第 59 卷 第 5 期
2026 年（总 249 期）

西 北 地 质
NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 59 No. 5
2026(Sum249)



引文格式：祁尧刚，孟勇，李佐臣，等. 东昆仑东段沟里地区洪水川组火山岩夹层锆石 U-Pb 年代学、岩石成因及对古特提斯洋演化的制约[J]. 西北地质，2026，59(5)：86−102. DOI：10.12401/j.nwg.2025085

Citation：QI Yaogang，MENG Yong，LI Zuochen，et al. Zircon U-Pb Geochronology and Petrogenesis of Volcanic Interlayers in the Hongshuichuan Formation：Insights into the Evolution of Paleo-Tethys Ocean in the Gouli Area of the Eastern Section of East Kunlun[J]. Northwestern Geology，2026，59(5)：86−102. DOI：10.12401/j.nwg.2025085

东昆仑东段沟里地区洪水川组火山岩夹层锆石 U-Pb 年代学、岩石成因及对古特提斯洋演化的制约

祁尧刚[1]，孟勇[1,*]，李佐臣[2]，许星辰[1]，张吉廷[1]，王鹏[1]，朱兴明[1]，周霖[1]

（1. 中国地质调查局西宁自然资源综合调查中心，青海 西宁 810021；2. 长安大学地球科学与资源学院，陕西 西安 710054）

摘 要：东昆仑造山带是古特提斯域的重要组成部分，该区古特提斯洋的闭合时限目前还存在分歧。选取该区东段沟里地区洪水川组中的火山岩夹层开展锆石 U-Pb 同位素年龄和岩石地球化学研究。结果表明，该套火山岩由玄武安山岩、英安岩和流纹岩组成；英安岩和流纹岩的样品中所挑锆石均具有岩浆韵律环带，大多数具有较高 Th/U 值，为岩浆成因锆石；LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为（250 ± 2.1）Ma（MSWD=4.9）和（248 ± 4.5）Ma（MSWD=1.2），代表火山岩形成时代为早三叠世奥列尼奥克期。岩石地球化学分析表明，该套火山岩夹层属于钙碱性，呈现出 Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素（LILE）富集，Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素（HFSE）亏损，Zr 和 Hf 无明显异常的特点，表现出与俯冲带相关的弧岩浆岩特征。玄武安山岩是受俯冲流体交代的地幔源区岩浆，经历后期结晶分异和地壳物质混染形成的；英安岩和流纹岩属于同源演化关系，是幔源岩浆上涌诱发的地壳熔融产物，形成于古特提斯洋向北俯冲的环境下。洪水川组火山岩夹层的时代和沉积环境研究，限定了东昆仑地区古特提斯洋的闭合时间不早于 248 Ma。

关键词：东昆仑东段；洪水川组火山岩夹层；锆石 U-Pb 定年；岩石成因；构造环境

中图分类号：P581；P584 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-6248(2026)05-0086-17

Zircon U-Pb Geochronology and Petrogenesis of Volcanic Interlayers in the Hongshuichuan Formation: Insights into the Evolution of Paleo-Tethys Ocean in the Gouli Area of the Eastern Section of East Kunlun

QI Yaogang[1], MENG Yong[1,*], LI Zuochen[2], XU Xingchen[1], ZHANG Jiting[1], WANG Peng[1], ZHU Xingming[1], ZHOU Lin[1]

（1. Xining Center of Natural Resource Comprehensive Survey, China Geologicial Survey, Xining 810021, Qinghai, China；
2. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China）

Abstract：The East Kunlun Orogenic Belt is an important part of the Paleo-Tethys domain, and there are still

收稿日期：2025-03-29；**修回日期**：2025-05-21；**责任编辑**：曹佰迪

基金项目：中国地质调查局项目“ 青海省格尔木市纳赤台西地区小南川等 2 幅 1∶5 万区域地质调查 ”（DD20250103002），“东昆仑成矿带金矿资源潜力动态评价”（DD20220978），“祁连成矿带金矿资源潜力动态评价”（DD20220979），陕西高校青年创新团队联合资助。

作者简介：祁尧刚（1992−），男，工程师，从事区域地质矿产调查工作。E-mail：13519738002@163.com。

*** 通讯作者**：孟勇（1979−），男，正高级工程师，硕士生导师，从事区域地质和成矿规律研究工作。E-mail：myong@mail.cgs.gov.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

disagreements regarding the closure time limit of the Paleo-Tethys Ocean in this area. Volcanic rock interlayers in the Hongshuichuan Formation in the Gouli area of the eastern segment of this region were selected for zircon U-Pb isotopic age and petrogeochemical studies. The results show that this suite of volcanic rocks is composed of basaltic andesite, dacite, and rhyolite. The selected zircons in the dacite and rhyolite samples all exhibit magmatic rhythmic zoning, and most of them have a high Th/U ratio, indicating that they are of magmatic origin. The LA-ICP-MS zircon U-Pb ages are (250±2.1) Ma (MSWD=4.9) and (248±4.5) Ma (MSWD=1.2), representing that the volcanic rocks were formed during the Olenekian period of the Early Triassic. Petrogeochemical analysis shows that this suite of volcanic rock interlayers belongs to the calc-alkaline series, showing the characteristics of enrichment in large ion lithophile elements (LILE) such as Rb, Ba, Th, and U, depletion in high field strength elements (HFSE) such as Nb, Ta, P, and Ti, and no obvious anomalies in Zr and Hf, exhibiting the characteristics of arc magmatic rocks related to the subduction zone. The basaltic andesite is a magma from the mantle source area metasomatized by subduction fluids, formed through later crystallization differentiation and crustal material contamination; the dacite and rhyolite have a homologous evolutionary relationship and are products of crustal melting induced by the upwelling of mantle-derived magma, formed in the environment of northward subduction of the Paleo-Tethys Ocean. The study on the age and sedimentary environment of the volcanic rock interlayers in the Hongshuichuan Formation limits that the closure time of the Paleo-Tethys Ocean in the East Kunlun area is not earlier than 248 Ma.

Keywords: eastern section of the East Kunlun; volcanic rock interlayers in Hongshuichuan Formation; zircon U-Pb dating; petrogenesis; tectonic environment

东昆仑造山带是中央造山带的重要组成部分、也是青藏高原北部重要的构造岩浆带, 先后经历了多次弧岩浆作用和碰撞事件(Wu et al., 2019; 钟世华等, 2025a), 以前寒武纪—泥盆纪原特提斯洋和石炭纪—三叠纪古特提斯洋两期造山事件最为显著(许志琴等, 2007; 李荣社等, 2008; Xiong et al., 2014; Shao et al., 2017; Dong et al., 2018; 王秉璋等, 2022), 其中古特提斯洋的造山事件更是奠定了东昆仑造山带最终的构造格局。前人对东昆仑造山带古特提斯洋的扩张、俯冲、大洋闭合、陆–陆碰撞及碰撞后的伸展开展了大量研究工作(丰成友, 2002; 莫宣学等, 2007; 裴先治等, 2018), 认为东昆仑地区昆南缝合带中的蛇绿岩作为古特提斯洋的残片, 记录了古特提斯洋的形成与扩张历史(边千韬等, 1999; 杨经绥, 2004), 然而对于古特提斯洋的闭合时间还存在争议: ① 东昆仑古特提斯洋在晚二叠世闭合(Huang et al., 2014), 从早三叠世开始已经进入了碰撞及后碰撞造山阶段, 并形成了以俯冲洋壳和沉积物为岩浆源区的具碰撞构造属性的花岗岩(Huang et al., 2014); ②东昆仑古特提斯洋在晚二叠世—中三叠世还在继续向北俯冲(Xiong et al., 2014; Xia et al., 2015; Dong et al., 2018; 裴先治等, 2018), 从中三叠世晚期开始弧(陆)陆碰撞造山, 晚三叠世已转入到后碰撞造山阶段并引发幔源岩浆活动, 形成东昆仑成矿带以 Au、Cu、Pb、Zn 为主的多金属成矿期(王秉璋等, 2014; Gao et al., 2021); ③ 东昆仑古特提斯洋在晚三叠世之前(>215 Ma)仍未完全关闭(Ding et al., 2014; Wu et al., 2019)。这些争议限制了对东昆仑造山带印支期岩浆岩构造属性以及古特提斯洋构造演化时间的认识。

基于上述问题, 本次研究选取东昆仑造山带东段德龙金矿区下三叠统洪水川组火山岩夹层作为研究对象, 通过对其进行详细的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学及全岩地球化学研究, 探讨其构造环境, 以期为东昆仑地区古特提斯洋的构造演化提供约束。

1 地质背景

东昆仑造山带北邻柴达木地块, 南接巴颜喀拉地块, 东与西秦岭相接, 西边被阿尔金走滑断裂与西昆仑错开(图 1a)。东昆仑造山带以昆北、昆中(缝合带)和昆南(缝合带)3 条断裂带将东昆仑造山带由北向南分为祁漫塔格构造带、东昆北构造带和东昆南构造带(许志琴等, 2006; 李荣社等, 2008; Dong et al., 2018; 鲍泓辰等, 2026)。祁漫塔格构造带以古元古界金水口群、中元古界小庙群为变质基底, 在长期洋陆转换过程中相对稳定; 东昆北构造带与祁漫塔格构造带有同

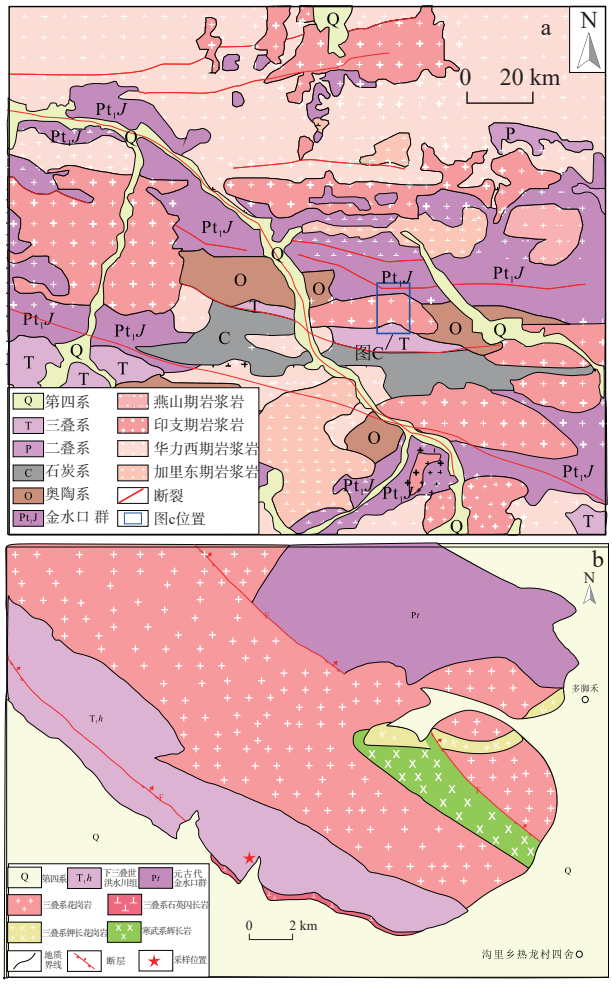


图1 青海沟里地区大地构造位置图(a;据王兴等,2019修)、沟里地区地质简图(b;据杨宝荣等,2018修)及德龙金矿区地质简图(c;据张萱颖,2016修)

Fig. 1 (a) Tectonic location map of the Gouli area in Qinghai, (b) simplified geological map of the Gouli area, and (c) simplified geological map of the Delong gold mining area

样的变质基底,不同的是其保存有多条早古生代蛇绿岩片;昆南构造带主要为中元古代苦海杂岩型软基底,晚古生代表现为大陆边缘的稳定–次稳定沉积(郝娜娜,2016;何书跃等,2023;钟世华,2025b)。

晚二叠世—三叠世是东昆仑地区处于洋–陆转换的重要变革时期,此时东昆仑南缘的古特提斯洋封闭、消亡。东昆仑地区三叠纪地层沉积类型多样,分布广泛,厚度巨大,昆中断裂以北缺失早、中三叠纪地层,晚三叠世地层以祁漫塔格及都兰地区的鄂拉山组为代表,以南的三叠纪地层由洪水川组、闹仓坚沟组和八宝山组组成。通过对洪水川组中古生物化石的研究认为其形成时代为早三叠纪(欧阳舒,2011),由底到顶划分6个岩性段和4个沉积体系,其中1、2段为灰绿–紫红色粗碎屑岩及紫红色细碎屑岩组合和灰绿色含砾粗砂岩、粗砂岩夹砾岩组合,属于扇三角洲沉积体系;3、4段为深灰色–灰黑色薄层–中薄层灰岩和浅灰色–灰色中–薄层粉砂岩夹灰色薄层灰岩组合,属于浅海混积陆棚沉积体系;5段为一套灰色–灰绿色薄层钙质粉砂岩、细砂岩和中粒钙质长石岩屑杂砂岩互层或夹层组成的鲍马序列组合,属于半深海–深海浊流沉积体系;6段为灰色中薄层细砾岩、含细砾粗砂岩、细砂岩夹薄层钙质粉砂岩及灰岩组合,属于滨浅海沉积体系(杨忠智,2012)。火山岩呈夹层状赋存于洪水川组底部的碎屑岩中。洪水川组的沉积序列形成于古特提斯洋向北俯冲过程中的弧前盆地,完整记录了一个弧前盆地初始沉积(扇三角洲沉积和浅海陆棚沉积体系)、正常沉积(浊流沉积)、晚期沉积(滨浅海相沉积)等连续的沉积过程,客观反映了古特提斯洋向北俯冲的事实(闫臻,2008;王兴等,2019)。

德龙金矿区位于东昆南构造带东段,夹持于昆中断裂和昆南断裂之间,地处东昆仑成矿带东端的沟里地区,属于东昆南加力东期、印支期金多金属成矿亚带的南东段(图1b)。德龙金矿区北部主要为古元古代金水口群变质岩,中部出露三叠纪花岗岩,南部以下三叠统洪水川组和第四系为主,矿区内的金矿体主要受区内NW向、NNW向断裂构造控制。洪水川组火山岩夹层出露于德龙金矿区的南部,主要由玄武安山岩、英安岩和流纹岩组成(图2),笔者采集了3种不同岩性的火山岩样品(图1c)。

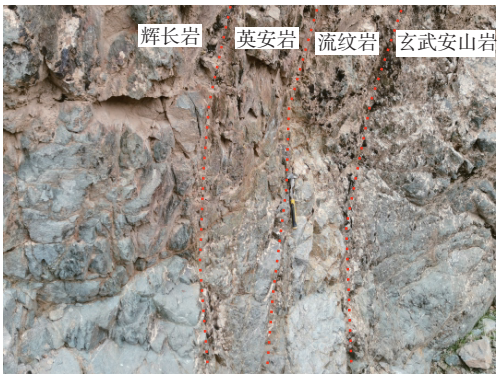


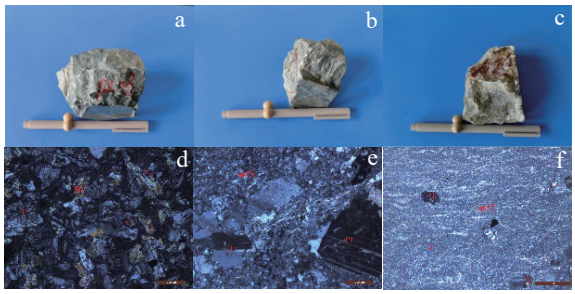
图2 德龙地区洪水川组火山岩夹层野外露头

Fig. 2 Outcrop in the field of the interlayer of volcanic rocks in the Hongshuichuan Formation in Delong area

2 岩相学特征

玄武安山岩:岩石呈灰绿色,显微晶质结构,块状

构造, 遭受绿泥石化绢云母化蚀变(图 3a)。岩石主要由基质组成。基质由斜长石、辉石、橄榄石、石英等组成。其中, 斜长石约为 55%, 主要为拉长石, 粒度为 0.6～0.2 mm, 半自形–自形板条状、宽板状, 具较宽的聚片双晶, 多发生绢云母化; 普通辉石约为 25%, 粒度为 0.12～0. 6 mm, 无色略带浅绿色, 裂理发育, 它形粒状; 斜方辉石已经全部转变为绿泥石和碳酸盐矿物形成假象斜方辉石约为 12%, 粒度为 0.1～0.46 mm; 橄榄石估量 2%, 粒度为 0.04～0.2 mm, 充填于矿物颗粒之间; 石英约为 3%, 粒度为 0.08～0.45 mm, 主要呈他形粒状, 充填于矿物颗粒之间。此外, 还发育少量(3%)的副矿物, 主要为磷灰石和黑色金属矿物(图 3b)。



a、b. 玄武安山岩; c、d. 英安斑岩; e、f. 流纹斑岩; Pl. 斜长石; Q. 石英; Hb1. 辉石; Py. 黄铁矿; Or. 正长石

图3 东昆仑东段沟里地区德龙洪水川组火山岩手标本及镜下照片

Fig. 3 Specimen and microscopic photographs of the Delong Hongshuichuan Formation volcanic rocks interlayers in the Gouli area of the Eastern Kunlun Orogenic Belt

英安斑岩: 岩石呈黄灰色, 斑状结构, 块状构造(图 3c)。岩石主要由基质和斑晶组成。基质可见石英、长石和隐晶质组成显微嵌晶结构。斑晶由斜长石、碱性长石和石英组成, 其中斜长石约为 3%, 粒度为 0.16～1.0 mm, 半自形–自形板条状、宽板状, 具平直且细密的聚片双晶; 碱性长石约为 2%, 粒度为 0.4～0.7 mm, 半自形宽板状, 可见正长石具有卡式双晶, 可见自形晶透长石, 裂纹发育; 石英约为 5%, 粒度为 0.2～0.6 mm, 呈次圆状, 多为单晶石英, 晶面较干净, 显微裂纹较发育, 较均匀分布(图 3d)。

流纹斑岩: 岩石呈黄灰色, 斑状结构, 块状构造(图 3e)。岩石主要由基质和斑晶组成。基质可见石英、长石和隐晶质, 相间定向排列。斑晶由斜长石、碱性长石和石英组成, 其中斜长石约为 2%, 粒度为 0.16～1.0 mm, 半自形–自形板条状、宽板状, 具平直且细密的聚片双晶; 碱性长石约为 8%, 粒度为 0.4～1.7 mm, 半自形宽板状, 可见正长石具有卡式双晶, 可见自形晶透长石, 裂纹发育; 石英约为 8%, 粒度为 0.2～2.6 mm, 呈次圆状, 多为单晶石英, 晶面较干净, 显微裂纹较发育, 较均匀分布。此外, 还发育少量(2%)的副矿物(黑色金属矿物(图 3f))。

3 样品采集和分析测试方法

3.1 锆石测年

本次研究采集 2 件样品英安岩和流纹岩(样品编号 DL-02 和 DL-05)进行锆石 U-Pb 测年分析。样品地理坐标为 N 35° 37′09.32″, E 98°29′00.74″。

锆石 U-Pb 同位素测年样品由西安喆奥雷地质科技有限公司进行锆石挑选、制靶和阴极发光照相。其中锆石挑选通过标准重矿物分离技术分选完成。全岩样品经破碎、淘洗和磁选后, 分离出锆石颗粒, 然后在双目镜下仔细挑选表面平整光洁且具不同长宽比例、不同柱锥面特征、不同颜色的锆石颗粒用于制靶, 并对其进行抛光, 直到样品露出一个光洁的平面。样品测定之前用酒精轻擦样品表面, 以除去可能的污染。锆石样品靶制作完成后, 进行阴极发光(CL)照相, 作为同位素分析时的选点依据。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年在南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)完成。分析采用的激光束能量为 10 J·cm^{-2}, 频率为 10 Hz, 束斑大小为 44 μm。元素分馏和质量相关分馏用标准锆石 91500 校正, 每 4 个锆石点分析一次标准锆石, 玻璃标样 NIST610 作为微量元素分析的校正参考, ^{29}Si 作为元素校正内标。原始数据用 LaDating 以及 LaTe-calc 两个宏文件处理, 普通 Pb 通过 Com-Pbcorr#3-18 校正(Andersen, 2002)。采用 Isoplot 3.0 程序(Ludwig, 2003)进行锆石加权平均年龄计算及和谐曲线绘制, 采用年龄为^{206}Pb/^{238}U 年龄, 其加权平均值的误差类型为 1σ, 置信度为 95% 以上。

3.2 岩石地球化学

本次研究采集 15 件岩石地球化学样品, 其中英安岩岩性 5 件(DL02-01～DL02-05)、流纹岩岩性 5 件(DL05-01～DL02-05)、玄武安山岩岩性 5 件(DL08-01～DL02-05)进行主、微量及稀土元素分析。用于岩石地球化学分析的样品地理坐标为 N 35° 37′09.32″, E 98°29′00.74″。

岩石地球化学样品在中国地质调查局西宁自然资源综合调查中心将新鲜样品粉碎至 200 目以下, 主

量元素、稀土元素和微量元素分析在西安地质矿产研究所实验测试中心完成。主量元素采用 X 荧光光谱(XRF)进行分析,分析精度优于 1%。稀土和微量元素利用 SX-2 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)进行测定,分析精度优于 10%。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年代学

本次对德龙地区洪水川组中的英安岩和流纹岩开展 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄测定(表 1)。

英安岩样品(样品 DL02)的锆石阴极发光(CL)照片显示(图 4a),内部结构大多较为清楚,发育明显的岩浆生长振荡环带结构,属于岩浆结晶产物(Siebel et al., 2005)。锆石呈柱状、近椭圆状,粒径为 100～250 μm,晶体长宽比为 1∶1～3∶1,30 个锆石测点的 U 含量为 5.48×10^{-6}～23.39×10^{-6},Th 含量为 0.33×10^{-6}～21.37×10^{-6};Th/U 值为 0.02～3.75,大多数大于 0.10(3 个比值小于 0.10;表 1),为典型的岩浆成因锆石(Corfu et al., 2003)。在锆石 U-Pb 谐和图上(图 5a),2 个锆石测点(DL02-02、DL02-17)谐和度较差,偏离了谐和曲线;其余 28 个点位于谐和线附近,第 1 组为(938±17)Ma 和(902±16)Ma(2 个数据点),为捕获锆石年龄;第 2 组年龄 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为 233～276 Ma,加权平均年龄为(248±4.5)Ma(MSWD=4.9)(26 个数据点;图 5b),代表了英安岩的成岩年龄。

流纹岩样品(样品 DL05)的锆石阴极发光(CL)照片显示(图 4b),内部结构大多较为清楚,可见细密的岩浆韵律环带。锆石多呈长柱状,长轴约为 70～150 μm,短轴约为 40～100 μm,晶体长宽比为 2∶1～3∶1;锆石的 U 含量为 $8.97\sim49.16\times10^{-6}$,Th 含量为 $0.39\sim45.40\times10^{-6}$;Th/U 值为 0.01～3.13,大多数大于 0.10(3 个比值小于 0.10;表 1),为典型的岩浆成因锆石(Corfu et al., 2003)。在锆石 U-Pb 谐和图上(图 5c),2 个锆石测点(DL05-02、DL05-20)谐和度较差,偏离了谐和曲线;其余 28 个点位于谐和线附近,谐和性较好,$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为 239～276 Ma,加权平均年龄为(250±2.1) Ma(MSWD=1.2)(图 5d),代表了流纹岩的成岩年龄。

结合区域资料成果,可确定德龙地区洪水川组中的火山岩夹层形成时代为早三叠世奥列尼奥克期。

4.2 岩石地球化学特征

4.2.1 主量元素

玄武安山岩样品中 SiO_2 含量为 51.82%～53.07%,平均为 52.18%,MgO 含量为 4.36%～4.63%,平均为 4.51%(表 2)。Al_2O_3 含量为 16.71%～16.95%,Na_2O 与 K_2O 含量分别为 2.67%～3.32% 和 1.22%～1.62%。TiO_2 含量为 1.07%～1.16%,平均为 1.10,明显低于洋岛玄武岩 TiO_2 值(＞2.0%)和洋中玄武岩 TiO_2 值(1.5%),而高于岛弧岩浆岩 TiO_2 值(0.83%, Pearce et al., 1979)。$Mg^{\#}$指数为 44.84～45.87,平均 45.51,明显低于原生岩浆范围($Mg^{\#}$=67～73, McKenzie et al., 1988),表明岩浆经历了结晶分异作用。在 TAS 图解中(图 6a),样品落入玄武岩–玄武安山岩的过渡区域,与 Nb/Y-Zr/

表 1 东昆仑东段沟里地区洪水川组火山岩夹层锆石 U-Pb LA-ICP-MS 同位素分析表

Tab. 1 Zircon U-Pb LA-ICP-MS isotope analysis for the volcanic rocks interlayers of Hongshuichuan Formation in the Gouli area of the Eastern Kunlun Orogenic Belt

样品号	元素含量(10^{-6})			同位素比值								同位素年龄(Ma)					
	Th	U	Th/U	Pb^{207}/Pb^{206}	1σ	Pb^{207}/U^{235}	1σ	Pb^{206}/U^{238}	1σ	Pb^{208}/Th^{232}	1σ	Pb^{207}/Pb^{206}	1σ	Pb^{207}/U^{235}	1σ	Pb^{206}/U^{238}	1σ
英安岩(样品DL02)																	
DL02-01	0.33	12.49	0.03	0.052 01	0.002 42	0.307 66	0.013 91	0.042 90	0.000 86	0.014 63	0.000 39	286	103	272	11	271	5
DL02-02	8.06	8.12	0.99	0.061 45	0.003 51	0.349 90	0.019 47	0.041 30	0.000 87	0.012 78	0.000 42	655	118	305	15	261	5
DL02-03	4.73	10.08	0.47	0.052 40	0.002 88	0.293 63	0.015 76	0.040 65	0.000 84	0.013 02	0.000 34	303	120	261	12	257	5
DL02-04	10.57	20.03	0.53	0.053 97	0.002 23	0.293 11	0.011 70	0.039 39	0.000 79	0.011 48	0.000 29	370	90	261	9	249	5
DL02-05	16.31	14.14	1.15	0.049 62	0.002 36	0.286 16	0.013 29	0.041 83	0.000 84	0.012 62	0.000 36	177	107	256	10	264	5
DL02-06	6.98	14.21	0.49	0.052 30	0.002 44	0.286 15	0.012 98	0.039 69	0.000 80	0.012 11	0.000 33	298	103	256	10	251	5
DL02-07	9.64	10.62	0.91	0.052 92	0.002 83	0.284 32	0.014 81	0.038 97	0.000 81	0.012 36	0.000 36	325	117	254	12	246	5
DL02-08	6.86	6.00	1.14	0.069 56	0.002 40	1.502 38	0.049 83	0.156 65	0.003 09	0.045 92	0.001 07	916	69	931	20	938	17
DL02-09	6.42	13.23	0.49	0.050 86	0.002 58	0.277 74	0.013 76	0.039 61	0.000 80	0.012 07	0.000 32	235	113	249	11	250	5
DL02-10	10.26	8.26	1.24	0.050 79	0.003 40	0.277 06	0.018 20	0.039 57	0.000 85	0.012 16	0.000 37	231	147	248	14	250	5
DL02-11	0.36	23.39	0.02	0.069 90	0.001 81	1.447 98	0.035 51	0.150 26	0.002 85	0.044 04	0.001 30	925	52	909	15	902	16

续表 1

样品号	元素含量(10^{-6})			同位素比值								同位素年龄(Ma)					
	Th	U	Th/U	Pb^{207}/Pb^{206}	1σ	Pb^{207}/U^{235}	1σ	Pb^{206}/U^{238}	1σ	Pb^{208}/Th^{232}	1σ	Pb^{207}/Pb^{206}	1σ	Pb^{207}/U^{235}	1σ	Pb^{206}/U^{238}	1σ
DL02-12	2.06	12.31	0.17	0.050 45	0.002 64	0.273 95	0.014 03	0.039 38	0.000 80	0.012 21	0.000 35	216	117	246	11	249	5
DL02-13	7.87	12.27	0.64	0.053 00	0.002 69	0.278 78	0.013 79	0.038 15	0.000 78	0.011 38	0.000 27	329	111	250	11	241	5
DL02-14	21.37	22.45	0.95	0.052 45	0.002 07	0.265 64	0.010 12	0.036 73	0.000 73	0.011 39	0.000 27	305	87	239	8	233	5
DL02-15	20.57	5.48	3.75	0.053 90	0.004 41	0.289 70	0.023 32	0.038 98	0.000 88	0.012 84	0.000 42	367	174	258	18	247	5
DL02-16	4.97	17.69	0.28	0.053 18	0.002 32	0.272 98	0.011 58	0.037 23	0.000 75	0.011 70	0.000 30	337	96	245	9	236	5
DL02-17	15.00	6.71	2.24	0.060 28	0.004 42	0.312 44	0.022 47	0.037 60	0.000 84	0.014 84	0.000 51	614	151	276	17	238	5
DL02-18	3.83	9.18	0.42	0.051 44	0.003 29	0.265 49	0.016 65	0.037 44	0.000 79	0.010 84	0.000 39	261	141	239	13	237	5
DL02-19	4.71	20.58	0.23	0.052 61	0.002 12	0.272 44	0.010 63	0.037 56	0.000 75	0.011 86	0.000 32	312	89	245	8	238	5
DL02-20	9.96	16.10	0.62	0.052 54	0.002 38	0.267 77	0.011 78	0.036 96	0.000 74	0.011 39	0.000 29	309	100	241	9	234	5
DL02-21	0.37	14.87	0.02	0.050 17	0.002 47	0.261 78	0.012 58	0.037 85	0.000 77	0.011 51	0.000 34	203	111	236	10	240	5
DL02-22	7.49	5.70	1.31	0.054 84	0.004 39	0.288 52	0.022 73	0.038 16	0.000 87	0.013 11	0.000 41	406	170	257	18	241	5
DL02-23	5.63	15.33	0.37	0.051 03	0.002 76	0.270 49	0.014 27	0.038 45	0.000 80	0.013 34	0.000 40	242	120	243	11	243	5
DL02-24	8.30	17.98	0.46	0.051 83	0.002 22	0.275 72	0.011 48	0.038 58	0.000 77	0.012 01	0.000 30	278	95	247	9	244	5
DL02-25	15.32	17.13	0.89	0.055 42	0.002 39	0.317 83	0.013 32	0.041 60	0.000 83	0.013 60	0.000 35	429	94	280	10	263	5
DL02-26	12.94	14.62	0.89	0.049 80	0.002 41	0.300 43	0.014 15	0.043 75	0.000 89	0.015 53	0.000 40	186	109	267	11	276	5
DL02-27	10.25	13.36	0.77	0.050 13	0.002 61	0.282 58	0.014 38	0.040 88	0.000 84	0.014 18	0.000 46	201	117	253	11	258	5
DL02-28	5.20	20.48	0.25	0.051 80	0.002 16	0.293 12	0.011 84	0.041 04	0.000 82	0.013 28	0.000 38	277	92	261	9	259	5
DL02-29	8.56	9.06	0.94	0.054 51	0.003 44	0.301 95	0.018 70	0.040 18	0.000 86	0.013 39	0.000 37	392	136	268	15	254	5
DL02-30	9.56	14.95	0.64	0.051 07	0.002 52	0.276 33	0.013 31	0.039 24	0.000 80	0.013 62	0.000 36	244	110	248	11	248	5
流纹岩中(样品 DL05)																	
DL05-01	0.39	22.68	0.02	0.051 31	0.002 12	0.286 45	0.011 48	0.040 49	0.000 80	0.008 73	0.000 26	255	92	256	9	256	5
DL05-02	12.06	34.78	0.35	0.074 27	0.002 28	0.466 41	0.013 67	0.045 55	0.000 89	0.014 96	0.000 33	1 049	61	389	9	287	5
DL05-03	45.40	14.51	3.13	0.052 09	0.002 62	0.314 21	0.015 44	0.043 75	0.000 90	0.010 41	0.000 31	289	111	277	12	276	6
DL05-04	10.23	20.56	0.50	0.053 63	0.002 38	0.295 72	0.012 73	0.039 99	0.000 80	0.013 26	0.000 33	356	97	263	10	253	5
DL05-05	18.42	16.50	1.12	0.052 41	0.002 54	0.297 21	0.014 03	0.041 13	0.000 84	0.012 94	0.000 39	304	107	264	11	260	5
DL05-06	7.67	45.53	0.17	0.051 55	0.001 66	0.278 69	0.008 63	0.039 21	0.000 76	0.012 39	0.000 30	266	72	250	7	248	5
DL05-07	20.15	35.42	0.57	0.051 99	0.001 81	0.288 97	0.009 68	0.040 31	0.000 79	0.012 45	0.000 32	285	77	258	8	255	5
DL05-08	14.86	33.23	0.45	0.051 34	0.001 86	0.274 04	0.009 59	0.038 72	0.000 76	0.012 66	0.000 33	256	81	246	8	245	5
DL05-09	14.39	39.80	0.36	0.051 93	0.001 74	0.287 20	0.009 27	0.040 11	0.000 78	0.012 93	0.000 32	282	75	256	7	254	5
DL05-10	18.77	43.06	0.44	0.054 12	0.001 78	0.293 61	0.009 26	0.039 35	0.000 76	0.012 10	0.000 29	376	72	261	7	249	5
DL05-11	0.40	39.22	0.01	0.050 00	0.001 67	0.285 50	0.009 18	0.041 42	0.000 80	0.013 91	0.000 33	195	76	255	7	262	5
DL05-12	21.02	19.03	1.10	0.050 33	0.002 37	0.282 05	0.012 93	0.040 65	0.000 82	0.013 38	0.000 39	210	105	252	10	257	5
DL05-13	8.50	38.06	0.22	0.051 48	0.001 79	0.281 80	0.009 43	0.039 71	0.000 78	0.012 30	0.000 29	262	78	252	7	251	5
DL05-14	31.51	36.91	0.85	0.050 72	0.001 82	0.277 93	0.009 64	0.039 75	0.000 78	0.012 75	0.000 34	228	81	249	8	251	5
DL05-15	15.38	30.00	0.51	0.051 77	0.001 94	0.285 39	0.010 37	0.039 99	0.000 79	0.012 70	0.000 32	275	84	255	8	253	5
DL05-16	18.87	30.94	0.61	0.052 92	0.001 97	0.286 96	0.010 31	0.039 33	0.000 77	0.013 09	0.000 35	325	82	256	8	249	5
DL05-17	12.45	19.04	0.65	0.051 86	0.002 39	0.279 65	0.012 56	0.039 11	0.000 79	0.012 59	0.000 34	279	102	250	10	247	5
DL05-18	12.28	32.70	0.38	0.050 19	0.001 87	0.271 76	0.009 79	0.039 28	0.000 77	0.011 95	0.000 28	204	84	244	8	248	5
DL05-19	29.46	21.23	1.39	0.051 33	0.002 33	0.285 90	0.012 64	0.040 40	0.000 82	0.013 52	0.000 36	256	101	255	10	255	5
DL05-20	12.29	26.40	0.47	0.058 33	0.002 32	0.306 97	0.011 81	0.038 17	0.000 76	0.010 85	0.000 25	542	85	272	9	242	5
DL05-21	0.41	49.16	0.01	0.050 99	0.001 62	0.283 01	0.008 62	0.040 26	0.000 78	0.012 57	0.000 30	240	71	253	7	254	5
DL05-22	26.06	40.55	0.64	0.056 09	0.001 88	0.303 19	0.009 76	0.039 21	0.000 77	0.012 47	0.000 29	455	73	269	8	248	5
DL05-23	36.44	27.10	1.34	0.052 81	0.002 15	0.287 78	0.011 40	0.039 53	0.000 79	0.012 50	0.000 34	321	90	257	9	250	5
DL05-24	13.42	45.65	0.29	0.050 23	0.001 70	0.273 42	0.008 92	0.039 48	0.000 77	0.012 38	0.000 31	206	77	245	7	250	5
DL05-25	21.74	8.97	2.42	0.048 89	0.003 90	0.258 85	0.020 37	0.038 41	0.000 85	0.011 71	0.000 48	142	177	234	16	243	5
DL05-26	4.62	45.43	0.10	0.051 40	0.001 70	0.270 85	0.008 61	0.038 22	0.000 74	0.012 04	0.000 30	259	74	243	7	242	5
DL05-27	22.90	23.88	0.96	0.052 04	0.002 26	0.273 81	0.011 55	0.038 16	0.000 77	0.012 02	0.000 37	287	96	246	9	241	5
DL05-28	9.00	25.04	0.36	0.053 87	0.002 26	0.280 88	0.011 45	0.037 82	0.000 76	0.012 11	0.000 32	365	92	251	9	239	5
DL05-29	17.50	15.18	1.15	0.050 37	0.002 84	0.278 47	0.015 40	0.040 10	0.000 83	0.011 94	0.000 34	212	126	249	12	254	5
DL05-30	11.53	42.50	0.27	0.053 02	0.001 83	0.287 61	0.009 57	0.039 35	0.000 77	0.012 70	0.000 33	329	76	257	8	249	5

TiO_2×0.000 1 图解中(图 6b)的结果一致; 在 SiO_2-K_2O 图解中(图 6c), 样品落入钙碱–高钾钙碱性系列区域; 在 AR-SiO_2 图解中(图 6d), 样品落入钙碱性系列区域, 与火山岩 AFM 图解的结果一致(图 6e), 属于钙碱性玄武岩系列。

英安岩样品 SiO_2 含量为 68.70%～76.13%, TiO_2 含量为 0.22%～0.35%, MgO 含量为 0.97%～1.89%, Al_2O_3 含量为 10.86%～13.35%, Na_2O 与 K_2O 含量分别为 2.66～5.38% 和 0.34%～2.88%; 碱度率(AR)为 1.92～2.65, Al_2O_3 大于 CaO+Na_2O+K_2O, 属硅、铝过饱和类型; 全碱(Na_2O+K_2O)含量为4.48%～5.72%;K_2O/Na_2O 值0.06～1.03, 铝指数 A/CNK 值为 0.77～1.12, 里特曼指数 σ 值为 0.69～1.17, 属钙碱性岩类(表 2)。在 TAS 图解中(图 6a), 样品落入英安岩区域, 与 Nb/Y-Zr/TiO_2×0.000 1 图解中(图 6b)的结果一致; 在 SiO_2-K_2O 图解(图 6c)和 AR-SiO_2 图解中(图 6d)中, 样品除 DL02-1 之外全部落入钙碱性系列区域, 与火山岩 AFM 图解的结果一致(图 6e); 在 A/CNK-A/NK 图解(图 6f)中, 样品落

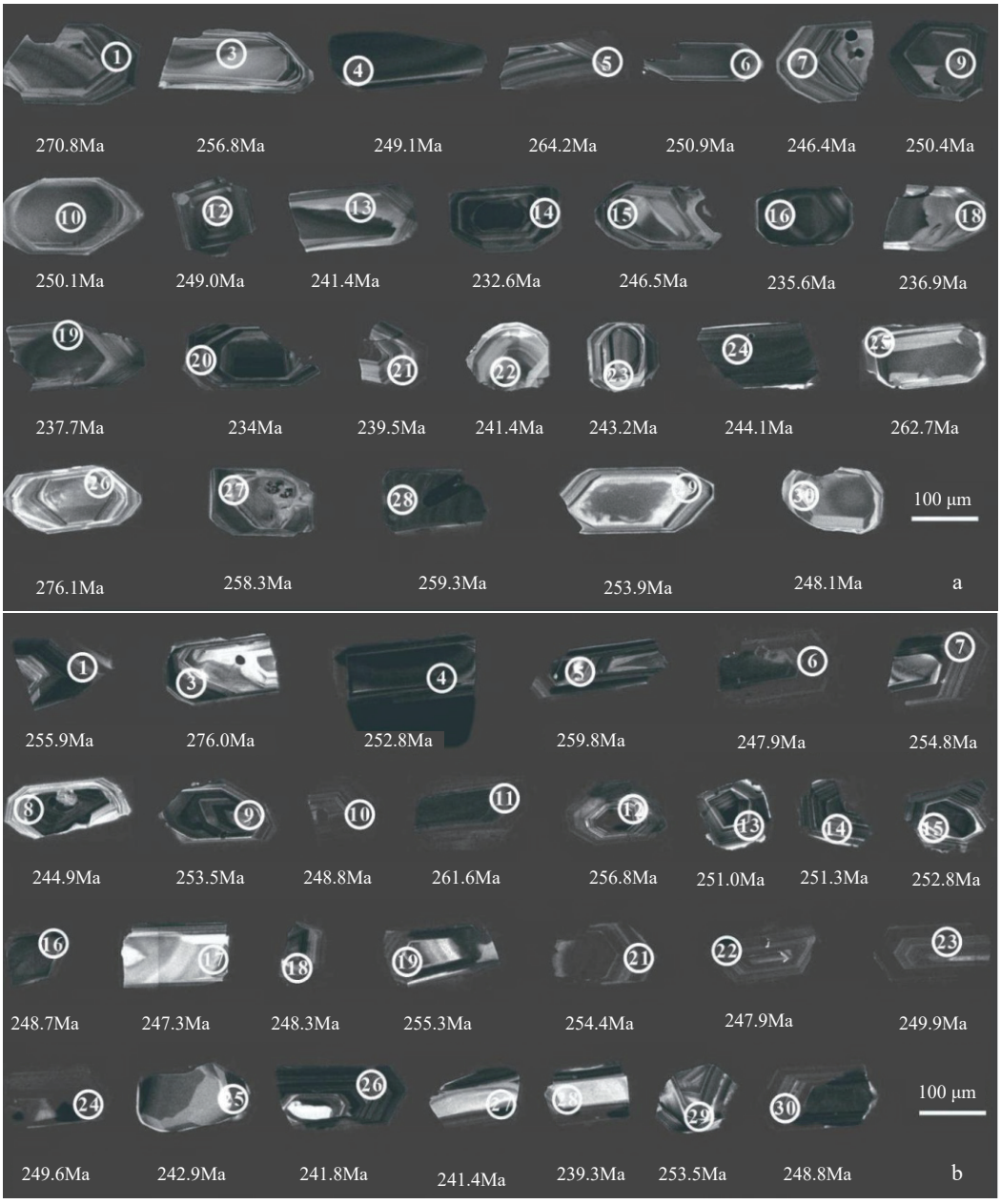


图4 东昆仑东段沟里地区德龙洪水川组火山岩锆石 CL 图像、测点位置及年龄图

Fig. 4 Zircon CL images, analysis point locations, and age plots of the Delong Hongshuichuan formation volcanic rocks interlayers in the Gouli area of the Eastern Kunlun Orogenic Belt

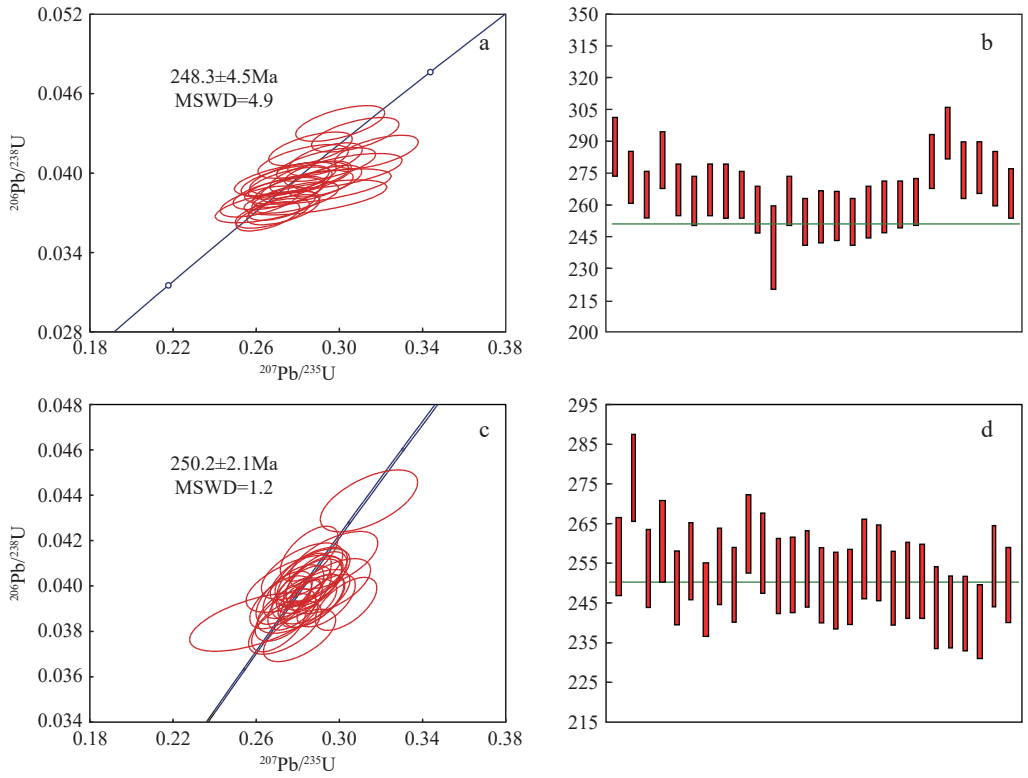


图5　东昆仑东段沟里地区德龙洪水川组火山岩锆石 U-Pb 谐和图和加权平均年龄图

Fig. 5　Zircon U-Pb concordia diagrams and weighted average age plots for the volcanic rocks interlayers of Delong Hongshuichuan Formation in the Gouli area of the Eastern Kunlun Orogenic Belt

入准铝–过铝质区域。需要注意的是样品中 DL02-1 具有较高的 SiO_2, 但很低的 K_2O 以及 Li、Be、Rb、Cs, 可能指示该样品存在一定的后期流体改造。综上所述, 德龙地区洪水川组中的英安岩主量元素显示出准铝–富铝、钙碱性的中性岩特征。

流纹岩样品 SiO_2 含量(75.66%～79.53%)较高, TiO_2 含量为 0.04%～0.06%, MgO 含量为 0.49%～0.60%, Al_2O_3 含量为 9.90%～12.52%, Na_2O 与 K_2O 含量分别为 1.11%～1.41% 和 3.11%～3.87%, 碱度率(AR)为 2.10～2.23, Al_2O_3 大于 $CaO+Na_2O+K_2O$, 属硅、铝过饱和类型; 全碱(Na_2O+K_2O)含量为 4.22%～5.28%, K_2O/Na_2O 值为 2.58～2.80, 铝指数 A/CNK 值为 1.05～1.24, 里特曼指数 σ 值为 0.49～0.85, 属钙碱性岩类(表 2)。在 TAS 图解中(图 6a), 样品均落入流纹岩区域, 与 Nb/Y-$Zr/TiO_2\times0.000\,1$ 图解中(图 6b)的结果一致; 在 SiO_2-K_2O 图解(图 6c)中, 样品投点落入钙碱性–高钾钙碱性系列区域; 在 AR-SiO_2 图解中(图 6d), 样品投点落入钙碱性系列区域, 与火山岩 AFM 图解的结果一致(图 6e); 在 A/CNK-A/NK 图解(图 6f)中, 样品落入过铝质区域。综上所述, 德龙地区洪水川组中的流纹岩

表 2　东昆仑东段沟里地区德龙洪水川组火山岩主量元素(%)和微量、稀土元素(10^{-6})元素分析结果

Tab. 2　Major element (%) and trace and rare earth element (10^{-6}) analysis results for the volcanic rocks interlayers of Hongshuichuan Formation in the Gouli area of the Eastern Kunlun Orogenic Belt

岩性	流纹岩					英安岩					玄武安山岩				
样品代号	DL05-1	DL05-2	DL05-3	DL05-4	DL05-5	DL02-1	DL02-2	DL02-3	DL02-4	DL02-5	DL08-1	DL08-2	DL08-3	DL08-4	DL08-5
SiO_2	75.66	79.53	76.10	78.36	76.57	76.13	70.85	71.94	68.70	69.91	53.07	51.83	52.27	51.82	51.93
Al_2O_3	12.52	9.90	11.45	11.00	11.77	11.01	13.34	10.86	13.35	11.50	16.76	16.95	16.71	16.85	16.80
FeO	0.45	0.25	0.30	0.30	0.25	1.40	1.65	2.08	2.75	2.05	7.88	7.75	7.35	7.15	7.50
CaO	1.99	2.01	2.54	1.66	1.82	1.64	2.30	3.37	2.38	3.93	6.98	7.77	7.55	7.70	7.62
MgO	0.60	0.49	0.55	0.51	0.55	0.97	1.36	1.68	1.89	1.42	4.36	4.63	4.54	4.51	4.52
K_2O	3.87	3.11	3.64	3.50	3.69	0.34	2.88	1.82	2.16	1.32	1.22	1.42	1.62	1.52	1.33
Na_2O	1.41	1.11	1.41	1.31	1.36	5.38	2.78	2.66	3.33	3.82	3.32	2.67	2.77	2.76	2.94
TiO_2	0.06	0.04	0.06	0.05	0.05	0.26	0.22	0.25	0.35	0.28	1.16	1.07	1.08	1.10	1.10

续表 2

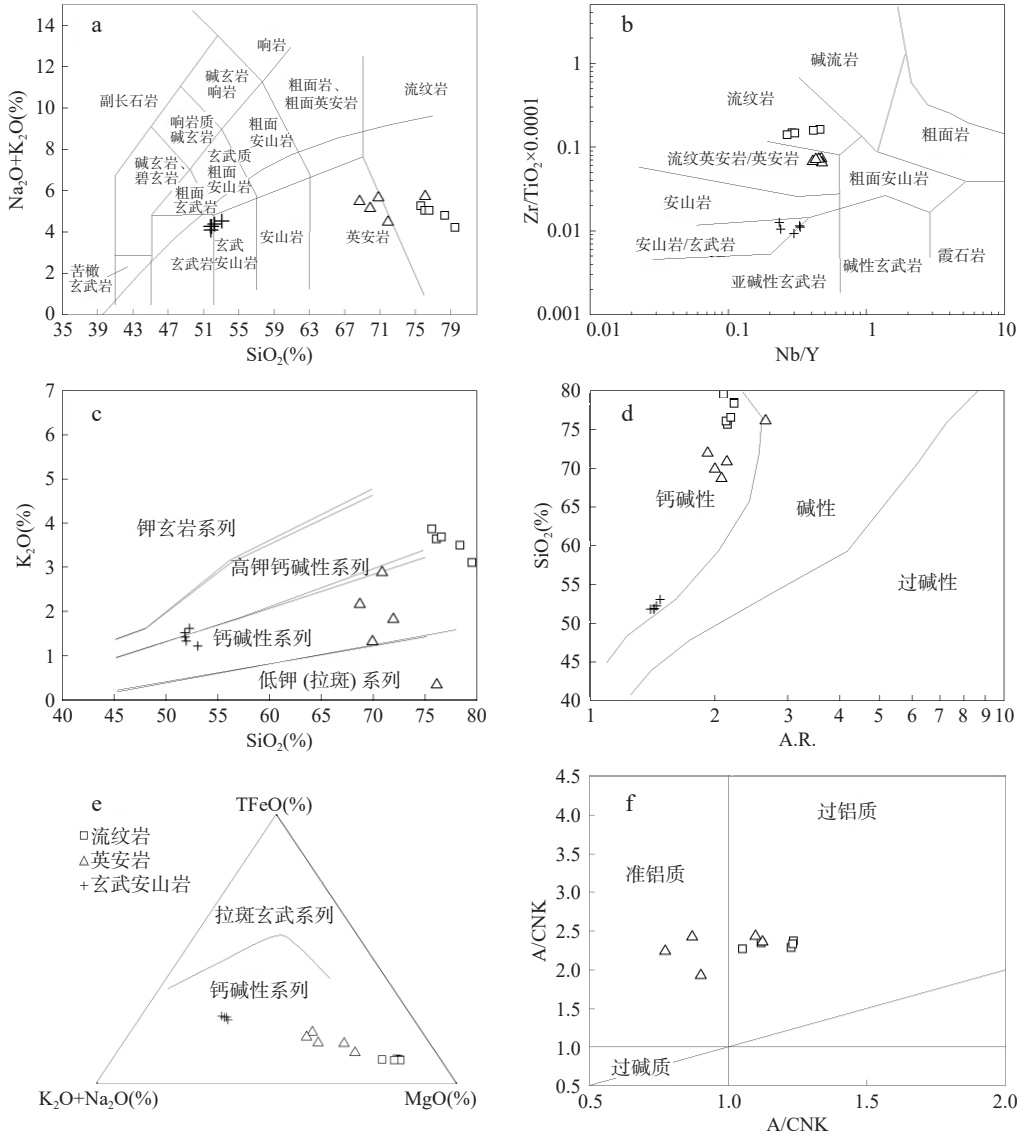
岩性	流纹岩					英安岩					玄武安山岩				
样品代号	DL05-1	DL05-2	DL05-3	DL05-4	DL05-5	DL02-1	DL02-2	DL02-3	DL02-4	DL02-5	DL08-1	DL08-2	DL08-3	DL08-4	DL08-5
P_2O_5	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.05	0.06	0.09	0.07	0.22	0.19	0.19	0.19	0.19
MnO	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.05	0.06	0.09	0.07	0.09	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
LOI	2.92	2.69	3.34	2.72	3.14	2.08	3.78	4.41	3.84	4.53	2.82	3.16	3.11	3.28	3.33
H_2O^+	0.94	1.02	1.42	1.32	1.10	0.86	1.78	1.67	1.96	1.90	2.00	1.92	2.14	2.20	2.24
TFe_2O_3	0.89	1.02	0.80	0.75	0.93	2.17	2.45	3.02	4.07	3.27	10.62	10.85	10.61	10.70	10.70
Fe_2O_3	0.39	0.74	0.47	0.42	0.65	0.61	0.62	0.71	1.01	0.99	1.87	2.24	2.44	2.76	2.37
TFeO	0.80	0.92	0.72	0.67	0.84	1.95	2.21	2.72	3.66	2.94	9.56	9.77	9.55	9.63	9.63
Total	100.47	100.20	100.86	100.78	100.35	100.18	101.05	100.89	100.86	100.82	99.94	99.51	99.48	99.23	99.65
Mg#	57.18	48.76	57.66	57.39	53.95	46.96	52.37	52.42	47.91	46.24	44.84	45.80	45.87	45.50	45.55
A/CNK	1.24	1.12	1.05	1.23	1.23	0.90	1.12	0.87	1.10	0.77	0.86	0.85	0.83	0.83	0.83
SI	8.93	8.59	8.64	8.45	8.46	11.14	14.64	18.77	16.96	14.79	23.38	24.75	24.25	24.12	24.23
AR	2.14	2.10	2.13	2.23	2.18	2.65	2.13	1.92	2.07	2.00	1.47	1.40	1.44	1.42	1.42
σ	0.85	0.49	0.77	0.65	0.76	0.99	1.15	0.69	1.17	0.98	2.05	1.89	2.08	2.08	2.04
A/MF	4.72	3.89	4.74	4.89	4.56	2.11	2.03	1.34	1.34	1.48	0.68	0.66	0.67	0.67	0.67
C/MF	1.36	1.44	1.91	1.34	1.28	0.57	0.64	0.76	0.43	0.92	0.52	0.55	0.55	0.56	0.55
La	25.60	17.70	23.00	20.90	25.30	34.10	41.30	39.80	52.30	45.80	32.00	33.30	31.70	34.60	32.70
Ce	49.00	33.40	45.70	38.80	49.00	64.30	74.90	73.40	99.50	86.00	68.50	72.40	70.50	73.20	70.20
Pr	4.48	3.01	4.17	3.50	4.31	7.26	8.38	8.14	11.00	9.79	8.64	8.91	8.89	9.57	9.03
Nd	17.60	12.00	16.20	14.20	17.00	23.10	25.50	26.20	43.30	29.90	29.90	29.70	29.70	32.40	30.60
Sm	4.17	2.89	4.24	3.51	4.15	4.93	5.36	5.53	7.17	5.93	6.56	6.92	6.35	7.00	6.68
Eu	0.69	0.49	0.75	0.51	0.64	0.95	1.08	1.26	1.34	1.43	1.61	1.77	1.77	1.81	1.75
Gd	4.45	3.16	4.29	3.72	4.22	4.67	5.27	5.76	6.92	5.82	6.46	6.70	6.59	7.00	7.00
Tb	0.74	0.55	0.76	0.63	0.73	0.75	0.86	0.92	1.01	0.93	1.04	1.06	1.05	1.12	1.12
Dy	4.57	3.40	4.82	4.01	4.58	4.50	5.03	5.25	5.85	5.09	6.20	6.00	6.40	6.67	6.56
Ho	0.94	0.70	1.01	0.85	0.93	0.94	1.00	1.06	1.19	1.02	1.28	1.31	1.32	1.41	1.38
Er	2.82	2.07	2.94	2.58	2.86	2.88	2.88	2.97	3.52	2.97	3.68	3.70	3.74	3.91	3.88
Tm	0.49	0.35	0.50	0.43	0.46	0.47	0.46	0.48	0.59	0.48	0.57	0.59	0.60	0.61	0.63
Yb	2.99	2.31	3.19	2.74	3.10	2.95	3.01	2.95	3.62	3.01	3.56	3.71	3.67	3.84	3.76
Lu	0.50	0.38	0.54	0.45	0.53	0.48	0.48	0.48	0.56	0.48	0.56	0.58	0.58	0.61	0.57
Y	26.50	20.50	29.20	23.80	27.20	26.30	27.10	29.00	31.50	29.10	34.20	34.70	35.60	37.20	35.70
ΣREE	119.04	82.41	112.11	96.83	117.81	152.28	175.51	174.20	237.87	198.65	170.56	176.65	172.86	183.75	175.86
LREE	101.54	69.49	94.06	81.42	100.40	134.64	156.52	154.33	214.61	178.85	147.21	153.00	148.91	158.58	150.96
HREE	17.50	12.92	18.05	15.41	17.41	17.64	18.99	19.87	23.26	19.80	23.35	23.65	23.95	25.17	24.90
LREE/HREE	5.80	5.38	5.21	5.28	5.77	7.63	8.24	7.77	9.23	9.03	6.30	6.47	6.22	6.30	6.06
$(La/Yb)_N$	6.14	5.50	5.17	5.47	5.85	8.29	9.84	9.68	10.36	10.91	6.45	6.44	6.20	6.46	6.24
δEu	0.49	0.50	0.54	0.43	0.47	0.61	0.62	0.68	0.58	0.74	0.76	0.79	0.84	0.79	0.78
Pb	8.16	7.11	4.48	5.88	4.81	54.40	24.50	9.82	26.60	34.20	8.46	8.05	7.95	8.18	7.98
Cr	5.25	4.77	5.56	5.23	5.62	7.36	17.60	9.10	6.79	6.02	36.00	36.30	35.80	37.10	34.40
Ni	0.94	0.71	0.93	0.67	1.05	0.94	4.55	2.64	1.06	1.06	4.62	3.98	3.86	3.88	3.93
Co	0.77	0.62	0.54	0.41	0.60	0.92	2.10	1.84	7.10	5.78	28.70	29.70	27.20	28.40	29.20
Li	4.03	3.00	3.58	3.55	3.87	3.30	8.41	8.44	9.72	7.47	4.84	5.42	5.28	5.53	5.08
Rb	142.00	107.00	135.00	132.00	135.00	13.80	112.00	76.40	87.30	56.50	34.40	40.20	42.30	42.70	36.10
Cs	0.68	0.51	0.59	0.57	0.63	0.16	0.90	0.52	0.55	0.33	0.24	0.27	0.27	0.30	0.24
Sr	76.00	66.40	93.90	67.40	71.40	143.00	134.00	140.00	117.00	175.00	318.00	330.00	333.00	359.00	329.00
Ba	946.00	748.00	982.00	921.00	964.00	150.00	750.00	458.00	488.00	323.00	919.00	1 080.00	1 110.00	1 170.00	1 010.00
V	4.54	2.98	3.57	3.15	3.36	2.01	20.30	15.00	8.74	5.97	167.00	180.00	173.00	177.00	173.00
Sc	3.86	2.38	3.05	2.84	3.35	12.00	6.54	7.70	8.90	7.56	36.20	36.10	35.50	36.30	34.60
Nb	12.20	5.92	7.80	7.21	11.20	12.40	12.90	11.80	14.20	12.50	10.20	11.50	8.48	8.69	11.70
Ta	1.41	0.99	1.21	1.13	1.28	0.98	1.20	1.02	1.15	0.94	0.68	0.62	0.70	0.65	0.62
Zr	101.00	62.10	78.40	79.20	85.20	189.00	143.00	169.00	252.00	200.00	108.00	119.00	114.00	139.00	127.00
Hf	3.39	2.30	2.91	2.82	3.07	4.72	4.10	4.32	6.36	4.78	3.25	3.55	3.31	3.96	3.69
Be	2.08	1.61	1.95	1.91	2.14	0.91	2.81	1.83	2.01	1.50	1.18	1.26	1.20	1.30	1.23
Ga	15.20	11.30	13.50	13.00	15.10	9.09	15.20	13.20	15.60	11.70	19.80	21.10	19.00	20.40	19.50
Ge	1.27	1.14	1.27	1.24	1.34	1.32	1.48	1.56	1.52	1.43	1.53	1.62	1.55	1.67	1.57
U	2.89	2.16	2.95	2.41	2.81	2.50	2.72	2.26	2.61	2.33	0.70	0.70	0.72	0.72	0.74
Th	17.60	12.80	16.60	14.90	18.00	11.80	16.90	13.10	14.90	12.60	4.80	4.49	4.49	4.48	4.59

主量元素显示出高硅、富铝、钙碱性的酸性岩特征。

4.2.2 稀土元素和微量元素

玄武安山岩 ΣREE 值为 170.56×10^{-6}～183.75×10^{-6}, 平均为 175.93×10^{-6}; LREE/HREE 和 $(La/Yb)_N$ 值分别为 6.06～6.47 和 6.20～6.46, 平均为 6.27 和 6.35; δEu 值为 0.76～0.84, 平均为 0.79(表 2)。英安岩 ΣREE 值为 152.28×10^{-6}～238.87×10^{-6}, 平均为 187.70×10^{-6}; LREE/HREE 和 $(La/Yb)_N$ 值分别为 7.63～9.23 和 8.29～10.91, 平均为 8.38 和 9.82; δEu 值为 0.58～0.74, 平均为 0.65(表 2)。流纹岩 ΣREE 值为 82.41×10^{-6}～119.04×10^{-6}, 平均为 105.64×10^{-6}; LREE/HREE 和 $(La/Yb)_N$ 值分别为 5.21～5.80 和 5.17～6.14, 平均为 5.49 和 5.63; δEu 值为 0.43～0.54, 平均为 0.48(表 2)。在稀土元素球粒陨石标准化分布型式图中(图 7a), 所有样品均呈现轻稀土富集, 中重稀土分异不明显, Eu 负异常的特征。

在不相容元素原始地幔标准化蛛网图上(图 7b), 德龙地区洪水川组中的玄武安山岩、英安岩和流纹岩各岩石类型表现出相似的变化趋势, 但元素富集和亏



a. TAS 判别图解(底图据 Peccerillo et al., 1976; 分界线据 Middlemost, 1994); b. Nb/Y-Zr/TiO_2×0.0001 图解(据 Winchester et al., 1977); c. SiO_2-K_2O 图解(实线据 Peccerillo et al., 1976; 虚线据 Middlemost, 1985); d. AR-SiO_2 图解(据 Wright, 1969); e. 火山岩 AFM 图解; f. A/CNK-A/NK 图解(据 Maniar et al., 1989)

图6 东昆仑东段沟里地区德龙洪水川组火山岩岩石类别及性质判别图解

Fig. 6 Diagram for distinguishing the rock types and properties for thevolcanic rocks interlayers of Delong Hongshuichuan Formation in the Gouli area of the Eastern Kunlun Orogenic Belt

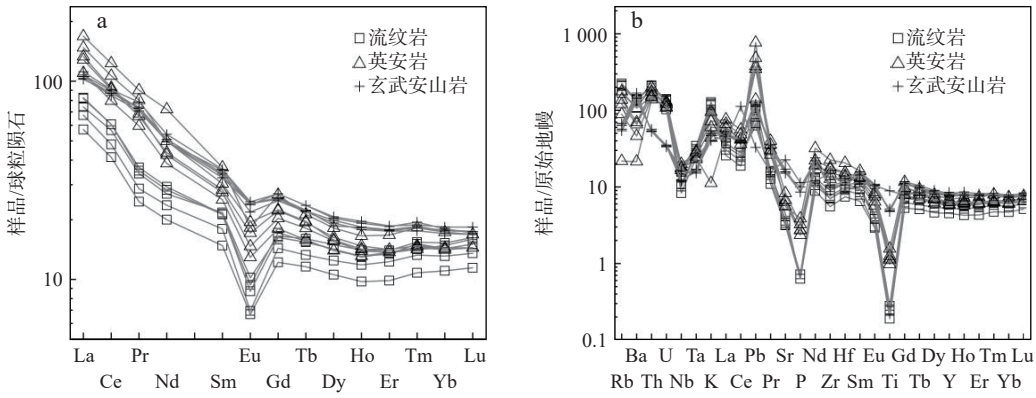


图7 东昆仑东段沟里地区德龙洪水川组稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(a;球粒陨石标准化数据值引自 Boynton，1984)和火山岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(b;标准化值据 Sun et al.，1989)

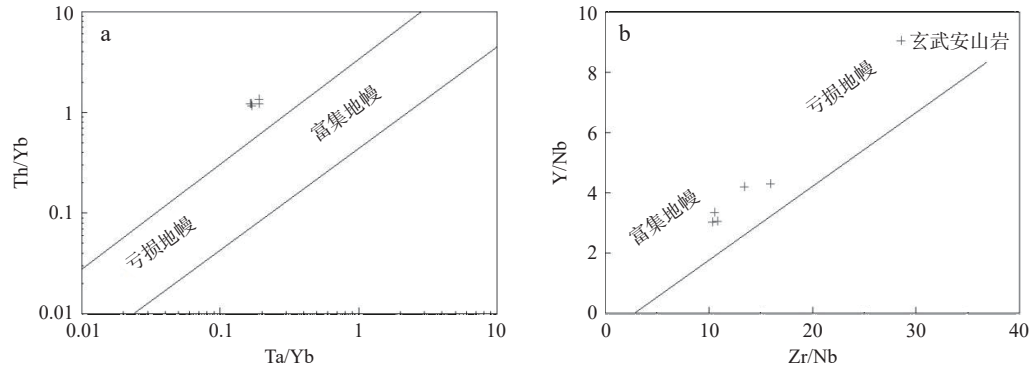
Fig. 7 (a) Chondrite-normalized rare earth element distribution pattern, and (b) primitive mantle-normalized spider diagram of trace elements for the volcanic rocks interlayers of Delong Hongshuichuan Formation in the Gouli area of the Eastern Kunlun Orogenic Belt

损程度略有差异。总体呈现出 Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素(LILE)富集, Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素(HFSE)亏损, Zr 和 Hf 无明显异常的特点。这与东昆仑地区弧花岗岩具有相同微量元素配分型式, 表现出与俯冲带相关的弧岩浆岩特征。

5 讨论

5.1 岩石成因

玄武岩起源于地幔橄榄岩的部分熔融, 经历了结晶分异、同化混染作用的残余岩浆形成(O'Hara, 1965)。洪水川组玄武安山岩的 Ba/Th、Th/Ta 和 Th/Nb 值较高, 分别为 191.46～261.16、6.41～7.40 和 0.39～0.53, 表明岩浆来自受俯冲流体交代的地幔源区(Devine, 1995)。MgO 含量为 4.36%～4.63%, 平均为 4.51%; $Mg^{\#}$值为 44.84～45.87, 平均为 45.51, 均小于地幔源区产生的玄武质初始岩浆 MgO 含量(MgO＞8%)和 $Mg^{\#}$值(67～73)(McKenzie et al., 1988), 暗示岩浆演化过程中发生了结晶分异和不同程度的同化混染作用。深部地幔的岩浆具有较低的 La/Ta(8～15)值, La/Sm 值几乎不变; 在受到地壳物质混染后, La/Ta 值迅速上升(＞25), La/Sm 值迅速增大到 5 以上(于小亮等, 2017); 玄武安山岩 La/Ta 值为 47.06～53.71, 平均为 50.41, 明显高于 25; La/Sm 值为 4.81～4.99, 变化稳定且接近于 5, 表明岩浆演化过程中受到了不同程度的同化混染作用。Nb、Zr、Y 微量元素的不活动性, 不受交代、蚀变或风化的影响, 代表源区地幔的成分。在 Zr/Nb-Y/Nb 和 Ta/Yb-Th/Yb 图解中(图 8a、图 8b),



a. Ta/Yb-Th/Yb 图解； b. Zr/Nb-Y/Nb 图解(据 Wilson, 1989)

图8 东昆仑东段沟里地区德龙洪水川组火山岩地幔源区判别图

Fig. 8 Mantle source region discrimination diagram for the volcanic rocks interlayers of Delong Hongshuichuan Formation in the Gouli area of the Eastern Kunlun Orogenic Belt

样品靠近富集地幔一侧, 说明原始地幔受到俯冲板块流体交代或是地壳混染。因此, 洪水川组玄武安山岩来自于受俯冲流体交代的地幔源区岩浆, 经历后期结晶分异和地壳物质混染。

德龙地区洪水川组中的火山岩微量元素配分型式表现出与俯冲带相关的弧岩浆岩特征。目前, 俯冲带相关的弧岩浆可能有① 俯冲板片部分熔融形成的熔体; ② 俯冲带上覆的地幔楔中的橄榄岩; ③ 俯冲带流体; ④ 大陆地壳物质(包括洋底沉积物)的同化混染; ⑤ 地幔楔上覆的陆壳或洋壳(Wyllie, 1984; Macdonald et al., 2000; 邓晋福等, 2015)5 种来源。Nb、Ta 均属高场强元素, 在各种地质作用过程中具有相似的地球化学行为, Nb/Ta 值在岩浆体系中基本保持恒定, 因此成为判别岩浆源区的重要地球化学指标之一(Hofmann, 1988; Green, 1995; Weyer et al., 2003)。洪水川组英安岩样品 Nb 平均含量为 12.76×10^{-6}, Ta 平均含量为 1.06×10^{-6}, Nb/Ta 值平均为 12.12, 接近于大陆地壳 Nb/Ta 值(11.0～12.3)(Taylor et al., 1985; Rudnick et al., 2000), 说明英安岩是地壳熔融的产物。样品中较高的 $Mg^{\#}$值(46.24～52.42), 高于地壳熔融形成的岩浆 $Mg^{\#}$值(＜45), 可能进一步指示了其是幔源岩浆上涌诱发的地壳熔融产物(Rapp et al., 1995)。此外, 样品中的 Ba/Th 值为 12.71～44.37, 平均为 30.08, 排除了俯冲带流体对英安岩源区的影响(Devine, 1995)。因此, 德龙地区洪水川组中的英安岩应该是幔源岩浆上涌诱发的地壳熔融产物, 这也与该地区花岗岩 Sr-Nd-Hf 同位素研究结果相一致(陈加杰等, 2024)。

德龙地区洪水川组流纹岩和英安岩具有相似的微量元素分布特征和稀土元素配分模式。在 Harker 图解上(图 9), 流纹岩与英安岩在 SiO_2-CaO、SiO_2-FeO^T、SiO_2-Al_2O_3、SiO_2-MgO、SiO_2-P_2O_5、SiO_2-TiO_2 之等方面均呈现负相关关系, 暗示它们之间存在同源演

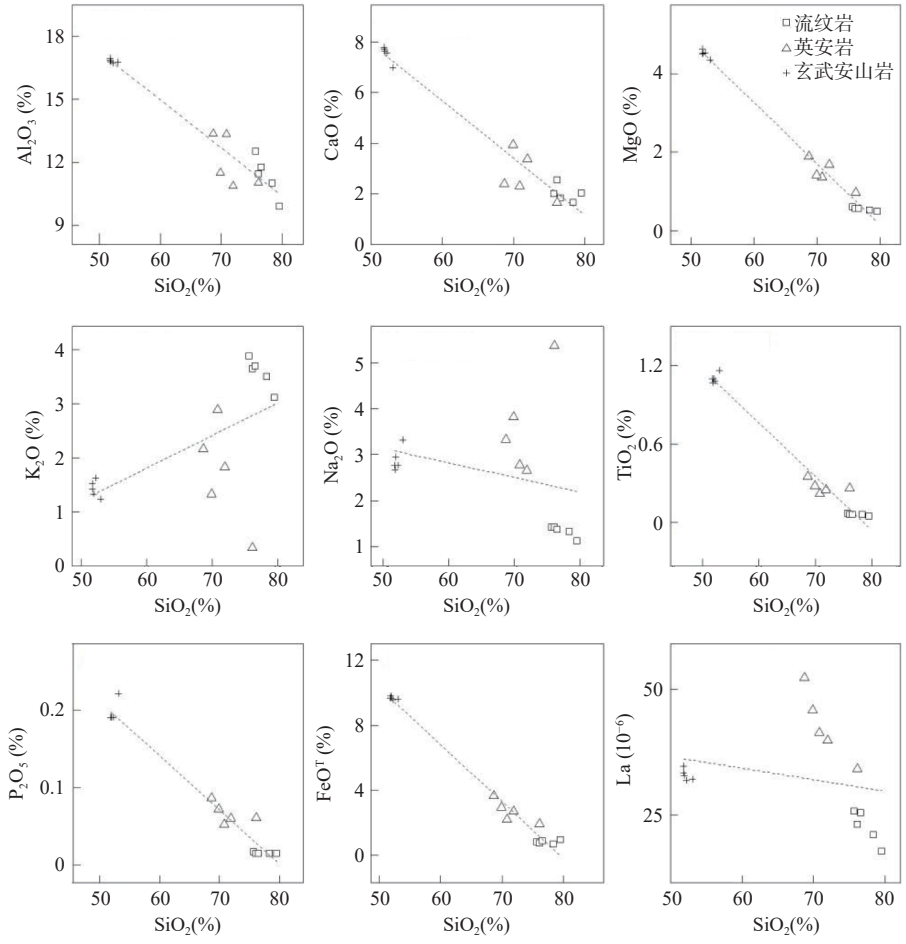


图9　东昆仑东段沟里地区德龙洪水川组火山岩 Harker 图解

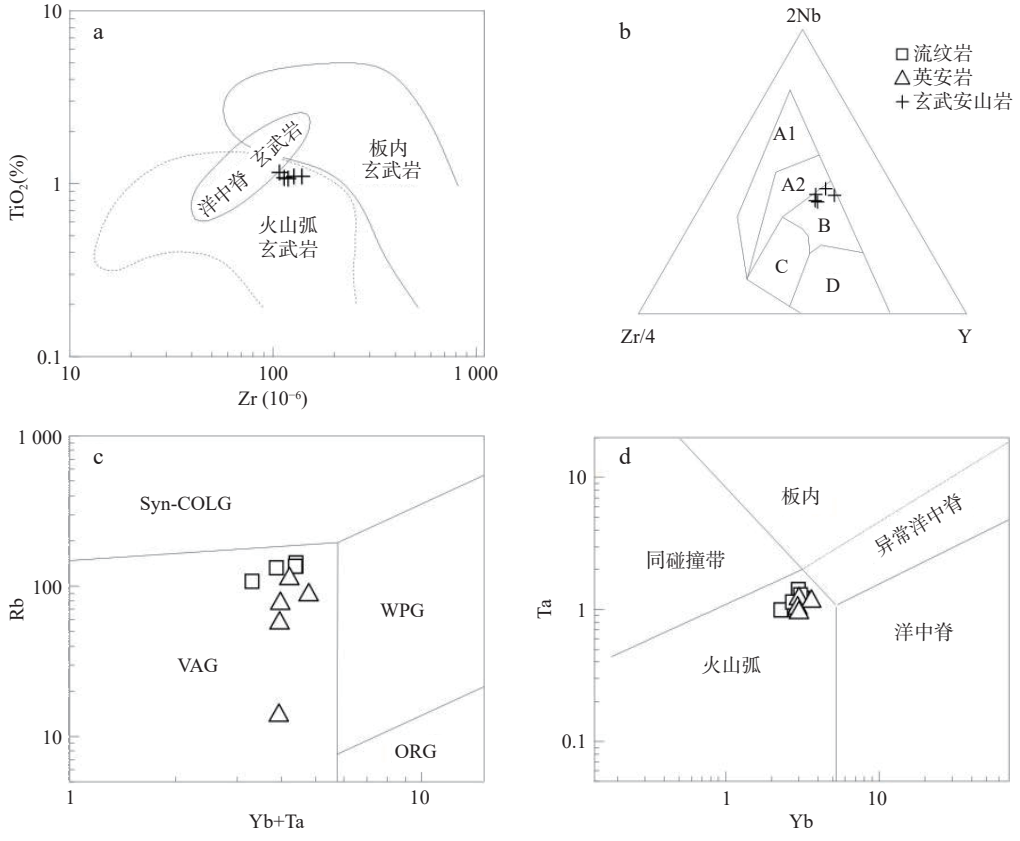
Fig. 9　Harker diagram for the volcanic rocks interlayers of Delong Hongshuichuan Formation in the Gouli area of the Eastern Kunlun Orogenic Belt

化关系。流纹岩 Nb 平均含量为 9.45×10^{-6}, Ta 平均含量为 1.20×10^{-6}, Nb/Ta 值平均为 7.24, 略低于英安岩 Nb/Ta 值, 而流纹岩较高的 $Mg^{\#}$值(48.76～57.66)、较高的 Th/Ce 值(0.36～0.38)和低 Ba/Th 值(53.55～61.81)与英安岩样品特征基本一致。因此, 德龙地区洪水川组中的流纹岩成因与英安岩一样, 都是幔源岩浆上涌诱发的地壳熔融产物, 略低的 Nb/Ta 值可能是地壳熔融过程中 Nb、Ta 的富集程度不同。

5.2 构造环境

德龙地区洪水川组火山岩微量元素地球化学分析结果表明, 其富集大离子亲石元素和轻稀土元素而亏损高场强元素和重稀土元素, 表现出俯冲消减带岩浆的特征(李伍平等, 1999)。岩石类型、地球化学特征反映洪水川组火山岩为一套钙碱性系列为主的火山岩, 普遍具绿泥石化和绢云母化。因此, 用较稳定的微量元素进行环境判别是研究构造属性的有效途径之一。Ta、Nb、Yb、Y 等不活动性元素对建立火山岩构造环境的地球化学判别图解是十分重要的(李昌年, 1992)。

陆缘岛弧、陆缘火山弧玄武岩的 $La\times Nb/Zr^2$ 值大于 0.002(武莉娜, 2003), $Th\times Ta/Hf^2$ 值大于 0.035(汪云亮, 2001)。德龙地区洪水川组玄武安山岩 $La\times Nb/Zr^2$ 值为 0.058～0.082, 平均为 0.068, $Th\times Ta/Hf^2$ 值为 0.18～0.30, 平均为 0.24, 具有陆缘岛弧、陆缘火山弧的特性。在构造判别 Zr-TiO_2 图解中(图 10a), 玄武安山岩样品全部落入火山弧玄武岩区域, 且在 2Nb-Zr/4-Y 图解(图 10b)中全部落入 E-MORB 区域, 这与上述玄武安山岩地幔源区特征一致, 受到了俯冲流体的交代作用。此外, 将英安岩和流纹岩样品投在 Rb-Yb+Ta 图解(图 10c)中, 样品全部落在火山弧花岗岩区域, 具弧火山岩的亲缘性; 在 Yb-Ta 图解(图 10d)中



a. Zr-TiO_2 图解(底图据 Pearce, 1982); b. 2Nb-Zr/4-Y 图解(底图据 Meschede, 1986); c. 酸性火山岩 Rb-Yb+Ta 图解(底图据 Pearce et al., 1984); d. 酸性火山岩 Ta-Yb 图解(底图据 Pearce et al., 1984); A_1. 板内碱性玄武岩; A_2. 板内碱性玄武岩＋板内拉斑玄武岩; B. E-MORB; C. 板内拉斑玄武岩＋火山弧玄武岩; D. 火山弧玄武岩＋N-MORBVAG.火山弧花岗岩; Syn-COLG. 同碰撞花岗岩; WPG. 板内花岗岩; ORG. 洋脊花岗岩

图10 东昆仑东段沟里地区德龙洪水川组火山岩构造环境判别图解

Fig. 10 Tectonic environment discrimination diagram for the volcanic rocks interlayers of Delong Hongshuichuan Formation in the Gouli area of the Eastern Kunlun Orogenic Belt

反映结果与 Rb-Yb+Ta 图解一致。结合区域构造背景，认为德龙地区洪水川组火山岩夹层形成于古特提斯洋向北俯冲阶段。

5.3 地质意义

东昆仑南缘布青山–阿尼玛卿构造带记录的哈尔郭勒地区 MOR 型蛇绿岩(刘战庆等, 2011)和德尔尼地区 MOR 型蛇绿岩(陈亮等, 2000)的成岩时代研究，以及哥日卓托地区 OIB 型洋岛组合(李瑞保等, 2014)和哈尔郭勒地区识别出兼具 OIB 与 N-MORB 属性的复杂的洋岛/海山玄武岩组合(杨杰等, 2014)的特征报道，均表明东昆仑南缘于晚古生代发育古特提斯洋盆。昆南缝合带北部记录 269 Ma 的埃坑德勒斯特中酸性侵入岩则是最早证明古特提斯洋向北俯冲的岩浆岩记录(杨延乾等, 2013)，表明古特提斯洋在不晚于中二叠世就已经开始向北俯冲于东昆仑地体之下，而昆中缝合带(266 ±2) Ma 出现的弧后盆地(Zhao et al., 2019)也印证了以上说法。目前，东昆仑地区古特提斯洋闭合的时间存在晚二叠世、中三叠世、晚三叠世等 3 种观点。本次研究的德龙地区洪水川组火山岩夹层形成于古特提斯洋向北俯冲阶段，并且获得英安岩和流纹岩锆石 U-Pb 同位素年龄值分别为(248±4.5) Ma 和(250±2.1) Ma，指示古特提斯洋在 248 Ma 仍处于俯冲阶段，闭合时间不早于 248 Ma。本次研究结果并不认同东昆仑地区古特提斯洋在晚二叠世已经闭合的观点，与东昆南地区大量出现早中三叠世洪水川组和闹仓坚沟组的海相灰岩、碎屑沉积岩等(李瑞保等, 2012)、东昆仑造山带在 260 Ma 之后才开始大量出现与古特提斯洋俯冲相关的岩浆岩，在早中三叠世才达到峰值(Chen et al., 2017; Dong et al., 2018)等观点相一致，表明晚二叠世古特提斯洋尚未闭合，俯冲时间至少持续到 248 Ma，至于中三叠世和晚三叠世闭合的观点还需进一步工作给予证据。

洪水川组大地构造位置上夹在北侧布尔汉布达山地区发育的弧岩浆岩带和南侧布青山蛇绿构造混杂岩带之间。前人针对洪水川组的形成时代、沉积序列及砾石源区等研究已做了许多工作，认为其形成时代是早三叠纪，属于弧前盆地沉积体系，而沉积体系、沉积组合的变化又间接地记录了古特提斯洋向北俯冲的发展过程(王兴等, 2019)。本次研究得出的德龙地区洪水川组中的火山岩夹层形成的构造环境以及成岩年龄结果与上述观点一致，这不仅对洪水川组的时代和沉积环境添加了新的证据，还对东昆仑地区古特提斯洋的关闭时间给予了进一步的限制。

6 结论

(1)德龙地区洪水川组英安岩和流纹岩锆石 U-Pb 年龄测定结果表明，$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄加权平均值分别为(250±2.1)Ma(MSWD=4.9)和(248±4.5)Ma(MSWD=1.2)，火山岩形成时代为早三叠世奥列尼奥克期。

(2)该套火山岩夹层中，玄武安山岩是受俯冲流体交代的地幔源区岩浆，经历后期结晶分异和地壳物质混染形成的；英安岩和流纹岩属于同源演化关系，是幔源岩浆上涌诱发的地壳熔融产物。

(3)德龙地区洪水川组中的火山岩夹层形成于古特提斯洋向北俯冲阶段，不仅对洪水川组的时代和沉积环境添加了新的证据，还进一步限定了东昆仑地区古特提斯洋闭合时间不早于 248 Ma。

利益冲突声明(Conflict of Interests)：

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)：

鲍泓辰, 谢登科, 邓宇峰, 等. 东昆仑祁漫塔格地区早古生代 Fe-Cu 多金属矽卡岩矿点的发现与意义[J]. 西北地质, 2026, 59(1): 189−202.

BAO Hongchen, XIE Dengke, DENG Yufeng, et al. Discovery and Significance of Early Paleozoic Fe-Cu Polymetallic Skarn Mineralization Points in the Dongkunlun-Qimantage Region[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(1): 189−202.

边千韬, 罗小全, 李红生. 阿尼玛山早古生代和早石炭-早二叠世蛇绿岩的发现[J]. 地质科学, 1999, 34(4): 523−524.

BIAN Qiantao, LUO Xiaoquan, LI Hongsheng. Discovery of Early Paleozoic and Early Carboniferous- Early Permian Cophiolites in the A'NYEMAQEN, QingHai Province, China[J]. Geological science, 1999, 34(4): 523−524.

陈加杰, 冷成彪, 付乐兵, 等. 东昆仑德龙花岗岩成因及对古特提斯洋演化的制约[J]. 地球科学, 2024, 49(2): 560−576.

CHEN Jiajie, LENG Chengbiao, FU Lebing, et al. Genesis of Delong Granite in East Kunlun Orogen and Its Implication on the Evolution of Paleo-Tethys Ocean[J]. Earth Science, 2024, 49(2): 560−576.

陈亮, 孙勇, 柳小明, 等. 青海省德尔尼蛇绿岩的地球化学特征及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 2000, 16(1): 106−110.

CHEN Liang, SUN Yong, LIU Xiaoming, et al. Geochemistry of Derni ophiolite and its tectonic significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(1): 106−110.

邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 等. 岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换[J]. 地质论评, 2015, 61(3): 473−484.

DENG Jinfu, FENG Yanfang, DI Yongjun, et al. Magmatic Arc and Ocean-Continent Transition: Discussion[J]. Geological Review, 2015, 61(3): 473−484.

丰成友. 青海东昆仑地区的复合造山过程及造山型金矿床成矿作用 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2002.

FENG Chengyou. Multiple Orogenic Processes and Mineralization of Orogenic Gold Deposits in the East Kunlun Orogen, Qinghai Province [D]. Beijing: China Geological Academy, 2002.

郝娜娜. 东昆仑造山带岩浆活动与成矿作用 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2016.

HAO Nana. Magmatism and Metallogeny in the East Kunlun Orogenic Belt [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.

何书跃, 林贵, 钟世华, 等. 造山作用孕育“青海金腰带”[J]. 西北地质, 2023, 56(6): 1−16.

HE Shuyue, LIN Gui, ZHONG Shihua, et al. Geological Characteristics and Related Mineralization of “ Qinghai Gold Belt” Formed by Orogeny[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(6): 1−16.

李昌年. 火成岩微量元素岩石学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992.

李荣社, 计文化, 杨永成. 昆仑山及邻区地质 [M]. 北京: 地质出版社: 2008.

李伍平, 路凤香. 钙碱性火山岩构造背景的研究进展[J]. 地质科技情报, 1999, (2): 16−19.

LI Wuping, LU Fengxiang. New Progress of the study of Geologic Setting for Calc-Alkline Volcanic Rocks[J]. Geological Science and Technology Information, 1999, (2): 16−19.

李瑞保. 东昆仑造山带 (东段) 晚古生代-早中生代造山作用研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.

LI Ruibao. Research on the Late Paleozoic-Early Mesozoic Orogeny in East Kunlun Orogen[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.

李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 等. 东昆仑南缘布青山构造混杂带哥日卓托洋岛玄武岩地球化学特征及构造意义[J]. 地学前缘, 2014, 21(1): 183−195.

LI Ruibao, PEI Xianzhi, LI Zuochen, et al. Geochemical characteristics of Gerizhuotuo OIB and its tectonic significance in Buqingshan tectonic mélange belt, southern margin of East Kunlun Orogen[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(1): 183−195.

刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑南缘阿尼玛卿构造带布青山地区两期蛇绿岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造意义[J]. 地质学报, 2011, 85(2): 185−194.

LIU Zhanqing, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology of the Two Suites of Ophiolites at the Buqingshan Area of the A’nyemaqen Orogenic Belt in the Southern Margin of East Kunlun and Its Tectonic Implication [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(2): 185−194.

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): 403−414.

MO Xuanxue, LUO Zhaohua, DENG Jinfu, et al. Granitoids and Crustal Growth in the East-Kunlun Orogenic Belt[J]. Geolocal Journal of China Universities, 2007, 13(3): 403−414.

欧阳舒, 冀六祥, 罗伟. 青海省中西部洪水川群孢粉组合及其时代[J]. 古生物学报, 2011, 50(2): 187−218.

OUYANG Shu, JI Liuxiang, LUO Wei. Early Triassic Spore-Pollen Assemblages from the HongShuiChuan Group of Central-Western QingHai[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2011, 50(2): 187−218.

裴先治, 李瑞保, 李佐臣, 等. 东昆仑南缘布青山复合增生型构造混杂岩带组成特征及其形成演化过程[J]. 地球科学, 2018, 43(12): 4498−4520.

PEI Xianzhi, LI Ruibao, LI Zuochen, et al. Composition Feature and Formation Process of Buqingshan Composite Accretionary Mélange Beltin Southern Margin of East Kunlun Orogen[J]. Earth Science, 2018, 43(12): 4498−4520.

王秉璋, 陈静, 罗照华, 等. 东昆仑祁漫塔格东段晚二叠世-早侏罗世侵入岩岩石组合时空分布、构造环境的讨论[J]. 岩石学报, 2014, 30(11): 3213−3228.

WANG Bingzhang, CHEN Jing, LUO Zhaohua, et al. Spatial and Temporal Distribution of Late Permian-Early Jurassic Intrusion Assemblages in Eastern Qimantag, East Kunlun, and Their Tectonic Settings[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(11): 3213−3228.

王秉璋, 李积清, 付长垒, 等. 东昆仑布尔汗布达早古生代岩浆弧的形成与演化初探[J]. 地球科学, 2022, 47(4): 1253−1270.

WANG Bingzhang, LI Jiqing, FU Changlei, et al. Research on Formation and Evolution of Early Paleozoic Bulhanbuda Arc in East Kunlun Orogen[J]. Earth Science, 2022, 47(4): 1253−1270.

王兴, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑东段下三叠统洪水川组砾岩源区研究: 来自砾岩特征及锆石 U-Pb 年龄的证据[J]. 中国地质, 2019, 46(1): 155−177.

WANG Xing, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. Conglomerate source and source area property of Lower Hongshuichuan Formation in the East Kunlun Mountains: Evidence from conglomerate characteristics and U-Pb dating[J]. Geology in China, 2019, 46(1): 155−177.

汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别[J]. 岩石学报, 2001, 17(3): 413−421.

WANG Yunliang, ZHANG Chengjiang, XIU Shuzhi. Th/Hf, Ta/Hf identi-fication of tectonic setting of basalts[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(3): 413−421.

武莉娜, 王志畅, 汪云亮. 微量元素 La, Nb, Zr 在判别大地构造环境方面的应[J]. 华东地质学院学报, 2003, 26(4): 343−348.

WU Lina, WANG Zhichang, WANG Yunliang. On the Application of La, Nb and Zr in identifying the tectonic set-tings[J]. Jounal of east china Geological Institute, 2003, 26(4): 343−348.

许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 中央造山带早古生代地体构架与

高压/超高压变质带的形成[J]. 地质学报, 2006, 80(12): 1793−1806.

XU Zhiqin, YANG Jingsui, LI Haibing, et al. The Early Palaeo-zoic Terrene Framework and the Formation of the High Pressure (HP) and Ultra-High Pressure (UHP) Meta-morphic Belts at the Central Orogenic Belt (COB)[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(12): 1793−1806.

许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 造山的高原-青藏高原的地体拼合、碰撞造山及隆升机制 [M]. 北京: 地质出版社. 2007.

杨宝荣, 张里斌, 马忠贤, 等. 青海沟里地区金矿床地质背景研究[J]. 矿产勘查, 2018, 9(10): 1920−1925.

YANG Baorong, ZHANG Libin, MA Zhongxian, et al. Study on Metallogenic Geological Background of Gold Deposits in Gouli Area, Qinghai[J]. Mineral Exploration, 2018, 9(10): 1920−1925.

杨杰, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑南缘布青山地区哈尔郭勒玄武岩地球化学特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2014, 41(2): 335−350.

YANG Jie, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. Geochemical characteristics and geological implications of Haerguole basalt in Buqingshan area on the southern margin of East Kunlun Mountains[J]. Geology in China, 2014, 41(2): 335−350.

杨经绥, 王希斌, 史仁灯, 等. 青藏高原北部东昆仑南缘德尔尼蛇绿岩: 一个被肢解了的古特提斯洋壳[J]. 中国地质, 2004, 31(3): 225−239.

YANG Jingsui, WANG Xibin, SHI Rendeng, et al. The Dur'ngoi Ophiolitein East KunLun, Northern Qinghai-Tibet Plateau: A Fragment of Paleo-Tethyan Oceanic Crust[J]. Geology in China, 2004, 31(3): 225−239.

于小亮, 顾雪祥, 蔡成龙, 等. 新疆塔吾尔别克金矿区赋矿火山岩地球化学特征与构造意义[J]. 矿物岩石, 2017, 37(2): 74−83.

YU Xiaoliang, GU Xuexiang, CAI Chenglong, et al. Geochemical characteristics and tectonic significance of ore-bearing volcanic rocks in Tawuerbek Gold Deposit, Xinjiang[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2017, 37(2): 74−83.

杨延乾, 李碧乐, 许庆林, 等. 东昆仑埃坑德勒斯特二长花岗岩锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 西北地质, 2013, 46(1): 56−62.

YANG Yanqian, LI Bile, XU Qinglin, et al. Zircon U-Pb Ages and its Geological Significance of the Monzonitic Granite in the Aikengdelesite, Eastern Kunlun[J]. Northwestern Geology, 2013, 46(1): 56−62.

闫臻, 边千韬, Oleg A Korchagin, 等. 东昆仑南缘早三叠世洪水川组的源区征: 来自碎屑组成、重矿物和岩石地球化学的证据[J]. 岩石学报, 2008, 24(5): 1068−1078.

YAN Zhen, BIAN Qiantao, Korchagin O A, et al. Provenance of Early Triassic Hongshuichuan Formation in the southern margin of the East Kunlun Mountains: Constrains from detrital framework, heavy mineralanalysis and geochemistry[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(5): 1068−1078.

杨忠智. 东昆仑造山带东段下三叠统洪水川组地质特征及构造环境研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.

YANG Zhongzhi. A Study on geologic feature and structural setting of the Lower Triassic Hongshuichuan formation in Eastern section of the East Kunlun orogen[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.

张萱颖. 青海省都兰县德龙地区矿床特征及靶区优选 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2016.

ZHANG Xuanyin. Deposit characteristics and target area selection in the Delong area, Dulan County, Qinghai Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.

钟世华, 黄宇, 刘永乐, 等. 东昆仑志留纪—泥盆纪关键金属成矿大爆发[J]. 地质通报, 2025a, 44(4): 574−586.

ZHONG Shihua, HUANG Yu, LIU Yongle, et al. Silurian-Devonian critical metal mineralization boom of the East Kunlun Orogenic Belt[J]. Geological Bulletin of China, 2025a, 44(4): 574−586.

钟世华, 李三忠, 丰成友, 等. 原特提斯和古特提斯碰撞岩浆与斑岩成矿: 以东昆仑祁漫塔格地区为例[J]. 地质通报, 2025b, 44(4): 511−533.

ZHONG Shihua, LI Sanzhong, FENG Chengyou, et al. Proto-Tethys and Paleo-Tethys collisional magmas and porphyry mineralization: A case study of the Qimantagh area, East Kunlun Mountains[J]. Geological Bulletin of China, 2025b, 44(4): 511−533.

Andersen T. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That do not Report ^{204}Pb[J]. Chemical Geology, 2002, 192(1/2): 59−79.

Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[A]. In: Henderson P (Eds.). Rare Earth Element Geochemistry[M]. Amsterdam: Elsevier: 1984, 63−114.

Chen J J, Wei J H, Fu L B, et al. Multiple Sources of the Early Mesozoic Gouli Batholith, Eastern Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibetan Plateau: Linking Continental Crustal Growth with Oceanic Subduction[J]. Lithos, 2017, 292−293: 161−178.

Corfu F, Hanchar J M, Hoskin P W O, et al. Atlas of zircon textures[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53(1): 469−500.

Devine J D. Petrogenesis of the basalt-andesite-dacite association of Grenada, Lesser Antilles island arc, revisited[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1995, 69(1−2): 1−33.

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 Implica-tions[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.

Gao H C, Sun F Y. NW China: Petrogenesis and Im-plications for a Transition from Subduction to Post-Collision Setting of the Paleo-Tethys Ocean[J]. Geological Journal. 2021.

Green T H. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system[J]. Chemical Geology, 1995, 120(3-4): 347−359.

Hofmann A W. Chemical diferentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1988, 90(3): 297−314.

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: Impli-cations for Continental Crust Growth through Syn-Colli-sional Felsic Magmatism[J]. Chemical Geology, 2014, 370(1594): 1−18.

Ludwig K R. Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley. 2003.

Macdonald R, Hawkesworth C J, Heath E. The Lesser Antilles volcanic chain: a study in arc magmatism[J]. Earth Science Reviews, 2000, 49(1−4): 1−76.

Middlemost E A K. Magmas and Magmatic Rocks[M]. London: Longman, 1985, 1−266.

Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth Science Reviews, 1994, 37(3−4): 215−224.

Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. Chemical Geology, 1986, 56(3−4): 207−218.

McKenzie D, Bickle M J. The Volume and Composition of Melt Generated by Extension of the Lithosphere[J]. Journal of Petrology, 1988, 29(3): 625−679.

Maniar P D and Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635−643.

O'Hara M J. Primary magmas and the origin of basalts[J]. Scottish Journal of Geology, 1965, 1(1): 19−40.

Peccerillo R, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58: 63−81.

Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1979, 69(1): 33−47.

Pearce J A. Trace Element Characteristics of Lavas from Destructive Plate Boundaries[A]. In: Thorpe, R. S., ed., Orogenic Andesites and Related Rocks[M]. John Wiley and Sons, New York, 1982, 528−548.

Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element dis-crimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984(25): 956−983.

Rapp R P and Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8~32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. Journal of Petrology, 1995, 36(4): 891−931.

Rudnick R L, Barth M, Horn I, et al. Rutile-bearing refractory eclogites: Missing link between continents and depleted mantle[J]. Science, 2000, 287(5451): 278−281.

Shao F L, Niu Y L, Liu Y, et al. Petrogenesis of Triassic Granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibetan Plateau and their Tectonic Implications[J]. Lithos, 2017, 282−283(251): 33−44.

Siebel W, Blaha U, Chen F K, et al. Geochronology and Geochemistry of a Dyke-Host Rock Association and Implications for the Formation of the Bavarian Pfahl Shear Zone, Bohemian Massif[J]. International Journal of Earth Sciences (Geol. Rundsch.), 2005, 94(1): 8−23.

Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for Mantle composition and processes[A]. In: Saunders AD, Norry MJ (Ed.). Magmatism in the Ocean Basins[M]. Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313−345.

Taylor S R, Mclennan S M. The continental crust: its composition and evolution[J]. The Journal of Geology, 1985, 94(4): 57−72.

Weyer S, Muenker C, Mezger K. Nb/Ta, Zr/Hf and REE in the depleted mantle: Implications for the differentiation history of the crust-mantle system[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 205(3-4): 309−324.

Wright J B. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis[J]. Geological Magazine, 1969, 106(4): 370−384.

Winchester J A and Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chemical Geology, 1977, 20: 325−343.

Wilson M. Igneous petrogenesis[M]. London: Unwin Hyman, 1989, 1-466.

Wu C, Zuza A V, Chen X H, et al. Tectonics of the Eastern Kunlun Range: Cenozoic reactivation of a Paleozoic-Early Mesozoic orogen[J]. Tectonics, 2019, 38(5): 1609−1650.

Wyllie P J. Constraints imposed by experimental petrology on possible and impossible magma sources and products[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1984, 310(1514): 439−456.

Xiong F, Ma C, 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.

Xia R, Wang C M, 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, 2015, 234−235: 47−60.

Zhao X, Fu L B, Wei J H, et al. Late Permian Back-Arc Extension of the Eastern Paleo- Tethys Ocean: Evidence from the East Kunlun Orogen, Northern Tibetan Plateau[J]. Lithos, 2019, 340−341(4): 34−48.