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：彭义伟，姜文尧，章永梅，等. 西昆仑翁吉勒铁矿区中新世埃达克质岩成因及成矿意义[J]. 西北地质，2026，59(5)：157−173. DOI：10.12401/j.nwg.2026066

Citation：PENG Yiwei，JIANG Wenyao，ZHANG Yongmei，et al. Petrogenesis and Metallogenic Significance of Miocene Adakitic Rocks in the Wengjile Iron Deposit，West Kunlun[J]. Northwestern Geology，2026，59(5)：157−173. DOI：10.12401/j.nwg.2026066

西昆仑翁吉勒铁矿区中新世埃达克质岩成因及成矿意义

彭义伟[1]，姜文尧[1]，章永梅[2,3]，顾雪祥[2,3]，李国军[4]，解程皓[4]，
张英帅[1]，董树义[1]，宋明伟[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；4. 新疆维吾尔自治区地质研究院，新疆 乌鲁木齐 830000）

摘 要：翁吉勒矽卡岩型铁矿床位于西昆仑塔什库尔干地区，矿区内广泛发育的似斑状花岗岩与铁矿的关系尚不明确。笔者以矿区内灰白色（含灰白色钾长石斑晶）和浅肉红色（含肉红色钾长石斑晶）两类似斑状花岗岩为研究对象，通过岩相学、锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素和全岩地球化学研究，结合氧逸度计算，揭示其岩石成因、源区性质、构造背景及成矿意义。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示，似斑状花岗岩的年龄约为 13.6 Ma，属于中新世岩浆活动产物。翁吉勒花岗岩具有高 Sr（773.32×10^{-6}～$1\,437.81\times10^{-6}$），低 Y（3.12×10^{-6}～18.07×10^{-6}）和 Yb（0.25×10^{-6}～1.16×10^{-6}）及高 Sr/Y 值（61.05～460.98）的埃达克质岩特征。翁吉勒花岗岩具有低的 MgO（0.50%～0.77%）、Ni（2.50×10^{-6}～5.45×10^{-6}）及 Cr（8.39×10^{-6}～13.87×10^{-6}）含量、富集的锆石 Hf 同位素（−6.3～−3.4）组成及不明显的 Eu 异常，指示其可能来源于加厚的古老榴辉岩相下地壳部分熔融。结合前人研究成果，认为翁吉勒花岗岩的形成受控于印度−欧亚板块碰撞后背景，其中帕米尔地壳的持续加厚引发的岩石圈地幔局部拆沉，是促使加厚古老下地壳部分熔融的重要原因。翁吉勒花岗岩显示出较高氧逸度特征（相对氧逸度 ΔFMQ 值为 0.19～2.47）。此外，花岗岩普遍发育黑云母，锆石 Ce/Sm 与 Yb/Gd 呈正相关关系，指示岩浆存在角闪石的分离结晶作用，暗示岩浆富水。综合分析认为，岩浆源区、较高氧逸度及富水是控制翁吉勒矽卡岩型铁矿成矿的关键因素。西昆仑地区广泛发育埃达克质岩，具有良好的找矿潜力，其岩浆氧逸度和含水量可作为重要的找矿指标。

关键词：翁吉勒铁矿；中新世；埃达克质岩；岩石成因

中图分类号：P581 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-6248(2026)05-0157-17

Petrogenesis and Metallogenic Significance of Miocene Adakitic Rocks in the Wengjile Iron Deposit, West Kunlun

收稿日期：2026-07-17；**修回日期**：2026-08-29；**责任编辑**：吕鹏瑞

基金项目：深地国家科技重大专项（2024ZD1001806）资助。

作者简介：彭义伟（1987−），男，博士，副教授，从事矿床学及矿床地球化学教学与科研。E−mail：yiwei_peng@163.com。

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

PENG Yiwei[1], JIANG Wenyao[1], ZHANG Yongmei[2,3], GU Xuexiang[2,3], LI Guojun[4], XIE Chenghao[4], ZHANG Yingshuai[1], DONG Shuyi[1], SONG Mingwei[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 the People's Government of Xinjiang Uygur Autonomous Region /Xinjiang Research Center for Natural Resources and Ecological Environment, Urumqi 830000, Xinjiang, China；4. Xinjiang Institute of Geology, Urumqi 830000, Xinjiang, China）

Abstract：The relationship between the widely developed porphyritic granites and iron mineralization in the Wengjile skarn-type iron deposit, located in the Tashkurgan area of the West Kunlun orogenic belt, remains unclear. This study investigates two types of porphyritic granites in the mining area: grayish-white (containing grayish-white K-feldspar phenocrysts) and light flesh-red (containing light flesh-red K-feldspar phenocrysts). Through petrography, zircon U-Pb geochronology, Hf isotope analysis, whole-rock geochemistry, and oxygen fugacity calculations, we elucidate their petrogenesis, source characteristics, tectonic setting, and metallogenic significance. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yields consistent ages of ～13.6 Ma for both granite types, indicating that they are products of Miocene magmatism. The Wengjile granites exhibit adakitic affinities, characterized by high Sr (773.32×10^{-6}–$1\,437.81\times10^{-6}$), low Y (3.12×10^{-6}–18.07×10^{-6}) and Yb (0.25×10^{-6}–1.16×10^{-6}), and high Sr/Y ratios (61.05–460.98). Their low MgO (0.50%–0.77%), Ni (2.50×10^{-6}–5.45×10^{-6}) and Cr (8.39×10^{-6}–13.87×10^{-6}) contents, enriched zircon Hf isotopic compositions ($\varepsilon_{Hf(t)}$ values range from –6.3 to –3.4), and insignificant Eu anomalies suggest that the Wengjile granites were derived from partial melting of thickened ancient eclogite-facies lower crust. Combined with previous studies, the generation of the Wengjile granites was controlled by the post-collisional setting of the India-Eurasia plate collision, wherein localized delamination of the lithospheric mantle, triggered by continued crustal thickening in the Pamir region, was an important factor promoting partial melting of the thickened ancient lower crust. The Wengjile granites exhibit relatively high oxygen fugacity (ΔFMQ values range from 0.19 to 2.47). In addition, the granites are generally enriched in biotite, and the positive correlation between zircon Ce/Sm and Yb/Gd ratios indicates fractional crystallization of amphibole, suggesting a water-rich magma. Comprehensive analysis suggests that magma source characteristics, relatively high oxygen fugacity, and water-rich conditions are key factors controlling the Wengjile skarn-type iron mineralization. The Tashkurgan area, where adakitic rocks are widely developed, shows considerable exploration potential, with magmatic oxygen fugacity and water content serving as important prospecting indicators.

Keywords：Wengjile iron deposit；Miocene；Adakitic rocks；petrogenesis

青藏高原西北部的西昆仑–帕米尔造山带记录了新元古代以来多期地体裂离、俯冲增生、碰撞造山及新生代陆内变形的完整地质历史，是特提斯构造域演化的关键区域（Robinson et al., 2007; 张传林等, 2019）。印度–欧亚板块的聚合碰撞是新生代最重要的地质事件之一，碰撞致使西昆仑–帕米尔地区发生整体隆升与地壳增厚，并于后碰撞阶段形成了广泛出露、种类多样的中新世火成岩组合（柯珊等, 2006; Liu et al., 2024）。西昆仑–帕米尔地区广泛分布的中新世花岗岩普遍具有埃达克质岩的地球化学亲缘性（王亚伟等, 2013; 木热地里·马合木提等, 2024）。前人围绕这些埃达克质岩开展了系统的年代学和地球化学研究，但在岩浆成因和源区性质方面仍存在分歧，主要观点包括富集地幔熔融、壳幔混合和加厚下地壳熔融等（Jiang et al., 2012; 王亚伟等, 2013; 塔力峰·别地力汗等, 2026），岩石成因尚需进一步厘定。

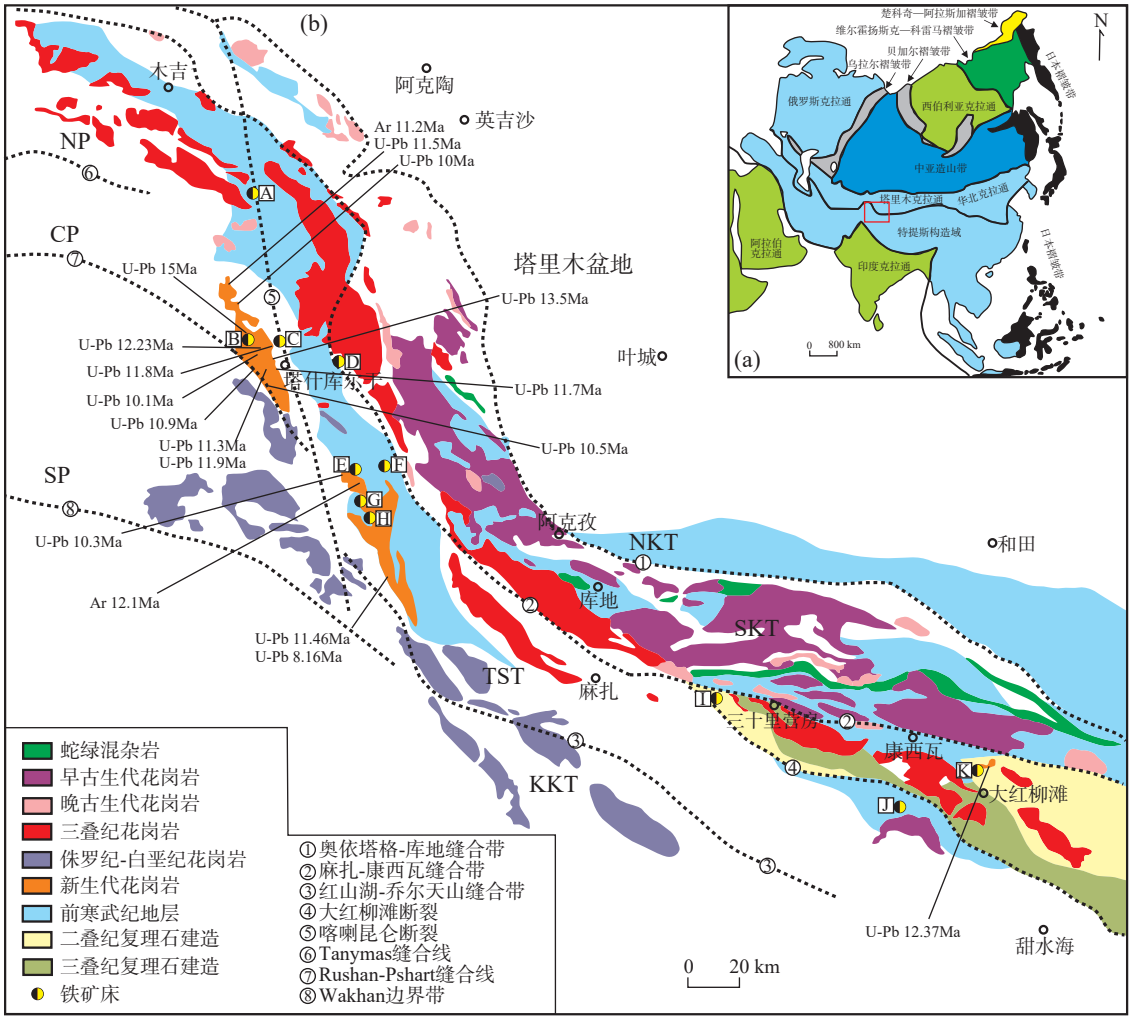
全球范围内，埃达克质岩不仅与铜、金等金属成矿表现出显著的时空耦合关系，也与部分矽卡岩型铁矿（如鄂东程潮铁矿、宁芜姑山和凹山铁矿）存在直接成因联系（李印等, 2009）。西昆仑–帕米尔地区作为中国重要的铁矿产区，除发育大量的沉积–变质型铁矿床（如赞坎、老并和塔合曼东铁矿）以外，还分布着与中新世埃达克质岩密切相关的矽卡岩型铁矿床，如翁吉勒和阿克萨依铁矿床（张德贤等, 2016; 董瑞等,

2021; Dong et al., 2023)。然而，埃达克质岩成因及其与矽卡岩型铁矿的关系尚不明确，制约了对该区矽卡岩型铁矿成矿规律的深入认识及找矿方向的确定。

笔者以西昆仑塔什库尔干地区翁吉勒铁矿区的似斑状花岗岩为研究对象，开展了岩相学、同位素年代学、全岩地球化学、锆石微量元素和 Hf 同位素组成等研究，剖析岩石成因、源区性质和地球动力学背景，并探讨其与铁矿的成矿意义。

1　地质背景

西昆仑–帕米尔造山带位于青藏高原西北缘，大地构造位置处于印度板块与欧亚板块碰撞形成的“帕米尔构造结”外围东北部，该造山带呈现典型的多块体拼贴、多缝合带分割的复杂构造格局(Burtman et al., 2000)。东段西昆仑造山带自北向南依次划分为北昆仑地体、南昆仑地体、麻扎–甜水海地体及喀喇昆仑地体，西段帕米尔构造结则对应划分为北帕米尔、中帕米尔和南帕米尔(图 1; 张传林等, 2019; Liu et al., 2020)。受印度板块与欧亚板块碰撞及特提斯洋的开启与闭合过程影响，西昆仑地区发育元古代、早古生代、晚古生代、三叠纪、侏罗纪—白垩纪及新生代 6 期岩浆活动，侵入岩的时代整体呈现出自北向南逐渐变年轻的趋势(汪玉珍等, 1987; 魏小鹏, 2018; 董瑞等,



A. 切列克其矿床；B. 翁吉勒矿床；C. 塔合曼东矿床；D. 班迪尔司热洪矿床；E. 老并矿床；F. 卡拉孜矿床；G. 赞坎矿床；H. 莫喀尔矿床；I. 黑恰矿床；J. 大红柳滩矿床；K. 阿克萨依矿床；年龄数据引自柯珊等(2006)、林清茶等(2006)、Robinson et al.(2007)、Jiang et al.(2012)、张德贤等(2016)、徐晓尹等(2017)、蔡志慧等(2020)、董瑞等(2021)、Liu et al.(2024)、塔力峰·别地力汗等(2026)

图1　西昆仑–帕米尔造山带地质图(a; 据 Dong et al., 2023 修改)和亚洲构造轮廓图(b; 据Şengör et al., 1992)

Fig. 1　(a) Geological map of the West Kunlun-Pamir orogenic belt, and (b) tectonic outline map of Asia

2021)。新生代岩浆岩主要分布于塔什库尔干县及邻区,在甜水海地块东北部的阿克萨依地区亦有零星出露。锆石 U-Pb 定年结果显示,这些岩浆岩的形成时代为 10～15 Ma(柯珊等, 2006; 张德贤等, 2016; 董瑞等, 2021; Liu et al., 2024)。岩浆岩多具埃达克质岩的地球化学特征,其成因机制虽存争议,但近年来多数研究倾向于认为其源于加厚古老下地壳的部分熔融(柯珊等, 2006; Liu et al., 2024)。在成矿方面,西昆仑发育与埃达克质岩密切相关的矽卡岩型铁矿床,典型实例包括塔什库尔干县的翁吉勒铁矿床和甜水海地块东北部的阿克萨依铁矿床(张德贤等, 2016; 董瑞等, 2021),表明埃达克质岩具有良好的矽卡岩型铁矿找矿潜力。

新疆塔什库尔干地区位于青藏高原西北部,该区基底由古元古代布伦阔勒岩群(深变质)和中元古代—新元古代甜水海岩群(浅变质)共同构成。奥陶纪—志留纪地层为复理石相,而石炭纪—二叠纪地层则以活动陆缘(火山弧)背景下形成的火山岩为特征(王建平, 2008)。区内大型构造包括喀喇昆仑断裂以及沿塔什库尔干河谷展布的近 SN 向公格尔伸展断裂系(Brunel et al., 1994; Amidon and Hynek, 2010)。此外,在研究区东北部还发育有公格尔–慕士塔格片麻岩穹窿,其形成与公格尔伸展断裂系密切相关(Robinson et al., 2007; 蔡志慧等, 2020)。区内新生代岩浆岩主要包括塔什库尔干河谷西侧的卡日巴生–苦子干岩体和东侧的赞坎岩体,侵位于二叠系及前寒武纪布伦阔勒群中(柯珊等, 2006; 徐晓尹等, 2017; Liu et al., 2024)。

2 矿区地质及岩体岩相学特征

翁吉勒铁矿床位于中–塔边境以东约 20 km 的萨热克塔什达板希勒别力沟附近。矿区出露地层主要为未分元古界布伦阔勒群(Pt_1B)和第四系(Q)(图 2)。未分元古界布伦阔勒群(Pt_1B)集中分布于矿区东部和中部,岩性包括黑云母石英片岩、黑云母斜长片麻岩、辉石角闪片岩等。受区域构造运动影响,矿区总体呈 NW–SE 向单斜构造,发育小断层和小裂隙。节理主要有两组,产状分别为 SE 168 °和 NE 65 °。矿区岩浆岩发育,岩性组合较为复杂,主要包括似斑状花岗岩、灰白色细粒花岗岩及灰白色中粒黑云母花岗岩。其中,似斑状花岗岩在矿区内大面积出露,与围岩地层

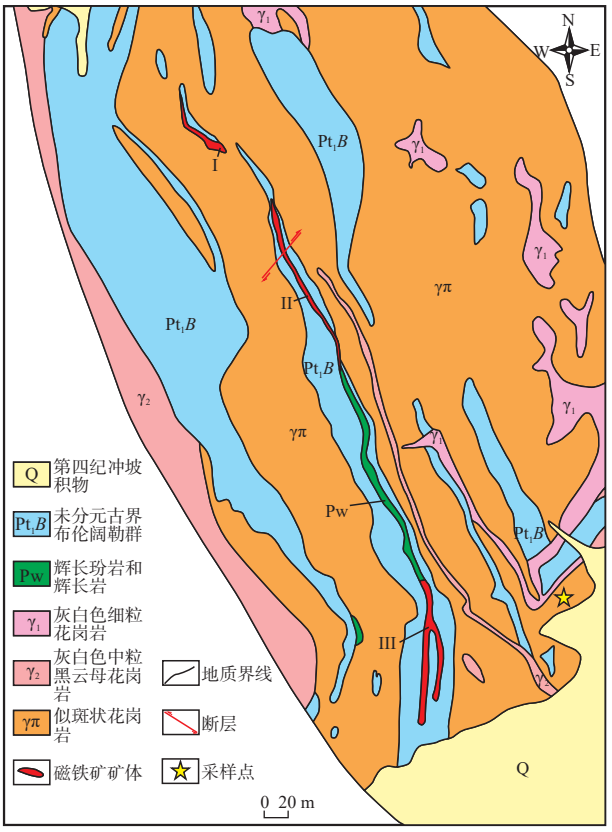


图2 翁吉勒铁矿床矿区地质简图(据新疆地矿局第二地质大队, 2006 修改)

Fig. 2 Simplified geological map of the Wengjile iron deposit

及其他侵入岩接触界线明显;灰白色细粒花岗岩与灰白色中粒黑云母花岗岩出露规模有限,整体呈 NW–SE 向展布,多呈脉状、透镜状或不规则状产出。此外,矿区内还发育多种脉岩,包括花岗岩脉、辉长岩脉及辉长玢岩脉等。矿区共发现 3 处较大矿体露头,主要呈脉状、似层状和透镜状产出,分布于似斑状花岗岩与布伦阔勒群的接触带,或沿布伦阔勒群层位产出(图 2),长度为 120～210 m;矿石品位较富,TFe 平均品位为 27.69%～49.66%,总体属小型铁矿床。

野外地质调查显示,矿区内灰白色细粒花岗岩、灰白色中粒黑云母花岗岩、辉长玢岩及辉长岩脉均明显切穿似斑状花岗岩,部分岩脉甚至直接切穿矿体。相比之下,似斑状花岗岩与矿体及围岩接触界线清晰,且岩体发育矽卡岩化,暗示似斑状花岗岩与成矿作用关系更为密切。似斑状花岗岩依据斑晶颜色可分为灰白色似斑状花岗岩(斑晶为灰白色)和浅肉红色似斑状花岗岩(斑晶为肉红色)(图 3)。不同颜色的似斑状花岗岩具有相似的岩石学特征:似斑状结构,块状构造。斑晶均为钾长石,含量为 30%～40%,发育卡氏双晶。基

质含量为 60%～70%, 主要矿物为钾长石(15%～20%)、斜长石(25%～30%)、石英(15%～20%), 黑云母(2%～5%), 含极少量榍石、磷灰石等。

3　样品采集和分析方法

本次研究的花岗岩样品均采自翁吉勒矿区, 采样坐标为 N 37°53′44″, E 75°00′37″。用于锆石 U-Pb-Hf 同位素和微量元素分析的样品为 1 件灰白色似斑状花岗岩(WJL-3)和 1 件浅肉红色似斑状花岗岩(WJL-4), 主微量测试的样品为 6 件灰白色似斑状花岗岩和 5 件浅肉红色似斑状花岗岩。

锆石 U-Pb 同位素定年和微量元素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完成, 采用 GeoLas 193 激光剥蚀系统和 X Series Ⅱ型等离子体质谱仪, 束斑直径为 32 μm, 频率为 8 Hz, 能量密度为 8 J/cm^2。锆石标样 91500 作为外标校正样, Plešovice 为监控标样, NIST610 为微量元素含量外标。

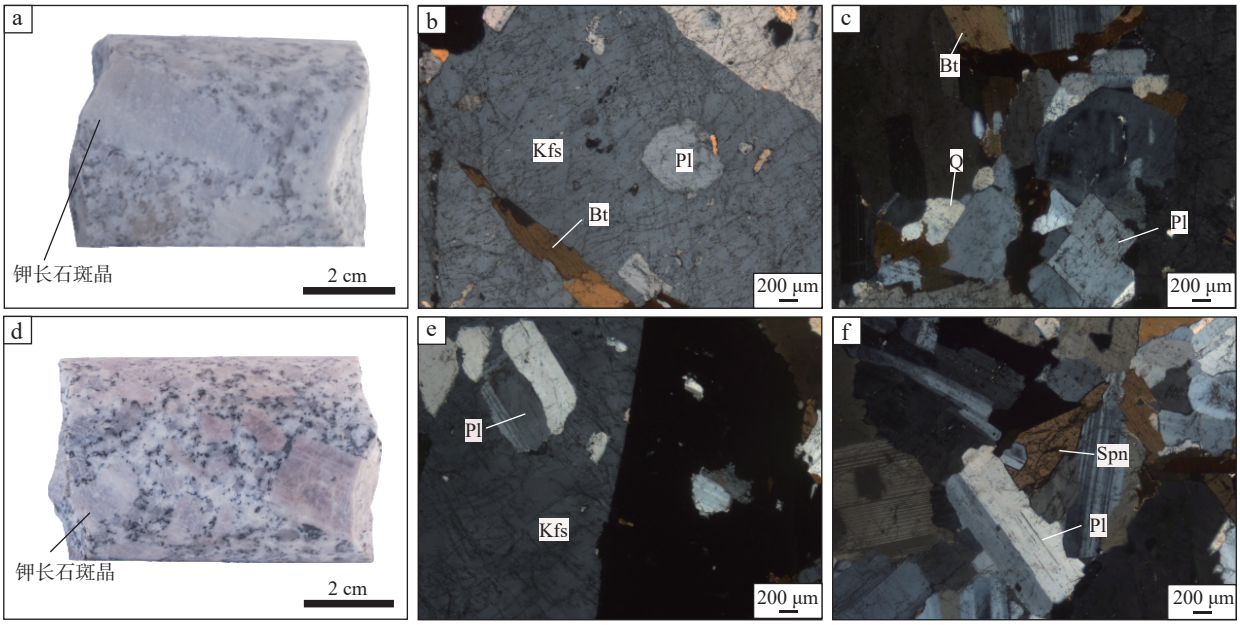
锆石 Hf 同位素测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。采用 Coherent GeoLasPro 193 nm 激光器和 Nu Plasma Ⅱ型 MC-ICP-MS, 束斑直径为 44 μm、能量密度为 10 J/cm^2、频率为 10 Hz。以 He 为载气, 并加入少量 N_2 以提高灵敏度。使用锆石标样 Mud Tank 和 Qinghu 作为参考物质。所有分析点位均与 U-Pb 定年测试位置一致或接近。

样品的主微量元素分析在成都南达微构质检技术服务有限公司完成。主量元素由 Rigaku 公司的 ZSX Primus III+波长色散 X 射线荧光光谱仪测定。使用理论 α 系数校正元素间的吸收–增强效应, 根据荧光强度计算主、次成分含量。微量和稀土元素含量采用 PerkinElmer 公司的 NexION 1000G 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定, 精度优于±5%。

4　分析结果

4.1　锆石 U-Pb 年龄

翁吉勒花岗岩中的锆石大部分为深灰色或暗色, 自形程度较好, 但岩浆振荡环带不甚清晰(图 4), 这可能与锆石中异常高的 U、Th 含量有关(表 1)。高 U 含量引发的辐射损伤(蜕晶化)显著降低了锆石的 CL 发光强度, 高 U 含量和快速结晶过程共同抑制了规则振荡环带的发育(Nasdala et al., 2003)。灰白色似斑状花岗岩(WJL-3)中锆石 Th、U 含量分别为 416.44×10^{-6}～899.09×10^{-6} 和 890.73×10^{-6}～1 352.74×10^{-6}, Th/U 值为 0.40～0.66, 显示岩浆锆石特征。21 个测点显示加权平均年龄为(13.60±0.90)Ma(MSWD=0.094), 谐和年



a. 灰白色似斑状花岗岩；b. 灰白色似斑状花岗岩中的钾长石巨斑晶；c. 灰白色似斑状花岗岩基质；d. 浅肉红色似斑状花岗岩；e. 浅肉红色似斑状花岗岩中的钾长石巨斑晶；f. 浅肉红色似斑状花岗岩基质；Bt. 黑云母；Kfs. 钾长石；Pl. 斜长石；Q. 石英；Spn. 榍石

图3　翁吉勒花岗岩手标本及镜下照片

Fig. 3　Hand specimen and photomicrographs of the Wengjile granite

龄为(13.61±0.24)Ma(MSWD=0.006)(图 4a、图 4b)。浅肉红色似斑状花岗岩(WJL-4)中锆石 Th、U 含量分别为 373.34×10^{-6}～1 388.77×10^{-6} 和1 004.89×10^{-6}～2 044.60×10^{-6}, Th/U 值为 0.44～0.68, 显示岩浆锆石特征。23 个测点显示加权平均年龄为(13.60±0.23)Ma(MSWD=0.28), 其谐和年龄为(13.60±0.23)Ma(MSWD=0.18)(图 4a、图 4b)。

4.2 锆石微量元素

在岩浆锆石的 LA-ICP-MS 分析中, 常会遇到榍石和磷灰石矿物包裹体的干扰。文中采用 La≤0.1×10^{-6} 和 Ti≤50×10^{-6} 剔除了部分锆石数据(Zou et al., 2019)。灰白色似斑状花岗岩锆石∑REE 值为 255.75×10^{-6}～398.14×10^{-6}, LREE/HREE 值为 0.09～0.14, Eu/Eu*值为 0.23～0.51, Ce/Ce*值为 28.20～133.65, △FMQ 值为 0.33～1.62, logfO_2 值为−18.42～−16.24, 锆石 Ti 温度计算结果为 653～735 ℃; 浅肉红色似斑状花岗岩锆石∑REE 值为 254.66×10^{-6}～511.61×10^{-6}, LREE/HREE 值为 0.09～0.16, Eu/Eu*值为 0.28～0.62, Ce/Ce*值为 66.98～327.71, △FMQ 值为 0.19～2.47, logfO_2 值为−17.80～−14.05, 锆石 Ti 温度计算结果为 594～824 ℃(表 2)。

4.3 锆石 Hf 同位素

对翁吉勒花岗岩进行锆石 Hf 同位素分析, 打点位置与 U-Pb 同位素定年位置重合。灰白色似斑状花岗岩$^{176}Yb/^{177}Hf$ 值为 0.009 432～0.012 897, $^{176}Lu/^{177}Hf$ 值为 0.000 447～0.000 604, $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值为 0.282 585～0.282 668, $\varepsilon_{Hf(t)}$、T_{DM2} 值分别为−6.3～−3.4、1.31～1.49 Ga; 浅肉红色似斑状花岗岩$^{176}Yb/^{177}Hf$ 值为 0.009 672～0.016 626, $^{176}Lu/^{177}Hf$ 值为0.000 462～0.000 729, $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值为 0.282 593～0.282 633, $\varepsilon_{Hf(t)}$值为−6.0～−4.6, 对应的二阶模式年龄 T_{DM2} 值为 1.39～1.48 Ga(表 3)。

4.4 岩石地球化学

翁吉勒灰白色和浅肉红色似斑状花岗岩的主量、微量及稀土元素测试结果(表 4)显示, 岩石均具有较高的 SiO_2(66.74%～70.37%)、Al_2O_3(15.19%～17.78%)、Na_2O(3.47%～4.69%)和K_2O(3.19%～7.00%)含量, MgO(0.38%～0.89%)、P_2O_5(0.09%～0.14%)、TiO_2(0.28%～0.52%)和 TFe_2O_3(1.32%～2.58%)含量低, $Mg^{\#}$值较低(33～42)。在 QAPF 实际矿物分类中, 岩石的似斑状结构和矿物组成将其定为似斑状花岗岩。然而, 在 TAS 图解中(图 5a), 样品主要落入石英二长岩区域, 这主要归因于岩石中大量钾长石巨斑晶(30%～40%)的存在, 这些早期结晶的斑晶显著影响了全岩的 K_2O、Na_2O 和 SiO_2 含量, 使其化学成分偏离标准花岗岩区域。岩石铝饱和指数 A/CNK 值为 0.90～1.04, A/NK 值为 1.28～1.45, 在 A/CNK-A/NK 图解(图 5d)中显示为准铝质特征。K_2O/Na_2O 值为 0.70～2.01, 结合岩石

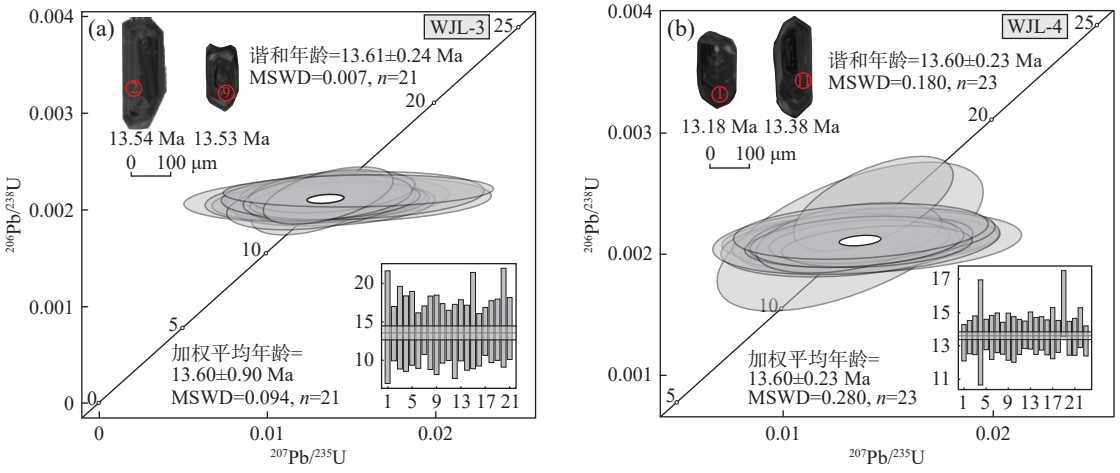


图4 翁吉勒花岗岩锆石 U-Pb 年龄图及代表性锆石 CL 图像

Fig. 4 Zircon U-Pb age diagram and representative zircon CL images of the Wengjile granite

表 1 翁吉勒花岗岩锆石 U-Pb 测年结果

Tab. 1 Summary of zircon U-Pb dating results for the Wengjile granite

样品号	Th(10^{-6})	U(10^{-6})	Th/U	加权平均年龄(Ma, 1σ)
WJL-3(n=21)	416.44～899.09	890.73～1 352.74	0.40～0.66	13.60±0.90
WJL-4(n=23)	373.34～1 388.77	1 004.89～2 044.60	0.44～0.68	13.60±0.23

表 2　翁吉勒花岗岩锆石微量元素(10^{-6})分析结果

Tab. 2　Trace element compositions (10^{-6}) of zircons from the Wengjile granite

岩性	灰白色似斑状花岗岩（21颗锆石）	浅肉红色似斑状花岗岩（23颗锆石）	岩性	灰白色似斑状花岗岩（21颗锆石）	浅肉红色似斑状花岗岩（23颗锆石）
La	0.04～0.08(0.05)	0.01～0.05(0.03)	Tm	9.65～16.41(13.17)	10.45～20.39(15.43)
Ce	23.87～37.22(28.80)	23.25～53.61(36.70)	Yb	110.80～167.26(137.84)	110.17～209.18(157.53)
Pr	0.05～0.25(0.11)	0.02～0.13(0.08)	Lu	25.97～37.04(31.85)	25.79～47.14(37.04)
Nd	0.68～0.99(0.87)	0.51～2.40(1.36)	Ti	1.98～4.89(3.66)	0.90～13.01(4.57)
Sm	1.01～2.23(1.53)	1.69～3.03(2.32)	ΣREE	255.75～398.14(321.06)	254.66～511.61(379.45)
Eu	0.33～0.58(0.44)	0.30～1.29(0.76)	LREE/HREE	0.09～0.14(0.11)	0.09～0.16(0.12)
Gd	6.54～10.77(8.41)	6.30～14.76(10.65)	△FMQ	0.33～1.19(0.96)	0.19～2.47(1.27)
Tb	1.77～3.12(2.44)	1.98～4.52(3.22)	$\log f O_2$	16.87～−16.11(−16.33)	−17.80～−14.05(−16.11)
Dy	19.65～37.07(28.12)	22.03～47.12(34.58)	T_{Ti}(℃)	653～727(695)	594～824(696)
Ho	8.30～14.98(11.71)	9.13～17.94(13.59)	Eu/Eu*	0.23～0.57(0.40)	0.28～0.62(0.46)
Er	41.14～70.88(55.72)	42.98～90.59(66.14)	Ce/Ce*	28.20～133.65(88.64)	66.98～327.71(144.36)

类型判别图(图 5b、图 5c), 进一步判定花岗岩为高钾钙碱性至钾玄岩系列岩石。

翁吉勒花岗岩的稀土元素配分图具有明显的稀土元素分馏特征(图 6a), 轻稀土相对富集, 重稀土相对亏损。岩石稀土总量为 51.15×10^{-6}～603.20×10^{-6}, 平均为 321.17×10^{-6}; 轻重稀土比值(LREE/HREE)为 20.70～84.31, 平均为 43.99; $(La/Yb)_N$ 值为 24.67～276.31, 平均为 115.29; Eu/Eu*值为 0.69～1.06, 具有弱的 Eu 负异常。在原始地幔标准化蛛网图中(图 6), 翁吉勒花岗岩富集大离子亲石元素(如 Rb、U、Sr 元素)和亏损高场强元素(如 Nb、Ta、Ti 元素)。岩石具有高 Sr (773.32×10^{-6}～$1\,437.81\times10^{-6}$)、Sr/Y 值(61.05～460.98), 低 Y(3.12×10^{-6}～18.07×10^{-6})、Yb(0.25×10^{-6}～1.16×10^{-6}), 显示埃达克岩的微量元素特征。

5　讨论

5.1　成岩时代

翁吉勒花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为(13.61±0.24) Ma 和(13.60±0.23)Ma, 与前人在该矿床获得的黑云母二长花岗岩年龄(约 15 Ma; 张德贤等, 2016)比较接近, 进一步确认其侵位时代为中新世。前人对西昆仑–帕米尔造山带中新世花岗岩做过大量的研究, 特别是西段塔什库尔干地区研究程度较高。苦子干岩体的众多锆石 U-Pb 年龄主要为 10～12 Ma(Jiang et al., 2012; 徐晓尹等, 2017; 塔力峰·别地力汗等, 2026)。卡日巴生岩体及岩体北部的锆石 U-Pb 年龄主要为 11.5～12.2 Ma(Jiang et al., 2012; Liu et al., 2024)。木热地里·马合木提等(2024)测得热斯卡木地区二长花岗岩锆

表 3　翁吉勒花岗岩锆石 Hf 同位素分析结果

Tab. 3　Zircon Hf isotopic analysis results of the Wengjile granite

测试点	年龄(Ma)	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	εHf(0)	εHf(t)	TDM1(Ma)	TDM2(Ma)	fLu-Hf
WJL-3-2	13.54	0.009 432	0.000 447	0.282 585	−6.6	−6.3	930	1 493	−0.99
WJL-3-4	13.45	0.011 309	0.000 519	0.282 668	−3.7	−3.4	817	1 308	−0.98
WJL-3-8	13.89	0.012 897	0.000 604	0.282 623	−5.3	−5.0	881	1 408	−0.98
WJL-3-9	13.53	0.011 557	0.000 548	0.282 596	−6.2	−5.9	917	1 469	−0.98
WJL-4-1	13.18	0.009 672	0.000 462	0.282 618	−5.4	−5.2	885	1 420	−0.99
WJL-4-3	13.62	0.016 626	0.000 729	0.282 624	−5.2	−5.0	883	1 408	−0.98
WJL-4-8	13.77	0.013 547	0.000 620	0.282 633	−4.9	−4.6	868	1 387	−0.98
WJL-4-10	13.55	0.012 017	0.000 567	0.282 593	−6.3	−6.0	922	1 476	−0.98

表 4 翁吉勒花岗岩全岩主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果

Tab. 4 Summary table of whole-rock major oxide (%) and trace element (10^{-6}) for the Wengjile granite

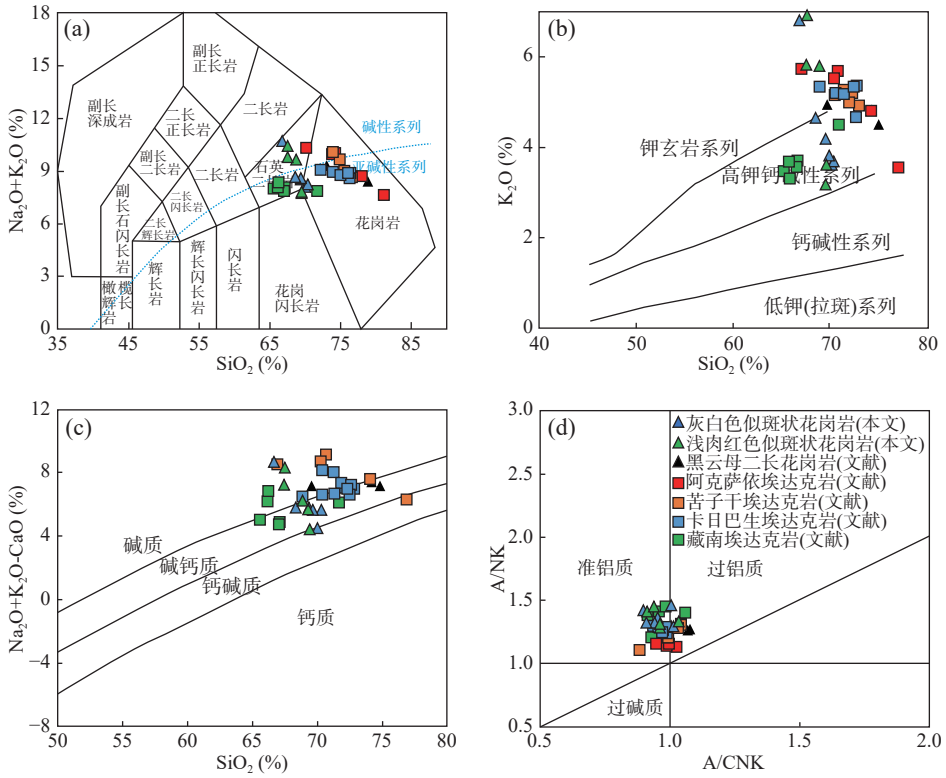
元素	灰白色似斑状花岗岩（6件）	浅肉红色似斑状花岗岩（5件）	元素	灰白色似斑状花岗岩（6件）	浅肉红色似斑状花岗岩（5件）
SiO_2	66.74～70.37(69.12)	67.53～69.50(68.55)	Bi	0.05～0.92(0.29)	0.04～0.10(0.06)
Al_2O_3	15.19～17.78(16.25)	15.42～17.72(16.39)	As	1.03～10.64(5.33)	3.60～9.80(5.12)
TFe_2O_3	1.32～2.35(1.88)	1.43～2.58(2.07)	Rb	43.58～116.46(63.94)	22.94～121.19(74.46)
MgO	0.50～0.77(0.66)	0.38～0.89(0.67)	Ba	1 868.18～3 823.34(2 456.21)	1 856.29～5 865.41(3 722.80)
CaO	1.98～3.51(2.72)	2.06～3.22(2.65)	Th	21.59～48.81(35.59)	25.34～39.60(34.46)
Na_2O	3.92～4.69(4.35)	3.47～4.55(4.02)	U	1.75～3.42(2.30)	1.10～2.75(1.75)
K_2O	3.61～6.80(4.46)	3.19～7.00(5.08)	Ta	0.42～0.61(0.55)	0.31～2.04(1.08)
MnO	0.03～0.05(0.04)	0.03～0.04(0.03)	Nb	5.09～8.30(6.46)	4.14～9.63(7.23)
TiO_2	0.32～0.46(0.40)	0.28～0.52(0.41)	Sr	773.32～1 279.64(1 060.04)	1 086.98～1 437.81(1 230.83)
P_2O_5	0.09～0.13(0.12)	0.10～0.14(0.12)	Zr	141.30～220.85(191.08)	135.45～183.70(163.71)
LOI	0.19～0.66(0.45)	0.07～0.61(0.45)	Hf	3.96～6.02(5.33)	3.84～5.09(4.63)
Total	99.36～99.94(99.60)	99.10～99.71(99.41)	Y	5.09～9.85(7.65)	3.12～18.07(12.71)
Sc	1.71～3.86(2.96)	1.52～2.60(2.00)	La	25.99～198.77(102.58)	14.27～145.39(96.71)
V	20.74～26.57(23.62)	14.97～29.37(24.27)	Ce	57.40～267.57(140.11)	21.05～180.84(130.76)
Cr	8.39～13.87(10.92)	8.12～13.09(10.26)	Pr	8.52～28.07(16.00)	2.50～21.36(15.43)
Co	1.90～2.48(2.44)	1.93～3.84(2.89)	Nd	37.35～91.79(56.05)	9.81～73.70(53.75)
Ni	2.50～5.45(3.47)	2.68～4.35(3.57)	Sm	4.39～8.35(6.01)	1.29～8.74(6.38)
Cu	2.40～8.15(5.25)	2.22～37.57(12.26)	Eu	0.97～1.58(1.31)	0.26～1.61(1.29)
Zn	12.35～65.83(25.12)	14.33～37.31(20.31)	Gd	2.21～3.52(2.81)	0.73～4.53(3.29)
Ga	18.56～21.20(20.06)	19.33～21.21(20.02)	Tb	0.28～0.40(0.31)	0.09～0.58(0.42)
Cs	2.14～2.96(2.57)	2.01～2.39(2.25)	Dy	1.07～1.84(1.42)	0.46～2.94(2.10)
Pb	27.87～63.49(36.06)	21.51～196.98(74.11)	Ho	0.17～0.31(0.24)	0.09～0.53(0.37)
Li	9.20～24.98(17.17)	10.32～22.50(16.70)	Er	0.40～0.96(0.76)	0.28～1.30(0.99)
Be	2.53～4.10(2.96)	1.78～2.91(2.42)	Tm	0.05～0.12(0.09)	0.04～0.20(0.14)
Mo	0.65～1.28(0.94)	0.66～2.32(1.13)	Yb	0.36～0.76(0.56)	0.25～1.16(0.84)
Cd	0.03～0.07(0.04)	0.03～0.12(0.05)	Lu	0.06～0.12(0.09)	0.04～0.15(0.11)
In	0.02～0.09(0.02)	0.02～0.03(0.02)	Sr/Y	97.54～251.55(148.41)	61.05～460.98(157.22)
Sb	0.10～0.77(0.23)	0.06～2.32(0.62)	LREE	135.88～596.13(355.76)	49.18～427.01(304.32)
W	0.35～2.76(1.65)	0.17～1.68(0.53)	HREE	5.17～7.92(6.27)	1.97～11.36(8.28)
Tl	0.67～1.16(0.85)	0.58～1.40(0.91)	T_{Zr}(℃)	748～795(773)	741～769(758)

石 U-Pb 年龄为(12.0±0.3)Ma。

从青藏高原成矿时空格局来看,中新世岩浆活动不仅促成了高原北缘西昆仑翁吉勒、阿克萨依等矽卡岩型铁矿的形成,亦在高原南缘冈底斯带孕育了朱诺、甲玛、岗讲等一系列斑岩–矽卡岩型铜矿床。西昆仑翁吉勒和阿克萨依铁矿床成矿花岗岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 13.6 Ma 和 12.4 Ma(董瑞等, 2021)。西藏朱诺、甲玛和岗讲斑岩型铜矿床成矿岩体的锆石 U-Pb 年龄分别为 14.7、14.9~16.2 Ma 和 16.6 Ma(吴松, 2016; 杨震等; 2017; Sun et al.; 2022)。这些年龄数据表明,青藏高原南北两缘的中新世岩浆活动存在一定的时间差异,印度–欧亚板块碰撞产生的应力由南向北传递存在时间上的延迟。

5.2 岩石成因及源区特征

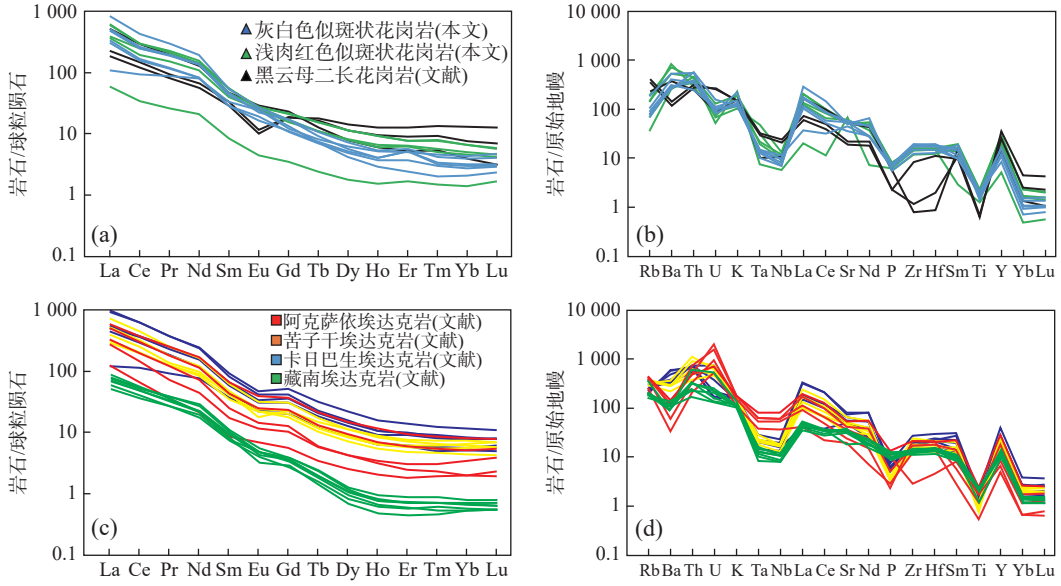
翁吉勒花岗岩主要由石英、斜长石、钾长石、黑云母及少量榍石组成,副矿物中未见富铝矿物(图 3)。根据主量元素(SiO_2、Al_2O_3、K_2O、Na_2O、CaO 等)与 Zr 含量的关系,本文计算出翁吉勒花岗岩的锆石饱和温度为 741～795 ℃(Shao et al., 2020),显著低于典型 A 型花岗岩的平均温度值(850 ℃; King et al., 1997)。在(Zr+Nb+Ce+Y)-(K_2O+Na_2O)/CaO 及10000*Ga/Al-Zr 图解中,翁吉勒花岗岩大部分落入 I 型和 S 型花岗岩区



a. TAS 分类命名图(据 Middlemost et al., 1994)；b. SiO_2-K_2O 图(据 Peccerillo et al., 1976)；c. SiO_2-(Na_2O+K_2O-CaO)图(据 Frost et al., 2001)；d. A/CNK-A/NK 图(据 Chappell et al., 1974)；黑云母二长花岗岩数据引自张德贤等(2016)；阿克萨依埃达克岩引自董瑞等(2021)；苦子干花岗岩引自王亚伟等(2013)；卡日巴生花岗岩引自 Jiang et al.(2012)；藏南埃达克岩引自 Li et al.(2011)

图5　翁吉勒花岗岩的 TAS 分类及岩石类型判别图

Fig. 5　TAS classification and rock type discrimination diagram of the Wengjile granite



黑云母二长花岗岩数据引自张德贤等(2016)；阿克萨依埃达克岩引自董瑞等(2021)；苦子干花岗岩引自王亚伟等(2013)；卡日巴生花岗岩引自 Jiang et al.(2012)；藏南埃达克岩引自 Li et al.(2011)

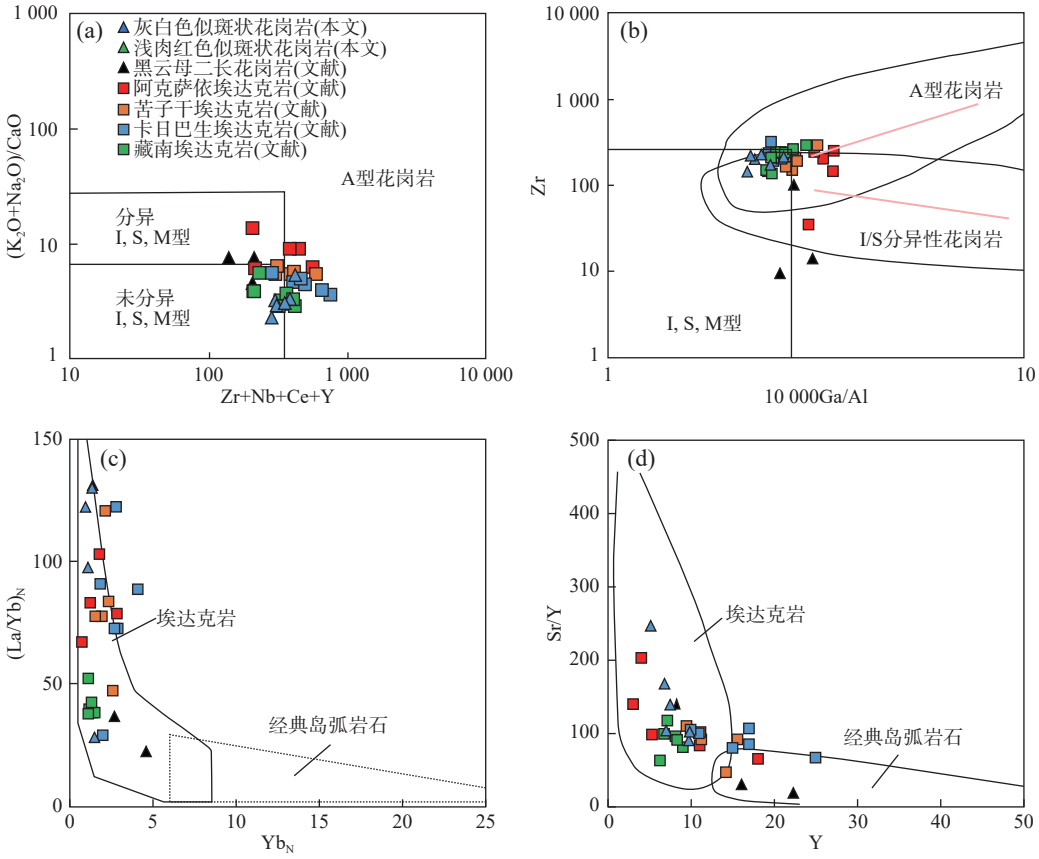
图6　翁吉勒花岗岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式(a、c)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b、d)

Fig. 6　(a, c) Chondrite-normalized rare earth element pattern, and (b, d) primitive mantle-normalized trace element spider diagram of the Wengjile granite

域(图 7a、图 7b),由此排除翁吉勒花岗岩为 A 型花岗岩的可能。典型 S 型花岗岩通常以强过铝质和富磷为显著特征,其 A/CNK 值普遍大于 1.1,P_2O_5 含量多高于 0.2%(Chappell et al., 2001)。然而,翁吉勒花岗岩的 A/CNK 值为 0.90～1.04,P_2O_5 含量为 0.09%～0.14%,均与 S 型花岗岩不符。上述特征表明翁吉勒花岗岩属于 I 型花岗岩。

前人对塔什库尔干地区 I 型花岗岩的研究表明,此类岩石具有埃达克质岩的地球化学亲缘性(Liu et al., 2024)。翁吉勒花岗岩具有较高的 SiO_2(66.74%～70.37%)、Al_2O_3(15.19%～17.78%)和 Sr(773.32×10^{-6}～$1\,437.81\times10^{-6}$)含量,较低的 MgO(0.38%～0.89%)、Y(3.12×10^{-6}～18.07×10^{-6})和 Yb(0.25×10^{-6}～1.16×10^{-6})含量,以及较高的 Sr/Y(61.05～460.98)和 $(La/Yb)_N$ 值(24.67～276.31),Eu 异常不明显,类似于埃达克质岩。在 $(La/Yb)_N$-$(Yb)_N$ 和 Sr/Y-Y 图中(图 7c、图 7d),大部分样品落入埃达克岩范围。

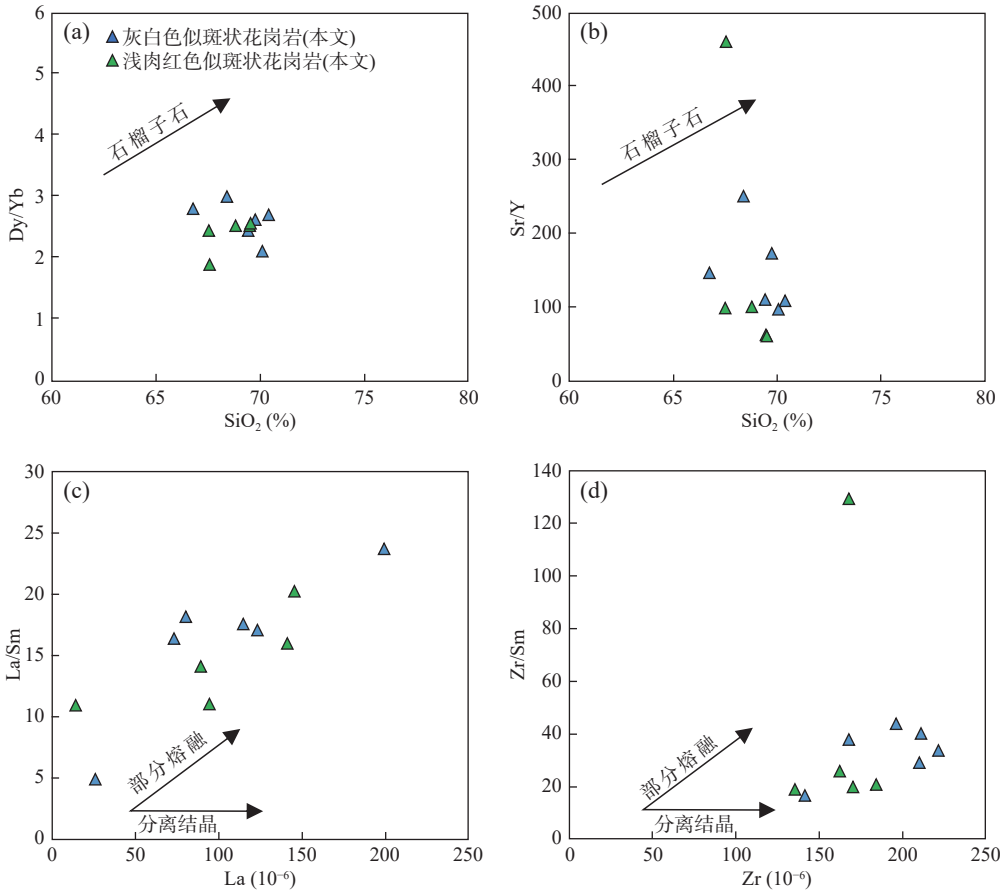
目前普遍认为埃达克质岩石的成因包括弧玄武质岩浆的结晶分异(Castillo, 2012)、岩浆混合作用(Guo et al., 2007)、俯冲洋壳部分熔融(Defant et al., 1990)、拆沉或加厚下地壳部分熔融(Gao et al., 2004)。玄武质岩浆的分离结晶导致岩浆中 SiO_2 含量升高和 Dy/Yb、Sr/Y 值的不断增大(Macpherson et al., 2006)。翁吉勒花岗岩的 Dy/Yb、Sr/Y 值与 SiO_2 含量之间未见显著的相关性(图 8a、图 8b),在 La/Sm-La和 Zr/Sm-Zr 图解中(图 8c、图 8d),翁吉勒花岗岩显示出部分熔融的趋势,与玄武质岩浆分离结晶模型不符。与长英质和玄武质岩浆混合成因的埃达克质岩(通常 MgO 值大于 4.5%,$Mg^{\#}$值大于 66,且 $\varepsilon_{Hf(t)}$变化范围较大;Hawkesworth et al., 2006; Streck et al., 2007)不同,翁吉勒花岗岩具有较低的 MgO 含量(0.38%～0.89%)和 $Mg^{\#}$值(33～42),且 $\varepsilon_{Hf(t)}$值相对集中(图 9),由此排除



黑云母二长花岗岩数据引自张德贤等(2016);阿克萨依埃达克岩引自董瑞等(2021);苦子干花岗岩引自王亚伟等(2013);卡日巴生花岗岩引自 Jiang et al.(2012);藏南埃达克岩引自 Li et al.(2011)

图7 翁吉勒花岗岩(Zr+Nb+Ce+Y)-(K_2O+Na_2O)/CaO 图(a;据 Whalen et al., 1987);10 000Ga/Al-Zr 图(b;据吴福元等,2017);$(Yb)_N$-$(La/Yb)_N$ 图(c;据 Defant et al., 1990);Y-Sr/Y 图(d;据 Martin, 1999)

Fig. 7 (a) (Zr+Nb+Ce+Y) vs. (K_2O+Na_2O)/CaO, (b) 10 000×Ga/Al vs. Zr, (c) $(Yb)_N$ vs. $(La/Yb)_N$, (d) Y vs. Sr/Y discrimination diagrams for the Wengjile granite



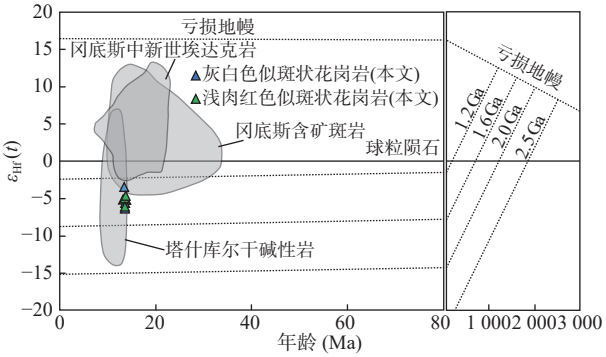
a. Dy/Yb-SiO_2 图；b. Sr/Y-SiO_2 图；c. La/Sm-La 图(据董瑞等, 2021)；d. Zr/Sm-Zr 图(据 Wu et al., 2016)

图8　翁吉勒花岗岩主微量元素协变图

Fig. 8　Major and trace element variation diagrams for the Wengjile granite

了岩浆混合成因。

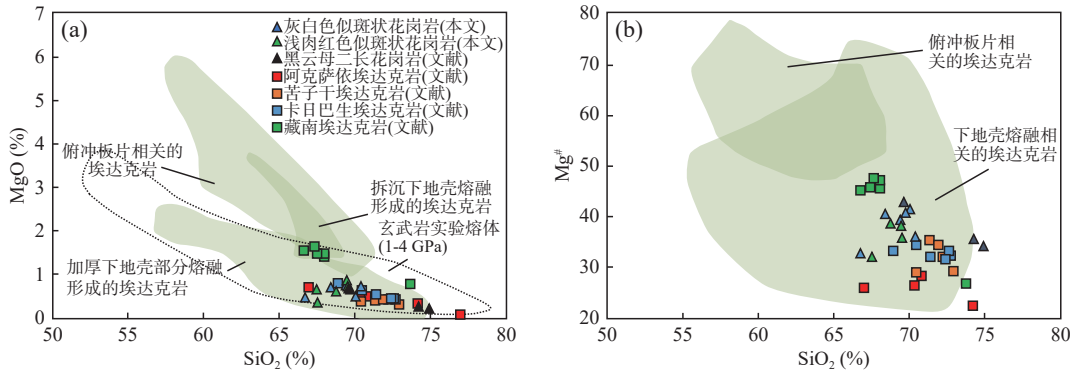
俯冲洋壳部分熔融的岩浆会与上覆地幔楔发生交代作用, 从而具有较高的 MgO 含量(Wang et al., 2006), K_2O/Na_2O 值通常≤0.4(Defant et al., 1990)。翁吉勒花岗岩具有较低的 MgO(0.38%～0.89%)和高的 K_2O/Na_2O 值(0.70～2.01), 明显不同于俯冲洋壳部分熔融形成的埃达克质岩。由于受到幔源物质的影响, 拆成下地壳成因的埃达克质岩具有较高的 $Mg^{\#}$、Cr 和 Ni 含量(Gao et al., 2004)。翁吉勒花岗岩低的 $Mg^{\#}$(33～42)、Cr(8.12×10^{-6}～13.87×10^{-6})和Ni(2.50×10^{-6}～5.45×10^{-6})特征更符合加厚下地壳部分熔融的埃达克质岩($Mg^{\#}$＜50、Cr＜100×10^{-6}、Ni＜20×10^{-6}; 张旗等, 2001)。在 MgO、$Mg^{\#}$与 SiO_2 关系图解(图 10)中, 前人数据与文中所有样品落入加厚下地壳部分熔融形成的埃达克岩区域, 进一步指示翁吉勒花岗岩成因与加厚下地壳部分熔融有关。翁吉勒花岗岩亏损 HREE, 其 Y/Yb 值为 12.73～15.69(平均为 14.23), $(Ho/Yb)_N$ 值为 1.08～1.39(平均为 1.31), 表明源区存在大量石榴子石(Y/Yb>10; $(Ho/Yb)_N$>1.2; Hu et al., 2014)。岩石具有高 Sr 含量(773.32×10^{-6}～$1\,437.81\times10^{-6}$)及无明



冈底斯含矿斑岩引自侯增谦等, 2012；冈底斯中新世埃达克岩引自陈希节等, 2014、靳胜凯等, 2023；塔什库尔干碱性岩引自王亚伟等, 2013、徐晓尹等, 2017

图9　翁吉勒花岗岩锆石年龄-$\varepsilon Hf(t)$图解

Fig. 9　Zircon U-Pb age vs $\varepsilon Hf(t)$ diagram for the Wengjile granite



a. SiO_2–MgO 图解(据 Wang et al., 2007)；b. SiO_2–$Mg^{\#}$(据 Guan et al., 2012)；黑云母二长花岗岩数据引自张德贤等(2016)；阿克萨依埃达克岩引自董瑞等(2021)；苦子干花岗岩引自王亚伟等(2013)；卡日巴生花岗岩引自 Jiang et al.(2012)；藏南埃达克岩引自 Li et al.(2011)

图10 翁吉勒花岗岩岩成因判别图解

Fig. 10 Discrimination diagram for the genesis of the Wengjile granites

显负 Eu 异常的特征，表明源区残留相中几乎不含斜长石。岩石显著的 Nb、Ta、Ti 及 P 的亏损(图 6)，表明残留相中存在金红石和磷灰石。文中据此推断岩浆源区残留相具有类似榴辉岩的矿物组合。结合翁吉勒花岗岩锆石负 $\varepsilon_{Hf(t)}$值(–6.3～–3.4)和 Hf 同位素二阶段模式年龄(1.31～1.49 Ga)，笔者认为翁吉勒花岗岩是由加厚的中元古代榴辉岩相下地壳部分熔融形成。

值得注意的是，灰白色与浅肉红色似斑状花岗岩中的钾长石斑晶颜色差异显著，暗示其结晶条件不同。但二者成岩年龄一致、全岩微量元素及锆石 Hf 同位素特征相似，属同源岩浆产物。颜色差异主要源于钾长石晶格中 Fe^{3+}含量的不同(Hofmeister et al., 1984)，反应了岩浆房内部局部物理化学条件的不均一性。未来可进一步开展系统性的矿物学精细研究，以定量约束结晶条件，从而为岩石成因提供更精确的解释。

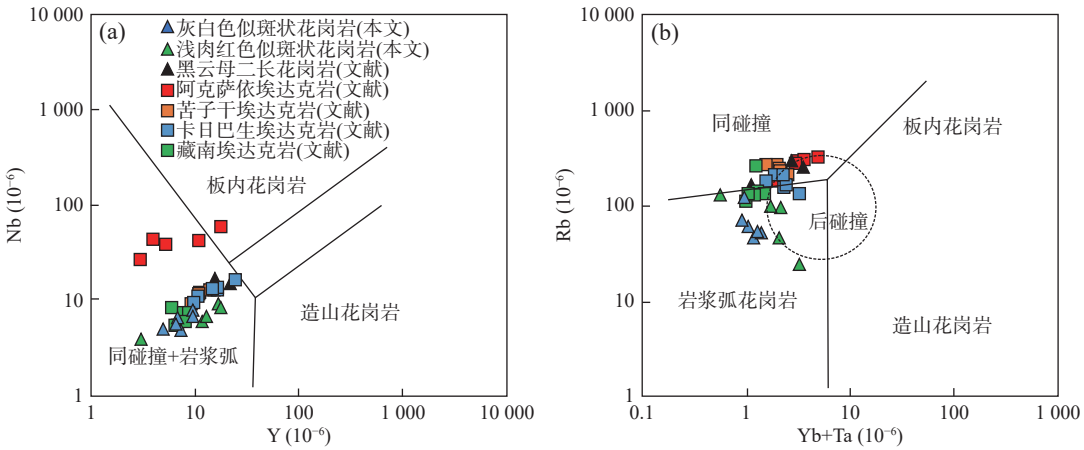
5.3 构造背景

地质年代学与构造地质学研究表明，23～16 Ma 期间，帕米尔地区因印度板片断离而处于短暂的伸展环境，板片断离触发了一系列岩浆作用，导致高原隆升和地壳过度增厚(Kufner et al., 2016; Rutte et al., 2017)。至～12 Ma，由于印度–欧亚板块的持续挤压，喀喇昆仑断裂由转换挤压带转变为转换伸展带，在走滑过程中伴随产生一系列大规模正断裂和拉分盆地，标志着伸展构造体制的建立(徐晓尹等, 2017)，这与翁吉勒花岗岩的成岩时代(～13.6 Ma)基本吻合。微量元素构造环境判别图解(图 11a、图 11b)显示，翁吉勒花岗岩以及前人报道的同时代埃达克质花岗岩投点于同碰撞+岩浆弧以及后碰撞环境。结合区域岩浆岩研究成果，塔什库尔干地区中新世埃达克质岩形成于后碰撞伸展构造背景已得到普遍共识(王亚伟等, 2013; Liu et al., 2024)。因此，翁吉勒花岗岩应是后碰撞伸展体制下岩浆活动的产物。

后碰撞背景下的埃达克质岩浆通常归因于岩石圈拆沉(Rey et al., 2001)或板片断离作用(Huw Davies et al., 1995)。由于新特提斯俯冲板片已于始新世发生断离并沉入地幔(Zhang et al., 2021)，且帕米尔中下地壳存在显著低速异常，可能指示局部拆沉和热物质上涌(Mechie et al., 2012; Sippl et al., 2013)。笔者认为中新世印度板块的持续向北俯冲导致帕米尔地区地壳加厚并榴辉岩化，进而诱发局部岩石圈拆沉。拆沉作用促使热软流圈物质上涌，为加厚古老榴辉岩相下地壳的部分熔融提供了热源。

5.4 成矿意义

西昆仑–帕米尔地区经历了多期次、多类型的复杂构造岩浆事件，为成矿元素的活化、迁移和富集创造了优越的地质条件(张传林等, 2019)。印度–欧亚板块碰撞后阶段，帕米尔地区地壳持续加厚，引发岩石圈地幔局部拆沉(王亚伟等, 2013; Liu et al., 2024)。拆沉作用促使热的软流圈物质上涌，为加厚古老下地壳的部分熔融提供了热源，从而形成了大范围的埃达克质岩。采用 Loucks et al.(2020)提出的氧逸度计算公式，估算翁吉勒花岗岩相对氧逸度 ΔFMQ 值为 0.19～2.47，样品大部分投点于 FMQ 氧逸度缓冲线之上(图 12a)，与冈底斯矽卡岩型铁矿床的相对氧逸度(ΔFMQ 值为 0～2)基本一致(程逸飞, 2021)。翁吉勒



a. Nb-Y 图(据 Pearce et al., 1984)；b. Rb-(Yb+Ta)图(据 Pearce et al., 1984)；黑云母二长花岗岩数据引自张德贤等(2016)；阿克萨依埃达克岩引自董瑞等(2021)；苦子干花岗岩引自王亚伟等(2013)；卡日巴生花岗岩引自 Jiang et al.(2012)；藏南埃达克岩引自 Li et al.(2011)

图11　翁吉勒花岗岩构造环境判别图

Fig. 11　Discrimination diagram for the tectonic setting of the Wengjile granites

花岗岩中锆石 Ce/Sm 与 Yb/Gd 的正相关关系指示其岩浆演化过程中经历了角闪石的分离结晶(图 12b)。岩石中普遍发育黑云母等原生含水矿物，进一步指示翁吉勒花岗岩源自高氧逸度富水岩浆。

对于矽卡岩型铁矿来说，高氧逸度可以提高熔体中的铁含量(Zhang et al., 2021)，含水量高能促进含矿流体和挥发分在较低压力条件下出溶(Cline, 1995)。在全球范围内，高氧逸度和富水的岩浆性质同样被视为斑岩铜矿成矿的有利条件(Richards, 2009; 侯增谦等, 2012)。然而，翁吉勒却形成了矽卡岩型铁矿床，而非斑岩铜矿，这可能与成矿岩浆源区性质有关。翁吉勒铁矿成矿岩体的锆石 $\varepsilon_{Hf(t)}$值为−6.3～−3.4，指示岩浆主要源自古老下地壳物质的重熔。同时期的冈底斯带则发育以铜为主的斑岩–矽卡岩型矿床，其中驱龙矿区中新世侵入岩的锆石 $\varepsilon_{Hf(t)}$值为 7～9(李秋耘等, 2021)，甲玛矿区含矿斑岩的锆石 $\varepsilon_{Hf(t)}$值为 1.4～4.9(邹兵等, 2019)，二者成矿岩浆主要源于新生下地壳的重熔。研究表明，全球下地壳(包括新生下地壳和古老下地壳)以基性麻粒岩为主体(Rudnick et al., 2003)。然而，对于铜来说，其富集主要受控于大量年轻幔源或弧岩浆物质，弧岩浆底侵是导致新生下地壳铜富集的重要机制(Oyarzun et al., 2001; Richards, 2009)。因此，与翁吉勒铁矿相比，冈底斯斑岩铜矿的岩浆源区更富集亲铜元素。但鉴于翁吉勒花岗岩具备高氧逸度和富水岩浆这两个关键铜成矿要素，其深部可能存在不同性质的岩浆房或成矿空间，仍具有一定的斑岩型铜矿化潜力。

从西昆仑地区现有勘查成果来看，与中新世埃达克质岩有关的矿床目前仅见翁吉勒和阿克萨依矽卡岩型铁矿床，尚未有斑岩铜矿的报道。翁吉勒花岗岩

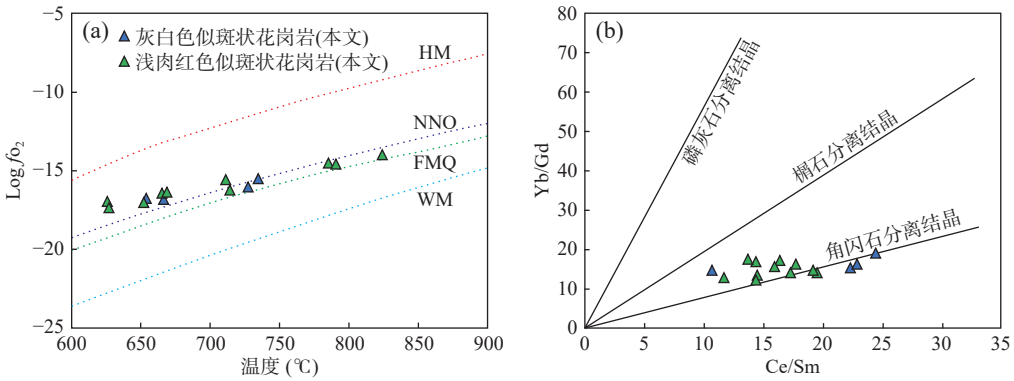


图12　翁吉勒花岗岩 LogfO_2-温度(T/℃)图解(a; 据 Trail et al., 2011)、锆石 Yb/Gd-Ce/Sm 图解(b; 据 Xie et al., 2018)

Fig. 12　(a) Log fO_2 vs. temperature (T/°C) diagram, and (b) zircon Yb/Gd vs. Ce/Sm diagram for the Wengjile granites

为加厚古老下地壳部分熔融的产物。阿克萨依花岗岩前人虽解释为富集地幔来源并经历了地壳混染(董瑞等, 2021), 但该认识值得商榷。阿克萨依锆石 $\varepsilon_{Hf(t)}$ 值为−7.8～+1.7(仅 1 颗锆石为正值), 对应的 Hf 同位素二阶段模式年龄为 0.98～1.59 Ga(董瑞等, 2021), 与翁吉勒花岗岩($\varepsilon_{Hf(t)}$值为−6.3～−3.4, T_{DM2} 值为 1.31～1.49 Ga)高度一致, 指示二者的源区可能均以中元古代古老下地壳物质为主。由此可见, 西昆仑地区广泛分布的埃达克质岩成因与古老下地壳密切相关, 且具有形成铁矿的找矿潜力, 同时岩浆岩的氧逸度与含水量可作为后续勘查的关键评价指标。

6 结论

(1)翁吉勒铁矿灰白色似斑状花岗岩和浅肉红色似斑状花岗岩锆石 U-Pb 年龄分别为(13.61±0.24)Ma 和(13.60±0.23)Ma, 属于中新世岩浆活动的产物。

(2)翁吉勒似斑状花岗岩具有典型埃达克质岩的特征, 锆石 $\varepsilon_{Hf(t)}$值为−7.6～−3.4, Hf 同位素二阶段模式年龄为 1.31～1.57 Ga, 表明岩浆源区主要为古老下地壳。

(3)中新世印度板块持续向北俯冲, 帕米尔地区因地壳加厚导致岩石圈地幔重力不稳, 局部发生岩石圈拆沉, 进而引发热的软流圈物质上涌, 加厚的古老下地壳发生熔融, 最终形成了翁吉勒中新世埃达克质岩浆。岩浆源区、较高氧逸度及富水岩浆是控制翁吉勒铁矿成矿的关键因素。塔什库尔干地区广泛发育埃达克质岩, 具有良好的铁矿找矿潜力。

致谢: 野外调查工作得到了塔什库尔干县翁吉勒铁矿有限责任公司的大力协助, 表示诚挚感谢。

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):

蔡志慧, 何碧竹, 刘若涵. 新疆塔什库尔干温泉地区花岗岩体侵入与新生代构造变形: 对东北帕米尔中新世构造演化的启示[J]. 岩石学报, 2020, 36(10): 3137−3151.

CAI Zhihui, HE Bizhu, LIU Ruohan. Emplacement of granitic pluton and Cenozoic deformation in the Wenquan region, Tashkorgan, Xinjiang: The implications for the Miocene tectonic evolution of the Northeast Pamir[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(10): 3137−3151.

陈希节, 许志琴, 孟元库, 等. 冈底斯带中段中新世埃达克质岩浆作用的年代学、地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 2014, 30(8): 2253−2268.

CHEN Xijie, XU Zhiqin, MENG Yuanku, et al. Petrogenesis of Miocene adakitic diorite-porphyrite in middle Gangdese batholith, southern Tibet: Constraints from geochemistry, geochronology and Sr-Nd-Hf isotopes[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(8): 2253−2268.

程逸飞. 冈底斯斑岩型铜矿与矽卡岩型铁矿床成矿岩体锆石成分特征及地质意义 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2021.

CHENG Yifei. Characteristics and geological significance of zircon compositions of metallogenetic rock from porphyry copper and skarn iron deposits in the Gangdese[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.

董瑞, 王核, 闫庆贺. 西昆仑阿克萨依铁矿二长花岗岩岩石成因及动力学背景: 年代学、地球化学及 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素约束[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(2): 370−388.

DONG Rui, WANG He, YAN Qinghe. Petrogenesis and Geodynamic Setting of Akesayi Cenozoic Monzogranite in West Kunlun: Constraints from Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopes[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021, 45(2): 370−388.

侯增谦, 郑远川, 杨志明, 等. 大陆碰撞成矿作用: Ⅰ. 冈底斯新生代斑岩成矿系统[J]. 矿床地质, 2012, 31(4): 647−670.

HOU Zengqian, ZHENG Yuanchuan, YANG Zhiming, et al. Metallogenesis of continental collision setting: Part Ⅰ. Gangdese Cenozoic porphyry Cu-Mo systems in Tibet[J]. Mineral Deposits, 2012, 31(4): 647−670.

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. Genesis of Neoproterozoic granitic rocks in the Qiemo-Ruoqiang area of Altyn Tagh and their constraints on the assembly time of Rodinia supercontinent[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(11): 1909−1923.

柯珊, 莫宣学, 罗照华, 等. 塔什库尔干新生代碱性杂岩的地球化学特征及岩石成因[J]. 岩石学报, 2006, 22(4): 905−915.

KE Shan, MO Xuanxue, LUO Zhaohua, et al. Petrogenesis and geochemistry of Cenozoic Taxkorgan alkalic complex and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(4): 905−915.

李秋耘, 杨志明, 王瑞, 等. 西藏驱龙矿区中新世侵入岩锆石微量和 Hf-O 同位素研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2021, 40(6): 1023−1048.

LI Qiuyun, YANG Zhiming, WANG Rui, et al. Zircon trace elemental and Hf-O isotopic compositions of the Miocene magmatic suite in the giant Qulong porphyry copper deposit, southern Tibet[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2021, 40(6): 1023−1048.

李印, 凌明星, 丁兴, 等. 中国东部埃达克岩及成矿作用[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(3): 448−464.

LI Yin, LING Mingxing, DING Xing, et al. Adakites or Adakitic Rocks and Associated Metallogenesis in Eastern China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(3): 448−464.

林清茶, 夏斌, 张玉泉. 西昆仑-喀喇昆仑地区钾质碱性岩 Ar-Ar 年龄——以羊湖、昝坎和苦子干岩体为例[J]. 矿物岩石, 2006, 26(2): 66−70.

LIN Qingcha, XIA Bin, ZHANG Yuquan. Ar-Ar Dating of Potassic Alkali-rocks in the WEstern Kunlun-Kalakorum Mountains[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2006, 26(2): 66−70.

木热地里·马合木提, 刘晓强, 张传林, 等. 南东帕米尔热斯卡木地区中新世高锶低钇花岗岩: 对新生代构造演化的制约[J]. 地质论评, 2024, 70(4): 1242−1266.

Muradili Mahemuti, LIU Xiaoqiang, ZHANG Chuanlin, et al. The Miocene adakitic rocks in the Reskam area, SE Pamir: Implications for the Cenozoic tectonic evolution[J]. Geological Review, 2024, 70(4): 1242−1266.

塔力峰·别地力汗, 王翠翠, 杨佐怀, 等. 中帕米尔苦子干地区中新世埃达克质花岗岩与加厚地壳熔融[J]. 地质科学, 2026, 61(2): 382−401.

Talifeng·Biedilihan, WANG Cuicui, YANG Zuohuai, et al. Miocene adakitic granites in central Pamir's Kuzigan region: Melting of thickened continental crust[J]. Chinese Journal of Geology, 2026, 61(2): 382−401.

汪玉珍, 方锡廉. 西昆仑山、喀喇昆仑山花岗岩类时空分布规律的初步探讨[J]. 新疆地质, 1987, 5(1): 9−24.

WANG Yuzhen, FANG Xilian. Preliminary Study on Granite Distribution of Time and Space in West Kunlun-Karakorum Mountains of Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 1987, 5(1): 9−24.

王建平. 西昆仑塔什库尔干混杂岩地质特征及其大地构造意义[D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2008.

WANG Jianping. Geological features and Tectonic significance of melange zone in West Kunlun Taxkorgan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2008.

王亚伟, 廖小莹, 刘良, 等. 西昆仑塔什库尔干苦子干碱性杂岩体的成因及其构造意义[J]. 西北地质, 2013, 46(4): 1−24.

WANG Yawei, LIAO Xiaoying, LIU Liang, et al. Petrogenesis and Tectonic Implications of the Cenozoic Alkaline Complex in Kuzigan, Taxkorgan, West Kunlun[J]. Northwestern Geology, 2013, 46(4): 1−24.

魏小鹏. 西昆仑造山带三叠纪花岗岩类时空分布、岩石成因及其构造背景 [D]. 广州: 中国科学院大学 (中国科学院广州地球化学研究所), 2018.

WEI Xiaopeng. Spatial-temporal Pattern, Petrogenesis and Tectonic Implications of the Triassic Granitoids from the Western Kunlun Orogen, Northwestern China[D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences), 2018.

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

WU Fuyuan, LIU Xiaochi, JI Weiqiang, et al. Highly fractionated granites: Recognition and research[J]. Science China: Earth Sciences, 2017, 60: 1201−1219.

吴松. 西藏冈底斯朱诺超大型斑岩铜矿床: 岩浆与成矿 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2016.

WU Song. The super-large Zhunuo porphyry Cu deposit in the Gangdese belt, southern Tibet: magmatism and mineralization[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.

新疆地矿局第二地质大队. 1∶2000 新疆塔什库尔干县翁吉勒铁矿Ⅰ、Ⅱ号矿体地形地质图 [R]. 喀什: 新疆地矿局第二地质大队, 2006.

徐晓尹, 蔡志慧, 许志琴, 等. 东北帕米尔塔什库尔干中新世高钾碱性岩的成因机制与大地构造意义[J]. 地质论评, 2017, 63(3): 616−629.

XU Xiaoyin, CAI Zhihui, XU Zhiqin, et al. The Miocene High-K Alkaline Rocks in Tashkorgan Region, Northeastern Pamir: Formation Mechanism and Tectonic Implications[J]. Geological Review, 2017, 63(3): 616−629.

杨震, 姜华, 杨明国, 等. 冈底斯中段岗讲斑岩铜钼矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年代学及其地质意义[J]. 地球科学, 2017, 42(3): 339−356.

YANG Zhen, JIANG Hua, YANG Mingguo, et al. Zircon U-Pb and Molybdenite Re-Os Dating of the Gangjiang Porphyry Cu-Mo Deposit in Central Gangdese and Its Geological Significance[J]. Earth Science, 2017, 42(3): 339−356.

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.

张德贤, 曹汇, 曾敏, 等. 新疆“帕米尔式”铁矿床成因与成矿背景分析[J]. 岩石学报, 2016, 32(12): 3847−3864.

ZHANG Dexian, CAO Hui, ZENG Min, et al. Study on metallogenic genesis and metallogenic settings of Xinjiang "Pamir-type" iron deposit[J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(12): 3847−3864.

张旗, 王焰, 钱青, 等. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. 岩石学报, 2001, 17(2): 236−244.

ZHANG Qi, WANG Yan, QIAN Qing, et al. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan

period from eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(2): 236−244.

邹兵, 林彬, 郑文宝, 等. 西藏甲玛矿床南坑矿段蚀变、矿化及含矿斑岩年代学[J]. 岩石学报, 2019, 35(3): 953−967.

ZOU Bing, LIN Bin, ZHENG Wenbao, et al. The characteristics of alteration and mineralization and geochronology of ore-bearing porphyry in south pit of Jiama copper-polymetallic deposit, Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(3): 953−967.

Amidon W H, Hynek S A. Exhumational history of the north central Pamir[J]. Tectonics, 2010, 29(5): TC5017.

Brunel M, Arnaud N, Tapponnier P, et al. Kongur Shan normal fault: Type example of mountain building assisted by extension (Karakoram fault, eastern Pamir)[J]. Geology, 1994, 22(8): 707−710.

Burtman V S. Cenozoic crustal shortening between the Pamir and Tien Shan and a reconstruction of the Pamir-Tien Shan transition zone for the Cretaceous and Palaeogene[J]. Tectonophysics, 2000, 319(2): 69−92.

Castillo P R. Adakite petrogenesis[J]. Lithos, 2012, 134−135: 304−316.

Chappell B W, White A J R. Two contrasting granite types[J]. Pacific Geology, 1974, 8: 173−174.

Chappell B W, White A J R. Two contrasting granite types: 25 years later[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2001, 48(4): 489−499.

Cline J S. Genesis of porphyry copper deposits: The behavior of water, chloride, and copper in crystallizing melts[J]. Arizona Geological Society Digest, 1995, 20: 69−82.

Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. Nature, 1990, 347(6294): 662−665.

Dong R, Wang H, Yan Q H, et al. Geochronology and skarn mineralogy of the Akesayi Fe deposit in the Western Kunlun, Xinjiang: Implications for mineralization process[J]. Ore Geology Reviews, 2023, 156: 105392.

Frost B R, Barnes C G, Collins W J, et al. A geochemical classification for granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 2001, 42(11): 2033−2048.

Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China Craton[J]. Nature, 2004, 432: 892−897.

Guan Q, Zhu D C, Zhao Z D, et al. Crustal thickening prior to 38 Ma in southern Tibet: Evidence from lower crust-derived adakitic magmatism in the Gangdese Batholith[J]. Gondwana Research, 2012, 21(1): 88−99.

Guo Z F, Wilson M, Liu J Q. Post-collisional adakites in south Tibet: Products of partial melting of subduction-modified lower crust[J]. Lithos, 2007, 96(1−2): 205−224.

Hawkesworth C J, Kemp A I S. Using hafnium and oxygen isotopes in zircons to unravel the record of crustal evolution[J]. Chemical Geology, 2006, 226(3−4): 144−162.

Hofmeister A M, Rossman G R. Determination of Fe^{3+} and Fe^{2+} concentrations in feldspar by optical absorption and EPR spectroscopy[J]. Physics and Chemistry of Minerals, 1984, 11(5): 213−224.

Hu Z L, Yang X Y, Duan L A, et al. Geochronological and geochemical constraints on genesis of the adakitic rocks in Outang, South Tan-Lu Fault Belt (Northeastern Yangtze Block)[J]. Tectonophysics, 2014, 626: 86−104.

Huw Davies J, von Blanckenburg F. Slab breakoff: A model of lithosphere detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1995, 129(1−4): 85−102.

Jiang Y H, Liu Z, Jia R Y, et al. Miocene potassic granite–syenite association in western Tibetan Plateau: Implications for shoshonitic and high Ba–Sr granite genesis[J]. Lithos, 2012, 134−135: 146−162.

King P L, White A J R, Chappell B W, et al. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia[J]. Journal of Petrology, 1997, 38: 371−391.

Kufner S K, Schurr B, Sippl C, et al. Deep India meets deep Asia: Lithospheric indentation, delamination and break-off under Pamir and Hindu Kush (Central Asia)[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2016, 435: 171−184.

Li J X, Qin K Z, Li G M, et al. Post-collisional ore-bearing adakitic porphyries from Gangdese porphyry copper belt, southern Tibet: Melting of thickened juvenile arc lower crust[J]. Lithos, 2011, 126(3−4): 265−277.

Liu X Q, Zhang C L, Hao X S, et al. Early Cretaceous granitoids in the Southern Pamir: Implications for the Meso-Tethys evolution of the Pamir plateau[J]. Lithos, 2020, 362: 105492.

Liu X Q, Ma H D, Sargazi M, et al. Miocene adakitic monzogranites in the Northeast Pamir: Evidence for post India-Eurasia collisional evolution[J]. Lithos, 2024, 486−487: 107775.

Loucks R R, Fiorentini M L, Henríquez G J, et al. New magmatic oxybarometer using trace elements in zircon[J]. Journal of Petrology, 2020, 61(3): egaa034.

Macpherson C G, Dreher S T, Thirlwall M F. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 243(3−4): 581−593.

Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids[J]. Lithos, 1999, 46(3): 411−429.

Mechie J, Yuan X, Schurr B, et al. Crustal and uppermost mantle velocity structure along a profile across the Pamir and southern

Tien Shan as derived from project TIPAGE wide-angle seismic data[J]. Geophysical Journal International, 2012, 188(2): 385−407.

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

Nasdala L, Zhang M, Kempe U, et al. Spectroscopic methods applied to zircon[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53(1): 427−467.

Oyarzun R, Márquez A, Lillo J, et al. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: adakitic versus normal calcalkaline magmatism[J]. Mineralium Deposita, 2001, 36: 794−798.

Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25(4): 956−983.

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

Rey P, Vanderhaeghe O, Teyssier C. Gravitational collapse of the continental crust: Definition, regimes and modes[J]. Tectonophysics, 2001, 342(3−4): 435−449.

Richards J P. Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction-modified lithosphere[J]. Geology, 2009, 37: 247−250.

Robinson A C, Yin A, Manning C E, et al. Cenozoic evolution of the eastern Pamir: Implications for strain-accommodation mechanisms at the western end of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. GSA Bulletin, 2007, 119(7−8): 882−896.

Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust[A].In: Rudnick R L (Eds.). Treatise on Geochemistry, Volume 3: The Crust[M]. Oxford: Elsevier-Pergamon, 2003: 1−64.

Rutte D, Ratschbacher L, Khan J, et al. Building the Pamir-Tibetan Plateau: Crustal stacking, extensional collapse, and lateral extrusion in the Central Pamir: 2. Timing and rates[J]. Tectonics, 2017, 36(3): 385−419.

Şengör A M C. The Palaeo-Tethyan suture: A line of demarcation between two fundamentally different architectural styles in the structure of Asia[J]. Island Arc, 1992, 1(1): 78−91.

Shao T, Xia Y, Ding X, et al. Zircon saturation model in silicate melts: A review and update[J]. Acta Geochimica, 2020, 39(3): 387−403.

Sippl C, Schurr B, Tympel J, et al. Deep burial of Asian continental crust beneath the Pamir imaged with local earthquake tomography[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2013, 384: 165−177.

Streck M J, Leeman W P, Chesley J. High-magnesian andesite from Mount Shasta: A product of magma mixing and contamination, not a primitive mantle melt[J]. Geology, 2007, 35(4): 351−354.

Sun F, Zhang J B, Wang R, et al. Magmatic evolution and formation of the giant Jiama porphyry-skarn deposit in southern Tibet[J]. Ore Geology Reviews, 2022, 145: 104889.

Trail D, Watson E B, Tailby N D. The oxidation state of Hadean magmas and implications for early Earth's atmosphere[J]. Nature, 2011, 480: 79−82.

Wang Q, Xu J F, Jian P, et al. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, south China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization[J]. Journal of Petrology, 2006, 47(1): 119−144.

Wang Q, Wyman D A, Zhao Z, et al. Petrogenesis of Carboniferous adakites and Nb-enriched arc basalts in the Alataw area, northern Tianshan Range (western China): Implications for Phanerozoic crustal growth in the Central Asia orogenic belt[J]. Chemical Geology, 2007, 236(1−2): 42−64.

Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discriminations and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95: 407−419.

Wu H, Xie C M, Li C, et al. Tectonic shortening and crustal thickening in subduction zones: Evidence from Middle-Late Jurassic magmatism in southern Qiangtang, China[J]. Gondwana Research, 2016, 39: 1−13.

Xie F W, Tang J X, Chen Y C, et al. Apatite and zircon geochemistry of Jurassic porphyries in the Xiongcun district, southern Gangdese porphyry copper belt: Implications for petrogenesis and mineralization[J]. Ore Geology Reviews, 2018, 96: 98−114.

Zhang Z M, Ding H X, Dong X, et al. The Mesozoic magmatic, metamorphic, and tectonic evolution of the eastern Gangdese magmatic arc, southern Tibet[J]. GSA Bulletin, 2021, 134(7−8): 1721−1740.

Zou X Y, Jiang J L, Qin K Z, et al. Insight into zircon REE oxy-barometers: A lattice strain model perspective[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2019, 506: 87−96.