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：张英帅，章永梅，顾雪祥，等. 西昆仑孜洛依铁矿床地质特征、形成时代及矿床成因探讨[J]. 西北地质，2026，59(5)：144−156. DOI：10.12401/j.nwg.2026068

Citation：ZHANG Yingshuai，ZHANG Yongmei，GU Xuexiang，et al. Geology，Formation Age，and Genesis of the Ziluoyi Iron Deposit in the Western Kunlun[J]. Northwestern Geology，2026，59(5)：144−156. DOI：10.12401/j.nwg.2026068

西昆仑孜洛依铁矿床地质特征、形成时代及矿床成因探讨

张英帅[1]，章永梅[2,3,*]，顾雪祥[2,3]，杨振兴[4]，闫相喜[4]，史行行[4]，孙燕[2]，彭义伟[1]，李羚[2]

（1. 成都理工大学地球与行星科学学院，四川 成都 610059；2. 中国地质大学（北京）地球科学与资源学院，北京 100083；3. 新疆维吾尔自治区人民政府国家三〇五项目办公室/新疆维吾尔自治区自然资源与生态环境研究中心，新疆 乌鲁木齐 830000；4. 新疆葱岭能源有限公司，新疆 克孜勒苏柯尔克孜自治州 845350）

摘 要：孜洛依铁矿床是新疆西昆仑塔什库尔干铁矿带北段规模最大的磁铁矿矿床。矿体呈层状、似层状赋存于布伦阔勒群变火山−沉积岩系中，与围岩为整合接触关系。矿石类型以条带状磁铁矿矿石为主，主要发育磁铁矿−阳起石−黑云母、磁铁矿−碳酸盐（方解石+白云石）−黑云母两类矿物组合，与塔什库尔干铁矿带南段矿床的矿石特征存在明显差异。然而，相较于南段矿床已具备较高的研究程度，孜洛依铁矿在地质特征、成矿时代及矿床成因类型等方面的认识仍较为薄弱。笔者对孜洛依铁矿的矿床地质特征进行了详细解剖，并选取与铁矿体整合产出的顶、底板围岩开展锆石 U-Pb 定年和微量元素分析，旨在约束其形成时代，探讨成矿构造背景与矿床成因类型。根据矿体底板变沉积岩中最年轻碎屑锆石年龄（518±16 Ma）及顶板变英安岩中岩浆锆石的加权平均年龄（504.3±5.9 Ma），首次将矿床的形成时代约束至寒武纪第二世—苗岭世（518～504 Ma）。碎屑锆石年龄峰值分布与变英安岩岩浆锆石的微量元素特征揭示，孜洛依地区布伦阔勒群原岩主要由一套弧火山岩和沉积岩共同组成，其中沉积岩物源主要来自麻扎尔−甜水海地体的大陆弧岩浆物质，整体形成于弧前伸展构造背景。综合成矿时代、构造背景和矿床地质特征分析，认为孜洛依矿床的形成可能与海相火山岩或与海底火山热液系统相关的喷流沉积作用有关。与塔什库尔干铁矿带南段矿床相比，孜洛依矿床可能距离海底火山通道或热液喷口更远，并在铁质沉积后遭受了高绿片岩相变质作用。

关键词：锆石 U-Pb 定年；矿床成因；孜洛依；塔什库尔干铁矿带；西昆仑

中图分类号：P611；P59 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-6248(2026)05-0144-13

Geology, Formation Age, and Genesis of the Ziluoyi Iron Deposit in the Western Kunlun

ZHANG Yingshuai[1], ZHANG Yongmei[2,3,*], GU Xuexiang[2,3], YANG Zhenxing[4], YAN Xiangxi[4], SHI Hanghang[4], SUN Yan[2], PENG Yiwei[1], LI Ling[2]

收稿日期：2026-08-25；**修回日期**：2026-09-03；**责任编辑**：吕鹏瑞

基金项目：深地国家科技重大专项（2024ZD1001800）资助。

作者简介：张英帅（1995−），男，博士，助理研究员，从事岩石学与矿床地球化学研究。E−mail：zys66@outlook.com。

*** 通讯作者**：章永梅（1984−），女，博士，教授，从事矿床学和地球化学研究。E−mail：zhangyongmei@cugb.edu.cn。

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

（1. College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China；2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China；3. National 305 Project Office of the People's Government of Xinjiang Uygur Autonomous Region (Xinjiang Research Center for Natural Resources and Ecological Environment), Urumqi 830000, Xinjiang, China；4. Xinjiang Congling Energy Co., Ltd., Kizilsu Kyrgyz Autonomous Prefecture 845350, Xinjiang, China）

Abstract：The Ziluoyi iron deposit is the largest magnetite deposit in the northern segment of the Taxkorgan iron ore belt in the western Kunlun orogen, Xinjiang. Layered and stratoid orebodies are hosted in the meta-volcanic-sedimentary rock series of the Bulunkuole Group and show conformable contacts with host rocks. The magnetite ores feature banded structures with two dominant mineral assemblages of magnetite-actinolite-biotite and magnetite-carbonate (calcite + dolomite)-biotite, showing notable differences in ore characteristics relative to deposits in the southern segment of the Taxkorgan iron-ore belt. Nevertheless, compared with the well-documented deposits in the southern segment, knowledge of the Ziluoyi iron deposit, including its geological features, formation age, and genetic type, is still limited. In this study, the geological features of the Ziluoyi iron deposit are dissected in detail. Zircon U-Pb geochronology and trace-element analyses on hanging-wall and footwall rocks conformable with iron orebodies are carried out to constrain their formation age and unravel their tectonic setting and genetic type. Using the youngest detrital zircon age (518±16 Ma) from ore-foot-wall metasedimentary rocks and the weighted-mean magmatic zircon age (504.3±5.9 Ma) from hanging-wall metadacite, the deposit's metallogenic age is constrained to the Cambrian Series 2–Miaolingian (518–504 Ma). Detrital-zircon age-peak patterns and magmatic zircon trace-element signatures from meta-dacite indicate that the protoliths of the Bulunkuole Group in the Ziluoyi area were generated within a fore-arc extensional setting. They predominantly consist of arc volcanic rocks and sedimentary rocks derived from continental-arc magmatic materials of the Mazar-Tianshuihai terrane. Combining its metallogenic age, tectonic setting, and geological characteristics, we suggest that the Ziluoyi deposit originated from exhalative-sedimentary processes linked to marine volcanic rocks or submarine volcanic-hydrothermal systems. Located distally from submarine volcanic conduits or hydrothermal vents, the deposit underwent high-greenschist-facies metamorphism after iron precipitation.

Keywords：zircon U-Pb dating；ore genesis；Ziluoyi；Taxkorgan iron-ore belt；western Kunlun

新疆塔什库尔干铁矿带位于西昆仑造山带，截至目前已探明铁矿床（点）40 余处，近 SN 向延伸超过 120 km，已成为新疆乃至全国重要的铁矿整装勘查区及铁矿资源基地（张连昌等，2016）。区内典型矿床包括赞坎、老并、叶里克和莫喀尔等数个大型铁矿，以及孜洛依、喀来子和吉尔铁克等一大批中小型铁矿。这些铁矿床主要赋存于布伦阔勒群，以层状、似层状磁铁矿体为主要特征，与布伦阔勒群中的变质沉积岩和/或变质火山岩呈整合接触关系（Ding et al., 2021a）。因此，作为塔什库尔干铁矿带最重要的赋矿地层，布伦阔勒群的沉积年龄可以用于限定区内铁矿床的成矿时代。然而，尽管众多学者已针对该区开展了大量成岩成矿年代学研究，但布伦阔勒群的形成时代仍存在争议，其年龄范围从古元古代早期（Ji et al., 2011）、古元古代晚期（乔耿彪等，2015）以及新元古代到早古生代（Li et al., 2019; Ding et al., 2021a）均有分布。这些杂乱的年代学结果直接导致研究者对区域铁矿床成矿环境和成矿动力学的不同理解，进而引发对成矿机制和矿床成因类型的争议。

目前，对塔什库尔干铁矿带内矿床的成因类型尚未达成共识，主要观点包括：①变质的元古宙铁建造（IF），与全球同期 IF 成矿事件有关（胡建卫等，2010; 冯昌荣等，2012）；②遭受后期热液叠加改造的元古宙 IF（张连昌等，2016）；③特殊的早古生代 IF，形成于局部海洋缺氧盆地内（Li et al., 2018; Ding et al., 2021b）；④海相火山岩型或与海底火山热液系统相关的喷流沉积型铁矿床（Zhou et al., 2017, 2018; 丁明朋等，2018）。随着近年来分析方法的进步，锆石年龄测试精度不断提高，最新的年代学研究均表明布伦阔勒群形成于早古生代。早先被认为形成于古元古代早期的流纹岩样品（2 481±14 Ma; Ji et al., 2011），现已被解释为布伦阔勒群之下太古宙基底的组成部分（Zhang et al., 2018a）。因此，目前基本可排除前两种矿床成因观点。但应当指出的是，上述有关区内铁矿成岩成矿时

代与矿床成因的研究，主要聚焦在塔什库尔干铁矿带南段的赞坎、老并、叶里克、莫喀尔一带（刘品德，2014；张强等，2019），对北段布伦阔勒群中的孜洛依、苏巴什、塔合曼东等矿床的相关研究较为薄弱，对南北段矿床在成矿时代和矿床成因方面的差异与联系尚不清楚。

孜洛依铁矿床位于新疆阿克陶县布伦口乡境内，是塔什库尔干铁矿带北段最具规模的磁铁矿矿床，且矿区深部和外围仍存在增储空间，总体规模预计可超亿吨。孜洛依矿床中矿体呈层状、似层状赋存于布伦阔勒群，矿石构造以条带状、块状为主。矿石矿物主要为磁铁矿，较少发育硫化物和硫酸盐矿物，与矿带南段的典型铁矿床（如赞坎、老并、莫喀尔）具明显区别，是对比研究塔什库尔干铁矿带南北段成矿时代、成因类型差异与联系的理想对象。在详细的野外调查基础上，笔者对孜洛依铁矿的矿床地质特征进行了全面细致的剖析，并选取与铁矿体整合产出的顶、底板布伦阔勒群围岩开展锆石 U-Pb 定年和微量元素地球化学分析，以限定塔什库尔干铁矿带北段铁矿床的形成时代与构造背景，并结合与矿带南段典型铁矿床的对比，探讨了矿床成因。

1 区域地质背景

西昆仑造山带位于青藏高原西北缘，其北部为塔里木克拉通，南部为喀喇昆仑地块，分别以柯岗断裂和喀喇昆仑–龙木错–双湖断裂为界（Xiao et al., 2000; Zhang et al., 2018a, 2018b）。西昆仑造山带被库地断裂带和康西瓦断裂由北至南划分为西昆仑北地体、西昆仑南地体、塔什库尔干–甜水海地体 3 个构造单元（图 1a）。区内记录了从原特提斯洋到新特提斯洋漫长的发展历史，经历了多期次、多阶段的构造–岩浆–变质事件，地质构造演化极其复杂（Zhang et al., 2018b）。西昆仑北地体由古元古代至中元古代的变质基底和上覆的泥盆纪—二叠纪组成。西昆仑南地体则未发现前寒武纪基底，主要由一套变火山–沉积岩系组成，可能代表了一个巨大的早古生代增生杂岩（Zhang et al., 2018b）。塔什库尔干–甜水海地体同样存在争议，因主要构成塔什库尔干地体的、被视为前寒武纪基底的布伦阔勒群被证实主要形成于早古生代。因此，最近的研究通常将塔什库尔干地体并入西昆仑南地体讨论，认为其同属于早古生代巨型增生楔（Zhang et al., 2018b）。甜水海地体则被证实存在前寒武纪基底，可能代表了西昆仑造山带内一个前寒武纪微陆块。

布伦阔勒群在塔什库尔干地体内广泛出露，总体呈近南北向展布（图 1b）。该套杂岩群主要由一套变质火山岩、碎屑岩和化学沉积岩组成，其中火山岩和火山碎屑岩约占总厚度的 30%（张传林等，2019）。布伦阔勒群由下至上大致可分为 3 段：下段主要分布于南部的赞坎–老并地区，主要由黑云斜长片麻岩和斜长角闪片麻岩组成，其次为石榴子石角闪片麻岩、二云母斜长片麻岩等，其原岩主要为双峰式火山岩和正常沉积岩（Zhang et al., 2018b）；中段主要出露于塔县一带，由含石榴子石/硅线石的黑云母石英片岩、二云母石英片岩以及少量的斜长角闪片岩组成，原岩为杂砂岩、泥质岩、碳酸盐岩和玄武岩（宋明伟等，2026）；上段主要出露于孜洛依一带，主要的岩石组合包括变质双峰式火山岩、变质碳酸盐岩，夹少量变质杂砂岩（张传林等，2019）。此外，奥陶系和志留系以碎屑岩、碳酸盐岩建造为主夹火山岩，石炭系以发育复理石–火山岩建造为特征。区内岩浆活动发育，主要为中酸性侵入岩（图 1b），时间跨度从早古生代、早中生代，一直到新生代，其形成与原、古特提斯洋演化以及印度板块与欧亚板块碰撞有关。

塔什库尔干地体内发育数量众多的大中型铁矿床，其中磁铁矿矿床主要赋存于布伦阔勒群中，构成了塔什库尔干铁矿带的主体（图 1b；张连昌等，2016）。在下志留统温泉沟群中也发育一些菱铁矿矿床，以切列克其大型铁矿为代表（朱明田等，2025）。1∶100 万航磁在塔什库尔干铁矿带显示出呈 NNW 向带状展布的串珠状异常带和 3 个异常中心（图 1c；胡建卫等，2010）。其中，南部强异常区对应以赞坎、老并、叶里克等为代表的大中型铁矿集区，中部较弱异常区对应新发现的塔合曼东铁矿（宋明伟等，2026），北部较强异常区则与孜洛依和苏巴什铁矿的分布范围重叠（吴晓贵等，2026）。

2 矿床地质特征

孜洛依矿区出露的地层主要为布伦阔勒群上段，总体为一套受中–深区域变质作用形成的富含石榴子石、矽线石的变质碎屑岩–火山岩–碳酸盐岩建造，变质程度可达高绿片岩–角闪岩相。主要的岩石组合包括黑云母石英片岩、斜长角闪岩、角闪黑云斜长片麻

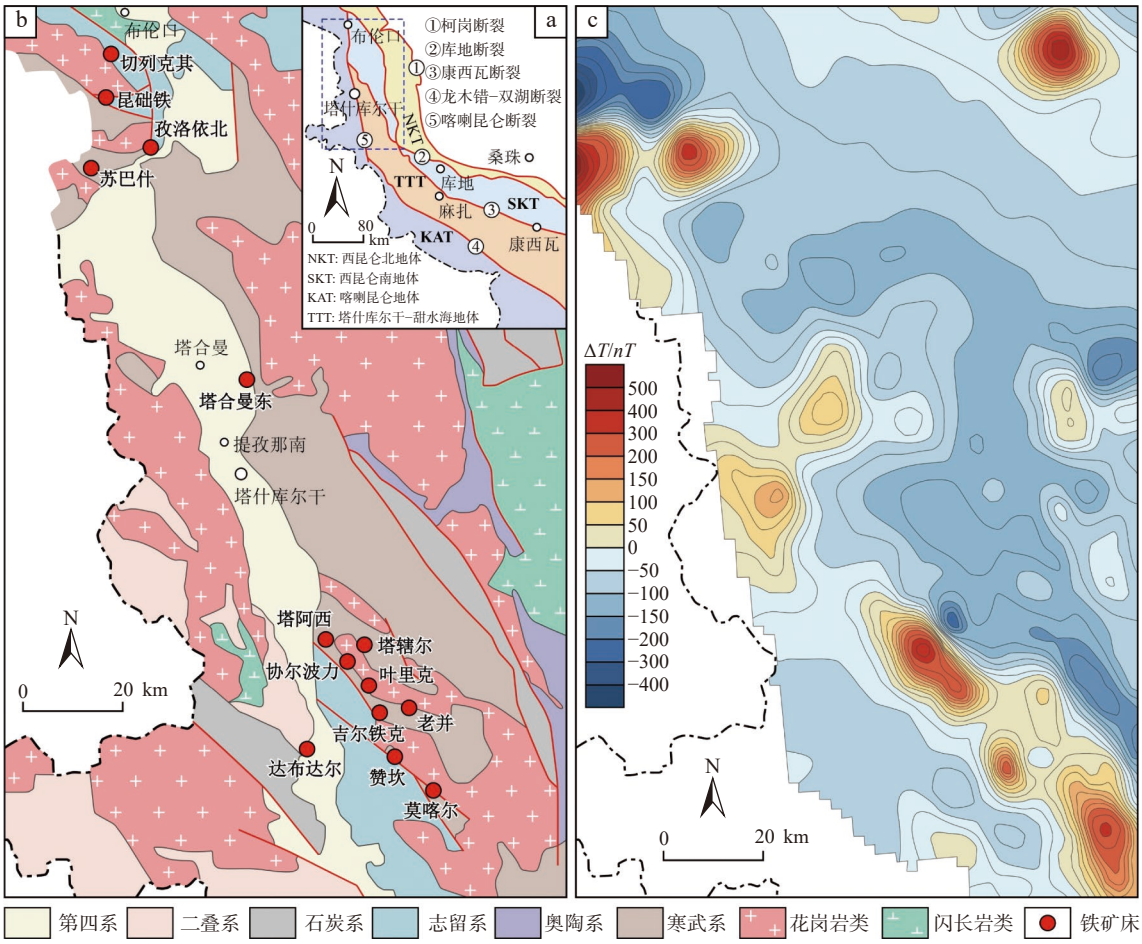


图 a 中蓝色虚线框为图 b 与图 c 的大致范围；b. 塔什库尔干铁矿带内典型铁矿床及其分布；c. 图 b 对应范围的航磁异常图，带内磁铁矿矿床的产出与分布与区域航磁异常套合较好

图1　西昆仑造山带构造框架及研究区位置(a)、塔什库尔干铁矿带地质简图(b)及对应区域航磁异常图(c; 据吴晓贵等，2026 修改)

Fig. 1　(a) Tectonic framework of the Western Kunlun orogenic belt, (b) simplified geological map of the Taxkorgan iron ore belt, and (c) regional magnetic anomaly map

岩、大理岩、长英质变粒岩以及磁铁矿层。根据岩性组合特征，可将矿区内地层进一步划分为两个岩组，其中第一岩组内石英长石黑云片岩和黑云斜长片麻岩中磁铁矿含量相对较高，局部富集成磁铁矿体(图 2a)。矿区内褶皱构造发育，以波状变形及局部复杂的揉皱为主，表现为一系列片麻理的平卧褶皱、斜卧褶皱、无根褶皱以及紧闭尖棱褶皱等，总体组成一倒转向形构造，即孜洛依沟向形。该倒转向形轴向 NW，轴面向 NE 陡倾，褶皱总体向 NW 倾伏，倾伏角为 30°～40°，南西翼为正常翼，北东翼为倒转翼(图 2a)。区内岩浆岩不发育，仅在局部见较窄的花岗岩脉切穿布伦阔勒群。

孜洛依铁矿区拥有 3 个矿体群，共圈定出 9 条磁铁矿体，其中 I 号矿体群规模较小，Ⅱ、Ⅲ号矿体为主矿体。Ⅰ、Ⅱ号矿体分布于孜洛依沟向斜南翼，整体呈近 EW 走向，倾向北(图 2b)，而Ⅲ号矿体位于向斜核部，矿体南翼走向近 EW，倾向北，北翼走向 NW，倾向东。受褶皱构造影响，Ⅲ号矿体变形显著，并在褶皱核部发生显著增厚(图 2c)。矿体长度为 400～1 128 m 不等；厚度变化较大，介于 2.1～148 m，TFe(全铁)平均品位为 35.70%，mFe(磁铁矿)平均品位为 31.41%(内部报告)。各矿体总体呈层状、似层状、透镜体状产于布伦阔勒群第一岩组第二段石英长石黑云片岩和黑云斜长片麻岩中，在部分剖面的矿体顶、底板围岩中可见长英质变粒岩和少量黑云角闪岩夹层(图 3a、图 3b)。

孜洛依矿床中的矿石类型较为单一，以原生磁铁矿矿石为主，仅在个别地表露头可见少量氧化矿石(图 3a、图 3b)，部分矿石含极少量黄铁矿和黄铜矿等硫化物。矿区内的磁铁矿矿石类型主要包括条带状

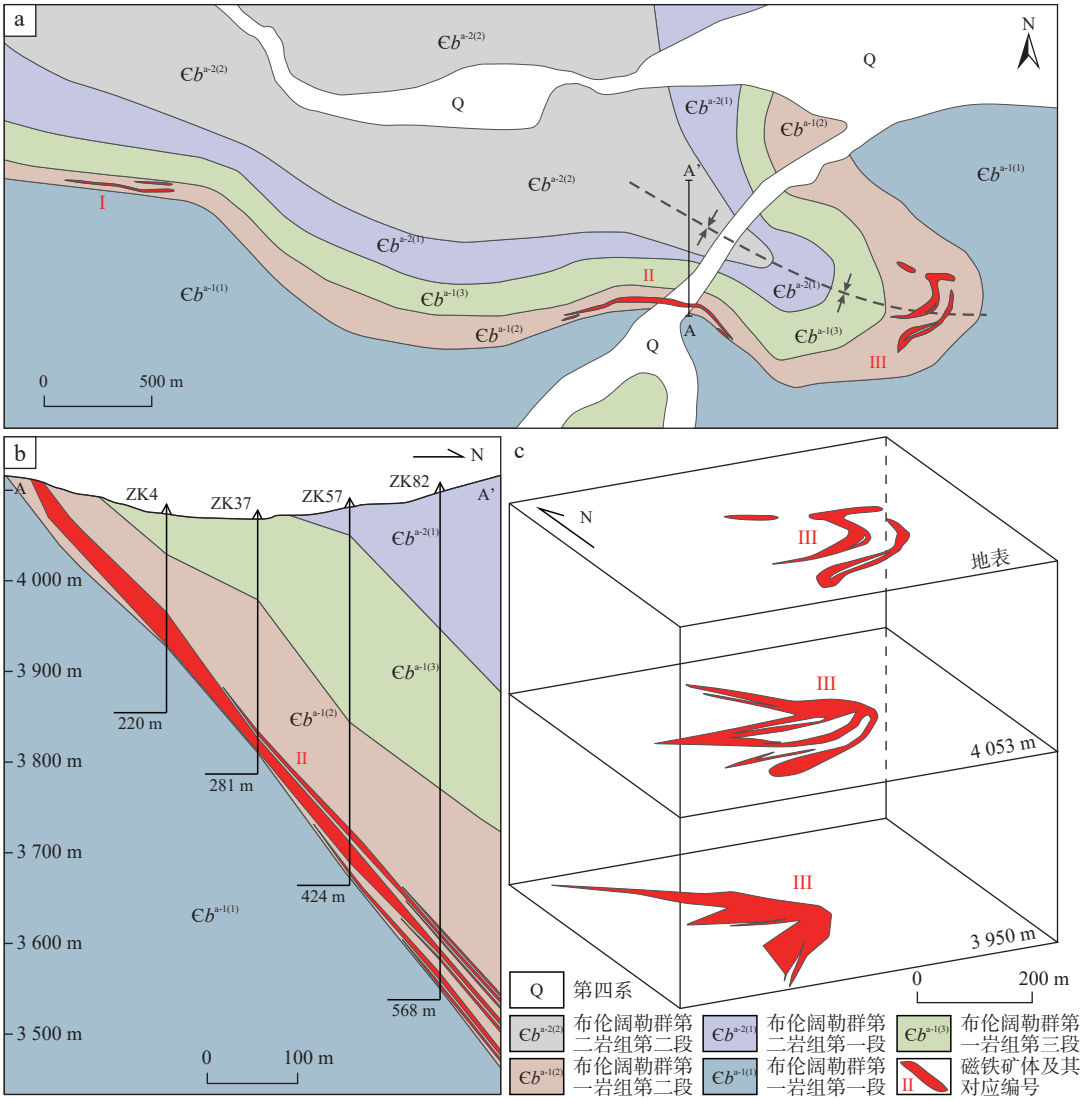


图2 孜洛依铁矿床地质图(a)、A-A'剖面图(b)及 III 号矿体联合中段水平投影图(c;据吴晓贵等,2026 修改)

Fig. 2 (a) Geological map and (b) cross-section along line A-A' of the Ziluoyi iron deposit, and (c) horizontal projected profile of No. Ⅲ ore body at different levels

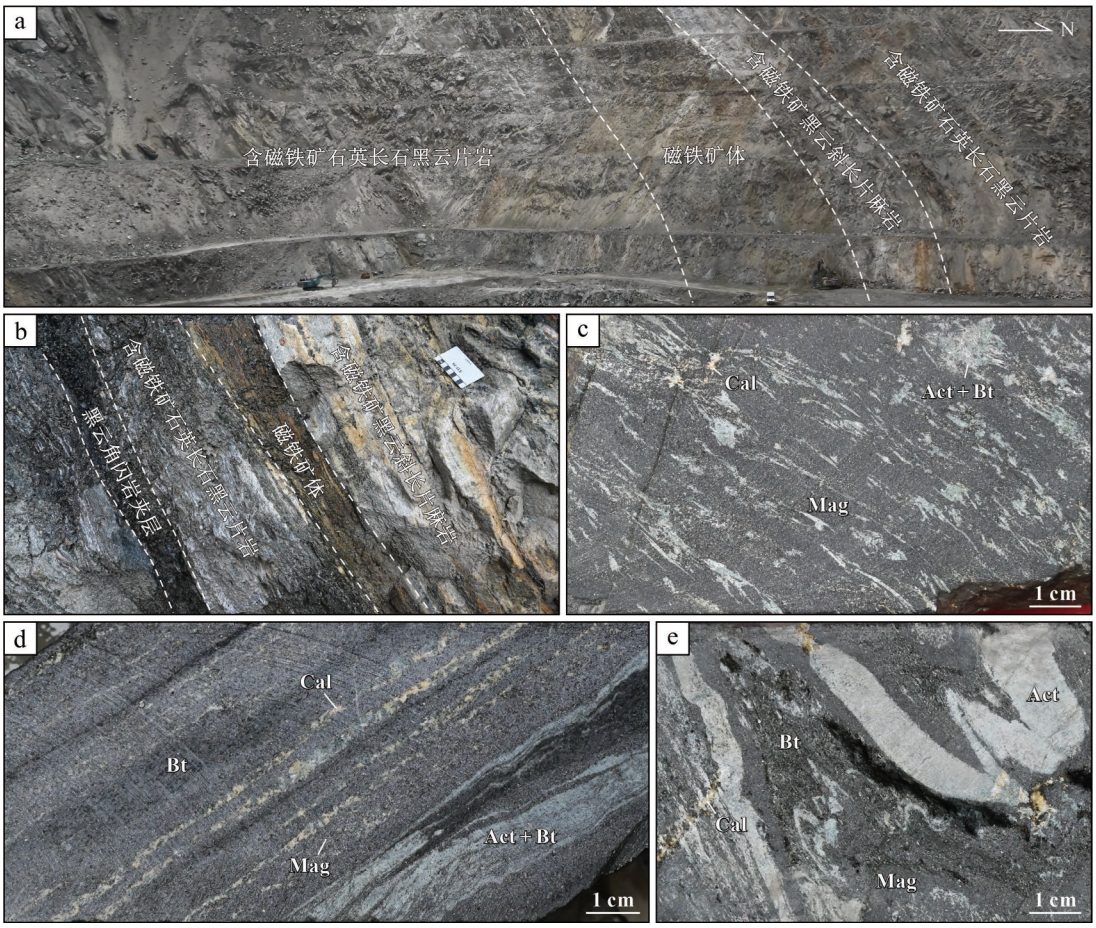
矿石和浸染状矿石,局部发育块状矿石(图 3c),构成高品位铁矿段。条带状矿石是矿床中最主要的矿石类型(图 3d),受后期褶皱构造影响可发生明显的揉皱变形(图 3e)。

3 样品采集和分析方法

本次研究采集了孜洛依铁矿床典型的条带状/块状矿石开展矿物自动定量分析(TIMA)和矿石矿相学研究(图 4),并选择 I 号矿体钻孔 ZK103 岩心中铁矿层底板围岩长英质变粒岩(ZK103-16)以及顶板围岩黑云斜长片麻岩(ZK103-14)开展锆石 U-Pb 定年工作(图 5)。

TIMA 分析使用西安矿谱地质勘查技术有限公司的矿物定量分析系统(捷克泰思肯 TIMA3 X GHM)完成。选取点阵分析数据采集模式,每个点的 X 射线计数为 1 200,BSE 像素间距为 3 μm,EDS 测试点步长为 9 μm。测试过程中为高真空模式,加速电压为 25 kV,电流为 9 nA,工作距离为 15 mm。其中,电流和 BSE 信号强度使用铂法拉第杯自动程序校准,EDS 信号使用 Mn 标样校准。TIMA3 软件系统将每个测试点的 BSE 和 EDS 数据自动进行统计、对比和拟合,通过相分割算法和谱图数据库匹配,完成矿物相分布图的绘制。

锆石单矿物分选和阴极发光拍照均在河北省廊坊市诚信地质服务有限公司完成。锆石 U-Pb 同位素测试在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室矿床地球化学微区分析实验室利用 LA-



a. 孜洛依铁矿床 III 号矿体野外露头；b. 层状磁铁矿体；c. 块状/条带状磁铁矿矿石；d. 条带状磁铁矿矿石；
e. 条带状磁铁矿矿石发生揉皱变形；Act. 阳起石；Bt. 黑云母；Cal. 方解石； Mag. 磁铁矿

图3　孜洛依铁矿床矿区野外照片及代表性矿石宏观特征

Fig. 3　Typical macroscopic photographs of field outcrops of ore bodies and representative ores from the Ziluoyi iron deposit

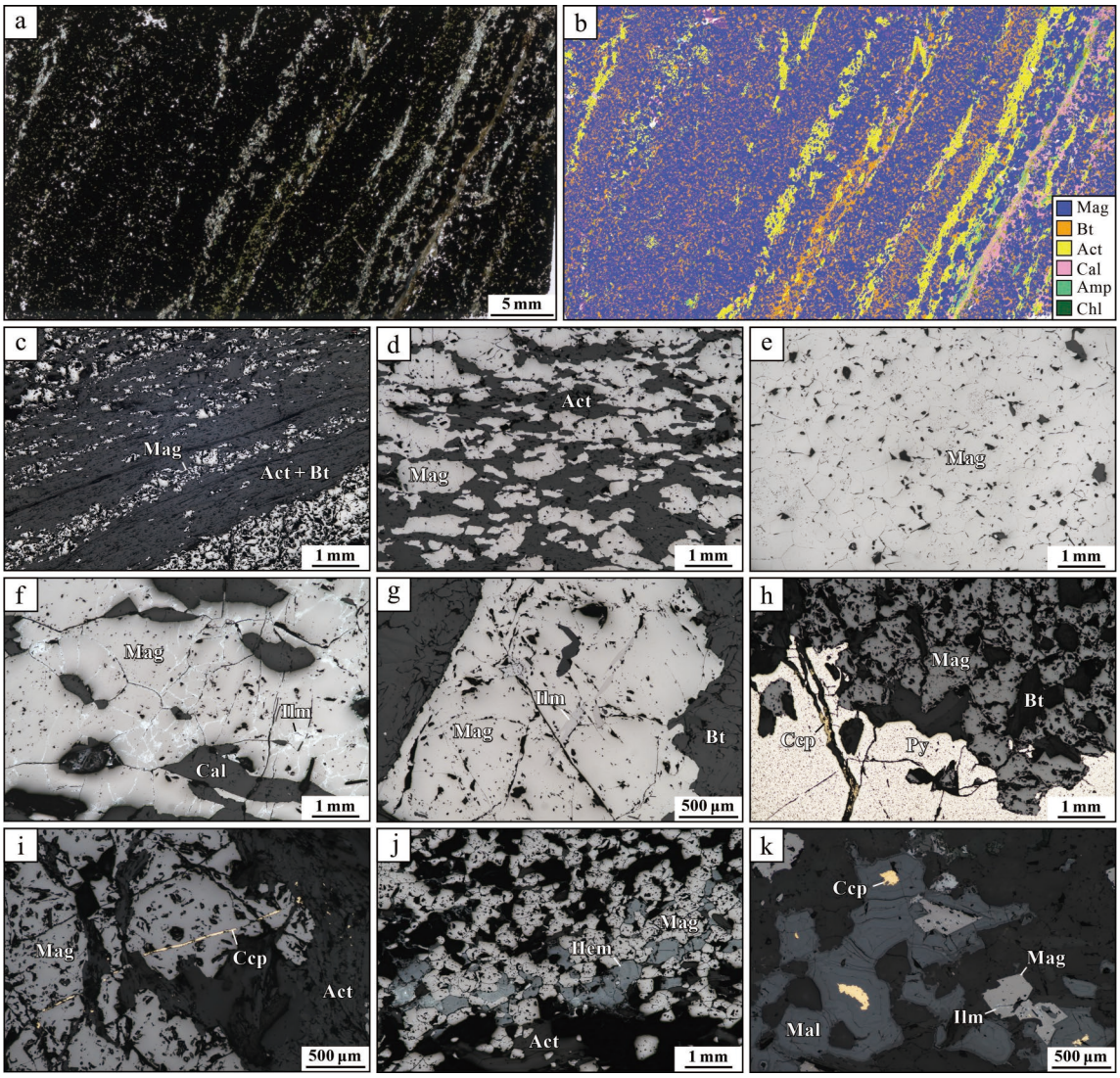
ICP-MS 开展, 激光剥蚀系统为 Geolas 193 准分子固体进样系统, ICP-MS 设备为 Thermo Fisher X Series Ⅱ型四极杆等离子体质谱仪。激光束斑直径为 24 μm, 频率为 6 Hz, 能量密度 6 J/cm^2, 采用 He 作为载气, Ar 作为补偿气, 以美国国家标准参考物质 NIST610 作为测定微量元素含量的外标, 标准锆石 91500 作为外标, 标准锆石 Plešovice 作为监控样品。测试完成后采用 ICPMSDataCal 软件对测试数据进行后期处理(Liu et al., 2008), 年龄计算与谐和图利用 Isoplot 软件进行绘制(Ludwig, 2003)。

4　分析结果

4.1　矿石组构特征

孜洛依矿床矿石中金属矿物主要为磁铁矿, 常见钛铁矿(图 4a～图 4g), 部分矿石含极少量晚期黄铁矿和黄铜矿(图 4h、图 4i)。非金属矿物主要为阳起石、黑云母、方解石、角闪石和绿泥石, 少量白云石和磷灰石, 几乎不含石英(图 4a、图 4b)。半自形–他形粒状结构是区内主要的矿石结构类型, 其次为自形粒状结构、浸蚀结构、交代残余结构、格状结构、乳滴状结构等。

矿区内的矿石类型以条带状矿石为主, 块状高品位矿石和浸染状矿石次之。条带状矿石发育磁铁矿–阳起石–黑云母、磁铁矿–碳酸盐(方解石+白云石)–黑云母的矿物组合类型(图 4c), 具有细粒变晶结构, 矿物常呈拉长的透镜状定向排列(图 4d)。稠密浸染状和块状高品位矿石中主要发育的矿物组合为磁铁矿–阳起石, 磁铁矿定向性减弱, 矿物粒度明显增大(>500 μm), 呈自形到半自形(图 4e), 沿磁铁矿边缘常见针状钛铁矿出溶(图 4f), 部分自形磁铁矿颗粒内部可见析出的钛铁矿片晶(图 4g)。部分矿石可见少量浸染状、细脉状黄铁矿、黄铜矿等金属硫化物, 暗示矿床受微弱的热液



a、b. 条带状磁铁矿矿石透射扫描和 TIMA 主要矿物相分布；c. 磁铁矿与阳起石和黑云母呈条带状相间分布(反射，单偏光)；d. 条带状磁铁矿矿石，磁铁矿呈透镜状定向排列(反射，单偏光)；e. 块状磁铁矿矿石，磁铁矿颗粒较为自形(反射，单偏光)；f. 浸染状矿石中半自形磁铁矿边缘发育钛铁矿出溶片晶，构成格状结构(反射，单偏光)；g. 浸染状矿石中磁铁矿内部发育交代残余结构钛铁矿(反射，单偏光)；h. 粗粒自形黄铁矿交代磁铁矿，二者均被后期黄铜矿脉切穿(反射，单偏光)；i. 黄铜矿细脉切穿半自形磁铁矿(反射，单偏光)；j、k. 地表磁铁矿矿石中发育表生氧化成因赤铁矿和孔雀石(反射，单偏光)；Act. 阳起石；Bt. 黑云母；Cal. 方解石； Mag. 磁铁矿；Hem. 赤铁矿；Ilm. 钛铁矿；Py. 黄铁矿；Ccp. 黄铜矿；Mal. 孔雀石

图4 孜洛依铁矿床典型矿石微观照片

Fig. 4 Typical microscopic photographs of the ores from the Ziluoyi iron deposit

蚀变影响。黄铁矿常呈他形粒状交代磁铁矿(图 4h)，黄铜矿含量较少，常呈他形粒状交代磁铁矿，或呈细脉状切穿磁铁矿和黄铁矿(图 4i)，指示其较晚的生成顺序。此外，部分矿石受后期表生氧化作用影响，磁铁矿或黄铁矿、黄铜矿等硫化物被氧化形成赤铁矿和孔雀石(图 4j、图 4k)。

4.2 赋矿围岩特征

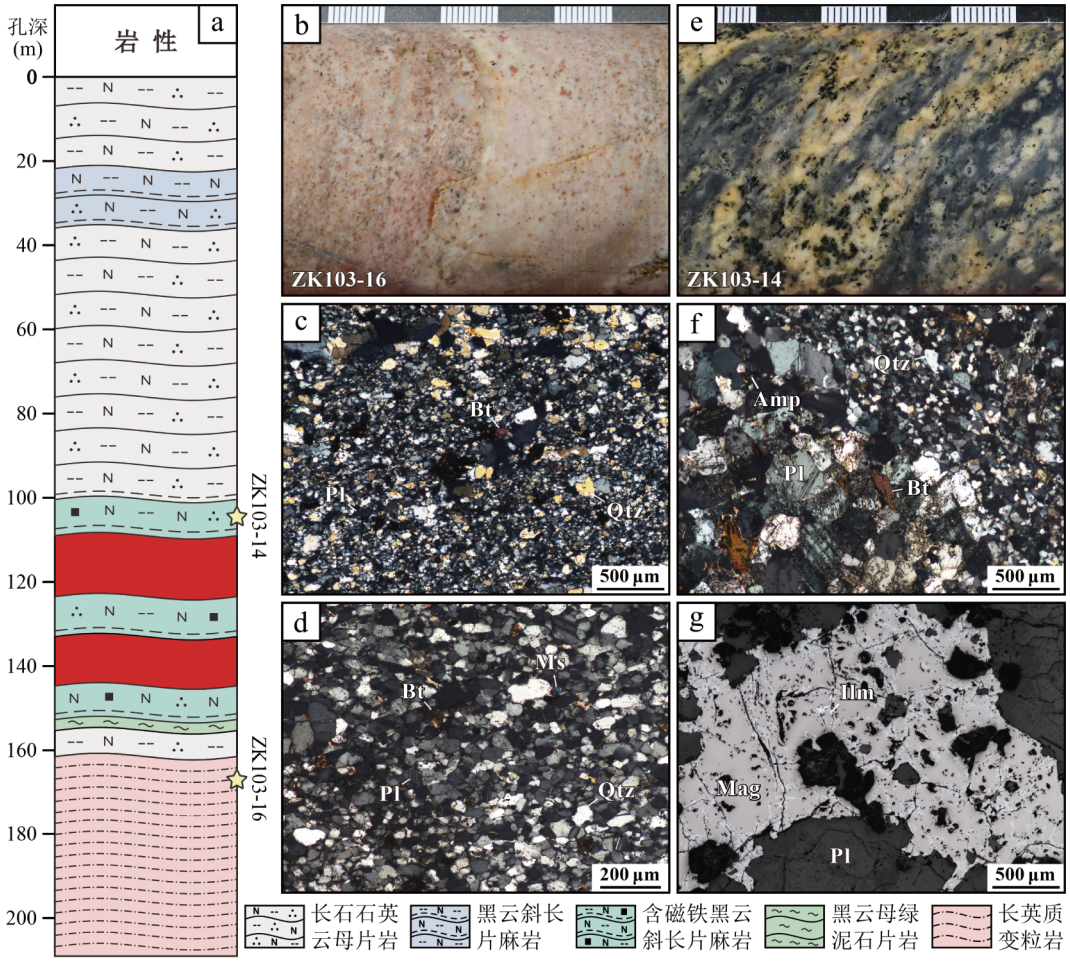
对孜洛依铁矿床 I 号矿体钻孔 ZK103 开展岩心编录表明，矿体整体产于布伦阔勒群第一岩组第二段石英长石黑云片岩中，紧邻铁矿体的顶、底板围岩则分别发育一段含磁铁矿黑云斜长片麻岩(ZK103-14)和长英质变粒岩(ZK103-16)(图 5a)。矿体底板长英质变粒岩手标本呈浅粉色(图 5b)，具粒状变晶结构，主要由长石(～45%)和石英(～40%)组成，含少量黑云母和白云母(～15%)，矿物颗粒显示一定程度磨圆，未发育明显定向(图 5c、图 5d)。矿体顶板含磁铁矿黑云斜长片麻岩手标本呈深灰色(图 5e)，具鳞片粒状变晶结构，片麻状构造，主要由斜长石(～50%)、石英

(～30%)、黑云母(～10%)和角闪石(～5%)组成, 矿物具有明显定向性, 粒度较粗的斜长石和黑云母与粒度较细的石英等矿物呈条纹状相间排列(图 5f), 可见少量磁铁矿(～5%)沿斜长石和黑云母条带散落分布, 磁铁矿边缘出溶大量针状钛铁矿(图 5g)。

4.3　锆石 U-Pb 年代学

4.3.1　长英质变粒岩(ZK103-16)

矿体底板长英质变粒岩中的锆石颗粒多为圆形、次圆形和长柱状, 且长柱状锆石的边缘棱角不明显, 具有明显的磨圆特征, 说明这些锆石都经历了一定程度的搬运, 具有碎屑锆石的特征。在 CL 图像中, 锆石颗粒显示出不同的内部特征, 典型振荡环带、均匀或宽条纹内部纹理, 暗示其复杂的来源(图 6)。对长英质变粒岩中的碎屑锆石进行了 72 个点位的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试, 获得了分布范围很广的年龄范围(2 714～518 Ma; 图 7a), 在年龄分布直方图上可以分为晚太古代末至古元古代(2 569～2 081 Ma)、新元古代(922～727 Ma)以及新元古代末—早寒武世(557～518 Ma)3 个主要的年龄群, 并显示出 2 486 Ma、828 Ma、528 Ma 等 3 个主要突出的峰值(图 7b)。所有测试锆石均具有高的 Th/U 值(0.34～2.9; 图 7d), 表明均为岩浆成因锆石, 暗示长英质变粒岩的原岩受到来自古元古代、新元古代和早寒武世的多重岩浆锆石源区供给。测试点中最年轻一组锆石的$^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为(523±12)Ma(N=6), 最年轻单颗粒锆石年龄为(518±16)Ma(图 7a)。



a. 钻孔 ZK103 岩性柱状图; b. 矿体底板长英质变粒岩(ZK103-16)手标本照片; c、d. 长英质变粒岩中石英和斜长石等矿物具有一定磨圆度, 不发育定向性(透射, 正交偏光); e. 矿体顶板含磁铁矿黑云斜长片麻岩(ZK103-14)手标本照片; f. 黑云斜长片麻岩中粒度较粗的斜长石和黑云母与粒度较细的石英等矿物呈条纹状相间分布(透射, 正交偏光); g. 黑云斜长片麻岩中的磁铁矿, 边缘出溶针状钛铁矿(反射, 单偏光); Qtz. 石英; Pl. 斜长石; Bt. 黑云母; Amp. 角闪石; Ms. 白云母; Mag. 磁铁矿; Ilm. 钛铁矿

图5　孜洛依铁矿床代表性钻孔矿体顶底板围岩宏观及微观照片(黄色五角星为采样位置)

Fig. 5　Typical macroscopic and microscopic photographs of the wall rocks from the hanging wall and footwall of the iron ore bodies in a representative drill columnar section of the Ziluoyi iron deposit (the yellow five-pointed star is the sampling location)

4.3.2 黑云斜长片麻岩(ZK103-14)

矿体顶板黑云斜长片麻岩中的锆石主要为自形–半自形的棱柱状,其长度为 80～150 μm,长宽比介于 1～3。在阴极发光图像中,所有锆石均呈现一致的形态特征,多具有发光强度较高、具较宽震荡环带的核部,以及狭窄的较暗的变质增生边(图 6),说明样品受到了后期变质作用的影响。对该样品中的锆石总共进行了 30 个点位的分析,其中 4 个分析变质增生边的点位未出结果,其余 26 个位于核部的点位得到谐和度较高的$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄,介于 508～492 Ma,其加权平均年龄为(504.3 ± 5.9)Ma(图 7c)。所有锆石核部测试的点位均显示较高的 Th/U 值(0.50～1.03;图 7d),结合阴极发光图像中震荡环带的发育,指示这些锆石均为岩浆成因锆石。

5 讨论

5.1 矿床形成时代

布伦阔勒群及其中铁矿床的形成时代长期存在争议,已有研究厘定的成岩成矿时代跨度极大,涵盖古元古代早期(Ji et al., 2011)、古元古代晚期(乔耿彪等, 2015)、新元古代至早古生代多个时段(陈俊魁, 2018; Li et al., 2019; Ding et al., 2021a)。孜洛依矿床矿体底板长英质变粒岩主要由具有一定磨圆度的细粒斜长石和石英组成(图 5c、图 5d),结合样品中的碎屑锆石形貌特征,判定其原岩很可能为一套长石粉砂岩。该套碎屑沉积岩的碎屑锆石年龄频谱复杂,指示沉积物源具有多源性;锆石整体较高的 Th/U 值(0.34～2.9;图 7d),表明其沉积物源以岩浆岩为主。西昆仑南地体和塔什库尔干地体并未出露前寒武纪基底,不具备提供该套碎屑沉积物的物质条件,可排除其物源可能性。样品碎屑锆石识别出的 3 个主要年龄峰值(2 486 Ma、828 Ma 和 528 Ma),与西昆仑北地体前寒武纪碎屑锆石年龄谱系(1.8 Ga、1.4 Ga、0.82～0.80 Ga、0.78 Ga、0.75 Ga; Zhang et al., 2018b)存在显著差异,进一步排除西昆仑北地体为物源区的可能。在毗邻塔什库尔干地体的麻扎尔–甜水海地体中,麻扎尔杂岩变火山岩锆石 U-Pb 年龄被厘定为(2 481±14)Ma(Ji et al., 2011),与本次样品古元古代年龄峰值(2 486 Ma)高度吻合。甜水海岩群岩浆岩年龄为 740～530 Ma(Zhang et al., 2018b),与样品新元古代末—早寒武世年龄峰值基本对应。碎屑锆石微量元素特征显示,沉积碎屑物质主要来源于大陆地壳的中基性弧岩浆岩(图 8)。综上所述,判定矿体底板变质碎屑沉积岩的物质来源以邻区麻扎尔–甜水海地体大陆弧岩浆岩为主,其最年轻碎屑锆石年龄可将孜洛依铁矿床的沉积成矿时代上限有效约束至 518 Ma(图 7a)。

矿体顶板含磁铁矿黑云斜长片麻岩中的锆石颗

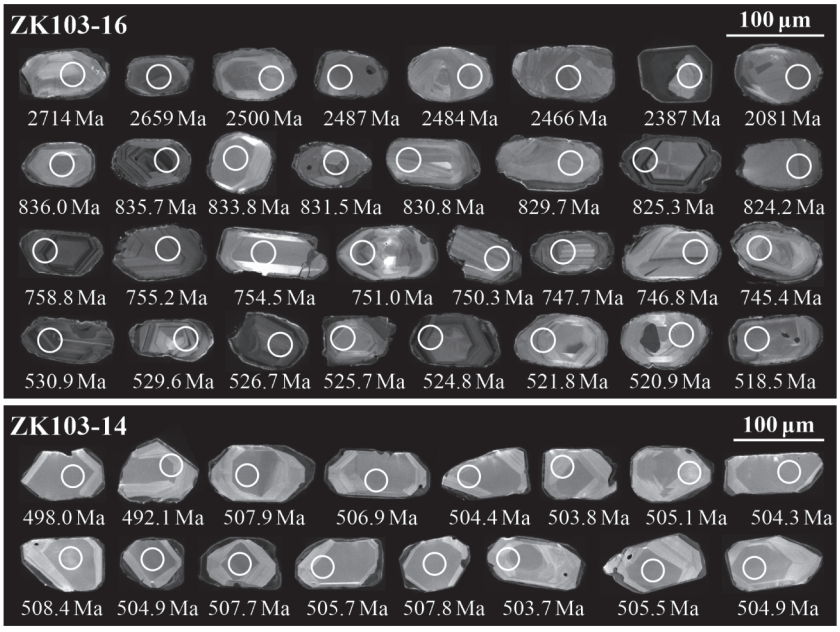


图6 孜洛依铁矿床矿体顶底板围岩中代表性锆石阴极发光图像

Fig. 6 Cathodoluminescence image of zircon in wall rocks from the hanging wall and footwall of the iron ore bodies in the Ziluoyi iron deposit

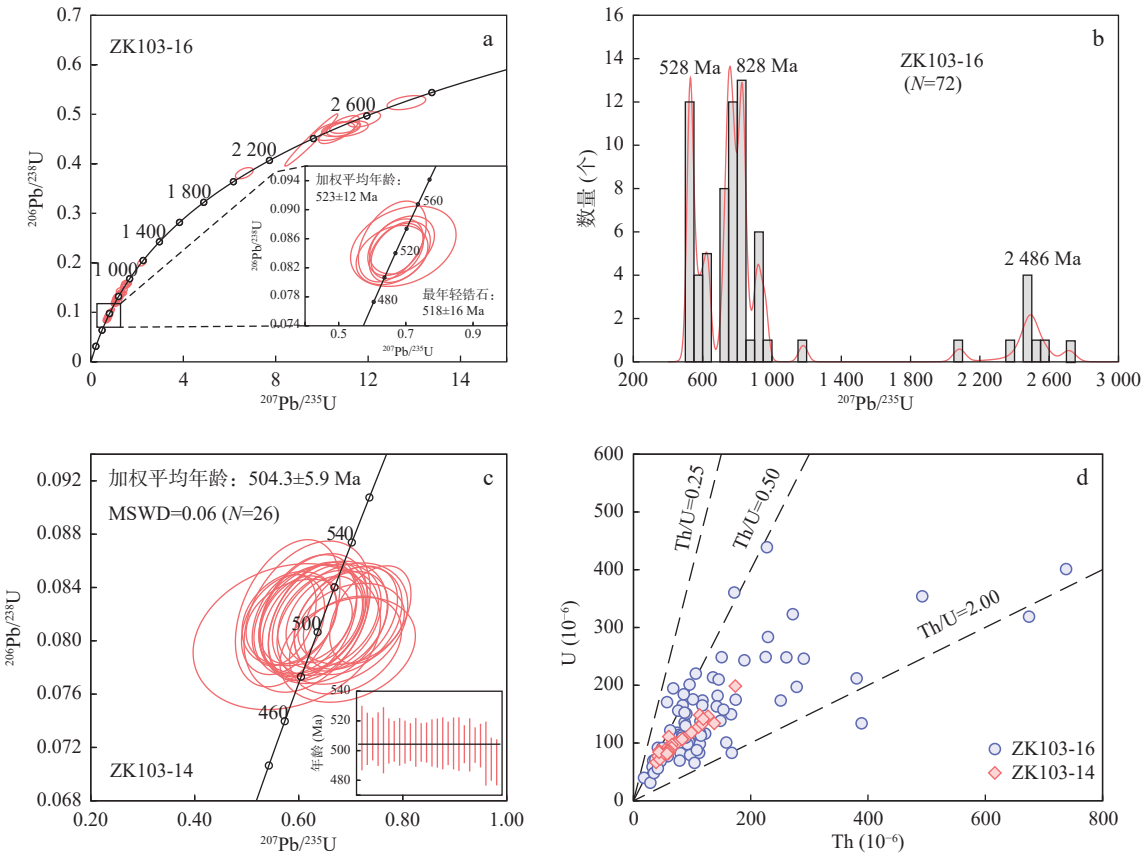


图7　矿体底板长英质变粒岩(ZK103-16)与顶板含磁铁矿黑云斜长片麻岩(ZK103-14)锆石 U-Pb 年龄

Fig. 7　Zircon U-Pb ages of leptynite (ZK103-16) from the footwall and biotite-plagioclase gneiss (ZK103-14) from the hanging wall of the iron ore bodies

粒均呈自形–半自形的棱柱状，表明锆石并未经历碎屑搬运与沉积过程中的磨圆改造。全部锆石具有高度均一的阴极发光特征，一致的$^{206}Pb/^{238}U$年龄(图 7c)，指示其应为原生岩浆锆石。尽管阴极发光图像显示多数锆石发育狭窄的变质增生边，反映锆石遭受过后期变质作用改造，但锆石样品整体较高的 Th/U 值(0.50～1.03; 图 7d)、良好的 U-Pb 同位素谐和度以及锆石内部保存的震荡环带，均说明后期变质作用对锆石主体的影响有限。含磁铁矿黑云斜长片麻岩中的磁铁矿边缘可见大量针状钛铁矿出溶结构(图 5g)，反映磁铁矿初始结晶时具有高钛属性，该特征通常指示高温岩浆或高温岩浆热液成因(Liu et al., 2025)。据此判断，矿体顶板这套含磁铁矿黑云斜长片麻岩很可能由火山岩经历高绿片岩相变质作用改造而成。在锆石微量元素判别图解中，样品投点均落在基性岩与花岗闪长岩重叠区间(图 8a)，结合岩石现有矿物组合特征，推测其原岩为英安岩。该套岩浆岩喷发于铁矿层沉积之后，因此铁矿的形成时代不晚于岩浆的喷发年龄(504.3±5.9 Ma; 图 7c)。综合上述证据，研究认为孜洛依矿床含铁层位的原始沉积时代应为寒武纪第二世—苗岭世，其沉积年龄介于 518～504 Ma。

5.2　成矿构造背景

本次研究限定的孜洛依矿区布伦阔勒群形成时代为寒武纪第二世—苗岭世，该年代结果与邻近新迭铁矿床布伦阔勒群最年轻碎屑锆石年龄(514±4.0 Ma; 陈港等, 2024)基本吻合，同时与矿区南侧新发现的塔合曼东铁矿床矿体下盘变火山岩(角闪斜长片麻岩)锆石年龄(517±5.9 Ma; 宋明伟等, 2026)高度接近。前人研究指出，该时期原特提斯洋向南俯冲于麻扎尔–甜水海地体之下，并在其北缘形成了一个与洋–陆俯冲有关的岩浆弧(Song et al., 2025)。布伦阔勒群含磁铁矿黑云斜长片麻岩(变英安岩)锆石微量元素分析结果显示，这套火山岩具有显著的大陆弧岩浆属性(图 8b～图 8d)，应归属于洋–陆俯冲背景下的弧岩浆系统。但布伦阔勒群及其赋存铁矿床的沉积成矿盆地类型，究竟为弧前盆地或弧后盆地，仍存在争议。

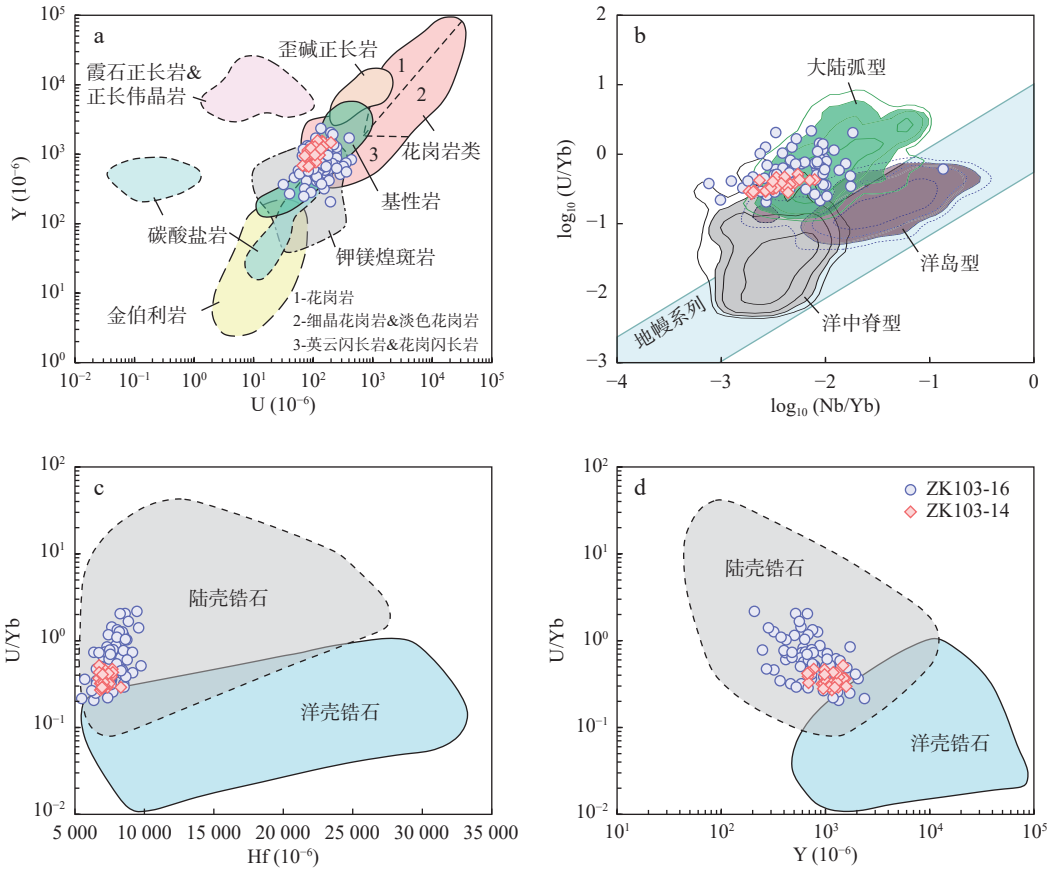


图8 矿体顶底板围岩中锆石微量元素判别图解(底图据 Belousova et al., 2002; Grimes et al., 2007, 2015)

Fig. 8 Trace-element discrimination diagrams of zircons in wall rocks from the hanging wall and footwall of the iron ore bodies

已有地球化学研究表明,塔什库尔干地体内布伦阔勒群下部出露的寒武纪辉长岩(约 530 Ma)为典型弧前辉长岩,记录了原特提斯洋的俯冲启动过程(Zhang et al., 2018c)。孜洛依铁矿底板布伦阔勒群变沉积岩(长英质变粒岩)的碎屑锆石年龄谱与微量元素分析显示,其物源以临近的麻扎尔–甜水海地体中的弧岩浆物质为主(图 8),与弧前盆地的沉积物质组成特征高度匹配。此外,弧后盆地通常无法形成规模宏大、厚度巨大的火山–沉积序列,与研究区布伦阔勒群的沉积建造特征不符,而弧前环境普遍发育巨厚增生火山–沉积杂岩系。结合区内广泛发育的同期双峰式火山岩组合,认为弧前伸展盆地是布伦阔勒群及其中赋存铁矿床形成的最合理构造背景。

5.3 矿床成因类型浅析

伴随塔什库尔干铁矿带成矿时代的精准限定,区内铁矿床的成因机制目前存在两类主流认识:一类认为其为早古生代局部缺氧海洋盆地中形成的特殊 BIF 矿床(Li et al., 2018; Ding et al., 2021b);另一类则将其归为海相火山岩型铁矿或海底火山热液系统控制的喷流沉积型铁矿(Zhou et al., 2017, 2018; 丁明朋等, 2018)。

孜洛依矿床及塔什库尔干铁矿带内多数铁矿均形成于俯冲构造体制下的弧前伸展环境,矿区广泛出露变质火山岩组合,与稳定克拉通背景、被动陆缘沉积的苏必利尔型 BIF 存在本质区别(李厚民等, 2022)。典型阿尔戈马型 BIF 虽与火山活动密切耦合,但主要形成于洋中脊、岛弧、弧后盆地及陆内裂谷等深水构造环境,与孜洛依、塔合曼东等矿床的弧前伸展浅海成矿背景明显不符。从矿物成因来看,阿尔戈马型 BIF 的成矿 Fe、Si 组分主要源自热液对玄武岩的淋滤萃取,原生化学沉淀形成的磁铁矿普遍具有低钛特征;而孜洛依矿床中磁铁矿广泛发育钛铁矿出溶结构,指示其结晶过程受控于岩浆活动或高温岩浆热液作用(Liu et al., 2025)。孜洛依矿体顶板变英安岩(黑云斜长片麻岩)中的磁铁矿亦发育同等高钛特征,与矿石磁铁矿成因属性高度一致。综合上述地质与矿物学证据,初步认为孜洛依矿床的形成与海相火山岩或与海底火山热液系统相关的喷流沉积作用密切相关。

鉴于磁铁矿石中阳起石的大量发育, 矿床形成后整体经历了高绿片岩相变质叠加改造。此外, 孜洛依矿床未发育大量条带状黄铁矿、厚层膏岩等典型喷流沉积岩, 反而广泛分布大理岩, 与矿带南段赞坎、老并等典型矿床差异显著。该差异表明, 相较于矿带南段矿床, 孜洛依矿床的沉积位置距离古海底火山通道或热液喷口更远。

6　结论

(1)孜洛依铁矿矿体整合赋存于布伦阔勒群中, 矿体空间展布受控于孜洛依沟向形构造, 在褶皱核部位置矿体发生显著变形与加厚现象。矿石主体为条带状磁铁矿矿石, 主要发育磁铁矿–阳起石–黑云母、磁铁矿–碳酸盐(方解石+白云石)–黑云母两类矿物组合。

(2)矿体底板变质碎屑沉积岩(长英质变粒岩)中单颗粒最年轻碎屑锆石年龄为(518±16)Ma, 结合矿体顶板变英安岩(含磁铁矿黑云斜长片麻岩)的岩浆锆石喷发年龄, 可将孜洛依铁矿的沉积成矿时代精确约束为寒武纪第二世—苗岭世, 成矿年龄为 518～504 Ma。

(3)孜洛依矿床形成于原特提斯洋俯冲体制下的弧前伸展盆地, 成因类型为海相火山岩型或与海底火山热液系统相关的喷流沉积型铁矿。区域成矿规律表明, 布伦阔勒群严格控制了区内该类铁矿床的空间产出; 褶皱转折端为有利储矿构造, 常发生矿体膨大增厚。大比例尺高精度磁测是该区后续铁矿找矿勘探的有效技术手段。

致谢: 感谢中国地质大学(北京)蒋文韬硕士和于汪洋硕士在野外采样和实验分析过程中给予的帮助。

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):

陈港, 陈懋弘, 杨成栋, 等. 西昆仑塔什库尔干新迭铁矿床赋矿地层形成时代及其地质意义[J]. 矿床地质, 2024, 43(5): 977−992.

CHEN Gang, CHEN Maohong, YANG Chengdong, et al. Age of ore-bearing strata of Xindie iron deposit in Taxkorgan of West Kunlun and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 2024, 43(5): 977−992.

陈俊魁. 新疆西昆仑塔什库尔干地区老并铁矿赋矿地层形成时代及其地质意义[J]. 西北地质, 2018, 51(3): 105−120.

CHEN Junkui. Formation Age of Ore-bearing Strata from the Laobing Iron Deposit in Taxkorgan area of Western Kunlun, Xinjiang and Its Geological Significance[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(3): 105−120.

丁明朋, 汤好书, 陈衍景, 等. 西昆仑塔什库尔干叶里克铁矿成因: 矿床地质与磁铁矿 LA-ICP-MS 原位分析约束[J]. 地球科学, 2018, 43(9): 3169−3185.

DING Mingpeng, TANG Haoshu, CHEN Yanjing, et al. Genesis of the Erik iron ore deposit in the Taxkorgan area of the West Kunlun, Xinjiang: Constraints from ore deposit geology and in situ LA-ICP-MS analysis of magnetite[J]. Northwestern Geology, 2018, 43(9): 3169−3185.

冯昌荣, 何立东, 郝延海, 等. 新疆塔什库尔干县一带铁多金属矿床成矿地质特征及找矿潜力分析[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(1): 102−110.

FENG Changrong, HE Lidong, HAO Yanhai, et al. Features and Potential Analysis of the Iron Polymentallic Deposits in the Taxkorgan Area, Xinjiang[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2012, 36(1): 102−110.

胡建卫, 庄道泽, 杨万志. 新疆西南部塔什库尔干地区赞坎铁矿综合信息预测模型及其在区域预测中的应用[J]. 地质通报, 2010, 29(10): 1495−1503.

HU Jianwei, ZHUANG Daoze, YANG Wangzhi. The integrated information predicting model of the Zankan iron deposit, Tashikuergan area, southwestern Xinjiang, China and its application in regional metallogenic prognosis[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(10): 1495−1503.

李厚民, 李延河, 李立兴, 等. 沉积变质型铁矿成矿条件及富铁矿形成机制[J]. 地质学报, 2022, 96(9): 3211−3233.

LI Houmin, LI Yanhe, LI Lixing, et al. Ore-forming conditions of the sedimentary metamorphic iron deposit and metallogenesis of the high-grade iron deposit[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(9): 3211−3233.

刘品德. 西昆仑塔什库尔干地区老并石膏磁铁矿地质特征及成矿作用过程探讨[J]. 西北地质, 2014, 47(4): 227−236.

LIU Pinde. Geological features and mineralization process of Laobing gypsum magnetite deposit in Taxkorgan region of west Kunlun[J]. Northwestern Geology, 2014, 47(4): 227−236.

乔耿彪, 王萍, 伍跃中, 等. 西昆仑塔什库尔干陆块赞坎铁矿赋矿地层形成时代及其地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 616−629.

QIAO Gengbiao, WANG Ping, WU Yuezhong, et al. Formation age of ore-bearing strata of the Zankan iron deposit in Taxkorgan landmass of Western Kunlun Mountains and its geological significance[J]. Geology in China, 2015, 42(3): 616−629.

宋明伟, 彭义伟, 章永梅, 等. 新疆西昆仑塔合曼东铁矿床成因——来自地质学和地球化学的证据 [J/OL]. 矿物岩石地球化学通报, 2026, 1–17.

SONG Mingwei, PENG Yiwei, ZHANG Yongmei, et al. The genesis of the Tahemandong iron deposit in the western Kunlun Mountains of Xinjiang: Evidences from geology and geochem-

istry[J/OL]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2026, 1–17.

吴晓贵, 史行行, 陈瑶, 等. 新疆西昆仑塔什库尔干铁矿带北段孜洛依北铁矿地质特征及成因浅析[J]. 矿产与地质, 2026, 40(1): 52−61.

WU Xiaogui, SHI Hanghang, CHEN Yao, et al. Geological characteristics and genesis discussion of Ziluoyi North iron deposit in the north section of Taxkorgan iron ore belt, West Kunlun, Xinjiang[J]. Mineral Resources and Geology, 2026, 40(1): 52−61.

张传林, 马华东, 朱炳玉, 等. 西昆仑—喀喇昆仑造山带构造演化及其成矿效应[J]. 地质论评, 2019, 65(5): 1077−1102.

ZHANG Chuanlin, MA Huadong, ZHU Bingyu, et al. Tectonic evolution of the Western Kunlun-Karakorum Orogenic Belt and its coupling with the mineralization effect[J]. Geological Review, 2019, 65(5): 1077−1102.

张连昌, 冯京, 董连慧, 等. 西昆仑塔什库尔干铁矿带矿床类型、成因及成矿规律[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(4): 427−443.

ZHANG Lianchang, FENG Jing, DONG Lianhu, et al. Deposit types, origin, and metallogenetic regularity of the Taxkorgan iron ore belt in West Kunlun[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2016, 38(4): 427−443.

张强, 冯昌荣, 谢月桥, 等. 新疆塔什库尔干地区莫喀尔磁铁矿床地球化学特征及成因探讨[J]. 西北地质, 2019, 52(4): 137−151.

ZHANG Qiang, FENG Changrong, XIE Yueqiao, et al. Geochemical Characteristics and Genetic Study of Mokaer Magnetite Deposits in the Taxkorgan Area, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(4): 137−151.

朱明田, 孔繁琦, 刘文成. 新疆西昆仑切列克其大型菱铁矿床锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 地质科学, 2025, 60(1): 272−279.

ZHU Mingtian, KONG Fanqi, LIU Wencheng. The metallogenic chronology and its significance of the large Qieliekeqi siderite deposit, West Kunlun, Xinjiang[J]. Chinese Journal of Geology, 2025, 60(1): 272−279.

Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 143: 602−622.

Ding T, Tan T, Wang J, et al. Field and zircon U-Pb geochronological evidence for the occurrence of Cambrian banded iron formations in the West Kunlun Orogenic Belt, China[J]. Gondwana Research, 2021a, 98: 1−16.

Ding T, Wang J, Tan T, et al. Sulfur isotopic and trace-element compositions of pyrite from the Zankan iron deposit, West Kunlun Orogenic Belt, China: Possible Early Cambrian banded iron formations[J]. Geological Journal, 2021b, 56: 5738−5754.

Grimes C B, John B E, Kelemen P B, et al. Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: A method for distinguishing detrital zircon provenance[J]. Geology, 2007, 35(7): 643−646.

Grimes C B, Wooden J L, Cheadle M J, et al. "Fingerprinting" tectono-magmatic provenance using trace elements in igneous zircon[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2015, 170: 1−26.

Ji W, Li R, Chen S, et al. The discovery of Palaeoproterozoic volcanic rocks in the Bulunkuoler Group from the Tianshuihai Massif in Xinjiang of Northwest China and its geological significance[J]. Science China Earth Sciences, 2011, 54: 61−72.

Li Z Q, Zhang L C, Xue C J, et al. Earth's youngest banded iron formation implies ferruginous conditions in the Early Cambrian ocean[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 9967−9970.

Li Z Q, Zhang L C, Xue C J, et al. Genesis of the Neoproterozoic-Early Cambrian banded iron ore-bearing sedimentary rocks in the Jiertieke-Zankan iron ore belt, West Kunlun Orogenic Belt, Xinjiang (NW China)[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 173: 143−160.

Liu S Q, Jiang S Y, Zhang H X, et al. Fe-Ti oxides as petrogenetic indicators in carbonatite from the Caotan iron deposit in the Qinling orogenic belt of central China[J]. Lithos, 2025, 496–497: 107949.

Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 2008, 257(1-2): 34−43.

Ludwig K R. A geochronological toolkit for Microsoft Excel [Z]. Isoplot, 2003, 3: 1–70.

Song Z, Zhang C, Jing Y, et al. Cambrian–Triassic mafic magmatism in the northeastern Pamir: Implications for the transition from the Proto- to Paleo-Tethys oceans[J]. Gondwana Research, 2025, 147: 98−118.

Xiao W J, Hou Q L, Li J L, et al. Tectonic facies and the Archipelago-accretion process of the West Kunlun, China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2000, 43(1): 134−143.

Zhang C L, Zou H B, Ye X T, et al. A newly identified Precambrian terrane at the Pamir Plateau: The Archean basement and Neoproterozoic granitic intrusions[J]. Precambrian Research, 2018a, 304: 73−87.

Zhang C L, Zou H B, Ye X T, et al. Tectonic evolution of the NE section of the Pamir Plateau: New evidence from field observations and zircon U-Pb geochronology[J]. Tectonophysics, 2018b, 723: 27−40.

Zhang C L, Zou H B, Ye X T, et al. Timing of subduction initiation in the Proto-Tethys Ocean: Evidence from the Cambrian gabbros from the NE Pamir Plateau[J]. Lithos, 2018c, 314–315: 40–51.

Zhou Z J, Tang H S, Chen Y J et al. Trace elements of magnetite and iron isotopes of the Zankan iron deposit, westernmost Kunlun, China: A case study of seafloor hydrothermal iron deposits[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 80: 1191−1205.

Zhou Z J, Tang H S, Wu T S, et al. Geology, geochemistry and genesis of the Zankan iron deposit in the West Kunlun Orogen, Xinjiang, China[J]. Ore Geology Reviews, 2018, 100: 334−346.