

虎峪沟长城系底部富硅火山岩、火山碎屑岩及其中富铁钛熔体包裹体的发现

孙嘉婧, 谢玉玲, 于超, 曲云伟, 夏加明

(北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要: 元古宙是地球演化的关键时期, 对该时期岩石记录的研究为理解前寒武纪地球演化提供了重要依据。对岩石成因的正确解读是岩石大地构造研究的基础, 也是基于岩石记录揭示地球环境变化的前提。华北克拉通长城系底部普遍发育一套富硅的层状岩石, 被认为是一套由裂谷沉积形成的海相石英砂岩和硅质岩浅变质而成。本文以北京昌平虎峪沟出露的长城系底部常州沟组富硅层状岩石为研究对象, 通过详细的野外地质观察, 典型样品的岩矿相、SEM/EDS(扫描电镜/X射线能谱)分析、CL(显微阴极发光)成像分析、石英原位 LA-ICP-MS(电感耦合等离子质谱)分析以及石英中熔体包裹体的岩相学、显微测温、马弗炉加温-淬火实验和包裹体成分的 SEM/EDS、EPMA(电子探针)、LRM(显微激光拉曼光谱)分析等, 提出了长城系底部富硅层状岩石的火山成因新认识。研究表明, 长城系底部富硅层状岩石包括碎屑结构(前人定义的石英砂岩)和镶嵌结构(前人定义的石英岩)两类, 其矿物组成主要为石英和钾长石, 另外还含有少量锆石、金红石等。碎屑结构岩石中石英、钾长石碎屑可见棱角-次棱角状, 且钾长石未见黏土化的边缘。两类岩石中石英的 CL 多显示蓝紫色的发光特征。另外, 据石英钛饱和温度计估算的形成温度集中在 550~650°C 之间, 也显示了高温石英的特征。两类岩石中的石英和钾长石中均发育有富铁钛的两相熔体包裹体。熔体包裹体显微测温结果表明, 熔体包裹体在加温过程中至 1 000°C 后, 不混溶两相的成分持续变化, 并在 1 050°C 发生颜色深浅的反转, 在约 1 350°C 左右临界均一。马弗炉加温淬火实验也证实, 在加温至 1 350°C 淬火后的样品中的两相熔体包裹体发生了均一。SEM/EDS 和 EPMA 结果表明, 熔体包裹体的主要成分为铁、钛的氧化物, 暗色部分相对富铁, 而浅色部分相对富钛, 熔体包裹体两相的 Fe/Ti 值变化较大。LRM 分析结果表明, 熔体包裹体的两相均为非晶质。综合岩石的结构特征、石英的 CL 发光特征、石英的形成温度估算和石英中熔体包裹体的显微测温结果等, 笔者认为, 长城系底部的富硅层状岩石应为富硅的火山岩和火山碎屑岩, 表明古元古代华北克拉通曾存在与哥伦比亚超大陆裂解有关的大规模富硅火山活动。这一发现为华北克拉通元古宙地质演化提供了新证据。石英中富铁钛熔体包裹体的发现也为解释前寒武纪岩浆成因铁矿床、铁钛矿床的形成, 特别是岩浆过程中铁、钛的富集机理提供了新的思路。

关键词: 华北克拉通; 长城系; 富硅火山岩; 熔体包裹体; 熔体不混溶

中图分类号: P588.14; P588.21⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)05-1235-16

The discovery of siliceous volcanic rocks, volcanoclastic rocks, and iron-titanium-rich melt inclusions at the bottom of the Great Wall System in Huyugou

SUN Jia-jing, XIE Yu-ling, YU Chao, QU Yun-wei and XIA Jia-ming

(Civil and Resource Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The Proterozoic Eon is a critical period of the Earth's evolution, and the study of its rock records in this period is important for understanding the Earth's evolution in the Precambrian. The correct interpretation of rock genesis

收稿日期: 2024-05-30; 接受日期: 2024-08-25; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0601300); 自然科学基金重点项目(41930427)

作者简介: 孙嘉婧(1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向为矿床学, E-mail: 289077389@qq.com; 通讯作者: 谢玉玲(1963-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事矿床学和矿床地球化学研究, E-mail: yulingxie63@hotmail.com。

is the basis of the study of rock geotectonics and the premise of revealing the change of earth environment based on rock records. A set of silicon-rich layered rocks generally developed at the bottom of the Changcheng System in the North China Craton, which is considered to be a set of marine quartz sandstones and siliceous rocks formed by shallow metamorphism in rift valley deposition. This paper focuses on the silica-rich layered rocks of Changzhongou Formation at the bottom of the Great Wall System exposed in Huyugou, Changping, Beijing. Through detailed field geological observations, petrological and mineral analysis of typical samples, SEM/EDS (Scanning Electron Microscopy/X-ray Spectroscopy), CL (Cathodoluminescence) imaging, in-situ LA-ICP-MS (Laser Ablation-inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) analysis of quartz, and petrological, micro-thermometry, muffle furnace heating-quenching experiments, and SEM/EDS, EPMA (Electron Probe Microanalysis), LRM (Laser Raman Microscopy) analysis of melt inclusions in quartz, a new understanding of the volcanic origin of the silicon-rich stratified rocks at the bottom of the Great Wall System has been proposed. The results indicate that the silicon-rich stratified rocks at the bottom of the Great Wall System include two types: clastic structures (previously defined as quartz “sandstone”) and mosaic structures (previously defined as “quartzite”). The main mineral compositions are quartz and K-feldspar, with minor amounts of zircon, rutile, and other minerals. In the clastic structure rocks, quartz and K-feldspar clasts exhibit angular to subangular shapes, and K-feldspar shows no signs of clay alteration at the edges. The CL of quartz in the two types of rocks mostly shows blue-purple luminous characteristics. Additionally, the formation temperature estimated by the quartz titanium saturation thermometer is concentrated between 550 ~ 650°C, indicating characteristics of high-temperature quartz. Both types of rocks contain iron-titanium-rich two-phase melt inclusions in quartz and K-feldspar. Micro-thermometry results of the melt inclusions show that during the heating process to 1 000°C, the composition of the two-phase immiscible melt inclusions changes continuously, when the temperature reaches 1 000°C, with a color reversal occurring at about 1 050°C, and critical homogenization around 1 350°C. Muffle furnace heating-quenching experiments also confirmed that the two-phase melt inclusions in the samples quenched after heating to 1 350°C became homogeneous. SEM/EDS and EPMA results indicate that the main components of the melt inclusions are iron and titanium oxides, with the dark part being relatively rich in iron and the light part being relatively rich in titanium, and the Fe/Ti ratio of the two phases of the melt inclusions varies greatly. LRM analysis results show that both phases of the melt inclusions are amorphous. Integrating the structural characteristics of the rocks, the CL luminescence characteristics of quartz, the formation temperature estimation of quartz, and the micro-thermometry results of the melt inclusions in quartz, it is believed that the siliceous strata at bottom of the Changcheng System should be siliceous volcanic rocks and volcanoclastic rocks. This indicates that there was a large-scale siliceous volcanic activity in the North China Craton during the Paleoproterozoic, which is related to the rifting of the Columbia Supercontinent. It provides new evidence for the geological evolution of the North China Craton in the Proterozoic. The discovery of iron-titanium-rich melt inclusions in quartz also offers new perspectives on the formation of Precambrian magmatic iron and titanium deposits, particularly the enrichment mechanism of iron and titanium during the magmatic process.

Key words: North China craton; Great Wall system; silicon-rich volcanic rocks; melt inclusions; melt immiscibility

Fund support: National Key Research and Development Program of China (2017YFC0601300); National Natural Science Foundation of China (41930427)

北京南口虎峪地区地处北京市昌平区,大地构造位置属华北克拉通北缘的燕辽裂陷槽。区内广泛出露前寒武纪基底和裂谷沉积地层,包括太古宇、元古宇长城系、蓟县系和青白口系,其中长城系是元古宇最下部层位,其角度不整合于太古宇之上。前人对古元古界长城系的岩性、地层时代、成岩背景等进行了大量的工作,取得了一系列重要进展。已有的研究结果表明,长城系的成岩年龄为 1 650 ~ 1 600 Ma (李怀

坤等, 2020), 主要由一套浅变质的滨海-浅海相沉积岩系组成, 其岩性主要为石英岩、变质石英砂岩、硅质页岩、紫色砂岩、碳酸盐岩等 (孙淑芬等, 2002; 张健等, 2015), 成岩物质主要来源于新太古代晚期基底风化而成的陆源碎屑物质 (万渝生等, 2003)。近年来, 越来越多的证据表明, 长城系中含多个火山岩夹层, 如大红峪组、团山子组中的碱性玄武质火山岩 (1 624 ± 9 Ma) (张健等, 2015)。另外, 也发现有与

火山岩同期的基性脉岩($1\ 620\pm 9\ \text{Ma}$)(张健等, 2015)。

元古宇在华北克拉通广泛出露,记录了地球关键时期的构造演化、环境和气候变化。基于海相沉积成因的认识,前人利用元古宙的地层记录探讨了华北克拉通的地质演化(裴先治等, 1998; 杨海斌等, 2015; 陆松年等, 2016; 朱茂炎, 2022)及前寒武纪地球环境和气候变化(张拴宏, 1999)。本文在详细的野外地质调研基础上,通过典型样品的岩矿相、SEM/EDS、CL 成像、石英的原位 LA-ICP-MS 分析、石英中熔体包裹体研究等,提出了长城系底部富硅层状岩石的火山成因新认识,并对其成岩背景及对岩浆演化和金属富集的意义进行了探讨。长城系底部富硅火山岩的发现为华北克拉通前寒武纪地质演化提供了新的思路。

1 研究区地质概况

研究区位于北京西北十三陵至南口一带,大地构造上属华北克拉通北缘。区内地层主要发育有太古宇基底和较为完整的元古宇,包括长城系、蓟县系、青白口系和震旦系(图1)。虎峪地区主要出露太古宇的斜长角闪片麻岩、斜长角闪岩和古元古界的长城系,二者呈角度不整合接触。长城系由老至新分别为常州沟组、串岭沟组和团山子组。已往的地质资料认为,常州沟组的主要岩性为石英砂岩、石英岩,串岭沟组岩性包括页岩夹粉砂岩、砂岩、紫色砂岩、石英岩、粉砂岩夹页岩等,团山子组主要为硅质灰岩夹泥质灰岩和泥质白云岩夹灰岩。常州沟组、串岭沟组和团山子组之间呈整合接触。

区内构造活动强烈,燕山运动控制着研究区的断裂和褶皱构造格局(李晨星, 2021),区内总体构造线方向为 NE-SW,发育有 NE 向的南口山前大断裂,该断裂为京西丘陵平原与军都山的分界断层,其在虎峪沟口形成断层破碎带。除此之外,区内还发育一系列褶皱构造。

研究区北部大面积出露中生代花岗岩,还发育有少量中生代花岗闪长岩、闪长岩及钾长花岗岩(崔盛芹等, 2003),虎峪地区还发育小规模岩床、岩脉,其岩性为角闪正长斑岩和闪长玢岩(和政军等, 2011)。

2 样品与测试

研究样品采自虎峪沟出露的元古宇长城系常州

沟组,即以往地质资料中定义的石英砂岩及石英岩,二者在野外不易区分,呈互层状产出。

显微岩矿相、SEM/EDS 和 CL 成像分析在北京科技大学土木与资源工程学院岩石矿物实验室进行,所用仪器型号分别为日本奥林巴斯 BX53M 系列显微镜、Phenom XL 台式能谱型扫描电镜和 CL8200 Mk5-2 阴极发光仪。SEM/EDS 测试采用高真空、15 kV 电压,室温 20℃。阴极发光测试电压 16~20 kV,电流 130~200 mA。

石英的原位 LA-ICP-MS 测试在合肥工业大学资源与环境工程学院矿床成因与勘查技术研究中心(OEDC)矿物微区分析实验室完成,使用仪器为与 Cetac Analyte HE 激光剥蚀系统(193 nm ArF 准分子激光器)联用的 Agilent 7900 电感耦合等离子体质谱仪。激光剥蚀过程中采用氦气作载气,氩气为补偿气以调节灵敏度,详细的仪器操作步骤和数据处理方法见汪方跃等(2017)和聂利青等(2018)。元素含量计算采用多外标、无内标法(总量归一化法),并选择 Si 作为归一化元素以消除激光剥蚀量变化对灵敏度漂移的影响。石英的钛饱和温度估算据 Huang 等(2012)校准后的石英-钛饱和温度计算公式。

熔体包裹体岩相学、显微测温和高温淬火实验在北京科技大学岩石矿物实验室完成,显微测温所用仪器型号为英国产 Linkam Th1400 高温热台,高温热台的测试温度范围为 20~1 400℃。当温度低于 800℃时升温速率控制在 30℃/min,温度在 800℃以上时升温速率控制在 2℃/min,并且每升温 10℃进行恒温 30 min,直至熔体包裹体达到均一状态。高温热台配有 Leica 偏反两用显微镜和显微成像系统。

熔体包裹体成分的 EPMA 测试在山东省地质科学研究院进行,所用仪器型号为 JXA-8230。熔体包裹体成分的 LRM 分析在北京大学地空学院激光拉曼实验室进行,所用仪器为 HORIBA JY 共聚焦拉曼光谱仪,使用的拉曼激光波长为 532 nm,分析时室温为 25℃,相对湿度为 50%,采集的光谱信号范围为 100~4 000 cm^{-1} 。

3 结果与分析

3.1 岩石学和矿物学结果

3.1.1 岩相学和 SEM/EDS 分析

野外观察表明,常州沟组岩石呈灰色-灰绿色厚层、中厚层、薄层状层理构造(图2a、2b)。显微镜下

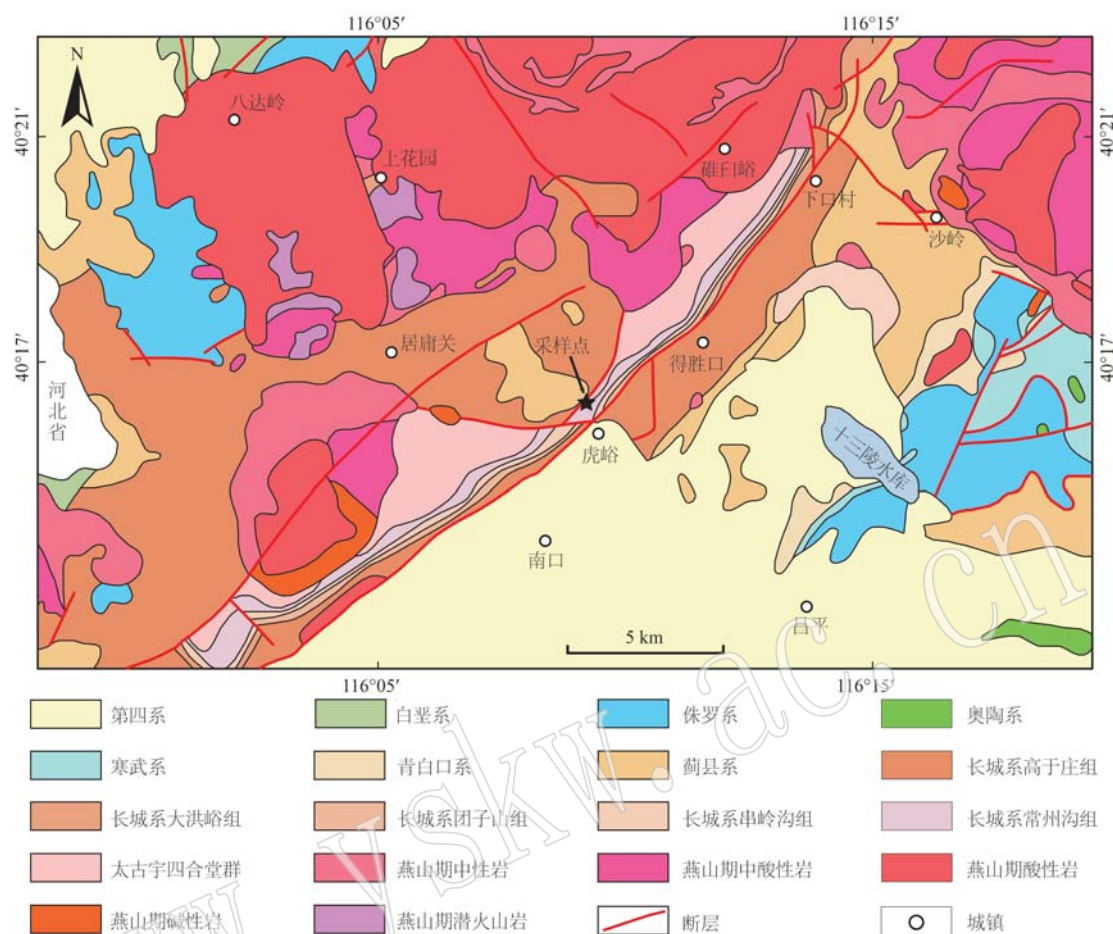


图 1 虎峪及周边地区地质简图 (据自北京市地质矿产局, 1991 修绘)
Fig. 1 Simplified geological map of Huyu and surrounding area (after Beijing Bureau of Geology and Mineral Resources, 1991)

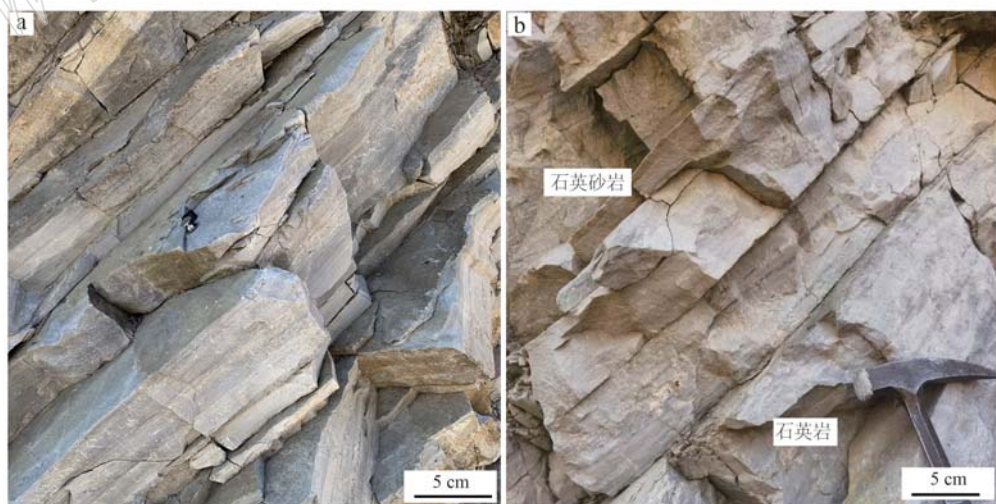


图 2 “石英砂岩”与“石英岩”野外照片
Fig. 2 Field photos of “quartz sandstone” and “quartzite”
a—“石英砂岩”的层理构造; b—“石英岩”及“石英砂岩”的接触关系和层理构造
a—“quartz sandstone” showing bedding structure; b—contact relation and bedding structure of the “quartzite” and “quartz sandstone”

观察发现,常州沟组岩石总体变形较弱,原岩结构保留较好,但岩石结构和矿物组成变化较大。根据岩石的结构不同可将其分为两类:一类明显具有碎屑结构,即以往地质资料中定义的石英砂岩;另一类呈

镶嵌结构,碎屑结构不发育,即以往地质资料中定义的石英岩。为描述方便和便于读者理解,本文研究对象的岩石名称仍沿用前人的名称,即石英岩和石英砂岩,但加“”以示成因认识上的不同。

“石英砂岩”: 呈浅绿灰色,层理构造,碎屑结构(图 3a~3c)。碎屑成分以石英和钾长石为主,多呈次棱角状-次圆状,有时可见棱角特别尖锐的钾长石和石英(图 3a、3b),还可见由石英或由石英和钾长

石组成的形态浑圆的岩石碎屑(图 3c)。碎屑胶结物以碳酸盐矿物为主。此外,很多石英碎屑中可见针状金红石(图 3d)。SEM/EDS 结果表明,岩石的矿物组成复杂,除石英和钾长石外还发现有锆石(图 4a、4b)、磷灰石(图 4c、4d)、金红石(图 4c、4d)、角闪石(图 4e、4f)、榍石(图 4g、4h)等。磷灰石和锆石既可呈自形晶包裹于石英、钾长石中,也可呈碎屑分布于胶结物中。

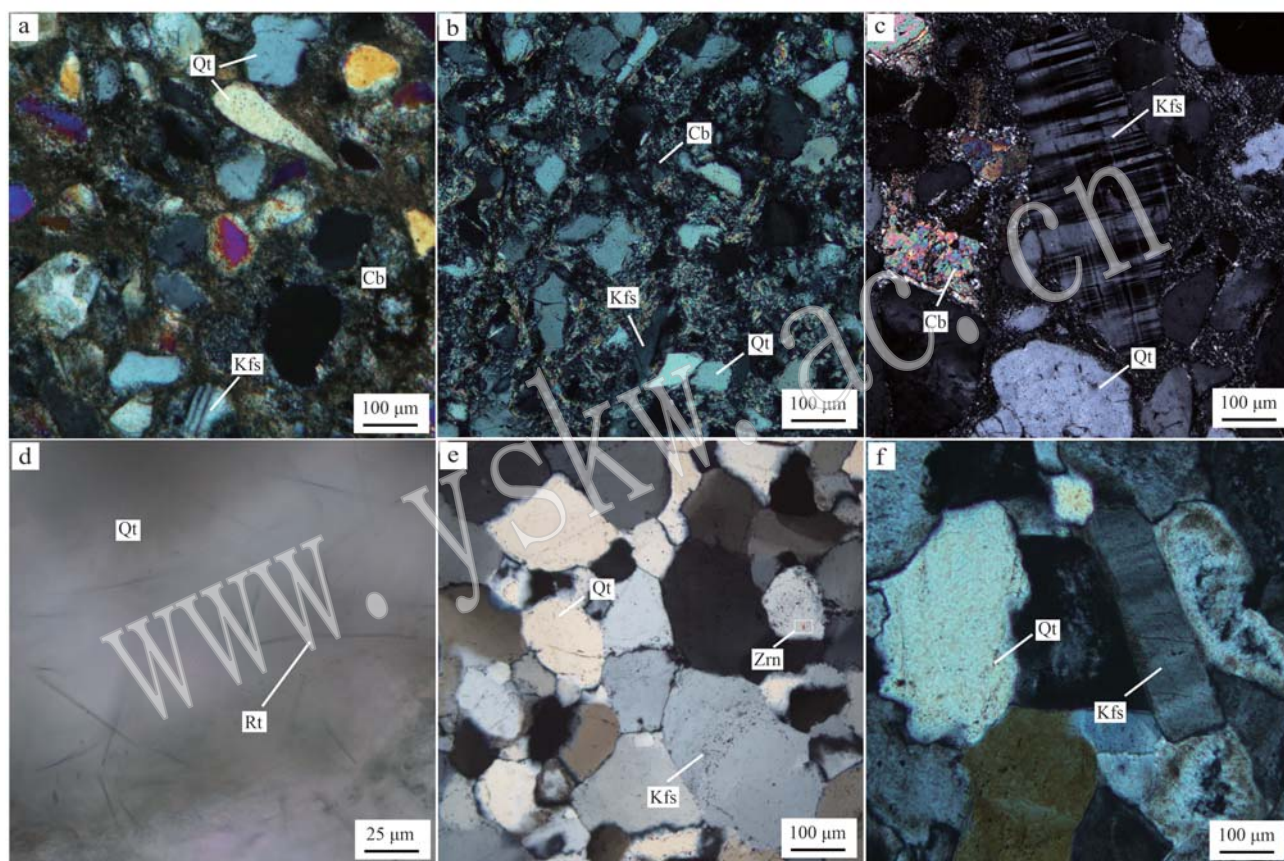


图3 “石英砂岩”和“石英岩”的显微镜下照片

Fig. 3 Microscopic photos of “quartz sandstone” and “quartzite”

a—碎屑结构,其中的石英碎屑形态各异,有些棱角清晰(+); b—碎屑结构,其中的石英和长石棱角分明(+); c—碎屑结构,其中可见浑圆状石英集合体和新鲜无蚀变边的钾长石(+); d—石英中出溶的针状金红石(-); e—石英的镶嵌结构(+); f—自形钾长石和呈镶嵌结构的石英(+); Qt—石英; Kfs—钾长石; Cb—碳酸盐胶结物; Rt—金红石; Zrn—锆石

a—clastic texture, in which the quartz clastic shape is different, some edges and corners are clear (+); b—clastic texture, including quartz and feldspar angular (+); c—clastic texture, including visible round shape quartz aggregate and fresh without alteration of potassium K-feldspar (+); d—acicular rutile exsolved from quartz (-); e—mosaic texture of quartz (+); f—euhedral K-feldspar and mosaic texture of quartz (+);

Qt—quartz; Kfs—K-feldspar; Cb—carbonate cement; Rt—rutile; Zrn—zircon

“石英岩”: 呈灰白-白色,野外可见层理发育。岩石具镶嵌结构(图 3e、3f),主要矿物组成为石英和钾长石。钾长石常呈自形-半自形晶(图 3f),而石英多呈他形或镶嵌结构(图 3e、3f)。SEM/EDS 结果表明,“石英岩”的矿物组成与“石英砂岩”的矿物组成相似,除石英、钾长石外还发现有角闪石、锆石(图

4i、4j)、榍石、磷灰石和褐帘石(图 4k、4l)等,其多呈自形晶包裹于石英和钾长石中。

3.1.2 阴极发光(CL)显微成像分析

CL 显微成像分析结果表明,“石英砂岩”中碎屑形态各异、大小不一。“石英砂岩”和“石英岩”中的石英在阴极发光下均呈带棕色的灰紫色-蓝紫光,而

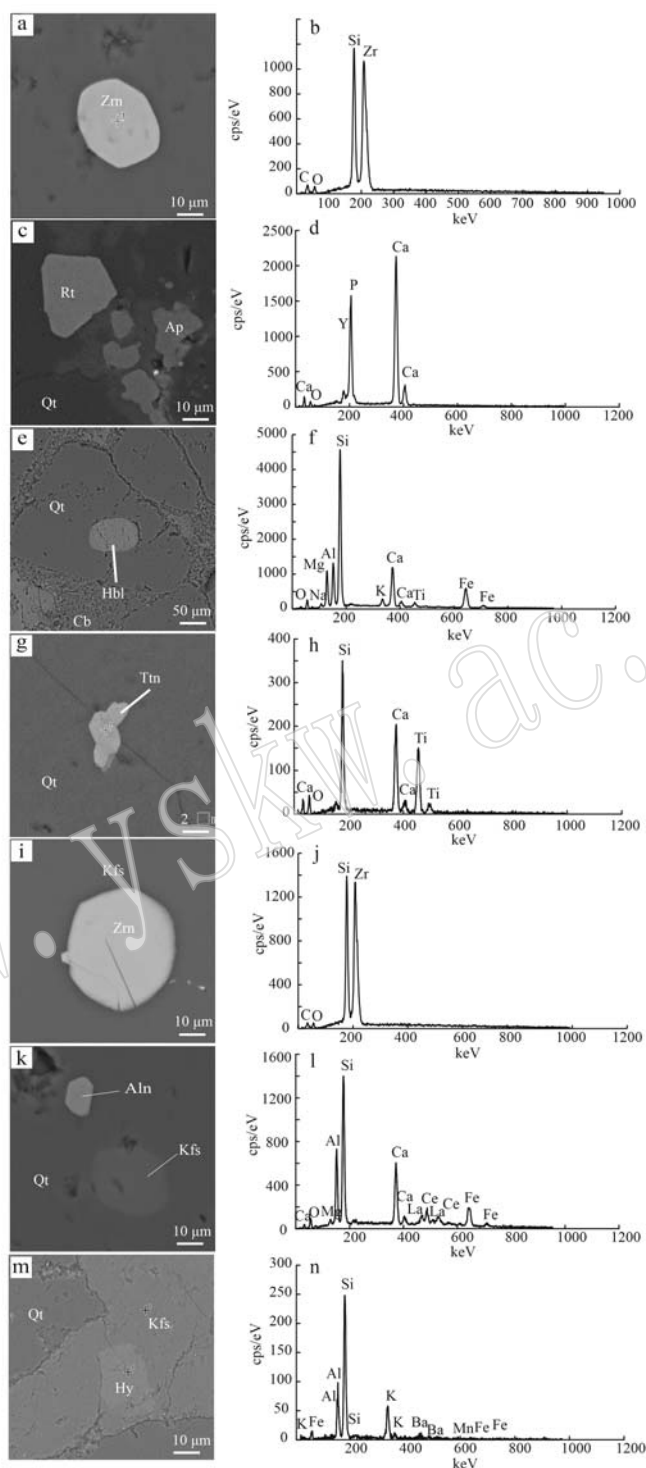


图4 “石英砂岩”和“石英岩”中主要组成矿物的BSE图像和X射线能谱图

Fig. 4 BSE images and X-ray energy spectrums of the major minerals in “quartz sandstone” and “quartzite”

a—包裹于石英中的自形锆石；b—锆石的X射线能谱图；c—包裹在石英中的磷灰石和金红石；d—磷灰石的X射线能谱图；e—包裹于碎屑石英中的角闪石；f—角闪石的X射线能谱图；g—石英中的榍石；h—榍石的X射线能谱图；i—包裹于钾长石中的半自形锆石；j—锆石的X射线能谱图；k—石英中包裹的自形褐帘石和钾长石；l—褐帘石的X射线能谱图；m—钼冰长石交代钾长石；n—钼冰长石的X射线能谱图；Qt—石英；Zm—锆石；Ap—磷灰石；Rt—金红石；Kfs—钾长石；Cb—碳酸盐胶结物；Hbl—角闪石；Ttn—榍石；Aln—褐帘石；Hy—钼冰长石；a~h—“石英砂岩”；i~n—“石英岩”

a—euhedral shaped zircon in quartz；b—X-ray energy spectrum of zircon；c—apatite and rutile in quartz；d—X-ray spectrum of apatite；e—hornblende in clastic quartz；f—X-ray spectrum of hornblende；g—titanite in quartz；h—X-ray spectrum of titanite；i—subhedral zircon in K-feldspar；j—X-ray energy spectrum of zircon；k—euhedral shaped allanite and K-feldspar in quartz；l—X-ray spectrum of allanite；m—hyalophane metasomatized K-feldspar；n—X-ray energy spectrum of hyalophane；Qt—quartz；Zm—zircon；Ap—apatite；Rt—rutile；Kfs—K-feldspar；Cb—carbonate cement；Hbl—hornblende；Ttn—titanite；Aln—allanite；Hy—hyalophane；a~h—“quartz sandstone”；i~n—“quartzite”

钾长石呈亮蓝色。碎屑石英中不同的碎屑颗粒发光强度也明显不同(图 5a、5b), 总体看, 单晶的碎屑石英发光性较好, 而石英集合体或经历明显动态重结晶的发光性略差(图 5a、5b)。由于受后期变形和蚀变影响, 有些“石英岩”的 CL 图像显示出与显微镜下不同的结构特征(图 5c、5d), 显示岩石经历了韧

性剪切变形, 动态重结晶的石英发光性明显减弱, 而长石明显受蚀变影响, 形成内外不同的发光环带, 但仍保留了钾长石的晶体外形(图 5e、5f), 其应与后期流体蚀变有关。SEM/EDS 结果也表明, 钾长石的边部常被钼冰长石交代(图 4m、4n), 因此其黄绿色的阴极发光可能与其交代后形成的钼冰长石中 Fe、

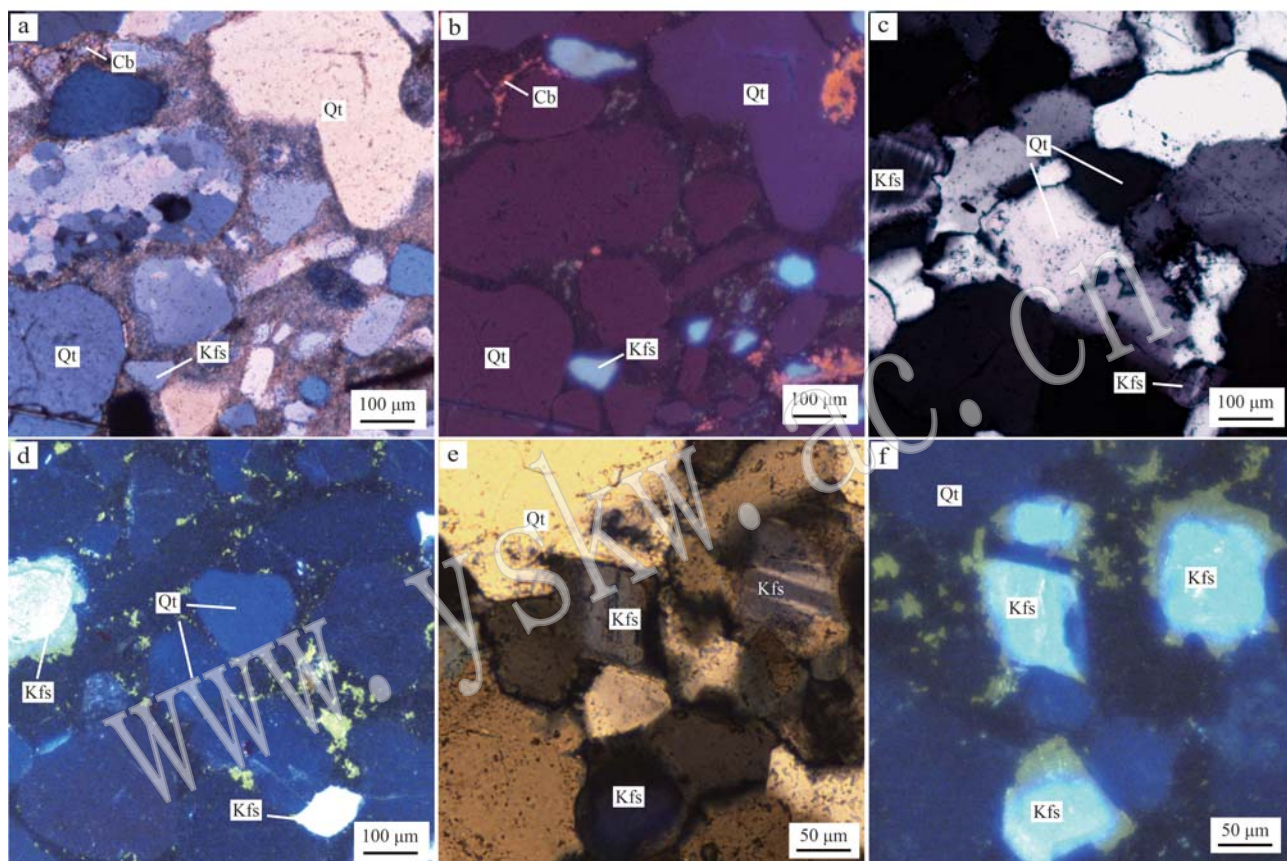


图 5 “石英砂岩”(a、b)和“石英岩”(c~f)的正交偏光照片和 CL 图像

Fig. 5 Cross-polarized light micrograph and CL images of “quartz sandstone” (a, b) and “quartzite” (c~f)

Qt—石英; Kfs—钾长石; Cb—碳酸盐胶结物

Qt—quartz; Kfs—K-feldspar; Cb—carbonate cement

Mn 含量增加有关。

3.1.3 石英的原位 LA-ICP-MS 分析和钛饱和温度估算

分别对“石英砂岩”和“石英岩”样品中的石英进行了原位 LA-ICP-MS 成分分析, 结果列于表 1。从表 1 可以看出, 除 Si 外, 石英中还含有 Al、Na、K、Ca、Mg 等多种杂质元素, 其中“石英砂岩”的石英中杂质含量明显高于“石英岩”, 特别是 K、Na、Fe、Al、Mg, 但 Ti 的含量差别不大, 在 $2.3 \times 10^{-6} \sim 76.6 \times 10^{-6}$, 且主要集中在 $15 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$ 。由于两类样品的石英中均可见金红石, 因此, 可以认为石英形成时应

处于钛饱和体系。本次利用 LA-ICP-MS 结果, 据 Huang 等(2012)给出的钛饱和温度计算公式(压力范围 0.1~1 GPa), 对石英的形成温度进行估算, 结果列于表 2。

从表 2 可以看出, “石英砂岩”样品的石英形成温度约为 464~716℃, 平均 590℃; “石英岩”的钛饱和温度计所得结果为 502~700℃, 平均 601℃。计算获得的石英钛饱和温度其主要分布于 500~700℃之间。由于部分石英样品中常可见针状金红石, 表明其已发生了金红石的固溶体出溶, 这可能会造成石英中钛含量降低, 因此部分依据钛饱和温度计得出

表 1 “石英砂岩”与“石英岩”的原位 LA-ICP-MS 分析结果

 $w_B/10^{-6}$

Table 1 Results of in-situ LA-ICP-MS analysis of “quartz sandstone” and “quartzite”

岩石分类	样品号	Li	Na	Mg	Al	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Be	B	Cu	Zn	As
“石英砂岩”	1010-2-1	0.3	26.7	3.6	723.4	1 065.8	179.0	18.6	9.0	30.1	0.09	1.0	0.2	3.3	0.3
	1010-2-2	0.4	286.2	109.6	1 934.3	3 431.7	437.7	76.6	44.8	67.8	—	16.0	5.6	23.9	1.2
“石英岩”	1010-1-2	0.1	23.0	2.3	5.2	97.4	43.7	3.8	2.4	5.2	—	—	0.1	3.6	0.1
	1023-2-1	4.2	—	2.8	108.9	—	9 637.6	28.6	44.0	672.7	—	103	—	17.5	37.0
	1023-2-2	1.1	—	39.9	9.3	13.1	157.6	14.5	0.1	—	—	—	—	0.2	0.7
	1023-1-1	—	—	—	6.4	—	27.2	2.3	0.3	9.1	0.2	0.2	—	0.3	0.6
	1023-1-2	0.6	9.4	0.6	8.0	—	70.3	3.0	—	—	0.3	5.0	0.2	—	—
	1023-3-1	0.5	15.3	3.8	10.8	2.6	28.3	8.1	0.6	12.8	—	0.3	—	0.3	1.5
	1023-3-2	1.0	1.3	—	12.9	2.9	57.7	7.9	—	—	0.1	1.0	0.2	—	0.1
	1023-4-1	0.5	2.5	0.5	6.6	11.3	0.8	6.8	0.2	10.3	—	3.0	—	—	2.5
	1023-4-2	0.1	—	2.4	3.5	—	35.8	15.6	—	—	0.3	1.2	0.4	0.3	0.2
	1023-5-1	1.1	—	—	17.0	78.6	54.8	31.2	0.7	1.1	0.6	2.8	—	0.6	0.5
	1023-5-2	0.5	8.3	0.2	17.1	49.9	41.5	41.5	—	3.7	—	—	—	—	0.9
	1025-2-1	5.4	11.2	0.2	45.1	—	19.9	59.3	0.8	—	0.9	1.9	0.4	—	1.0
	1025-2-2	3.7	17.8	6.2	59.4	45.4	44.0	66.3	4.0	27.8	0.7	5.1	0.1	—	0.6
	1025-1-1	1.2	—	16.8	9.8	—	45.9	44.0	—	—	—	—	—	0.8	—
	1025-1-2	0.2	7.3	0.2	17.1	—	67.0	38.0	0.2	21.6	—	0.5	—	0.5	0.7
	1025-1(2)-2	0.2	—	0.7	10.2	—	11.3	7.4	0.1	—	—	2.1	—	1.3	1.0

注：表中“—”代表未检出或低于检出限。

表 2 石英-钛饱和温度计计算结果

Table 2 Calculation result for quartz-titanium saturation thermometer

岩石分类	样品号	$w(\text{Ti})/10^{-6}$	$t/^\circ\text{C}$
“石英砂岩”	1010-2-1	19	579
	1010-2-2	77	716
	1010-1-2	4	464
“石英岩”	1023-2-1	29	616
	1023-2-2	15	558
	1023-3-1	8	514
	1023-3-2	8	513
	1023-4-1	7	502
	1023-4-2	16	564
	1023-5-1	31	624
	1023-5-2	42	652
	1025-2-1	59	688
	1025-2-2	66	700
	1025-1-1	44	657
	1025-1-2	38	643
	1025-1(2)-2	7	508

的温度应低于实际石英的形成温度。另外,从石英的 CL 发光特征(图 5a、5d)可以看出,动态重结晶石英的发光性明显降低,因此部分钛含量很低的测试点可能与石英的动态重结晶有关。

3.2 熔体包裹体分析结果

3.2.1 岩相学特征

镜下观察表明,“石英砂岩”和“石英岩”的石英

和钾长石中均发育两相的熔体包裹体。包裹体形态多呈浑圆状或呈石英的负晶形,大小多在 5~20 μm 之间,且多小于 10 μm 。显微镜下,熔体包裹体由深浅不同的两相组成,其中深色部分呈半透明-不透明,多呈深棕红-棕红色,浅色部分可呈透明-半透明,呈浅棕色-略带绿色调的棕色或淡棕黄色,两相之间的边界清楚(图 6a),常呈弧形弯曲(图 6b),也有些包裹体可出现三相,由 2 个深色相和 1 个浅色相组成(图 6c)。

3.2.2 SEM/EDS 及 EPMA 分析

首先对含熔体包裹体样品进行无水抛光,使其出露于样品表面。SEM/EDS 分析结果显示(图 7a、7b)其主要成分为 Ti、Fe、O,其中深色部分 Fe 含量较高,而浅色部分 Ti 含量较高。由于包裹体相对较小,其成分分析时不可避免地受寄主矿物石英的影响,其谱图中均可见明显 Si 的峰(图 7a、7b)。X 射线扫描结果(图 8)也表明,熔体包裹体内部浅色部分主要以 Ti、O 为主,Fe 含量较低,深色部分则相反,其主要元素组成为 Fe 和 O, Ti 含量相对较低。

为了确定熔体包裹体的成分特征,对矿物内熔体包裹体颜色及透明度不同的两相分别进行 EPMA 分析,分析结果见表 3。由于包裹体较小,因此探针可能打到寄主矿物石英或相邻相,对主量成分有所影响。EPMA 结果表明,熔体包裹体两相的主要成分为 Ti、

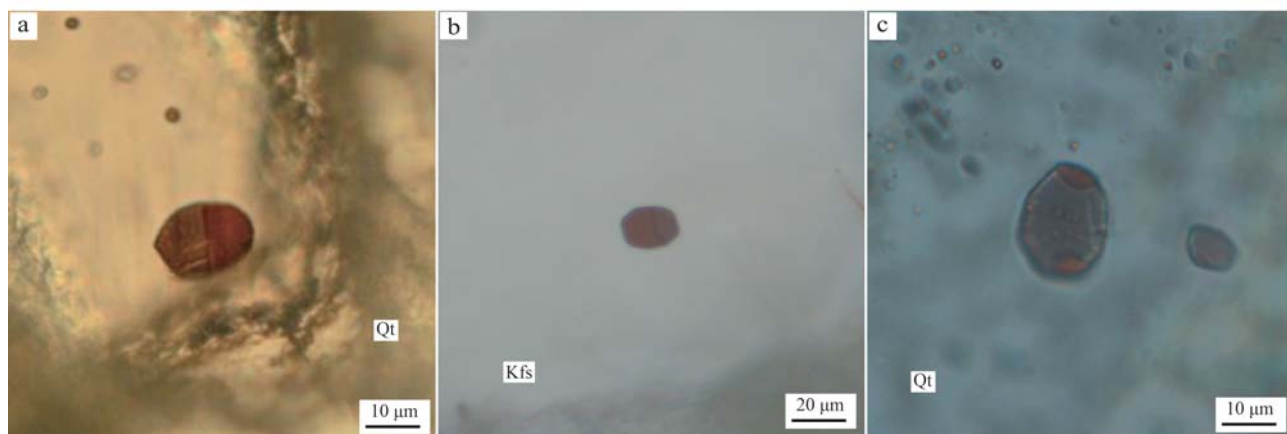


图 6 石英中熔体包裹体的单偏光照片

Fig. 6 Plane-polarized light photomicrograph of melt inclusions hosted in quartz

a, b—两相熔体包裹体; c—三相熔体包裹体

a, b—two phases melt inclusion; c—three phases melt inclusion

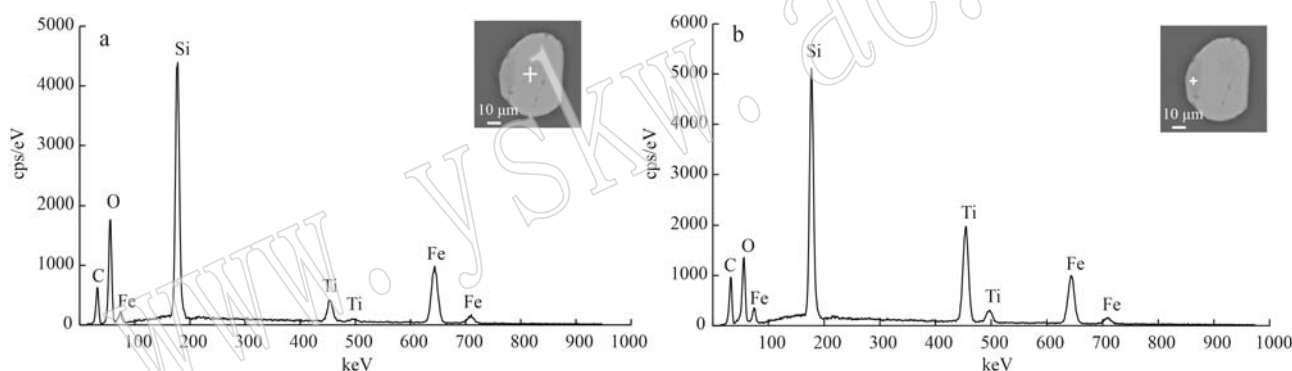


图 7 石英中熔体包裹体的 BSE 图像和 X 射线能谱图

Fig. 7 BSE images and X-ray energy spectrum of the melt inclusion in quartz

a—熔体包裹体深色部分的 X 射线能谱图; b—熔体包裹体浅色部分的 X 射线能谱图

a—X-ray energy spectrum of the dark part of the melt inclusion; b—X-ray energy spectrum of the light part of the melt inclusion

Fe、O, 并含少量 Co、V, 个别可检测到少量的 Ni、P、K 和 Al (表 3)。据 EPMA 分析结果对其中的 FeO/TiO_2 值进行计算, 发现其 FeO/TiO_2 变化较大, 其比值介于 1:6.8 到与 1:1.1 不等, 深色部分的 FeO/TiO_2 值明显高于浅色部分, 表明深色部分相对富铁, 而浅色部分相对富 Ti, 这与 SEM/EDS 测试结果吻合。

3.2.3 LRM 分析

多数情况下拉曼散射对于矿物的结晶度是较为敏感的, 因此拉曼光谱被认为是区分晶质与非晶质矿物的有效手段之一(何佳乐等, 2022)。晶质矿物在拉曼光谱中具有尖锐且高强度的拉曼峰, 非晶质矿物(如玻璃质)的拉曼峰多数较宽, 且强度较低。

本次对石英中的熔体包裹体中不同相进行了 LRM 分析。结果表明, 熔体包裹体的深色和浅色部分除寄主矿物石英的特征峰外, 未显示明显的其他矿物特征峰(图 9a、9b), 但在 Fe—Ti—O 特征峰 684 cm^{-1} 、Ti—O 特征峰 610 cm^{-1} 及 Fe—O 特征峰 407 cm^{-1} 处均可见微弱和宽缓的拉曼信号, 表明熔体包裹体中的两相均为非晶质相, 即这些包裹体为玻璃质的熔体包裹体。

3.2.4 显微测温和加温—淬火实验结果

熔体包裹体显微测温结果表明, 熔体包裹体群内各包裹体在室温下均由深浅两相组成(图 10a), 加温过程中在 800°C 以下未显示明显变化。随着温度的升高, 熔体包裹体内的固相在 900°C 左右可看出

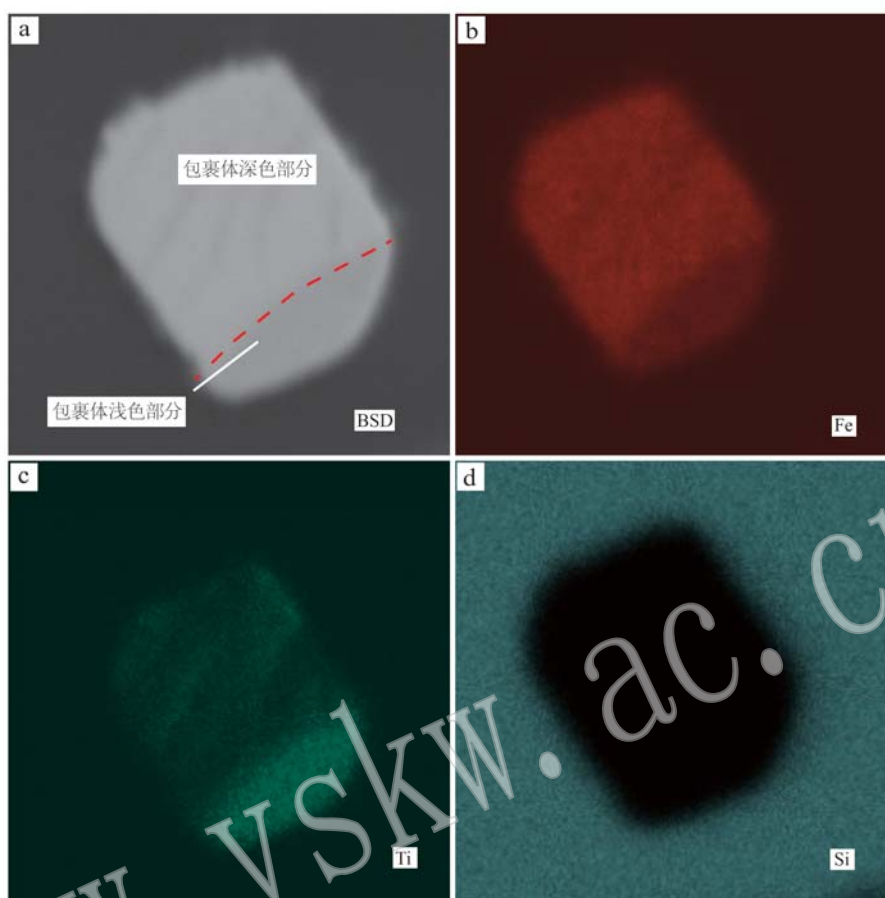


图 8 石英中的熔体包裹体的 BSE 图像(a)和 X 射线元素面分布图(b,c,d)

Fig. 8 BSE image (a) and X-ray element mapping (b, c, d) of a melt inclusion in quartz

表 3 熔体包裹体成分的电子探针分析结果 $w_B/\%$

Table 3 Electron probe analysis of the melt inclusion

	深色	深色	深色	浅色	浅色
NiO	0	0.1	0	0	0
MnO	0	0	0	0.2	0.1
V ₂ O ₅	0.1	0.1	0.5	0	0.8
CoO	0.2	0	0.1	0.1	0.1
K ₂ O	0	0	0.1	0	2.5
CaO	0	0	0	0	0
P ₂ O ₅	0	0	0	0	0.1
FeO	73.9	77.9	76.2	48.3	50.5
TiO ₂	15.3	13.2	12.3	49.9	25.8
SiO ₂	0.4	0.4	0.3	0.9	10.3
Al ₂ O ₃	0	0	0	0	3.4
MgO	0	0	0	0	0
Total	90	91.7	89.6	99.4	93.9
FeO/TiO ₂	5.3	6.8	6.8	1.1	2.1

其边界形态略有变化,且深浅两相的颜色差距略有变小(图 10b),表示其已开始发生熔融,继续加温至 1 000℃,可见熔体包裹体两相边界发生了轻微的偏

移,约在 1 000℃至 1 050℃,随着温度升高包裹体中两相的颜色持续变化,并在约 1 050℃形成深浅对换(图 10c),即原来的深色相变为相对的浅色相,而原来的浅色相变为深色相,指示在不同温度下 Fe 和 Ti 在不混溶两相间分配系数的变化。在加温到约 1 350℃时两侧界线基本消失(图 10d),包裹体呈临界均一。需要说明的是,由于石英颗粒细小,加温过程中可能会发生微弱的塑性变形和包裹体的体积膨胀,这可能导致包裹体内压的降低和均一温度的升高,因此本次得到的均一温度可能略高于实际捕获温度。

在熔融包裹体完全均一后,对其进行冷却,降温过程中可以发现,随着温度的降低,该熔体包裹体的两侧颜色渐渐再次出现差距,与升温过程的现象一致,表明包裹体中捕获的熔体在冷却过程中发生了不混溶。

为了进一步验证熔体包裹体的均一温度并得到淬火后的均一熔体样品,使用马弗炉对石英中的熔

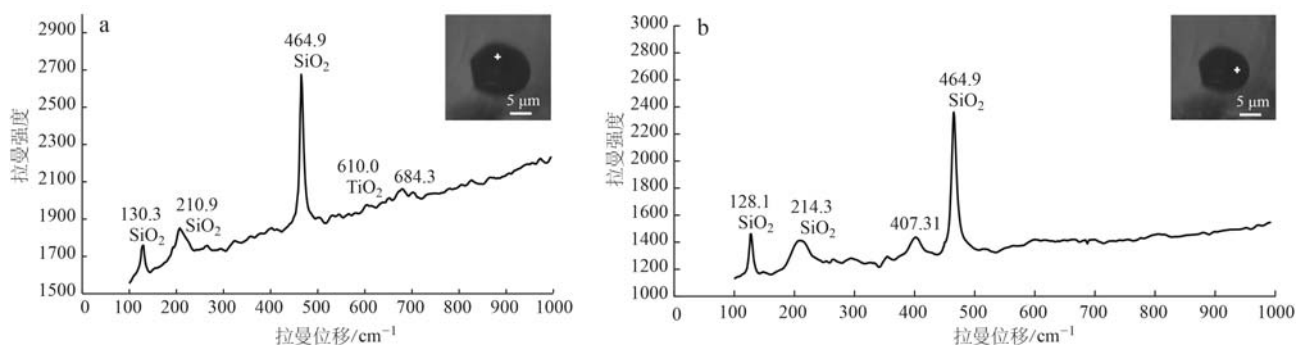


图9 石英中熔体包裹体的 LRM 谱图

Fig. 9 LRM spectrum of the melt inclusion in quartz

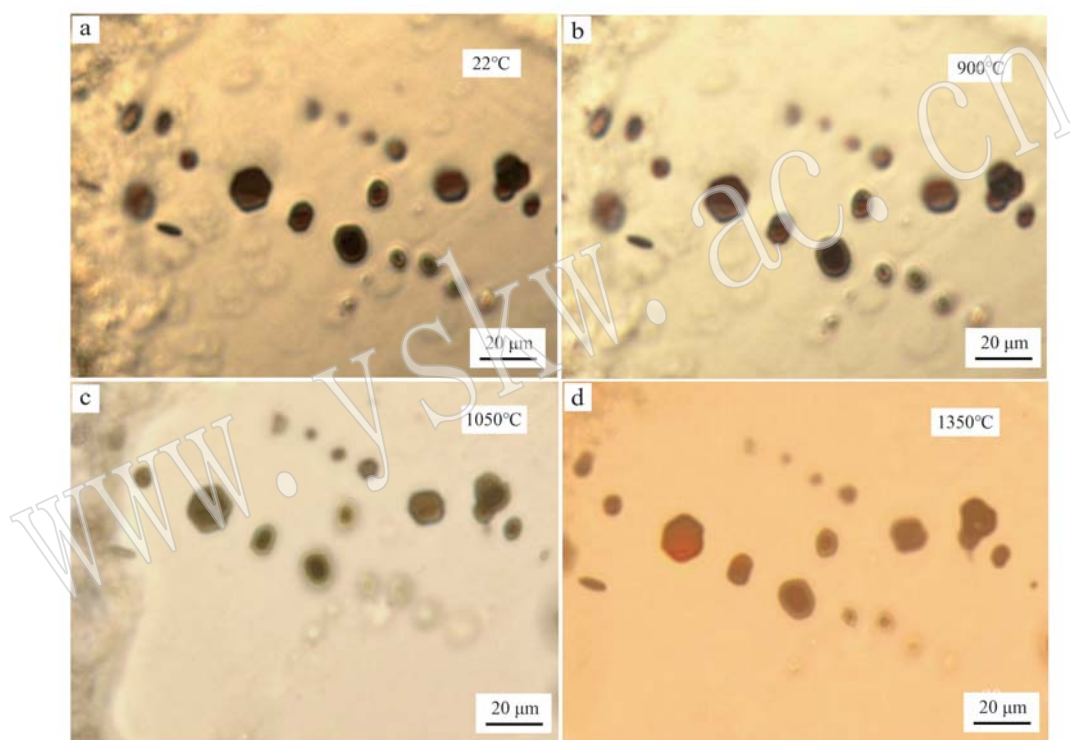


图10 石英中熔体包裹显微测温不同升温阶段的显微镜下照片

Fig. 10 Microscopic photographs of melt inclusions in quartz at different heating stages of microthermometry

体包裹体进行了升温-淬火实验。结果表明,经过马弗炉加热至 1 350℃后并淬火后,几乎所有熔体包裹体都发生了均一,加温-淬火后石英中的熔体包裹体由不透明-半透明的单一相组成(图 11a、11b)。对高温-淬火后样品进行抛光,使熔体包裹体出露于样品表面。均一后的熔体包裹体的 SEM/EDS 分析结果表明(图 11c、11d),均一后的熔体包裹体由 Fe、Ti、O 组成,其在电镜下由单一相组成,表明这些熔体包裹体的捕获温度应不高于 1 350℃。

4 讨论

4.1 长城系底部富硅层状岩石的成因

以往的研究认为,区内的石英岩为一套区域变质岩(宋福生等, 2017; 马帅等, 2019; 陈超等, 2022), 其原岩为一套裂谷沉积成因的深海硅质岩和滨海相石英砂岩(孙淑芬等, 2002; 张健等, 2015), 其物源主要来自太古宇基底地层的风化产物

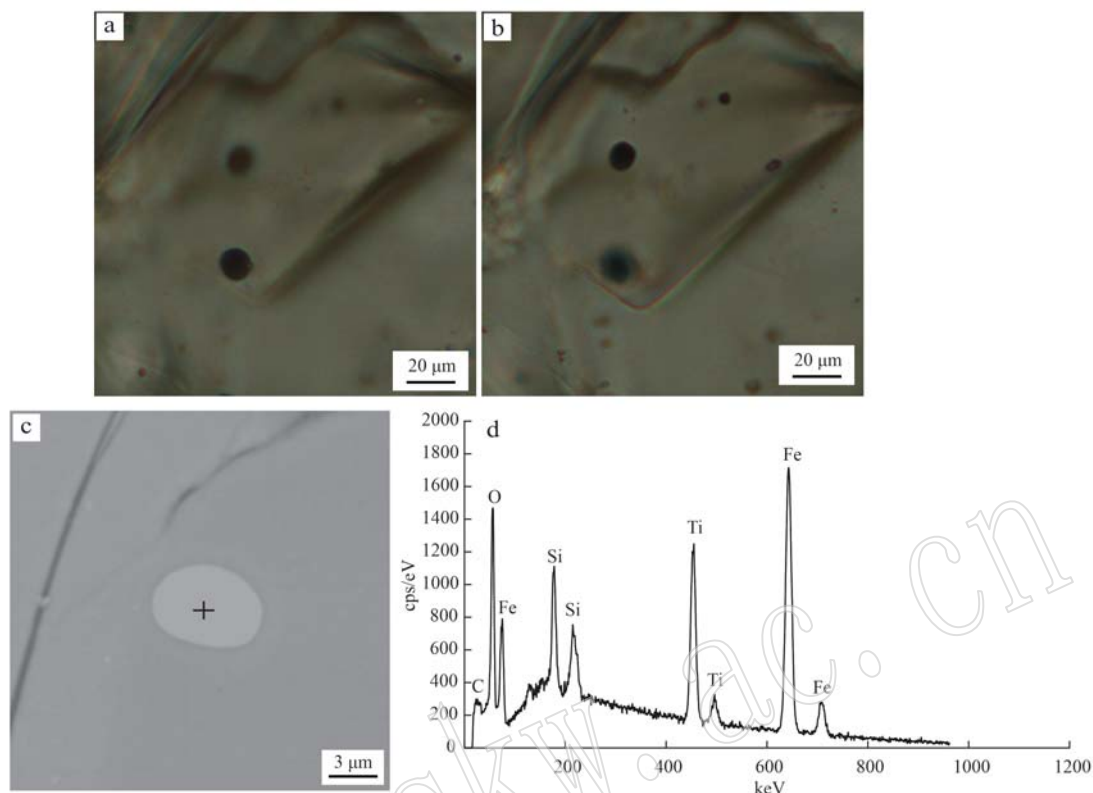


图 11 高温淬火均一后的熔体包裹体显微照片(a, b), BSE 图像(c)和 X 射线能谱图(d)

Fig. 11 Micrograph (a, b), BSE image (c) and X-ray energy spectrum (d) of melt inclusions after high-temperature and quenching homogenization

(和政军, 2011)。华北克拉通太古宇的岩性以 TTG 片麻岩为主, 少有富硅质的火山岩报道(万渝生等, 2022; 张洪祥等, 2023; 康诗胜等, 2023)。TTG 片麻岩的原岩主要为一套深成侵入岩组合(万渝生等, 2020, 2022; 康诗胜等, 2023), 且经历了较强的变形和变质, TTG 岩石中不应有玻璃质熔体包裹体。

本研究发现, 无论是“石英砂岩”还是“石英岩”, 其矿物组成相似, 均以石英和钾长石为主, 并含有少量的黑云母、磷灰石、锆石、榍石、独居石、褐帘石等, 显示了典型的长英质岩浆岩的矿物组成特征。石英的钛饱和温度计和阴极发光特征也显示了高温石英的特征。碎屑结构的“石英砂岩”中的长石、石英碎屑常呈棱角分明, 有些棱角甚至非常尖锐, 且钾长石新鲜、无风化。钾长石属易风化矿物(董恒笔等, 2007), 在风化、剥蚀和搬运过程中易与水、大气中的酸等发生反应, 发生黏土化蚀变。但本次研究的钾长石碎屑不仅棱角分明, 且边部未显示黏土化蚀变, 证明其可能并非风化剥蚀产物。另外, “石英岩”和“石英砂岩”的石英中大量发育玻璃质的熔体

包裹体, 显示了火山成因特征。这些包裹体常呈近球状、椭球状或呈石英的负晶形, 显示了原生包裹体的特征。“石英岩”中的钾长石、石英和钾长石中包裹的角闪石等矿物也呈现良好的自形晶体形态, 表明其未经历明显的变形。前人的定年资料表明, 长城系的成岩年龄应在 1 650~1 600 Ma 之间(李怀坤等, 2020), 华北克拉通在 1.8~1.6 Ga 期间一直处于伸展状态, 发育多期裂谷, 并伴随有周期性板内岩浆活动, 与哥伦比亚超大陆裂解有密切联系(杨泽宇等, 2021)。综合岩石结构、石英钛饱和温度、石英和钾长石中玻璃质熔体包裹体的发现, 并结合前人对长城系年代学的研究结果, 笔者认为, 长城系底部的“石英砂岩”和“石英岩”可能为一套火山岩和火山碎屑岩组合, 是与哥伦比亚超大陆裂解有关的长英质火山活动产物。长城系底部富硅火山岩的发现为深化华北克拉通前寒武纪地质演化提供了新的思路。

长英质火山岩喷出地表快速冷凝一般会形成一些独特的岩石结构, 如玻璃质结构、斑状结构等, 这

是判别岩石成因和产状的重要依据。但本次发现的富硅火山岩尽管结晶粒度细小(粒径一般为几十至几百个微米),但仍为全晶质结构,且未见明显的流纹状构造,与传统认识上的流纹岩不同。岩浆岩石的结构与岩浆的冷却速率、挥发分含量等密切相关,形成这种全晶质富硅火山岩的原因目前尚不清楚,古元古代高的地表温度和低的地温梯度可能是造成岩浆冷却速率低的原因。

4.2 对岩浆演化及岩浆型铁矿中金属富集机理的指示

石英中熔体包裹体的岩相学、显微测温 and 成分分析表明,熔体包裹体的成分以 Fe、Ti、O 为主,且常温下由不混溶的两相组成。深色的部分相对富铁,浅色部分相对富钛。石英中富铁、钛熔体包裹体的发现表明,形成这套富硅火山岩的岩浆可能经历了硅酸盐熔体与铁钛氧化物熔体的不混溶,且铁钛氧化物熔体在降温过程中可进一步不混溶形成相对富铁和相对富钛的熔体。在熔体包裹体的加温过程中,自其熔融后,不混溶两相的成分不断变化,表现在其颜色的连续变化上,加温过程中甚至出现颜色深浅的反转,表明富铁钛熔体在不同温度可以形成成分不同的两个不混溶熔体,并造成铁和钛在不同的熔体相中富集。

华北克拉通已发现有多多个前寒武纪的岩浆型铁矿床,如河北承德的大庙铁矿床。前人通过对大庙铁矿床的年代学研究,认为大庙铁矿的成岩成矿时代应在 1.80~1.68 Ga 之间(白雪山等, 2018),其最新的年龄与长城系底部石英岩的成岩年代(1.65 Ga, 李怀坤等, 2020)相当。对华北克拉通前寒武纪岩浆型铁矿床的中铁的富集机制前人进行了大量的工作,如陈伟等(2008)、赵国春(2009)和赵太平等(2010)认为结晶分异可能是造成岩浆中铁超常富集的原因。但也有学者认为大庙铁矿的含矿母岩浆在深部发生了液态不混溶和重力分异作用,形成铁岩浆和含铁磷岩浆(胡世玲等, 1990; 何海龙等, 2015),它们沿着不同的通道侵入或就地固结成矿,磷在铁矿岩浆分化过程中的可能起了促进作用(Toplis and Carroll, 1995)。另外有学者发现,大庙铁矿的磷灰石中发育富 Fe、Mg 的熔体包裹体(王萌, 2014)和熔体包裹体内铁镁两相的不混溶现象,并认为其记录了岩浆熔体的不混溶过程,包括富铁镁氧化物熔体与硅酸盐熔体的不混溶及富铁和富镁熔体的不混溶(Chen *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2016; He *et al.*, 2016),提出岩浆不混溶可能是造成

岩浆中铁富集的重要原因。

岩浆型钒钛磁铁是世界钛和钒的主要来源,位于我国攀西地区的攀枝花铁矿是我国岩浆型钒钛磁铁矿的典型代表。前人研究表明,岩浆不混溶对于 Fe、Ti 的富集具有重要作用(王坤等, 2013),在硅酸盐熔体与富铁熔体不混溶过程中,Fe、Ti、V 被强烈分配进入不混溶的富铁熔体中,造成铁和钛的富集。

岩浆不混溶是岩浆演化的重要过程之一,也是造成岩浆组分变化和金属富集的重要机制。本次在长城系底部硅质火山岩和火山碎屑岩的石英中发现的富铁、钛熔体包裹体表明,富铁钛的氧化物熔体可以与富硅熔体发生不混溶,因此不混溶可能是造成岩浆型铁钛矿床形成的重要机制。初始成矿岩浆在地壳浅部或上侵过程中由于温度和压力的降低可以使铁钛氧化物熔体与富硅熔体发生不混溶作用,由于铁钛氧化物熔体相对于富硅熔体的密度高,因此其可在重力的作用下向下聚集,并在岩浆房底部形成富铁钛的熔体,这些熔体或在原地凝固结晶,或沿断裂等侵入,这可能是岩浆型铁矿床或铁钛矿床形成的机制之一。

5 结论

(1) 综合岩石的结构、矿物组成、石英的钛饱和温度估算和石英中玻璃质熔体包裹体的发现,认为北京昌平虎峪沟出露的长城系底部的富硅岩石组合,包括前人定义的“石英岩”和“石英砂岩”应为火山成因,为一套富硅的火山岩和火山碎屑岩组合。

(2) 石英和钾长石内发现的富铁钛熔体包裹体表明,硅酸盐熔体可以与富铁钛的氧化物熔体发生不混溶,不混溶可能是造成岩浆中铁钛富集的重要机制。这一发现为揭示岩浆型铁矿和钒钛磁铁矿中金属的富集机制提供了新的思路。

(3) 熔体包裹体加温过程中不混溶两相的颜色随温度而变化,表明不混溶两相在不同温度下的成分不同,即不同温度下铁、钛在两相中的分配可能不同,这对解释岩浆型铁矿床、铁钛矿床等金属组合变化提供了理论支撑。

References

- Bai Xueshan, Zhang Huannan, Zhang Lijian, *et al.* 2018. Analysis of the metallogenic law of “rich ore” of Chengde Damiao-style iron ore[J].

- Science and Technology Innovation Herald, 15(27): 130~131, 134 (in Chinese).
- Beijing Bureau of Geology and Mineral Resources. 1991. Regional Geology of Beijing[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Chen Chao, Xiu Di, Wang Haimin, *et al.* 2022. Petrological characteristics, geochemical characteristics, and geological significance of sandstones in Changzhougou Formation, central sector of the Yanshan Mountains[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 41(4): 771~785 (in Chinese with English abstract).
- Chen Wei, Zhao Taiping, Wei Qingguo, *et al.* 2008. Genesis of nelsonite from the Damiao Fe-Ti-P deposit, Hebei Province, China: Evidence from apatite[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(10): 2301~2312 (in Chinese with English abstract).
- Chen W, Zhou M F and Zhao T P. 2013. Differentiation of nelsonitic magmas in the formation of the ~1.74 Ga Damiao Fe Ti P ore deposit, North China[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 165(6): 1341~1362.
- Cui Shengqin, Wu Zhenhan, Ma Yinsheng, *et al.* 2003. Meso-cenozoic intracontinental orogenic process in the Beijing area—A case study based on geological observations from the Ming tombs to Badaling Mountain[J]. Journal of Geomechanics, 9(3): 201~219 (in Chinese).
- Dong Hengbi, Zhang Qingsheng, Kong Wennian, *et al.* 2007. Analysis of the weathering genesis of clastic rocks in the Shaanxi-Mongolia border area[J]. Geology of Shaanxi, 25(2): 36~43 (in Chinese).
- He Hailong and Song Xieyan. 2015. The indicative significance of oxide composition to the genesis of titanium-iron apatite in Damiao, Hebei Province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 35(S1): 119 (in Chinese).
- He H L, Yu S Y, Song X Y, *et al.* 2016. Origin of nelsonite and Fe Ti oxides ore of the Damiao anorthosite complex, NE China: Evidence from trace element geochemistry of apatite, plagioclase, magnetite and ilmenite[J]. Ore Geology Reviews, 79: 367~381.
- He Jiale, Pan Zhongxi and Du Gu. 2022. Application and research progress of Laser Raman spectroscopy in geology and mineral resources [J]. China Geological Survey, 9(5): 111~119 (in Chinese with English abstract).
- He Zhengjun, Zhang Xinyuan, Niu Baogui, *et al.* 2011. The paleo-weathering mantle of the Proterozoic rapakivi granite in Miyun County, Beijing and the relationship with the Changzhougou Formation of Changchengian System[J]. Earth Science Frontiers, 18(4): 123~130 (in Chinese with English abstract).
- Hu Shiling, Wang Songshan, Sang Haiqing, *et al.* 1990. The isotopic ages and REE geochemistry of Damiao anorthosite and their geological implication[J]. Scientia Geologica Sinica, 25(4): 332~343 (in Chinese with English abstract).
- Huang R and Audétat A. 2012. The titanium-in-quartz (TitaniQ) thermometer: A critical examination and re-calibration[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 84: 75~89.
- Kang Shisheng, Liu Heng, Hu Tianyang, *et al.* 2023. Petrogenesis and geotectonica significance of TTG gneiss in Late Neoproterozoic Dengfeng complex[J]. Earth Science, 48(9): 3342~3359 (in Chinese with English abstract).
- Li Chenxing. 2021. Tectono-thermal Evolution Since Meso-Neoproterozoic of the Yanliao Rift Belt, the Northern Margin of the North China Craton[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Li Huaikun, Zhang Jian, Tian Hui, *et al.* 2020. Recent advances in the study of the Meso- to Neoproterozoic chronostratigraphy of the Yanliao Aulacogen on the northern margin of the North China Craton[J]. Geological Survey and Research, 43(2): 127~136 (in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian, Hao Guojie and Xiang Zhenqun. 2016. Precambrian major geological events[J]. Earth Science Frontiers, 23(6): 140~155 (in Chinese with English abstract).
- Ma Shuai. 2019. Meso-Neoproterozoic to Paleozoic Tectonic-Paleogeography Evolution in the East of North China Plate[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China) (in Chinese with English abstract).
- Nie Liqing, Zhou Taofa, Wang Fangyue, *et al.* 2018. Scheelite trace element compositions from Anhui Dongyuan porphyry deposit: Implications for tungsten mineralization[J]. Mineral Deposits, 37(6): 1237~1246 (in Chinese with English abstract).
- Pei Xianzhi, Wang Tao and Wang Yang. 1998. Crustal composition and tectonic evolution of the North Qinling orogenic belt[J]. Progress in Precambrian Research, 21(4): 26~35 (in Chinese with English abstract).
- Song Fusheng, Kuang Aibing, Sun Chengwang, *et al.* 2017. Metamorphic characteristics of Changcheng system Akesu rocks along Qiakemake Wuqia county in Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 35(3): 255~261 (in Chinese with English abstract).
- Sun Shufen, Zhu Shixing and Huang Xueguang. 2002. Discovery of microplaeoflora from the Changzhougou Formation in Jixian Tianjin China[J]. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources Tianjin, 25(1): 48~51 (in Chinese with English abstract).
- Toplis M J and Carroll M R. 1995. 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]. *Petrol.*, 36: 1 137~1 170.
- Wan Yusheng. 2022. How did the oldest continental crust form? [J]. *Earth Science*, 47(10): 3 776~3 778 (in Chinese with English abstract).
- Wan Yusheng, Dong Chunyan, Xie Hangqiang, *et al.* 2022. Huge growth of the Late Mesoarchean-Early Neoproterozoic (2.6~3.0 Ga) continental crust in the North China Craton: A review[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(5): 866~906 (in Chinese with English abstract).
- Wan Yusheng, Xie Hangqiang, Dong Chunyan, *et al.* 2020. Timing of tectonothermal events in Archean basement of the North China Craton [J]. *Earth Science*, 45(9): 3 119~3 160 (in Chinese with English abstract).
- Wan Yusheng, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, *et al.* 2003. The Precambrian high-grade basement of the Qilian terrane and neighboring areas: Its ages and compositions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 319~324 (in Chinese with English abstract).
- Wang Fangyue, Ge Can, Ning Siyuan, *et al.* 2017. A new approach to LA-ICP-MS mapping and application in geology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(11): 3 422~3 436 (in Chinese with English abstract).
- Wang M, Veksler I, Zhang Z C, *et al.* 2016. The origin of nelsonite constrained by melting experiment and melt inclusions in apatite: The Damiao anorthosite complex, North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 42: 163~176.
- Wang Meng. 2014. Origin of the Proterozoic Massif-type Nelsonite—A Case Study on the Damiao Anorthosite Complex, North China Craton [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Yang Haibin, Zhang Zhongjie, Wang Xiao, *et al.* 2015. Main characteristics and possible evolution models of Precambrian Earth[J]. *Geological Review*, 61(2): 288~306 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zeyu, Li Shanshan, He Dengyang, *et al.* 2021. Geochronology and petrogenesis of Paleoproterozoic mafic intrusive rocks in Miyun area of northern North China Craton[J]. *Global Geology*, 40(4): 772~792 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongxiang, Liu Jin, Sun Bo, *et al.* 2023. Petrogenesis of Late Neoproterozoic TTG rocks in Liaonan Block, North China craton and its tectonic significance[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 45(5): 1 192~1 209 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jian, Tian Hui, Li Huaikun, *et al.* 2015. Age, geochemistry and zircon Hf isotope of the alkaline basaltic rocks in the middle section of the Yan-Liao aulacogen along the northern margin of the North China Craton: New evidence for the breakup of the Columbia Supercontinent [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 3 129~3 146 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuanhong. 1999. The theory of the origin of heat in the Earth's interior[J]. *Geology of the World*, 18(3): 15~19 (in Chinese).
- Zhao Guochun. 2009. Metamorphic evolution of major tectonic units in the basement of the North China Craton: Key issues and discussion [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1 772~1 792 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Taiping, Chen Wei and Lu Bing. 2010. Characteristics and origin of Fe-Ti-P oxide deposits associated with Proterozoic massif-type anorthosite[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 106~117 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Maoyan. 2022. New trend of global geological age division in the Precambrian period[J]. *Journal of Stratigraphy*, 46(2): 209~213 (in Chinese).

附中文参考文献

- 白雪山, 张焕楠, 张立剑, 等. 2018. 承德大庙式铁矿“富矿”成矿规律浅析[J]. *科技创新导报*, 15(27): 130~131, 134.
- 北京市地质矿产局. 1991. 北京市区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈超, 修迪, 王海敏, 等. 2022. 燕山中段常州沟组砂岩岩石学、地球化学特征及地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 41(4): 771~785.
- 陈伟, 赵太平, 魏庆国, 等. 2008. 河北大庙 Fe-Ti-P 矿床中铁钛磷灰岩的成因: 来自磷灰石的证据[J]. *岩石学报*, 24(10): 2 301~2 312.
- 崔盛芹, 吴珍汉, 马寅生, 等. 2003. 北京地区中新生代陆内造山过程——以十三陵-龙庆峡-八达岭路线观察为基础[J]. *地质力学学报*, 9(3): 201~219.
- 董恒笔, 张清盛, 孔文年, 等. 2007. 陕蒙交界地区碎屑岩风化成因浅析[J]. *陕西地质*, 25(2): 36~43.
- 何海龙, 宋谢炎. 2015. 氧化物成分对河北大庙铁磷灰岩成因的指示意义[J]. *矿物学报*, 35(S1): 119.
- 何佳乐, 潘忠习, 杜谷. 2022. 激光拉曼光谱技术在地矿领域的应用与研究进展[J]. *中国地质调查*, 9(5): 111~119.
- 和政军, 张新元, 牛宝贵, 等. 2011. 北京密云元古宙环斑花岗岩古风化壳及其与长城系常州沟组的关系[J]. *地学前缘*, 18(4): 123~130.
- 胡世玲, 王松山, 桑海清, 等. 1990. 大庙斜长岩同位素地质年龄、稀土地球化学及其地质意义[J]. *地质科学*, 25(4): 332~343.
- 康诗胜, 刘恒, 胡天杨, 等. 2023. 新太古代晚期登封地区 TTG 片

- 麻岩成因及大地构造意义[J]. 地球科学, 48(9): 3 342~3 359.
- 李晨星. 2021. 华北克拉通北缘燕辽裂陷带中-新元古界构造-热演化研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京).
- 李怀坤, 张 健, 田 辉, 等. 2020. 华北克拉通北缘燕辽裂陷槽中-新元古代地层年代学研究进展[J]. 地质调查与研究, 43(2): 127~136.
- 陆松年, 郝国杰, 相振群. 2016. 前寒武纪重大地质事件[J]. 地学前缘, 23(6): 140~155.
- 马 帅. 2019. 华北板块东部中新元古代-古生代构造-古地理演化[D]. 青岛: 中国石油大学(华东).
- 聂利青, 周涛发, 汪方跃, 等. 2018. 安徽省东源斑岩型钨矿床白钨矿原位微量元素特征及其指示意义[J]. 矿床地质, 37(6): 1 237~1 246.
- 裴先治, 王 涛, 王 洋. 1998. 北秦岭前寒武纪地壳组成及其构造演化[J]. 前寒武纪研究进展, 21(4): 26~35.
- 宋福生, 匡爱兵, 孙成旺, 等. 2017. 新疆乌恰县恰克马克地区长城系阿克苏岩群变质岩特征[J]. 新疆地质, 35(3): 255~261.
- 孙淑芬, 朱士兴, 黄学光. 2002. 天津蓟县常州沟组(约1 800 Ma)微古植物的发现及其意义[J]. 前寒武纪研究进展, 25(1): 48~51.
- 万渝生. 2022. 最古老陆壳是如何形成的? [J]. 地球科学, 47(10): 3 776~3 778.
- 万渝生, 董春艳, 颀颀强, 等. 2022. 华北克拉通新太古代早期-中太古代晚期(2.6~3.0 Ga)巨量陆壳增生: 综述[J]. 地质力学学报, 28(5): 866~906.
- 万渝生, 颀颀强, 董春艳, 等. 2020. 华北克拉通太古宙构造热事件时代及演化[J]. 地球科学, 45(9): 3 119~3 160.
- 万渝生, 许志琴, 杨经绥, 等. 2003. 祁连造山带及邻区前寒武纪深变质基底的时代和组成[J]. 地球学报, 24(4): 319~324.
- 汪方跃, 葛 黎, 宁思远, 等. 2017. 一个新的矿物面扫描分析方法开发和地质学应用[J]. 岩石学报, 33(11): 3 422~3 436.
- 王 坤, 邢长明, 任钟元, 等. 2013. 攀枝花镁铁质层状岩体磷灰石中的熔融包裹体: 岩浆不混熔的证据[J]. 岩石学报, 29(10): 3 503~3 518.
- 王 萌. 2014. 元古宙斜长岩体型铁钛磷灰岩的成因研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 杨海斌, 张中杰, 王 晓, 等. 2015. 前寒武纪地球演化的主要地质特征及可能模式[J]. 地质论评, 61(2): 288~306.
- 杨泽宇, 李珊珊, 何登洋, 等. 2021. 华北克拉通北部密云地区古元古代基性侵入岩形成时代与岩石成因[J]. 世界地质, 40(4): 772~792.
- 张 健, 田 辉, 李怀坤, 等. 2015. 华北克拉通北缘 Columbia 超大陆裂解事件: 来自燕辽裂陷槽中部长城系碱性火山岩的地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素证据[J]. 岩石学报, 31(10): 3 129~3 146.
- 张洪祥, 刘 锦, 孙 博, 等. 2023. 华北克拉通辽南地块新太古代晚期 TTG 岩石成因及其构造意义[J]. 地球科学与环境学报, 45(5): 1 192~1 209.
- 张拴宏. 1999. 地球内部热起源的理论[J]. 世界地质, 18(3): 15~19.
- 赵国春. 2009. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论[J]. 岩石学报, 25(8): 1 772~1 792.
- 赵太平, 陈 伟, 卢 冰. 2010. 斜长岩体中 Fe-Ti-P 矿床的特征与成因[J]. 地学前缘, 17(2): 106~117.
- 朱茂炎. 2022. 前寒武纪全球地质年代划分新趋势[J]. 地层学杂志, 46(2): 209~213.