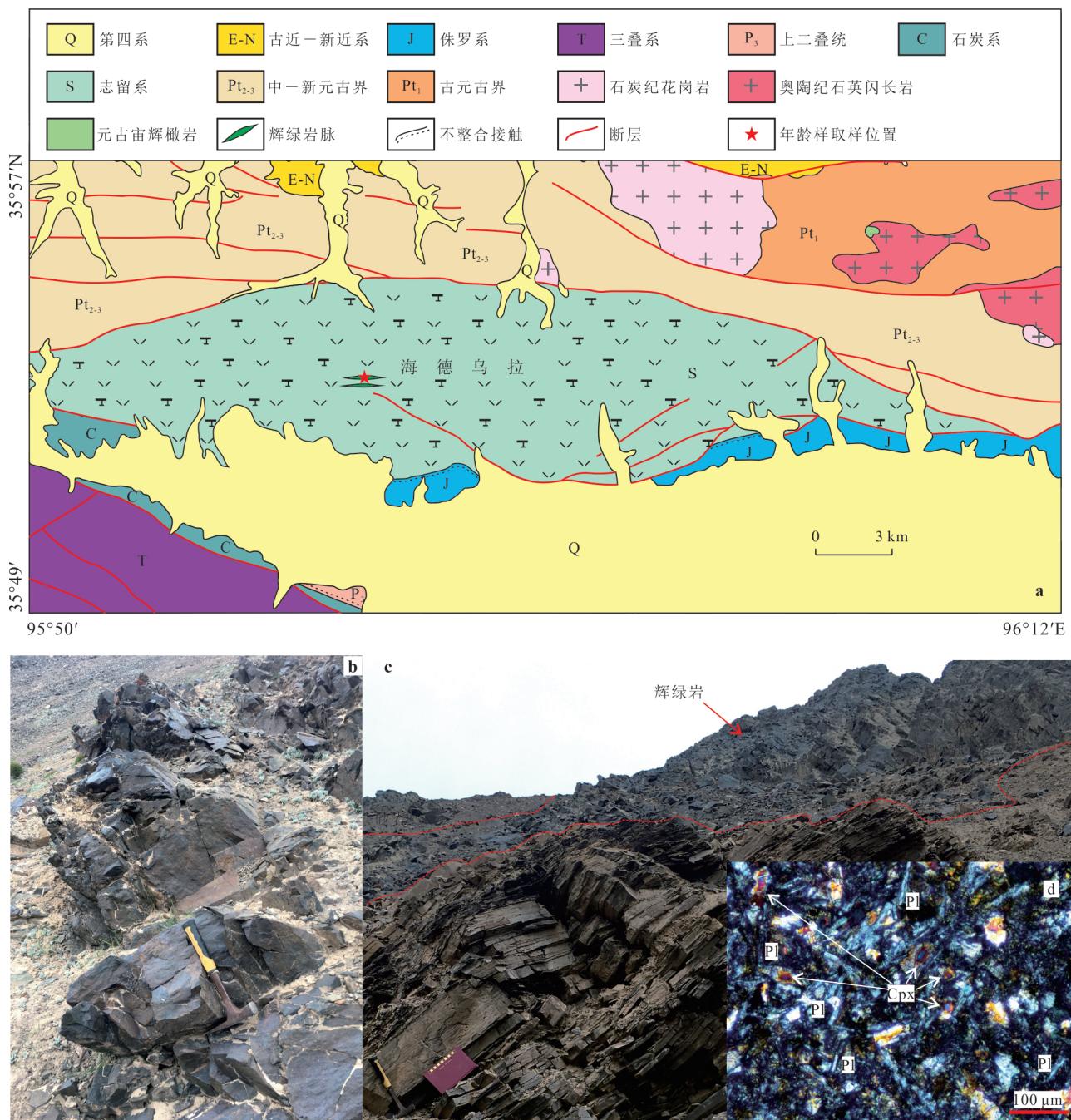


图2 海德乌拉地区地质简图(a)、辉绿岩野外露头照片(b~c)和显微照片(d)

Fig. 2 Simplified geological map of the Haidewula area (a), representative field outcrop photographs (b–c) and photomicrograph (d) of the Haidewula diabase

图a据雷勇亮等(2021)略作修改. Pl.斜长石,Cpx.单斜辉石.部分辉石已发生蚀变

完成.激光剥蚀系统为Resonetics-S-155.测试中激光束斑为 $24 \mu\text{m}$,频率10 Hz,剥蚀30 s.电感耦合等离子体质谱仪为热电公司制造的iCAPQc.测试过程中,以标准锆石91500为外标校正元素分馏,以标准锆石Plešovice作为盲样监控数据质量.测试数据使用ICPMSDataCal软件进行离线处理(Liu *et al.*,

2010).

全岩主量元素和微量元素测试工作在澳实分析检测有限公司(广州)完成.其中,主量元素分析过程中,将样品粉末与四硼酸锂—偏硼酸锂—硝酸锂混合后,制成熔片并用XRF测定,仪器型号为PANalytical PW2424,分析精度和准确度的相对偏

差均小于5%.微量元素分析过程中,将样品粉末用高氯酸、硝酸、氢氟酸消解后,转为稀盐酸介质之后,使用ICP-MS进行测定.仪器型号为Agilent 7900.分析精度和准确度相对偏差低于10%.

全岩Sr-Nd同位素分析在南京聚谱检测科技有限公司使用Nu Plasma II MC-ICP-MS测定完成.其中,Sr同位素组成测定中,采用 $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}=0.119\,4$ 内部校正仪器质量分馏,以国际标准物质NISTSRM987作为外标校正仪器漂移;Nd同位素组成的测试中,采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.721\,9$ 内部校正仪器质量分馏,以国际标准物质JNd-1作为外标校正仪器漂移.实验中,质控盲样USGSBCR-2和USGS STM-2的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值分别为0.705 043±0.000 010(2SE)和0.703 702±0.000 012(2SE), $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值分别为0.512 630±0.000 004(2SE)和0.512 916±0.000 004(2SE),在误差范围内与文献报道值一致(Weis *et al.*, 2006).

4 实验结果

4.1 锆石U-Pb年龄

辉绿岩锆石大多为长柱状或短柱状,无色透明,部分锆石表面有裂隙.锆石长60~150 μm、宽30~60 μm,长宽比为2:1~3:1.在CL图像中,部分锆石具有较为宽缓的振荡环带,另有部分锆石无明显环带(图3c);少量锆石(<5%)可见核幔结构.

本文挑选了辉绿岩中的24颗锆石开展了U-Pb同位素年龄的测试工作,分析结果分别列于附表1.分析结果显示,8颗锆石数据偏离谐和线,另有2颗锆石年龄数据(HD-3和HD-24)虽然位于谐和线上,但误差很大(图3a).除上述10颗锆石以外,其余14颗锆石年龄数据位于谐和线上(图3a).这14颗具有谐和年龄的锆石的Th含量为 $69.3 \times 10^{-6} \sim 3074 \times 10^{-6}$,U含量为 $79.9 \times 10^{-6} \sim 1669 \times 10^{-6}$,Th/U比值为0.52~2.36,符合岩浆锆石的特征.这些锆石分别形成于石炭纪(1颗)、二叠纪(8颗)和三叠纪(5颗)(图3b,表1).具体而言,测点HD-2的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为321±3 Ma,测点HD-14的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为270±3 Ma,测点HD-1等7颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为252±3 Ma(MSWD=2.1),测点HD-11等5个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为238±2 Ma(MSWD=0.82).

4.2 全岩主量元素和微量元素

海德乌拉辉绿岩的全岩主量元素和微量元素

分析结果列于附表2.海德乌拉辉绿岩的SiO₂含量在46.6%~51.2%之间,TiO₂含量为1.75%~2.46%,在图4中,海德乌拉辉绿岩落于辉绿岩/辉长岩区域.碱金属含量变化范围较大(Na₂O+K₂O=5.60%~8.13%),Na含量高于K含量,Na₂O/K₂O=1.09~4.70.海德乌拉辉绿岩表现出高Fe含量(Fe₂O₃^T=8.88%~12.3%)、低Mg含量(MgO=2.76%~6.34%)的特征,Mg#较低,在0.36~0.54之间.

在微量元素蛛网图中,海德乌拉辉绿岩显示出富集不相容元素的特征,但Nb、Ta、Sr、Ti相对亏损,Pb则相对富集(图5a).在稀土元素(REE)配分图解中,海德乌拉辉绿岩明显富集轻稀土,并且具有一定的Eu负异常($\delta\text{Eu}=0.67\sim0.80$),其轻稀土元素(LREE)含量与OIB相当,但重稀土元素(HREE)含量则明显高于OIB(图5b).海德乌拉辉绿岩的Zr/Hf比值为43.0~47.2,明显高于球粒陨石(Zr/Hf=36.3, Sun and McDonough, 1989),Nb/Ta在16.5~19.6之间,与球粒陨石大体相当(Nb/Ta=17.6, Sun and McDonough, 1989).

4.3 全岩Sr-Nd同位素

海德乌拉辉绿岩的全岩Sr-Nd同位素分析结果列于附表3,Sr同位素初始值和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值校正到238 Ma.海德乌拉辉绿岩具有相对富集的Sr-Nd同位素组成,($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i比值为0.711 61~0.712 95, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较为一致,在-3.2~-2.8之间(图6a),单阶段Nd模式年龄(T_{DM})为1.35~1.39 Ga,明显高于其成岩年龄.

5 讨论

5.1 成岩时代

本文对海德乌拉辉绿岩的锆石U-Pb年龄测试获得了两组较为集中的谐和年龄,分别为252±3 Ma($n=7$)和238±2 Ma($n=5$).本文认为238±2 Ma应代表了辉绿岩的成岩时代,而前一组锆石则很可能是岩浆上升过程中从围岩捕获得到的.值得注意的是,这两组锆石均具有较高的Th/U比值(>0.4),而在CL图像上,大多显示出宽缓的韵律环带(图3c),表明它们有可能均结晶于基性岩浆(吴元保和郑永飞, 2004).张宇婷(2018)对与研究区邻近的五龙沟地区的研究揭示了多期的基性岩浆活

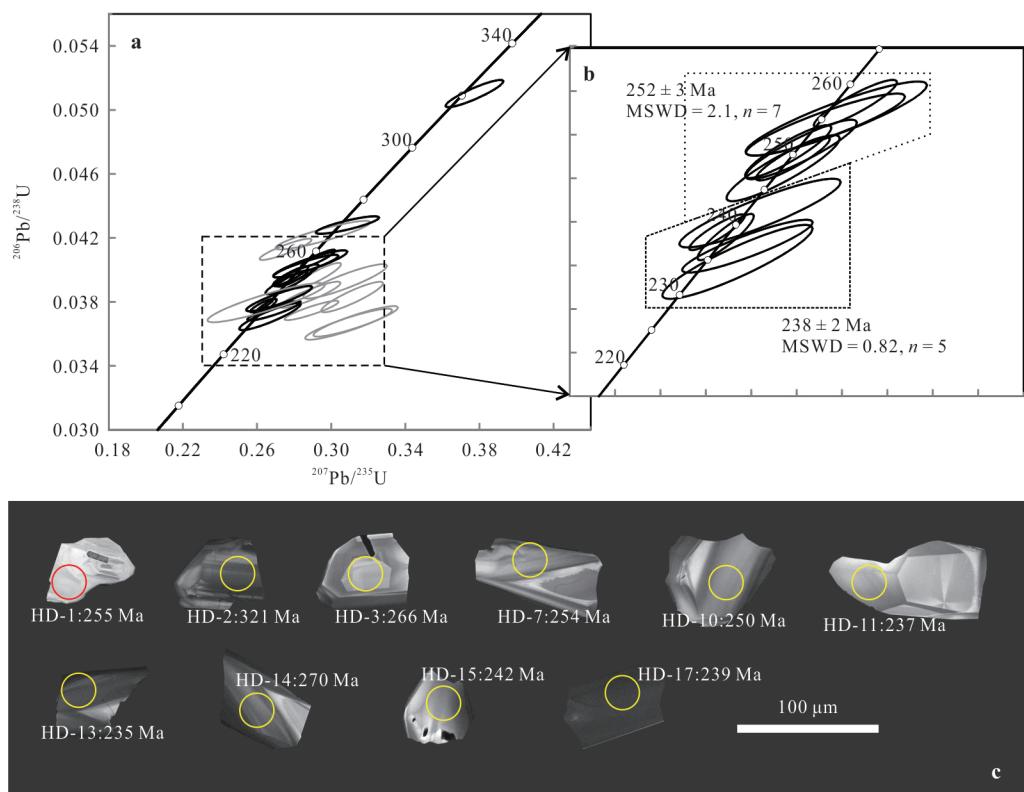


图 3 海德乌拉辉绿岩锆石年龄谱和图(a, b)及代表性锆石的CL图像(c)

Fig. 3 U-Pb concordia diagrams (a, b) and representative cathodoluminescence (CL) images of zircons from the Haidewula diabase

图 a 中灰色测点未参与加权平均年龄的计算

表 1 东昆仑造山带中二叠世—三叠纪基性岩形成时代统计
Table 1 Temporal distribution of Middle Permian-Triassic basic igneous rocks in the EKOB

产出位置	岩性	形成时代	参考文献
坑得弄舍	辉长岩	$266 \pm 2 \text{ Ma}$	Zhao <i>et al.</i> (2019)
五龙沟小干沟	辉绿岩	$263 \pm 4 \text{ Ma}$	张宇婷(2018)
加当	辉长岩	$263 \pm 3 \text{ Ma}$	孔会磊等(2018)
白日其利	镁铁质岩墙	$251 \pm 2 \text{ Ma}$	熊富浩等(2011)
加当	橄榄辉长岩	$250 \pm 3 \text{ Ma}$	孔会磊等(2017)
五龙沟水闸东沟	富闪基性岩脉	$248 \pm 1 \text{ Ma}$	张宇婷(2018)
五龙沟黑石沟	辉绿岩	$244 \pm 2 \text{ Ma}$	张宇婷(2018)
按纳格	角闪辉长岩	$242 \pm 2 \text{ Ma}$	赵旭等(2018)
约格鲁	辉长岩	$239 \pm 6 \text{ Ma}$	Liu <i>et al.</i> (2004)
海德乌拉	辉绿岩	$238 \pm 2 \text{ Ma}$	本文
小尖山	辉长岩	$228 \pm 1 \text{ Ma}$	奥琮等(2015)
冰沟	富闪辉长岩	$226 \pm 2 \text{ Ma}$	Liu <i>et al.</i> (2017)
石沟外滩	角闪辉长岩	$222 \pm 3 \text{ Ma}$	罗照华等(2002)
加鲁河	角闪辉长岩	$220 \pm 4 \text{ Ma}$	陈国超等(2017)
野牛沟	镁铁质岩脉	$218 \pm 3 \text{ Ma}$	Hu <i>et al.</i> (2016)

动(表1).因此,海德乌拉地区或许也存在着多期基性岩浆活动.不过,这仍有待未来进一步工作的论证.

晚古生代—早中生代是东昆仑造山带构造—岩浆活动较为活跃的时期,产出了大量的岩浆岩(图1).这些岩浆岩以花岗岩类为主,不过,基性岩石亦有出露(图1).从形成时代来看,自中二叠世到三叠纪期间,东昆仑造山带内发育的基性岩石大体可分为3个时间段,分别为263 Ma之前、251~238 Ma之间和228 Ma之后(表1).

5.2 岩石成因

5.2.1 低温蚀变作用和地壳混染对岩浆成分的影响 从光学显微镜的观察可知,海德乌拉辉绿岩的部分样品,经历了一定程度的后期低温蚀变作用.这与样品烧失量较大范围的变化相吻合($\text{LOI}=3.78\% \sim 6.02\%$).蚀变作用有可能导致岩石中的活动元素(如K、Na、Rb、Sr)含量的下降(Deniel, 1998).因此,在后文的讨论中,将利用岩石中不活动主量元素(如Si、Fe、Al、Ti)、高场强元素、稀土元素和过渡族元素的特征,对岩浆演化过程和源岩特征

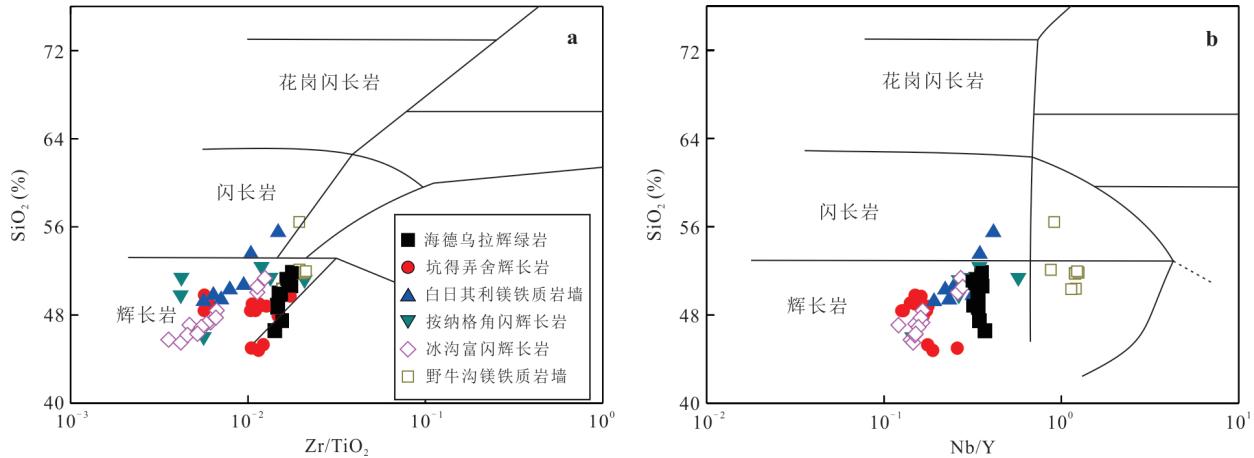
图4 海德乌拉辉绿岩 Zr/TiO_2 - SiO_2 图解(a)和 Nb/Y - SiO_2 图解(b)(据 Winchester and Floyd, 1977)

Fig. 4 Zr/TiO_2 versus SiO_2 diagram (a) and Nb/Y versus SiO_2 diagram (b) for the Haidewula diabase (after Winchester and Floyd, 1977)

东昆仑造山带基性岩数据来源:中二叠世坑得弄舍辉长岩引自 Zhao *et al.* (2019);早三叠世白日其利镁铁质岩墙引自熊富浩等(2011);中三叠世按纳格角闪辉长岩引自赵旭等(2018);晚三叠世冰沟富闪辉长岩引自 Liu *et al.* (2017);晚三叠世野牛沟镁铁质岩墙引自 Hu *et al.* (2016)

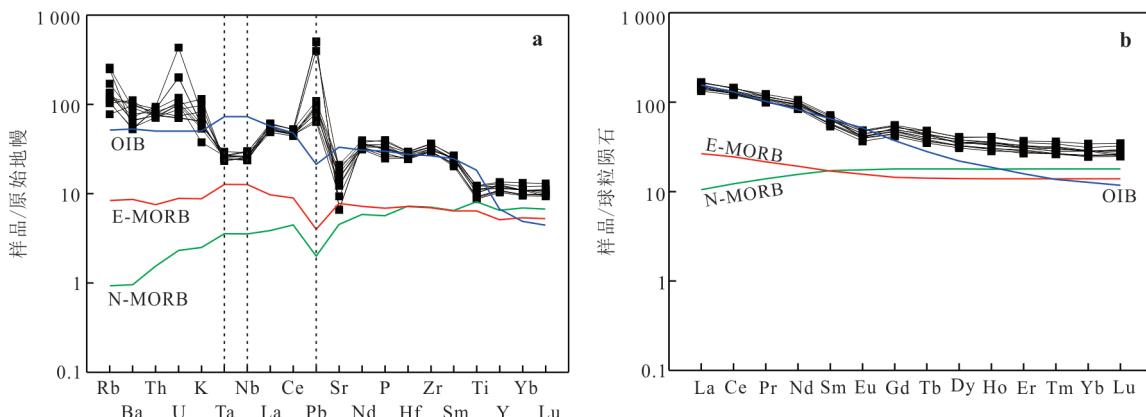


图5 海德乌拉辉绿岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)和球粒陨石标准化稀土元素配分图(b)

Fig. 5 Primitive mantle-normalized spider diagram (a) and chondrite-normalized REE pattern (b) for the Haidewula diabase

进行判别,而不使用Sr、Rb、K等活动元素。

基性岩浆上升过程中,难免会受到地壳物质的混染,而强烈的地壳混染将会改变基性岩浆的地球化学特征(Yu *et al.*, 2022).海德乌拉辉绿岩中存在继承锆石(见5.1节),在微量元素标准化图解中明显富集Pb(图5a),这些特征都表明岩浆上升过程中与地壳岩石之间发生了一定程度的同化混染作用。因此,在利用地球化学特征探讨源区性质和岩浆过程之前,需要对地壳混染对岩浆成分的影响进行评估。

海德乌拉辉绿岩的 Zr/Nb 比值随着 SiO_2 含量的升高而呈现升高的趋势,并且,该比值与 Nb/La 比值呈负相关关系(图7a, 7b),这些变化趋势不符合受到地壳混染控制的变化趋势;海德乌拉辉绿岩 Zr/Hf 比值明显高于大陆上地壳平均成分(36.4,

Rudnick and Gao, 2003),并且与 SiO_2 含量之间没有明显的负相关关系(图7c);海德乌拉辉绿岩的 Sm/Yb 比值低于大陆上地壳平均成分(2.35, Rudnick and Gao, 2003),并且与 SiO_2 含量之间大体呈负相关关系(图7d)。这些特征均暗示着岩浆中高场强元素和REE(Eu除外)的特征没有受到地壳物质混染的明显影响,可以反映其地幔源区的特征。

5.2.2 地幔源区特征

海德乌拉辉绿岩明显富集不相容元素,具有显著的Nb、Ta的相对亏损,以及相对富集的Sr-Nd同位素组成,这些地球化学特征明显区别于N-MORB和OIB(图5a, 图6a)。造成这种富集的同位素组成和元素特征的原因有两种,即地壳物质混染和继承自富集的地幔源区。

为了评估地壳物质混染对海德乌拉辉绿岩的

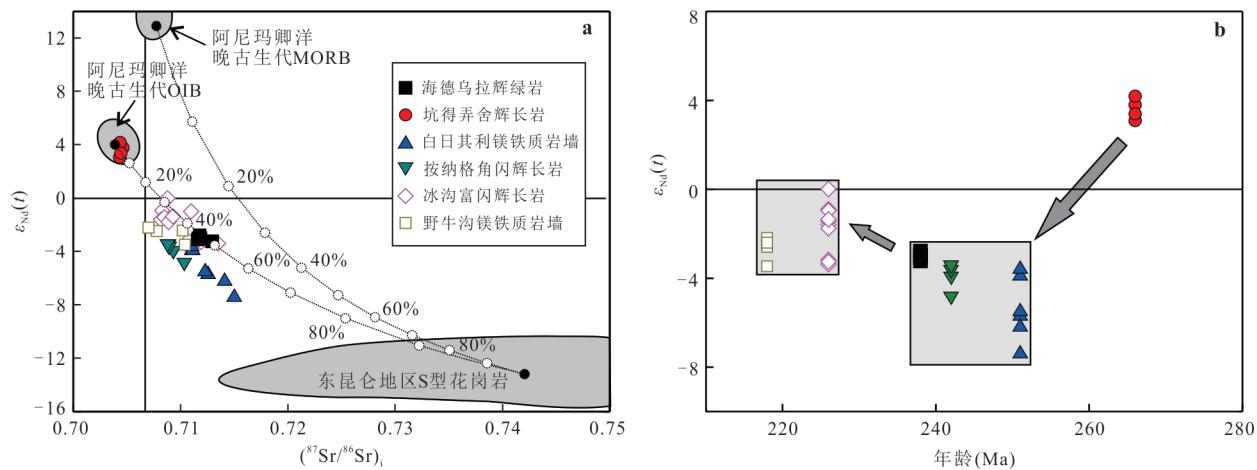
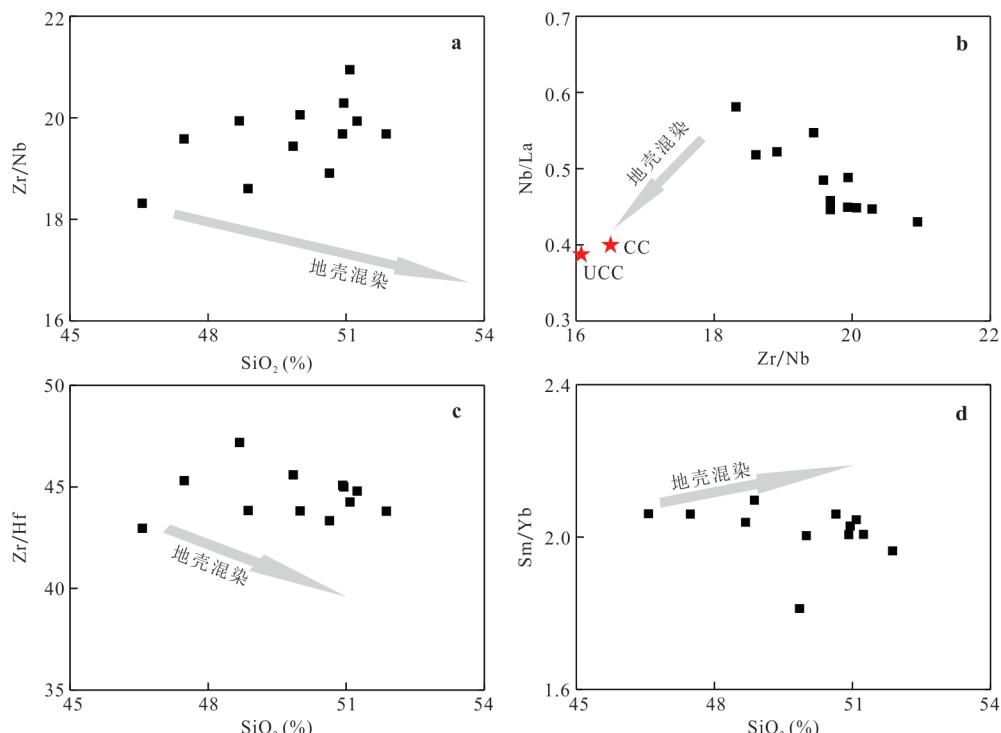
图 6 海德乌拉辉绿岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解(a)和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ -年龄图解(b)Fig. 6 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ versus $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ diagram (a) and $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ versus age diagram (b)

图 a 中曲线为基性岩浆与地壳物质以不同比例同化混染后产物的同位素组成变化趋势线, 百分数代表地壳物质比例, 端元组分分别为阿尼玛卿洋晚古生代 MORB、OIB 和东昆仑地区强过铝质 S 型花岗岩的平均成分, 具体参数见附表 4; 图 a 中同位素组成均校正到 $t = 238$ Ma。阿尼玛卿洋晚古生代 MORB 和 OIB 数据引自郭安林等(2007a)和马丽艳等(2007), 东昆仑地区 S 型花岗岩数据引自余能等(2005)和巴金等(2012), 东昆仑造山带基性岩数据来源见图 4

图 7 海德乌拉辉绿岩 SiO_2 - Zr/Nb 图解(a)、 Zr/Nb - Nb/La 图解(b)、 SiO_2 - Zr/Hf 图解(c)、 SiO_2 - Sm/Yb 图解(d)Fig. 7 SiO_2 vs. Zr/Nb diagram (a), Zr/Nb versus Nb/La diagram (b), SiO_2 vs. Zr/Hf diagram (c), and SiO_2 vs. Sm/Yb diagram (d) for the Haidewula diabase

图中箭头方向代表岩浆成分随地壳混染程度增强的变化趋势; 图(b)中 CC 和 UCC 分别代表大陆地壳平均成分和大陆上地壳平均成分 (Rudnick and Gao, 2003)

影响, 本文进行了 Sr-Nd 同位素的模拟计算(图 6a)。以阿尼玛卿洋晚古生代大洋中脊玄武岩(MORB)或洋岛玄武岩(OIB)作为原始岩浆, 混染以中上地

壳物质(以东昆仑造山带强过铝质 S 型花岗岩代替), 只有当地壳组分比例超过 30% 时, 才有可能得到与海德乌拉基性岩同位素组成相当的岩浆。考虑

到海德乌拉基性岩 SiO_2 含量为 46.6%~51.9%，与阿尼玛卿洋晚古生代 MORB ($\text{SiO}_2 = 45.3\% \sim 50.3\%$) 和 OIB ($\text{SiO}_2 = 43.6\% \sim 51.2\%$) 大体相当 (郭安林等, 2007b)，而大陆上地壳平均 SiO_2 含量约为 66.6% (Rudnick and Gao, 2003)，根据质量守恒定律，混染的地壳物质的比例应低于 10%，远不足以得到海德乌拉基性岩的 Sr-Nd 同位素组成 (图 6a)。虽然上述计算中使用了近似成分进行替代，所得数值与实际情况之间可能有所偏差，但仍然足以说明，造成海德乌拉基性岩富集的同位素组成的主要原因，并非地壳物质的混染。

在 Nb/Yb - Th/Yb 图解中，海德乌拉辉绿岩样品落在 MORB-OIB 演化区域之上 (图 8a)，表明其地幔源区中存在部分俯冲物质；在 La/Nb - Nb/Th 图解中，海德乌拉辉绿岩落在弧火山岩区域中 (图 8b)，也支持其地幔源区曾受到俯冲物质的交代。因此，海德乌拉辉绿岩应来自于受到俯冲物质交代的地幔的部分熔融，其富集的特征应是继承自地幔源区。

在俯冲过程中，交代地幔楔的物质可能来自：(1)俯冲板片或沉积物释放的流体；(2)俯冲沉积物或板片熔融形成的熔体。如图 9 所示，海德乌拉辉绿岩样品大体呈现水平展布趋势，与俄罗斯堪察加 (Kamchatka) 岩浆弧中的戈洛温 (Golovin) 和别拉亚 (Belyaia) 岩浆岩成分的变化趋势大体相当，反映了研究区地幔的富集主要是受到流体交代的结果，熔

体交代不明显。同时，东昆仑造山带内发育的其他早一中三叠世基性岩 (如图 9 中白日其利镁铁质岩墙和按纳格角闪辉长岩) 与海德乌拉辉绿岩展现了相同的变化趋势，暗示着在这一时期，俯冲流体对地幔的交代在东昆仑造山带普遍发育。

综上所述，海德乌拉地区的地幔受到俯冲板片释放流体的交代，从而发生了富集和部分熔融，形成了海德乌拉辉绿岩。

5.3 构造意义

东昆仑地区在晚古生代至早中生代期间受到

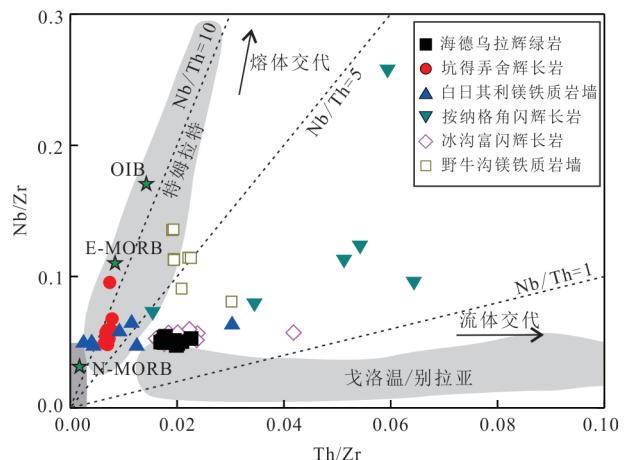


图 9 Th/Zr - Nb/Zr 图解 (据 Kepezhinskis *et al.*, 1997)
Fig. 9 Th/Zr versus Nb/Zr diagram (after Kepezhinskis *et al.*, 1997)

图中 N-MORB、E-MORB、OIB 数据引自 Sun and McDonough (1989)，东昆仑造山带基性岩数据来源见图 4

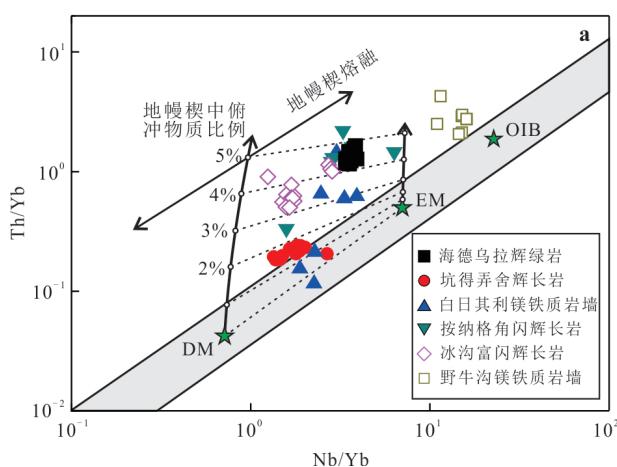


图 8 Nb/Yb - Th/Yb 图解(a)(据 Pearce, 2008)

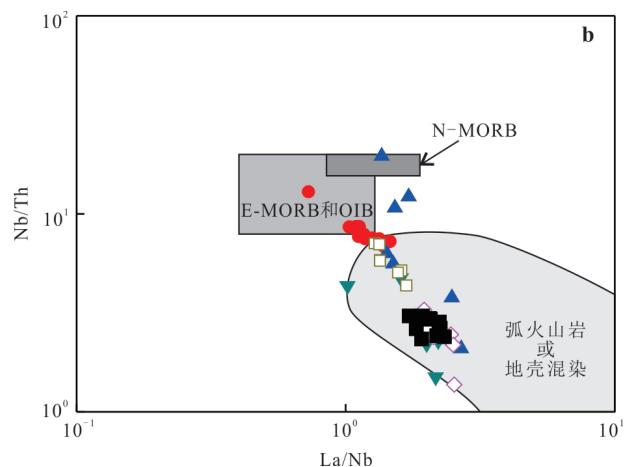


图 8 Nb/Yb versus Th/Yb diagram (a) (after Pearce, 2008) and La/Nb - Nb/Th (b) (after Yang *et al.*, 2019)

Fig. 8 Nb/Yb versus Th/Yb diagram (a) (after Pearce, 2008) and La/Nb versus Nb/Th diagram (b) (after Yang *et al.*, 2019)
图中 DM、EM、OIB、E-MORB、N-MORB 分别代表亏损地幔、富集地幔、洋岛玄武岩、富集洋中脊玄武岩和正常洋中脊玄武岩，东昆仑造山带基性岩数据来源见图 4

古特提斯洋北侧分支,即阿尼玛卿洋演化的控制,而发育了大规模的构造岩浆作用。前人对东昆仑地区在此阶段的构造演化历史已开展了大量研究,然而,对于该洋盆的闭合时限仍存在争议,已有观点包括晚二叠世(Huang *et al.*, 2014; Kong *et al.*, 2020; Zhu *et al.*, 2022)、中三叠世(莫宣学等,2007; Xiong *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2020; 陈国超等,2020; 王巍等,2021; 封铿等,2022),以及晚三叠世(郭正府等,1998; Yu *et al.*, 2020; 徐博等,2020a, 2020b)。

已有研究指出,在中一晚二叠世期间,东昆仑地区已经出现了多处与俯冲作用相关的岩浆活动,

如坑得弄舍辉长岩、加当辉长岩、五龙沟小干沟辉绿岩、巴隆花岗闪长岩和石英闪长岩(Zhang *et al.*, 2012; 孔会磊等, 2018; 张宇婷, 2018; Zhao *et al.*, 2019)。例如,Zhao *et al.*(2019)对坑得弄舍辉长岩进行的研究表明,该辉长岩具有较为亏损的同位素组成,暗示其很可能形成于弧后环境。总之,阿尼玛卿洋在中二叠世时就已经开始了俯冲(图 10b)。

本文对中三叠世末期形成的海德乌拉辉绿岩的研究表明,其地幔源区受到了俯冲洋壳的交代影响(见第 5.2 节)。不仅如此,东昆仑造山带内其他的早一中三叠世基性岩,如白日其利镁铁质岩墙、按纳格辉长岩,都表现出与海德乌拉基性岩相似的地

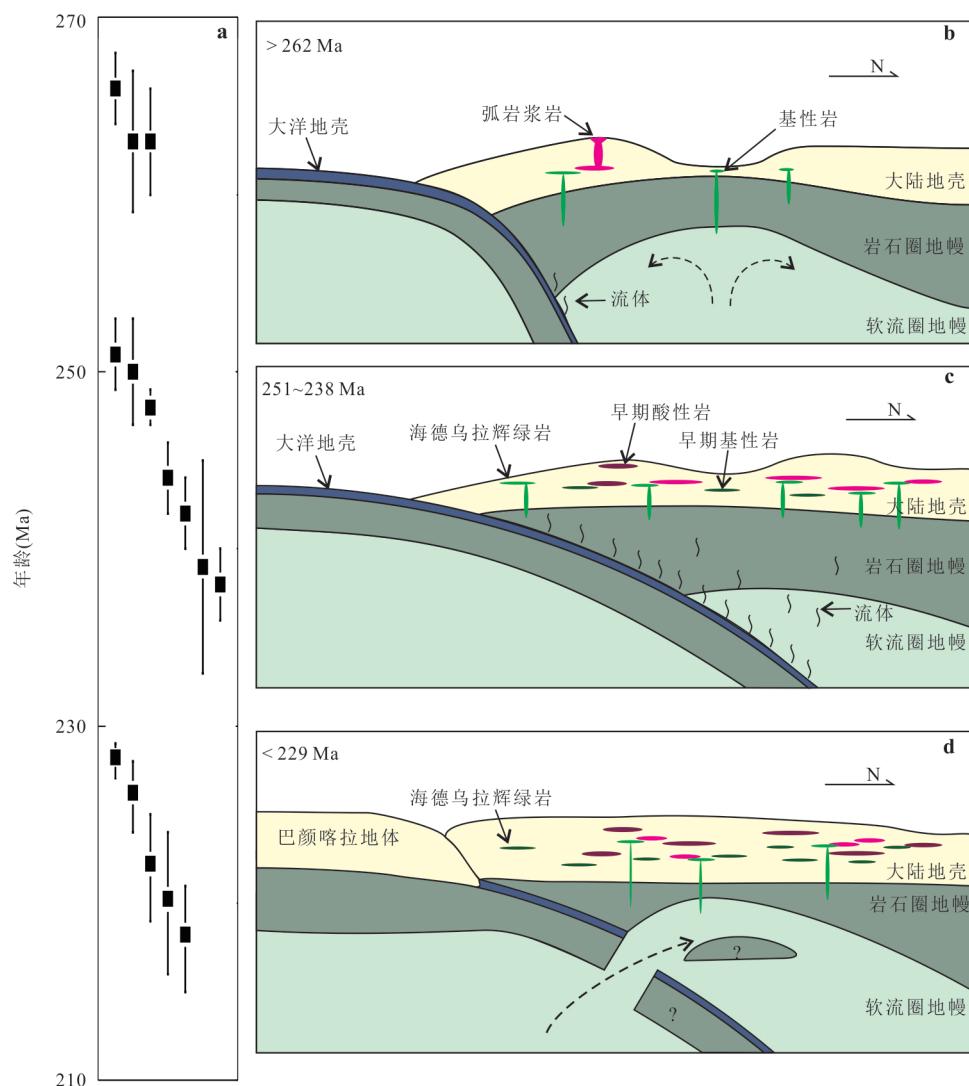


图 10 东昆仑造山带中二叠世—三叠纪时期基性岩年龄统计图(a)和构造演化模式图(b~d)

Fig.10 Temporal distribution of Middle Permian-Triassic basic igneous rocks in the EKOB (a) and schematic cartoons of the tectonic evolution of the EKOB from Middle Permian to Triassic (b-d)

图 a 中基性岩数据来源见表 1

球化学特征和同位素组成(图6,图8,图9),它们的地幔源区也都表现出受到俯冲流体交代的特征(熊富浩等,2011;赵旭等,2018),指示着它们形成于俯冲的构造环境。近年来,对东昆仑地区的大量研究揭示了该地区广泛出露的晚二叠世—中三叠世中酸性火成岩具有陆源弧岩浆岩属性,并且岩浆岩活动(包括基性岩和中酸性火成岩)在整体上呈现出持续增强的趋势(莫宣学等,2007;Zhang *et al.*, 2012; Xiong *et al.*, 2014; Ju *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2019; 黄啸坤等,2021; 徐晓波等,2021; 封铿等,2022)。沉积学研究也指出,上二叠统格曲组和下三叠统洪水川组均是在活动大陆边缘环境下形成,记录了古洋壳的俯冲过程(李瑞保等,2015; 杨森等,2016)。这些证据同样支持板片俯冲作用应持续到中三叠世。

需要指出的是,中一晚三叠世基性岩与中二叠世基性岩在岩石性质和构造环境上的差别,可能表征了俯冲板片的影响范围不断向北推进(Zhao *et al.*, 2019)。一种可能的解释是,随着俯冲作用的进行,板片俯冲角度发生了变化,进而影响上覆岩石圈,使之发生了有限程度的挤压加厚,引发了基性岩浆性质的变化和上二叠统的沉积间断。在这种情况下,虽然基性岩浆因岩石圈增厚而难以到达中上地壳,但酸性岩浆活动并未停滞。不过,这一猜想有待进一步研究的验证。

总之,本文认为阿尼玛卿洋在晚二叠世—中三叠世时期并未闭合,东昆仑地区仍处于板片俯冲的构造环境(图10c)。本文对海德乌拉辉绿岩的研究则指示着,板片的俯冲至少持续到238 Ma左右。

在海德乌拉辉绿岩形成之后,基性岩浆活动在晚三叠世早期(237~229 Ma)出现了短暂的减弱,到228 Ma之后再次集中产出(表1,图10a)。值得注意的是,虽然晚三叠世基性岩仍然具有弧岩浆岩的特征(图8,图9),但相对于早—中三叠世基性岩而言,其Sr-Nd同位素组成较为亏损(图6b)。这一变化表明,在晚三叠世时期,东昆仑地区富集的地幔楔中加入了部分较为亏损的组分(Liu *et al.*, 2017)。结合基性岩浆活动在晚三叠世早期的减少(图10a),本文认为,东昆仑地区在晚三叠世早期进入陆(弧)陆碰撞的构造环境,随后,由于残留板片的断离或是加厚岩石圈的拆沉(陈国超等,2019; Zhu *et al.*, 2022),导致了软流圈地幔上涌,加入到富集的地幔楔中,诱发了地幔物质的部分熔融,形成了

相对较为亏损的晚三叠世基性岩(图10d)。与此同时,东昆仑地区进入后碰撞伸展的构造环境。

构造环境的转变,不仅造成了基性岩的再次活跃以及同位素组成的变化,也留下了相应的沉积记录,同时,引起了中酸性岩浆岩活动强度和岩石性质的变化。晚三叠世时,东昆仑地区出现了明显的沉积间断,表现为上三叠统八宝山组陆相磨拉石沉积不整合覆盖于中三叠统岩层之上,这次不整合事件正是在碰撞挤压的环境下形成的。对东昆仑地区三叠纪岩浆岩的统计研究显示,岩浆活动(包括基性岩和中酸性岩石)在235~229 Ma间出现了低谷(徐晓波等,2021),这与本文对基性岩的统计结果相吻合,进一步佐证了构造环境在此时期内发生了转变。而在230 Ma之后,岩浆活动再次活跃,花岗质岩石的性质也随之发生了变化,产出了大量埃达克质岩石和A型花岗岩(Xiong *et al.*, 2014; 陈国超等, 2019; Zhu *et al.*, 2022),暗示东昆仑地区在此时进入了后碰撞伸展的构造环境,也与本文结论相吻合。

需要说明的是,虽然近年来的研究指出,一些晚三叠世酸性岩也具有弧岩浆岩的特征,但这些岩浆岩主要分布于东昆仑西段(徐博等, 2020a, 2020b)。这一现象暗示着东昆仑西段与东段之间,在构造转换的时间上可能有所差异。

总之,本文的研究表明,东昆仑东段地区在中二叠世—中三叠世期间,处于板片俯冲的构造环境;陆(弧)陆碰撞发生在237~229 Ma期间;到不晚于228 Ma时,东昆仑东段地区已经进入后碰撞伸展的构造环境。

6 结论

(1) 海德乌拉辉绿岩形成时代在238±2 Ma。

(2) 海德乌拉辉绿岩是在板片俯冲的构造环境下,由受到俯冲板片释放出的流体交代作用影响的地幔源区,发生部分熔融而形成的。

(3) 在东昆仑东段地区,阿尼玛卿洋洋壳的北向俯冲至少持续到了中三叠世末;由俯冲阶段到碰撞阶段的构造转换发生在237~229 Ma之间;在不晚于228 Ma时,东昆仑东段转入后碰撞伸展的构造环境。

附表见官网(<http://www.earth-science.net>)。

致谢:刘国奇博士和张迪博士在锆石定年实验中提供了帮助,匿名审稿人对本文提出了建设性的修改意见和建议,在此一并表示感谢。

References

- Ao, C., Sun, F.Y., Li, B.L., et al., 2015. U-Pb Dating, Geochemistry and Tectonic Implications of Xiaojianshan Gabbro in Qimantage Mountain, Eastern Kunlun Orogenic Belt. *Geotectonica et Metallogenica*, 39(6): 1176–1184(in Chinese with English abstract).
- Ba, J., Chen, N.S., Wang, Q.Y., et al., 2012. Nd-Sr-Pb Isotopic Compositions of Cordierite Granite on Southern Margin of the Qaidam Block, NW China, and Constraints on Its Petrogenesis, Tectonic Affinity of Source Region and Tectonic Implications. *Earth Science*, 37(S1): 80–92(in Chinese with English abstract).
- Chen, G.C., Pei, X.Z., Li, R.B., et al., 2017. Age and Petrogenesis of Jialuhe Basic-Intermediate Pluton in Xiangjia' nanshan Granite Batholith in the Eastern Part of East Kunlun Orogenic Belt, and Its Geological Significance. *Geotectonica et Metallogenica*, 41(6): 1097–1115 (in Chinese with English abstract).
- Chen, G.C., Pei, X.Z., Li, R.B., et al., 2019. Lithospheric Extension of the Post-Collision Stage of the Paleo-Tethys Oceanic System in the East Kunlun Orogenic Belt: Insights from Late Triassic Plutons. *Earth Science Frontiers*, 26(4): 191–208(in Chinese with English abstract).
- Chen, G.C., Pei, X.Z., Li, R.B., et al., 2020. Late Palaeozoic-Early Mesozoic Tectonic-Magmatic Evolution and Mineralization in the Eastern Section of the East Kunlun Orogenic Belt. *Earth Science Frontiers*, 27(4): 33–48(in Chinese with English abstract).
- Deniel, C., 1998. Geochemical and Isotopic (Sr, Nd, Pb) Evidence for Plume-Lithosphere Interactions in the Genesis of Grande Comore Magmas (Indian Ocean). *Chemical Geology*, 144(3–4): 281–303. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(97\)00139-3](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(97)00139-3)
- Dong, Y., He, D., Sun, S., et al., 2018. Subduction and Accretionary Tectonics of the East Kunlun Orogen, Western Segment of the Central China Orogenic System. *Earth-Science Reviews*, 186: 231–261. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.12.006>
- Feng, K., Li, R.B., Pei, X.Z., et al., 2022. Zircon U-Pb Chronology, Geochemistry and Geological Significance of Late Triassic Intermediate-Acid Volcanic Rocks in Boluositai Area, East Kunlun Orogenic Belt. *Earth Science*, 47(4): 1194–1216(in Chinese with English abstract).
- Goldstein, S. L., O' Nions, R. K., Hamilton, P. J., 1984. A Sm-Nd Isotopic Study of Atmospheric Dusts and Particulates from Major River Systems. *Earth and Planetary Science Letters*, 70(2): 221–236.
- Guo, A.L., Zhang, G.W., Sun, Y.G., et al., 2007a. Sr-Nd-Pb Isotopic Geochemistry of Late-Paleozoic Mafic Volcanic Rocks in the Surrounding Areas of the Gonghe Basin, Qinghai Province and Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(4): 747–754(in Chinese with English abstract).
- Guo, A.L., Zhang, G.W., Sun, Y.G., et al., 2007b. Geochemistry and Spatial Distribution of OIB and MORB in A'nyemaqen Ophiolite Zone: Evidence of Majixueshan Ancient Ridge-Centered Hotspot. *Scientia Sinica (Terrestrae)*, 37(S1): 249–261(in Chinese).
- Guo, Z.F., Deng, J.F., Xu, Z.Q., et al., 1998. Late Palaeozoic-Mesozoic Intracontinental Orogenic Process and Intermediate-Acidic Igneous Rocks from the Eastern Kunlun Mountains of Northwestern China. *Geoscience*, 12(3): 344–352 (in Chinese with English abstract).
- Hu, Y., Niu, Y. L., Li, J. Y., et al., 2016. Petrogenesis and Tectonic Significance of the Late Triassic Mafic Dikes and Felsic Volcanic Rocks in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibet Plateau. *Lithos*, 245: 205–222. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.05.004>
- Huang, H. Q., Niu, Y., Nowell, G., et al., 2014. 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. *Chemical Geology*, 370: 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.01.010>
- Huang, X.K., Wei, J.H., Li, H., et al., 2021. Zircon U-Pb Geochronological, Elemental and Sr-Nd-Hf Isotopic Constraints on Petrogenesis of Late Triassic Quartz Diorite in Balong Region, East Kunlun Orogen. *Earth Science*, 46(6): 2037–2056(in Chinese with English abstract).
- Jacobsen, S. B., Wasserburg, G. J., 1980. Sm-Nd Isotopic Evolution of Chondrites. *Earth and Planetary Science Letters*, 50(1): 139 – 155.
- Jahn, B. M., Condie, K. C., 1995. Evolution of the Kaapvaal Craton as Viewed from Geochemical and Sm-Nd Isotopic Analyses of Intracratonic pelites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(11): 2239–2258. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00103-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00103-7)
- Ju, Y. J., Zhang, X. L., Lai, S. C., et al., 2017. Permian –

- Triassic Highly-Fractionated I-Type Granites from the Southwestern Qaidam Basin (NW China): Implications for the Evolution of the Paleo-Tethys in the Eastern Kunlun Orogenic Belt. *Journal of Earth Science*, 28(1): 51–62. <https://doi.org/10.1007/s12583-017-0745-5>
- Kepezhinskas, P., McDermott, F., Defant, M. J., et al., 1997. Trace Element and SR-ND-PB Isotopic Constraints on a Three-Component Model of Kamchatka Arc Petrogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(3): 577–600. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(96\)00349-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(96)00349-3)
- Khan Junaid, Yao Huazhou, Zhao Junhong, Li Qiwei, Xiang Wenshuai, Jiang Junsheng, Tahir Asma, 2023. Petrogenesis and Tectonic Implications of the Tertiary Choke Shield Basalt and Continental Flood Basalt from the Central Ethiopian Plateau. *Journal of Earth Science*, 34(1): 86–100. <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1729-7>
- Kong, H.L., Li, J.C., Li, Y.Z., et al., 2017. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating and Its Geological Significance of the Jiadang Gabbro in the Eastern Section of East Kunlun, Qinghai Province. *Geology and Exploration*, 53(5): 889–902(in Chinese with English abstract).
- Kong, H.L., Li, J.C., Li, Y.Z., et al., 2018. Zircon U-Pb Dating and Geochemistry of the Jiadang Olivine Gabbro in the Eastern Section of East Kunlun, Qinghai Province and Their Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 92(5): 964–978(in Chinese with English abstract).
- Kong, J. J., Niu, Y. L., Hu, Y., et al., 2020. Petrogenesis of the Triassic Granitoids from the East Kunlun Orogenic Belt, NW China: Implications for Continental Crust Growth from Syn-Collisional to Post-Collisional Setting. *Lithos*, 364: 105513. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105513>
- Kuritani, T., Ohtani, E., Kimura, J. I., 2011. Intensive Hydration of the Mantle Transition Zone beneath China Caused by Ancient Slab Stagnation. *Nature Geoscience*, 4: 713–716. <https://doi.org/10.1038/ngeo1250>
- Lei, Y.L., Dai, J.W., Bai, Q., et al., 2021. Genesis and Implications of Peraluminous A-Type Rhyolite in the Haidewula Area, East Kunlun Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 37(7): 1964–1982(in Chinese with English abstract).
- Li, R.B., Pei, X.Z., Li, Z.C., et al., 2015. The Depositional Sequence and Prototype Basin for Lower Triassic Hongshuichuan Formation in the Eastern Segment of East Kunlun Mountains. *Geological Bulletin of China*, 34(12): 2302–2314(in Chinese with English abstract).
- Liew, T. C., Hofmann, A. W., 1988. Precambrian Crustal Components, Plutonic Associations, Plate Environment of the Hercynian Fold Belt of Central Europe: Indications from a Nd and Sr Isotopic Study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98(2): 129–138. <https://doi.org/10.1007/BF00402106>
- Liu, B., Ma, C., Huang, J., et al., 2017. Petrogenesis and Tectonic Implications of Upper Triassic Appinite Dykes in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibetan Plateau. *Lithos*, 284–285: 766–778. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.05.016>
- Liu, C. D., Mo, X. X., Luo, Z. H., et al., 2004. Mixing Events between the Crust- and Mantle-Derived Magmas in Eastern Kunlun: Evidence from Zircon SHRIMP II Chronology. *Chinese Science Bulletin*, 49(8): 828–834. <https://doi.org/10.1007/BF02889756>
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Liu, Z.Q., 2011. Study on the Geological Characteristics and Tectonic of Buqingshan Melanges Belt, the South Margin of East Kunlun Mountains (Dissertation). Chang'an University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z.Q., Pei, X.Z., Li, R.B., et al., 2011. 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. *Acta Geologica Sinica*, 85(2): 185–194(in Chinese with English abstract).
- Lugmair, G. W., Marti, K., 1978. Lunar Initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$: Differential Evolution of the Lunar Crust and Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 39(3): 349–357. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(78\)90021-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(78)90021-3)
- Luo, Z.H., Ke, S., Cao, Y.Q., et al., 2002. Late Indosiman Mantle-Derived Magmatism in the East Kunlun. *Regional Geology of China*, 21(6): 292–297(in Chinese with English abstract).
- Ma, L. Y., Niu, Z. J., Bai, Y. S., et al., 2007. Sr, Nd and Pb Isotopic Geochemistry of Permian Volcanic Rocks from Southern Qinghai and Their Geological Significance. *Earth Science*, 32(1): 22–28(in Chinese with English abstract).

- Mo, X.X., Luo, Z.H., Deng, J.F., et al., 2007. Granitoids and Crustal Growth in the East-Kunlun Orogenic Belt. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 403–414(in Chinese with English abstract).
- Pearce, J. A., 2008. Geochemical Fingerprinting of Oceanic Basalts with Applications to Ophiolite Classification and the Search for Archean Oceanic Crust. *Lithos*, 100(1): 14–48. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>
- Rawson, H., Keller, T., Fontijn, K., et al., 2016. Compositional Variability in Mafic Arc Magmas over Short Spatial and Temporal Scales: Evidence for the Signature of Mantle Reactive Melt Channels. *Earth and Planetary Science Letters*, 456: 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.09.056>
- Rudnick, R. L., Gao, S., 2003. Composition of the Continental Crust. In: Rudnick, R. L., Holland, H. D., Tu-rekian, K. K., eds., Treatise on Geochemistry. Elsevier-Pergamon, Oxford, 3: 1–64.
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Wang, M., Pei, X. Z., Li, R. B., et al., 2019. Early Indosinian High-Mg[#] and High-Sr/Y Ratio Granodiorites in the Xiahe Area, West Qinling, Central China: Petrogenesis and Geodynamic Implications. *Lithos*, 332–333: 162–174. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.03.005>
- Wang, W., Xiong, F.H., Ma, C.Q., et al., 2021. Petrogenesis of Triassic Suolagou Sanukitoid-Like Diorite in East Kunlun Orogen and Its Implications for Paleo-Tethyan Orogeny. *Earth Science*, 46(8): 2887–2902(in Chinese with English abstract).
- Weis, D., Kieffer, B., Maerschalk, C., et al., 2006. High-Precision Isotopic Characterization of USGS Reference Materials by TIMS and MC-ICP-MS. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(8): Q08006. <https://doi.org/10.1029/2006GC001283>
- Winchester, J. A., Floyd, P. A., 1977. Geochemical Discrimination of Different Magma Series and Their Differentiation Products Using Immobile Elements. *Chemical Geology*, 20: 325–343. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(77\)90057-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2)
- Wu, Y.B., Zheng, Y.F., 2004. Genesis of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589–1604 (in Chinese).
- Xiong, F.H., Ma, C.Q., Zhang, J.Y., et al., 2011. 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. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3350–3364(in Chinese with English abstract).
- Xiong, F. H., Ma, C. Q., Zhang, J. Y., et al., 2014. Re-working 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. *Journal of the Geological Society*, 171: 847–863. <https://doi.org/10.1144/jgs2013-038>
- Xu, B., Li, Y.L., Shi, L.C., et al., 2020a. Magmatic Consanguinity of the Late Triassic Granites and Rhyolites in Eastern Qimantage: Constraints from Geochronology, Geochemistry and Nd-Pb Isotopes. *Geological Review*, 66(3): 686–698(in Chinese with English abstract).
- Xu, B., Wang, C.Y., Liu, J.D., et al., 2020b. The Petrogenesis of the Late Triassic Granites in the Heergetou Area, East Kunlun: Constraints from Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Pb Isotopes. *Acta Geologica Sinica*, 94(12): 3643–3656(in Chinese with English abstract).
- Xu, X.B., Wang, L.X., Ma, C.Q., et al., 2021. Petrogenesis and Geological Implications of the Yangfengou Intermediate-Felsic Dykes in the Balong Area within the Eastern Kunlun Orogen. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 40(3): 653–676(in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.Q., Yang, J.S., Li, H.Q., et al., 2012. Indosinian Collision-Orogenic System of Chinese Continent and Its Orogenic Mechanism. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6): 1697–1709(in Chinese with English abstract).
- Yang, H., Ge, W., Dong, Y., et al., 2019. Permian Subduction of the Paleo-Pacific (Panthalassic) Oceanic Lithosphere beneath the Jiamusi Block: Geochronological and Geochemical Evidence from the Luobei Mafic Intrusions in Northeast China. *Lithos*, 332–333: 207–225. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.03.004>
- Yang, S., Pei, X.Z., Li, R.B., et al., 2016. Provenance Analysis and Structural Implications of Gequ Formation at the Buqingshan Area in the Eastern Segment of the East Kunlun Region. *Geological Bulletin of China*, 35(5): 674–686(in Chinese with English abstract).

- Yu, M., Dick, J. M., Feng, C., et al., 2020. The Tectonic Evolution of the East Kunlun Orogen, Northern Tibetan Plateau: A Critical Review with an Integrated Geodynamic Model. *Journal of Asian Earth Sciences*, 191: 104168. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2019.104168>
- Yu, N., Jin, W., Ge, W. C., et al., 2005. Geochemical Study on Peraluminous Granite from Jinshukou in East Kunlun. *World Geology*, 24(2): 123—128(in Chinese with English abstract).
- Yu, Y.Y., Zong, K.Q., Yuan, Y., et al., 2022. Crustal Contamination of the Mantle-Derived Liuyuan Basalts: Implications for the Permian Evolution of the Southern Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Earth Science*, 33(5): 1081—1094. <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1706-1>
- Zhang, J. Y., Ma, C. Q., Xiong, F. H., et al., 2012. Petrogenesis and Tectonic Significance of the Late-Permian–Middle Triassic Calc-Alkaline Granites in the Balong Region, Eastern Kunlun Orogen, China. *Geological Magazine*, 149(5): 892—908. <https://doi.org/10.1017/S0016756811001142>
- Zhang, Y.T., 2018. Research on Metallogenesis of Gold Deposits in the Wulonggou Ore Concentration Area, Central Segment of the East Kunlun Mountains, Qinghai Province (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X., Fu, L., Wei, J. H., et al., 2019. Late Permian Back-Arc Extension of the Eastern Paleo-Tethys Ocean: Evidence from the East Kunlun Orogen, Northern Tibetan Plateau. *Lithos*, 340—341: 34—48. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.05.006>
- Zhao, X., Fu, L.B., Wei, J.H., et al., 2018. Geochemical Characteristics of An' nage Hornblende Gabbro from East Kunlun Orogenic Belt and Its Constraints on Evolution of Paleo-Tethys Ocean. *Earth Science*, 43(2): 354—370(in Chinese with English abstract).
- Zhao, X., Wei, J. H., Fu, L. B., et al., 2020. Multi-Stage Crustal Melting from Late Permian Back-Arc Extension through Middle Triassic Continental Collision to Late Triassic Post-Collisional Extension in the East Kunlun Orogen. *Lithos*, 360—361: 105446. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105446>
- Zhu, Y.H., Zhu, Y.S., Lin, Q.X., et al., 2003. Characteristics of Early Jurassic Volcanic Rocks and Their Tectonic Significance in Haidewula, East Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province. *Earth Science*, 28(6): 653—659(in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. X., Wang, L. X., Ma, C., et al., 2022. Petrogenesis and Tectonic Implication of the Late Triassic A1-Type Alkaline Volcanics from the Xiangrige Area, Eastern Segment of the East Kunlun Orogen (China). *Lithos*, 412—413: 106595. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106595>.
- ### 中文参考文献
- 奥琮, 孙丰月, 李碧乐, 等, 2015. 东昆仑祁漫塔格地区小尖山辉长岩地球化学特征、U-Pb年代学及其构造意义. 大地构造与成矿学, 39(6): 1176—1184.
- 巴金, 陈能松, 王勤燕, 等, 2012. 柴南缘堇青石花岗岩的Nd-Sr-Pb同位素组成及其对岩石成因、源区构造属性和构造演化的启示. 地球科学, 37(S1): 80—92.
- 陈国超, 裴先治, 李瑞保, 等, 2017. 东昆仑东段香加南山花岗岩基中加鲁河中基性岩体形成时代、成因及其地质意义. 大地构造与成矿学, 41(6): 1097—1115.
- 陈国超, 裴先治, 李瑞保, 等, 2019. 东昆仑古特提斯后碰撞阶段伸展作用: 来自晚三叠世岩浆岩的证据. 地学前缘, 26(4): 191—208.
- 陈国超, 裴先治, 李瑞保, 等, 2020. 东昆仑造山带东段晚古生代: 早中生代构造岩浆演化与成矿作用. 地学前缘, 27(4): 33—48.
- 封铿, 李瑞保, 裴先治, 等, 2022. 东昆仑造山带波洛斯太地区晚三叠世中酸性火山岩锆石U-Pb年代学、地球化学及地质意义. 地球科学, 47(4): 1194—1216.
- 郭安林, 张国伟, 孙延贵, 等, 2007a. 青海省共和盆地周缘晚古生代镁铁质火山岩Sr-Nd-Pb同位素地球化学及其次地质意义. 岩石学报, 23(4): 747—754.
- 郭安林, 张国伟, 孙延贵, 等, 2007b. 共和盆地周缘晚古生代镁铁质火山岩地球化学及空间分布: 玛积雪山三联点以及东古特提斯多岛洋启示. 中国科学(D辑: 地球科学), 37(增刊1): 249—261.
- 郭正府, 邓晋福, 许志琴, 等, 1998. 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. 现代地质, 12(3): 344—352.
- 黄啸坤, 魏俊浩, 李欢, 等, 2021. 东昆仑巴隆地区晚三叠世石英闪长岩成因: U-Pb年代学、地球化学及Sr-Nd-Hf同位素制约. 地球科学, 46(6): 2037—2056.
- 孔会磊, 李金超, 栗亚芝, 等, 2017. 青海东昆仑东段加当辉长岩LA-ICP-MS锆石U-Pb测年及其地质意义. 地质与勘探, 53(5): 889—902.
- 孔会磊, 李金超, 栗亚芝, 等, 2018. 青海东昆仑东段加当橄榄辉长岩锆石U-Pb年代学、地球化学及地质意义. 地质学报, 92(5): 964—978.

- 雷勇亮, 戴佳文, 白强, 等, 2021. 东昆仑造山带海德乌拉铝质 A 型流纹岩成因及其意义. 岩石学报, 37(7): 1964—1982.
- 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 等, 2015. 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. 地质通报, 34(12): 2302—2314.
- 刘战庆, 2011. 东昆仑南缘布青山构造混杂岩带地质特征及区域构造研究(博士学位论文). 西安: 长安大学.
- 刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 等, 2011. 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. 地质学报, 85(2): 185—194.
- 罗照华, 柯珊, 曹永清, 等, 2002. 东昆仑印支晚期幔源岩浆活动. 地质通报, 21(6): 292—297.
- 马丽艳, 牛志军, 白云山, 等, 2007. 青海南部二叠纪火山岩 Sr、Nd、Pb 同位素特征及地质意义. 地球科学, 32(1): 22—28.
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等, 2007. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长. 高校地质学报, 13(3): 403—414.
- 王巍, 熊富浩, 马昌前, 等, 2021. 东昆仑造山带索拉沟地区三叠纪赞岐质闪长岩的成因机制及其对古特提斯造山作用的启示. 地球科学, 46(8): 2887—2902.
- 吴元宝, 郑永飞, 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589—1604.
- 熊富浩, 马昌前, 张金阳, 等, 2011. 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. 岩石学报, 27(11): 3350—3364.
- 徐博, 李玉龙, 史连昌, 等, 2020a. 祁漫塔格东段晚三叠世花岗岩与流纹岩岩浆同源性: 年代学、地球化学及 Nd、Pb 同位素制约. 地质论评, 66(3): 686—698.
- 徐博, 王成勇, 刘建栋, 等, 2020b. 东昆仑河尔格头地区晚三叠世花岗岩成因: 年代学、地球化学及 Sr-Nd-Pb 同位素约束. 地质学报, 94(12): 3643—3656.
- 徐晓波, 王连训, 马昌前, 等, 2021. 东昆仑造山带巴隆地区羊粪沟中酸性岩脉成因及其地质意义. 矿物岩石地球化学通报, 40(3): 653—676.
- 许志琴, 杨经绥, 李化启, 等, 2012. 中国大陆印支碰撞造山系及其造山机制. 岩石学报, 28(6): 1697—1709.
- 杨森, 裴先治, 李瑞保, 等, 2016. 东昆仑东段布青山地区上二叠统格曲组物源分析及其构造意义. 地质通报, 35(5): 674—686.
- 余能, 金巍, 葛文春, 等, 2005. 东昆仑金水口过铝花岗岩的地球化学研究. 世界地质, 24(2): 123—128.
- 张宇婷, 2018. 青海东昆仑中段五龙沟矿集区金矿成矿作用研究(博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 赵旭, 付乐兵, 魏俊浩, 等, 2018. 东昆仑按纳格角闪辉长岩体地球化学特征及其对古特提斯洋演化的制约. 地球科学, 43(2): 354—370.
- 朱云海, 朱耀生, 林启祥, 等, 2003. 东昆仑造山带海德乌拉一带早侏罗世火山岩特征及其构造意义. 地球科学, 28(6): 653—659.