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：韩建华，金泽西，邓浩，等. 阿尔金南缘苏满马勒央凝灰质角砾岩和构造角砾岩时代、成因及地质意义[J]. 西北地质，2026，59(5)：244−262. DOI：10.12401/j.nwg.2026070

Citation：HAN Jianhua，JIN Zexi，DENG Hao，et al. Geochronology，Genesis，and Geological Significance of Tuffaceous Breccia and Tectonic Breccia at Sumaomaleyang on the Southern Margin of the Altyn Tagh[J]. Northwestern Geology，2026，59(5)：244−262. DOI：10.12401/j.nwg.2026070

阿尔金南缘苏满马勒央凝灰质角砾岩和构造角砾岩时代、成因及地质意义

韩建华[1]，金泽西[2,*]，邓浩[2]，申添毅[2]，周佳伦[2]

（1. 新疆维吾尔自治区地质局区域地质调查中心，新疆 乌鲁木齐 830011；
2. 中国地质大学地球与行星科学学院，湖北 武汉 430074）

摘 要：苏满马勒央地区位于新疆且末县南部、东昆仑西段，因自然条件所限，前人对该区的研究主要依赖于区域地质填图，区内火山−沉积岩系的形成时代、成因及构造背景尚缺乏系统的构造变形解析、地质年代学和地球化学资料制约。笔者对该区含凝灰质角砾岩和构造角砾岩典型剖面开展了野外构造解析、岩相学观察、全岩主微量元素地球化学分析及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年工作。野外构造解析表明，该剖面主要发育逆冲与走滑断裂叠加的脆性变形组合，反映阿尔金断裂带新生代左行走滑主导、局部挤压转换的变形特征。凝灰质火山角砾岩具典型的火山碎屑结构，基质为凝灰质；构造角砾岩则以强烈破碎、硅化及构造−热液叠加改造为主要特征。地球化学结果显示，岩石主要呈现富集大离子亲石元素（LILE）、亏损高场强元素（HFSE）、Sr 负异常等特征。稀土元素总量 ∑REE 值为 107×10^{-6}～823×10^{-6}，LREE/HREE 值为 2.04～4.17，呈轻稀土富集型配分模式，具中等 Eu 负异常（Eu/Eu*值为 0.65～0.98）。Th/U 值为 1.38～4.30，指示俯冲流体交代作用，整体显示陆缘弧地球化学亲缘性。凝灰质角砾岩与构造角砾岩中的锆石均属捕获成因的锆石，其 U-Pb 年龄跨越新太古代、古元古代、中元古代—新元古代及古生代等多个地质时期，并呈现 5 个年龄峰值（约 2.6 Ga、1.8 Ga、1.5 Ga、1.2 Ga 及 473 Ma）。上述年龄谱特征表明，源区曾先后混入多期基底物质并叠加构造−热事件产物。最年轻的 473 Ma 年龄组因锆石颗粒数较少，不宜直接解释为成岩年龄，仅作为最年轻年龄组，用以限定岩石的形成时代不早于约 473 Ma。综合研究认为，苏满马勒央地区凝灰质角砾岩与构造角砾岩原岩形成于与俯冲相关的陆缘弧环境，是原特提斯洋俯冲增生过程在东昆仑西段的岩石记录。此外，构造角砾岩内发育多期热液脉体与褐铁矿化蚀变，表明该区后期断裂带可能曾作为热液流体运移和沉淀的重要通道，对后续金矿找矿具有一定指示意义。

关键词：构造角砾岩；凝灰质火山角砾岩；构造岩浆演化；热液蚀变；新疆且末

中图分类号：P548 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-6248(2026)05-0244-19

收稿日期：2026-08-14；**修回日期**：2026-09-11；**责任编辑**：贾晓丹

基金项目：新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2023B03016-2)资助。

作者简介：韩建华(1984−)，男，正高级工程师，从事区域地质调查与矿产勘查工作。E−mail：745410955@qq.com。

*** 通讯作者**：金泽西(2003−)，男，硕士研究生，从事构造地质学研究。E−mail：2926037055@qq.com。

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

Geochronology, Genesis, and Geological Significance of Tuffaceous Breccia and Tectonic Breccia at Sumaomaleyang on the Southern Margin of the Altyn Tagh

HAN Jianhua[1], JIN Zexi[2,*], DENG Hao[2], SHEN Tianyi[2], ZHOU Jialun[2]

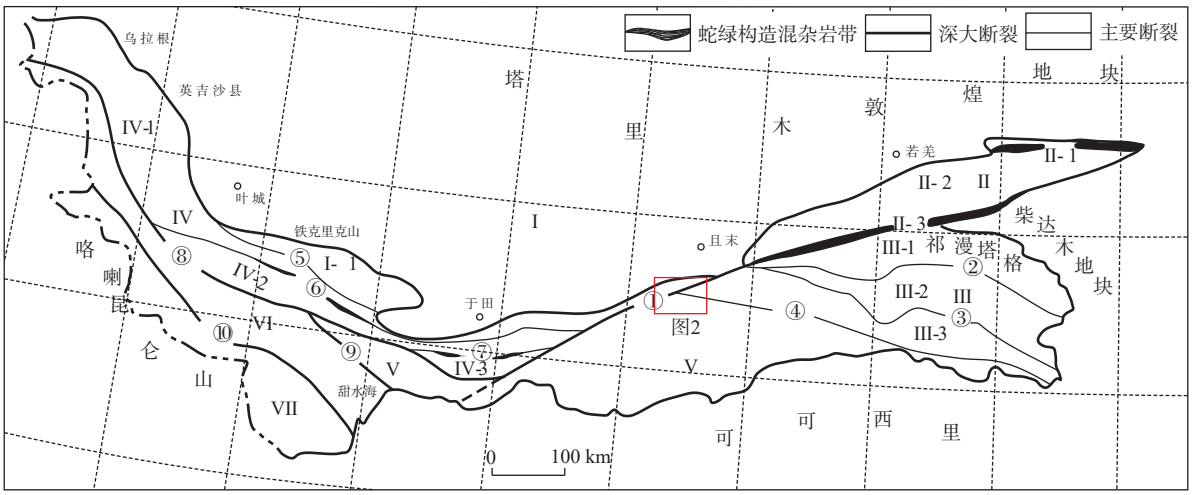
（1. Xinjiang Geological Bureau Regional Geological Survey Center, Urumqi 830011, Xinjiang, China；
2. School of Earth and Planetary Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China）

Abstract：The Suman Maleyang area is located in southern Qiemo County, Xinjiang, in the western East Kunlun. Owing to its remote setting and difficult field conditions, previous work has relied largely on regional geological mapping, and the age, origin, and tectonic setting of the volcanic-sedimentary succession remain poorly constrained by structural, geochronological, and geochemical data. Here we investigate a representative section containing tuffaceous volcanic breccia and tectonic breccia through field structural analysis, petrography, whole-rock major- and trace-element geochemistry, and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating. Field observations reveal brittle deformation characterized by superposed thrust and strike-slip faulting, consistent with Cenozoic deformation along the Altyn Tagh fault system dominated by sinistral strike-slip motion with local transpression. The tuffaceous volcanic breccia preserves typical volcaniclastic textures with a tuffaceous matrix, whereas the tectonic breccia is characterized by intense fragmentation, silicification, and tectono-hydrothermal overprinting. Geochemically, the rocks are enriched in large-ion lithophile elements, depleted in high-field-strength elements, and show negative Sr anomalies. They have total REE contents of 107×10^{-6}–823×10^{-6}, LREE/HREE ratios of 2.04–4.17, LREE-enriched patterns, and moderate negative Eu anomalies (Eu/Eu*=0.65–0.98). Th/U ratios range from 1.38 to 4.30, and the overall trace-element characteristics show an affinity with a subduction-related continental-margin arc setting. Zircon U-Pb ages span the Neoarchean, Paleoproterozoic, Mesoproterozoic–Neoproterozoic, and Paleozoic, with prominent age populations at ca. 2.6 Ga, 1.8 Ga, 1.5 Ga, 1.2 Ga, and 473 Ma. The zircons are dominated by xenocrystic grains and record repeated contributions from older basement components and multiple regional tectonothermal events. The youngest population at ca. 473 Ma contains only a few grains and is therefore not interpreted as a robust crystallization age; instead, it constrains the maximum depositional age to ca. 473 Ma. Taken together, the petrographic and geochemical characteristics of the tuffaceous volcanic breccia suggest formation in a subduction-related continental-margin arc setting associated with Proto-Tethyan subduction and accretion in the western East Kunlun. The tectonic breccia was subsequently generated by fault-related fragmentation and hydrothermal alteration of the volcanic rocks. Multistage hydrothermal veins and limonitic alteration within the fault zones further suggest that these structures may have acted as pathways for hydrothermal fluid migration and precipitation, with potential implications for gold exploration in the area.

Keywords：tectonic breccia；tuffaceous volcanic breccia；tectono-magmatic evolution；hydrothermal alteration；Qiemo Xinjiang

东昆仑造山带位于青藏高原东北部, 北以柴达木盆地为界、南邻巴颜喀拉–松潘甘孜地块, 是一条由多期次、不同类型造山作用叠加的大陆复合造山带, 属于中国中央造山带的重要组成部分(图 1)。东昆仑造山带经历了漫长而复杂的构造演化, 可分为前寒武纪基底形成与超大陆演化阶段、早古生代原特提斯洋演化阶段、晚古生代—早中生代古特提斯洋演化阶段、晚中生代—新生代陆内造山阶段 4 个演化阶段(Yang et al., 1996; 陈能松等, 2007; 莫宣学等, 2007; Zhang et al., 2014)。东昆仑地区是特提斯构造域重要的金矿成矿区之一, 也是中国重要的矿产资源潜力基地。

近年来, 东昆仑造山带在构造演化与成矿规律研究领域取得诸多重要进展。结合地质、地球化学及年代学资料, 朱坤贺(2022)认为东昆仑造山带在古生代发育海沟–弧–弧后盆地构造体系, 并进一步发育沿昆仑缝合带向北持续的俯冲增生过程。晚古生代—早中生代构造–岩浆演化划分为俯冲阶段(277～240 Ma)、同碰撞阶段(240～230 Ma)与后碰撞阶段(230～200 Ma)(陈国超等, 2020)。在成矿作用方面, 志留纪—泥盆纪被厘定为关键金属成矿的主爆发期(钟世华等, 2025); 晚三叠世广泛发育造山型金矿及矽卡岩–斑岩型多金属矿床(丰成友等, 2024)。针对东昆仑西段早



Ⅰ. 泛华夏古陆块群(塔里木陆块、敦煌陆块)；Ⅰ-1. 铁克里克断隆带；Ⅰ-2. 北阿尔金地块；古陆块群南侧陆缘系统：Ⅱ. 阿尔金造山带；Ⅱ-1. 红柳沟–拉配泉蛇绿构造混杂岩带；Ⅱ-2. 阿中地块；Ⅱ-3. 阿南蛇绿构造混杂岩带；Ⅲ. 东昆仑造山带；Ⅲ-1. 东昆北–祁漫塔格岩浆弧；Ⅲ-2. 东昆中微陆块；Ⅲ-3. 东昆南俯冲增生杂岩带；Ⅳ. 西昆仑造山带；Ⅳ-1. 西昆北岩浆弧；Ⅳ-2. 西昆中微陆块；Ⅳ-3. 西昆南俯冲增生杂岩带；Ⅴ. 巴彦喀拉褶断带；Ⅵ. 塔什库尔干–甜水海陆块；Ⅶ. 明铁盖陆块；①. 阿尔金南缘断裂带；②. 东昆北断裂带；③. 东昆中断裂带：④. 东昆南断裂带；⑤. 柯岗断裂带；⑥. 库地–其曼于特蛇绿构造混杂岩带；⑦. 苏巴什–柳什塔格蛇绿构造混杂岩带；⑧. 康西瓦–木孜塔格构造混杂岩带；⑨. 乌恰–郭扎错构造混杂岩带；⑩. 塔阿西构造混杂岩带

图1 昆仑–阿尔金成矿带构造单元划分图(据潘桂棠等，2002；冯京等，2022 修改)

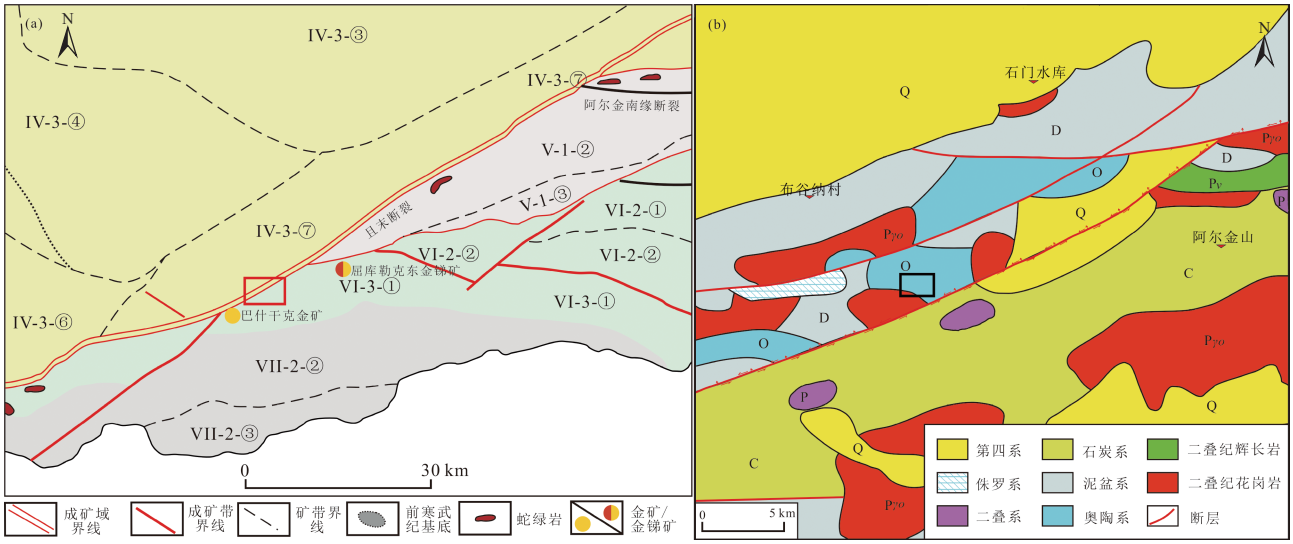
Fig. 1 Structural unit division map of the Kunlun-Altun metallogenic belt

古生代的研究中，克其克孜苏花岗岩(442.3±4.4 Ma)为原特提斯洋晚奥陶世—早志留世俯冲消减提供了年代学依据(刘卫东等，2022)；木孜塔格地区同碰撞花岗岩(415～419 Ma)指示东昆仑西段原特提斯洋的闭合时限可能为早泥盆世(王坤等，2023)；黑海地区过铝质花岗岩(421.9～412.0 Ma)则反映研究区于晚志留世—早泥盆世已转入碰撞后伸展环境(赵春涛等，2026)。晚古生代—中生代岩浆记录方面，冰沟南铜镍矿含矿岩体(377.8±3.4 Ma)与再力克山花岗岩(～210 Ma)，分别保存了晚泥盆世与晚三叠世岩浆活动信息(张照伟等，2017；鲁浩等，2025)。成矿研究上，阿确墩豹子沟金矿化带的发现证实东昆仑西段具备金矿找矿潜力(李猛等，2020)；祁漫塔格卡尔却卡铜多金属矿床与冰沟南铜镍矿的相关研究，也揭示该区可发育多类型金属矿床，具备良好成矿条件。总体而言，东昆仑西段新疆境内早古生代火山–岩浆作用的时代归属、物质来源及其与原特提斯洋俯冲–闭合过程的对应关系仍缺乏系统约束，不同地区已有年代学记录之间也尚未建立统一的区域演化框架。尤其是偏远地区基础地质调查与实测岩性、年代学资料之间仍存在不一致，限制了对区域构造演化及其成矿响应的进一步认识。特别是已有工作多聚焦于西段祁漫塔格矿集区及少数重点矿区，西段新疆境内的偏远区域研究程度仍较低。

苏满马勒央地区位于新疆且末县东昆仑西段(图 1、图 2a)，受自然地理条件制约，该区域虽已积累部分年代学与岩石地球化学资料，但相关研究成果年代较早，仍缺少新的实测年代学及岩石地球化学数据支撑。前人区域填图显示该区出露有石炭纪闪长岩、碱长花岗岩，而本次野外调查实地采集到的样品为凝灰质火山角砾岩和构造角砾岩，与填图结果存在显著差异，样品的时代和成因尚无定论，由此产生以下问题：苏满马勒央地区出露的凝灰质火山角砾岩和构造角砾岩形成于什么时代？其物质来源及形成大地构造背景如何？构造角砾岩是寻找矿产资源的重要标志，苏满马勒央地区是否有金矿成矿潜力？因此，笔者针对苏满马勒央地区含凝灰质火山角砾岩和构造角砾岩地质剖面，开展构造地质解析、锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学研究，约束其岩石形成时代，探讨岩浆源区特征和岩石成因机制，约束该区构造动力学背景，为填补区域地质演化和找矿勘查提供科学依据。

1 地质背景

苏满马勒央地区位于新疆且末县石门水库西南 20 km 处，地处青藏高原北缘，东昆仑与西昆仑的衔接



Ⅳ-3-③. 塔北坳陷；Ⅳ-3-④.塔中隆起；Ⅳ-3-⑥.塔南隆起；Ⅳ-3-⑦.塔东南坳陷；Ⅴ-1-②. 阿尔金陆缘地块；Ⅴ-1-③. 迪木那里克–苏巴里克裂陷槽；Ⅵ-2-①. 祁漫塔格造山带；Ⅵ-2-②. 布尔汗布达地块；Ⅵ-3-①. 喀拉米兰复合沟弧带；Ⅶ-2-②. 黄羊岭陆缘活动带；Ⅶ-2-③. 云雾岭陆缘活动带

图2　苏满马勒央地区大地构造位置(a; 据郭利等，2025 修改)和区域地质图(b; 据 1∶500 000 区域地质图)

Fig. 2　(a)Tectonic location of the Suman Maleyang area and (b)regional geological map

处, 属于古亚洲构造域和特提斯构造域结合部, 阿尔金大断裂为两大构造域的分界断裂(图 2)。研究区大地构造主体属于秦祁昆造山带, 阿尔金南缘大断裂横贯全区, 此外还发育有若干次级断裂, 形成复杂且特殊区域构造格局(冯京等, 2022)。研究区内主要出露泥盆纪布拉克巴什群、石炭纪托库孜达坂群、二叠纪闪长岩、二叠纪蛇绿岩等岩石地层单元(图 2b)。区域构造演化过程中岩浆活动较为强烈, 先后记录了新元古代、早古生代以及晚古生代—中生代多期岩浆事件(段星星等, 2012; 冯京等, 2022; 靳胜凯等, 2023)。西侧的巴什干克与东侧的屈库勒克东历来为找矿工作的重点区(图 2a; 郭利等, 2025), 进行过大量的矿产调查和科研工作, 以往找矿成果显示沿阿尔金大断裂带, 构造活动较为强烈, 北部基性–超基性岩发育, 有利于形成与之相关的铜金钴矿床, 南部昆中地层小区构造强烈, 岩浆岩带发育, 广泛分布破碎蚀变岩型金矿床, 找矿条件良好, 成矿潜力巨大(王永等, 2020)。

2　野外地质构造及岩相学

研究区地层以下奥陶统上其汗组(O_1s)为主体, 南侧出露早二叠世闪长岩(图 3a)。野外实测构造剖面位于苏满马勒央工作区(图 3a), 海拔为 3 373 m, 总长为 328 m(E 84°24′49″, N 36°55′50″; 图 3b)。剖面总体呈 NW–SE 向展布, 主要穿过下奥陶统上其汗组火山碎屑岩, 并斜交研究区内主要断层(图 3a)。沿剖面由 NW 向 SE, 出露岩性以凝灰质火山角砾岩为主, 构造角砾岩主要发育于断层破碎带内, 局部地段被第四纪沉积物覆盖(图 3b)。

剖面北西端主要出露凝灰质火山角砾岩(图 3b), 岩石较破碎, 局部发育面理、共轭剪节理和断层擦痕, 角砾岩表面可见明显擦痕(图 4a)。北西侧断层破碎带内石英脉和构造透镜体较发育, 局部岩石呈黄褐色并发生明显粉末化。根据断层面及擦痕等运动学特征, 该处断裂以左行走滑为主, 两组代表性断层面产状分别为 0°∠79°和 259°∠35°(图 4b、图 4c)。继续向南东, 主要出露深灰色凝灰质火山角砾岩, 岩石整体以脆性破碎变形为特征, 局部发育约 30 m 宽的断层破碎带, 部分地段被第四纪沉积物覆盖(图 3)。再向南东局部出露凝灰质石英角砾岩, 岩石整体保存较完整, 构造变形相对较弱。其后仍以凝灰质火山角砾岩为主, 岩石表面发育擦痕, 部分石英角砾具有定向排列特征, 面状构造产状较陡, 代表性产状为 205°∠85°(图 4d、图 4e)。继续向南东, 凝灰质火山角砾岩与构造角砾岩共同出露, 构造变形明显增强。该段发育较大型断层面及擦痕, 以左行走滑为主, 局部发育逆冲断层; 断层破碎带内岩石强烈粉碎并呈红褐色, 反映走滑与挤压性质构造作用的叠加(图 4f、图 4g)。局

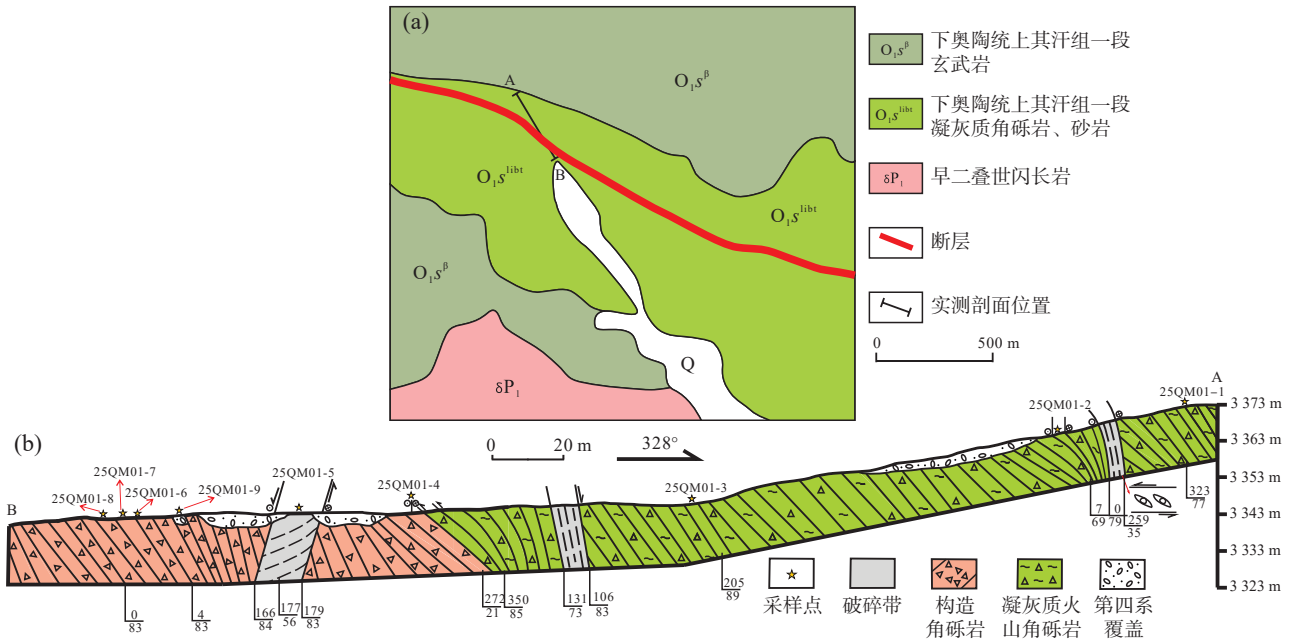


图3 研究区平面地质图(a)、实测构造剖面图及采样位置(b)

Fig. 3 (a) Geological map of the study area, (b) measured structural profile and sampling locations

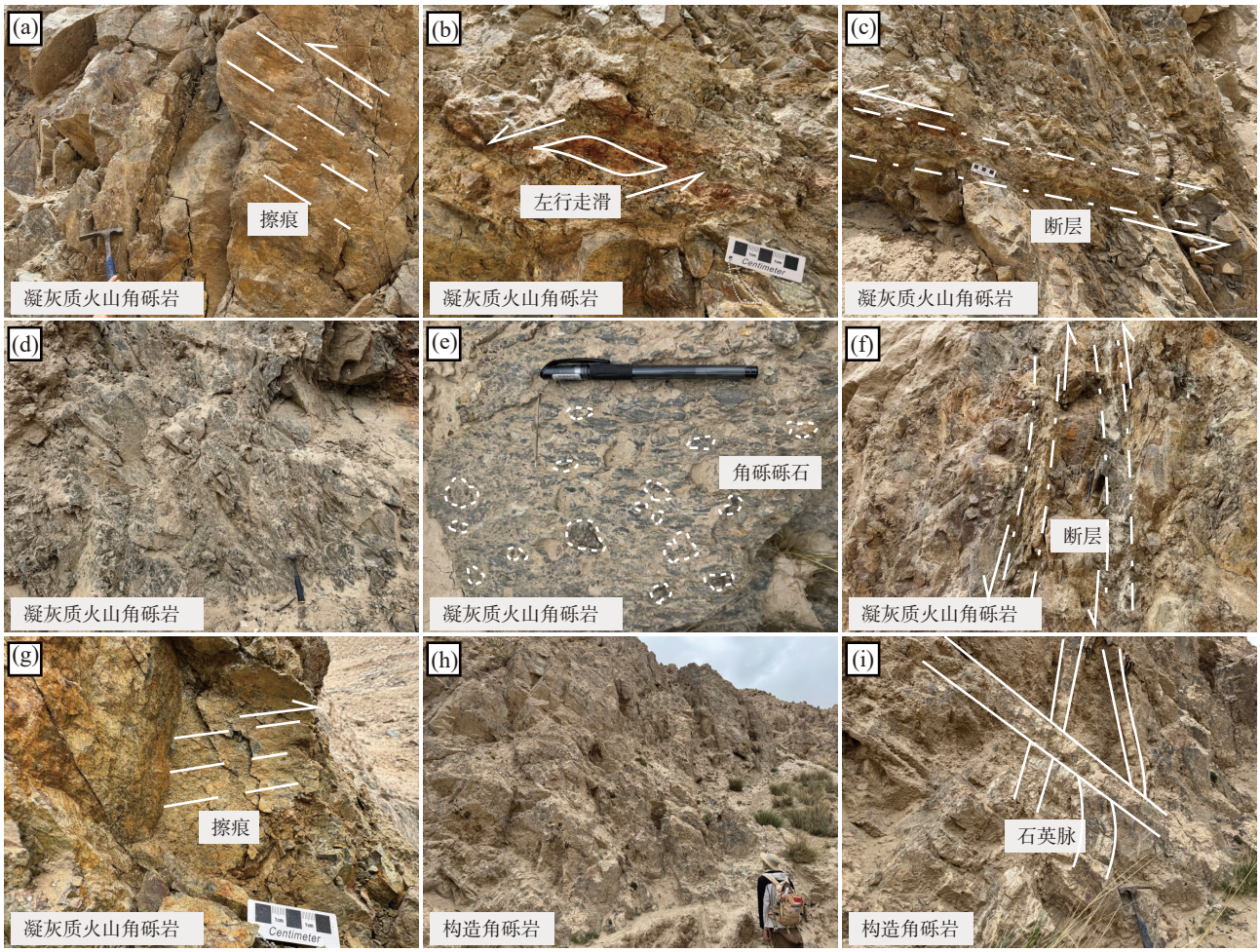
部断层破碎带中发育构造透镜体,断层面及线理特征指示北盘相对上升,并伴有左行走滑分量。剖面东南端主要位于断层破碎带内,出露构造角砾岩,岩石中面理和石英脉较为发育,石英脉多沿既有面状构造或裂隙充填,整体破碎程度较前述断层破碎带有所减弱(图 4h、图 4i)。

总体来看,该剖面沿 NW–SE 方向以凝灰质火山角砾岩为主要原岩,构造角砾岩主要产于断层破碎带内,反映凝灰质火山角砾岩或相关火山碎屑岩在后期断裂活动过程中经历了破碎、热液充填和胶结改造。剖面构造变形总体以脆性破裂和左行走滑为主,并局部叠加挤压–逆冲作用。结合不同岩性及构造变形特征,本研究沿剖面采集了具有代表性的样品,包括凝灰质火山角砾岩样品 25QM01-1～25QM01-3、构造角砾岩样品 25QM01-4～25QM01-8,以及石英脉样品 25QM01-9,用于岩相学、地球化学及年代学研究。

为进一步揭示剖面岩石的矿物组成及变形–蚀变特征,对上述代表性样品进行了透射显微镜岩相学观察。凝灰质火山角砾岩整体表现出明显的火山碎屑结构和后期热液蚀变特征。镜下可见两类石英组分:一类为砾石级或斑晶状石英,颗粒边部局部发育港湾状熔蚀结构,并可见碎裂、重结晶等现象,指示其可能经历了岩浆作用及后续快速破碎过程;另一类为分散于凝灰质基质中的他形–棱角状细粒石英,反映火山喷发或快速冷凝过程中形成的碎屑组分。部分凝灰质火山角砾岩发生明显脱玻化、硅化和碳酸盐化改造,方解石脉及碳酸盐矿物较为发育,说明其在形成后受到富 CO_2 热液流体的叠加改造(图 5a; Shukla et al., 2018; Wang et al., 2020a; Unwin et al., 2023)。此外,部分凝灰质角砾岩样品发育碳酸盐化热液蚀变(图 5b),富二氧化碳热液流体促使火山玻璃发生脱玻化,并进一步发生碳酸盐交代作用,最终形成方解石等碳酸盐矿物(Zhuravkova et al., 2017; Wang et al., 2020a;Si et al., 2024)。

基于岩石粒级三角分类图解(图 6a),样品 25QM01-1 为角砾凝灰岩,样品 25QM01-2 为火山角砾岩,而样品 25QM01-3 落入凝灰岩区间。凝灰质角砾岩火山角砾含量变化幅度较大,介于 8.5%～56%,所有样品均未发育火山集块组分。表明该类岩石碎屑粒级组成具有明显非均一性,可能反映火山喷发–搬运–堆积过程中能量条件的变化,也可能受到后期构造破碎和热液改造的叠加影响。

构造角砾岩(图 5c、图 5d)则以强烈破碎、硅化和构造–热液叠加改造为主要特征。镜下显示,岩石中长石含量极低,仅局部可见少量斜长石残留并发育聚片双晶,表明长石类矿物在后期构造变形与流体交代过程中发生了选择性溶蚀;石英普遍发育波状消光、动态重结晶和裂隙充填现象,部分裂隙被岩屑或黑色



a. 凝灰质火山角砾岩，岩石发育擦痕；b. 发育构造透镜体，指示左行走滑；c. 角砾岩中断层发育；d. 较新鲜的凝灰质火山角砾岩露头；e. 角砾砾石发育，表现出一定的定向性；f. 构造角砾岩中断层发育；g. 构造角砾岩擦痕发育；h. 构造角砾岩野外露头；i. 构造角砾岩中发育较多石英脉，指示多期构造变形

图4　苏满马勒央野外构造照片

Fig. 4　Field photographs showing structural features in the Suman Maleyang area

不透明矿物充填，后者可能为构造角砾岩的胶结物或氧化铁/锰薄膜。构造角砾岩中还可见多期脉体穿切关系：早期硅化作用形成石英脉，中期构造破裂切割早期石英脉，晚期碳酸盐化作用沿裂隙充填形成方解石脉，反映其经历了多阶段构造变形和热液活动。部分石英裂隙内充填的岩屑与不透明矿物，多为岩体胶结物或铁(锰)氧化物薄膜(Cheng et al., 2024)。

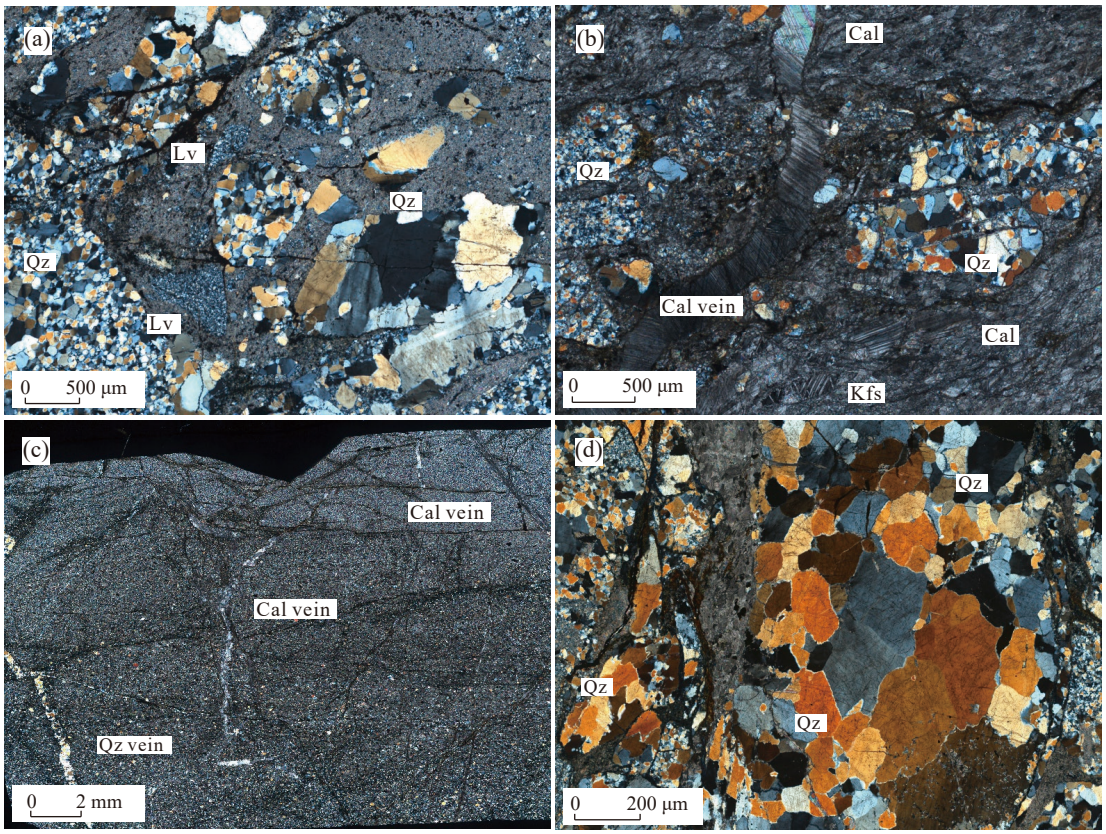
根据断层角砾岩–碎裂岩三角分类图，构造角砾岩样品可进一步划分为不同类型(图 6b)。其中，样品 25QM01-4 和 25QM01-5 主要落入碎裂岩类区域，反映其经历了较强的构造破碎作用；样品 25QM01-6 至 25QM01-8 则主要落入断层脉类区域，说明其可能代表断裂活动过程中沿裂隙充填形成的脉体或热液充填物。结合镜下观察到的石英脉、裂隙充填、硅化和碳酸盐化等现象，表明构造角砾岩形成过程中经历了多期构造破碎与热液活动叠加改造。

总体来看，凝灰质火山角砾岩主要记录了火山碎屑堆积及后期蚀变过程，构造角砾岩则突出表现为断裂破碎、硅化–碳酸盐化热液改造和多期构造叠加特征，而石英脉为该区热液流体活动和构造变形提供了直接岩相学证据

3　样品分析方法

3.1　全岩主微量元素分析方法

本次全岩主、微量元素地球化学测试在南京顺科检测科技有限公司开展，并在严格质量控制的实验条件下完成。样品前处理采用 HF-HNO_3 密闭酸消解体



a. 火山角砾岩，石英重结晶；b. 硅酸盐化角砾岩，发育方解石脉，碳酸盐化严重；c. 构造角砾岩，发育石英脉、裂隙、方解石脉、反映多期次构造热事件；d. 构造角砾岩，石英发育波状消光和动态重结晶；Qz. 石英；Lv. 岩屑；Cal. 方解石；Kfs. 钾长石；Qz vein. 石英脉；Cal vein. 方解石脉

图5 苏满马勒央剖面样品显微照片(正交偏光)

Fig. 5 Microscopic photographs of samples from the Suman Maleyang section

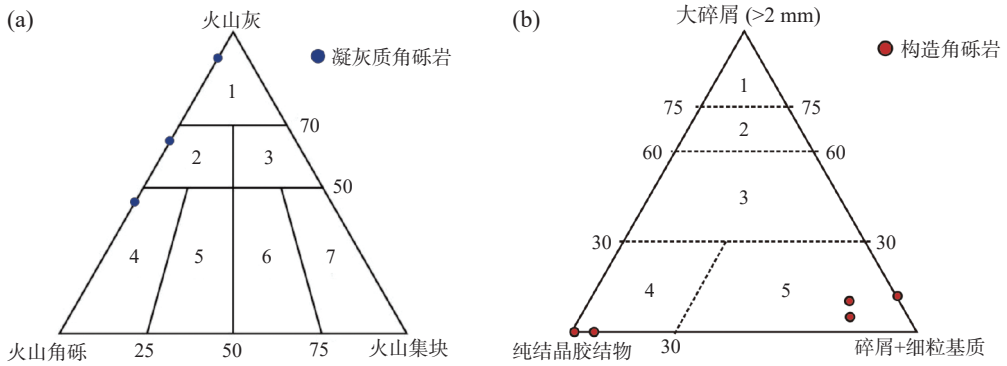


图 a：1.凝灰岩；2.角砾凝灰岩；3.集块凝灰岩；4.火山角砾岩；5.集块角砾岩；6.角砾集块岩；7.集块岩。图 b：1.裂隙角砾岩；2.镶嵌角砾岩；3.杂乱角砾岩；4.碎裂岩、糜棱岩或断层泥；5.断层脉

图6 凝灰质角砾岩粒级三角图(a)与断层角砾–碎裂岩三角图(b)(据 Woodcock et al., 2008)

Fig. 6 (a) Ternary classification diagrams of tuffaceous breccias by grain size and (b) fault breccia-cataclasite classification

系，在 195℃ 恒温条件下加热消解，保障样品中难熔矿物充分分解。测试阶段采用分段检测方式：除 SiO_2 采用碱熔法单独测定外，其余主量元素通过电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)完成测试；全岩微量元素则利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)进行测定。为保障数据可靠性，实验全程采用多重标准物

质进行质量监控, 以美国地质调查局(USGS)系列国际岩石标准(BHVO-2、BCR-2、AGV-2、RGM-2、GSP-2)及原地质矿产部 GSR、GSD 系列标准物质作为盲样同步测试。最终将实测数据与国际地球化学参考物质数据库(GeoReM)的推荐值进行比对验证, 确保本次分析结果的准确度与精密度完全满足后续地球化学研究的精度要求。

3.2　锆石 U-Pb 年代学分析方法

本次研究采用常规重液分离与磁选技术开展锆石分选工作, 在双目显微镜下筛选出晶形完好、无裂隙、无明显包裹体的锆石颗粒, 制成环氧树脂样品靶。为明确锆石内部生长结构、精准选取测试点位, 对样品开展阴极发光(CL)成像分析。锆石 U-Pb 定年测试依托 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统与四极杆电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)联用平台完成, 实验采用 24 μm 激光束斑、6 Hz 剥蚀频率, 以氦气作为载气将激光剥蚀产生的气溶胶输送至等离子体源进行测试。测试过程中, 选用 91500 锆石标准物质作为外标, 校正实验过程中的质量歧视与元素分馏效应, 同时以 Plešovice 锆石标准物质作为监控样, 全程评估实验数据质量。锆石微量元素含量以 NIST SRM 610 为外标、Si 元素为内标进行定量校正。所有原始测试数据均采用 ICPMSDataCal 软件完成离线处理, 主要包括信号积分、背景扣除及普通铅校正等步骤。该套分析方法体系成熟稳定, 已广泛应用于显生宙与前寒武纪各类地质样品的高精度年代学研究, 具备良好的测试准确度与精密度(Liu et al., 2010)。锆石的分选、制靶及 U-Pb 年代学测试均在南京顺科检测科技有限公司完成。

4　测试结果

4.1　岩石主微量元素

凝灰质火山角砾岩(25QM01-1、25QM01-2)样品整体呈中高 Si(SiO_2=84.08%～90.18%)、中等 Al 含量(Al_2O_3=4.88%～5.69%)的特点(表 1)。样品 25QM01-3 具有极低 Si(SiO_2=29.76%)、高 Ca(CaO=36.32%)的特殊组分。结合岩相学观察, 推测其受到较强碳酸盐化改造。因此, 凝灰质火山角砾岩主量元素组成的非均一性, 除受原始火山碎屑物质组成差异控制外, 还可能与后期热液蚀变和次生交代作用有关。总体而言, 区内凝灰质火山角砾岩主量元素组分差异显著, 这种成分非均一性既受控于原始火山碎屑的物质组成差异, 也反映了样品遭受热液蚀变与次生交代改造的程度各不相同。因此, 样品 25QM01-3 主量元素不参与岩石成因讨论。

微量元素结果显示(表 1), 凝灰质火山角砾岩整体呈现出 Rb 富集、Th 与 U 相对富集的特征, 并表现明显 Sr 负异常, 与中–酸性火山碎屑岩的地球化学特征一致; 该组样品稀土元素总量 ∑REE 值为 115.1×10^{-6}～331.9×10^{-6}, LREE/HREE 值为 2.31～2.59, 体现轻重稀土中等分馏、轻稀土相对富集的分配模式; Eu/Eu*值为 0.58～0.99, 表现为轻微至中等 Eu 负异常(表 1)。样品大离子亲石元素(LILE)与高场强元素(HFSE)整体相对富集, 且 Th/U 值普遍大于 3, 指示岩浆具有显著的壳源物质贡献。显著 Sr 和 Eu 负异常特征进一步指示岩浆经历了强烈的分离结晶作用, 整体元素地球化学组合特征与岛弧或俯冲大陆边缘环境

表 1　全岩主量(%)、微量与稀土元素(10^{-6})统计表

Tab. 1　Major (%), trace and rare earth (10^{-6}) elements in whole rock

样品名	25QM01-1	25QM01-2	25QM01-3	25QM01-4	25QM01-5	25QM01-6	25QM01-7	25QM01-8
岩性	凝灰质角砾岩	凝灰质角砾岩	构造角砾岩	构造角砾岩	构造角砾岩	构造角砾岩	构造角砾岩	构造角砾岩
SiO_2	90.18	84.08	29.76	66.32	56.78	75.17	83.77	89.39
TiO_2	0.32	0.50	0.14	1.56	1.42	0.36	0.22	0.32
Al_2O_3	4.88	5.69	2.04	14.17	13.77	5.81	3.80	3.95
TFe_2O_3	0.64	2.39	1.10	6.94	6.59	2.04	2.44	2.98
MnO	0.01	0.08	0.03	0.08	0.10	0.07	0.07	0.05
MgO	0.34	0.87	0.73	2.76	2.97	0.87	1.17	1.17
CaO	0.86	1.98	36.32	1.58	6.93	7.03	4.18	0.56
Na_2O	0.05	0.03	0.01	0.10	0.08	0.02	0.02	0.02
K_2O	1.64	1.30	0.29	3.48	3.08	1.43	0.67	0.63
P_2O_5	0.13	0.10	0.04	0.17	0.20	0.18	0.14	0.09

续表 1

样品名	25QM01-1	25QM01-2	25QM01-3	25QM01-4	25QM01-5	25QM01-6	25QM01-7	25QM01-8
岩性	凝灰质角砾岩	凝灰质角砾岩	构造角砾岩	构造角砾岩	构造角砾岩	构造角砾岩	构造角砾岩	构造角砾岩
Li	4.03	16.50	10.90	35.30	30.20	11.00	12.20	15.20
Be	0.64	0.93	0.26	1.62	1.87	0.96	0.52	0.75
Sc	5.21	8.29	3.72	22.40	22.50	9.42	5.95	7.02
Ti	1 717.00	2 774.00	830.00	9 033.00	8 302.00	2 034.00	1 214.00	1 806.00
V	46.50	73.70	16.00	158.00	153.00	74.30	45.60	46.90
Mn	117.00	591.00	234.00	639.00	757.00	545.00	535.00	352.00
Co	2.73	91.30	2.61	20.70	21.40	6.18	3.77	7.26
Ni	8.30	61.40	8.54	73.80	84.70	21.20	9.86	20.10
Cu	7.30	169.00	5.58	30.30	1.75	4.33	8.64	8.47
Zn	10.00	68.60	12.10	40.80	51.00	49.20	50.70	53.00
Ga	5.86	7.76	2.43	21.90	23.20	6.49	4.64	5.51
As	34.40	39.20	5.84	19.10	25.50	31.00	24.20	22.80
Rb	75.60	70.20	12.50	132.00	141.00	79.10	38.30	39.00
Sr	8.32	23.30	159.00	26.40	56.50	50.10	22.80	11.70
Y	7.27	19.10	7.55	33.00	29.10	11.80	6.16	9.55
Zr	58.30	73.30	29.00	243.00	218.00	58.00	61.30	59.90
Nb	4.44	7.49	2.57	27.10	24.80	4.79	2.69	5.37
Mo	0.20	0.20	0.46	1.47	0.59	0.23	0.23	0.31
Cs	3.12	3.45	1.05	9.70	6.69	2.45	1.59	2.60
Ba	391.00	173.00	92.90	767.00	290.00	344.00	164.00	125.00
La	6.67	15.40	5.46	42.00	49.90	7.61	5.43	8.92
Ce	14.20	29.70	11.50	79.70	93.40	15.70	10.80	19.70
Pr	1.66	3.95	1.31	9.50	11.30	1.89	1.24	2.26
Nd	6.63	16.30	5.46	37.30	44.40	7.75	5.00	9.05
Sm	1.37	3.74	1.23	7.55	8.45	1.96	1.10	1.98
Eu	0.25	1.24	0.28	1.69	1.80	0.59	0.25	0.41
Gd	1.25	3.94	1.27	6.58	6.80	2.11	1.05	1.82
Tb	0.21	0.60	0.21	1.01	0.94	0.35	0.16	0.29
Dy	1.20	3.39	1.24	5.89	5.06	2.00	0.97	1.71
Ho	0.25	0.64	0.24	1.14	0.94	0.38	0.18	0.34
Er	0.73	1.65	0.66	3.26	2.76	1.06	0.54	0.95
Tm	0.10	0.22	0.09	0.46	0.40	0.15	0.09	0.14
Yb	0.66	1.33	0.58	3.07	2.72	0.98	0.63	0.85
Lu	0.10	0.18	0.08	0.45	0.41	0.14	0.12	0.12
Hf	1.45	1.81	0.70	6.25	5.63	1.38	1.42	1.38
Ta	0.29	0.50	0.17	1.70	1.58	0.32	0.16	0.33
Pb	3.59	6.92	2.35	5.46	2.28	10.70	10.40	9.03
Th	2.61	3.06	1.75	11.50	10.00	2.17	2.09	2.16
U	0.64	0.80	1.26	2.68	2.72	1.26	0.78	0.72

酸性火山碎屑岩高度吻合(图 7)。

构造角砾岩样品(25QM01-4～25QM01-8)地球化学特征规律性显著,整体表现为中高 Si 含量,SiO_2=56.78%～89.3%(表 1)。其中,25QM01-4～5 样品 MgO、全铁及 CaO 组分含量偏高,25QM01-6～8 MgO、TFe_2O_3 及 CaO 组分含量偏低,具有显著的硅质富集特点,反映构造破碎过程中强烈的含硅热液充填作用(Elidemir et al., 2022)。样品 K_2O 含量相对富集(K_2O=0.63%～3.48%)、高于 Na_2O(0.02%～0.10%),具有明显的钾质富集特征。构造角砾岩样品 25QM01-4～8 微量元素以 Pb 相对富集、Sr 显著负异常、Ti 明显亏损为主要特征,∑REE 值为 107.1×10^{-6}～823.2×10^{-6}(碎裂糜棱岩的∑REE 值为 741.6×10^{-6}～823.2×10^{-6}、断层脉为 107.1×10^{-6}～183.1×10^{-6}),LREE/HREE 值为 2.04～4.17,轻重稀土中等分馏、轻稀土富集;Eu/Eu*值为 0.65～0.89,Eu 负异常较明显(图 7)。

4.2 锆石 U-Pb 定年

本次工作对凝灰质火山角砾岩(25QM01-2)及构

造角砾岩(25QM01-5、25QM01-6)共 3 个样品开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析。数据处理过程中剔除谐和度＜90% 的测点, 获得 107 个有效锆石 U-Pb 年龄数据(表 2)。锆石 CL 图像显示明显的岩浆锆石振荡环带; 在锆石稀土元素配分图中, 均表现为典型的 Ce 正异常、Eu 负异常以及重稀土元素富集, 表明其自身主要具有岩浆成因特征(吴元保等, 2004; 图 8)。然而, 3 件样品的锆石年龄分布均较为分散, 以中元古代—古元古代年龄组分为主, 明显早于寄主岩石可能的形成时代, 表明这些锆石主要为捕获锆石。

在凝灰质火山角砾岩 25QM01-2 样品中分析了 40 颗锆石, 获得 35 颗有效年龄(表 2, 图 9a)。锆石年龄范围从古生代到新太古代均有分布, 最年轻年龄为 474.4 Ma。其中, 古生代(约 474 Ma)分布两颗、新元古代无锆石分布、中元古代(1 000～1 600 Ma)分布 21 颗、古元古代(1 600～1 800 Ma)分布 8 颗、新太古代(约 2 600 Ma)分布 4 颗。

在构造角砾岩 25QM01-5 样品中分析了 40 颗锆石, 获得 35 颗有效年龄(表 2, 图 9b)。锆石年龄分布广泛, 最年轻年龄为 475.3 Ma。各年龄段分布: 古生代(约 475 Ma)分布两颗、新元古代分布 5 颗、中元古代(1 000～1 600 Ma)分布 17 颗、古元古代(1 600～2 500 Ma)分布 10 颗、中太古代(2 800 Ma)分布 1 颗。25QM01-6 样品分析了 40 颗锆石, 有效锆石年龄 37 颗(表 2, 图 9c), 最年轻年龄为 472.7 Ma。其中, 古生代(473～476 Ma)分布两颗、新元古代(928.8 Ma)分布 1 颗、中元古代(1 000～1 600 Ma)分布 25 颗、古元古代(1 600～1 800 Ma)分布 8 颗、新太古代(2 600 Ma)分布 1 颗。3 组样品锆石年龄峰值集中在中元古代(1 000～1 600 Ma)和古元古代(1 600～1 800 Ma), 源区以中元古代—古元古代地壳物质为主(图 9d)。

5　讨论

5.1　元素活动性

苏满马勒央地区岩石普遍发育断裂、裂隙、硅化和碳酸盐化等现象, 表明其形成后经历了较强的构造破碎和热液蚀变叠加改造。因此, 在利用全岩地球化学特征讨论岩石成因和构造背景时, 需要充分考虑元素活动性的影响。其中, Rb、K、Sr、Ba、Pb 等大离子亲石元素及 Ca、Na、LOI 等组分容易受后期流体作用影响, 而 Nb、Ta、Ti、Zr、Y、REE 等相对不活动元素对原岩性质和构造背景具有更稳定的指示意义。

凝灰质火山角砾岩样品整体表现出较一致的微量元素和稀土元素配分特征, 显示其原岩具有一定的岩浆岩地球化学属性。原始地幔标准化微量元素蛛网图中(图 7a), 该类样品总体富集 Rb、Th、U 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素, 并表现出明显的 Sr 负异常; 球粒陨石标准化稀土元素配分图中(图 7b), 样品呈轻稀土相对富集、重稀土相对平坦的右倾型配分模式, 并具有轻微至中等 Eu 负异常。这些特征表明, 凝灰质火山角砾岩的原岩可能形成于受俯冲流体或地壳物质参与影响的岩浆体系中, 具有岛弧或活动大陆边缘火山岩的地球化学亲缘性。同时, Eu 和 Sr 的负异常可能与岩浆演化过程中长石分离结晶有关, 也可能受到后期蚀变过程中长石分解和流体改造的进一步影响(Aliyari et al., 2014)。

值得注意的是, 凝灰质火山角砾岩内部也存在一定地球化学差异。部分样品仍较好地保留了火山碎屑岩的原岩信息, 而部分样品受碳酸盐化和热液交代作用影响明显, 导致 CaO、Sr、LOI 等组分发生显著变化。例如, 凝灰质角砾岩样品 25QM01-3 具有极低硅、高钙等特征, 表明这些元素在后期热液蚀变和次生交代作用过程中活动性较强。但稀土元素和微量元素配分图显示样品 25QM01-3 与其他两个凝灰质角砾岩样品并无差别。因此, 文中主要依据相对不活动元素组合、稀土元素配分型式以及 Nb、Ta、Ti 等高场强元素亏损特征, 判断凝灰质火山角砾岩的原岩构造背景, 而不单独依据易活动元素或强蚀变样品的主量元素组成进行解释。

构造角砾岩样品的微量元素和稀土元素配分曲线与凝灰质火山角砾岩总体相似(图 7), 说明其原岩可能与凝灰质火山角砾岩或相关火山碎屑岩具有密切联系。但构造角砾岩普遍经历了强烈的断裂破碎、硅化、碳酸盐化和热液胶结作用, 其全岩化学组成已受到明显改造。因此, 构造角砾岩的地球化学特征不宜直接用于判别原始岩浆构造环境, 而主要用于说明其原岩来源及后期构造–热液改造过程(Srivastava et al., 2001; Aliyari et al., 2014; McNulty et al., 2020; Basori et al., 2022; Djagre et al., 2023)。构造角砾岩中 Pb 等亲硫元素局部富集, Th/U 值在剖面上存在一定变化, 可能反映热液流体活动和元素迁移的影响; 但这些特征更多代表断裂带流体改造过程, 而不应作为独立的构造背景判别依据。

表 2 样品锆石 U-Pb 年代学数据

Tab. 2 U-Pb geochronological data of zircon samples

样品号	Pb	Th^{232}	U^{238}	Th/U	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	rho	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	谐和
	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}		比值	1σ	比值	1σ		年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ	度
25QM01-2-1	52.48	67.73	151.40	0.45	3.12	0.06	0.25	0.00	0.64	1 438.82	13.60	1 437.19	14.67	99%
25QM01-2-3	97.01	168.29	305.60	0.55	2.70	0.03	0.23	0.00	0.73	1 328.51	8.02	1 327.32	9.41	99%
25QM01-2-4	497.53	337.62	647.39	0.52	12.86	0.13	0.51	0.00	0.77	2 669.74	9.73	2 668.21	17.21	99%
25QM01-2-5	71.88	111.07	231.65	0.48	2.60	0.03	0.22	0.00	0.61	1 299.42	7.85	1 298.01	7.70	99%
25QM01-2-6	70.83	56.21	230.95	0.24	2.81	0.04	0.23	0.00	0.73	1 359.05	11.80	1 358.88	14.06	99%
25QM01-2-7	16.02	18.91	47.25	0.40	3.10	0.06	0.25	0.00	0.61	1 432.80	15.16	1 432.06	15.56	99%
25QM01-2-8	39.58	48.74	123.54	0.39	2.79	0.04	0.23	0.00	0.72	1 353.91	10.50	1 355.67	12.32	99%
25QM01-2-9	43.07	24.47	55.41	0.44	13.48	0.23	0.52	0.01	0.63	2 713.68	16.50	2 709.23	24.09	99%
25QM01-2-10	67.30	66.33	187.14	0.35	3.43	0.05	0.26	0.00	0.60	1 512.32	11.21	1 509.75	11.45	99%
25QM01-2-11	49.59	65.82	189.16	0.35	2.18	0.03	0.20	0.00	0.62	1 174.43	9.62	1 167.19	9.09	99%
25QM01-2-12	82.70	91.67	178.93	0.51	5.27	0.07	0.34	0.00	0.82	1 864.32	11.03	1 870.61	17.02	99%
25QM01-2-13	92.11	184.68	173.95	1.06	5.10	0.05	0.33	0.00	0.65	1 836.52	9.09	1 834.18	10.99	99%
25QM01-2-15	31.19	42.32	89.39	0.47	3.16	0.04	0.25	0.00	0.60	1 447.01	10.69	1 442.91	10.81	99%
25QM01-2-16	75.76	55.10	97.54	0.56	12.81	0.17	0.51	0.01	0.87	2 665.72	12.74	2 661.59	25.38	99%
25QM01-2-17	81.60	78.35	325.24	0.24	2.05	0.03	0.19	0.00	0.76	1 132.64	9.38	1 124.27	10.69	99%
25QM01-2-18	38.87	50.93	112.92	0.45	3.12	0.04	0.25	0.00	0.63	1 437.08	10.39	1 440.33	11.02	99%
25QM01-2-19	105.67	138.73	407.47	0.34	2.03	0.03	0.19	0.00	0.59	1 124.92	10.96	1 124.69	9.76	99%
25QM01-2-21	30.14	95.53	69.24	1.38	3.86	0.07	0.28	0.00	0.66	1 604.86	15.07	1 605.23	17.39	99%
25QM01-2-22	61.71	96.66	203.51	0.47	2.94	0.05	0.24	0.00	0.61	1 392.42	11.64	1 391.71	11.75	99%
25QM01-2-23	51.24	333.28	516.41	0.65	0.60	0.01	0.08	0.00	0.67	478.97	6.29	474.98	5.06	99%
25QM01-2-25	106.69	149.25	417.29	0.36	2.33	0.03	0.21	0.00	0.53	1 221.24	8.91	1 210.00	7.38	99%
25QM01-2-26	67.27	121.78	211.99	0.57	2.94	0.04	0.24	0.00	0.51	1 393.43	11.17	1 390.80	9.33	99%
25QM01-2-27	23.50	49.13	58.72	0.84	3.92	0.08	0.28	0.00	0.69	1 617.73	16.76	1 608.86	20.35	99%
25QM01-2-28	25.35	34.88	86.85	0.40	2.91	0.05	0.24	0.00	0.65	1 384.29	12.66	1 386.14	13.47	99%
25QM01-2-30	60.14	49.90	83.00	0.60	13.03	0.20	0.52	0.00	0.64	2 681.47	14.26	2 679.47	21.00	99%
25QM01-2-31	35.98	34.94	168.10	0.21	1.86	0.03	0.18	0.00	0.61	1 068.25	11.21	1 071.60	10.28	99%
25QM01-2-32	28.80	70.01	74.88	0.94	3.52	0.06	0.27	0.00	0.65	1 530.93	12.59	1 523.07	13.95	99%
25QM01-2-33	80.28	108.39	177.53	0.61	5.19	0.07	0.33	0.00	0.67	1 851.76	11.16	1 842.88	14.08	99%
25QM01-2-34	29.25	43.32	111.46	0.39	2.31	0.04	0.21	0.00	0.57	1 214.41	10.93	1 219.17	9.78	99%
25QM01-2-35	70.89	87.25	326.97	0.27	1.85	0.02	0.18	0.00	0.57	1 062.01	8.86	1 058.82	7.53	99%
25QM01-2-36	57.10	52.95	129.63	0.41	5.45	0.08	0.34	0.00	0.71	1 893.38	12.46	1 887.74	16.92	99%
25QM01-2-37	29.41	53.54	130.08	0.41	1.82	0.03	0.18	0.00	0.62	1 054.15	10.43	1 068.56	9.75	98%
25QM01-2-38	112.22	352.67	1 206.64	0.29	0.59	0.01	0.08	0.00	0.59	473.84	5.21	474.47	3.70	99%
25QM01-2-39	79.32	82.49	197.93	0.42	4.61	0.07	0.31	0.00	0.67	1 750.40	12.96	1 747.49	15.92	99%
25QM01-2-40	34.95	69.16	87.47	0.79	3.91	0.07	0.28	0.00	0.60	1 615.38	13.87	1 606.87	14.63	99%
25QM01-5-1	37.58	47.41	140.10	0.34	2.19	0.03	0.20	0.00	0.68	1 177.73	10.15	1 172.22	10.60	99%
25QM01-5-2	87.82	88.37	184.39	0.48	5.07	0.05	0.33	0.00	0.56	1 830.36	9.28	1 832.90	9.72	99%
25QM01-5-3	142.75	114.01	315.96	0.36	5.12	0.06	0.33	0.00	0.80	1 838.78	10.81	1 833.93	16.23	99%
25QM01-5-4	58.49	50.41	186.30	0.27	2.83	0.03	0.23	0.00	0.67	1 363.63	8.58	1 357.84	9.39	99%
25QM01-5-6	58.06	65.31	124.04	0.53	4.94	0.06	0.32	0.00	0.71	1 809.22	9.98	1 810.17	13.21	99%
25QM01-5-7	111.56	164.40	560.03	0.29	1.42	0.02	0.15	0.00	0.50	898.28	7.84	895.21	5.50	99%
25QM01-5-8	20.82	54.69	78.79	0.69	1.85	0.03	0.18	0.00	0.49	1 064.28	11.70	1 060.67	8.42	99%
25QM01-5-9	55.32	51.60	156.66	0.33	3.33	0.04	0.26	0.00	0.63	1 488.26	10.25	1 486.77	10.88	99%
25QM01-5-10	46.19	100.11	222.02	0.45	1.44	0.04	0.15	0.00	0.47	904.06	16.00	898.66	10.57	99%
25QM01-5-11	70.85	69.93	407.92	0.17	1.43	0.03	0.15	0.00	0.95	902.08	14.43	900.71	19.21	99%
25QM01-5-12	12.61	24.56	46.54	0.53	2.04	0.04	0.19	0.00	0.54	1 129.66	14.65	1 125.08	11.98	99%
25QM01-5-13	90.83	141.36	382.80	0.37	1.79	0.02	0.18	0.00	0.62	1 042.90	8.07	1 040.83	7.34	99%
25QM01-5-14	105.37	188.34	399.78	0.47	2.02	0.02	0.19	0.00	0.71	1 123.76	7.63	1 123.04	8.18	99%
25QM01-5-15	35.52	80.92	117.85	0.69	2.29	0.03	0.21	0.00	0.68	1 208.52	10.09	1 204.61	10.58	99%

续表 2

样品号	Pb	Th^{232}	U^{238}	Th/U	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	rho	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	谐和
	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}		比值	1σ	比值	1σ		年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ	度
25QM01-5-16	45.83	63.54	94.45	0.67	5.29	0.07	0.34	0.00	0.79	1 866.79	11.07	1 871.15	16.65	99%
25QM01-5-20	29.99	23.16	35.70	0.65	14.76	0.25	0.54	0.01	0.66	2 799.90	16.32	2 801.32	25.57	99%
25QM01-5-21	22.12	28.16	85.86	0.33	2.30	0.04	0.21	0.00	0.62	1 212.48	11.67	1 214.56	11.32	99%
25QM01-5-22	27.23	103.50	232.82	0.44	0.77	0.01	0.09	0.00	0.60	577.87	7.84	578.30	5.90	99%
25QM01-5-23	66.85	180.34	153.95	1.17	3.95	0.05	0.28	0.00	0.67	1 623.23	11.13	1 605.55	13.03	98%
25QM01-5-24	81.81	99.63	283.91	0.35	2.68	0.04	0.23	0.00	0.61	1 323.21	11.68	1 319.70	11.57	99%
25QM01-5-25	40.62	77.05	159.47	0.48	2.09	0.03	0.20	0.00	0.56	1 146.86	9.98	1 149.29	8.58	99%
25QM01-5-26	30.24	30.53	46.45	0.66	10.44	0.16	0.46	0.00	0.67	2 474.61	14.02	2 457.04	20.58	99%
25QM01-5-27	58.05	52.84	144.01	0.37	5.03	0.08	0.33	0.00	0.72	1 824.44	13.66	1 816.45	18.24	99%
25QM01-5-28	61.39	64.51	190.25	0.34	3.16	0.06	0.25	0.00	0.52	1 448.39	14.25	1 442.32	12.49	99%
25QM01-5-29	94.82	401.71	974.99	0.41	0.60	0.01	0.08	0.00	0.64	478.85	5.83	476.33	4.46	99%
25QM01-5-30	222.95	132.64	589.96	0.22	4.39	0.06	0.30	0.00	0.64	1 710.11	11.68	1 707.25	13.44	99%
25QM01-5-31	84.13	118.34	163.97	0.72	6.04	0.09	0.36	0.00	0.63	1 981.87	13.26	1 985.54	16.44	99%
25QM01-5-32	67.15	91.81	207.80	0.44	3.09	0.05	0.25	0.00	0.66	1 431.42	12.73	1 425.78	14.07	99%
25QM01-5-33	89.02	134.82	339.83	0.40	2.34	0.04	0.21	0.00	0.68	1 223.81	10.70	1 215.47	11.29	99%
25QM01-5-34	65.78	145.04	174.54	0.83	3.54	0.05	0.27	0.00	0.61	1 535.52	11.85	1 520.59	12.37	99%
25QM01-5-36	51.42	57.41	127.73	0.45	4.40	0.06	0.30	0.00	0.54	1 711.80	12.14	1 710.07	11.78	99%
25QM01-5-37	49.72	104.47	158.27	0.66	2.72	0.04	0.23	0.00	0.65	1 333.64	11.13	1 323.12	11.67	99%
25QM01-5-38	14.79	56.35	152.99	0.37	0.61	0.02	0.08	0.00	0.32	484.23	14.20	475.30	5.33	98%
25QM01-5-39	46.41	90.18	251.63	0.36	1.43	0.02	0.15	0.00	0.58	902.36	10.20	888.33	8.16	98%
25QM01-5-40	37.28	48.61	109.52	0.44	3.31	0.06	0.26	0.00	0.57	1 484.31	13.62	1 487.20	13.27	99%
25QM01-6-1	22.77	31.03	73.58	0.42	2.82	0.05	0.24	0.00	0.58	1 361.71	12.82	1 361.66	12.22	99%
25QM01-6-2	130.68	117.81	387.98	0.30	3.14	0.04	0.25	0.00	0.78	1 443.63	9.62	1 443.24	12.57	99%
25QM01-6-3	49.55	57.45	150.95	0.38	2.96	0.04	0.24	0.00	0.67	1 398.50	9.91	1 396.38	10.98	99%
25QM01-6-4	39.50	110.61	154.24	0.72	1.84	0.03	0.18	0.00	0.68	1 060.24	9.12	1 055.00	9.11	99%
25QM01-6-5	88.15	81.82	206.04	0.40	4.46	0.05	0.31	0.00	0.70	1 723.03	8.64	1 721.23	10.95	99%
25QM01-6-6	39.72	100.16	158.48	0.63	1.80	0.03	0.18	0.00	0.61	1 043.79	9.58	1 041.43	8.55	99%
25QM01-6-7	84.38	70.82	340.99	0.21	2.03	0.02	0.19	0.00	0.55	1 124.94	8.35	1 121.21	6.95	99%
25QM01-6-8	60.95	89.10	186.96	0.48	2.82	0.03	0.23	0.00	0.66	1 360.75	9.02	1 356.22	9.69	99%
25QM01-6-11	33.80	48.50	95.94	0.51	3.17	0.05	0.25	0.00	0.58	1 450.28	11.11	1 438.65	10.80	99%
25QM01-6-12	70.81	154.58	146.11	1.06	4.17	0.05	0.29	0.00	0.54	1 668.64	9.58	1 666.14	9.24	99%
25QM01-6-13	177.60	127.37	229.07	0.56	12.84	0.13	0.51	0.00	0.67	2 668.09	9.57	2 657.10	14.56	99%
25QM01-6-14	72.78	84.04	169.00	0.50	4.30	0.05	0.30	0.00	0.51	1 693.28	10.56	1 689.16	9.69	99%
25QM01-6-16	90.32	141.07	240.84	0.59	3.42	0.04	0.26	0.00	0.65	1 508.58	9.59	1 509.09	10.58	99%
25QM01-6-17	32.73	50.68	74.75	0.68	4.19	0.06	0.30	0.00	0.66	1 672.41	12.17	1 671.79	14.41	99%
25QM01-6-18	21.84	32.51	62.36	0.52	3.16	0.05	0.25	0.00	0.56	1 446.94	12.52	1 441.39	11.80	99%
25QM01-6-19	47.55	47.95	134.77	0.36	3.31	0.04	0.26	0.00	0.62	1 484.00	10.45	1 482.97	11.05	99%
25QM01-6-20	32.20	28.18	78.72	0.36	4.33	0.06	0.30	0.00	0.67	1 700.00	12.24	1 696.35	14.73	99%
25QM01-6-21	30.90	49.00	92.50	0.53	2.82	0.04	0.23	0.00	0.57	1 360.62	10.79	1 358.90	10.07	99%
25QM01-6-22	24.79	40.22	66.25	0.61	3.43	0.06	0.26	0.00	0.68	1 512.15	14.90	1 510.46	17.30	99%
25QM01-6-23	97.48	214.31	242.45	0.88	3.32	0.04	0.26	0.00	0.64	1 485.78	9.32	1 484.55	10.14	99%
25QM01-6-24	29.93	66.10	79.09	0.84	3.11	0.05	0.25	0.00	0.74	1 436.02	11.20	1 438.85	13.85	99%
25QM01-6-25	37.90	51.57	144.62	0.36	2.18	0.03	0.20	0.00	0.71	1 173.84	9.49	1 167.76	10.37	99%
25QM01-6-26	59.06	69.46	177.48	0.39	3.29	0.05	0.26	0.00	0.57	1 479.83	11.94	1 484.72	11.61	99%
25QM01-6-27	68.91	128.96	153.29	0.84	4.60	0.07	0.31	0.00	0.74	1 749.85	13.01	1 739.79	17.55	99%
25QM01-6-28	41.85	26.53	99.09	0.27	5.20	0.09	0.33	0.00	0.50	1 853.08	14.34	1 840.36	13.59	99%
25QM01-6-29	31.70	34.67	92.01	0.38	3.48	0.05	0.27	0.00	0.58	1 523.77	11.72	1 523.72	11.64	99%
25QM01-6-30	62.72	89.09	188.01	0.47	3.16	0.06	0.25	0.00	0.46	1 447.25	15.60	1 431.47	11.93	98%
25QM01-6-31	112.42	221.97	256.64	0.86	4.36	0.06	0.30	0.00	0.63	1 705.55	11.13	1 710.47	12.65	99%
25QM01-6-32	41.27	52.12	158.85	0.33	2.35	0.04	0.21	0.00	0.56	1 226.94	11.53	1 204.06	9.95	98%
25QM01-6-33	66.46	84.06	351.62	0.24	1.52	0.02	0.15	0.00	0.62	939.58	9.29	928.77	8.13	98%

续表 2

样品号	Pb	Th^{232}	U^{238}	Th/U	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	rho	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	谐和
	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}		比值	1σ	比值	1σ		年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ	度
25QM01-6-34	86.04	217.03	926.06	0.23	0.61	0.01	0.08	0.00	0.52	482.52	6.61	472.72	4.07	97%
25QM01-6-35	231.68	464.06	669.67	0.69	3.15	0.05	0.25	0.00	0.62	1 444.25	12.93	1 419.42	13.29	98%
25QM01-6-36	57.90	69.61	189.32	0.37	2.94	0.04	0.24	0.00	0.61	1 392.63	11.32	1 384.89	11.42	99%
25QM01-6-37	47.83	113.34	179.42	0.63	2.18	0.04	0.20	0.00	0.56	1 176.09	11.22	1 168.24	9.64	99%
25QM01-6-38	80.97	75.38	373.31	0.20	1.90	0.03	0.18	0.00	0.65	1 081.43	9.61	1 074.24	9.33	99%
25QM01-6-39	43.26	309.10	410.76	0.75	0.60	0.01	0.08	0.00	0.54	475.90	6.22	476.61	4.04	99%
25QM01-6-40	53.35	186.47	222.74	0.84	1.70	0.03	0.17	0.00	0.56	1 009.33	10.64	1 008.61	8.75	99%

注：谐和度＜90%的锆石分析点予以删除，不参与年龄统计及计算。

综上所述，凝灰质火山角砾岩相对保存了原岩的岩浆地球化学信息，其 LILE 富集、HFSE 亏损和轻稀土富集特征可用于约束其岛弧或活动大陆边缘属性（Bhat et al., 2023; Amani et al., 2024;Karaoğlu et al., 2024）；构造角砾岩与凝灰质火山角砾岩地球化学特征的相似性，则主要说明二者具有相近原岩来源，或构造角砾岩由凝灰质火山岩经后期断裂破碎、热液充填和胶结改造形成。由于构造角砾岩受后期改造强烈，文中不将其作为构造环境判别的主要依据。

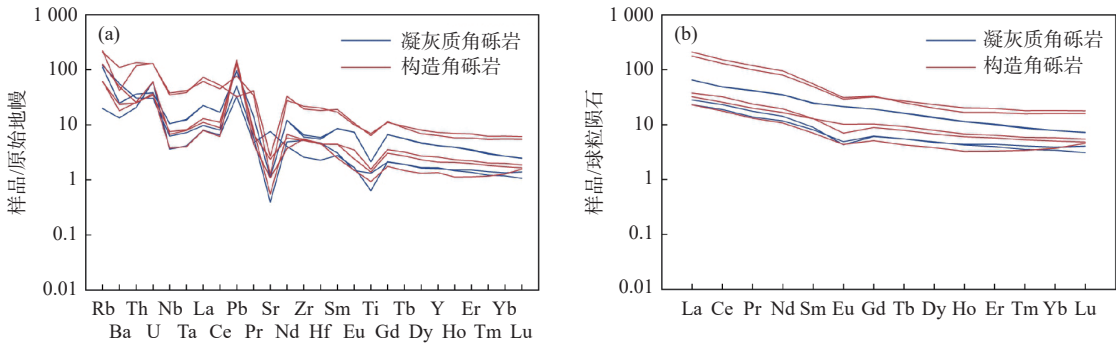
5.2 锆石成因分析

苏满马勒央地区一个凝灰质火山角砾岩及两个构造角砾岩样品经 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析后共测得 107 颗有效锆石年龄，均表现为捕获锆石，未获得成岩年龄（吴元保等，2004），这一现象表明，样品所对应的成岩事件时代必然晚于最年轻捕获锆石年龄峰值（～473 Ma）；岩浆可能处于 Zr 欠饱和状态（多数样品 Zr 显著低于 100×10^{-6}），导致全体锆石群体均为捕获锆石（Olierook et al., 2020）；此外岩浆在上升过程中应显著同化了围岩或深部地壳物质。3 个样品的捕获锆石年龄谱高度一致，均以中元古代（1.0～1.6 Ga）和古元古代（1.6～1.8 Ga）为双峰，次要峰值为古生代和新太古代晚期。这种年龄谱高度一致性表明 3 组角砾岩具有相同的深部源区或上升路径，在岩浆上升过程中系统性地同化了基底地壳物质（Wang et al., 2020b）。

苏满马勒央地区 3 组样品中中元古代（1 000～1 600 Ma）峰值的普遍性，与全球 Grenville 期造山事件的构造热活动记录相吻合，反映了该区深部地壳记录了 Rodinia 超大陆聚合期的岩浆事件；古元古代（1 600～1 800 Ma）峰值则对应 Columbia 超大陆聚合期的地壳增生事件。3 组样品全部为捕获锆石、未获得成岩年龄的现象，最合理的解释是岩浆在上升过程中经历了充分的围岩同化混染，同时成岩阶段温度和时间条件不足以结晶新生锆石（Pack et al., 2016）。岩石角砾岩化特征暗示岩浆在侵位过程中可能经历了快速淬火或隐爆作用，导致成岩阶段缺乏适宜锆石结晶的稳定热力学条件。这与 Xi et al.（2021）报道的吉尔吉斯北天山 Aktyuz 地体中含有大量前寒武纪捕获锆石的早古生代花岗斑岩类似。

除中元古代—古元古代主峰外，样品中还出现了 473 Ma、～800 Ma 和～2.6 Ga 等次级年龄组分，这些年龄具有一定区域地质意义。473 Ma 年龄组属于早古生代奥陶纪，与阿尔金–东昆仑及西昆仑地区广泛发育的原特提斯洋俯冲相关岩浆–构造事件相对应。已有研究表明，西昆仑地区原特提斯洋在奥陶纪开始向北俯冲，并在上盘形成岛弧体系；早古生代侵入岩主要形成于早奥陶世—早志留世，区域内已报道～481 Ma、480 Ma、464 Ma 和 460 Ma 等锆石 U-Pb 年龄（韩芳林，2006）。东昆仑和北东阿尔金地区也报道了 477～472 Ma 侵入岩以及～490 Ma 的火山岩，均被解释为原特提斯洋俯冲背景下的岩浆活动记录（Wang et al., 2019; Hu et al., 2023）。因此，本研究中 473 Ma 年龄组可能记录了区域早古生代俯冲–岛弧岩浆事件，但由于其颗粒数量较少，文中暂不将 472～475 Ma 年龄直接解释为凝灰质火山角砾岩或构造角砾岩的精确成岩年龄，仅将其作为最年轻年龄组，用以限定岩石形成时代不早于～473 Ma。

～800 Ma 年龄组可与阿尔金–塔里木及邻区新元古代构造–岩浆事件相联系。前人研究认为，阿尔金地区及塔里木东南缘保存有中元古代—新元古代沉积和岩浆记录，其中 880～760 Ma 的新元古代沉积岩形成于 Rodinia 超大陆裂解前后的伸展背景（Liu et al., 2020）。韩芳林（2006）也将震旦纪—寒武纪 Rodinia 超大陆裂解、原特提斯洋形成作为西昆仑增生造山带早期演化的重要阶段。因此，～800 Ma 锆石年龄可能反映源区中与 Rodinia 裂解或塔里木陆缘新元古代伸展–岩浆作用有关的物质组分。



标准化数据来源 Sun et al.(1989)

图7　样品原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)与样品球粒陨石标准化稀土元素配分图(b)

Fig. 7　(a) Standardized trace element distribution map of the original mantle sample, and (b) standardized rare earth element spider web diagram of sample chondrite meteorites

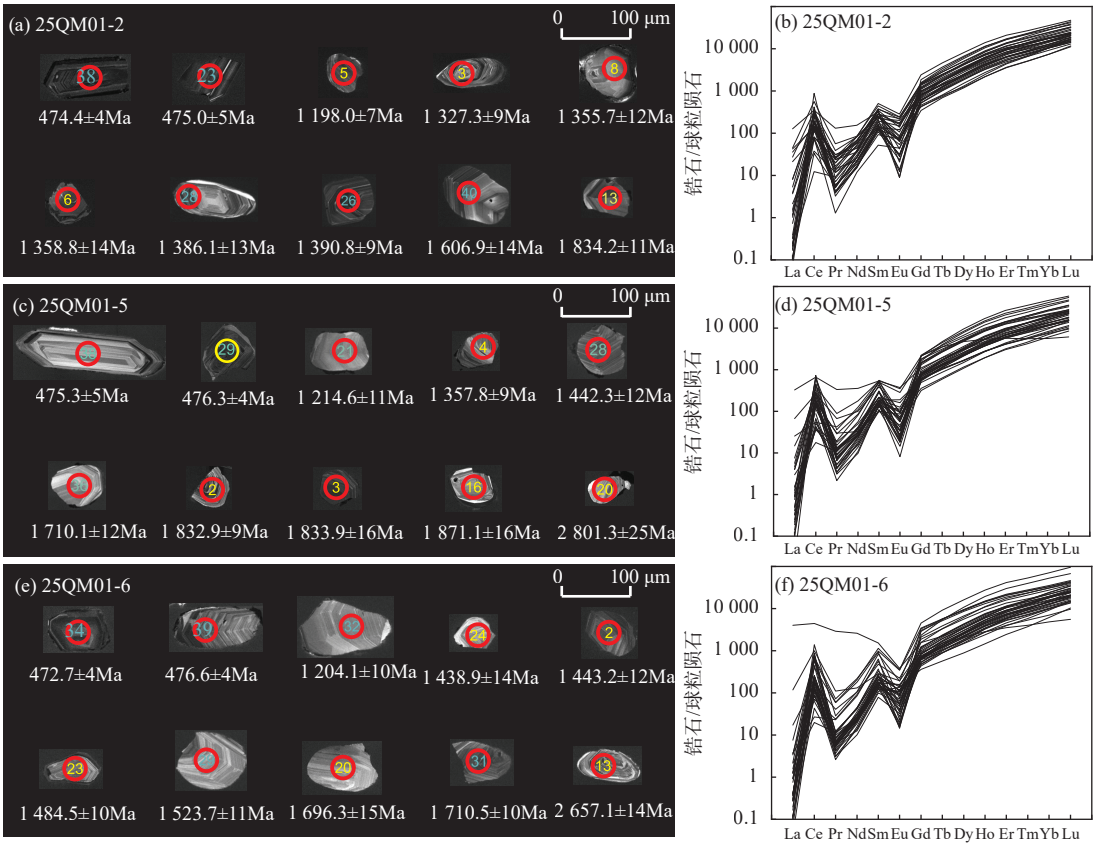


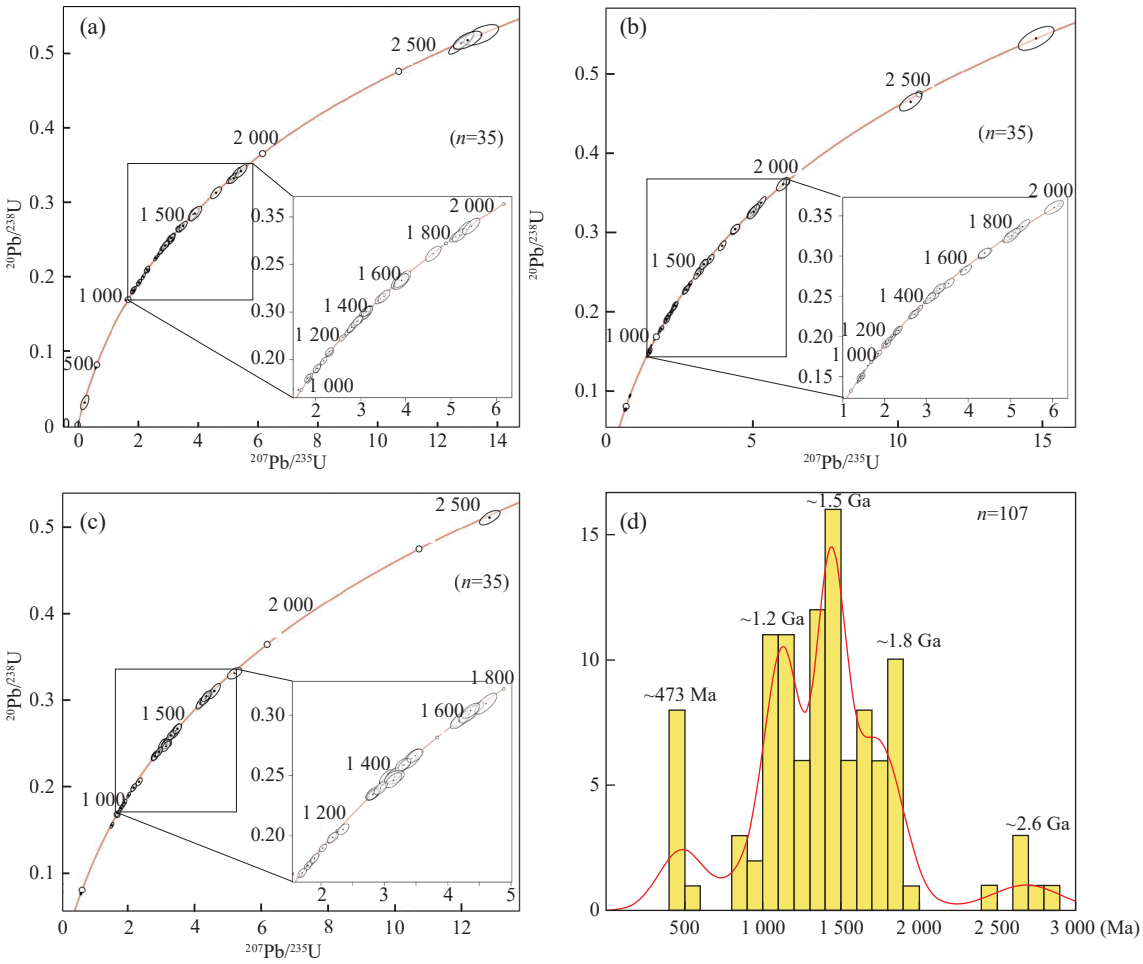
图8　样品典型锆石颗粒 CL 图像(a、c、e)以及对应的锆石微量元素蛛网图(b、d、f)

Fig. 8　(a, c, e) Representative CL images of zircon grains from the analyzed samples, and (b, d, f) corresponding zircon trace-element spider diagrams

～2.6 Ga 年龄组则指示源区中存在新太古代古老陆壳物质。塔里木克拉通及其周缘已报道新太古代—古元古代基底岩石。例如, 北塔里木 Tuoge 杂岩中 TTG 片麻岩记录了～2 603 Ma、2 565 Ma 和 2 516 Ma 的岩浆事件(Chen et al., 2019)。北塔里木基底岩石中也有～2 575 Ma、2 516 Ma 和 2 460 Ma 的锆石 U-Pb 年龄记录(Long et al., 2010)。

5.3　岩石成因机制和地质意义

苏满马勒央剖面中凝灰质火山角砾岩与构造角砾岩空间上密切共生, 但二者的岩石学属性和地球化学解释意义并不完全相同。凝灰质火山角砾岩主要保留了火山碎屑岩的原岩信息, 可用于讨论岩石成因



a. 25QM01-2 锆石年龄图; b. 25QM01-5 锆石年龄图; c. 25QM01-6 锆石年龄图; d. 样品锆石年龄分布直方图

图9 样品锆石年龄图与分布直方图

Fig. 9 Zircon age diagram and distribution of the sample

及形成构造背景; 而构造角砾岩普遍经历了后期断裂破碎、硅化、碳酸盐化和热液胶结改造, 其全岩地球化学组成已受到明显影响, 因此不宜作为判别原始岩浆构造环境的主要依据。

凝灰质火山角砾岩具有较典型的火山碎屑岩特征。野外和镜下观察显示, 该类岩石中发育火山角砾、凝灰质基质及不同粒级的石英组分。石英颗粒主要表现为两种赋存状态: 一类为砾石级或斑晶状石英, 局部可见港湾状熔蚀边界、碎裂和重结晶现象, 说明其可能经历了岩浆结晶、熔蚀以及后续破碎过程; 另一类为分散于凝灰质基质中的他形–棱角状细粒石英, 可能与火山喷发过程中快速破碎、搬运和冷凝堆积有关(Shukla et al., 2018; Unwin et al., 2023)。部分样品发生脱玻化、硅化和碳酸盐化改造, 方解石脉及碳酸盐矿物较为发育, 表明其形成后受到一定程度富 CO_2 热液流体交代(Zhuravkova et al., 2017; Si et al., 2024)。

地球化学特征进一步表明, 凝灰质火山角砾岩原岩可能具有酸性–中酸性火山碎屑岩属性。相对保存原岩信息的凝灰质火山角砾岩样品表现出 LILE 富集、Nb-Ta-Ti 等 HFSE 亏损、轻稀土相对富集以及 Sr、Eu 负异常等特征。这些特征与俯冲相关岛弧或活动大陆边缘火山岩较为相似, 说明其岩浆源区可能受到俯冲流体或地壳物质参与的影响。结合区域上阿尔金–东昆仑地区早古生代弧岩浆活动广泛发育的认识及大量捕获锆石, 认为苏满马勒央地区凝灰质火山角砾岩的原岩可能形成于原特提斯洋俯冲相关的陆缘弧环境(Wang et al., 2019; Liu et al., 2021a)。不过, 由于部分样品受到明显蚀变改造, 文中主要依据相对不活动元素和稀土元素配分特征进行构造背景判断, 而不单独依据易活动元素或强蚀变样品的主量元素组成进行解释。

构造角砾岩则主要记录了后期断裂破碎和热液

改造过程。该类岩石中石英脉、裂隙、碎裂结构和不透明矿物充填较为发育,局部可见方解石脉沿裂隙充填,说明其经历了多期构造破裂和流体活动叠加。石英普遍发育波状消光、动态重结晶和裂隙充填等现象,反映岩石曾经历中–低温条件下的变形改造(Cheng et al., 2024)。构造角砾岩中长石含量极低,仅局部保留少量斜长石,说明长石类矿物可能在后期流体作用和蚀变过程中发生分解或溶蚀。

目前,缺少直接限定构造角砾岩形成时代及热液活动时代的年代学证据,因此不宜进一步划分其具体构造–热液事件期次。其与凝灰质火山角砾岩具有相似的微量元素和稀土元素配分型式,主要说明构造角砾岩可能以凝灰质火山角砾岩或相关火山碎屑岩为原岩,经后期断裂破碎、热液充填和胶结改造形成。因此,构造角砾岩的地球化学相似性更多反映其原岩来源,而不是其自身能够独立指示岩浆构造环境。

3 件样品共获得 107 颗有效捕获锆石年龄,未获得成岩年龄,最年轻捕获锆石年龄为 473～475 Ma,表明岩石形成时代不早于～473 Ma,且岩浆在上升过程中显著同化了围岩或深部地壳物质。捕获锆石年龄峰值集中在中元古代(1 000～1 600 Ma)和古元古代(1 600～1 800 Ma),这些古老捕获锆石年龄的记录也与北阿尔金地区早古生代蛇绿岩、弧岩浆岩和俯冲–增生所记录的长期受原特提斯洋俯冲、弧后扩张及陆缘增生过程控制相一致(Wang et al., 2019; Liu et al., 2021a)。地球化学分析结果说明,凝灰质角砾岩和构造角砾岩与活动大陆边缘的火山岩相似(Zhang et al., 2008),表明岩浆源区受到了俯冲流体或熔体的交代富集作用(Turner et al., 2024; Yumin et al., 2025)。因此,笔者认为苏满马勒央地区的凝灰质角砾岩和构造角砾岩形成时代晚于约 473 Ma,且与俯冲作用相关的陆缘弧环境有关。

综合来看,苏满马勒央地区凝灰质火山角砾岩与构造角砾岩在空间上密切共生,但二者记录的地质过程有所不同:凝灰质火山角砾岩相对保留了原岩信息,其岩相学特征、相对不活动微量元素组合及锆石年龄谱共同指示其可能与阿尔金南缘–东昆仑西段早古生代俯冲相关的火山–岩浆活动有关;构造角砾岩则更可能是在凝灰质火山角砾岩或相关火山碎屑岩基础上,经后期断裂破碎、硅化、碳酸盐化和热液胶结改造形成,其地球化学特征与凝灰质火山角砾岩相似,说明二者具有相近的原岩来源。此外,剖面中发育的左行走滑断层、逆冲构造、石英脉、硅化、碳酸盐化及褐铁矿化蚀变,表明该区后期断裂带可能曾作为热液流体运移和沉淀的重要通道,对后续金矿找矿具有一定指示意义;但由于目前尚缺少直接的矿石矿物学、成矿年龄和 Au 含量数据,其成矿意义仍需进一步工作验证。

6　结论

(1)苏满马勒央地区凝灰质火山角砾岩与构造角砾岩在空间上密切共生,但记录了不同阶段的地质过程。凝灰质火山角砾岩具有火山碎屑结构和近火山口快速堆积特征,反映早期火山喷发–碎屑堆积过程;构造角砾岩则主要局限于断层破碎带内,发育碎裂结构、石英脉、硅化和碳酸盐化等特征,表明其可能由凝灰质火山角砾岩或相关火山碎屑岩在后期断裂活动和热液流体作用下破碎、充填和胶结改造形成。野外构造解析显示,剖面中逆冲构造与左行走滑断裂叠加发育,反映研究区经历了多期构造改造,但目前尚缺少直接年代学资料约束各期构造及热液活动的具体时代。

(2)凝灰质火山角砾岩相对保留了原岩的地球化学信息,总体表现为 LILE(Rb、Th、U 等)相对富集,HFSE(Nb、Ta、Ti 等)相对亏损,并具有轻稀土富集及 Sr、Eu 负异常等特征,显示其原岩具有陆缘弧火山岩地球化学亲缘性。构造角砾岩与凝灰质火山角砾岩具有相似的稀土元素和微量元素配分型式,说明其原岩来源相近;由于构造角砾岩经历了明显的断裂破碎和热液改造,其全岩地球化学组成已受到不同程度影响。

(3)锆石 U-Pb 年代学分析显示,3 件样品中的锆石年龄以中元古代—古元古代组分为主,主要峰值为 1.0～1.6 Ga 和 1.6～1.8 Ga,与塔里木克拉通南缘前寒武纪基底年龄组成具有较好的对应关系,表明岩石形成过程中可能有古老地壳物质参与。样品中均出现～473 Ma 的最年轻年龄组,可限定岩石形成时代不早于～473 Ma,并可能记录区域早古生代原特提斯洋俯冲–陆缘弧岩浆事件。整体锆石年龄谱说明,苏满马勒央地区火山碎屑岩形成过程中可能混入了塔里木克拉通南缘及阿尔金–东昆仑地区的古老基底物质。

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):

陈国超, 裴先治, 李瑞保, 等. 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, 2020, 27(4): 33−48.

CHEN Guochao, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. Late Palaeozoic-Early Mesozoic tectonic-magmatic evolution and mineralization in the eastern section of the East Kunlun Orogenic Belt[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(4): 33−48.

陈能松, 王勤燕, 陈强, 等. 柴达木和欧龙布鲁克陆块基底的组成和变质作用及中国中西部古大陆演化关系初探[J]. 地学前缘, 2007, 14(1): 43−55.

CHEN Nengsong, WANG Qinyan, CHEN Qiang, et al. Components and metamorphism of the basements of the Qaidam and Oulongbuluke micro-continental blocks, and a tentative interpretation of paleocontinental evolution in NW-Central China[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(1): 43−55.

段星星, 王立社. 新疆阿尔金山清水泉地区区域地质特征[J]. 西部探矿工程, 2012, 24(12): 167−169+172.

DUAN Xingxing, WANG Lishe. Regional geological characteristics of Qingshuiquan area in Altun Mountains, Xinjiang[J]. Western Exploration Engineering, 2012(12): 167−169+172.

丰成友, 王辉, 瞿泓滢, 等. 东昆仑造山带古特提斯演化及大规模金属成矿特色[J]. 矿床地质, 2024, 43(6): 1316−1335.

FENG Chengyou, WANG Hui, QU Hongying, et al. Paleo-Tethys tectonic evolution and related large-scale metallogenic features in East Kunlun Orogen[J]. Mineral Deposits, 2024, 43(6): 1316−1335.

冯京, 朱志新, 赵同阳, 等. 新疆大地构造单元划分及成矿作用[J]. 中国地质, 2022, 49(4): 1154−1178.

FENG Jing, ZHU Zhixin, ZHAO Tongyang, et al. Subdivision of tectonic units and its metallogenesis in Xinjiang[J]. Geology in China, 2022, 49(4): 1154−1178.

郭利, 邢令, 邸晓辰. 巴什干克金矿与屈库勒克东金锑矿成矿地质条件及背景的对比研究与思考[J]. 新疆地质, 2025, 43(3): 523−527.

GUO Li, XING Ling, DI Xiaochen. A Comparative Study and Reflection on the Metallogenic Geological Conditions and Backgrounds of the Bashiganke Gold Mine and the Qukuleke East Gold-Antimony Mine[J]. Xinjiang Geology, 2025, 43(3): 523−527.

韩芳林. 西昆仑增生造山带演化及成矿背景 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2006.

HAN Fanglin. Tectonic evolution and mineralization of the western Kunlun accretion-type orogen[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijign), 2006.

李猛, 胡朝斌, 查显锋, 等. 东昆仑西段新疆阿确墩地区豹子沟金矿的发现及其找矿意义[J]. 西北地质, 2020, 53(3): 169−174.

LI Meng, HU Chaobin, ZHA Xianfeng, et al. On the Discovery and Prospecting Significance of the Baozigou Gold Deposit in the Western Part of East Kunlun, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(3): 169−174.

刘卫东, 平艳丽, 刘杰, 等. 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]. 地质论评, 2022, 68(2): 469−487.

LIU Weidong, PING Yanli, LIU Jie, et al. 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, 2022, 68(2): 469−487.

鲁浩, 江国会, 林大伟, 等. 东昆仑西段再力克山三叠纪花岗岩成因: 来自 U-Pb 年代学及岩石地球化学的约束[J]. 矿产勘查, 2025, 16(11): 2397−2411.

LU Hao, JIANG Guohui, LIN Dawei, et al. Genesis of the Triassic granites in the western Zeleke Mountains of the East Kunlun: Constraints from U-Pb chronology and petrogeochemistry[J]. Mineral Exploration, 2025, 16(11): 2397−2411.

靳胜凯, 谢志远, 李明军, 等. 阿尔金且末—若羌地区新元古代花岗质岩石成因及其对 Rodinia 超大陆汇聚时限的约束[J]. 地质通报, 2023, 42(11): 1909−1923.

JIN Shengkai, XIE Zhiyuan, LI Mingjun, et al. Petrogenesis for Neoproterozoic granitic rocks in Altyn Qiemo-Ruoqiang area, and implications for determining the timing of Rodinia supercontinent's convergence[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(11): 1909−1923.

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]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(3): 403−414.

潘桂棠, 李兴振, 王立全, 等. 青藏高原及邻区大地构造单元初步划分[J]. 地质通报, 2002, 21(11): 701−707.

PAN Guitang, LI Xingzhen, WANG Liquan, et al. Preliminary division of tectonic units in the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent regions[J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(11): 701−707.

王坤, 蔡志超, 王玺, 等. 东昆仑西段原特提斯洋洋盆闭合时间——来自新疆木孜塔格地区同碰撞花岗岩的证据[J]. 地质通报, 2023, 42(9): 1556−1570.

WANG Kun, CAI Zhichao, WANG Xi, et al. Time constraints on the closure of the Proto Tethys Ocean in the western part of the East Kunlun orogenic belt: Evidence from the syn-collision granites in the Muztag area, Xinjiang[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(9): 1556−1570.

王永, 吴玉, 陈柏林, 等. 北阿尔金地区超基性岩地球化学特征及其成矿潜力分析[J]. 中国地质, 2020, 47(4): 1220−1240.

WANG Yong, WU Yu, CHEN Bolin, et al. Geochemical characteristics and metallogenic potential of ultrabasic rocks in North Altun area, Xinjiang[J]. Geology in China, 2020, 47(4):

1220−1240.

吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589−1604.

WU Yuanbao, ZHENG Yongfei. Zircon genesis mineralogy and its constraints on the interpretation of U-Pb ages[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16): 1589−1604.

赵春涛, 陈亮, 刘泽, 等. 东昆仑黑海地区早古生代过铝质花岗岩成因及对构造演化的制约[J]. 地球学报, 2026, 47(1): 118−134.

ZHAO Chuntao, CHEN Liang, LIU Ze, et al. The Genesis of Early Paleozoic Peraluminous Granite in the Heihai Region of East Kunlun Orogenic Belt and Its Constraints on Tectonic Evolution[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2026, 47(1): 118−134.

张照伟, 王亚磊, 钱兵, 等. 东昆仑冰沟南铜镍矿锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及构造意义[J]. 地质学报, 2017, 91(4): 724−735.

ZHANG Zhaowei, WANG Yalei, QIAN Bing, et al. Zircon SHRIMP U-Pb Age of the Binggounan Magmatic Ni-Cu Deposit in East Kunlun Mountains and Its Tectonic Implications[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(4): 724−735.

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, 2025, 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, 2025, 44(4): 574−586.

朱坤贺. 东昆仑造山带的俯冲与增生构造[J]. 江西科学, 2022, 40(2): 318−322.

ZHU Kunhe. Subduction and Accretionary Tectonics of the East Kunlun Orogen[J]. Jiangxi Science, 2022, 40(2): 318−322.

Aliyari F, Rastad E, Goldfarb R J, et al. Geochemistry of hydrothermal alteration at the Qolqoleh gold deposit, northern Sanandaj–Sirjan metamorphic belt, northwestern Iran: Vectors to high-grade ore bodies[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 140: 111−125.

Amani K, Delavari M, Amini S, et al. Geochemistry, Sr-Nd isotopes and zircon U-Pb dating of magmatic rocks from the Talesh range, western Alborz: New insights into Late Cretaceous evolution of the southern Eurasian margin[J]. Geochemistry, 2024, 84(1): 126042.

Basori M B I, Zaw K, McNeill A, et al. A mineralogical and geochemical application for determining hydrothermal alteration zones associated with volcanic-hosted massive sulphide deposits at Tasik Chini area, Peninsular Malaysia[J]. Applied Geochemistry, 2022, 145: 105404.

Bhat I M, Chauhan H, Ahmad T, et al. Geochemistry and petrogenesis of ophiolitic rocks from the Indus Suture Zone (ISZ), Ladakh Himalaya: insights for depleted mantle beneath an intra-oceanic island arc complex[J]. International Geology Review, 2023, 65(21): 3329−3347.

Chen S, Guo Z, Huang W. Traces of Archean subduction in the Tarim craton, northwest China: Evidence from the tuoge complex and implications for basement formation[J]. The Journal of Geology, 2019, 127(3): 323−341.

Cheng X, Ling M, Liu P, et al. Multistage sulfide and hydrothermal quartz as a record of precision ore-forming process in the epithermal Cu–Zn–Au system in the Kalatag arc, East Tianshan, NW China[J]. Ore Geology Reviews, 2024, 166: 105917.

Djagre L, Koffi B G, Camara M, et al. The metasedimentary-hosted Nyangoubé gold prospect, northwest Côte d'Ivoire: Geochemical and mineralogical characterization of associated hydrothermal alteration[J]. Heliyon, 2023, 9(9).

Elidemir S, Güleç N, Deniz K, et al. Reservoir rock characterization in Edremit geothermal field: geochemical implications for possible fault zones[J]. Applied Geochemistry, 2022, 143: 105388.

Hu Y M, Li X W, Mo X X, et al. Early Paleozoic subduction imprints of the Proto-Tethys Ocean: Evidence from the Appinite–Diorite–Granodiorite complex in East Kunlun, Northern Tibet[J]. Lithos, 2023, 452: 107215.

Karaoğlu Ö, Varol E, Lustrino M, et al. Large-volume and swift magmatic response to Late Cenozoic segmentation of the subducted Neotethyan oceanic slab: evidence from the Galatian Volcanic Province, northwestern Turkey[J]. International Geology Review, 2024, 66(19): 3428−3456.

Liu Q, Tsunogae T, Zhao G, et al. Multiphase ophiolite formation in the northern Altyn Tagh orogen, southeastern Tarim[J]. American Journal of Science, 2021a, 321(6): 788−821.

Liu Q, Zhao G, Li J, et al. Detrital zircon U-Pb-Hf isotopes of middle Neoproterozoic sedimentary rocks in the Altyn Tagh Orogen, southeastern Tarim: insights for a Tarim-South China-North India connection in the periphery of Rodinia[J]. Lithosphere, 2020, 2020(1): 8895888.

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

Long X, Yuan C, Sun M, et al. Archean crustal evolution of the northern Tarim craton, NW China: Zircon U–Pb and Hf isotopic constraints[J]. Precambrian Research, 2010, 180(3-4): 272−284.

McNulty B A, Fox N, Gemmell J B. Assessing hydrothermal alteration intensity in volcanic-hosted massive sulfide systems using portable X-ray fluorescence analysis of drill core: An example from Myra Falls, Canada[J]. Economic Geology, 2020, 115(2): 443−453.

Olierook H K H, Kirkland C L, Szilas K, et al. Differentiating between inherited and autocrystic zircon in granitoids[J]. Journal of Petrology, 2020, 61(8): egaa081.

Pack B, Schmitt A K, Roberge J, et al. Zircon xenocryst resorption and magmatic regrowth at El Chichón Volcano, Chiapas, Mexico[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2016, 311: 170−182.

Turner S J, Langmuir C H. An alternative to the igneous crust fluid+

sediment melt paradigm for arc lava geochemistry[J]. Science Advances, 2024, 10(24): eadg6482.

Shukla M K, Sharma A. A brief review on breccia: it's contrasting origin and diagnostic signatures[J]. Solid Earth Sciences, 2018, 3(2): 50−59.

Si X, Sun X, Xiao K, et al. Late Cretaceous Sn mineralization at Haobadi, southwestern Yunnan province, China: Constraints from cassiterite and zircon U− Pb geochronology[J]. Ore Geology Reviews, 2024, 166: 105936.

Srivastava R K, Sahai A. High-field strength element geochemistry of mafic intrusive rocks from the Bhagirathi and Yamuna valleys, Garhwal Himalaya, India[J]. Gondwana Research, 2001, 4(3): 455−463.

S. Sun S S, McDonough W F . Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313−345.

Unwin H E, Tuffen H, Wadsworth F B, et al. The exposed Mule Creek vent deposits record the structure of a volcanic conduit during a hybrid explosive–effusive eruption[J]. Bulletin of Volcanology, 2023, 85(5): 28.

Wang B, Zhou T F, Fan Y, et al. Breccia, hydrothermal alteration and structural geology of the Huangtun porphyry Au-Cu deposit in the Middle-Lower Yangtze Metallogenic Belt, eastern China[J]. Ore Geology Reviews, 2020a, 120: 103414.

Wang C M, Tang H S, Zheng Y, et al. Early Paleozoic magmatism and metallogeny related to Proto-Tethys subduction: Insights from volcanic rocks in the northeastern Altyn Mountains, NW China[J]. Gondwana Research, 2019, 75: 134−153.

Wang K, Dong S, Yao W, et al. Xenocrystic/inherited Precambrian zircons entrained within igneous rocks from eastern South China: Tracking unexposed ancient crust and implications for late Paleoproterozoic orogenesis[J]. Gondwana Research, 2020b, 84: 194−210.

Woodcock N H, Mort K. Classification of fault breccias and related fault rocks[J]. Geological Magazine, 2008, 145(3): 435−440.

Xi W, Li N, Xia X, et al. Geochronological constraint on the evolution of the Aktyuz Terrane, Kyrgyz North Tianshan, and the fate of the Taldybulak Levoberezhny gold deposit[J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 664361.

Yang J S, Robinson P T, Jiang C F, et al. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and their tectonic implications[J]. Tectonophysics, 1996, 258(1-4): 215−231.

Yumin B, Longming L, Shuai Z, et al. Petrogenesis and tectonic setting for the granitoids in the Qiantiaogou area of the Beishan orogenic belt[J]. Chinese Journal of Geology, 2025, 60(2): 537−549.

Zhang Z, Mao J, Cai J, et al. Geochemistry of picrites and associated lavas of a Devonian island arc in the northern Junggar terrane, Xinjiang (NW China): Implications for petrogenesis, arc mantle sources and tectonic setting[J]. Lithos, 2008, 105(3-4): 379−395.

Zhang Z W, Li W Y, Gao Y B, et al. Sulfide mineralization associated with arc magmatism in the Qilian Block, western China: zircon U-Pb age and Sr-Nd-Os-S isotope constraints from the Yulonggou and Yaqu gabbroic intrusions[J]. Mineralium Deposita, 2014, 49(2): 279−292.

Zhuravkova T V, Palyanova G A, Chudnenko K V, et al. Physicochemical models of formation of gold–silver mineralization at the Rogovik deposit (Northeastern Russia)[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 91: 1−20.