地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616,CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

# 《地质力学学报》预出版论文

论文题目：青海东昆仑造山带早古生代构造转换时限及其成矿指示意义——以昆仑河地区花岗岩为例

作者：祖木热提·阿布力依米提，焦和，王永，黄国彪

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026020
投稿时间：2026-02-06
录用时间：2026-08-27
预出版时间：2026-09-02

《地质力学学报》预出版

**预出版版权说明**

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

# 青海东昆仑造山带早古生代构造转换时限及其成矿指示意义——以昆仑河地区花岗岩为例

祖木热提·阿布力依米提[1,2,3]，焦 和[4,5]，王 永[2,3*]，黄国彪[4,5]
ABLIMIT Zumrat[1,2,3]，JIAO He[4,5]，WANG Yong[2,3]，HUANG Guobiao[4,5]

1. 东华理工大学地球与行星科学学院，江西 南昌，330013
2. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室，北京 100081
3. 中国地质科学院地质力学研究所动力成岩成矿实验室，北京 100081
4. 青海省柴达木综合地质矿产勘查院，青海 格尔木，816099
5. 青海省柴达木盆地盐湖资源勘探研究重点实验室，青海 格尔木，816099

1. *School of Earth and Planetary Sciences, East China University of Technology, Nanchang* 330013*, Jiangxi, China;*
2. *Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction, Ministry of Natural Resources, Beijing* 100081*, China*
3. *Laboratory of Dynamic Diagenesis and Metallogenesis, Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100081*, China;*
4. *Qaidam Comprehensive Geological and Mineral Exploration Institute of Qinghai Province, Golmud*, 816099*, Qinghai, China;*
5.*Qinghai Provincial Key Laboratory of Salt Lake Resource Exploration and Research in Qaidam Basin, Golmud* 816099*, Qinghai, China*

**Early Paleozoic Tectonic Transition and Metallogenic Implications in the Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai: Evidence from Kunlun River Granites**

**Abstract:** [Objective] The East Kunlun Orogenic Belt (EKOB) is a fundamental component of the Tethyan tectonic domain and preserves crucial records of the orogen's evolution. Although remarkable progress has been achieved in tectonic evolution of the EKOB, systematic studies on its western segment remains insufficient. In particular, no unified consensus has been reached on the closure timing of the Proto-Tethyan Ocean, shift of tectonic regimes, provenance of crustal material, and associated metallogenic processes. [Methods] To better constrain the timing of tectonic transition and assess its metallogenic significance for regional polymetallic mineralization, this study conducts integrated petrological, geochemical and zircon geochronological analyses on three representative plutons (North Heihai, Jiadong, and Suhaitu) in the Kunlun River area, with comparisons to coeval granitoids in the eastern EKOB. [Results] Zircon U–Pb dating yields formation ages of 437.7–428.8 Ma for the monzogranites. Geochemically, these rocks belong to calc-alkaline series with weak peraluminosity, and exhibit higher A/NK ratios than coeval monzogranites of the Baitonggou pluton in eastern EKOB. The monzogranites have total REE contents of 212–256 ppm, with $(La/Yb)_N$ = 8.78–21.05 and LREE/HREE = 8.15–14.13, reflecting LREE enrichment, flat HREE

**基金项目：**中国地质调查局地质调查项目（DD202402058）；新疆维吾尔自治区重大科技专项项目（2023A03002-4）；新疆维吾尔自治区重点研发计划项目（2024B03011-1）；国家重点研发计划（2021YFC2901904）

This research was financially supported by the Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant No.DD202402058), the Major Science and Technology Special Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region (Grant No.2023A03002-4), the Key Research and Development Program of Xinjiang Uygur Autonomous Region (Grant No.2024B03011-1), and the National Key Research and development Program of China (Grant No.2021YFC2901904).

**第一作者：**祖木热提·阿布力依米提（2000—），女，在读硕士，地质学专业。Email：zr25622@163.com

**通讯作者：**王永（1982—），男，正高级工程师，研究方向为成矿规律与找矿预测。Email：wangyong429@163.com

《地质力学学报》预出版

patterns, and pronounced negative Eu anomalies (0.23–0.73). Primitive mantle-normalized trace element patterns reveal enrichment in large-ion lithophile elements (Rb, K) and depletion in high field strength elements (Nb, Ta, Ti, P). [Conclusions]These characteristics indicate that the monzogranites are highly fractionated I-type granites derived from partial melting of ancient mid–upper crustal basement, and emplaced during a post-collisional extensional transition following Proto-Tethyan Ocean closure. This magmatic event records the tectonic switch from compression to extension and provides potential thermal and material conditions for polymetallic mineralization. The eastern and western EKOB experienced this tectonic transition nearly synchronously, demonstrating synchronous and unified evolutionary processes of the Proto-Tethyan Ocean across the whole EKOB.
**Keywords:** East Kunlun orogenic belt; monzogranite; chronology; geochemistry; Tethyan tectonic evolution

**摘要：**东昆仑造山带是特提斯构造域的重要组成部分，记录了特提斯演化的关键过程。近年来在构造演化研究方面取得了显著进展，但东昆仑西段研究比较薄弱，在原特提斯洋闭合时间、构造体制转换、地壳物质来源及成矿作用等方面尚未形成统一认识。为了进一步约束青海东昆仑造山带构造转换时限，并探讨其对区域成矿作用的指示意义，针对昆仑河地区三个主要的岩体（黑海北、加东、苏海图）开展岩石地球化学、锆石年代学研究，并与东昆仑造山带同期花岗岩进行对比分析。结果表明，昆仑河地区二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 437.7Ma~ 428.8Ma，地球化学特征显示其总体表现为钙碱性系列、弱过铝质岩石特征，样品具有较低的全碱含量（$Na_2O+K_2O$）及较高的 A/NK 值。昆仑河地区二长花岗岩的稀土元素总含量为 $212\times10^{-6}$~$256\times10^{-6}$，$(La/Yb)_N$ 为 8.78~21.05， LREE/HREE 值为 8.15~14.13，显示轻稀土相对富集、重稀土配分较为平坦，并具有明显 Eu 负异常（0.23~0.73）。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上，昆仑河地区二长花岗岩表现出 Rb、K 等大离子亲石元素富集以及 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素明显亏损的特征。综合年代学与地球化学特征，认为昆仑河地区二长花岗岩为来源于中—上地壳古老基底物质部分熔融形成的高分异 I 型花岗岩，形成于原特提斯洋闭合之后的后碰撞向伸展转换阶段。该阶段岩浆活动不仅记录了东昆仑造山带构造体制由挤压向伸展转换的关键过程，同时也为区域多金属成矿提供了潜在的热动力条件。研究结果表明东昆仑东段与西段基本在同一时期进入构造转换阶段，整个东昆仑地区原特提斯演化是一个相对同步的区域性事件。
**关键词：**东昆仑；二长花岗岩；年代学；地球化学；特提斯构造演化

**中图分类号：**P542　　**文献标志码：**A

## 0 引言

东昆仑造山带地处青藏高原北缘，构成中央造山带西段的关键部分（殷鸿福等，1998；封铿等，2022），同时东昆仑造山带作为原特提斯洋向古特提斯洋转变的关键位置（Dong et al.，2021；Fu et al.，2022），记录了原特提斯洋演化的关键过程。近年来在构造演化研究方面取得了显著进展，在东昆仑造山带，尤其是西段，原特提斯缝合带与古特提斯缝合带往往交织在一起，难以区分，在南昆仑（昆南）南缘的古特提斯缝合带中，发现了早古生代的蛇绿岩（裴先治等，2018；李文渊等，2022），李文渊等（2024）提出,原特提斯洋的缝合带往往是古特提斯洋再次裂解的薄弱带，传统认为的康西瓦-阿尼玛卿古特提斯缝合带，实际上是在原特提斯缝合带基础上再次开裂、扩张和闭合的结果。

《地质力学学报》预出版

东昆仑造山带构造演化历史复杂，主要经历了早古生代和晚古生代—早中生代两个重要构造演化阶段，目前对早古生代构造演化的研究相对较弱。一般认为东昆仑早古生代时期，原特提斯洋盆打开和扩张应发生在早寒武世之前（陆松年，2002；冯李强等，2026），洋壳俯冲消减开始于早寒武世末期（520~515 Ma）（张亚峰等，2010；Fu et al.，2022），但关于洋壳俯冲最终终止与碰撞造山作用起始的确切时间，目前仍存在不同观点。莫宣学等（2007）认为，东昆仑吐木勒克地区与奥陶世蓝闪石片岩伴生的辉长岩的出现（Ar-Ar 年龄：445±2 Ma）可作为俯冲结束和碰撞开始的标志性事件；然而，任军虎等（2009）与高晓峰等（2010）的研究则指出，在晚奥陶世至早志留世（458–436 Ma）期间，洋盆仍然存在，还未完全闭合，东昆仑地区可能仍处于局部弧后伸展阶段；王晓霞等（2012）通过对万宝沟环斑花岗岩的分析，提出至晚奥陶世（约 441Ma）时，碰撞造山已进入晚期阶段，并逐步转入后造山伸展演化；刘彬等（2013）认为胡晓钦镁铁质岩石（438 Ma）的出现标志着东昆仑早古生代洋壳俯冲已经进入到最晚阶段。

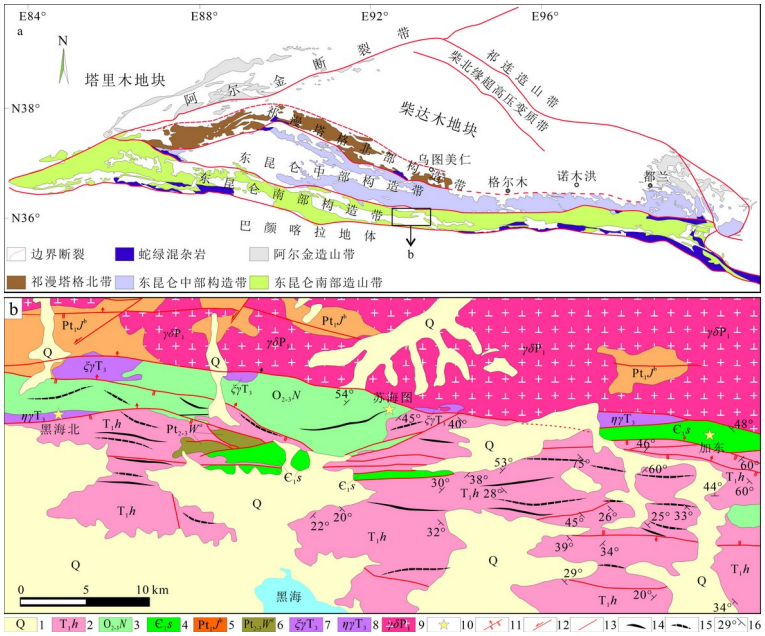
A 型花岗岩对伸展构造环境具有显著的指示作用，常被用作约束造山过程中构造体制由挤压向伸展转换的关键时间标志（吴福元等，2007；贾小辉等，2009；张旗等，2012；韩玉等，2024）。在东昆仑造山带内，加里东期的 A 型花岗岩分布范围较为广泛，目前报道过的加里东期岩体主要有东段的百吨沟岩体（417.9 Ma）（韩玉等，2024）、沟里地区迈龙花岗岩（426~438 Ma）（李斌等，2025）、五龙沟地区（420 Ma）（Xin et al.，2018；王艺龙等，2018；Ding et al.，2019；Chen et al.，2020）。西段目前报道的有克其克孜苏花岗岩（442.3 Ma）（刘卫东等，2022）、昆仑河北花岗岩（443 Ma、439 Ma）（焦和等，2022；Yu et al.，2022）。这些数据跨度较大（443~417.9 Ma），其成因是多阶段俯冲作用的结果，还是不同地区俯冲闭合时间存在差异，仍需进一步精准约束。

近年来，东昆仑原特提斯演化研究取得了重要进展，对原特提斯洋闭合时间、构造体制转换、地壳物质来源等方面已经有了初步的结论，但是这些研究大部分集中在东昆仑东段，对于西段的相关问题研究还比较匮乏。在东昆仑西段昆仑河以北地区东西向线状出露多个花岗质岩体，是东昆仑东段和西段原特提斯构造演化对比研究的理想对象。因此，针对昆仑河地区三个主要的岩体（黑海北、加东、苏海图）进行岩石地球化学、锆石年代学研究，并与东昆仑地区同期岩浆岩开展区域对比研究，分析东昆仑东、西段花岗质岩体成因和构造环境的差异，补充原特提斯洋构造演化细节，探讨其对区域成矿作用的指示意义。

## 1. 区域地质背景

研究区位于昆中断裂以南，即东昆仑南部构造带，也称为东昆仑南坡俯冲增生杂岩带（张雪亭和杨生德，2007；潘桂棠等，2013；图 1）。区内出露的地层以中-新元古界万保沟群为主，岩性主要包括中基性火山岩、碎屑岩及大理岩（阿成业等，2003）；其次为奥陶系纳赤台群，岩性主要为变质碎屑岩、玄武岩和大理岩（史连昌等，2017）。

《地质力学学报》预出版




1—第四系；2—三叠系洪水川组；3—奥陶系纳赤台群；4—寒武纪变砂岩；5—金水口群；6—万宝沟群；7—三叠纪钾长花岗岩；8—三叠纪二长花岗岩；9—二叠纪花岗闪长岩；10—采样点；11—逆断层；12—走滑断层；13—性质不明断层；14—背斜；15—向斜；16—地层产状

a—东昆仑造山带构造分区（底图据 Dong et al.，2018 修改）；b—昆仑河地区区域地质图（底图据王秉璋等，2008 修改）

图 1 东昆仑造山带构造分区及昆仑河地区区域地质图

Fig. 1 Tectonic subdivisions of the East Kunlun Orogenic Belt and regional geological map of the Kunlun River area

(a) Tectonic subdivisions of the East Kunlun Orogenic Belt (base map modified from Dong et al., 2018); (b) Regional geological map of the Kunlun River area (base map modified from Wang Bingzhang et al., 2008)

1–Quaternary; 2–Hongshuichuan Formation, Triassic; 3–Nachitai Group, Ordovician; 4–Cambrian metamorphic sandstone; 5–Jinshuikou Group; 6–Wanbaogou Group; 7–Triassic K-feldspar granite; 8–Triassic monzonite granite; 9–Permian granodiorite; 10–sampling site; 11–thrust fault; 12–strike-slip fault; 13–fault of unknown nature; 14–anticline; 15–syncline; 16–attitude of strata

区内侵入岩分布广泛，其侵位时代可划分为三期：中-晚志留世、早泥盆世和晚三叠世-早侏罗世。岩石类型以花岗岩、花岗闪长岩和闪长岩为主，其中晚三叠世的侵入体则以辉长岩为主（王秉璋等，2008）。主要出露区域为昆中断裂两侧以及与昆南断裂之间的昆仑河地区。

区内构造以北西西-近东西向断裂为区内主干构造，不仅是构造单元之间的边界断裂，还对地层的展布与演化具有明显的控制作用，并在岩浆活动和成矿作用中起重要控制作用（黄国彪等，2021）。此外，区内还发育北西向次级断裂及复式背斜和逆冲推覆构造，其褶皱轴向总体呈近东西向分布；同时，还发育一系列小规模断裂以近东西向、平行、密集分布。

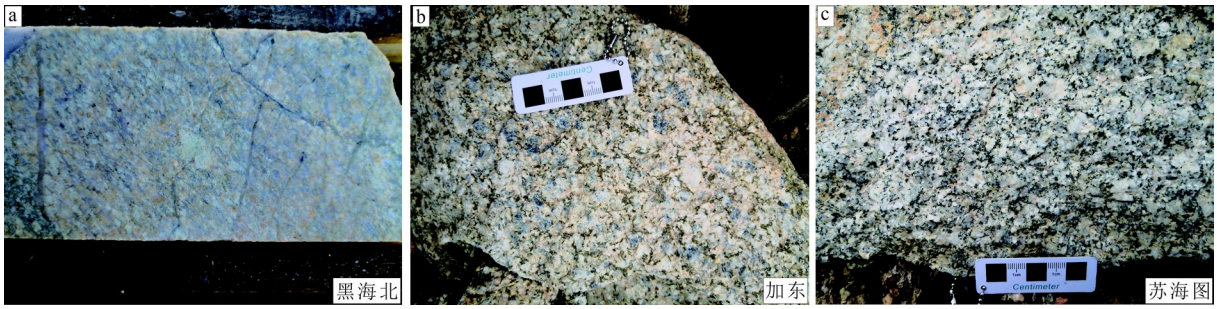
## 2. 样品与测试方法

### 2.1 样品描述

黑海北二长花岗岩出露于研究区西部，测试样品（H2114-1、H2104-2）采自黑海北金矿 6 勘探线 ZK0607 钻孔；加东（H2127-1、H2127-2）和苏海图（H2129-1、H2129-2）二长花岗岩样品采自地表露头。3 个地区的样品岩性较为相似，整体呈灰白色，具中-粗粒花岗结构，块状构造（图 2a-

《地质力学学报》预出版

c）。主要矿物为石英（50%-65%）、斜长石（15%-30%）、钾长石（18%-30%）及少量黑云母、角闪石等。其中加东和苏海图样品暗色矿物含量略高，约 5%。黑海北岩体与纳赤台蛇绿混杂岩呈侵入接触关系，局部发育硅化和褐铁矿化，岩体出露范围较小；加东和苏海图岩体露头整体较为新鲜，蚀变较轻。




a—黑海北二长花岗岩样品照片；b—加东二长花岗岩样品照片；c—苏海图二长花岗岩样品照片

图 2 昆仑河北地区花岗岩样品

Fig. 2 Monzogranite outcrop photographs

(a) Photograph of a monzogranite sample from north of Heihai; (b) photograph of a monzogranite sample from Jiadong; (c) Photograph of a monzogranite sample from Suhaitu

### 2.2 锆石 U-Pb 年代学分析

锆石 U-Pb 同位素定年在自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室完成，采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪（LA-ICP-MS）进行原位分析。测试的仪器组合为美国安捷伦科技公司的电感耦合等离子体质谱仪（Agilent 7900）和美国相干公司 193nm 准分子激光器（Geo Las HD ArF 型）。

锆石 U-Pb 定年测试采用单点剥蚀方式，以国际上应用最为广泛的锆石微区分析标样 91500 作为外标，以 Plešovice 锆石作为监控标样，对未知样品的 U/Pb 分馏进行校正，同时以 NIST SRM 610 和 NIST SRM 612 作为微量元素监控标样。实验过程中，每测试 5 个样品点，插入 2 个标样点和 1 个监控样点，并且保证每个实验批次的开头和结尾均有 2 个锆石标样点和一个微量元素标样点控制。详细方法见王森等（2023）。U-Pb 同位素原始数据处理采用 ICPMS Data Cal 12.0 程序（Liu et al.，2010a，2010b；Hu et al.，2012），谐和图绘制及年龄加权平均计算采用 Isoplot 3.0 程序（Ludwig，2003）。U-Pb 同位素比值及年龄误差均为 1$\sigma$，年龄加权平均值误差为 2$\sigma$。

### 2.3 地球化学分析

本次研究的主量和微量元素分析在国家地质实验测试中心完成。将野外采集的新鲜岩石样品研磨至 200 目后进行化学分析。主量元素及 Ba、Sc、Cu、Zn、Ni 等微量元素含量采用电感耦合等离子体发射光谱仪（ICP-AES）测定，其余微量元素及稀土元素含量采用电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS）测定。上述分析均以 OS-18 为标准样进行质量控制，分析精度优于±3%。

## 3 测试结果

### 3.1 锆石 U-Pb 年龄

黑海北二长花岗岩（H2114-1，H2104-2）的锆石晶体大多较为自形，多为无色，呈短柱状-等轴状，少量锆石颜色呈淡黄褐色，裂隙较多，自形程度较差。锆石颗粒约 150~180μm，CL 图像中岩浆振荡环带明显，部分锆石具有扇形分带，一些 CL 图像较亮的锆石显示出明显的核边结构，但测试结果基本一致。

定年结果及部分微量元素含量见附表 1。所有样品锆石的 Th/U 比值集中于 0.3~0.6，平均 0.43，显示出明显的岩浆锆石的特征（Th/U＞0.4）（吴元保等, 2004；许智等，2024）。其中

《地质力学学报》预出版

H2114-1 测试 17 个点，谐和度大于 90%的 13 个点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 437.7±2.2 Ma（MSWD=2.1），其他 4 个测点数据的 $^{207}Pb/^{235}U$，$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄值明显高于其他点，且偏离谐和线较远，可能是由于选点位置发育裂隙、包裹体或受到后期蚀变的区域，这些位置可能含有较高比例的“普通铅”所导致；H2104-2 共测试 29 个点，谐和度大于 90%的 23 个点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 428.8±1.7 Ma（MSWD=2.6），其他 6 个测点中，继承锆石有 5 个，$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为 484~2311Ma，740 Ma 附近有 3 个点，另有一个 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄较为年轻，为 385.5±7.7 Ma，误差较大。

加东二长花岗岩（H2127-1）的锆石多为无色，晶体自形，呈短柱状—长柱状，大部分锆石内部都发育有成分未知的包体。少量锆石颜色呈淡黄褐色，自形程度差，裂隙较多。锆石颗粒约 120~150μm，CL 图像中岩浆振荡环带和扇形分带明显，有些锆石甚至叠加两种分带。部分锆石具有扇形分带，部分锆石发育较亮的、分带性差的核部，显示出明显的核边结构，但测试结果 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄差别较大，$^{206}Pb/^{238}U$ 基本一致（图 3）。定年结果及部分微量元素含量见附表 1。锆石的 Th/U 值集中于 0.3~0.6，平均 0.42，显示出明显的岩浆锆石的特征（Th/U＞0.4）（吴元保等，2004；许智等，2024）。H2127-1 共测试 29 个点，其中 10 个测点数据分析偏离谐和线，可能受到了后期热事件的影响，不参与年龄计算，谐和度大于 90%的 19 个点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 435.1±1.7 Ma（MSWD=2.3）。

苏海图二长花岗岩（H2129-1）的锆石大部分为无色，晶体自形，呈短柱状–等轴状，少量淡黄褐色锆石，自形程度差，裂隙较多，透反射光下显示出明显的多层环状裂隙。锆石颗粒约 100~150 μm，透明锆石 CL 图像显示岩浆振荡环带和扇形分带明显，黄褐色锆石虽然也发育岩浆振荡环带，但总体颜色较暗，核部呈斑杂色。定年结果及部分微量元素含量见附表 1。锆石的 Th/U 值集中于 0.2~0.5，平均 0.42，较黑海北和加东地区变化不大，显示出明显的岩浆锆石的特征（Th/U＞0.4）（吴元保等, 2004）。H2129-1 共测试 29 个点，谐和度大于 90%只有 10 个点，$^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 432.8±2.2 Ma（MSWD=0.97）。其他 19 个测点为黄褐色锆石，谐和度较差，远离谐和曲线，说明锆石受到后期热事件影响较大，甚至出现了 265 Ma 的晚古生代年龄，228 Ma 的印支期及 140 Ma 的燕山期岩浆年龄，其年龄值应该是受到后期热事件的影响，不能准确反映岩浆活动的时间。各岩体锆石 U-Pb 加权平均年龄见图 4。

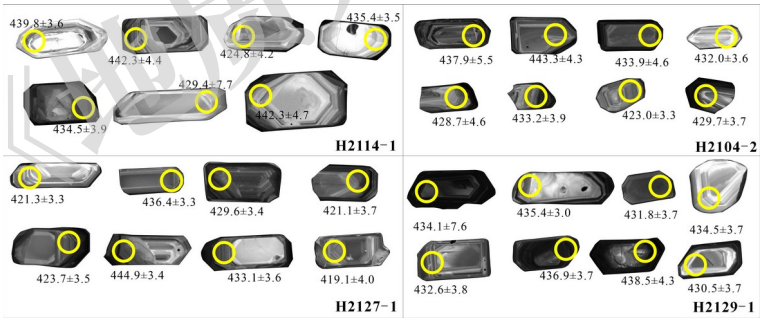



图 3 测试样品锆石阴极发光照片及点位年龄（黄色测点直径统一为 30 μm）

Fig. 3 Cathodoluminescence images of zircons from the analyzed samples and spot ages (the diameter of all yellow analytical spots is 30 μm)

《地质力学学报》预出版

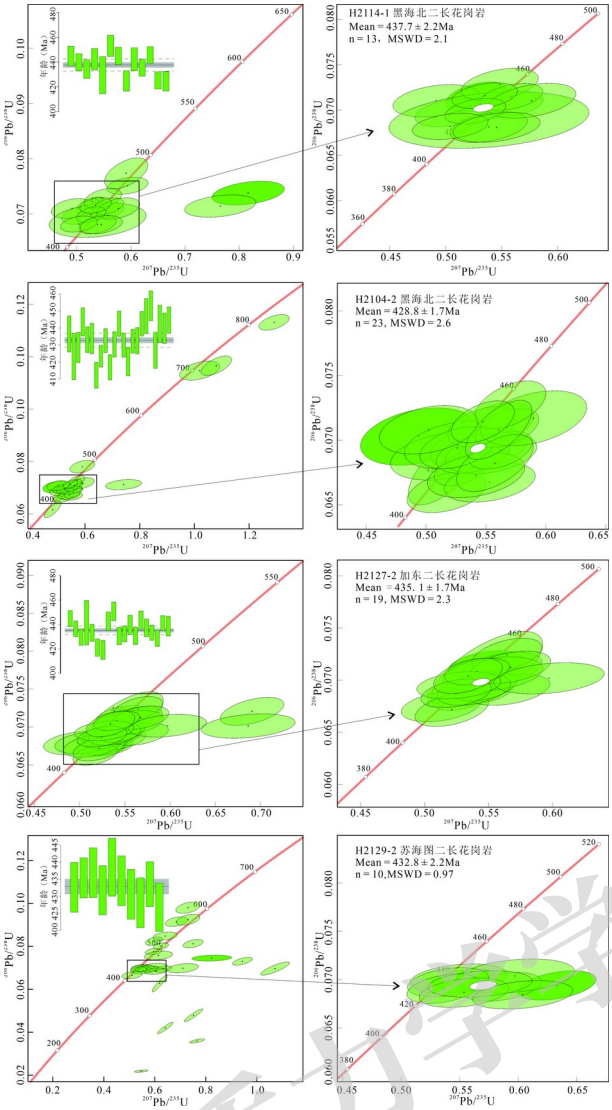



图 4 昆仑河地区二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄

Fig. 4 Zircon U–Pb ages of monzogranites from the Kunlun River area

### 3.2 地球化学特征

昆仑河地区主要花岗岩体的全岩主量元素分析数据见附表 2。

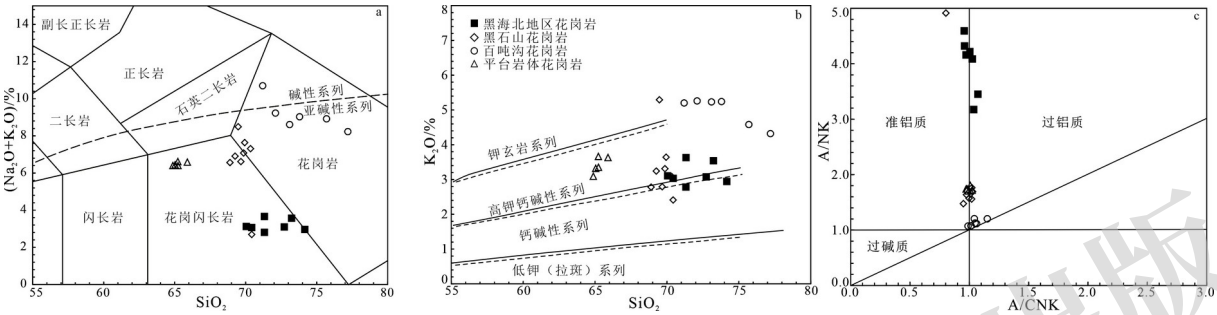
黑海北、加东和苏海图地区的二长花岗岩的地球化学特征十分相似，后文将统一进行讨论，不再分述。为进一步探讨研究区花岗岩的成因及其构造意义，选取东昆仑地区早古生代花岗岩作为区域对比对象，例如五龙沟地区百吨沟花岗岩，其锆石 U-Pb 年龄为 417.9 Ma（韩玉等，2024）。通过对比分析不同岩体的主量元素、微量元素及稀土元素特征，以期揭示研究区花岗岩的岩浆来源及其形成的构造背景。

本研究样品具有较高的 $SiO_2$（70.05%~74.16%），较低的全碱（$Na_2O+K_2O$）含量（2.81%~3.66%），$Na_2O$ 为 0.02%~0.04%，$K_2O$ 为 2.78%~3.63%，平均为 3.16%，导致 $K_2O/Na_2O$ 显著较高，91~135。在 TAS 岩石分类图解上，样品点主要分布于花岗闪长质组成区，并向花岗质组成区过渡（图 5a），结合其高 $SiO_2$ 含量及岩相学特征，显示出明显的酸性岩浆组成特征，并表现出高钾钙碱性系列特征（图 5b）。样品的 $Fe_2O_3T$ 含量较低（1.47%~2.44%），MgO 的变化为 0.21%~0.51%；$Al_2O_3$ 为 12.68%~14.71%，CaO 含量为 4.52%~6.54%，A/CNK 为 0.96~1.07，

《地质力学学报》预出版

在 A/NK-A/CNK 图解中都落在了准铝质和过铝质区域过渡部位（图 5c）。此外，样品 MnO 含量为 0.56%~1.56%，明显高于正常花岗岩范围，这是由于岩体遭受硅化、黏土化等热液蚀变作用所致。

综上，本研究样品整体表现为高钾钙碱性系列并具有弱过铝质特征，二长花岗岩具有典型的高钾钙碱性弱过铝质花岗岩地球化学特征。其主量元素特征与区域上东昆仑造山带同期早古生代花岗岩相比具有一定差异。本研究样品受 $Na_2O$ 含量低的影响，总体表现出较低的全碱（$Na_2O+K_2O$）含量、和明显较高的 A/NK 含量。与东段同时代的百吨沟岩体相比，上述两个特征更为明显，百吨沟岩体投图基本位于准铝质、过铝质、准碱质三者的交界部位，三叠纪岩体（黑石山、平台岩体）A/CNK 值与本研究样品、百吨沟样品基本一致，均为 1.0 左右，A/NK 则介于他们之间。




a—TAS 图解（据 Le Bas et al.，1986 修改）；b—$SiO_2$-$K_2O$ 图解；c—A/CNK-A/NK 图解（据 Peccerillo and Taylor，1976 修改）

图 5 昆仑河地区花岗岩 TAS 图解与二长花岗岩主量元素图解

Fig. 5 TAS diagram and major-element diagrams for monzogranites from the Kunlun River area

(a) TAS diagram (modified from Le Bas et al., 1986); (b) $SiO_2$-$K_2O$ diagram; (c) A/CNK-A/NK diagram (modified from Peccerillo and Taylor, 1976)

昆仑河地区早古生代花岗岩的稀土元素总量（ΣREE）为 212~256 ppm，为便于比较稀土元素分馏特征，稀土元素配分采用球粒陨石标准化方法，标准化值引自 Sun and McDonough（1989）。其中，轻重稀土分馏参数 $(La/Yb)_n$ 和 $(Gd/Yb)_n$ 分别表示球粒陨石标准化后的 La/Yb 和 Gd/Yb 比值，Eu 异常采用公式：

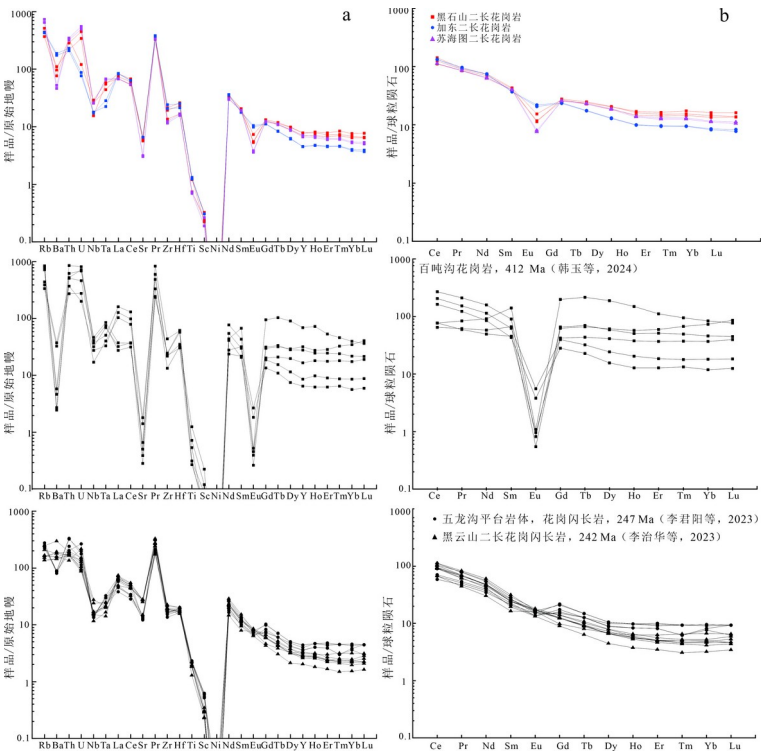
$$\delta Eu = Eu_n / (Sm_n \times Gd_n)^{1/2} \quad (1)$$

其中下标 n 表示球粒陨石标准化值。

$(La/Yb)_N$ 比值为 8.78~21.05，LREE/HREE 比值为 8.15~14.13，显示出轻稀土与重稀土之间存在较为显著的分馏。进一步分析表明，$(La/Sm)_N$ 比值为 3.56~4.76，而 $(Gd/Yb)_N$ 比值为 1.59~2.85，说明重稀土元素的配分模式相对平缓。所有样品均表现出明显的 Eu 负异常（$\delta Eu$ = 0.23~0.73），其中 $\delta Eu$ 采用球粒陨石标准化数据计算（Sun and McDonough, 1989）。在稀土元素球粒陨石标准化配分图上，呈现轻稀土元素（LREE）相对富集、重稀土元素（HREE）相对平缓的右倾型曲线配分模式。昆仑河地区早古生代花岗岩稀土元素特征总体上与百吨沟花岗岩比较相似，具有明显的 Eu 负异常，稍强的轻重稀土分馏，三叠纪的黑石山岩体和平台岩体最明显不同在于没有明显的 Eu 负异常。

在原始地幔标准化蛛网图上（图 6），昆仑河地区早古生代花岗岩具有以下特征：大离子亲石元素（LILEs）Rb、K 相对富集；Sr、Ba 相对亏损；高场强元素（HFSEs）Nb、Ta、Ti、P 明显亏损。样品的 Nb/ Ta 比 值为 4.99~14.31 （平均值 9.03），低于地幔平均值（17.7~17.5）（Sun and Mc Donough, 1989），在地壳值（8~12）（Rudnick and Gao, 2014）范围内。与百吨沟岩体微量元素特征十分相似，三叠纪的黑石山岩体和平台岩体微量元素特征主要表现在 Ta 元素亏损比较明显。

《地质力学学报》预出版




a—微量元素原始地幔标准化蛛网图；b—稀土元素球粒陨石标准化配分图（标准化数据引自 Sun and McDonough, 1989）

图 6 昆仑河地区微量和稀土元素图解

Fig. 6 Trace-element and rare-earth-element diagrams for samples from the Kunlun River area

(a) Primitive mantle-normalized trace element spider diagram; (b) Chondrite-normalized REE distribution pattern (Normalization values are from Sun and McDonough,1989 )

# 4 讨论

## 4.1 岩石类型和成因

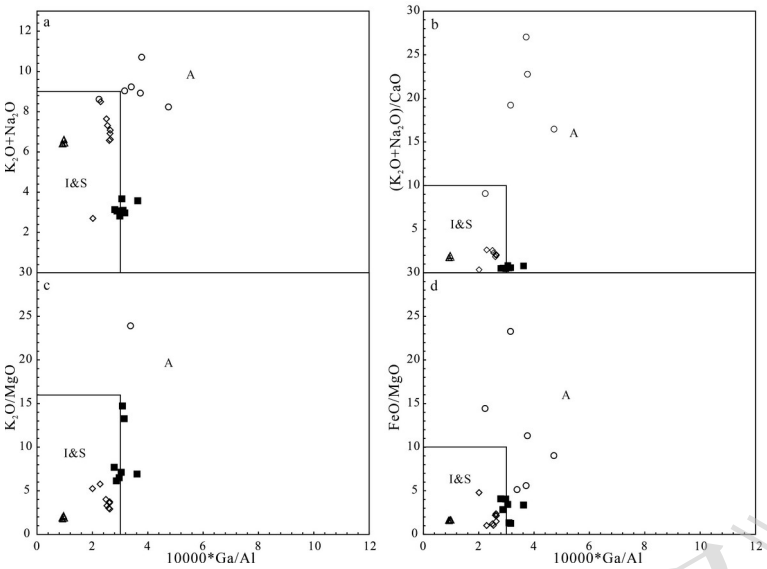
昆仑河地区二长花岗岩具有高 $SiO_2$（70.05%~74.16%）、富 $K_2O$（2.78%~3.62%）和 CaO（4.52%~6.54%），低 MgO（0.21%~0.51%）、$Na_2O$（0.02%~0.04%）、$TFe_2O_3$（1.47%~2.52%）及 $TiO_2$（0.16%~0.30%）、$P_2O_5$（0.05%~0.08%）。其 $T_{FeO}$/MgO 值为 3.42~7.13（平均 5.44），10000×Ga/Al 值为 2.79~3.62（平均 3.07），整体表现出明显的高分异花岗岩特征。岩体高 CaO 含量可能反映源区含变基性岩成分或岩浆演化过程中混染了基性地壳物质；低 $Na_2O$ 则与岩浆分异中斜长石分离有关，高 $K_2O$ 提示钾长石晚期结晶或源区富钾特征。

主量元素特征显示，昆仑河地区二长花岗岩源自地壳部分熔融，并经历高度分异演化。样品 Nb/Ta 值显著低于原始地幔，接近大陆地壳范围，且发育～739Ma 继承锆石，共同指示岩浆源区以中－上地壳古老基底物质部分熔融为主，无明显幔源物质混合。

在花岗岩类型判别投图中（图 7），样品落入 I 型向 A 型花岗岩过渡区域，与主量元素分析结果一致。镜下观察未见典型富铝矿物，铝饱和指数 A/CNK（0.96~1.07）处于过渡区，同时 Y 与 Rb 呈正相关，表明该岩体为高分异 I 型花岗岩。相比之下，东昆仑百吨沟岩体表现出典型 $A_2$ 型特征(韩玉等, 2024)，显示两者在岩浆来源及构造指示意义上存在差异。

《地质力学学报》预出版

吴福元等（2007）明确指出，高分异花岗岩的成因类型确定存在较大困难，其地球化学特征可能同时具有 I 型、S 型甚至 A 型花岗岩的部分特征，这是因为高度分异的岩浆在演化过程中，原始岩浆的源区信息被强烈改造，导致其地球化学特征趋同。例如，高分异的 I 型花岗岩可能表现出类似 A 型花岗岩的高 Ga/Al 比值和高 Zr+Nb+Ce+Y 含量，也会出现类似 S 型花岗岩的强过铝质特征。因此，仅凭 Whalen 判别图难以准确区分高分异 I 型与 A 型花岗岩，需结合矿物学、同位素及区域地质资料综合判断。




A—A 型花岗岩区；I&S—I 型－S 型花岗岩区

a—$K_2O+Na_2O$–10000×Ga/Al； b—$(K_2O+Na_2O)/CaO$–10000×Ga/Al； c—$K_2O/MgO$–10000×Ga/Al； d—FeO/MgO–10000×Ga/Al

图 7 昆仑河地区早古生代二长花岗岩 A 型花岗岩判别图，据 Whalen 等（1987）修改

Fig. 7 Discrimination diagrams for A-type granites of the Early Paleozoic monzogranites from the Kunlun River area (modified from Whalen et al., 1987)

(a) $K_2O+Na_2O$–10000×Ga/Al; (b) $(K_2O+Na_2O)/CaO$–10000×Ga/Al; (c) $K_2O/MgO$–10000×Ga/Al; (d) FeO/MgO–10000×Ga/Al

A–A-type granite field; I&S–I–type–S-type granite field

微量元素分析显示，样品在原始地幔标准化蛛网图上 Ba、Sr、Eu 元素亏损明显，一般认为 Ba 亏损是由于钾长石或黑云母结晶分异导致，Sr 亏损是由于斜长石（主）、磷灰石结晶分异导致，Eu 负异常是由于斜长石结晶分异导致。三者共同指示岩浆经历了以斜长石、钾长石为主的多阶段分离结晶作用，最终形成低 Ba、低 Sr、具显著 Eu 负异常的高分异熔体。

本研究样品在原始地幔标准化蛛网图上表现出大离子亲石元素（Rb、K）明显富集，而高场强元素（Nb、Ta、Ti、P）显著亏损的特征，该组合通常被认为与俯冲带流体交代作用有关，指示岩浆源区可能受到俯冲板片释放流体的改造。轻稀土显著富集（$(La/Yb)_N$=8.78~21.05）、重稀土平坦（$(Gd/Yb)_n$=1.59~2.85），表明熔融时无石榴子石残留（低压熔融环境），岩浆源区可能位于中-上地壳层次。

Tao et al.（2026）提出地球动力学背景的变化可以改变俯冲带与碰撞后环境中岩浆的氧化还原状态和含水量，最终来影响岩浆分异。俯冲环境下，岩体具有低的 $TiO_2$、高 Nb/Ta 比值和亏损的 Zr-Hf 含量，形成于氧化环境，代表了富水熔融，高 CaO、低 $K_2O$ 和 $K_2O/CaO$ 比值熔体。而形成于后碰撞环境的岩体具有高的 $TiO_2$ 含量、低 Nb/Ta 比值和富集 Zr-Hf 含量，形成于还原条件，代表了贫水熔融，低 CaO、高 $K_2O$ 含量，高的 $K_2O$、CaO 比值的熔体。昆仑河地区二长花岗岩整体表现为

《地质力学学报》预出版

低 $TiO_2$、高 CaO、低 $K_2O$ 及低 $K_2O/CaO$ 比值，并伴随 HFSE 系统性亏损，指示其岩浆来源受到俯冲相关流体交代的显著影响；而其 Nb/Ta 比值落入大陆地壳范围，则进一步揭示出明显的壳源物质参与。与东昆仑东段同期百吨沟等早古生代岩体相比，后者多呈现高 $K_2O$、高 $K_2O/CaO$ 及 HFSE 相对富集等典型后碰撞 A 型花岗岩特征，而昆仑河岩体则整体偏富 Ca、低碱，显示其尚未进入高温贫水的伸展熔融阶段；另一方面，与区域三叠纪岩体相比，其在元素分配模式及分异路径上亦存在显著差异，反映出不同构造旋回控制下的岩浆演化机制。综合来看，昆仑河地区二长花岗岩并不代表典型俯冲弧或成熟后碰撞环境，而更可能形成于俯冲体系衰退向后碰撞伸展过渡的构造转换阶段记录了原特提斯洋闭合过程中深部物质与热结构重组的早期岩浆响应。

综合判断，昆仑河地区二长花岗岩应属高分异 I 型花岗岩，岩浆演化过程中经历了多阶段结晶分异作用，整体表现出以壳源物质为主、未显示明显幔源物质混合特征，并可能受到俯冲相关流体作用的影响，代表了俯冲体系衰退向后碰撞伸展过渡的构造转换阶段的岩浆活动。吴福元等（1999）在研究东北地区显生宙花岗岩时提出的“I-分异型”概念与本研究样品特征高度吻合：样品镜下未见典型富铝矿物（如白云母、石榴子石、堇青石），铝饱和指数 A/CNK（0.96~1.07）处于准铝质-弱过铝质过渡区，不支持 S 型成因；而较低的 Nb/Ta 比值（平均 9.03，介于地壳值 8~12 之间）、古老继承锆石的出现（~739Ma）以及相对较低的锆石饱和温度，与典型 A 型花岗岩的高温、贫水、幔源物质参与特征不同。

### 4.2 构造背景

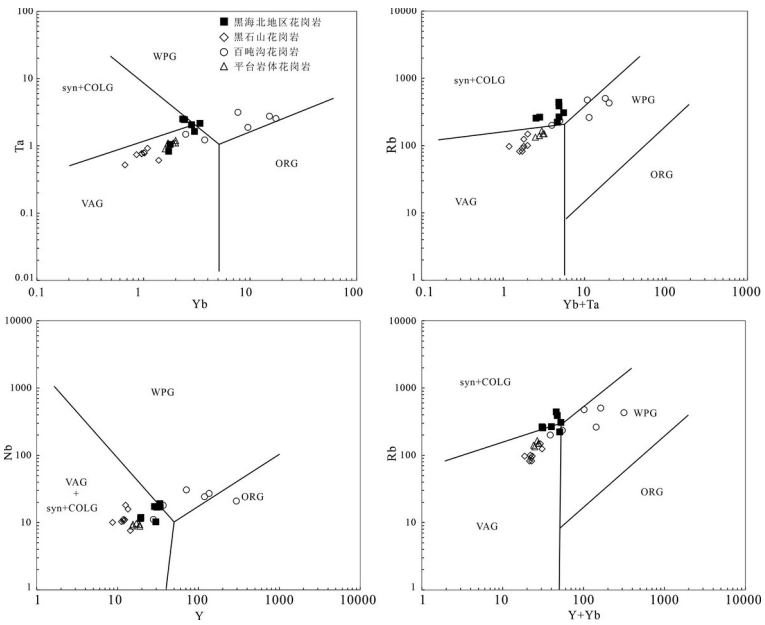
虽然本研究样品在图 7 中表现出向 A 型花岗岩过渡的特征，但并未完全落入 A 型花岗岩区域，暗示其可能形成于俯冲-碰撞向伸展转换的过渡环境，而非典型的后碰撞伸展背景。吴福元等（2007）指出，花岗岩形成的构造环境与其岩浆源区和热源条件密切相关：俯冲带环境主要产生 I 型花岗岩，同碰撞环境以 S 型为主，而碰撞后伸展环境则以 A 型或高分异 I 型为主。为验证本研究样品的构造环境归属，进一步采用 Pearce 等（1984）的构造环境判别图（图 8）进行分析。

在花岗岩构造环境判别图上（图 8），本研究样品主要落入同碰撞花岗岩（syn-COLG）和岛弧花岗岩（VAG）之间的过渡区域。表明其形成与俯冲—碰撞相关的构造环境密切相关。相比之下，东昆仑东段早古生代百吨沟岩体大部分样品落在了板内花岗岩（WPG）区域，显示出一定的 A 型花岗岩特征，通常被认为形成于后碰撞伸展背景。

在造山带形成过程中，在早期的碰撞/俯冲阶段，会形成增厚的下地壳，这些地壳可能是镁铁质的，成为 I 型源区；也可能是沉积岩来源的，成为 S 型源区。下地壳岩石在高压下发生了榴辉岩化或麻粒岩化变质，变得“干硬”，但随着俯冲板块释放的富水、富挥发分（如 K、Rb、Ba、LREE、Pb 等）流体对上覆地幔楔和下地壳进行了广泛的“混染”或交代作用，改变了它们的元素和同位素组成。到后期的伸展垮塌阶段，挤压环境转换为伸展环境，岩石圈的伸展减薄导致热的软流圈地幔上涌，上涌的地幔为先前被流体改造过的、已经“榴辉岩化/麻粒岩化”的增厚下地壳提供了巨大的热量，在高温下，这些贫水（因为已经脱水变质过）的下地壳物质发生部分熔融。正是这种“贫水”和“高温”的条件，使得熔体具有了 A 型花岗岩的特征（富含高温元素如 Nb、Ga、Zr、Y、REE 等）。

一般在造山带的碰撞阶段以产生 S 型花岗岩为主，而后碰撞阶段以 I 型/A 型花岗岩为主，考虑到本研究样品类型判别位于 I＆S 型与 A 型花岗岩过渡区域，且经历了俯冲带流体的混染，该岩体可能是早古生代原特提斯洋闭合后的陆-陆碰撞事件的响应，形成于从挤压造山向伸展垮塌的构造转换的构造背景下。

《地质力学学报》预出版




WPG—板内花岗岩；VAG—火山弧花岗岩；ORG—洋中脊花岗岩；syn-COLG—同碰撞花岗岩

a—Ta–Yb；b—Rb–(Yb+Ta)；c—Nb–Y；d—Rb–(Y+Yb)

图 8 黑海北地区早古生代二长花岗岩构造环境判别图，据 Pearce 等（1984）修改

Fig. 8 Tectonic discrimination diagrams for the Early Paleozoic monzogranites from the northern Heihai area (modified from Pearce et al., 1984)

(a) Ta–Yb diagram; (b) Rb–(Yb+Ta) diagram; (c) Nb–Y diagram; (d) Rb–(Y+Yb) diagram

WPG–Within Plate Granite; VAG–Volcanic Arc Granite; ORG–Ocean Ridge Granite; syn-COLG–Syn-Collision Granite

### 4.3 东昆仑地区构造转换时限

#### 4.3.1 东昆仑东段构造转换时限

精确厘定造山带构造转换的时间，对于揭示造山过程动力学机制、重建造山带完整演化历史、约束古地理与板块复原具有重要的意义，同时在区域地质调查、相关矿产资源潜力评价、造山带内构造单元划分中发挥重要的指导作用。

刘卫东等（2022）研究显示，442.3Ma 时，东昆仑造山带仍处于俯冲碰撞构造环境。王秉璋等（2023）认为昆仑河地区埃达克质侵入岩可能是俯冲洋壳熔融形成的埃达克质岩浆在上升过程中与同期古老大陆地壳来源岩浆发生了混合后形成的，而晚志留世埃达克质侵入岩可能是加厚下地壳部分熔融形成，认为东昆仑在晚奥陶世（446 Ma）还存在大洋板片的俯冲作用。张亮等（2021）在东昆仑造山带东段发现一套早泥盆世双峰式侵入岩岩体组合，其形成于早泥盆世（410 Ma），基性岩浆在侵位过程中捕获了形成于晚奥陶世至中-晚志留世( 428~445 Ma) 的锆石，基性端元来自于 EMII 型富集地幔并遭受地壳混染，酸性端元为低压高温条件下长英质地壳的部分熔融，认为此时原特提斯洋已经完成闭合，处于后碰撞伸展环境。

此外，区域上还发育具有富集地幔的特征的 I-S 过渡型花岗岩（407 Ma）（刘彬等，2012），进一步表明东昆仑地区在志留纪晚期至泥盆纪早期已进入后碰撞伸展阶段。韩玉等（2024）对五龙沟金矿集区百吨沟岩体（417.9 Ma）的研究也认为，东昆仑东段在晚志留世时已经进入后碰撞伸展阶段。在构造转换时间约束方面，刘彬等（2013）获得东昆仑昆中缝合带内的胡晓钦镁铁质岩石结晶年龄为 438 Ma，地球化学特征指示岩石的形成过程受到地壳混染的影响非常小，具有类似岛弧玄武岩特征的地球化学组成，该年龄明显早于东昆仑与碰撞作用相关的榴辉岩相变质峰期年龄（428 Ma）以及中压角闪岩相变质峰期年龄（427 Ma），表明其可能代表东昆仑洋壳俯冲作用最晚

《地质力学学报》预出版

期的岩浆记录。

上述研究成果进一步精确限定了伸展阶段开始的时间。李斌等（2025）认为东昆仑地区最晚在早志留世（440 Ma）开始进入同碰撞阶段，在 425~427 Ma 由碰撞阶段向后碰撞伸展阶段转换。国显正等（2019）获得东昆仑东部哈日扎花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 423.8±4.3 Ma，并指出其具有 I 到 S 过渡型花岗岩特征，认为是区域后碰撞伸展构造背景下的产物。综上，东昆仑东段进入后碰撞伸展阶段的时间可较为可靠地限定在 424~427 Ma。

#### 4.3.2 东昆仑西段构造转换时限

相比东昆仑东段，东昆仑西段地区相关研究相对较少，对构造转换时间尚缺乏统一认识。韩志辉等（2021）获得祁漫塔格乌兰乌珠尔二长花岗岩侵位时代为 422.5 Ma，地球化学特征为高分异 I 型花岗岩，构造背景为原特提斯洋向柴达木地块南缘俯冲碰撞拼贴后的伸展环境。冯李强等（2026）获得昆仑河地区的二道沟、五路沟西和加祖它士沟西岩体侵位时代分别为 423.6 Ma、427.9 Ma 和 413.8 Ma，认为他们是形成于原特提斯洋已经闭合后的伸展环境的 S 型花岗岩。上述研究表明，东昆仑西段在志留纪晚期已经出现明显的后碰撞伸展岩浆活动。此外，东昆仑西段胡热果勒地区发育一套 S 型花岗岩，其锆石 U-Pb 年龄为 435~442 Ma，被认为形成于原特提斯洋闭合过程中地壳部分熔融作用的产物(Li et al., 2013)。同时，祁漫塔格地区花岗质岩浆活动年龄集中在 420~450 Ma，代表该区早古生代重要岩浆事件阶段。上述研究结果表明，东昆仑西段在晚志留世前后已进入构造转换阶段，其时间可能略早于东段。

本研究获得东昆仑西段昆仑河地区二长花岗岩的侵位时代为 428.8~437.7 Ma。其地球化学特征显示出明显的构造转换期岩浆活动特征，因此可作为限定东昆仑西段由挤压构造体制向伸展构造体制转变的重要时间约束。结合已有研究成果，东昆仑西段进入伸展阶段的时间可限定在约 423~437Ma 之间，其中约 430 Ma 左右可能代表构造体制转换的重要阶段。

#### 4.3.3 东、西段构造转换的同步性分析

综合前人研究成果及本次研究获得的年代学数据，东昆仑东段构造转换时间主要集中在 424~427Ma，而西段相关岩浆活动年龄为 428~437Ma。两者在时间上存在 1~13Ma 的差异，但整体上均集中在晚志留世（约 420~440Ma）这一时期。这种差异反映了不同构造单元对区域构造应力场变化的响应可能存在一定的时间差，从而导致岩浆作用在空间上的阶段性差异。因此，西段可能由于受区域深大断裂构造带控制，其岩浆响应略早于东段。区域研究表明，东昆仑地区在 420~440 Ma 期间广泛发育后碰撞花岗岩、双峰式岩浆组合及相关构造—变质事件，指示区域构造环境由挤压体制逐渐向伸展体制转变，类似的后碰撞伸展背景也在中亚造山带南缘的晚泥盆世 A 型花岗岩中被识别，表明不同时期造山带的构造转换具有一定的相似(Wang et al., 2023)。已有研究指出，东昆仑早古生代岩浆活动具有阶段性特征，其中约 430Ma 为重要岩浆活动阶段，代表原特提斯洋俯冲体系向后碰撞伸展环境过渡的重要时期。相邻的祁漫塔格地区同样记录了该时期强烈的岩浆活动，其河流砂锆石年龄谱也显示出显著的早古生代峰值，进一步证实了该期构造-岩浆事件在整个东昆仑造山带的普遍性(Li et al., 2013)。

需要注意的是，东、西段构造转换时间的对比受到年龄误差、样品代表性和构造位置差异的影响。本研究年龄的 2σ 误差约为±3.4-4.4Ma，西段年龄的实际范围约为 425~434Ma；而东段引用年龄的误差未在原文中统一给出，但通常也在±2-5Ma 之间。若考虑误差范围，两段的年龄区间存在较大重叠，可以认为在误差范围内基本同步。

另一方面，西段昆仑河地区靠近昆中断裂（原特提斯缝合带的重要边界），可能更早响应区域应力场的转变；而东段远离缝合带，响应可能存在一定滞后。这可能是造成西段年龄略早于东段（约 3-5Ma）的原因之一。总体而言，东昆仑东、西段在晚志留世（约 430Ma 前后）基本同步进入构造转换阶段，反映了原特提斯洋闭合后区域构造体制的整体转变。

《地质力学学报》预出版

因此，东昆仑地区的构造转换更可能表现为一个持续的演化过程，而非单一时间点。本次获得的 428.8~437.7Ma 年龄记录了东昆仑西段构造转换阶段较早期的岩浆响应，与东段约 424~427 Ma 的后碰撞岩浆活动在区域尺度上具有良好的对应关系。总体而言，东昆仑东段与西段在晚志留世前后基本进入构造转换阶段，反映了原特提斯洋演化背景下区域构造体制的整体转变。

### 4.4 东昆仑西段构造转换与成矿作用

东昆仑造山带是一个复杂的微陆块拼贴带，其演化经历了多期次的板块俯冲、碰撞及陆内调整，成矿类型复杂，矿产资源丰富,是我国重要的多金属成矿带之一。东昆仑东段的中生代斑岩型铜钼矿、矽卡岩型铁多金属矿、脉状金矿和脉状银铅锌矿，成矿时代集中在中-晚三叠世（220~240 Ma）（陈国超等，2020），这些矿床的形成与古特提斯洋构造体制从俯冲挤压到后碰撞伸展的转换密切相关，构造转换是该区巨型岩浆-热液成矿体系发育的关键动力学条件（井国正等 2023）。由此推测，对于成矿时代属于早古生代的西段地区，构造体制转换对成矿的控制很可能具有相似性，可作为评价西段成矿潜力的重要参照。

近年来在东昆仑西段昆仑河以北、昆中断裂以南的昆南成矿带万保沟-大干沟成矿远景区以西地区先后发现了大量的金矿(床)点和矿化信息，东西长度近 150km，有望形成一条重要的的金矿（化）带，具有巨大的找矿前景，目前除了黑海北金矿提交金资源量近 20 吨以外，其它地区尚未取得找矿的重大突破（焦和等，2022）。此外，有报道在昆仑河地区还发现了多处钨锡矿点，成矿与早泥盆世花岗岩关系密切（康继祖等，2014），显示该地区可能发育有一套岩浆-热液多金属系统。

研究区位于昆中断裂带与昆南断裂带之间，该带为褶皱基底，这与昆北带、昆中带均不同。出露的地层主要有金水口岩群、万宝沟群、沙松乌拉组、纳赤台群、赛什腾组、哈拉郭勒组、马尔争组等。带内构造变形强烈，主要表现为昆中断裂南侧大型韧性剪切带发育，同期或后期均有较多脆性断层叠加，成矿条件极为有利（李金超，2017）。该地区位于原/古特提斯构造演化叠加地区，岩浆岩从加里东期（晚志留世）到华力西期（早泥盆世）、燕山期均有一定程度分布，因此也可能存在加里东期构造转换成矿和印支期叠加成矿两期成矿作用，参考东昆仑东段的成矿规律认识，在西段地区的地质找矿工作应以成矿系统的理念为指导，在依据地-物-化-遥异常寻找新的矿床的同时，还要开展“就矿找矿”工作，在已发现矿床周围寻找成矿系统中其他类型的矿床。

值得注意的是，本研究识别的晚志留世构造转换期岩浆活动（428~437 Ma）与区域上黑海北金矿在空间上密切共生（图 1b）。在后碰撞伸展构造体制下，昆中断裂等深大断裂重新活动，为深部岩浆上侵和热液流体运移提供了通道；伸展阶段发育的张性破裂系统则为矿质沉淀准备了空间。同时，该期高分异岩浆的侵位不仅直接提供了热驱动力，其分异过程中富集的挥发分和成矿元素也可能进入热液系统，成为成矿物质的重要来源。吴福元等（2017，2023）指出，高分异花岗岩与 W、Sn、Nb、Ta 等稀有金属成矿作用关系密切。昆仑河地区二长花岗岩作为高分异 I 型花岗岩，其高度分异的特征显示该地区具有良好的稀有金属成矿潜力。总的来看，晚志留世由挤压向伸展的构造转换，从热源、流体通道、成矿物质和容矿空间几个方面，对区域金及稀有金属成矿起到了控制作用。今后需要进一步厘清该期岩体与矿体在时间和空间上的具体联系，查明含矿流体的性质和演化过程，才能更准确地评价西段早古生代构造转换成矿的规模与找矿前景。

## 5 结论

1. 昆仑河地区早古生代二长花岗岩侵位时代为 428.8~437.7 Ma。该岩体为来源于中-上地壳古老基底物质部分熔融形成的高分异 I 型花岗岩，整体表现出以壳源物质为主的地球化学特征，并经历了多阶段结晶分异作用，未显示明显幔源物质混合迹象；岩浆活动可能受到俯冲相关流体作用影响

《地质力学学报》预排版

形成于原特提斯洋闭合后的后碰撞向伸展转换阶段。

2. 本研究获得的二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄结果为东昆仑西段昆仑河地区由挤压造山向伸展构造体制转换提供了新的年代学约束。该时间与前人报道的东昆仑东段同期花岗岩年代基本一致，表明东昆仑造山带东西段构造转换时间基本同步，并可能在志留纪时期整体进入后碰撞伸展阶段。

**致谢：**野外工作得到青海省柴达木综合地质矿产勘查院（青海省盐湖地质调查院）王亮、权朝军等人的大力协助；测试工作过程中得到自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室王森副研究员的帮助；写作过程中与中国地质科学院地质力学所陈正乐研究员、陈柏林研究员、王晓虎副研究员充分交流，提供思路；作者在此一并表示衷心的感谢！

**作者贡献声明：**祖木热提·阿布力依米提负责论文构思、撰写和图件绘制；焦和负责数据分析和技术手段的实践应用和绘图；王永，论文资助项目负责人，负责论文总体设计和质量把控；黄国彪负责数据分析、研究方法和审阅。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author’s Contributions: Zumureti Abuliyimiti conceived the study, drafted the manuscript and drew the figures; Jiao He performed data analysis, applied technical methods and assisted with plotting; Wang Yong, the principal investigator of the funding projects, oversaw the overall design and quality control of this paper; Huang Guobiao carried out data analysis, designed research approaches and reviewed the manuscript. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

**利益冲突说明：**本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

《地质力学学报》预出版

## References

A C Y, Wang Y Z, Ren J Q, et al., 2003. Disintegration of the Wanbaogou Group and discovery of Early Cambrian strata in the East Kunlun area[J]. Geology in China, 30(2): 199-206. (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[J]. Earth Science Frontiers, 27(4): 033-048. (in Chinese with English abstract)

Ding Q F, Song K, Zhang Q, et al., 2019. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic constraints on the petrogenesis of the Late Silurian Shidonggou granite from the Wulonggou area in the Eastern Kunlun Orogen, Northwest China[J]. International Geology Review, 61(13): 1666-1689.

Dong Y, Sun S, Santosh M, et al., 2021. Central China orogenic Belt and a Malga Mation of East Asian continents[J]. Gondwana Research, 100:131-194.

Dong Y P, He D F, Sun S S, et al., 2018. Subduction and accretionary tectonics of the East Kunlun orogen, western segment of the Central China Orogenic System[J]. Earth Science Reviews, 186: 231-26.

Feng C Y, Li D S, Wu Z S, et al., 2010. Major types, time-space distribution and metallogeneses of polymetallic deposits in the Qimantage metallogenic belt, Eastern Kunlun area[J]. Northwestern Geology, 43(4): 10-17. (in Chinese with English abstract).

Feng C Y, Zhang D Q, Qu W J, et al., 2006. Re-Os isotopic dating of pyrite in the Tuolugou SEDEX cobalt(gold) deposit, Golmud, Qinghai Province[J]. Acta Geologica Sinica, 80(4): 571-576. (in Chinese with English abstract)

Feng L Q, Shen R W, Peng Y W, et al., 2025. Genesis of Late Silurian to Early Devonian S-type granites in Kunlun River area, Qinghai Province and the tectonic evolution of the Proto-Tethys Ocean[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science&Technology Edition), 53(0): 1-19. (in Chinese with English abstract)

Fu L B, Bagas L, Wei J H, et al., 2022. Growth of Early Paleozoic continental crust linked to the Proto-Tethys subduction and continental collision in the East Kunlun orogen, northern Tibetan Plateau[J]. GSA Bulletin, 135(7-8): 1709-1733.

Gao X F, Xiao P X, Xie C R, et al., 2010. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and geological significance of Bashierxi granite in the eastern Kunlun area, China[J]. Geological Bulletin of China, 29(7): 1001-1008. (in Chinese with English abstract)

Guo X Z. 2020. The intermediate-acid magmatism and polymetallic mineralization in East Kunlun, Paleo-Tethys[D]. China University of Geosciences (Wuhan). (in Chinese with English abstract)

Guo X Z, Jia Q Z, Li J C, et al., 2019. The forming age and geochemistry characteristics of the granodiorites in Harizha， East Kunlun and its tectonic significance[J]. Journal of Geomechanics, 25(2): 286-300. (in Chinese with English abstract)

Han Y, Wang Q L, Xie H L, et al., 2024. Geochemistry Zircon U-Pb chronology and Hf isotopes of the Baidungou granite from the East Kunlun orogen and their implications[J]. Acta Petrologica et Mineralogica. 43(06): 1448-1464. (in Chinese with English abstract)

Han Z H, Sun F Y, Tian N, et al., 2021. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and geological implications of the Early Paleozoic Wulanwuzhuer granites in the Qi Mantag, East Kunlun, China[J]. Earth Science, 46(1): 13-30. (in Chinese with English abstract)

Hu Z C, Liu Y S, Gao S, et al., 2012. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and Jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 27: 1391–1399.

Huang G B, Ma W H, Li C Y, et al., 2021. Geological characteristics and prospecting prospects of Heihaibei Gold Deposit in Kunlunhe Area, Qinghai Province[J]. Gold, 42(6): 26-30. (in Chinese with English abstract)

Jia X H, Wang Q, Tang G J. 2009. A-type Granites: research progress and implications. Geotectonica et Metallogenin. 33(03): 465-480. (in Chinese with English abstract)

Jiao H, Kang J Z, Huang G B, et al., 2022. Magmatism, metallogenic characteristics, and prospecting prediction for gold deposits in the north of Kunlun River area, Qinghai, China[J]. Journal of Geomechanics, 28(3): 383-405. (in Chinese with English abstract).

Kang J Z, Xu B B, Xue W W, 2014. Metallogenic characteristics of tungsten-tin deposits and their relationship with Early Devonian granites in Kunlun River area, Qinghai Province[J]. China Mining Magazine. 23(12): 71-73+98. (in Chinese with English abstract)

Le Bas, M J, Le Maitre, R W, Streckeisen A. et al., 1986. A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram[J]. Journal of Petrology, 27, 745-750.

Li B, Wei J H, Gao Q, et al., 2025. Geochronology, geochemical characteristics and geological significance of Early Paleozoic Mailong granites in eastern section of East Kunlun[J]. Earth Science, 50(4): 1417-1442. (in Chinese with English abstract)

Li J C, 2017. Metallogenic regularity and prospecting prediction of gold deposits in the East Kunlun area, Qinghai Province[D]. Chang'an University. (in Chinese with English abstract)

Li J Y. 2023. Research on metallogenic environment and metallogenesis of gold field in the Wulongou, the East Kunlun orogenic belt[D]. China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)

Li W Y. 2024. The Paleo-Tethy stectonice volution and corresponding metallogenesis[J]. Acta Geologica Sinica, 98(11): 3255-3273. (in Chinese with English abstract)

Li Z H, Li B L, Wang B, et al., 2023.Genesis and geological significance of sulfide bearing Maficenclaves and host syenite in Heishishan, East Kunlun: Evidence from geochronology, mineralogy, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes[J]. Acta Petrologica Sinica,39(3): 742-762.

Liu B, Ma C Q, Jiang H A, et al., 2013. Early Paleozoic tectonic transition from ocean subduction to collision orogeny in the Eastern Kunlun region: Evidence from Huxiaoqin mafic-rocks[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(6): 2093-2106. (in Chinese with English abstract)

Liu B, Ma C Q, Zhang J Y, et al., 2012. Petrogenesis of Early Devonian intrusive rocks in the east part of Eastern Kunlun orogen and implication for Early Palaeozoic orogenic processes[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(6): 1785-1807. (in Chinese with English abstract)

Liu W D, Ping Y L, Liu J, et al., 2022. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages, geochemical characteristics and their geological significances of the Early Paleozoic granites in the western part of the East Kunlun orogenic belt[J]. Geological Review, 2: 469-487. (in Chinese with English abstract)

《地质力学学报》预出版

Liu Y G, Zhang J W, Feng Z X, et al., 2025. Exploration and research progress of magmatic copper-nickel-cobalt sulfide deposits in the north-eastern Margin of the Qinghai-Tibetan Plateaut[J]. Geology in China, 52(3): 972−1001. (in Chinese with English abstract)

Liu Y S, Hu Z C, Li M, et al., 2013. Applications of LA-ICP-MS in the elemental analyses of geological samples[J]. Chinese Science Bulletin, 58: 3863-3878.

Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al., 2010b. Reappraisement and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin,55(15):1535-1546.

Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al., 2010a. 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[J]. Journal of Petrology, 51(1-2): 537-571.

Lu H, Pan T, Jiao H, et al., 2022. Geochronology, geochemistry, and Hf isotopic compositions of the Early Devonian Heihaibei granite in the East Kunlun orogen, Northwest China[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 59(9).

Lu S N, Yang C L, Li H K, et al., 2002. North China Continent and Columbia Supercontinent[J]. Earth Science Frontiers,(04):225-233. (in Chinese with English abstract)

Ludwig K R. 2003. Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley, California: Berkeley Geochronology Center.

Mo X X, Luo Z H, Deng J F, et al., 2007. Granitoids and crustal growth in the East-Kunlun orogenic belt[J]. Geological Journal of China Universities, 13(3): 403-414. (in Chinese with English abstract)

Pan G T, Wang L Q, Zhang W P, et al., 2013. Tectonic Map and description of Qinghai Tibet Plateau and its adjacent areas (1:1500000)[J]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese with English abstract)

Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. Contr. Mineral and Petrol, 58: 63–81.

Pei X Z, Li R B, Li Z C, et al., 2018. Composition feature and for mation process of Buqingshan composite accretionary Mélange belt in southern margin of East Kunlun orogen[J]. Earth Science, 43(12): 498-4520. (in Chinese with English abstract)

Ren J H, Liu Y Q, Han W Z, et al., 2009. LA-ICP-MS U-Pb zircon dating and geochemical characteristics of diabase-dykes from the Qingshuiquan area, eastern Kunlun orogenic belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(5): 1135-1145. (in Chinese with English abstract)

Rudnick R L, Gao S. 2014. Composition of the continental crust[J]. Treatise on Geochemistry, 43.

Shi L C, Cai H J, Xu H Q, et al., 2017. Material composition characteristics of Nachitai Group in subduction accretion complex on the southern slope of East Kunlun mountains[J]. Geological Bulletin of China, 36(2-3): 251-257. (in Chinese with English abstract)

Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic system Matics of oceanic basalts; implications for Mantle composition and processes[C]//In: Mag Matism in the ocean basins. Saunders, A.D. and Norry, M.J. (Editors), Geological Society of London, London. 42: 313-345.

Tao Z L, Yin J Y, Yang Z M, et al., 2021. Continental collisional effects on magma source redox state and water content: Insights from thermodynamic modeling[J]. GSA Bulletin; 138 (3-4): 1563–1584.-

Tao J H, Li W X, Li X H, et al., 2013. Petrogenesis of early Yanshanian highly evolved granites in the Longyuanba area, southern Jiangxi Province: Evidence from zircon U-Pb dating, Hf-O isotope and whole-rock geochemistry[J]. Science China: Earth Sciences, 56:922–939. (in Chinese with English abstract).

Wang H, Feng C Y, Li R X, et al., 2018. Geological characteristics, metallogenesis, and tectonic setting of porphyry-skarn Cu deposits in East Kunlun Orogen[J]. Geological Journal, 53: 58-76.

Wang B Z, Li W F, Jin T T, et al., 2024. Baddeleyite U-Pb geochronology of rare metal mineralized carbonatite and peridotite in Dagele area of East Kunlun orogen and its prospecting significance[J]. Earth Science,49(4):1245-1260. (in Chinese with English abstract)

Wang B Z, Qi S S, Ding X Q, et al., 2008. Actual Material map of mineral resource potential evaluation in Qinghai Province construction drawing specification (1:250000), Dazaohuo range[J]. Xining: Qinghai Geological Survey Institute. (in Chinese with English Abstract)

Wang B Z, Zhang J M, Li W F, et al., 2023. Discovery of two stages of the Early Paleozoica dakitic intrusive rocks in the Kunlun River area, East Kulun: Implications for collisional orogenic processes[J]. Acta Petrologica Sinica, 39(3):763-784. (in Chinese with English abstract)

《地质力学学报》预出版

Wang C T, Li W F, Wang B Z, et al., 2024. Geochronology, geochemistry, Sr-Nd isotopic characteristics and geological significance of the pyroxenite in the Dagele alkali complex, East Kunlun[J]. Geotectonica et Metallogenia, 48(1):125−147. (in Chinese with English abstract)

Wang L, Yang L Q, Wang Y P, et al., 2012. Simultaneous determination of zircon LA-ICP-MS in-situ micro-area U-Pb dating and trace elements[J]. Acta Geoscience Sinica, 33(5):763-772. (in Chinese with English abstract)

Wang S, Zhang S H, Cai M Y, et al., 2023. Application of LA-ICP-MS garnet U-Pb dating method on the geochronological study of rodingite and skarn[J]. Acta Geoscience Sinica，45(3): 386-396. (in Chinese with English abstract).

Wang T S, Li W F, Wang B Z, et al., 2024.Geochemical characteristics and genesis of the Niobium-rich carbonatite in the Dagele area, East Kunlun[J]. Geotectonica et Metallogenia, 48(1): 97-113. (in Chinese with English abstract)

Wang X X, Hu N G, Wang T, et al., 2012. Late Ordovician Wanbaogou granitoidpluton from the southern Margin of the Qaidam basin: Zircon SHRIMP U-Pb age, Hf isotope and geochemistry[J]. Acta Petrologica Sinica,28(9): 2950-2962. (in Chinese with English abstract)

Wang Y L, Li Y J, Wei J H, et al., 2018. Origin of Late Silurian A-Type granite in Wulonggou area, East Kunlun orogen: Zircon U-Pb age, geochemistry, Nd and Hf isotopic constrains[J]. Earth Science. 43(4): 1219-1236. (in Chinese with English abstract)

Wu F Y, Li X H, Yang J H, et al., 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1217-1238. (in Chinese with English abstract)

Wu F Y, Liu Z C, Liu X C, et al., 2015. Hi Malayan leucogranite: Petrogenesis and implications to orogenesis and plateau uplift[J]. Acta Petrologica Sinica,31(1):1-36. (in Chinese with English abstract)

Wu F Y, Guo C L, Hu F Y, et al., 2023. Petrogenesis and metallogenesis of highly fractionated granites in the Nanling region[J]. Acta Petrologica Sinica. 39(1): 1-36. (in Chinese with English abstract)

Xia R. 2017. Paleo-Tethys orogenic process and gold metallogenesis of the East Kunlun[D]. China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract).

Xin W, Sun F Y, Li L, et al., 2018. The wulonggou metaluminous A2-type granites in the eastern Kunlun Orogenic Belt, NW China: Rejuvenation of subduction-related felsic crust and implications for post-collision extension[J]. Lithos, 312: 108-127.

Yao W G, Jia Q Z, Zhang H W., et al., 2002. Geological characteristics and genesis of Dulenggou copper and cobalt deposits in Qinghai Province[J]. Mineral Deposits, 21(S1): 523-526. (in Chinese with English abstract)

Yin H F, Zhang K.X. 1998. Evolution and characteristics of the Central Orogenic belt[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 23(05): 437-442. (in Chinese with English abstract)

Yu L, Sun F Y, Beier C, et al., 2022. Geology, U-Pb geochronology and stable isotope geochemistry of the Heihaibei gold deposit in the southern part of the Eastern Kunlun Orogenic Belt, China: A granitic intrusion-related gold deposit?[J]. Ore Geology Reviews,144:1-18.

Zhang Z W, Li W Y, Qian B, et al., 2015. Metallogenic epoch of the Xiarihamu magmatic Ni-Cu sulfide deposit in Eastern Kunlun orogenic belt and its prospecting significance[J]. Geology in China, 42(3): 438-451. (in Chinese with English abstract)

Zhang L, Li B L, Liu L, et al., 2021. Geochronology, geochemistry and geological significance of the Early Devonian bimodal intrusive rocks in Wulonggou area, East Kunlun Orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 37(7): 2007-2028. (in Chinese with English abstract)

Zhang Q, Ran H, Li C D. 2012. A-type granite: what is the essence?[J]. Acta Petrologica et Mineralogica. 31(04): 621-626. (in Chinese with English abstract)

Zhang X T, Yang S D. 2007. Regional geological outline of Qinghai Province[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese with English abstract)

Zhang Y F, Pei X Z, Ding S P, et al., 2010. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of quartz diorite at the Kekesha area of Dulan County, eastern section of the East Kunlun orogenic belt, China and its significance[J]. Geological Bulletin of China, 29(1): 79-85. (in Chinese with English abstract)

Zhong S H, Huang Y, Liu Y L, et al., 2025. Silurian-Devonian critical metal mineralization boom of the East Kunlun orogenic belt[J]. Geological Bulletin of China, 44(4): 574−586. (in Chinese with English abstract)

Zhong S H, Li S, Feng C, et al., 2021. Porphyry copper and skarn fertility of the northern Qinghai-Tibet Plateau collisional granitoids[J]. Earth Science Reviews, 214:103524.

《地质力学学报》预出版

# 附中文参考文献


阿成业，王毅智，任晋祁，等，2003.东昆仑地区万保沟群的解体及早寒武世地层的新发现[J].中国地质，30（2）：199-206.

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[J].地学前缘，27（4）：33−48.

丰成友，李东生，吴正寿，等，2010.东昆仑祁漫塔格成矿带矿床类型、时空分布及多金属成矿作用[J].西北地质，43（4）：10-17.

丰成友，张德全，屈文俊，等，2006.青海格尔木驼路沟喷流沉积型钴（金）矿床的黄铁矿 Re-Os 定年[J].地质学报，80（4）：571-576.

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 [J]. 地球科学, 47 (4) : 1194-1216.

冯李强，沈睿文，彭艳雯，等，2026. 青海昆仑河晚志留世-早泥盆世 S 型花岗岩成因与原特提斯洋构造演化 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 53 (2): 403-421.

高晓峰，校培喜，谢从瑞，等， 2010. 东昆仑阿牙克库木湖北巴什尔希花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质通报，29（7）：1001−1008.

国显正，贾群子，李金超，等，2019. 东昆仑哈日扎花岗闪长岩形成时代、地球化学特征及其构造意义[J]．地质力学学报，25（2）：286−300. doi： 10.12090/j. issn. 1006-6616. 2019. 25. 02. 027

国显正. 2020. 东昆仑东段古特提斯中酸性岩浆活动与多金属成矿作用[D]. 中国地质大学（武汉）.

韩玉，王启林，谢海林，等， 2024.东昆仑百吨沟花岗岩岩石地球化学、锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素特征及其构造意义[J].岩石矿物学杂志，43（6）：1448−1464.

韩志辉，孙丰月，田楠，等，2021，东昆仑祁漫塔格地区乌兰乌珠尔早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义[J].地球科学，46（1）： 13−30.

黄国彪，马文虎，李长印，等，2021.青海昆仑河地区黑海北金矿床地质特征及找矿前景[J].黄金，42（6）：26−30.

贾小辉，王强，唐功建. 2009.A 型花岗岩的研究进展及意义[J].大地构造与成矿学，33（3）： 465−480.

焦和，康继祖，黄国彪，等， 2022. 青海昆仑河北地区岩浆活动、金矿成矿特征及找矿前景分析 [J]. 地质力学学报，28（3）： 383−405. doi： 10.12090/j.issn.1006-6616.2021059

井国正，王晓云，张志强，等， 2023. 东昆仑东段中-晚三叠世区域岩浆-热液成矿系统[J].地质科技通报，42（1）： 89−111.

康继祖,许贝贝,薛万文.青海昆仑河地区钨锡成矿特征及与早泥盆世花岗岩的关系[J].中国矿业,2014,23(12):71-73+98.

李斌，魏俊浩，高强，等， 2025. 东昆仑东段沟里地区早古生代迈龙花岗岩年代学、岩石地球化学及地质意义 [J]. 地球科学，50（4）：1417−1442.

李金超.青海东昆仑地区金矿成矿规律及成矿预测[D].长安大学,2017.

李君阳. 2023. 东昆仑造山带五龙沟金矿田成矿环境及成矿作用研究[D]. 中国地质大学（北京）

李文渊，张照伟，王亚磊，等，2022. 东昆仑原、古特提斯构造转换与岩浆铜镍钴硫化物矿床成矿作用 [J]. 地球科学与环境学报，44 (1) : 1-19.

李文渊. 2024. 古特提斯构造演化及其成矿作用[J]. 地质学报，98（11）： 3255−327

李治华，李碧乐，王斌. 2023. 东昆仑黑石山含硫化物暗色包体及宿主正长岩成因及地质意义：年代学、矿物学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素证据[J]. 岩石学报，39（3）： 42−762. doi：10.18654/1000-0569/2023.03.08

刘彬，马昌前，蒋红安，等， 2013. 东昆仑早古生代洋壳俯冲与碰撞造山作用的转换：来自胡晓钦镁铁质岩石的证据 [J]. 岩石学报，29（6）： 2093−2106.

刘彬，马昌前，张金阳，等， 2012. 东昆仑造山带东段早泥盆世侵入岩的成因及其对早古生代造山作用的指示 [J]. 岩石学报，28 （6）：1785−1807.

刘卫东，平艳丽，刘杰，等， 2022. 东昆仑造山带西段早古生代花岗岩锆石 LA-ICP-MS 年龄、岩石地球化学特征及地质意义[J]. 地质评论，2： 469−487.

刘勇胜，胡兆初，李明，等， 2013. LA-ICP-MS 在地质样品元素分析中的应用[J]. 科学通报，58（36）： 3753−3769.

刘月高，张江伟，冯志兴，等， 2025. 青藏高原东北缘岩浆型铜镍钴硫化物矿床勘查模型与研究进展[J]. 中国地质, 52（3）： 972−1001.


《地质力学学报》预出版

陆松年，杨春亮，李怀坤，等， 2002. 华北古大陆与哥伦比亚超大陆[J]. 地学前缘，9（4）： 225−233.

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[J]. 高校地质学报，13（3）： 403−414.

潘桂棠，王立全，张万平，等， 2013. 青藏高原及邻区大地构造图及说明书（1：1500000）. 北京： 地质出版社.

裴先治，李瑞保，李佐臣，等， 2018. 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，43（12）：4498−4520.

任军虎，柳益群，冯乔，等， 2009. 东昆仑清水泉辉绿岩脉地球化学及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年[J]. 岩石学报，25 （5）： 1135−1145.

史连昌，才航加，许海全，等， 2017. 东昆仑南坡俯冲增生杂岩楔中纳赤台群物质组成特征[J]. 地质通报，36（2-3）： 251−257.

陶继华，李武显，李献华，等， 2013. 赣南龙源坝地区燕山期高分异花岗岩年代学、地球化学及锆石 Hf-O 同位素研究[J]. 中国科学： 地球科学， 43： 760−778.

王秉璋，李五福，金婷婷，等， 2024. 东昆仑大格勒稀有金属矿化碳酸岩和橄榄岩斜锆石 U−Pb 年代学研究和找矿意义[J]. 地球科学，49（4）：1245−1260.

王秉璋，祁生胜，丁西歧，等， 2008. 青海省矿产资源潜力评价实际材料图建造构造图说明书（1：250000）大灶火幅[M]. 青海省地质调查院.

王秉璋，张金明，李五福，等， 2023. 昆仑河早古生代两期埃达克质侵入岩的发现及其对东昆仑碰撞造山过程的启示 [J] 岩石学 报，39（3）： 763−784. doi：10.18654/1000-0569/2023.03.0

王春涛，李五福，王秉璋，等， 2024. 东昆仑大格勒地区碱性杂岩体中辉石岩的年代学、地球化学、Sr−Nd 同位素特征及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学，48（1）： 125−147.

王岚，杨理勤，王亚平，等， 2012. 锆石 LA-ICP-MS 原位微区 U-Pb 定年及微量元素的同时测定[J]. 地球学报，33（5）： 763−772.

王森，张拴宏，蔡梦颖，等， 2023. LA-ICP-MS 石榴子石 U-Pb 定年方法在异剥钙榴岩和矽卡岩年代学研究中的应用 [J]. 地球学报，45（3）： 386-396.

王泰山，李五福，王秉璋，等， 2024. 东昆仑大格勒富铌碳酸岩地球化学特征及成因初探[J]. 大地构造与成矿学，48（1）： 97−113.

王晓霞，胡能高，王涛，等， 2012. 柴达木盆地南缘晚奥陶世万宝沟花岗岩： 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素和元素地球化学[J]. 岩石学报，28 （9）： 2950−2962.

王艺龙，李艳军，魏俊浩，等，2018. 东昆仑五龙沟地区晚志留世 A 型花岗岩成因：U-Pb 年代学、地球化学、Nd 及 Hf 同位素制约[J]. 地球科学，43（4）： 1219−1236.

吴福元，李献华，杨进辉，等， 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报，23（6）： 1217−1238.

吴福元，刘小驰，纪伟强，等， 2017. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. 中国科学：地球科学，47（7）： 745-765.

吴福元，刘志超，刘小驰，等， 2015. 喜马拉雅淡色花岗岩[J]. 岩石学报，31（1）： 1−36

吴福元，孙德有. 1999. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生[J]. 岩石学报，15（2）： 181-189.

吴福元,郭春丽,胡方泱,等.南岭高分异花岗岩成岩与成矿[J].岩石学报,2023,39(1):1-36.

夏锐. 2017. 东昆仑古特提斯造山过程与金成矿作用[J]. 北京： 中国地质大学（北京）.

许智，夏楚林，韩芝弘，等，2024. 东昆仑东段各玛龙闪长岩年代学、地球化学特征及成因分析 [J]. 地质科学，59（1）：65-81.

姚文光，贾群子，张汉文，等， 2002. 青海督冷沟铜钴矿床地质特征及成因[J]. 矿床地质，21（增刊 1）： 523-526.

殷鸿福，张克信. 1998. 中央造山带的演化及其特点[J]. 地球科学，23（5）： 437−442.

张亮，李碧乐，刘磊，等， 2021. 东昆仑五龙沟地区早泥盆世双峰式侵入岩年代学、地球化学及其地质意义[J]. 岩石学报，37（7）：2007−2028.

张旗，冉皞，李承东. 2012. A 型花岗岩的实质是什么?[J]. 岩石矿物学杂志，31 （4）： 621−626.

张雪亭和杨生德. 2007. 青海省区域地质概论. 北京： 地质出版社.

张亚峰，裴先治，丁仨平，等， 2010. 东昆仑都兰县可可沙地区加里东期石英闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其意义[J]. 地质通报，29（1）： 79−85.

张照伟，李文渊，钱兵，等， 2015. 东昆仑夏日哈木岩浆铜镍硫化物矿床成矿时代的厘定及其找矿意义[J]. 中国地质，42（3）： 438-451.

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

《地质力学学报》预出版