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：宋明伟，彭义伟，章永梅，等. 西昆仑老并铁矿床磁铁矿矿物化学组成特征及其对成矿作用的约束[J]. 西北地质，2026，59(5)：131−143. DOI：10.12401/j.nwg.2026067

Citation：SONG Mingwei, PENG Yiwei, ZHANG Yongmei, et al. Chemical Composition of Magnetite from the Laobing Iron Deposit in West Kunlun, and Its Constraints on Ore Formation[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(5): 131−143. DOI: 10.12401/j.nwg.2026067

西昆仑老并铁矿床磁铁矿矿物化学组成特征及其对成矿作用的约束

宋明伟[1]，彭义伟[1,*]，章永梅[2,3]，顾雪祥[2,3]，张英帅[1]，董树义[1]，陈力[1]，罗潇[1]

（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）

摘 要：西昆仑塔什库尔干铁矿带是中国西部重要的铁矿富集区，老并铁矿床是该成矿带典型铁矿床之一，发育磁铁矿、石膏以及硫化物等矿物组合，是研究该区域铁成矿作用的理想对象。笔者在详细野外地质调查基础上，针对老并铁矿床 3 类不同产状磁铁矿开展了 LA-ICP-MS 原位微量元素分析，系统探讨了成矿物质来源、成矿物理化学条件及矿床成因。结果表明，3 类磁铁矿微量元素蛛网图变化趋势基本一致，配分模式与高温热液矿床相当，指示其成矿物质主要来源于海底高温热液。磁铁矿 (Al+Mn)-(Ti+V) 温度计及 Ga-MgO 图解显示，Mag-1 和 Mag-2 结晶温度约为 300 ℃，而 Mag-3 受后期变质作用改造明显，记录了更高的再平衡温度。磁铁矿中 Al、Ti、V 的明显富集、较高的 Ni/Cr 值与较低的 Ti/V 值，共同指示其结晶于相对还原的成矿环境，且从 Mag-1 到 Mag-3 氧逸度逐渐降低。老并矿床磁铁矿的 V+Ti 及 Al+Mn+Ca 含量明显高于典型 BIF 型磁铁矿，而与热液型磁铁矿更为接近。结合矿区发育大量与海相沉积相关的膏盐层这一地质事实，认为老并矿床形成于早寒武世的海底高温热液系统，经历了早期海底热液铁质沉淀与晚期局限盆地膏盐析出两个演化阶段，并遭受了后期区域变质作用的改造。

关键词：磁铁矿；矿物化学；老并铁矿床；西昆仑造山带

中图分类号：P57；P61 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-6248(2026)05-0131-13

Chemical Composition of Magnetite from the Laobing Iron Deposit in West Kunlun, and Its Constraints on Ore Formation

SONG Mingwei[1], PENG Yiwei[1,*], ZHANG Yongmei[2,3], GU Xuexiang[2,3], ZHANG Yingshuai[1], DONG Shuyi[1], CHEN Li[1], LUO Xiao[1]

(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 Xinjiang

收稿日期：2026-07-22；**修回日期**：2026-09-02；**责任编辑**：贾晓丹

基金项目：深地国家科技重大专项（2024ZD1001806）资助。

作者简介：宋明伟（1997−），男，博士研究生，矿物学、岩石学、矿床学专业。E−mail：2469749958@qq.com。

*通讯作者：彭义伟（1987−），男，博士，副教授，从事矿床学、矿床地球化学教学及科研。E−mail：pengyiwei15@cdut.edu.cn。

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

Uygur Autonomous Region /Xinjiang Natural Resources and Ecological Environment Research Center, Urumqi 830000, Xinjiang, China）

Abstract：The Taxkorgan area is an important iron metallogenic belt in western China. The Laobing iron deposit, one of the typical deposits in this belt, is characterized by the assemblage of magnetite, gypsum and sulfides, serving as an ideal proxy for investigating the iron mineralization processes in this region. Based on detailed field geological investigation, this study presents LA-ICP-MS in situ trace element analyses of three types of magnetite with different occurrences from the Laobing iron deposit, aiming to constrain the ore-forming material sources, physicochemical conditions and deposit genesis. The results show that the three types of magnetite display consistent trace element spider diagram patterns, which are comparable to those of high-temperature hydrothermal deposits, indicating that the ore-forming materials were derived from submarine high-temperature hydrothermal fluids. The (Al+Mn)-(Ti+V) geothermometer and Ga-MgO diagram indicate that Mag-1 and Mag-2 crystallized at approximately 300°C, whereas Mag-3 was modified by post-ore metamorphism, recording higher re-equilibration temperatures. The pronounced enrichment of Al, Ti and V, together with elevated Ni/Cr ratios and low Ti/V ratios in magnetite, jointly suggest crystallization under relatively reducing conditions, with oxygen fugacity exhibiting a systematic decrease from Mag-1 to Mag-3. The V+Ti and Al+Mn+Ca contents of magnetite from the Laobing deposit are significantly higher than those of BIF-type magnetite, while being more comparable to hydrothermal-type magnetite. Combined with the presence of abundant gypsum-bearing layers related to marine sedimentation in the mining area, this study proposes that the Laobing deposit formed in a submarine high-temperature hydrothermal system during the Early Cambrian, experiencing early submarine hydrothermal iron precipitation and late restricted basin gypsum-salt deposition, followed by post-ore regional metamorphic overprinting.

Keywords：magnetite；mineral chemistry；Laobing iron deposit；West Kunlun Orogenic Belt

中国铁矿资源整体呈现贫矿多、富矿少。空间分布上，铁矿资源集中于中东部产区，西部地区勘查程度相对较低，资源分布不均衡的问题仍然突出（李厚民等, 2022）。近年来，新疆塔什库尔干地区铁矿勘查取得一定进展，已显示出良好的成矿潜力，但成矿规律与找矿潜力的系统研究仍相对薄弱（董连慧等, 2011; 董连慧等, 2012）。因此，加强铁矿床成矿机制与成矿规律的研究具有重要意义。

新疆塔什库尔干地区是中国西部重要的铁成矿带，目前已发现铁矿床（点）30 余处，包括赞坎、莫喀尔、老并及叶里克等大中型矿床（燕长海等, 2012; 张连昌等, 2016; 张帮禄等, 2022）。该带铁矿床主要赋存于布伦阔勒群，矿石以条带状–层状构造为主，矿物组合包括磁铁矿、石英、硅酸盐矿物、方解石、硬石膏、重晶石及黄铁矿等（燕长海等, 2012; 郑梦天等, 2016; 张连昌等, 2016; Zhou et al., 2017, 2018）。目前，该地区铁矿床的成矿物质来源、成矿物理化学条件及矿床成因类型仍缺乏系统约束。老并铁矿床是塔什库尔干铁成矿带的典型铁矿床之一，矿体呈层状、似层状赋存于布伦阔勒群变质地层之中，矿石发育条纹–条带状构造，具有较大找矿潜力。目前该矿床已识别出多种产状的磁铁矿，其主微量元素组成对反演成矿物质来源、成矿物理化学条件及矿床成因具有重要指示意义。为此，笔者在详细野外地质调查的基础上，选取老并铁矿床不同产状的磁铁矿为研究对象，开展 LA-ICP-MS 原位微量元素分析，拟从磁铁矿矿物化学标型角度约束成矿物质来源及成矿物理化学条件，综合地质特征探讨其矿床成因，以期为塔什库尔干地区铁矿床的成矿机制研究提供新的地球化学依据。

1 区域地质背景

西昆仑造山带位于塔里木地块南缘与青藏高原北缘之间，东连东昆仑、秦岭及大别山（图 1a; 潘裕生, 1994; Xiao et al., 2000; Zhang et al., 2018a, 2018b）。该带经历了多期构造–岩浆–变质事件，演化历史复杂，记录了原特提斯洋至古特提斯洋的开启、俯冲与闭合过程，并伴随大量铁矿资源的形成（张帮禄等, 2022; 李文渊, 2024）。该造山带由北昆仑地体、南昆仑地体和塔什库尔干–甜水海地体 3 个次级构造单元构成

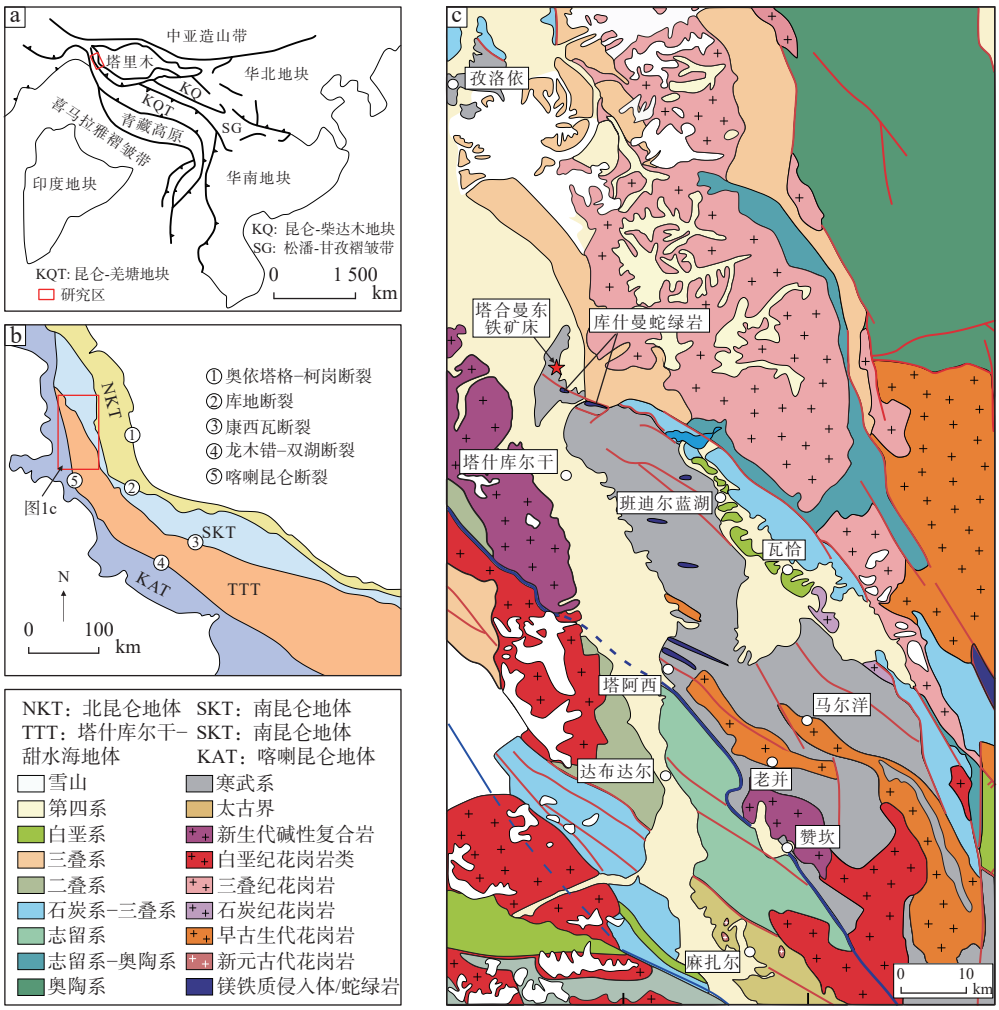


图1　研究区大地构造位置(a; 据 Pirajno, 2013 修改)、西昆仑造山带的构造框架(b; 据 Zhou et al., 2017 修改)及塔什库尔干地区地质简图(c; 据 Liu et al., 2023 修改)

Fig. 1　(a) Tectonic setting of the study area, (b) tectonic framework of the West Kunlun Orogenic Belt, and (c) geological map of the Taxkorgan area

(图 1b; Xiao et al., 2005; Yang et al., 2010), 其中塔什库尔干–甜水海地体又可进一步分为西北部的塔什库尔干地体和东南部的甜水海地体, 是该区铁矿床的主要赋存部位。布伦阔勒岩群作为塔什库尔干地体的主体地层单元, 在西昆仑地区出露广泛, 整体呈 NNE 向展布, 与区域构造线方向基本一致(图 1c)。该岩群是西昆仑地区重要的铁矿赋矿层位, 已发现赞坎、老并、塔阿西、叶里克等一系列大中型矿床(张连昌等, 2016; 张帮禄等, 2022)。其岩性组成以变质火山岩、碎屑岩和化学沉积岩为主, 其中火山岩及火山碎屑岩约占 30%, 沉积地层占据主导地位(计文化等, 2011; Li et al., 2018; 张传林等, 2019)。该套杂岩曾被认为记录了古元古代(2 100～2 500 Ma)和早寒武世(510～540 Ma)两期沉积成矿事件, 此后又经历了中晚元古代及华力西期—印支期的多期变质变形叠加(Zhang et al., 2007, 2019; 杨文强等, 2011; 刘文平等, 2013)。然而, 近年来的年代学资料显示, 区内铁矿的成矿时代应主要集中于早—中寒武世(540～510 Ma; 燕长海等, 2012; 郑梦天等, 2016; 李智泉, 2018; Zhang et al., 2018a, 2018b; Ding et al., 2021)。

2　矿床地质特征

老并矿区内出露地层主要为早古生界布伦阔勒群, 根据区内的岩石组合及其沉积相特征大致分为 3 段(图 2)。a 段主要分布于矿区的东部和南部, 为一套中浅变质碎屑岩夹火山岩、碳酸盐岩建造。该岩段主要岩性为黑云石英片岩、石榴黑云石英片岩、大理

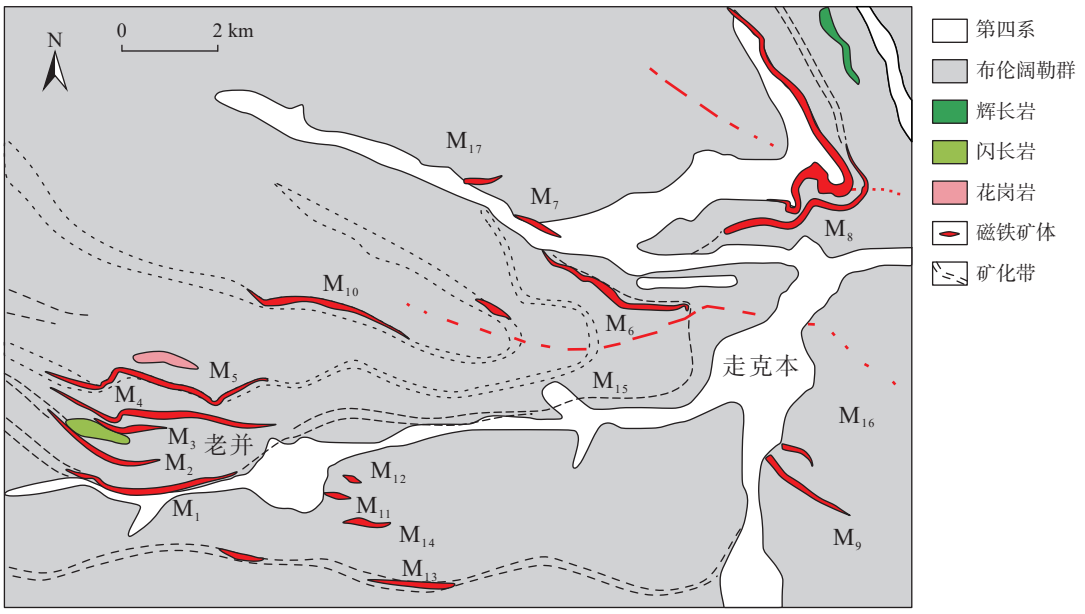


图2 老并铁矿床矿区地质简图(据陈登辉等, 2013 修改)

Fig. 2 Geological map of Laobing Fe deposit

岩、黑云斜长片岩。b 段主要分布于老并–走克本一带, 为矿区主要矿体的赋矿层位, 为一套中浅变质的碎屑岩夹火山岩建造。主要岩性为黑云石膏片岩、石膏岩、黑云石英片岩、长英质片岩、斜长角闪片岩、变石英砂岩。纵向上, 自下而上斜长角闪片岩、长英质片岩逐渐变少, 黑云石英片岩、含石膏黑云石英片岩增多; 横向上, 东北部以黑云石英片岩、变石英砂岩为主, 西南部以斜长角闪片岩、长英质片岩和黑云石英片岩为主。该岩性段中有两层石膏磁铁矿, 在地表呈负地形, 以此为标志划分出了 4 个岩性层。c 段主要分布于矿区的西部及西北部, 为一套中浅变质的碎屑岩夹火山岩建造。该岩段以大套的变石英砂岩出露为特征, 其主要岩性为变石英砂岩、磁铁石英岩、斜长角闪片岩、黑云石英片岩。

矿区内褶皱构造发育, 构造层次属中浅构造层, 变形相属于脆韧性变形相。褶皱以复式的背向形褶皱为主, 全区自北向南由问红向形、走克本背形、老并向形构成, 褶皱轴向以 NW 向为主, 褶皱两翼产状为 20～50°。断裂不发育, 断裂总体上以 NW、NNW 向高角度正断层为主, 规模一般较小。区内岩浆活动较弱, 出露面积约为 3.5 km^2, 岩石类型主要有片麻状花岗岩、闪长岩等。

老并铁矿区共发现 20 条磁铁矿体, 主要呈层状、透镜状产于地层沉积序列的结构转换面上或附近(图 3a、图 3b)。矿体总体上受单斜构造影响, 仅 M6-2、M6-1 矿体受走克本背斜构造控制。矿体形态较简单, 连续性较好, 走向以 NW–SE 向为主, 倾向 NE, 倾角为 23°～54°, 局部较陡在 70°以上。矿体长约为 200～1 800 m, 平均厚为 1.76～23.11 m。其中, M1 矿体资源量最大, 与下部的 M1-1 矿体均位于矿区中部; M6-2 矿体规模次之, 位于东北部背斜构造中, 形态较复杂且厚度较大; 其余 M2、M3、M4、M5 及 M6-1 矿体规模相对较小, 主要分布于西部和西北部。

老并矿床矿石类型包括绿泥石磁铁矿型、方解石磁铁矿型、角闪石磁铁矿型、石膏磁铁矿型、石英岩型磁铁矿石、黑云石英片岩磁铁矿型, 其中石膏磁铁矿型为主要矿石类型(图 3h)。矿石结构主要有鳞片粒状变晶结构、半自形粒状变晶结构、他形粒状结构和包含结构。矿石中金属矿物主要为磁铁矿, 其次为黄铁矿、磁黄铁矿和黄铜矿; 非金属矿物主要为石膏、黑云母、角闪石、石英等(图 4)。老并矿床中磁铁矿分为 3 类: 第一类磁铁矿(Mag-1)主要产于磁铁矿–石膏型矿石中, 与石膏密切共生, 多呈细粒自形–半自形晶(图 4a、图 4b); 第二类磁铁矿(Mag-2)主要产在含硫化物磁铁矿矿石中, 与磁黄铁矿、黄铜矿和黄铁矿密切共生, 形态大小类似于 Mag-1(图 4c、图 4d); 第三类磁铁矿(Mag-3)主要产于角闪石型矿石中, 与角闪石和石英关系密切, 粒径粗大, 明显区别于前两类磁铁矿(图 4e、图 4f)。



a. 磁铁矿–石膏型矿石风化呈松散砂状；b. 磁铁–石膏层大面积出露；c. 磁铁石膏片岩被花岗岩穿切；d. 磁铁石膏片岩中夹少量石英黑云片岩；e. 矿区出露少量含磁铁矿角闪片岩，局部含少量浸染状磁铁矿；f. 磁铁石膏片岩下盘黑云母片岩；g. 磁铁石膏片岩下盘石英黑云片岩；h. 磁铁矿与黑云母呈定向–半定向分布于磁铁石膏片岩中

图3　老并–走克本矿区野外及典型矿石照片

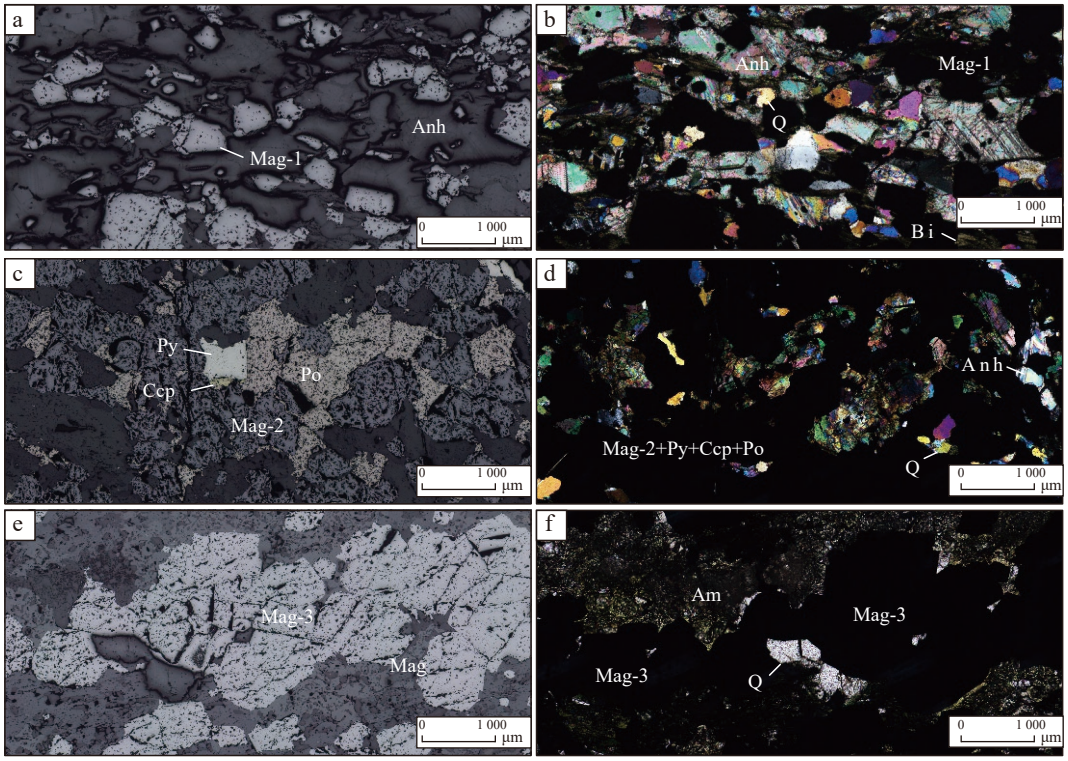
Fig. 3　Field photos and representative ore photos from the Laobing Fe deposit

3　样品选择及分析方法

本次研究样品采集自老并矿区 ZK12201 钻孔中不同层位的矿石。在镜下观察的基础上，选取 3 种不同产出形式的磁铁矿进行 LA-ICP-MS 原位分析。磁铁矿微量元素微区分析在中国地质大学(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室完成。测试所用激光剥蚀系统为美国 Coherent 公司 GeoLasPro 193 准分子固体进样系统，ICP-MS 为美国 Thermo Fisher 公司 X Series 2 型四极杆等离子体质谱仪。测试过程中采用 He 作为载气，Ar 作为补偿气，通过单点剥蚀模式进行分析，激光束斑直径为 44 μm，频率为 6 Hz，能量密度 6 J/cm^2。每个样品的前 20s 为背景信号采集时间，随后 50s 为样品信号采集时间。采用标准玻璃 NIST610 和 GSE-1G 作为外标，BCR-2G 和 GOR128-G 作为监控样确保数据精确度。测试完成后，采用软件 ICPMSDataCal(Liu et al., 2008; Liu et al., 2010)对样品的测试数据进行后期处理，各元素检出限根据背景信号标准偏差计算得出，绝大部分元素检出限低于 0.1×10^{-6}。

4　分析结果

3 类磁铁矿样品的原位微区成分分析结果(表 1)显示，磁铁矿 MgO、Al_2O_3、SiO_2、TiO_2 和 MnO 含量较高，Na_2O、P_2O_5、K_2O 和 CaO 含量较低。其中，Mag-1 的 Al_2O_3 含量最低(0.25%～0.35%，均值为 0.31%)，而 Mag-2(0.45%～0.75%，均值为 0.60%)与 Mag-3(0.75%～1.28%，均值为 0.95%)依次升高。Mag-1 和 Mag-2 的 MnO 含量基本一致(均约为 0.06%)，而在 Mag-3 中明显增高(0.08%～0.16%，均值为 0.11%)。Mag-1 与 Mag-2 的 SiO_2 含量(均值分别为 0.27%、0.24%)较为接近，而 Mag-3(均值为 0.84%)明显偏高，且变化范围



a、b. 磁铁矿与石膏密切共生；c、d. 磁铁矿与硫化物共生；e、f. 粗粒磁铁矿与角闪石共生；Mag. 磁铁矿；Anh. 硬石膏；Py. 黄铁矿；Po. 磁黄铁矿；Ccp. 黄铜矿；Q. 石英；Bi. 黑云母；Am. 角闪石；a、c、e. 反射光；b、d. 正交偏光；f. 单偏光

图4 老并铁矿床典型矿物镜下照片

Fig. 4 Photomicrographs of typical minerals from the Laobing Fe deposit

较大(0.00%～3.14%)。MgO 和 TiO_2 含量在 3 组样品中变化幅度较小且均值接近(MgO 为 0.17%～0.21%, TiO_2 为 0.15%～0.23%)。

老并铁矿床 3 类磁铁矿的微量元素组成呈现出系统性的差异。Mag-3 明显富集 V、Cr、Ga、Sn 等元素。其中, V 含量均值高达 2 536.61×10^{-6}, 是 Mag-1 (400.85×10^{-6})的 6.3 倍和 Mag-2(186.29×10^{-6})的 13.6 倍; Mag-3 的 Ga 含量均值为 75.55×10^{-6}, 约为前两类磁铁矿(16.72×10^{-6} 和 12.76×10^{-6})的 4.5～5.9 倍; Sn 含量变化最为显著, Mag-3 均值为 81.16×10^{-6}, 远高于 Mag-1 (3.52×10^{-6})和 Mag-2(2.26×10^{-6}), 且其变化范围极大 (0.09×10^{-6}～528.79×10^{-6})。Mag-2 的 Cr 含量最低(11.52 ×10^{-6}), Mag-3 最高(83.30×10^{-6}), Mag-1(59.97×10^{-6})介于二者之间。Zn 含量在 3 类磁铁矿中相对接近(Mag-1 为 84.65×10^{-6}, Mag-2 为 119.27×10^{-6}, Mag-3 为 96.29 ×10^{-6}), 但 Mag-2 的变化范围(28.94×10^{-6}～403.53×10^{-6}) 明显大于其他两组。Ge 和 In 含量在 Mag-2 和 Mag-3 中均略高于 Mag-1, 但整体均处于较低水平。Mag-3 中 V、Cr、Ga、Sn 显著升高, 指示其成矿环境或流体性质与前两类磁铁矿存在明显差异。

5 讨论

5.1 成矿作用的约束

作为各类铁矿床中主要的金属矿物, 磁铁矿对反演成矿作用过程具有重要的示踪意义。按照磁铁矿微量元素蛛网图(Dare et al., 2014)对老并矿床各类磁铁矿样品的微量元素进行分析, 各类磁铁矿具有基本一致的微量元素变化趋势, 表明这些磁铁矿具有同一物质来源。将老并磁铁矿与热液矿床磁铁矿微量元素配分模式进行对比, 其微量元素配分模式总体与高温热液磁铁矿相当(Dare et al., 2014), 基本落入高温热液区域(图 5), 指示老并磁铁矿以热液成因为主, 成矿物质可能主要来源于高温热液。

磁铁矿中 Al、Mn、Mg、Ti、V、Ga、Sn 等相容元素的含量与结晶温度呈正相关关系, 温度的升高有利于上述元素通过类质同象替代进入磁铁矿晶格, 反之则不利于其在矿物中富集(Mcintire, 1963; Nadoll et al., 2014)。(Al+Mn)-(Ti+V)图解是判别磁铁矿形成温度的有效工具(Nadoll et al., 2014), 其原理在于 Al 和 Ti

表 1　老并铁矿床不同类型磁铁矿 LA-ICP-MS 微区成分分析结果

Tab. 1　LA-ICP-MS in situ trace element compositions of different types of magnetite from the Laobing iron deposit

类型	范围	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	Sc	V	Cr	Co	Ni
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}
Mag-1	平均值	0.01	0.17	0.60	0.24	0.03	0.01	0.07	0.17	0.06	2.22	186.29	11.52	8.68	12.00
	最大值	0.12	0.44	0.75	0.65	0.15	0.03	0.24	0.40	0.07	3.62	199.29	25.77	12.89	42.47
	最小值	–	0.05	0.45	–	–	–	–	0.07	0.05	–	164.91	0.50	6.48	0.00
Mag-2	平均值	0.00	0.21	0.31	0.27	0.02	0.26	0.04	0.15	0.06	1.09	400.84	59.97	0.45	11.70
	最大值	0.01	0.23	0.35	0.92	0.12	2.56	0.14	0.17	0.06	3.25	473.67	84.47	1.91	46.98
	最小值	–	0.18	0.25	–	–	–	–	0.13	0.06	0.00	325.78	19.19	–	0.00
Mag-3	平均值	0.07	0.20	0.95	0.84	0.06	0.01	0.29	0.23	0.11	5.86	2 536.61	83.30	18.01	42.45
	最大值	0.45	0.30	1.28	3.14	0.16	0.09	1.86	0.34	0.16	29.56	2 687.10	129.85	24.74	68.52
	最小值	–	0.11	0.75	–	–	–	–	0.15	0.08	2.76	2 344.14	5.81	14.48	15.77

类型	范围	Cu	Zn	Ga	Ge	Y	Nb	Mo	In	Sn	W	Pb	Ce	Hf	Ta
		10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}
Mag-1	平均值	0.80	119.27	12.76	1.67	0.06	0.13	0.22	0.18	2.26	0.04	0.03	0.03	0.05	0.03
	最大值	3.68	403.53	15.61	3.42	0.52	1.57	0.58	0.34	3.97	0.36	0.30	0.29	0.50	0.34
	最小值	–	28.94	8.48	0.35	–	–	–	0.06	0.89	–	–	–	–	–
Mag-2	平均值	3.65	84.65	16.72	0.63	0.03	0.03	0.20	0.07	3.52	0.23	0.05	0.05	0.30	0.01
	最大值	35.18	93.53	18.82	1.51	0.08	0.22	0.72	0.20	4.96	2.63	0.46	0.39	2.81	0.07
	最小值	–	72.53	14.31	–	–	–	–	–	2.39	–	–	–	–	–
Mag-3	平均值	0.88	96.29	75.55	1.53	0.57	0.09	0.35	0.36	81.16	0.35	0.54	0.17	0.16	0.00
	最大值	4.34	255.10	89.86	2.99	6.92	0.93	1.90	2.19	528.79	4.86	5.24	1.06	1.27	0.02
	最小值	–	17.37	53.34	0.25	–	–	–	0.01	0.09	–	–	–	–	–

注：“–”表示该元素含量低于检出限；“0.00”表示该元素含量低于0.005。

在岩浆或热液体系中的含量均与温度具有直接的正相关性。老并矿床磁铁矿样品具有高 Al 和 Ti 含量，在(Al+Mn)-(Ti+V)图解中均落在 300～500 °C 的高温区域(图 6b)，与叶里克和赞坎铁矿床中磁铁矿的温度范围基本一致(丁明朋等, 2018; 陈登辉等, 2019)，表明其主体为高温热液成因。相比于 Mag-1 和 Mag-2，Mag-3 具有更高的结晶温度。此外，磁铁矿中 Ga 与 Mg 元素也可有效反应其形成的温度(Nadoll et al., 2014; Broughm et al., 2017)。Ga 在磁铁矿中的分配系数主要受温度控制(Nadoll et al., 2014)，高 Ga 含量趋向于高温的岩浆岩型磁铁矿，而低 Ga 含量则趋向于低温的热液型磁铁矿(Broughm et al., 2017)。在 Ga-MgO 图解中(图 6a)，老并矿床中 Mag-1 和 Mag-2 显示出良好的线性关系，指示其结晶温度较为稳定，总体约为 300°C。相比之下，Mag-3 具有更高的 Ga 含量，表明其具有更高的结晶温度。Mag-3 具有粗粒自形结构特征，表明其可能经历了重结晶过程。Mag-3 与 Mag-1 和 Mag-2 具有明显不同的结晶温度，表明后期变质作用对这类磁铁矿的微量元素组成造成显著迁移。因此，Mag-1 和 Mag-2 较好地保存了其原始高温热液流体的物理化学条件信息，但 Mag-3 所记录的可能并非原始高温流体的信息。

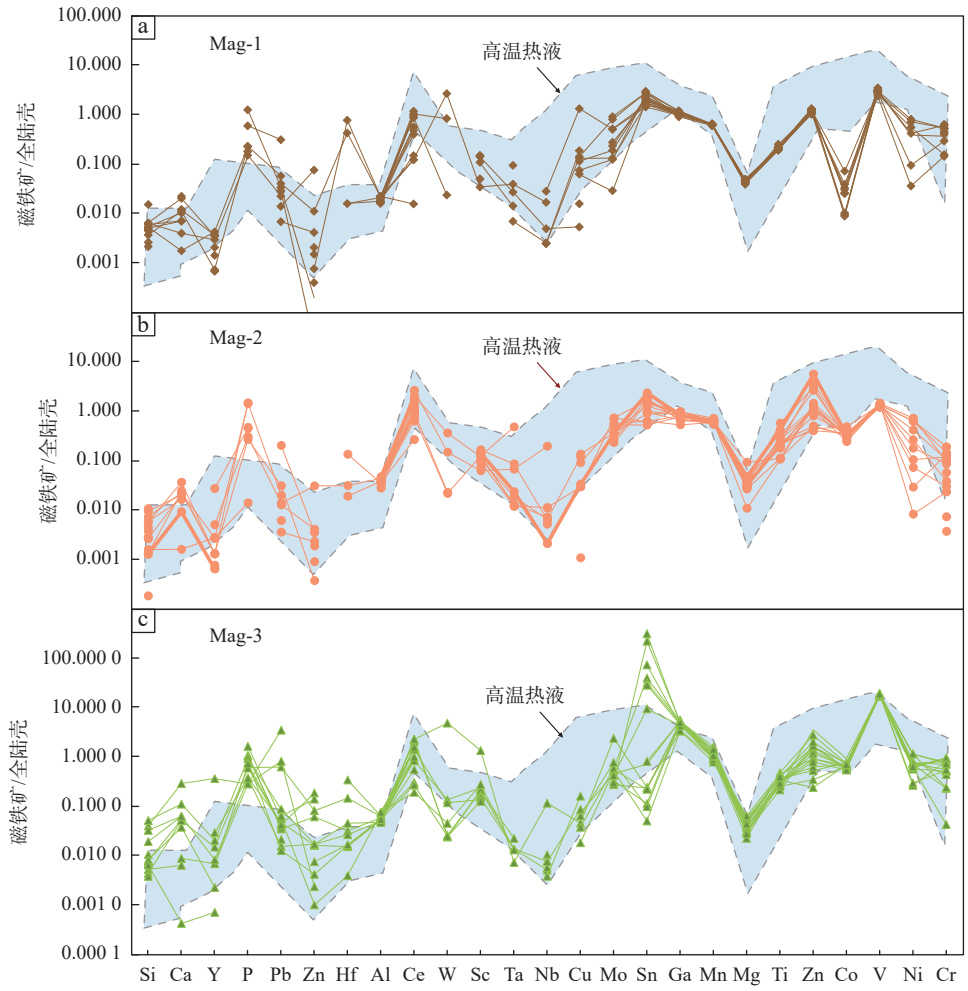


图5 老并铁矿床不同类型磁铁矿微量元素蛛网图

Fig. 5 Trace element spider diagrams for different types of magnetite from the Laobing iron deposit

磁铁矿中多价态元素的含量变化可作为衡量成矿流体氧逸度的重要指标。V 和 Cr 在自然界中存在多种价态，其在不同氧逸度条件下的价态转变直接影响其在磁铁矿中的赋存形式和含量。V 在磁铁矿中主要以 V^{3+}形式存在(离子半径为 0.64 Å，与 Fe^{3+}的 0.645 Å相近)，可通过类质同象替代进入磁铁矿晶格(Acosta-Góngora et al., 2014)。然而，随着氧逸度升高，V^{3+}被氧化为 V^{4+}或 V^{5+}，其中 V^{5+}离子半径较小，难以进入磁铁矿，导致磁铁矿中 V 含量降低(Toplis et al., 1995; Balan et al., 2006; Bordage et al., 2011)。Cr^{3+}(0.69 Å)与 Fe^{3+}(0.645 Å)具有相似的离子半径，易于类质同象替代进入磁铁矿，但在高氧逸度条件下 Cr^{3+}转变为 Cr^{4+}，亦会造成磁铁矿中 Cr 含量减少(Kotaś et al., 2000)。因此，磁铁矿中较高的 V 和 Cr 含量通常指示相对还原的成矿环境。老并矿床中 3 类磁铁矿样品均显示出较高的 V 和 Cr 含量(与叶里克铁矿类似；丁明朋等, 2018)，表明其形成环境相对还原。从 Mag-1、Mag-2 到 Mag-3，V 和 Cr 含量具有逐渐升高的特征，表明不同类型磁铁矿形成时的氧逸度条件亦有所不同，即 Mag-1 结晶时的氧逸度相对于 Mag-2 和 Mag-3 更高(图 6c)。此外，Ti 在成矿流体中仅存在单一价态(Ti^{4+})，具有稳定的分配系数，氧逸度对其在磁铁矿中的含量影响不大(Chung et al., 2015)，因此 Ti/V 值是判别氧逸度的有效指标，低 Ti/V 值指示还原性流体环境。同时，Sn 在相对高氧逸度条件下更容易以 Sn^{4+}形式进入磁铁矿晶格置换 Fe^{3+}(Carew, 2004; Chen et al., 2015)。老并矿床 3 类磁铁矿具有低 Ti/V 值和低 Sn 含量，指示其形成于还原环境。在 Sn-Ti/V 图解中，从 Mag-1、Mag-2 到 Mag-3，Ti/V 比和 Sn 含量具有逐渐降低的特征，亦表明 Mag-1 结晶环境的氧逸度相比于 Mag-2 和 Mag-3 更高(图 6d)。Mag-3 中 Sn 含量的显著变化，可能反映了后期变质作用对其微量元素组成的改造。

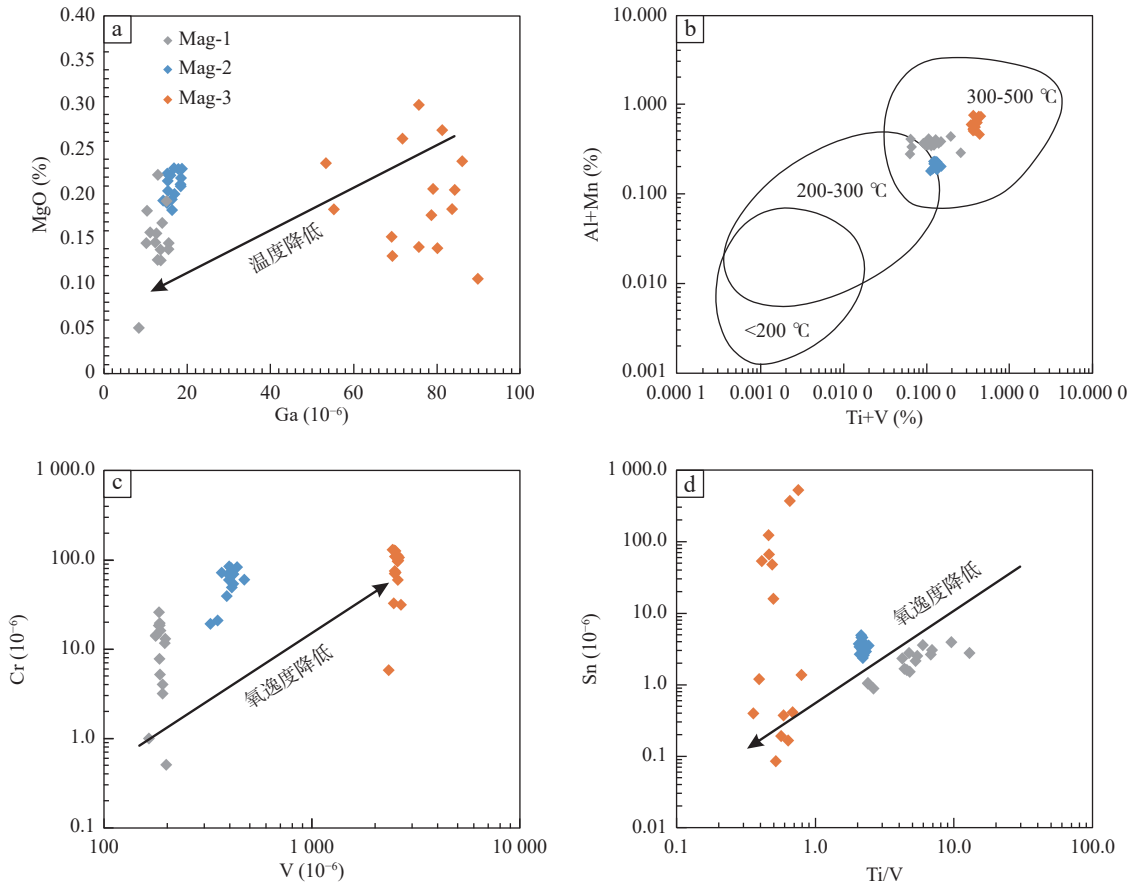


图6　磁铁矿 Ga-MgO(a)、(Ti+V)-(Al+Mn)(b，底图据 Nadoll et al., 2014)、V-Cr(c)及 Ti/V-Sn(d)图解

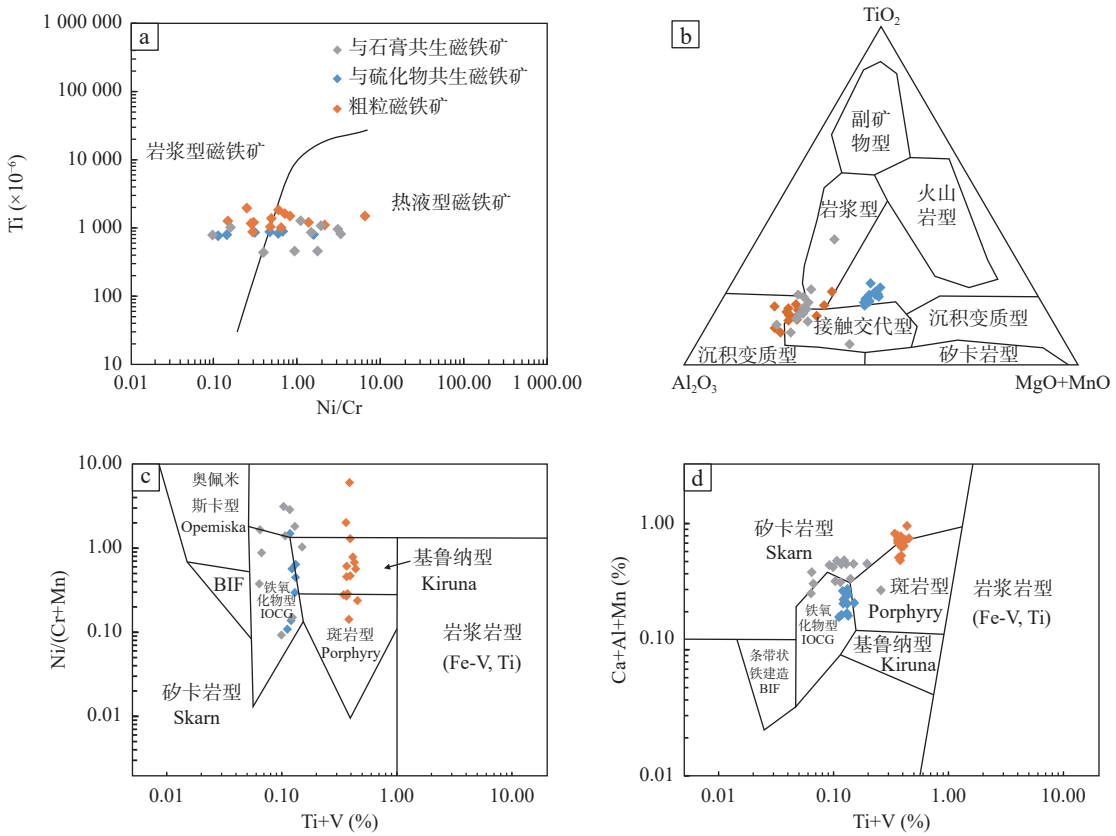
Fig. 6　(a) Ga vs. MgO, (b) Ti+V vs. Al+Mn, (c) V vs. Cr, and (d) Ti/V vs. Sn plots for magnetites

Sn 属于中等挥发性元素，对变质温压条件的变化较为敏感，其含量的大幅波动可能指示了变质重结晶过程中元素在矿物与流体之间的重新分配。

综上所述，老并矿床磁铁矿形成于温度约为 300 ℃、氧逸度相对较低的还原性热液环境，Mag-1 和 Mag-2 的微量元素组成有效地记录了成矿流体的原始物理化学条件。相比之下，后期变质作用对 Mag-3 的微量元素组成改造较为明显。

5.2　矿床成因分析

磁铁矿中主微量元素组成差异受控于其形成时的物理化学条件(如温度、压力、氧逸度、硫逸度及介质成分等)，因此其微量元素特征对矿床成因探讨具有重要的示踪意义(Dupuis et al., 2011; Dare et al., 2014; Nadoll et al., 2014)。依据不同成因磁铁矿的化学成分差异，前人建立了 Ni/Cr-Ti、TiO_2-Al_2O_3-(MgO+MnO)、(Ti+V)-Ni/(Cr+Mn)及(Ti+V)-(Ca+Al+Mn)等一系列判别图解(林师整, 1982; Dupuis et al., 2011; Dare et al., 2014; Nadoll et al., 2014)，为磁铁矿成因的判别提供了重要参考。需要指出的是，上述判别图解均基于大量不同成因类型矿床中磁铁矿的主微量元素数据统计建立，其本质是经验性的判别工具，在使用时需注意其适用条件和局限性。在 Ni/Cr-Ti 图解(图 7a)中，老并磁铁矿所有数据点主要集中在岩浆和热液交界处，且更靠近热液磁铁矿区域，指示其可能为热液成因。在 TiO_2-Al_2O_3-(MgO+MnO)图解(图 7b)中，Mag-1 和 Mag-3 的数据点靠近沉积变质型铁矿区域，Mag-2 落在空白区域。在(Ti+V)-Ni/(Cr+Mn)图解(图 7c)中，Mag-1 和 Mag-2 主要落入 IOCG 型区域，Mag-3 则落入斑岩型范围。在(Ti+V)-(Ca+Al+Mn)图解(图 7d)中，Mag-1 落在矽卡岩型矿床范围，Mag-2 落在 IOCG 型范围，Mag-3 落在斑岩型范围附近。从以上图解来看，老并铁矿床磁铁矿的成分特征与典型 BIF 型磁铁矿存在明显差别，其 V+Ti 及 Al+Mn+Ca 含量明显偏高，表明该矿床的形成与热液作用密切相关。此外，与典型 BIF 型铁矿相比，二者虽有相似的层状产状和磁铁矿–石英互层现象，但老并矿床发育独特的“磁铁矿–石膏–硬石膏”共生组合(即“膏铁建造”)，明显不同于 BIF 的“硅–铁建造”；其成矿时代为早寒武世，



a. 底图据 Dare et al.(2014)；b. 底图据林师整(1982)；c、d. 据 Dupuis et al.(2011)

图7 磁铁矿成因判别图解

Fig. 7 Magnetite genetic classification diagrams

也远晚于 BIF 主体形成的前寒武纪。因此，笔者倾向于认为老并矿床可能属于海相火山–沉积型铁矿床的一个特殊亚类，抑或是一种与早寒武世特殊海洋化学条件相关的独特沉积–变质型矿床，其确切归属有待进一步研究。

老并矿区赋矿围岩(长英质片岩、黑云石英片岩)中锆石 U-Pb 年龄分别为(532±3.9)Ma 和(526±5)Ma(燕长海等, 2012)，这一结果精确限定了含铁建造的沉积时代下限为早寒武世。该年龄区间与塔什库尔干铁矿集区内大量年代学数据所揭示的区域含铁建造主成岩期(540～510 Ma)高度吻合。赞坎矿区矿体下伏火山岩及侵入含矿地层的次火山岩体 U-Pb 年龄分别为(533±10)Ma 和(527.4±9.0)Ma(林尚康, 2015)；塔阿西矿区变质流纹岩年龄为 540～515 Ma(Ding et al., 2021)；孜洛依矿区为 526～509 Ma(Ding et al., 2021)；喀来子矿区火山熔岩夹层的锆石 U-Pb 年龄为(537.2±6.4)Ma(郑梦天等, 2016)。此外，布伦阔勒杂岩中变质火山岩的锆石 U-Pb 年龄为 543～534.8 Ma(Peng et al., 2021)。上述数据一致表明，老并铁矿床是该期区域性铁建造事件的重要组成部分。区域地质研究表明，原特提斯洋在寒武纪期间正处于俯冲消减阶段，西昆仑造山带记录了这一时期的弧岩浆活动和弧前/后扩张事件(Zhang et al., 2018a, 2018b; 丁明朋, 2023)。老并矿区含铁建造稀土元素呈现高含量及显著 Eu 正异常特征(饶东平等, 2013; 张哨波, 2016)，这与该区域其他膏–铁建造(如叶里克、喀来子)和硅–铁(磁铁矿–石英–硅酸盐矿物)建造(如赞坎、塔阿西)特征一致(陈登辉等, 2013; Li et al., 2018; Zheng et al., 2018)，记录了海底热液对成矿物质来源的重要贡献。磁铁矿微量元素蛛网图与高温热液的范围重叠，也证明了这一推测(图 6)。因此，综合区域构造演化、成岩成矿时代以及地球化学判别结果，认为老并矿床可能形成于寒武世原特提斯洋俯冲相关的弧前/后盆地环境。早阶段的伸展裂陷期，大规模火山活动为海水中输入了大量铁质，并在深部积累。随后溶解态 Fe^{2+} 扩散至氧化的浅水区域，可能被氧化为三价铁氢氧化物(王长乐等, 2024)。结晶程度较差的三价铁氢氧化物可能沿盆地斜坡与水溶液中的 Fe^{2+} 反应形成磁铁矿(Klein,

2005)。随后盆地开始闭合,海底热液活动减弱,盆地边缘逐步抬升,将大量沉积物带入盆地(Peng et al., 2021)。此阶段沉积盆地将形成一个局限浅水盆地,蒸发远大于海水补给。盆地中剩余海水逐渐浓缩,Ca^{2+}、SO_4^{2-}浓度达到过饱和,石膏大规模析出,形成大量石膏层。此外,由于海底热液活动并未完全停止,仍有少量 Fe^{2+}的输入,但局限盆地也难以维持高度分层的状态,导致 Fe^{2+}快速氧化沉淀,并分散在石膏层之中,形成了该区域的膏–铁建造。大约在 200～180 Ma 遭受了区域变质作用的改造(Qu et al., 2007; Zhang et al., 2018a, 2018b)。

6　结论

(1)老并铁矿床磁铁矿具有高温热液成因特征,结晶温度约为 300 ℃,形成于相对还原的成矿环境。Mag-1 和 Mag-2 较好地保存了原始热液流体的物理化学条件信息,而 Mag-3 受后期变质作用改造显著,其微量元素组成发生了明显迁移。

(2)老并铁矿床的磁铁矿微量元素特征与典型 BIF 型铁矿存在显著差异,而与热液型磁铁矿更为接近。结合矿区发育大量与海相沉积相关的膏盐层这一地质事实,认为老并矿床形成于早寒武世的海底高温热液系统。

(3)老并铁矿床经历了早期弧前/后拉张背景下海底热液铁质沉淀和晚期局限盆地蒸发成膏两个演化阶段,早寒武世(526～532 Ma)原特提斯洋俯冲相关的弧前/后盆地为其提供了有利的成矿空间,后期区域变质作用对矿石进行了叠加改造。

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):

陈登辉, 隋清霖, 赵晓健, 等. 西昆仑塔什库尔干地区赞坎铁矿床磁铁矿元素地球化学特征及其对成矿的制约[J]. 矿床地质, 2019, 38(2): 426−438.

CHEN Denghui, SUI Qinglin, ZHAO Xiaojian, et al. Geochemical characteristics of magnetite from Zankan iron deposit in Taxkorgan orefield and its constraint on mineralization[J]. Mineral Deposits, 2019, 38(2): 426−438.

陈登辉, 伍跃中, 李文明, 等. 西昆仑塔什库尔干地区磁铁矿矿床特征及其成因[J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(4): 671−684.

CHEN Denghui, WU Yuezhong, LI Wenming, et al. Geological characteristics and genesis of the iron deposits in the Taxkorgan area, West Kunlun[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2013, 37(4): 671−684.

丁明朋. 西昆仑造山带塔什库尔干铁矿带磁铁矿成矿作用研究—以赞坎铁矿为例 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2023.

DING Mingpeng. Metallogenic study of magnetite ore deposits in the Taxkorgan Iron Ore Belt, West Kunlun Orogenic Belt: a case study of the Zankan iron deposit[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2023.

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]. Earth Science, 2018, 43(9): 3169−3185.

董连慧, 冯京, 庄道泽, 等. 新疆富铁矿成矿特征及主攻类型成矿模式探讨[J]. 新疆地质, 2011, 29(4): 416−422.

DONG Lianhui, FENG Jing, ZHUANG Daoze, et al. Discussion of metallogenic models, mineralization characteristic and main type of rich iron ore of Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2011, 29(4): 416−422.

董连慧, 李基宏, 冯京, 等. 新疆地质矿产勘查 2011 年主要成果和进展[J]. 新疆地质, 2012, 30(1): 1−4.

DONG Lianhui, LI Jihong, FENG Jing, et al. The main achievement and progress of Xinjiang geology and mineral exploration in 2011[J]. Xinjiang Geology, 2012, 30(1): 1−4.

计文化, 李荣社, 陈守建, 等. 甜水海地块古元古代火山岩的发现及其地质意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(9): 1268−1280.

JI Wenhua, LI Rongshe, CHEN Shoujian, 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, 41(9): 1268−1280.

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.

李文渊. 古特提斯构造演化及其成矿作用[J]. 地质学报, 2024, 98(11): 3255−3273.

LI Wenyuan. The Paleo-Tethys tectonic evolution and corresponding metallogenesis[J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(11): 3255−3273.

李智泉. 西昆仑塔什库尔干铁矿带成矿机制及沉积环境 [D]. 北

京: 中国地质大学 (北京), 2018.

LI Zhiquan. Genesis and depositional condition of the iron deposit belt in Taxkorgan, West Kunlun[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.

林尚康. 西昆仑赞坎铁矿区英安斑岩地球化学特征及 U-Pb 年代学研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.

LIN Shangkang. Study on geochemistry and zircon U-Pb ages of dacite porphyry from the Zankan iron deposit, West Kunlun area[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015.

林师整. 磁铁矿矿物化学、成因及演化的探讨[J]. 矿物学报, 1982(3): 166−174.

LIN Shizheng. A contribution to the chemistry, origin and evolution of magnetite[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1982(3): 166−174.

刘文平, 王核, 仝来喜, 等. 西昆仑塔什库尔干布伦阔勒群的岩石地球化学特征及变质 P-T 轨迹[J]. 岩石学报, 2013, 29(3): 923−937.

LIU Wenping, WANG He, TONG Laixi, et al. Geochemical characteristics and metamorphic P-T paths of the Bulunkuole Group in Taxkorgan, western Kunlun[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(3): 923−937.

潘裕生. 青藏高原第五缝合带的发现与论证[J]. 地球物理学报, 1994, 37(2): 184−192.

PAN Yusheng. Discovery and evidence of the fifth suture zone of Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Acta Geophysica Sinica, 1994, 37(2): 184−192.

饶东平, 曹新志, 张旺生, 等. 塔什库尔干地区老并铁矿床地质特征及成因分析[J]. 新疆地质, 2013, 31(3): 190−195.

RAO Dongping, CAO Xinzhi, ZHANG Wangsheng, et al. Study on characteristics and genesis of the Laobin iron deposit in Tashikuergan, Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2013, 31(3): 190−195.

王长乐, 高亮, 谢尚君, 等. 条带状铁建造的原始矿物组成: 进展与问题[J]. 岩石学报, 2024, 40(1): 79−96.

WANG Changle, GAO Liang, XIE Shangjun, et al. Primary mineralogy of banded iron formation: Advances and issues[J]. Acta Petrologica Sinica, 2024, 40(1): 79−96.

燕长海, 陈曹军, 曹新志, 等. 新疆塔什库尔干地区“帕米尔式”铁矿床的发现及其地质意义[J]. 地质通报, 2012, 31(4): 549−557.

YAN Changhai, CHEN Caojun, CAO Xinzhi, et al. The discovery of the "Pamir-type" iron deposits in Taxkorgan area of Xinjiang and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(4): 549−557.

杨文强, 刘良, 曹玉亭, 等. 西昆仑塔什库尔干印支期 (高压) 变质事件的确定及其构造地质意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(8): 1047−1060.

YANG Wenqiang, LIU Liang, CAO Yuting, et al. Geochronological evidence of Indosinian (high-pressure) metamorphic event and its tectonic significance in Taxkorgan area of the Western Kunlun Mountains, NW China[J]. Science China Earth Sciences, 2011, 41(8): 1047−1060.

张帮禄, 张连昌, 董志国, 等. 西昆仑地区古生代沉积型铁锰矿床成矿规律及其与原—古特提斯洋演化的关系[J]. 地质科学, 2022, 57(4): 1047−1063.

ZHANG Banglu, ZHANG Lianchang, DONG Zhiguo, et al. Metallogenic regularity of Paleozoic sedimentary iron-manganese deposits in the northern segment of West Kunlun and its relationship with the evolution of the Proto-Paleo-Tethys Ocean[J]. Chinese Journal of Geology, 2022, 57(4): 1047−1063.

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

张哨波. 西昆仑帕米尔式铁矿床膏铁建造成因探讨—以老并铁矿为例[J]. 矿产与地质, 2016, 30(2): 151−156.

ZHANG Shaobo. Genesis of gypsolyte-iron formation of West Kunlun-Pamir type iron deposits: a case study of Laobing iron deposit[J]. Mineral Resources and Geology, 2016, 30(2): 151−156.

郑梦天, 张连昌, 朱明田, 等. 西昆仑喀来子钡-铁矿床地质特征、时代及成因探讨[J]. 地学前缘, 2016, 23(5): 252−265.

ZHENG Mengtian, ZHANG Lianchang, ZHU Mingtian, et al. Geological characteristics, formation age and genesis of the Kalaizi Ba-Fe deposit in West Kunlun[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(5): 252−265.

Acosta-Góngora P, Gleeson S A, Samson I M, et al. Trace element geochemistry of magnetite and its relationship to Cu-Bi-Co-Au-Ag-U-W mineralization in the Great Bear Magmatic Zone, NWT, Canada[J]. Economic Geology, 2014, 109(7): 1901−1928.

Balan E, Villiers J P R D, Eeckhout S G, et al. The oxidation state of vanadium in titanomagnetite from layered basic intrusions[J]. American Mineralogist, 2006, 91(5−6): 953−956.

Bordage A, Balan E, Villiers J P R D, et al. V oxidation state in Fe-Ti oxides by high-energy resolution fluorescence-detected X-ray absorption spectroscopy[J]. Physics and Chemistry of Minerals, 2011, 38(6): 449−458.

Broughm S G, Hanchar J M, Tornos F, et al. Mineral chemistry of magnetite from magnetite-apatite mineralization and their host rocks: Examples from Kiruna, Sweden, and El Laco, Chile[J]. Mineralium Deposita, 2017, 52(8): 1223−1244.

Carew M J. Controls on Cu-Au mineralisation and Fe oxide metasomatism in the eastern fold belt, NW Queensland, Australia[D]. Queensland: James Cook University, 2004.

Chen W T, Zhou M F, Gao J F, et al. Geochemistry of magnetite from Proterozoic Fe-Cu deposits in the Kangdian Metallogenic

Province, SW China[J]. Mineralium Deposita, 2015, 50(7): 795−809.

Chung D, Zhou M F, Gao J F, et al. In-situ LA-ICPMS trace elemental analyses of magnetite: The late Palaeoproterozoic Sokoman Iron Formation in the Labrador Trough, Canada[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 65: 917−928.

Dare S A S, Barnes S J, Beaudoin G, et al. Trace elements in magnetite as petrogenetic indicators[J]. Mineralium Deposita, 2014, 49(7): 785−796.

Ding T, Tan T 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, 2021, 98: 1−16.

Dupuis C, Beaudoin G. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types[J]. Mineralium Deposita, 2011, 46(4): 319−335.

Klein C. Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origin[J]. American Mineralogist, 2005, 90: 1473−1499.

Kotaś J, Stasicka Z. Chromium occurrence in the environment and methods of its speciation[J]. Environmental Pollution, 2000, 107(3): 263−283.

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(1): 9970.

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.

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

Liu X Q, Zhang C L, Zou H B, et al. Diverse metavolcanic sequences in the Cambrian accretionary complex at the Pamir Syntax: Implications for tectonic evolution from Proto-Tethys to Paleo-Tethys[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2023, 241: 105481.

Mcintire W L. Trace element partition coefficients: A review of theory and applications to geology[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1963, 27(12): 1209−1264.

Nadoll P, Angerer T, Mauk J L, et al. The chemistry of hydrothermal magnetite: A review[J]. Ore Geology Reviews, 2014, 61: 1−32.

Peng Z D, Zheng M T, Wang C L, et al. Constraints on the age and geodynamic setting of the iron formations and anhydrite Fe-(Ba) deposits in the Bulunkuole Group of the Taxkorgan area, NW China[J]. Ore Geology Reviews, 2021, 133: 104121.

Pirajno F. The geology and tectonic settings of China's mineral deposits[M]. Berlin: Springer, 2013, 1−671.

Qu J F, Zhang L F, Ai Y L, et al. High-pressure granulite from Western Kunlun, northwestern China: Its metamorphic evolution, zircon SHRIMP U-Pb ages and tectonic implication[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 50: 961−971.

Toplis M J, Carroll M R. An experimental study of the influence of oxygen fugacity on Fe-Ti oxide stability, phase relations, and mineral-melt equilibria in ferro-basaltic systems[J]. Journal of Petrology, 1995, 36(5): 1137−1170.

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

Xiao W J, Windley B F, Liu D Y, et al. Accretionary tectonics of the Western Kunlun Orogen, China: a Paleozoic-early Mesozoic, long-lived active continental margin with implications for the growth of Southern Eurasia[J]. The Journal of Geology, 2005, 113: 687−705.

Yang W Q, Liu L, Cao Y T, et al. Geochronological evidence of Indosinian (high-pressure) metamorphic event and its tectonic significance in Taxkorgan area of the Western Kunlun Mountains, NW China[J]. Science China: Earth Sciences, 2010, 53: 1445−1459.

Zhang C L, Lu S N, Yu H F, et al. Tectonic evolution of the Western Kunlun orogenic belt in northern Qinghai-Tibet Plateau: evidence from zircon SHRIMP and LA-ICP-MS U-Pb geochronology[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 50: 825−835.

Zhang C L, Zou H B, Ye X T, et al. Tectonic evolution of the West Kunlun Orogenic Belt along the northern margin of the Tibetan Plateau: Implications for the assembly of the Tarim terrane to Gondwana[J]. Geoscience Frontiers, 2019, 10: 973−988.

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, 2018a, 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, 2018b, 314−315: 40−51.

Zheng M T, Wang C L, Zhang L C, et al. Geological and geochemical constraints on the origin of the Early Cambrian Kalaizi Fe-Ba deposit in Western Kunlun, NW China[J]. Ore Geology Reviews, 2018, 100: 347−359.

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.