

# 华北克拉通宣龙式铁矿成矿环境：来自地球化学和硅同位素的约束

刘世晗<sup>1</sup>, 杨秀清<sup>1\*</sup>, 杨国威<sup>1</sup>, 杨云<sup>2</sup>, 梁永生<sup>2</sup>, 张子民<sup>1</sup>, 黄源辉<sup>1</sup>, 张政涛<sup>1</sup>

Liu Shihan<sup>1</sup>, Yang Xiuqing<sup>1\*</sup>, Yang Guowei<sup>1</sup>, Yang Yun<sup>2</sup>, Liang Yongsheng<sup>2</sup>, Zhang Zimin<sup>1</sup>,

Huang Yuanhui<sup>1</sup>, Zhang Zhengtao<sup>1</sup>

1. 长安大学地球科学与资源学院/西部矿产资源与地质工程重点实验室, 陕西西安

710054

2. 河北省地矿局第三地质大队, 河北张家口, 075000

1. School of Earth Science and Resources, MOE Key Laboratory of Western China's

Mineral Resources and Geological Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054,

China

2. The 3rd Geological Team of Hebei Geology and Mining Bureau, Zhangjiakou, Hebei,

075000, China

**摘要** 宣龙式铁矿主要形成于前寒武纪铁建造缺失期（元古宙中期，18-8 亿年），其成矿环境尚不明确。前人主要对铁矿石及其围岩（例如页岩和白云岩）开展了大量研究，本文通过对（含铁）石英砂岩和铁矿石开展地球化学和硅同位素对比研究，示踪物质源区和风化强度，进而深入探讨宣龙式铁矿成矿环境。宣龙式铁矿及其围岩（含铁）石英砂岩均显示很高的 PIA、CIW 值，暗示源区经历了强烈的风化作用。（含铁）石英砂岩稀土元素显示轻稀土相对富集和重稀土相对亏损的特征，Eu 可见负异常（ $Eu/Eu^*=0.65\sim 0.71$ ）；（含铁）石英砂岩和铁矿石中石英硅同位素基本一致，并且与花岗岩中石英硅同位素也相似，表明（含铁）石英砂岩和铁矿石中的石英碎屑颗粒可能来源于太古宙花岗岩风化；（含铁）石英砂岩中 Fe 和 Mn 均存在于胶结物中，且 MnO 和  $TFe_2O_3$  呈正相关，表明（含铁）石英砂岩沉积时海洋表层发生了氧化，但是氧化还原界面很浅。结合前人研究，我们认为元古宙中期可能发生了多期氧化事件，其导致中元古代铁建造发生大规模缺失。

**关键词** 华北克拉通；宣龙式铁矿；地球化学；硅同位素

**中图分类号**：P58; P61

**收稿日期**：2025-05-27

---

作者简介：刘世晗（2000-），男，在读研究生，矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: liushihan00@163.com

\*通讯作者简介：杨秀清（1987-），男，教授，从事沉积矿床及古海洋环境研究。E-mail: xiuqing2008@126.com

# The Metallogenic Environment of the Xuanlong-type Iron Deposit in the North China Craton: Constraints from Geochemistry and Silicon Isotopes

**Abstract** The Xuanlong-type iron deposits formed during the gap interval of Precambrian iron formation (Mid-Proterozoic, 1.8-0.8Ga), and its ore-forming environment remains ambiguous. Previous studies mainly focus on iron ores and their host rocks, including shales and dolostone. This study conducts comparative geochemical and silicon isotope studies on (ferruginous) quartz sandstones and iron ores, which was used to trace the provenance and the intensity of weathering, thereby facilitating further discussion of the formation environment of the Xuanlong-type iron deposits. Both the Xuanlong-type iron ores and the host rock (ferruginous) quartz sandstones in North China Craton has high Chemical Index of Alteration (CIA) and Plagioclase Index of Alteration (PIA) values, indicating that the source underwent intense weathering processes. Chondrite-normalized rare-earth element (REE) patterns of ferruginous quartz sandstones are characterized by enrichment in light rare-earth elements (LREE) relative to that heavy rare-earth elements (HREE) with negative Eu anomaly ( $Eu/Eu^*=0.65-0.71$ ). The silicon isotopic compositions of quartz in (ferruginous) quartz sandstones are similar to those in iron ores, as well as those in quartz from granite granitic quartz. This suggests that the detrital quartz grains in both (ferruginous) quartz sandstones and iron ores may be derived from the weathering products of Archean granites. Both Fe and Mn are present in the cementation of (ferruginous) quartz sandstone, and MnO is positively correlated with  $TFe_2O_3$ , indicating that oxidation occurred in the marine surface layer during the deposition of (ferruginous) quartz sandstone, but the redox interface is very shallow. When combining with previous studies, we proposed that multiple oxygenation episodes may take place during the Mid-Proterozoic, which led to the absence of large-scale iron formations during this period.

**Keywords:** North China craton; Xuanlong-type iron deposit; Geochemistry; Silicon isotope

# 引言

元古宙中期（18 亿年~8 亿年）大气氧化缓慢，生命演化迟缓，通常被认为是地球平静期（Boring Billion）。铁建造在该时期大量缺失，传统观点认为 18 亿年前由于海洋的完全氧化，导致  $\text{Fe}^{2+}$  发生氧化形成  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  胶体沉淀，海水中溶解的铁质减少，不利于铁建造的形成（Holland, 1984）。另一种观点认为，尽管该时期铁建造沉积终止了，但深部海水仍为缺氧、硫化海洋环境，铁以硫化物形式发生沉淀，从而阻止了铁建造的形成（Canfield, 1998）。近年来，元古宙中期少量铁建造也陆续被报道，例如我国宣龙式铁建造、下马岭组铁建造、云梦山组铁建造、镜铁山铁矿（Yang et al., 2015, 2024a; Canfield et al., 2018; 张水昌等, 2022; Qiu et al., 2022）。

宣龙式铁矿是我国大型浅海沉积型铁矿床，其中尤以独特的肾状、鲕状矿石等构造为地质学家所瞩目，前人对于宣龙式铁矿开展了大量研究，但长期以来对其形成环境研究薄弱，仍存在争议。前人利用多种地球化学手段，例如铁组分、Re-Os 同位素、铁同位素等，对铁矿石、页岩和白云岩三种岩石开展了研究，进而约束宣龙式铁矿成矿环境。目前主要观点认为宣龙式铁矿为生物成因（朱士兴, 1980; 侯奎等, 1983; 杜汝霖等, 1992; 赵东旭, 1994; 刘志礼等, 1995; 戴永定等, 2003; 李志红等, 2012）。成矿物质来源方面，主要有陆源物质（例如李志红等, 2012; 赵宇, 2016）和海底热液（汤冬杰等, 2015; Lin et al., 2019）两种不同认识。Yang et al. (2024, 2025) 认为铁矿形成于氧化还原分层海洋，源区经历了强烈氧化风化作用。

硅是自然界矿物、岩石、矿床的主要元素之一，但硅的化学性质不活泼，在沉积岩的风化、剥蚀搬运过程中硅同位素基本不发生分馏，因此利用其可以示踪源区（杨俊杰, 2023）。本文将在前人研究的基础上，选择（含铁）石英砂岩和铁矿石开展地球化学和硅同位素对比研究，示踪物质源区和风化程度，进一步深入探讨宣龙式铁矿床形成环境。

# 1 区域地质

华北克拉通约有 38 亿年的历史，经历了多期地质作用改造，例如超大陆的聚合与裂解以及造山运动（翟明国，2011；林倚天等，2019）。华北克拉通陆核稳定，其岩石构成类型多样，产出丰富的矿产资源。区域内的岩浆岩活动较少，以燕山期的酸性花岗岩体侵入为主。刘恒等（2025）认为华北克拉通大部分基底是在新太古代末（约 25 亿年）通过七个微块体的拼合形成的，根据华北克拉通内部高压麻粒岩的发现，复杂的岩石组合和幕式构造热事件，识别出“三个活动带”模型：胶辽吉活动带、晋豫活动带和丰镇活动带，与裂谷伸展（23.5~20 亿年）和俯冲-增生碰撞（20~18 亿年）的构造阶段相关，以形成一个统一的块体。燕辽盆地发育在华北克拉通北缘，可能与 Columbia 超大陆的初始裂解有关，约在 17 亿年前形成裂谷（图 1a）。燕辽盆地产出的沉积岩系包括 18~16 亿年的长城系、16~14 亿年的蓟县系、14~10 亿年的怀来系和 10~8 亿年的青白口系。

长城系沉积于太古宙-古元古代结晶基底上，地层序列包括常州沟组、串岭沟组、团山子组和大红峪组（图 1b）。在中元古代早期，燕辽盆地可能与北部的北海相连，海侵方向为西北或东北方向（Lin et al., 2019）。常州沟组下部以河流相粗砂岩和砾岩为主，上部以滨海-潮间带粉砂岩和砂岩为主，为燕辽盆地的初期发育沉积物。串岭沟组主要由鲕状铁建造（宣龙式铁矿）、白云岩、黑色页岩和砂岩组成，记录了潮间带到潮下低能环境的转变（例如，Li et al., 2015；Lin et al., 2019），团山子组和大红峪组出现大量火山岩可能暗示着盆地裂解的高峰期。常州沟组潮汐动力型碎屑岩下伏的 1673Ma 花岗岩限定了燕山地区常州沟组的底界年龄。串岭沟组为向上增厚的陆棚相页岩，团山子组为潮间带碳酸盐岩，大红峪组主要为潮上带碎屑岩，含少量碳酸盐岩、火山岩和角砾岩（含有 1625Ma 的火山岩夹层）。蓟县系从下至上包括高于庄组滨-浅海相燧石白云岩（包含约 1577Ma 凝灰岩夹层），杨庄组干旱泻湖相紫红色泥质白云岩，雾迷山组浅海相含丰富叠层石和植物化石的白云岩，洪水庄组稳定海底还原环境的含绿磷石页岩和白云岩，铁岭组温暖台地相白云岩和含叠层石白云质灰岩（包含 1437Ma 的凝灰岩夹层）。再向上的下马岭组为潮间带泥沙岩（含有约 1366Ma 和 1380Ma 的凝灰岩层）被归入待建系中。其中串岭沟组被 1638Ma 的辉绿岩墙侵入，雾迷山组被约 1345Ma 的辉绿岩墙侵入，洪水庄组被约 1350Ma 的辉绿岩墙侵入，下马岭

组被约 1320Ma 的基性岩床侵入 (孙逊等, 2024)。青白口系以砂岩和页岩为主, 标志着区域隆升前以硅质碎屑沉积为主的旋回 (Luo et al., 2014; Li et al., 2015; Zhang et al., 2018)。

前人对串岭沟组形成时代进行了制约 (图 1b), 高维等 (2008)、李怀坤等 (2011)、和政军等 (2011) 对侵入密云群的环斑花岗岩进行了年代学研究, 得到其形成时代分别为  $1673 \pm 10\text{Ma}$ 、 $1682 \pm 20\text{Ma}$ 、 $1685 \pm 15\text{Ma}$ , 由此推断其不整合上覆的常州沟组沉积岩形成时代应不早于  $1673\text{Ma}$ 。张旭升等 (2023) 获得鲕状赤铁矿石最年轻碎屑锆石年龄为  $1761.2\text{Ma}$ , 大致限定串岭沟组形成时代应晚于  $1761.2\text{Ma}$ 。此外, 前人获得侵入串岭沟组辉绿岩脉和闪长玢岩脉锆石 U-Pb 年龄分别为  $1638 \pm 14\text{Ma}$  (高林志等, 2009) 和  $1634 \pm 9\text{Ma}$  (张拴宏, 2013), 孙会一等 (2013) 首次获得串岭沟组上部火山凝灰岩中沉积年龄为  $1621 \pm 12\text{Ma}$ , Duan et al. (2018) 获得姜家寨串岭沟组底部砂页岩最年轻碎屑锆石年龄为  $1657.4 \pm 17.4\text{Ma}$ , 限定了串岭沟组的形成下限, 暗示形成时代不早于  $1657\text{Ma}$ 。Ding et al. (2018) 测得北京十三陵地区串岭沟组底部粉砂质泥岩、细粒砂岩最年轻的锆石年龄为  $1673 \pm 44\text{Ma}$ , 表明串岭沟组沉积于该年龄之后。综上所述, 串岭沟组沉积年龄可以限制在 16.4 亿年左右。

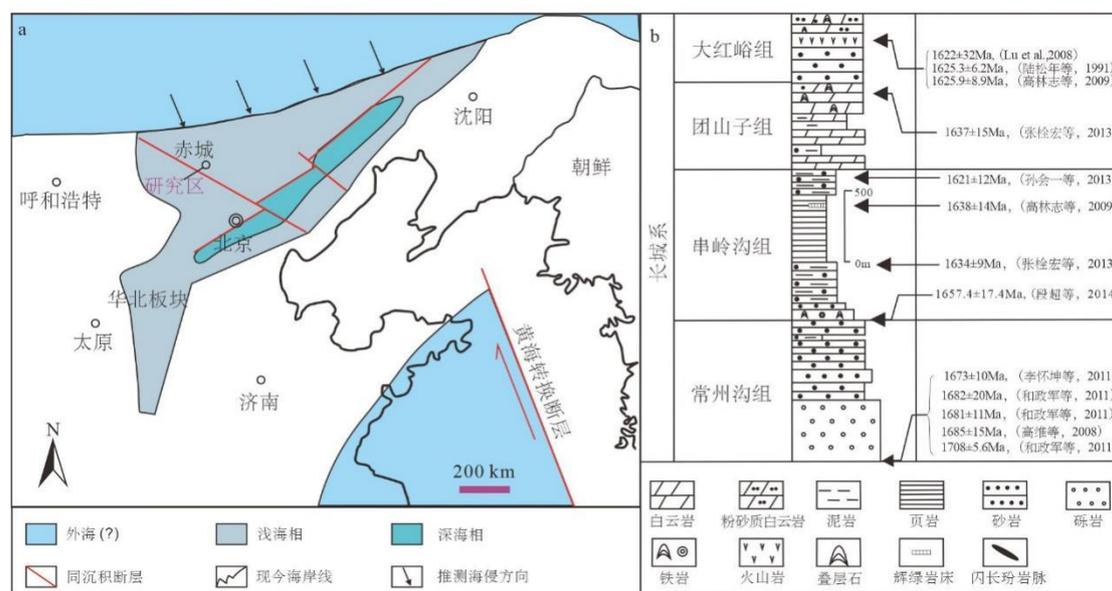


图 1 宣龙式铁矿区域地质图

Fig 1 Regional geological background map of Xuanlong-type iron deposits

a.串岭沟组沉积期间燕辽盆地构造和古地理背景 (据 Li et al., 2015, 有修改); b.华北克拉通长城群地层划分及时代 (Lin et al., 2019)

## 2 矿床地质

宣龙式铁矿主要赋存于串岭沟组之中，串岭沟组主要由页岩、铁矿层、白云岩和石英砂岩组成。串岭沟组在华北克拉通广泛分布，可划分为3个沉积区。东部蓟县、遵化、兴隆、宽城发育黑色厚层页岩。中部地区位于密云-怀柔北部，由厚层叠层石白云岩和泻湖相沉积组成。西部地区位于宣化-张家口地区，串岭沟组明显变薄，以发育铁建造为特征。从区域上看，铁建造向南延伸约154公里，向西延伸约130公里，覆盖面积约3900平方公里。

含矿层主要由4（I-IV）个铁矿层和3个砂页岩夹层组成，其中I、II层为主要的矿层，其他为次要矿层。

I矿层：该矿层的矿石种类主要以鲕状赤铁矿为主，厚度比较稳定，厚度大约2m左右，局部最厚可达5.38m，最薄0.18m，含铁品位比较高，价值也较大。

II矿层：该矿层的矿石种类主要为鲕状赤铁矿，但也可偶见肾状赤铁矿，矿层厚度相较于I矿层不稳定，厚度大约在1m左右，矿石的质量也不如I矿层。

III矿层：该矿层的矿石种类主要为肾状赤铁矿，其厚度最大可达2.45m，平均厚度约为0.63m，矿石的质量比较差，多见低品位矿。

0矿层：该矿层位于I矿层的顶部，层位比较稳定，厚度大约在0.25~0.35m之间，矿石种类主要为鲕状赤铁矿，少见肾状赤铁矿。

此外，在个别矿区的局部地段，在III矿层之下还会出现IV矿层，该矿层的特点是规模比较小，变化比较大，并且矿石的品位均较低。在以上几个矿层中还会夹有有0.8~1.2m厚的石英岩、砂岩、砂质页岩夹层（梁瑞等，2013）。

铁矿石主要以鲕状构造和肾状构造为主，鲕状构造多见于矿带上部，肾状构造见于矿带底部，矿带中部两种构造皆有（图2a），但以鲕状构造为主。鲕粒状赤铁矿手标本主要以钢灰色-红色为主，结构主要为卵型，鲕粒的形态有球形-半球形不等，表面较为光滑，呈现金属-半金属光泽，鲕粒直径大约在0.1mm~0.5mm之间（图2b）。矿物学研究表明，铁矿石中主要为赤铁矿，脉石矿物以石英、绿泥石为主，大部分石英充填在鲕粒之间，也有少部分的鲕粒之间直接接触，鲕粒、石英颗粒之间的胶结物多为含铁泥质。铁质鲕粒的包壳极易剥落，包壳各圈层之间连接紧密，单层厚度极小，同时可以清晰地看见大多数鲕粒的核心与包壳生长环带。

肾状赤铁矿通常被认为是铁质叠层石（朱世兴，1980；侯奎等，1983），形成过程与微生物的群落活动密切相关。其手标本的颜色主要为暗红色至深棕色，具有典型的赤铁矿颜色特征（图 2c）。其表面常呈现出金属光泽或半金属光泽。具有柱状叠层石构造，其顶面呈肾状凸起。矿物组成与鲕状铁矿石类似。

石英砂岩手标本主要以灰色，少量含铁石英砂岩也可见红褐色，通常呈现出典型的砂岩结构，部分可见明显的纹层状构造（图 2d）。



图2 宣龙式铁矿野外照片

Fig 2 Field photos of Xuanlong-type iron deposits

a.宣龙式铁矿野外照片；b.鲕状赤铁矿石；c.肾状赤铁矿石；d.石英砂岩

铁矿石在镜下鲕粒构造极为明显，不仅在胶结物中含有部分石英碎屑（图 3a、c），铁鲕中也存在部分石英碎屑填充（图 3b）。（含铁）石英砂岩在镜下可以明显识别碎屑石英和铁质胶结物，碎屑石英分选和磨圆一般（图 d、e、f）。此外，铁矿石和（含铁）石英砂岩中的碎屑石英磨圆均较差，进一步说明碎屑石英来源于近距搬运。

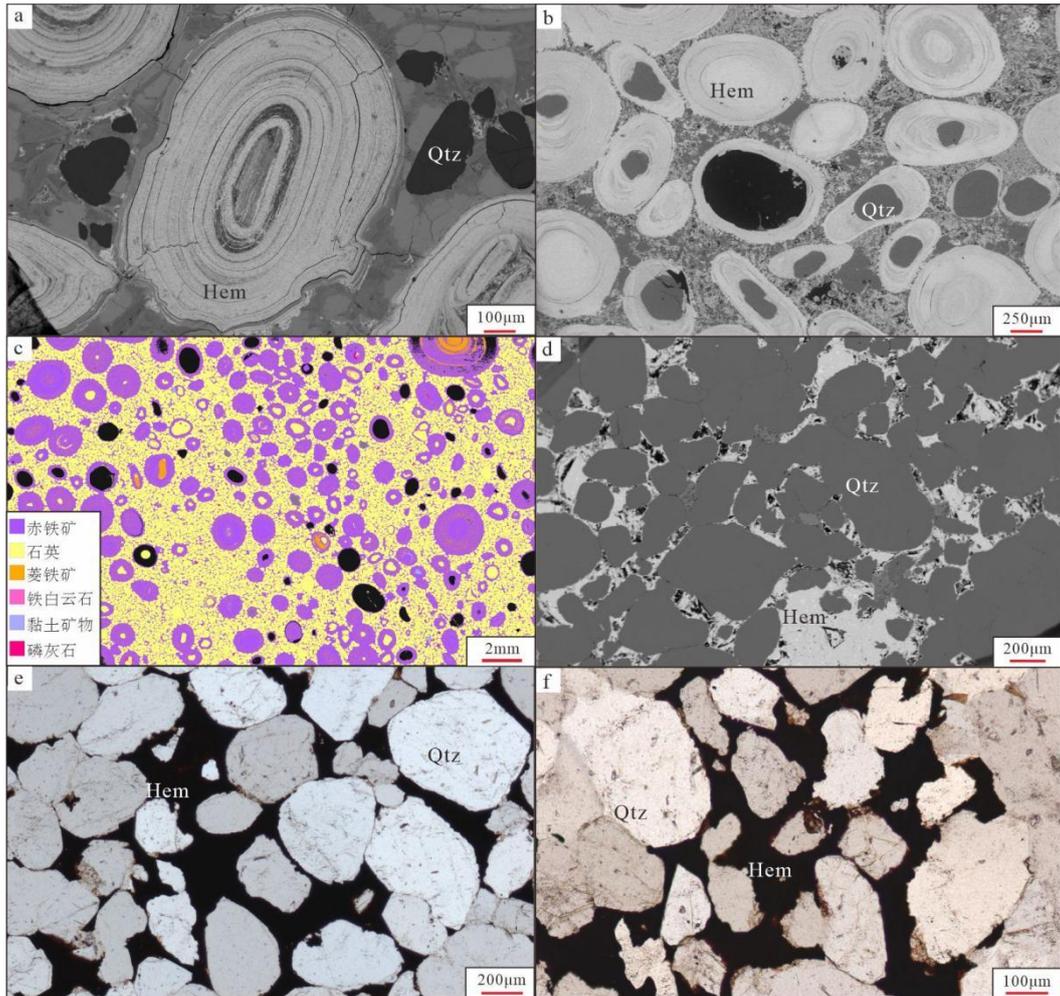


图 3 宣龙式铁矿显微照片

Fig 3 Microscopic photos of Xuanlong-style iron deposit

a. 鲕状铁矿石背散射照片；b. 鲕状铁矿石背散射照片；c. 鲕状铁矿石假彩色图；d. 石英砂岩镜下照片（单偏光）；e. 石英砂岩镜下照片（单偏光）；f. 石英砂岩镜下照片（单偏光）；Hem-赤铁矿，Qtz-石英

## 3 样品采集与测试

### 3.1 样品采集

本次的测试样品产自河北宣化城以北的烟筒山以及东北部的庞家堡，采样坐标分别为 E115°6′17.75″，N40°39′29.59″和 E115°26′38.87″，N40°37′36.52″。我们对 4 件（含铁）石英砂岩开展了地球化学测试，从 4 件（含铁）石英砂岩和 10 件铁矿石中挑选石英单矿物开展了硅同位素测试，并收集了前人地球化学数据。

## 3.2 测试方法

主微量元素元素测试在澳实分析检测（广州）有限公司完成，主量元素利用 XRF 光谱仪测定（AB104L），其样品处理流程：200 目样品 105°C 烘干 12h，称约 1.0g 烘干样品放恒重陶瓷坩埚，1000°C 马弗炉灼烧 2h，冷却称重算烧失量；再称助熔剂、样品、氧化剂放铂金坩埚，1150°C 熔样炉熔融 14min，冷却后取玻璃片备测，精度优于 5%。二价铁采用重铬酸钾滴定法测定（RSD<10%），称取试样 0.1000~0.5000g（称样量视样品的氧化亚铁含量定）于聚四氟坩埚中，加入氢氟酸和硫酸分解样品，重铬酸钾标准溶液滴定氧化亚铁含量。稀土元素采用电感耦合等离子体质谱仪（ELEMENT XRICP-MS）测试，步骤如下：准确称取 0.50g（精确至 0.0001g）石墨坩埚中，加入 5.0g 氟化氢铵，混匀后于马弗炉中低温升至 400°C，保持 0.5h，微开炉门方便 SiF<sub>4</sub> 挥发逸出，加热至 650°C，保持 1h，冷却后取出，备用。将分离硅后的样品灰化后加入 3-5g 过氧化钠，搅匀后表面覆盖层碳酸钠，置于已加热至 700°C 的马弗炉中熔融 15min，取出冷却后置于烧杯中，用热水浸取，洗至烧杯中煮沸 5min，加水至 100mL 左右，用慢速滤纸过滤，用氢氧化钠(1+9)冲洗滤纸 5 次，用纯水洗滤纸 5 次，弃去滤液；用热盐酸(1+2)冲洗沉淀至无色，用纯水洗滤纸 5 次，在滤液中加入 5mL 酒石酸（2mg/mL）以防铈钼等难溶金属元素水解损失，定容至 100mL，采用 10ng/mL 的 <sup>103</sup>Rh 和 <sup>185</sup>Re 溶液作为在线内标溶液，采用氦气吹扫-KED 模式去除氧化物及多原子干扰，上 ICP-MS 测定。

Si 同位素测试在核工业北京地质研究所完成，采用了气体同位素质谱分析法，步骤如下：在制样装置达到 10<sup>-3</sup>Pa 真空条件下，与纯净的五氟化溴在 500~680°C 恒温条件下反应 14 小时。用干冰、酒精、液氮混合冷冻剂将生成的 SiF<sub>4</sub> 纯化、分离、收集，用 MAT253 气体同位素质谱分析样品的 Si 同位素组成。测量结果以 NBS28 为标准，记为 δ<sup>30</sup>Si<sub>IV-NBS28</sub>。分析精度优于±0.1‰。硅同位素标准参考标准为 GBW-04421、GBW-04422 石英标准，其 δ<sup>30</sup>Si 分别是 -0.02±0.10‰ 和 -2.68±0.10‰。

## 4 测试结果

主量元素测试结果见表 1。(含铁)石英砂岩的  $\text{SiO}_2$  含量变化范围比较大, 介于 75.90%~97.95%之间;  $\text{TiO}_2$  的含量比较低且变化范围较小, 介于 0.01%~0.16%之间;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量介于 0.17%~2.09%之间;  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  的变化范围较大, 介于 2.73%~20.88%之间;  $\text{MnO}$  的含量变化范围较小, 介于 0.09%~0.26%之间;  $\text{MgO}$  的含量介于 0.03%~0.35%之间, 变化范围较小;  $\text{CaO}$  的变化范围也较小, 介于 0.02%~0.05%之间。化学蚀变指数 (CIA) 为 52~82; 斜长石蚀变指数 (PIA) 为 75~100; 化学风化指数 (CIW) 为 83~100。此外, 我们收集了前人鲕状铁矿石和肾状铁矿石主量元素测试结果, 计算获得鲕状铁矿石中 CIA 为 74~78; PIA 为 92~98; CIW 为 94~99 (表 1)。肾状铁矿石中 CIA 为 71~85; PIA 为 86~100; CIW 为 91~100 (表 1)。

表 1 宣龙地区含铁石英砂岩和铁矿石主量元素数据测试结果 (wt%)

Table 1 Analysis results of major element (wt%) of (ferruginous) quartz sandstone and iron ores in Xuanlong area.

样品号	样品编号	岩性	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CIA	PIA	CIW
1	YTS-20	含铁石英砂岩	75.90	0.02	0.31	20.88	0.26	0.35	0.05	0.01	0.02	0.02	85	90	90
2	YTS-27	含铁石英砂岩	93.35	0.01	0.17	5.74	0.10	0.07	0.02	0.01	0.02	0.01	76	82	84
3	YTS-50	含铁石英砂岩	85.24	0.03	0.28	11.91	0.25	0.26	0.03	0.00	0.19	0.02	58	100	100
4	YTS-51	含铁石英砂岩	93.06	0.05	2.09	2.73	0.09	0.03	0.04	0.03	1.64	0.03	53	76	95
5	6-117	鲕状铁矿石	8.55	0.10	2.05	76.46	0.18	1.56	0.50	0.01	0.54	0.25	77	98	98
6	6-118	鲕状铁矿石	8.87	0.08	2.12	73.55	0.23	1.78	0.67	0.04	0.55	0.33	74	92	94
7	6-119	鲕状铁矿石	13.00	0.08	2.28	75.03	0.10	0.77	0.47	0.01	0.57	0.23	78	98	99
8	6-120	鲕状铁矿石	8.52	0.08	2.12	73.58	0.23	1.80	0.70	0.03	0.54	0.37	76	94	96
9	6-121	鲕状铁矿石	9.06	0.08	2.11	73.00	0.22	1.74	0.71	0.01	0.54	0.36	77	98	98
10	6-122	鲕状铁矿石	9.84	0.09	2.42	73.68	0.20	1.48	0.61	0.03	0.62	0.31	76	95	96
11	6-124	鲕状铁矿石	9.90	0.11	2.69	79.20	0.20	0.83	0.50	0.01	0.65	0.28	78	98	99
12	6-125	鲕状铁矿石	11.07	0.08	2.09	72.85	0.11	1.14	0.63	0.03	0.56	0.30	75	94	95
13	6-126	鲕状铁矿石	8.64	0.07	2.09	76.97	0.18	1.26	0.76	0.01	0.51	0.43	78	98	98
14	6-127	鲕状铁矿石	21.73	0.13	2.37	65.17	0.04	0.51	0.61	0.01	0.59	0.20	78	98	99
15	6-128	鲕状铁矿石	6.54	0.06	1.77	75.66	0.28	1.97	0.57	0.03	0.42	0.27	76	93	95
16	6-129	鲕状铁矿石	8.45	0.09	1.96	75.52	0.18	1.64	0.67	0.03	0.48	0.34	76	94	95
17	15SCK-5-14	肾状铁矿石	14.02	0.12	2.02	81.19	0.00	0.13	0.30	0.01	0.30	0.25	85	98	98
18	15XY-1-3	肾状铁矿石	13.76	0.09	1.47	76.89	1.33	0.21	0.22	0.04	0.37	0.35	76	89	92
19	15DJG-1-1	肾状铁矿石	14.65	0.19	2.68	78.39	0.06	0.19	0.24	0.03	0.70	0.24	76	95	96
20	15DJG-10-1	肾状铁矿石	10.74	0.16	1.99	83.12	0.06	0.10	0.37	0.00	0.45	0.30	80	100	100
21	15DJG-10-2	肾状铁矿石	11.34	0.14	2.15	81.24	0.21	0.11	0.34	0.02	0.51	0.32	78	96	97
22	14MJY-DCS-5	肾状铁矿石	14.73	0.19	2.43	79.08	0.08	0.19	0.00	0.08	0.78	0.22	71	86	90
23	15PJP-A-1	肾状铁矿石	22.22	0.33	3.23	67.57	0.24	0.15	0.22	0.02	1.04	0.37	74	97	98

注：其中 5-16 号样品数据来自 Yang et al. (2024)，17-23 号样品数据来自于林倚天 (2019)。

计算公式为： $CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)$ ，式中各元素为摩尔百分数 (Nesbitt and Young, 1982)。CaO\* 仅指硅酸盐矿物中的 CaO 含量。本文根据 Fedo et al. (1995) 和 Bock (1998) 提到的方法计算 CaO\*，即根据 Fedo et al. (1995) 的方法去除磷灰石中的 Ca<sup>2+</sup>后，再根据 Bock (1998) 所提的方法进行 CIA 值计算。假定 CaO<sub>R</sub> 代表样品去除掉磷灰石后的 CaO 摩尔含量，当 CaO<sub>R</sub> > Na<sub>2</sub>O 含量时，Na<sub>2</sub>O = CaO\*，当 CaO<sub>R</sub> < Na<sub>2</sub>O 含量时，CaO<sub>R</sub> = CaO\*。

$PIA = (Al_2O_3 + K_2O) / (Al_2O_3 + CaO^* + K_2O + Na_2O) \times 100$ ，各元素均为摩尔百分数 (Fedo et al., 1995)。

$CIW = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O)] \times 100$ ，各元素均为摩尔百分数 (Harnois, 1988)。

稀土元素测试结果见表 2。经球粒陨石标准化后(Sun and McDonough, 1989), 呈现轻稀土相对富集重稀土相对亏损的特征,  $(La/Yb)_N$  变化范围为 3.95~11.60, Eu 可见负异常特征 ( $Eu/Eu^*=0.65\sim 0.71$ )。

表 2 宣龙地区 (含铁) 石英砂岩稀土元素测试结果

Table 2 Analysis results of rare earth elements of the (ferruginous) quartz sandstone in Xuanlong area.

样品号	1	2	3	4
样品编号	YTS-20	YTS-27	YTS-50	YTS-51
La	27.00	9.28	19.40	60.76
Ce	25.00	8.66	16.83	59.31
Pr	19.68	6.42	12.11	44.11
Nd	17.56	5.57	8.99	33.83
Sm	13.73	4.18	4.90	19.48
Eu	7.76	2.41	2.93	10.69
Gd	8.13	3.26	3.80	11.68
Tb	6.95	2.94	3.48	9.63
Dy	5.59	2.44	2.91	7.17
Ho	5.12	2.30	2.65	6.36
Er	4.77	2.24	2.48	5.68
Tm	4.71	2.35	2.35	5.49
Yb	4.59	2.35	2.24	5.24
Lu	4.72	2.36	2.36	5.51
REE	39.77	13.91	23.88	81.34
Eu/Eu*	0.71	0.65	0.67	0.69

注:  $\delta Eu$  所使用的计算公式如下:  $\delta Eu=2 \times Eu_N / (Sm_N + Gd_N)$ ,  $\delta Eu=1$  为无异常,  $\delta Eu>1$  为正异常,  $\delta Eu<1$  为负异常。

硅同位素测试结果见表 3, 4 件含铁石英砂岩的石英单矿物 Si 同位素的变化范围为  $-0.3\text{‰} \sim 0.1\text{‰}$ , 平均值为  $-0.1 \pm 0.14\text{‰}$ ; 5 件鲕状赤铁矿石石英单矿物的 Si 同位素变化范围为  $-0.5\text{‰} \sim -0.1\text{‰}$ , 平均值为  $-0.24 \pm 0.17\text{‰}$ ; 5 件肾状赤铁矿石石英单矿物的 Si 同位素变化范围为  $-0.2\text{‰} \sim -0.3\text{‰}$ , 平均值为  $-0.22 \pm 0.04\text{‰}$ , 与鲕状赤铁矿石中石英单矿物基本一致。

表 3 宣龙地区含铁石英砂岩和铁矿石中石英 Si 同位素测试结果

Table 3 Analysis results of Si isotope of (ferruginous) quartz from quartz sandstone and iron ores in Xuanlong

area.					
样品号	样品编号	样品	岩性	结果/‰	平均值/‰
1	YTS-20	石英	含铁石英砂岩	-0.1	-0.1±0.14
2	YTS-27	石英	含铁石英砂岩	-0.1	
3	YTS-50	石英	含铁石英砂岩	0.1	
4	YTS-51	石英	含铁石英砂岩	-0.3	
6	YTS-38	石英	鲕状铁矿石	-0.1	-0.24±0.17
6	YTS-39	石英	鲕状铁矿石	-0.1	

7	YTS-49	石英	鲕状铁矿石	-0.5	
8	PJB-17	石英	鲕状铁矿石	-0.3	
9	PJB-20	石英	鲕状铁矿石	-0.2	
10	PJB-24	石英	肾状铁矿石	-0.2	
11	PJB-28	石英	肾状铁矿石	-0.3	
12	PJB-31	石英	肾状铁矿石	-0.2	-0.22±0.04
13	PJB-37	石英	肾状铁矿石	-0.2	
14	YTS-37	石英	肾状铁矿石	-0.2	

## 5 讨论

### 5.1 源区风化强度

化学蚀变指数 (Chemical Index of Alteration, CIA) 是评价岩石风化程度的重要指标 (Nesbitt and Young, 1982), 且 CIA 指数不受变质作用的影响。CIA 在 50~65 之间指示风化强度较弱, 在 65~85 之间为中等风化强度, 在 85~100 时表明经历了强烈的风化作用。研究区所采集样品的 CIA 值变化范围较大, 为 53~85。 $K_2O$  含量比较高(0.02~1.64), 表明其经历了显著的钾交代作用(Fedo et al., 1995)。斜长石蚀变指数 (PIA) 通常也用于判断化学风化程度, 但是该指数不受钾交代的影响。成岩过程中铝质粘土矿物 (例如高岭土) 可分解形成伊利石, 或者使斜长石转换成钾长石。本次测试的石英砂岩均具有较高的 PIA 值 (75~100), 表明岩石经历了非常强烈的化学风化作用。Harnois (1988) 提出可利用化学风化指数 (CIW) 判定风化强度。显生宙页岩的 CIW 指数约为 85, 较高的 CIW 值指示强烈的风化作用。而研究区内含铁石英砂岩的 CIW 值均较高 (83~100), 暗示源区经历了强烈的风化作用。此外, 结合前人研究, 计算获得鲕状赤铁矿石 PIA 为 92~98, CIW 为 94~99; 肾状赤铁矿石 PIA 为 86~100, CIW 为 91~100。除石英砂岩和铁矿石外, 串岭沟组页岩和白云岩也具有较高的 PIA 和 CIW 值 (Yang et al., 2025), 暗示整个串岭沟组源区经历了强烈的化学风化作用。此外, 华北克拉通南缘同期崔庄组也经历了显著风化作用, 表明该时期华北克拉通发生了强烈的风化作用 (Yang et al., 2025)。

### 5.2 源区特征

细粒硅质碎屑岩常用于源区分析, Taylor and McLennan (1985) 和 McLennan

and Taylor (1990) 研究认为 REE 能有效的鉴别源区岩石组成。REE 不受成岩作用影响, 在沉积后只有极为微弱的变化, 例如现代墨西哥湾海岸沉积物几乎与其物源区的 REE 组成一样 (Chaudhuri and Cullers, 1979)。本次所测试的 4 件含铁石英砂经球粒陨石标准化后, 显示显著的轻稀土元素相对富集、重稀土元素相对亏损的配分模式 (图 3),  $(La/Yb)_N=3.95\sim 11.60$ , 与花岗质岩石比较类似, 暗示碎屑物质源区为花岗岩。前人研究表明串岭沟组岩石碎屑锆石主要呈现出 25 亿年和 18.5 亿年两个明显的峰值 (刘书琪等, 2022; 张旭升等, 2023), 区域上 18.5 亿年的花岗岩不发育, 而含铁石英砂岩稀土元素配分模式与华北克拉通 TTG 比较相似 (图 4), 进一步暗示碎屑石英主要来自 25 亿年左右华北克拉通地区 TTG。斜长石通常富集 Eu (Bhatia, 1985), 太古宙 TTG 可见 Eu 正异常特征, 而宣龙地区含铁石英砂岩 Eu 的负异常暗示了源区物质在搬运的过程中经历了斜长石的分解。

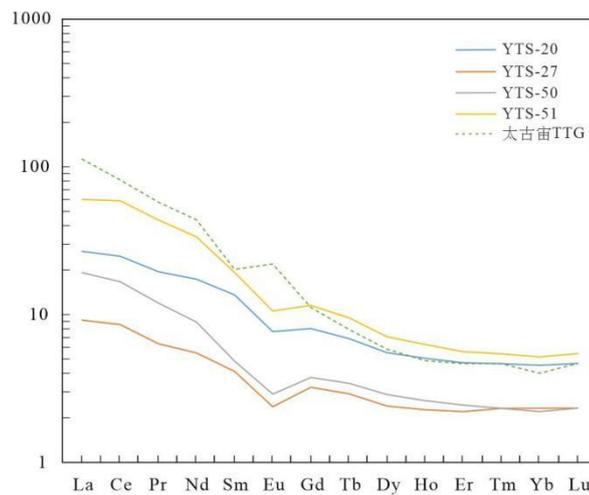


图 4 宣龙地区含铁石英砂岩稀土元素经球粒陨石标准化配分图 (球粒陨石引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig 4 Chondrite-normalized of (ferruginous) quartz sandstone from the Xuanlong-type iron deposit  
(Normalization values of chondrite after Sun and McDonough, 1989)

注: 图中太古宙 TTG 稀土元素数据来源于赵辰等 (2024)。

前人研究表明, 玄武岩  $\delta^{30}\text{Si}$  值变化范围为  $-1.0\text{‰}\sim -0.3\text{‰}$ , 峰值为  $-0.7\text{‰}$ , 平均值为  $-0.63\text{‰}$ , 略低于普通球粒陨石的  $\delta^{30}\text{Si}$  平均值 ( $-0.5\text{‰}$ ); 玄武安山岩  $\delta^{30}\text{Si}$  值变化范围为  $-0.7\text{‰}\sim -0.2\text{‰}$ , 平均值为  $-0.5\text{‰}$ , 玄武安山岩的  $\delta^{30}\text{Si}$  值略高于玄武岩, 可能反映了岩浆分异演化过程中的硅同位素分馏; 花岗岩类岩石的  $\delta^{30}\text{Si}$  值变化于  $-0.4\text{‰}\sim 0.4\text{‰}$  之间, 峰值为  $-0.1\text{‰}$ , 平均值为  $-0.12\text{‰}$  (丁悌平, 1994)。来自热液流体形成的硅质岩  $\delta^{30}\text{Si}$  值通常为负值, 例如前人获得式可布台地区  $\delta^{30}\text{Si}$

变化范围为-1.9‰~-1.2‰ (Yang et al., 2019), 蒋少涌等 (1993) 获得辽宁弓长岭地区  $\delta^{30}\text{Si}$  变化范围为-2.2‰~-0.9‰, 而来自大陆物质风化的  $\delta^{30}\text{Si}$  值变化范围较大 (André et al., 2006)。本次所测试的三类样品中石英砂岩和铁矿中石英的硅同位素基本一致 (图 4), 并且与花岗岩中石英硅同位素也基本一致, 暗示了石英砂岩和铁矿石中的石英碎屑来自于花岗岩的风化产物, 也表明源区经历了强烈的风化作用。

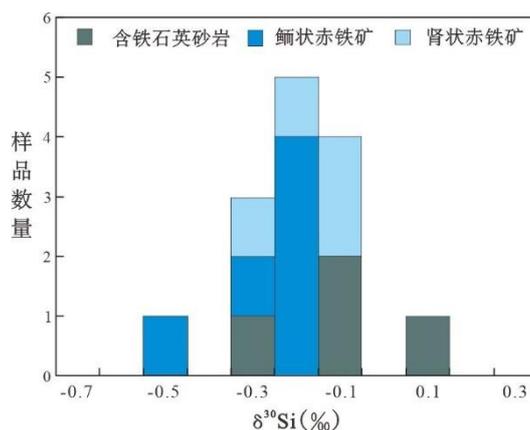


图 5 宣龙地区含铁石英砂岩和铁矿石石英硅同位素组成

Fig 5 Isotopic composition of quartz and silicon of ferruginous quartz sandstone and iron ores in Xuanlong area

### 5.3 对成矿环境的指示

通过能谱分析, 我们发现石英砂岩中 Fe 和 Mn 均存在于胶结物中 (图 5c、d), 石英砂岩中只含有碎屑石英和和铁质胶结物, 且 Mn 和 Fe 呈现正相关, 表明 Mn 和 Fe 发生同步富集 (图 6、图 7)。然而, 铁矿石 MnO 和  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  未见相关性, 表明铁矿石沉淀时, Mn 未发生富集。

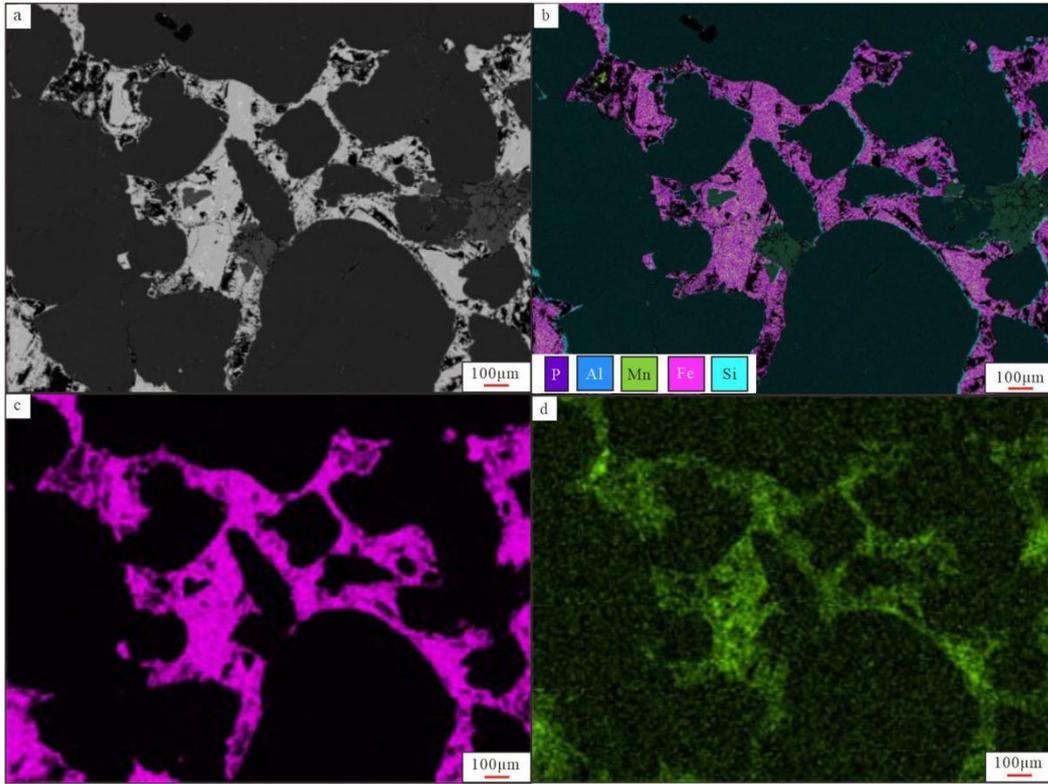


图6 宣龙式铁石英砂岩背散射照片

Fig 6 Backscatter photo of the quartz sandstone from the Xuanlong-type iron deposit

a.石英砂岩背散射照片；b.石英砂岩能谱分析假彩色图；c.能谱分析 Fe 元素富集区域；d.能谱分析 Mn 元素富集区域

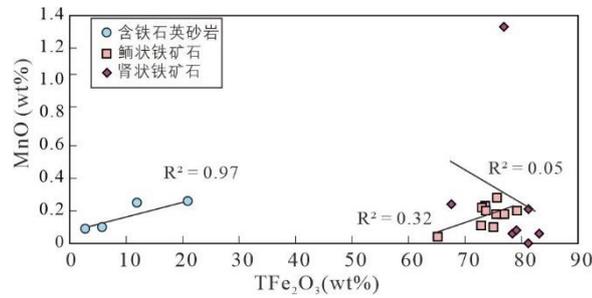


图7 宣龙地区含铁石英砂岩和铁矿石 MnO 和  $TFe_2O_3$  散点图

Fig 7 Scatter diagram of MnO and  $TFe_2O_3$  of ferroquartz sandstone and iron ores in Xuanlong area

野外地质观察表明，石英砂岩赋存于铁矿石之上，形成环境更浅，暗示其形成环境可能更为氧化，而铁矿石主要形成于铁化变层，Mn 氧化物在此发生分解，因此，MnO 和  $TFe_2O_3$  未见相关性。Mn 的氧化还原电位高于 Fe，通常需要自由氧 (Glasby & Schulz, 1999)，这进一步暗示石英砂岩沉积时海洋环境出现了自由氧，海洋表层出现 Mn 发生了氧化，这与前人提出的氧化还原分层海洋模式一致 (Yang et al., 2024)，由于石英砂岩和铁矿石沉积于浅海潮间-潮下带环境 (Li et al., 2015; Lin et al., 2019)，表明其沉积时氧化还原界面很浅。此外，我们通过对串岭沟组上部页岩和白云岩 Fe 同位素和氧化敏感元素研究表明，石英砂岩和铁

矿石沉积后海洋发生了波动氧化,氧化还原界面加深,可能达到浪基面附近(Yang et al., 2024),这可能导致了宣龙式铁矿沉积终止。国内外多个团队通过对我国华北克拉通元古宙中期沉积的高于庄组(例如 Zhang et al., 2018; Shang et al., 2019)、铁岭组(Hardisty et al., 2017; Wei et al., 2021)、下马岭组(例如 Tang et al., 2020)的研究,发现在 15.7~15.6、14.4~14.3 和 14~13.6 亿年海洋存在明显增氧现象,表明中元古代海洋发生了多期脉动式氧化事件,阻碍了铁建造大量沉积。

## 6.结论

本文结合前人研究,对宣龙式铁矿(含铁)石英砂岩和铁矿石开展了地球化学和硅同位素研究,取得的主要认识如下:

(1) 华北克拉通宣龙式铁矿及其围岩均显示很高的 CIA (53~82)、PIA (75-100)、CIW (83-100) 值,表明其源区经历了强烈的风化作用。

(2) 通过稀土元素和硅同位素研究,我们认为宣龙式铁矿(含铁)石英砂岩和铁矿石中石英碎屑颗粒可能主要来源于华北克拉通太古宙 TTG 风化。

(3) 华北克拉通宣龙式铁矿形成后大气和海洋均发生了氧化,结合前人研究,暗示中元古代发生了多期氧化事件,其阻碍了铁建造大量沉积。

致谢:感谢澳实分析检测(广州)有限公司和核工业北京地质研究所相关工作人员在样品测试分析方面提供的帮助,感谢两位匿名审稿人提出的宝贵意见。

## 参考文献

- André, L., Cardinal, D., Alleman, L.Y., et al., 2006. Silicon isotopes in 3.8 Ga West Greenland rocks as clues to the Eoarchaean supracrustal Si cycle. *Earth and Planetary Science Letters* 245, 162-173. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.02.046>
- Bhatia MR. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mud rocks: provenance and tectonic control. *Sedimentary Geology*, 45: 97-113. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(85\)90025-9](https://doi.org/10.1016/0037-0738(85)90025-9)
- Bock, B., McLennan, S.M., Hanson, G.N., 1998. Geochemistry and provenance of the Middle Ordovician Austin Glen Member (Normanskill Formation) and the Taconian Orogeny in New England. *Sedimentology*, 45: 635-655. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.1998.00168.x>
- Canfield, D.E., 1998. A New Model for Proterozoic Ocean Chemistry. *Nature*, 396: 450-453. <https://doi.org/10.1038/24839>
- Canfield, D.E., Zhang, S., Wang, H., et al., 2018. A Mesoproterozoic Iron Formation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(17): 3895-3904. <https://doi.org/10.1073/pnas.1720529115>
- Chaudhuri, S., Cullers, R.L., 1979. The Distribution of Rare-earth Elements in Deeply Buried Gulf Coast Sediments. *Chemical Geology*, 24(3-4): 327-338. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(79\)90131-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(79)90131-1)
- Fedo, C.M., Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1995. Unraveling the Effects of Potassium Metasomatism in Sedimentary Rocks and Paleosols, with Implications for Paleoweathering Conditions and Provenance. *Geology*, 23: 921-924. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0921:UTEOPM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0921:UTEOPM>2.3.CO;2)
- Glasby, G., Schulz, H. D., 1999. Eh pH diagrams for Mn, Fe, Co, Ni, Cu and As under seawater conditions: Application of two new types of Eh pH diagrams to the study of specific problems in marine geo-chemistry. *Aquatic Geochemistry*, 5, 227– 248. <https://doi.org/10.1023/A:1009663322718>
- Hardisty, D. S., Lu, Z.L., Bekker, A., et al., 2017. Perspectives on Proterozoic Surface Ocean Redox from Iodine Contents in Ancient and Recent Carbonate. *Earth and Planetary Science Letters*, 463: 159-170. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.01.032>
- Harnois, L., 1988. The CIW Index: A New Chemical Index of Weathering. *Sedimentary Geology*, 55: 319-322. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(88\)90137-6](https://doi.org/10.1016/0037-0738(88)90137-6)
- Holland, H., 1984. *The Chemical Evolution of the Atmosphere and Oceans*. Princeton: Princeton University Press. <https://doi.org/10.1515/9780691220239>
- Li, C., Planavsky, N.J., Love, G.D., et al., 2015. Marine Redox Conditions in the Middle Proterozoic Ocean and Isotopic Constraints on Authigenic Carbonate Formation: Insights from the Chuanlinggou Formation, Yanshan Basin, North China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 150: 90-105. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.12.005>
- Lin, Y.T., Tang, D.J., Shi, X.Y., et al., 2019. Shallow-marine Ironstones Formed by Microaerophilic

- Iron-oxidizing Bacteria in Terminal Paleoproterozoic. *Gondwana Research*, 76: 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2019.06.004>
- Luo, G.M., Junium, C.K., Kump, L.R., et al., 2014. Shallow Stratification Prevailed for 1700 to 1300 Ma Ocean: Evidence from Organic Carbon Isotopes in the North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 400: 219–232. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.05.020>
- McLennan, S.M., Taylor, S.R., McCulloch, M.T., et al., 1990. Geochemical and Nd-Sr Isotopic Composition of Deep-sea Turbidites: Crustal Evolution and Plate Tectonic Associations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54: 2015-2050. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90269-Q](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90269-Q)
- Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1984. Prediction of Some Weathering Trends of Plutonic and Volcanic Rocks Based on Thermodynamic and Kinetic Considerations. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, (84): 90408-3. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90408-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90408-3)
- Qiu, Y.F., Qin, L.P., Huang, F., et al., 2022. Early Prosperity of Iron Bacteria at the end of the Paleoproterozoic Era. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2022GL097877>
- Shang, M.H., Tang, D.J., Shi, X.Y., et al., 2019. A Pulse of Oxygen Increase in the Early Mesoproterozoic Ocean at ca. 1.57-1.56 Ga. *Earth and Planetary Science Letters*, 527: 115797. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115797>
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313-345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publishers, Oxford. <https://doi.org/10.1086/629067>
- Tang, D. J., Ma, J. B., Shi, X. Y., et al., 2020. The Formation of Marine Red Beds and Iron Cycling on the Mesoproterozoic North China Platform. *American Mineralogist*, 105(9): 1412-1423. <https://doi.org/10.2138/am-2020-7406>
- Wei, W., Frei, R., Kläbe, R., et al., 2021. A transient swing to higher oxygen levels in the atmosphere and oceans at ~1.4 Ga. *Precambrian Research*, 354: 106058. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.106058>
- Yang, X.Q., Zhang, Z.H., Duan, S.G., et al, 2015. Petrological and Geochemical Features of the Jingtieshan Banded Iron Formation (BIF): A Unique Type of BIF from the Northern Qilian Orogenic Belt, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 1218-1234. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.03.024>
- Yang, X.Q., Mao, J.W., Jiang, Z.S., et al., 2019. The Carboniferous Shikebutai Iron Deposit in Western Tianshan, Northwestern China: Petrology, Fe-O-C-Si Isotopes, and Implications for Iron Pathways. *Economic Geology*, 114(6), 1207–1222. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4681>
- Yang, X.Q., Mao, J.W., Li, R.X., et al., 2024. Fluctuating Oxygenation and Dynamic Iron Cycling in the Late Paleoproterozoic Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 626: 118554. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118554>

- Yang, X.Q., Yang, G.W., Li, C., et al., 2025. Pulse of Intense Oxidative Weathering during the Latest Paleoproterozoic. *Geology*, 53(1): 78-82. <https://doi.org/10.1130/G52373.1>
- Zhang, K., Zhu, X., Wood, R.A., et al., 2018. Oxygenation of the Mesoproterozoic Ocean and the Evolution of Complex Eukaryotes. *Nature Geoscience*, 11: 345-350. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0111-y>
- 戴永定, 宋海明, 沈继英, 2003.河北宣龙铁矿化石细菌. *中国科学:地球科学*, 33(8): 751-759.
- 丁悌平, 1994.硅同位素地球化学. 地质出版社.
- 杜汝霖, 刘志礼, 1992.冀西北长城纪宣龙式铁矿层中微体植物化石的发现及其意义. *地质论评*, 38(2): 184-189
- 侯奎, 陈志明, 于洁, 1983.宣龙铁矿矿石组构特征及蓝藻对铁的富集作用. *地质科学*, (03): 246-250.
- 蒋少涌, 丁悌平, 万德芳, 等, 1993. Silicon Isotopic Compositions of Archean Banded Si-Fe Formation (BIF) in the Gongchangling Ore Deposit, Liaoning Province, China. *Science in China, Ser. B*, (04): 482-489.
- 梁瑞, 张秀云, 赵军, 等, 2013.“宣龙式”铁矿地质特征及其成因分析. *华北国土资源*, (01): 135-140.
- 李志红, 朱祥坤, 2012.河北省宣龙式铁矿的地球化学特征及其地质意义. *岩石学报*, 28(09): 2903-2911.
- 林倚天, 2019.华北地台古元古代末铁岩: 成因机制与古海洋意义(博士学位论文).北京: 中国地质大学, 125-133.
- 刘恒, 刘磊, 张德贤, 等, 2025.新太古代-古元古代熊耳山地区的岩浆作用与大地构造意义. *地球科学*, 50(2): 667-686.
- 刘书琪, 祝禧艳, 苏文博, 等, 2022.华北燕辽地区串岭沟组黑色页岩对中元古代早期海水氧化还原环境的制约. *岩石学报*, 38(06): 1667-1684.
- 刘志礼, 刘雪娴, 李鹏富, 等, 1995. 宣龙式铁矿生物标志物(烷烃)的研究. *地质学报*, 69(2): 138-145.
- 孙逊, 刘超辉, 段瑞涵, 2024.华北克拉通东缘新元古代早期基性岩床的时代及其地质意义: 来自锆石学的证据. *地球科学*, 49(9): 3122-3139.
- 汤冬杰, 史晓颖, 刘典波, 等, 2015.华北古元古代末鲕铁岩: Columbia 超大陆裂解初期的沉积响应. *地球科学-中国地质大学学报*, 40(2): 290-304.
- 翟明国, 2011.克拉通化与华北陆块的形成. *中国科学:地球科学*, 41(08): 1037-1046.
- 赵辰, 王笑, 刘锦, 等, 2024.阴山地块固阳地区新太古代 TTG 片麻岩成因及构造意义: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Lu-Hf 同位素约束. *岩石学报*, 40(11): 3465-3483.
- 赵冬旭, 1994.宣龙铁矿铁质鲕粒的显微结构及成因. *地质科学*, 29(1): 71-77.
- 杨俊杰, 2023.新疆阿尔泰克兰多金属矿集区成矿规律与成矿预测(硕士学位论文).西安: 长安

大学,84.

张水昌, 王华建, 王晓梅, 等, 2022. 中元古代增氧事件. 中国科学:地球科学, 52(1): 26-52.

张旭升, 杨秀清, 赵军, 等, 2023. 华北克拉通宣龙式铁矿锆石 U-Pb 年龄及其对矿床成因的制约. 地质通报, 42(1): 13.

朱士兴, 1980. 河北宣龙区的铁质叠层石及其意义. 中国地质科学院天津地质矿产研究所文集(1). [出版者不详]. 26.