

冀北大乌苏南沟铁矿床太赫兹时域光谱特征

侯朝宗¹, 李珊珊^{1*}, 苗群峰², 么丝嘉¹, 滕卓尔¹,
章晶晶³, 王英九¹, 贾中龙¹, 黄昊翀¹, 郑志远¹

1. 地质过程与成矿预测全国重点实验室, 深时数字地球前沿科学中心, 中国地质大学(北京), 北京 100083

2. 河北省地质矿产勘查开发局第四地质大队(河北省水源涵养研究中心), 河北承德 067000

3. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

摘要: 太赫兹时域光谱技术具有矿物识别、快速定量分析和高灵敏度特性。本文针对华北克拉通冀北地区大乌苏南沟铁矿床典型矿石, 及其矿石矿物、脉石矿物进行了岩相学与太赫兹时域光谱分析。研究发现, 不同类型矿石在太赫兹波段表现出明显差异。钒钛磁铁矿较铁磷矿具有更显著的振幅衰减与时间延迟以及强吸收特征。磁铁矿、绿泥石、斜长石和黄铁矿在太赫兹波段吸收系数和折射率具有不同的光谱特征, 这些差异主要受矿物结构和含量控制。磁铁矿的吸收系数与铁含量呈显著正相关, 绿泥石吸收系数与折射率随其含量增加而升高, 斜长石吸收系数受共生矿物组合影响, 黄铁矿具有高折射率、较低吸收系数和振幅强度。研究表明, 太赫兹时域光谱技术能够有效识别典型矿石及其矿石矿物、脉石矿物, 为铁矿床深部勘查与矿体圈定提供了一种新的检测手段。

关键词: 太赫兹时域光谱; 华北克拉通; 钒钛磁铁矿; 勘查技术

中图分类号: P611;P618.31

收稿日期: 2025-10-30

Terahertz Time-Domain Spectroscopic Exploration of the Dawusunangou Iron Deposit

HOU Chaozong¹, LI Shanshan^{1*}, MIAO Qunfeng², YAO Sijia¹, TENG Zhuoer¹, ZHANG Jingjing³,
WANG Yingjiu¹, JIA Zhonglong¹, HUANG Haochong¹, ZHENG Zhiyuan¹

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Frontiers Science Center for Deep-time Digital Earth, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Fourth Geological Brigade of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration (Hebei Provincial Water Conservation Research Center), Chengde Hebei 067000, China

3. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract Terahertz time-domain spectroscopy offers advantages in mineral identification, rapid quantitative analysis, and high sensitivity. In this study, petrographic observation and terahertz time-domain spectroscopic analysis were conducted on typical ores, together with their ore minerals and gangue minerals, from the Dawusunangou iron deposit in northern Hebei, North China Craton. The results show that different types of ores exhibit distinct differences in the terahertz band. Compared with Fe-P ores, V-Ti magnetite ores show more pronounced amplitude attenuation, time delay, and strong absorption characteristics. Magnetite, chlorite, plagioclase, and pyrite exhibit different spectral characteristics in absorption coefficient and refractive index in the terahertz band, and these differences are mainly controlled by mineral structure and content. The absorption coefficient of magnetite is significantly positively correlated with Fe content; the absorption coefficient and refractive index of chlorite increase with increasing chlorite content; the absorption coefficient of plagioclase is affected by coexisting mineral assemblages; and pyrite is characterized by a high

基金项目: 国家自然科学基金(42521005); 中国地质调查局华北科技创新中心人才培育基金(2024HBPJ-G03); 河北省地矿局项目(13000025P003294103391); 北京科学技术协会青年人才托举工程(BYESS2024122); 中央高校基本科研业务专项项目(2-9-2023-05)

作者简介: 侯朝宗(2004—), 男, 本科生, 地质学专业。E-mail: houchaozong1023@163.com, ORCID: 0009-0009-3518-1044

***通信作者简介:** 李珊珊(1991—), 女, 高级实验师, 博士生导师, 主要从事矿床学研究。E-mail: lishanshan199811@163.com, ORCID: 0009-0006-4705-0672

refractive index, relatively low absorption coefficient, and strong amplitude intensity. The results indicate that terahertz time-domain spectroscopy can effectively identify typical ores, together with their ore minerals and gangue minerals, providing a new detection method for deep exploration and orebody delineation of iron deposits.

Keywords ■ Terahertz time-domain spectroscopy; North China Craton; Vanadium-Titanium Magnetite ■ Exploration Technology

0 引言

目前我国铁矿资源勘查面临储量大而富矿少、贫矿多且难选、勘查深度浅等挑战，易被工业利用的优质富铁矿资源日益紧缺，深部找矿勘查仍具有较大的潜力（赵立群等，2020）。在勘查技术体系中，地球物理方法（航磁、地磁、重力、电磁和地震勘探等），尤其是磁力勘探，仍是我国铁矿找矿的有效手段，在矿产勘查中发挥了重要作用（姜德波等，2008；王赞等，2025）。中国约 80% 的铁矿床的发现均通过航磁异常分析。尽管该勘探技术对磁铁矿等强磁性矿物响应明显，但对一些弱磁性或非磁性矿物识别能力有限，且磁异常解释存在多解性与构造干扰问题，导致其深部预测精度受限（Liu et al., 2018）。因此，探索一种适用于低含量弱磁性矿石识别的技术，对深部矿体的识别与定位具有重要意义。

太赫兹时域光谱技术作为一种新兴的光谱探测手段，与 X 射线荧光光谱、扫描电子显微镜、拉曼光谱等传统物理表征方法相比，该技术具有高效快速、低损伤、强穿透性和指纹性显著等优势，近年来已逐步应用于地质学矿物识别、含水量分析等研究（Zhang et al., 2024b）。太赫兹波段对矿物晶格结构极为敏感，能够精确识别矿物中的结构水、吸附水及其他赋存状态的水分，并用于揭示矿物相特征及其水态动态变化（Li et al., 2023b; Huang et al., 2025）。已有研究表明，太赫兹时域光谱技术可通过测定矿物的吸收系数、折射率等光学参数，实现对典型金属矿物的定性区分与定量分析，有效区分不同类型的含铁矿物（Zhang et al., 2024a; Zhang et al., 2024b）。因此，太赫兹时域光谱技术作为一种新兴的光谱探测手段，为铁矿床的矿物类型识别、成分分析及深部找矿预测提供了新的技术路径与支撑。

大乌苏南沟铁矿床位于华北克拉通北缘大庙斜长杂岩体中，是典型的岩浆型钒钛磁铁矿床。随着浅部矿产资源的逐步消耗，矿区找矿工作已由露头与浅部矿体向深部隐伏矿体转移。然而深部复杂的地质条件使得盲矿体识别难、空间形态圈定难、精细化手段缺乏等问题日益凸显（张立剑等，2025）。尤其是在深部找矿过程中，传统磁法等地球物理方法易受浅部干扰、地形效应及复杂地质条件的共同影响，对深部弱异常的分辨能力有限，反演解释中多解性问题难以有效规避，从而制约了对目标矿体空间位置及形态的识别与约束（袁桂琴等，2011）。该矿床不仅发育典型的深部隐伏矿体，而且具有显著的垂直矿化分带特征，矿石矿物与蚀变矿物关系复杂（孙静等，2009；Li et al., 2019）。本文通过太赫兹时域光谱技术，对大乌苏南沟铁矿床典型矿石，及其矿石矿物和脉石矿物开展岩相学和太赫兹时域光谱分析，旨在探讨不同类型矿石以及磁铁矿、绿泥石、斜长石、黄铁矿等矿物的太赫兹响应规律。

1 研究区地质特征

1.1 区域地质背景

大乌苏南沟铁矿床位于华北克拉通北缘，区域上处于华北地台北缘燕山台褶带和内蒙地轴交接地带的承德大庙—黑山一带，形成时代大约 1.8~1.7 Ga（白雪山等，2018；张招崇等，2021；Li et al., 2019; Li et al., 2023a; Qiu et al., 2024a）。区内的地层主要为新太古界变质岩系，古元古界变质深成岩类、中上元古界、中生界火山及陆相碎屑沉积岩均有分布。大乌苏南沟钒钛磁铁矿受红石砬—大庙的深断裂和大庙斜长杂岩体控制（图 1）。大庙斜长岩杂岩体是我国唯一的元古宙斜长岩体，平面形态呈三角形，面积约 90km²，杂岩体主要由斜长岩、苏长岩、辉长岩、纹长二长岩和花岗岩组成，呈侵入接触关系（孙静等，2009；Li et al., 2019）。大庙斜长岩杂岩体赋存有丰富的钒钛磁铁矿—磷灰石矿床，目前已发现黑山铁矿、

黑山东大洼矿段、大乌苏南沟铁矿等三处超亿吨大型矿床以及三处中型矿床和多处小型矿点（赵向奎，2020）。

1.2 矿床地质特征

矿区出露地层主要为侏罗系下花园组及第四系全新统。矿床位于斜长岩体，构造位置处于大庙压扭性构造带中段，该构造带总体呈 NE 向展布。矿体的空间展布和产出受 NE 向断裂构造控制（图 1）。成矿后构造活动较为强烈，以压扭性逆断层为主（孙静等，2009；白雪山等，2018）。从垂向分布特征看，矿体具有典型的矿化分带，矿体形态以脉状和似层状为主，局部表现出分枝、复合、膨胀与狭缩等特征，部分矿体沿走向和倾向连续性较好（盛恭勇等，2017）。矿体总体走向 NE18°，倾向 SE，倾角约 30°。浅部矿体多呈脉状产出，以铁磷矿化为主，磷含量相对较高；向深部过渡，矿体逐渐转变为稳定的似层状钽钛磁铁矿体。区内主要矿石类型为橄榄苏长岩型、斜长岩型以及辉石角闪石岩型。浅部与深部矿体差异较大，浅部矿体以灰绿色铁磷矿石为主，地表出露较多，矿石矿物有磁铁矿和磷灰石；深部矿体以黑绿色钽钛磁铁矿矿石为主，矿石矿物以磁铁矿为主。矿石构造主要为稠密浸染状构造以及稀疏浸染状构造。矿石金属矿物主要为磁铁矿、钛铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿以及少量黄铜矿。脉石矿物主要为斜长石、角闪石、紫苏辉石、透辉石，少量绿泥石、阳起石、黑云母、绿帘石、钙铝榴石、磷灰石。

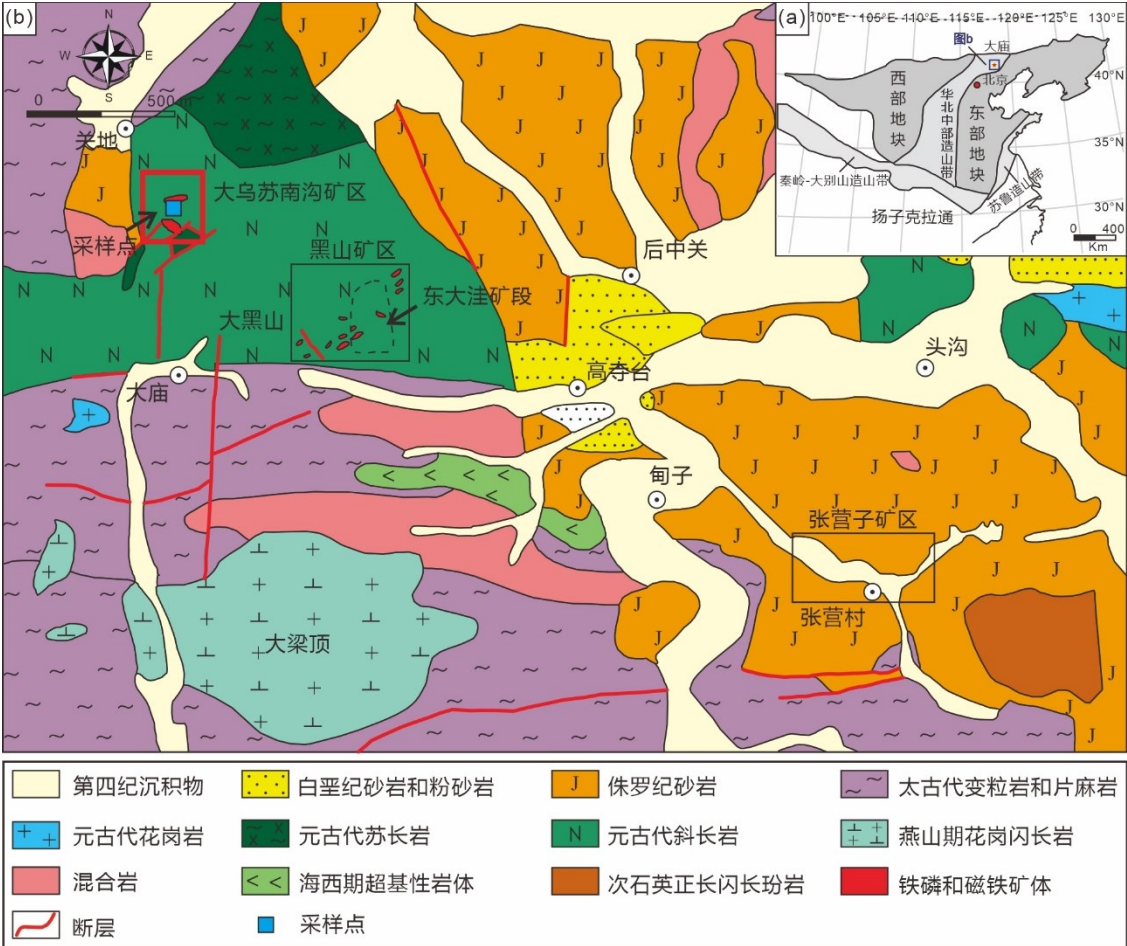


图 1 大乌苏南沟铁矿区域地质简图（据 Zhao et al., 2005 和 Li et al., 2019 修编）

Fig.1 Regional geological map of the Dawusunangou iron deposit area (modified after Zhao et al., 2005; Li et al., 2019)

2 岩相学

2.1 辉长苏长岩型铁磷矿

辉长苏长岩型铁磷矿，岩石新鲜面呈灰白色，中—粗粒半自形粒状结构，块状构造（图 2a），矿石矿物主要为磁铁矿（~10%）、钛铁矿（~10%）以及黄铁矿，脉石矿物为斜长石（~35%）、紫苏辉石（~10%）、透辉石（~10%）、绿泥石（~10%）以及磷灰石（~10%）。黄铁矿为脉状穿插结构，不规则充填于斜长石、磷灰石等周边矿物裂隙之中。磁铁矿多为半自形—他形粒状结构，大部分磁铁矿中可见钛铁矿出溶。钛铁矿与磁铁矿呈格架状、叶片状紧密连生，形态不一，大小不同（图 3a）。磷灰石多呈长短不一的针柱状。

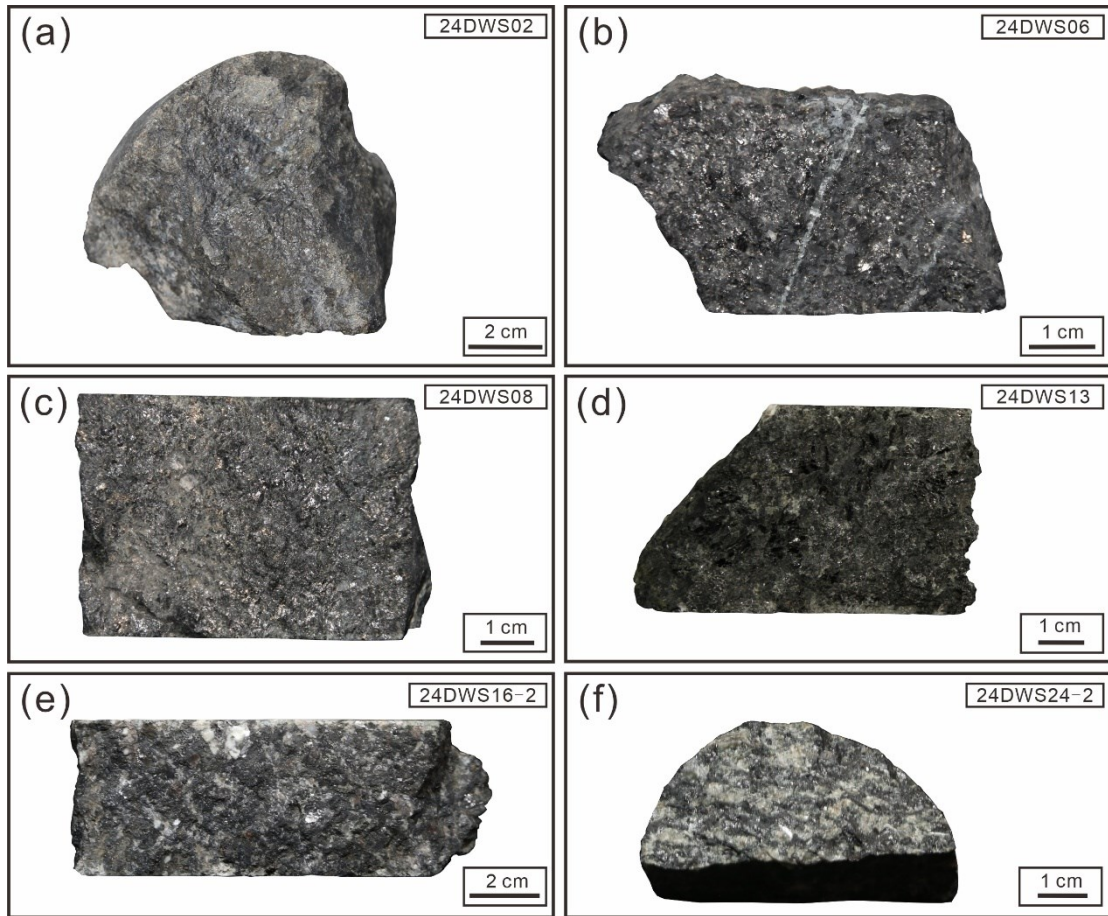


图 2 大乌苏南沟铁矿石手标本照片

(a)辉长苏长岩型铁磷矿；(b)橄榄辉长岩型钒钛磁铁矿；(c)橄榄苏长岩型钒钛磁铁矿；
(d)辉石岩型钒钛磁铁矿；(e)辉长苏长岩型钒钛磁铁矿；(f)辉长岩型铁磷矿

Fig.2 Specimen photographs of iron ore from the Dawusunangou iron deposit

(a) Gabbro-syenite type iron-phosphorus ore;(b) Olivine gabbro type vanadium-titanium magnetite ore;
(c) Olivine syenite type vanadium-titanium magnetite ore;(d) Pyroxenite type vanadium-titanium magnetite ore;
(e) Gabbro-syenite type vanadium-titanium magnetite ore;(f) Gabbro type iron-phosphorus ore

2. 2 橄榄辉长岩型钒钛磁铁矿

辉长岩型钒钛磁铁矿，岩石新鲜面呈灰黑色，中—粗粒粒状结构，块状构造（图 2b），可见浸染状黄铁矿、黄铜矿与磁铁矿。矿石矿物主要为磁铁矿（~25%）以及钛铁矿（~15%），脉石矿物为透辉石（~25%）、橄榄石（~15%）、角闪石（~5%）、紫苏辉石（~5%）、绿泥石（~5%）、斜长石、磷灰石以及镁铝尖晶石。黄铁矿为自形晶结构，其中包含黄铜矿以及镍黄铁矿。磁铁矿为半自形—他形粒状结构，与钛铁矿呈叶片状共生，并且包裹黄铁矿等金属矿物（图 3b）。钛铁矿主要环绕黄铁矿或在磁铁矿裂隙中生长。角闪石被磁铁矿交代后形成假象，周围被角闪石环绕，最外围多绿泥石化（图 3c,d）。

2. 3 橄榄苏长岩型钒钛磁铁矿

橄榄苏长岩型钒钛磁铁矿，岩石新鲜面呈灰绿色，中—粗粒粒状结构，块状构造（图 2c），可见黄铁矿，断面有长石蚀变黄绿色带。矿石矿物主要为磁铁矿（~25%）以及钛铁矿（~15%），脉石矿物为橄榄石（~25%）、角闪石（~10%）、斜长石（~6%）、绿泥石（~5%）、紫苏辉石（~5%）、滑石（~4%）、蛇纹石以及镁铝尖晶石。磁铁矿为半自形—他形粒状结构，与钛铁矿呈叶片状共生，可见尖晶石细脉，黄铁矿充填在细脉空隙，钛铁矿主要在磁铁矿裂隙中生长或呈现假象穿插于磁铁矿中（图 4a）。磷灰石多呈针柱状，可见自形六边形，粒径约 0.2–0.9 mm。

2.4 辉石岩型钒钛磁铁矿

辉石岩型钒钛磁铁矿，岩石新鲜面呈灰黑色，中—粗粒粒状结构，块状构造（图 2d），可见黄铁矿与黄铜矿。矿石矿物主要为磁铁矿（~5%），脉石矿物为透辉石（~40%）、黑云母（~35%）、磷灰石（~10%）、角闪石（~5%）以及金红石。磁铁矿为他形粒状结构，与钛铁矿呈格架状、叶片状共生，空隙生长有黄铁矿，钛铁矿呈现假象穿插于磁铁矿中（图 4b）。磷灰石多呈针柱状，可见自形六边形，粒径约 0.2–0.9 mm。

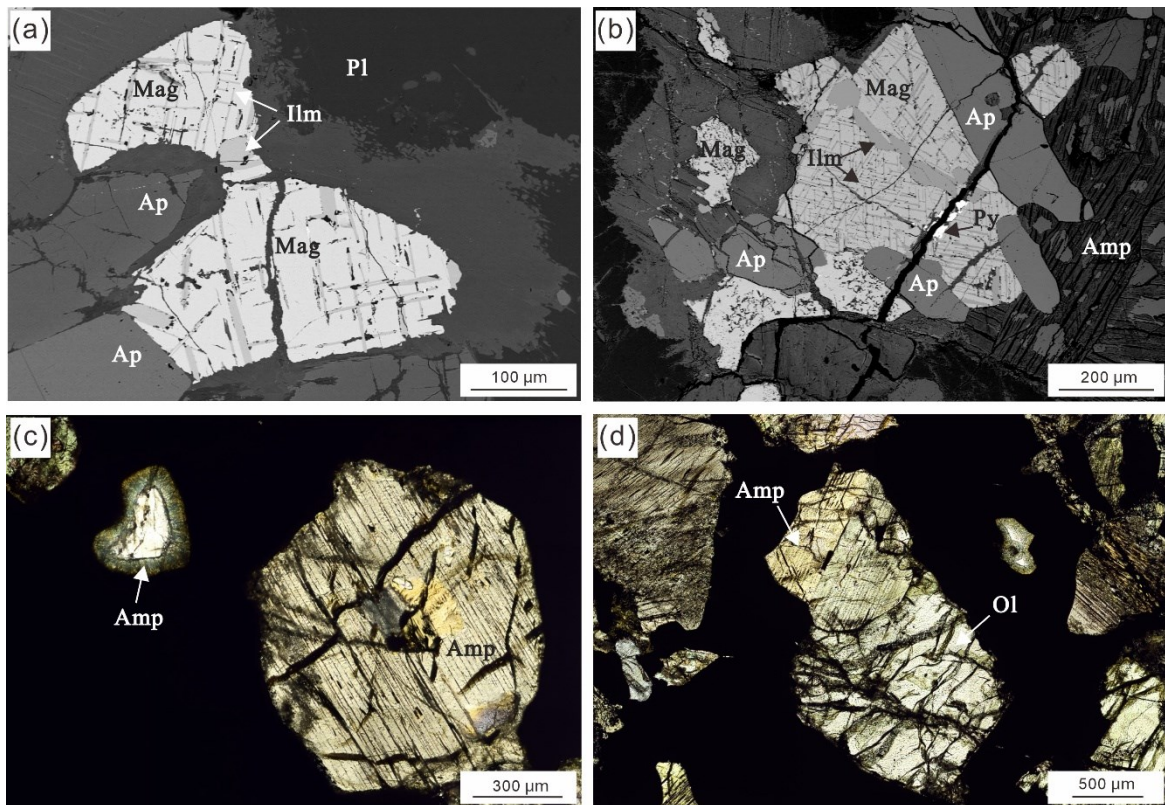


图 3 辉长苏长岩型铁磷矿和橄榄辉长岩型钒钛磁铁矿显微岩相学照片

(a)磁铁矿与钛铁矿呈格架状共生；(b)磁铁矿包裹黄铁矿；

(c)角闪石被磁铁矿交代后形成假象；(d)角闪石橄榄石化；

Mag-磁铁矿；Ilm-钛铁矿；Py-黄铁矿；Pn-镍黄铁矿；Pl-斜长石；Amp-角闪石；Ol-橄榄石；Ap-磷灰石

Fig.3 Microphotographs of gabbro-monzonite-type iron-phosphorus ore and olivine gabbro-type vanadium-titanium magnetite

(a) Magnetite and ilmenite occur in a lattice-like intergrowth;(b) Magnetite encloses pyrite;

(c) Amphibole is replaced by magnetite, forming a pseudomorph;(d) Amphibole is olivinized;

Mag – Magnetite; Ilm – Ilmenite; Py – Pyrite; Pn – Pentlandite; Pl – Plagioclase; Amp – Amphibole; Ol – Olivine; Ap – Apatite

2.5 辉长苏长岩型钒钛磁铁矿

辉长苏长岩型钒钛磁铁矿，岩石新鲜面呈灰白色，中—粗粒粒状结构，块状构造（图 2e），矿石矿物主要为磁铁矿（~6%）、钛铁矿（~6%）以及磁黄铁矿（~3%），脉石矿物包括斜长石（~35%）、角闪石

(~25%)、绿泥石 (~7%)、黑云母 (~6%)、绿帘石 (~5%)、镍滑石 (~2%) 以及磷灰石。斜长石呈板条状, 蚀变较严重。所有磁铁矿中均可见钛铁矿, 钛铁矿内部有磁铁矿出溶, 部分钛铁矿呈脉状穿插于磁铁矿中。可见镍黄铁矿被包裹于磁铁矿或黄铁矿中, 此外, 黄铁矿中也见黄铜矿生长。磷灰石多呈似圆状, 粒径约 0.2~0.6 mm (图 4d)。

2.6 辉长岩型铁磷矿

辉长岩型铁磷矿, 岩石新鲜面呈灰绿色。中—细粒粒状结构, 块状构造 (图 2f)。角闪石、斜长石和辉石总体呈定向排列特征, 岩石中蚀变作用较为发育, 主要表现为中等程度的绿泥石化。矿石矿物主要为磁铁矿 (~15%)、钛铁矿以及磁黄铁矿, 脉石矿物包括斜长石 (~40%)、绿泥石 (20%)、透辉石 (~15%)、角闪石 (~5%)、橄榄石、黑云母、磷灰石以及尖晶石。钛铁矿和磁铁矿呈格架状、叶片状紧密连生, 钛铁矿以长条状分布于磁铁矿颗粒之间或裂理中, 且多沿矿物不同方向裂理平行产出 (图 4c)。可见黑云母分布在磁铁矿周边, 磷灰石多呈柱状, 被角闪石细脉切穿。

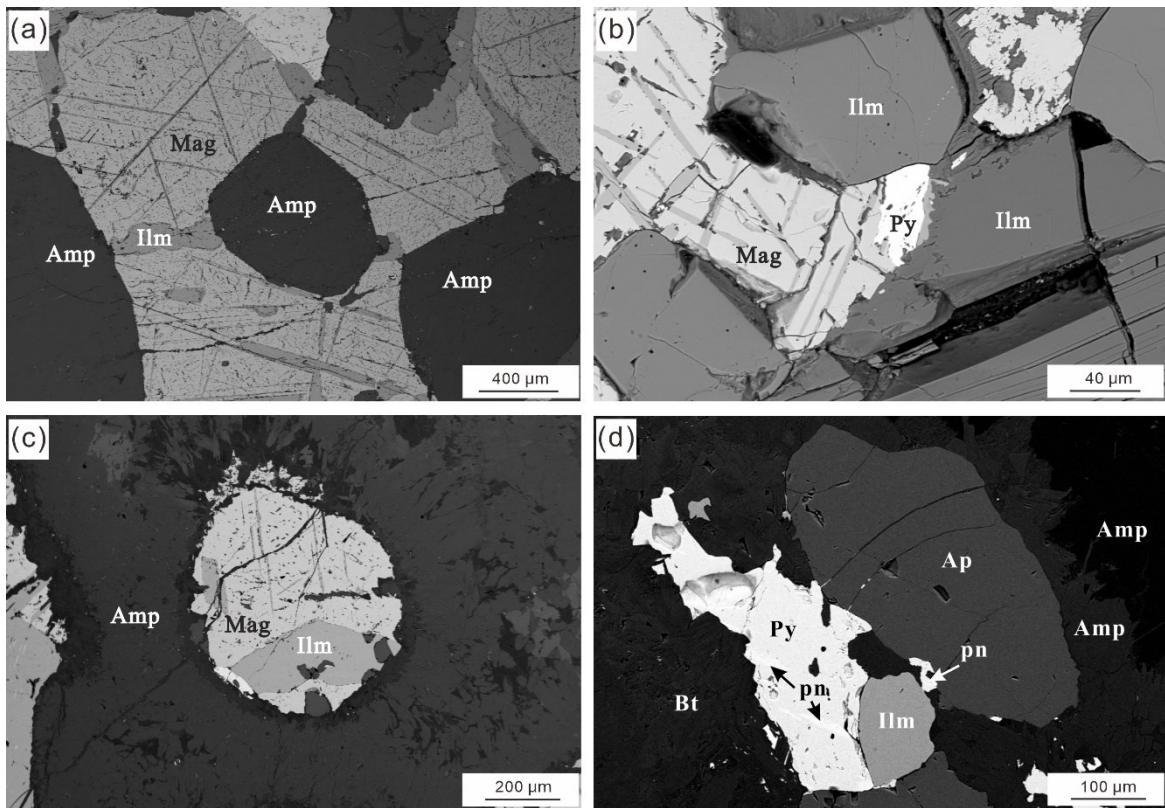


图 4 橄榄苏长岩型钒钛磁铁矿、辉石岩型钒钛磁铁矿、辉长苏长岩型钒钛磁铁矿和辉长岩型铁磷矿显微岩相学照片

(a) 钛铁矿在磁铁矿裂理中生长; (b) 钛铁矿呈现假象穿插于磁铁矿;

(c) 钛铁矿沿裂理平行产出; (d) 镍黄铁矿被包裹于黄铁矿中;

Mag-磁铁矿; Ilm-钛铁矿; Py-黄铁矿; Pn-镍黄铁矿; Pl-斜长石; Amp-角闪石; Ol-橄榄石; Ap-磷灰石

Fig.4 Microphotographs of olivine monzonite-type vanadium–titanium magnetite, pyroxenite-type vanadium–titanium magnetite, gabbro–monzonite-type vanadium–titanium magnetite, and gabbro-type iron–phosphorus ore.

(a) Ilmenite grows along the cleavage of magnetite;(b) Ilmenite shows a pseudomorphic intergrowth with magnetite;

(c) Ilmenite occurs parallel to the cleavage planes;(d) Pentlandite is enclosed within pyrite;

Mag – Magnetite; Ilm – Ilmenite; Py – Pyrite; Pn – Pentlandite; Pl – Plagioclase; Amp – Amphibole; Ol – Olivine; Ap – Apatite

3 实验部分

3.1 实验材料

本次测试样品采自河北承德大乌苏南沟铁矿床第三排勘探线 ZK0303 钻孔-33 米到-1750 米（图 5），自远矿端至近矿体分段取样，涵盖铁磷矿和钒钛磁铁矿两种典型矿石类型。本次除开展矿物测试外，同时对矿石全岩粉末进行了系统测试。共选取六组代表性样品，经切割与打磨制备为尺寸约 20 mm × 35 mm、平均厚度约 1.22 mm 的不透明岩石光片（图 6）。全岩粉末样品则经研磨与干燥处理后，按质量比 1:1 掺入聚四氟乙烯（PTFE）并压制成片，以满足测试要求。各测试样品的岩性特征及编号汇总见表 1。

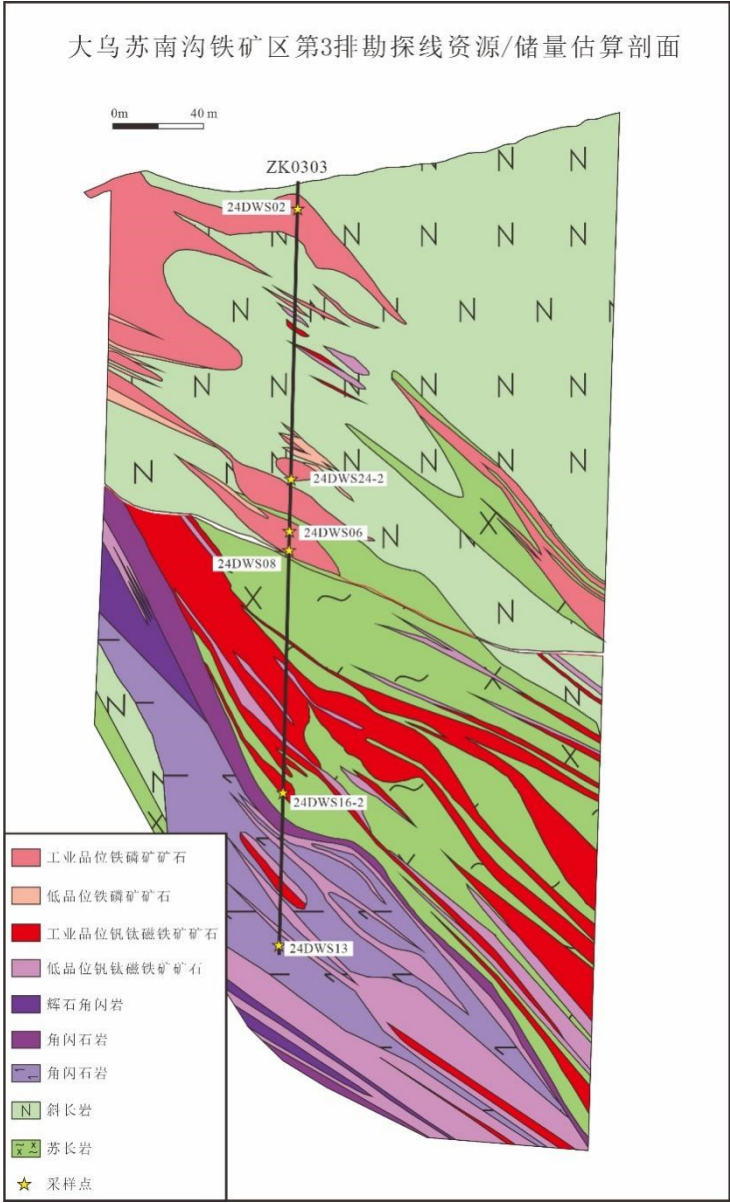


图 5 大乌苏南沟铁矿床第 3 排勘探线资源/储量估算剖面图

Fig.5 Cross-section of resource/reserve estimation along exploration line No. 3, Dawusunangou iron deposit

表 1 测试样品信息

Table 1 Information of the test sample

样品编号	岩性	采样位置	测试矿物	测试次数
24DWS02	辉长苏长岩型铁磷矿	-33 m	绿泥石;磁铁矿	1
24DWS24-2	辉长岩型铁磷矿	-806 m	磁铁矿;斜长石	1
24DWS06	橄榄辉长岩型钒钛磁铁矿	-1028 m	磁铁矿	1

24DWS08	橄榄苏长岩型钒钛磁铁矿	-1082 m	黄铁矿;磁铁矿;斜长石	1
24DWS13	辉石岩型钒钛磁铁矿	-1750 m	磁铁矿;绿泥石	1
24DWS16-2	辉长苏长岩型钒钛磁铁矿	-1074 m	斜长石;磁铁矿	1

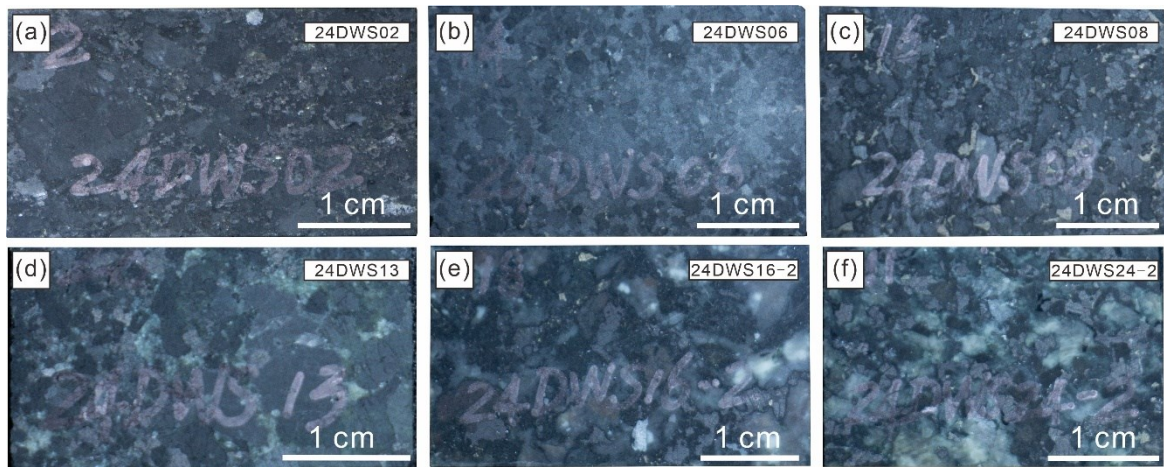


图 6 岩石光片

(a)辉长苏长岩型铁磷矿；(b)橄榄辉长岩型钒钛磁铁矿；(c)橄榄苏长岩型钒钛磁铁矿；(d)辉石岩型钒钛磁铁矿；
(e)辉长苏长岩型钒钛磁铁矿；(f)辉长岩型铁磷矿

Fig.6 Rock thin sections

(a) Gabbro-syenite type iron-phosphorus ore;(b) Olivine gabbro type vanadium-titanium magnetite ore;
(c) Olivine syenite type vanadium-titanium magnetite ore;(d) Pyroxenite type vanadium-titanium magnetite ore;
(e) Gabbro-syenite type vanadium-titanium magnetite ore;(f) Gabbro type iron-phosphorus ore

3. 2 实验原理

本实验采用大恒新纪元科技股份有限公司生产的透射式太赫兹时域光谱系统 (THz-TDS)，系统由钛宝石锁模激光器和太赫兹系统共同组成。其中，激光器输出中心波长为 800 nm，脉冲宽度约为 100 fs，重复频率为 80 MHz，太赫兹源脉冲频率宽度为 0.2-2.4 THz，光谱分辨率小于 1 GHz (Huang et al., 2025)。系统工作原理如图 7 所示，钛宝石锁模激光器产生的脉冲激光经过分束器被分为两束，一束作为泵浦光聚焦到光导天线产生太赫兹脉冲信号穿过待测样品到达探测端；另外一束较弱的探测光同时到达探测器晶体。通过改变时间延迟装置，即可采集获得样品完整的太赫兹时域信号。此外，实验室在室温 (18 °C) 下进行，测试环境相对湿度也需低于 5%，采用持续充氮方式消除水汽吸收影响，使光谱仪处于干燥环境 (Zhang et al., 2024b; Huang et al., 2025)。

数据处理与分析主要依托 Origin 软件平台完成，原始时域信号经时间零点校正与基线校正后，在相同时间窗条件下采用快速傅里叶变换 (FFT) 转换为频域信号。接着通过计算得出矿物的吸收系数和折射率 (如下 (1)、(2))。对于太赫兹样品，当样品对太赫兹吸收越少时，其对应的吸收系数的有效范围会越大，因此选取 0.1-1.3 THz 作为有效分析频谱范围。光学参数计算基于太赫兹波垂直入射模型，假设系统响应函数具有时不变性。为减小天然岩石的非均质性影响，所有样品均经精细打磨抛光至两表面平行，并择优选取无裂隙区域测试，以满足均匀介质的理论假设。在满足样品消光系数 κ 远小于折射率 n ，且空气折射率近似 1 的前提下，样品的折射率 $n(\omega)$ 和吸收系数 $\alpha(\omega)$ 可由公式 (1) 和 (2) 得到 (Huang et al., 2025)。

$$n(\omega) = \varphi(\omega) \frac{c}{\omega d} + 1 \quad (1)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{2}{d} \ln \left\{ \frac{4n(\omega)}{\rho(\omega)[n(\omega) + 1]^2} \right\} \quad (2)$$

两个公式中, $\rho(\omega)$ 是样品信号与参考信号振幅之比, $\varphi(\omega)$ 表示样品信号与参考信号之间的相位差, d 为样品的厚度, c 是光在真空中的传播速度。

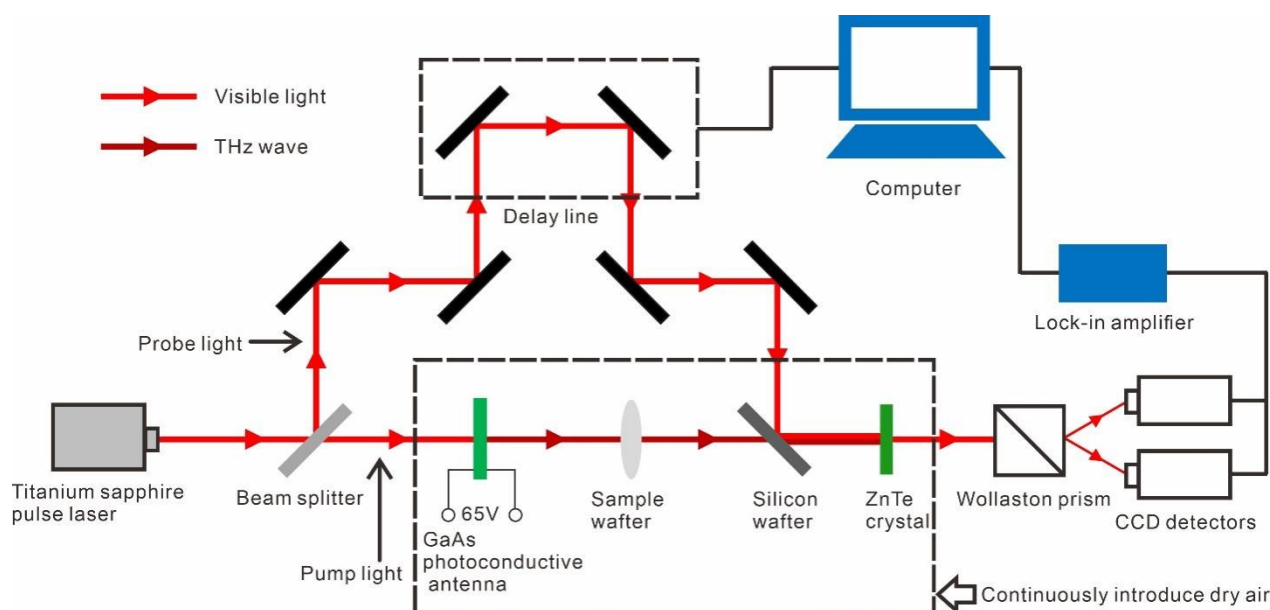


图 7 太赫兹时域光谱工作原理示意图 (据 Zhang et al., 2024b 修编)

Fig.7 Schematic diagram of the working principle of terahertz time-domain spectroscopy (modified after Zhang et al., 2024b)

4 太赫兹时域光谱结果

4.1 磁铁矿

对大乌苏南沟铁矿床不同岩性中的磁铁矿开展太赫兹时域光谱测试, 包括辉长苏长岩型铁磷矿、辉长岩型铁磷矿及橄榄辉长岩型钒钛磁铁矿。在太赫兹时域光谱分析中, 所有磁铁矿在 0-12 ps 范围内振幅较参考信号均有延迟 (图 8a)。进一步分析发现, 相较于辉长岩型铁磷矿, 橄榄辉长岩型钒钛磁铁矿中磁铁矿的信号延迟更明显, 且振幅强度也有所下降 (图 8a,b)。在太赫兹频域光谱中, 铁磷矿中磁铁矿表现出较高的振幅强度, 而钒钛磁铁矿中磁铁矿的振幅强度则相对较低。与时域光谱相对应, 磁铁矿频域光谱宽度明显小于参考信号的宽度, 且磁铁矿的振幅也明显低于参考线的振幅。

在频率—吸收系数图中, 铁磷矿中磁铁矿的吸收系数随频率增加呈现快速波动上升的趋势, 随后逐渐变缓。在 0.8 到 1.3 THz 的范围内, 吸收系数继续快速波动上升, 并在 1.2 THz 左右出现明显峰值。其中, 辉长岩型铁磷矿磁铁矿的吸收系数在频率开始增加时低于辉长苏长岩型铁磷矿磁铁矿, 但在 0.8 THz 后快速上升。在 0.8 THz 时, 辉长苏长岩型铁磷矿吸收系数为 63.1 cm^{-1} , 橄榄辉长岩型钒钛磁铁矿吸收系数为 55.5 cm^{-1} , 辉长岩型铁磷矿磁铁矿吸收系数为 54.9 cm^{-1} 和 58.2 cm^{-1} 。而在 1.2 THz 时, 不同岩性磁铁矿的吸收系数差异显著, 辉长苏长岩型铁磷矿为 85.4 cm^{-1} , 橄榄辉长岩型钒钛磁铁矿为 69.5 cm^{-1} , 辉长岩型铁磷矿磁铁矿为 118.0 cm^{-1} 和 83.2 cm^{-1} (图 8c)。在频率—折射率图中, 在 0.2-1.3 THz 范围内, 折射率随着频率的增加没有明显变化, 折射率相对不变。辉长苏长岩型铁磷矿 (2.67) 和辉长岩型铁磷矿磁铁矿 (2.66、2.44) 的折射率较低, 而橄榄辉长岩型钒钛磁铁矿 (2.79) 具有相对较高的折射率 (图 8d)。

4.2 绿泥石

对大乌苏南沟铁矿床不同岩性中的绿泥石开展太赫兹时域光谱测试，包括辉长苏长岩型铁磷矿与辉石岩型钒钛磁铁矿。对绿泥石的太赫兹光谱分析发现，与参考信号相比，其振幅也存在延迟(图 9a)。其中，辉长苏长岩型铁磷矿中绿泥石的太赫兹信号延迟现象尤为突出，且其振幅强度相较于辉石岩型钒钛磁铁矿明显降低(图 9b)。吸收系数和折射率表明，所有绿泥石的吸收系数随频率增加而增加，且在相同频率下，绿泥石含量与吸收系数呈正相关关系。同时，其特征峰也存在明显差异，辉长苏长岩型铁磷矿的吸收系数在整个频率区间呈现特殊的上升趋势，在 0.65 THz 与 1.0 THz 左右出现两个特征吸收峰。吸收系数起始值为 8.57 cm^{-1} ，在 0.65 THz 时候达到第一个局部峰值 72.3 cm^{-1} ，至 1.0 THz 左右达到第二个峰值 107.0 cm^{-1} (图 9c)。相比之下，辉石岩型钒钛磁铁矿吸收系数上升较平缓，吸收系数的起始值为 8.16 cm^{-1} ，在 1.20 THz 左右吸收系数出现一个特征吸收峰，峰值为 60.3 cm^{-1} 。折射率方面，虽然随着频率的增加，不同类型绿泥石的折射率值差异相对较小，但总体趋势是绿泥石含量越高，其折射率值也越高(图 9d)。

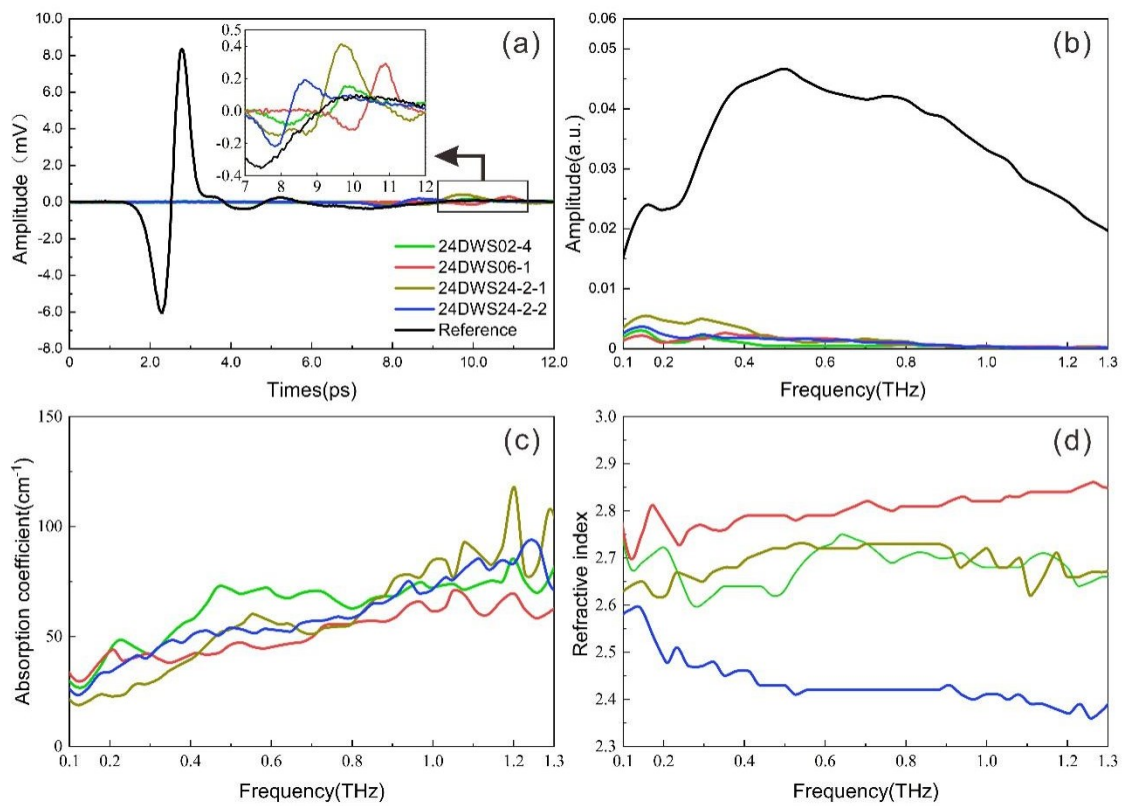


图 8 磁铁矿

(a):时域—振幅光谱图;(b):频域—振幅光谱图;(c):频率—吸收系数光谱图;(d):频率—折射率光谱图

Fig.8 Magnetite

(a): Time-domain amplitude Spectrum;(b): Frequency-domain amplitude spectrum;

(c): Frequency-absorption coefficient spectrum;(d): Frequency-refractive index spectrum

4. 3 斜长石

对大乌苏南沟铁矿床不同岩性中的斜长石开展太赫兹时域光谱测试，包括辉长岩型铁磷矿与辉长苏长岩型钒钛磁铁矿。从图 10a 可以看出，辉长岩型铁磷矿中斜长石的振幅起始时间相较于辉长苏长岩型钒钛磁铁矿略有提前。同时分析发现，辉长岩型铁磷矿中斜长石的振幅强度总体高于辉长苏长岩型钒钛磁铁矿(图 10b)。在频率—吸收系数图中，斜长石均表现出吸收系数随频率增加而逐渐升高的趋势(图 10c)。

具体而言，在 0.2–0.7 THz 的低频范围内，辉长岩型铁磷矿中斜长石的吸收系数普遍高于辉长苏长岩型钒钛磁铁矿。但在超过 0.7 THz 后，辉长苏长岩型钒钛磁铁矿中斜长石的吸收系数呈现快速上升的趋势，显示出更为剧烈的变化特征。在 0.7 THz 时，辉长苏长岩型钒钛磁铁矿（ 51.0 cm^{-1} ）与辉长岩型铁磷矿（ 52.3 cm^{-1} ）之间的吸收系数差异较小，而在 1.2 THz 时，二者中斜长石的吸收系数显著分化，辉长苏长岩型钒钛磁铁矿吸收系数为 117.0 cm^{-1} ，辉长岩型铁磷矿吸收系数为 90.4 cm^{-1} （图 10c）。在频率—折射率图中，辉长岩型铁磷矿（2.34）的折射率较低，而辉长苏长岩型钒钛磁铁矿（2.63）的折射率则较高（图 10d）。

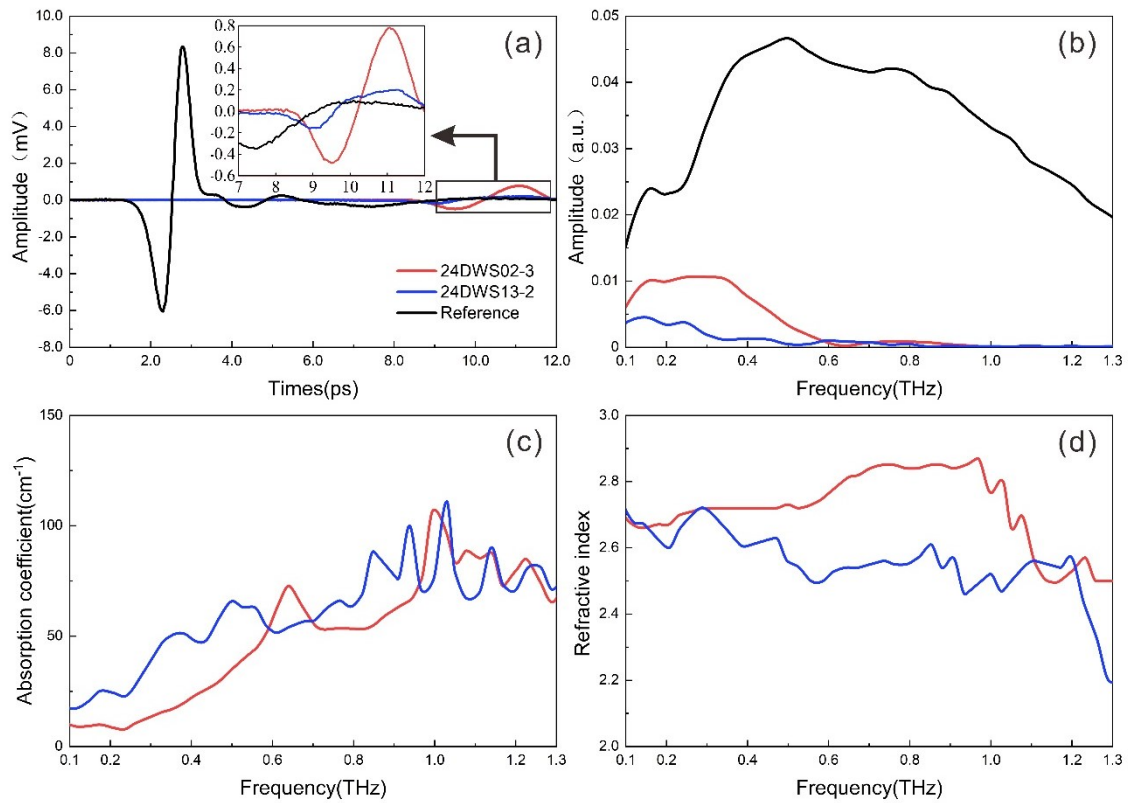


图 9 绿泥石

(a):时域—振幅光谱图;(b):频域—振幅光谱图;(c):频率—吸收系数光谱图;(d):频率—折射率光谱图

Fig.9 Chlorite

(a): Time-domain amplitude Spectrum;(b): Frequency-domain amplitude spectrum;

(c): Frequency-absorption coefficient spectrum;(d): Frequency-refractive index spectrum

4. 4 黄铁矿

对大乌苏南沟铁矿床橄榄苏长岩型钒钛磁铁矿中的黄铁矿开展太赫兹时域光谱测试。在太赫兹时域光谱中，橄榄苏长岩型钒钛磁铁矿黄铁矿信号较参考信号有较大延迟，且振幅强度较弱（图 11a, b）。在频率—吸收系数图中，黄铁矿也表现出吸收系数随频率增加而单调递增的趋势（图 11c）。在 0.2 THz 时，其吸收系数为 42.7 cm^{-1} ，1.3 THz 时，吸收系数上升为 76.8 cm^{-1} （图 11c）。与上述磁铁矿、绿泥石、斜长石等矿物相比，黄铁矿吸收系数较低且变化幅度较小。在频率—折射率图中，橄榄苏长岩型钒黄铁矿折射率为 2.72（图 11d），高于大部分其他矿物（图 11d）。

4. 5 铁矿石全岩

不同类型辉长苏长岩型铁磷矿、辉长岩型铁磷矿、橄榄辉长岩型钒钛磁铁矿、橄榄苏长岩型钒钛磁铁矿、辉石岩型钒钛磁铁矿及辉长苏长岩型钒钛磁铁矿矿石太赫兹时域光谱具有明显差异。在时域光谱

中，各类矿石相对于参考信号均表现出不同程度的延迟，其中橄榄苏长岩型钒钛磁铁矿振幅显著低于参考信号，且延迟最为明显（图 12a、b）。频域结果显示，不同矿石振幅强度差异显著，橄榄苏长岩型钒钛磁铁矿最低，其次为橄榄辉长岩型钒钛磁铁矿、辉石岩型钒钛磁铁矿及辉长苏长岩型铁磷矿，辉长苏长岩型钒钛磁铁矿与辉长岩型铁磷矿振幅较高且差异较小（图 12b）。

在频率—吸收系数图中，各类矿石吸收系数总体随频率升高而增加，并多在约 1.2 THz 附近出现明显峰值（图 12c）。橄榄苏长岩型与橄榄辉长岩型钒钛磁铁矿吸收系数显著高于其他类型，且增长幅度差异较大；相比之下，辉石岩型钒钛磁铁矿、辉长苏长岩型铁磷矿、辉长岩型铁磷矿及辉长苏长岩型钒钛磁铁矿吸收系数整体较低且相互接近。在 0.2 THz 处，橄榄苏长岩型与橄榄辉长岩型钒钛磁铁矿吸收系数分别为 16.2 cm^{-1} 和 11.2 cm^{-1} ，明显高于其他矿石。辉石岩型钒钛磁铁矿吸收系数为 5.5 cm^{-1} ，辉长苏长岩型铁磷矿吸收系数为 5.9 cm^{-1} ，辉长岩型铁磷矿吸收系数为 6.7 cm^{-1} ，辉长苏长岩型钒钛磁铁矿吸收系数为 7.3 cm^{-1} 。在 1.2 THz 附近，橄榄苏长岩型钒钛磁铁矿达到最大值 151.8 cm^{-1} ，橄榄辉长岩型为 113.9 cm^{-1} ，显著高于辉石岩型（ 59.9 cm^{-1} ）和辉长苏长岩型钒钛磁铁矿（ 53.2 cm^{-1} ）。此外，辉长苏长岩型铁磷矿与辉长岩型铁磷矿分别在 1.26 THz 和 1.10 THz 处出现局部峰值，吸收系数为 68.7 cm^{-1} 和 55.0 cm^{-1} （图 12c）。在频率—折射率关系中，除橄榄苏长岩型和橄榄辉长岩型钒钛磁铁矿外，其余矿石在 0.2–1.3 THz 范围内折射率变化较小，整体较为稳定（图 12d）。橄榄苏长岩型和橄榄辉长岩型钒钛磁铁矿折射率随频率升高呈下降趋势，其中橄榄辉长岩型变化较缓，平均折射率为 2.18；橄榄苏长岩型变化较为剧烈，平均值为 2.13，在 1.1–1.3 THz 区间由 2.05 降至 1.82（平均 1.94）。相比之下，辉长岩型铁磷矿平均折射率为 1.94，辉长苏长岩型钒钛磁铁矿与辉石岩型钒钛磁铁矿均为 2.01，而辉长苏长岩型铁磷矿为 2.08（图 12d）。

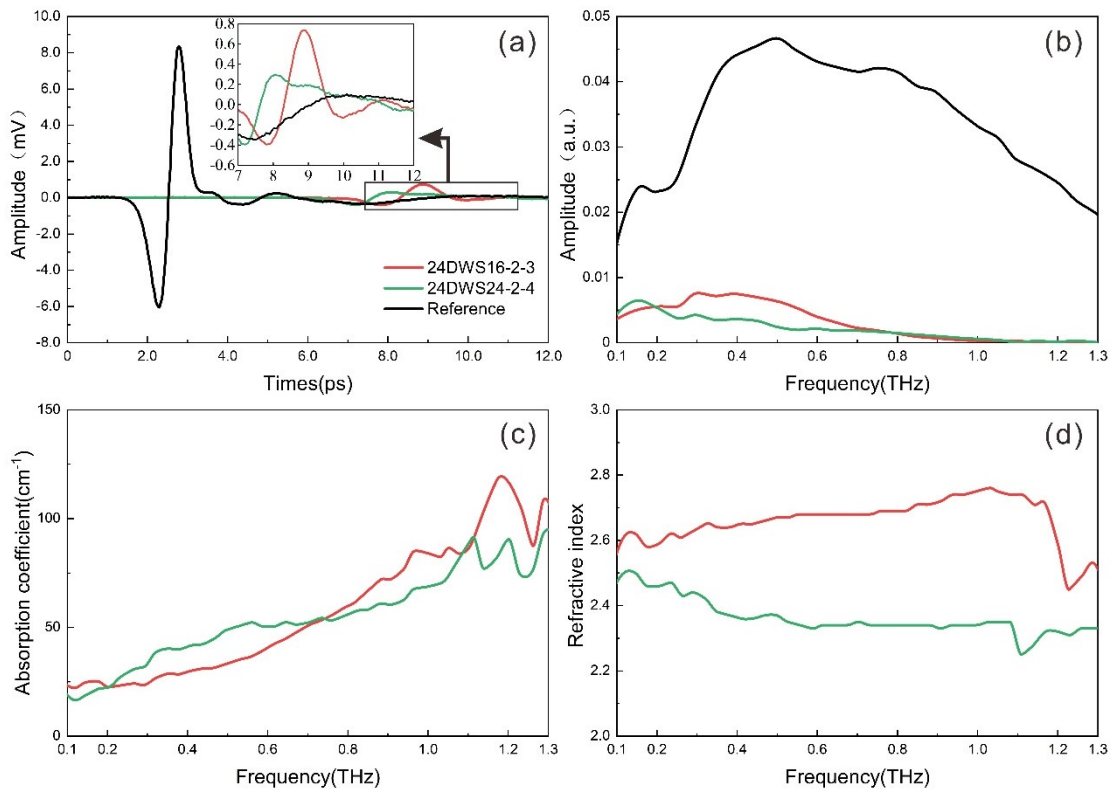


图 10 斜长石

(a):时域—振幅光谱图;(b):频域—振幅光谱图;(c):频率—吸收系数光谱图;(d):频率—折射率光谱图

Fig.10 Plagioclase

(a): Time-domain amplitude Spectrum;(b): Frequency-domain amplitude spectrum;

(c): Frequency-absorption coefficient spectrum;(d): Frequency-refractive index spectrum

5 太赫兹时域光谱对铁矿找矿勘查指示

铁矿勘查过程中,通常根据磁性异常、区域地质、构造特征等信息,圈定潜在找矿靶区(袁桂琴等,2011)。磁异常场的空间位置及异常形态,磁力、重力及化探异常的叠加可有效反映深部地质体的空间分布及矿床类型,如矽卡岩型、沉积变质型、岩浆型和火山岩型铁矿床(李厚民和张作衡,2013;赵立群等,2020;张招崇等,2021)。矽卡岩型铁矿床与中基性-中酸性侵入岩密切相关,矿体多沿侵入岩与碳酸盐岩接触带展布,接触带具有明显的重力和磁力异常(张招崇等,2021)。矿体多位于带状或等轴状磁异常梯度明显、高重力异常部位,该异常组合被认为是矽卡岩型铁矿的找矿标志(张招崇等,2021)。沉积变质型铁矿床规模大,矿体通常位于条带状磁异常边部负背景场中的局部高磁异常(杨海等,2022)。受后期构造改造和变质作用影响,磁异常形态往往较为平缓,单一磁异常难以约束矿体的延深与规模(卢焱等,2008)。岩浆型铁矿床多沿走向延伸的强磁异常带分布,线性磁异常和局部高磁中心能够反映富矿体(张立剑等,2025)。火山岩型铁矿床成矿过程复杂,多与同期的火山岩存在密切联系,在区域磁场中具有条带状磁异常和高重力异常(张招崇等,2021;徐鹏等,2022;杨海等,2022)。

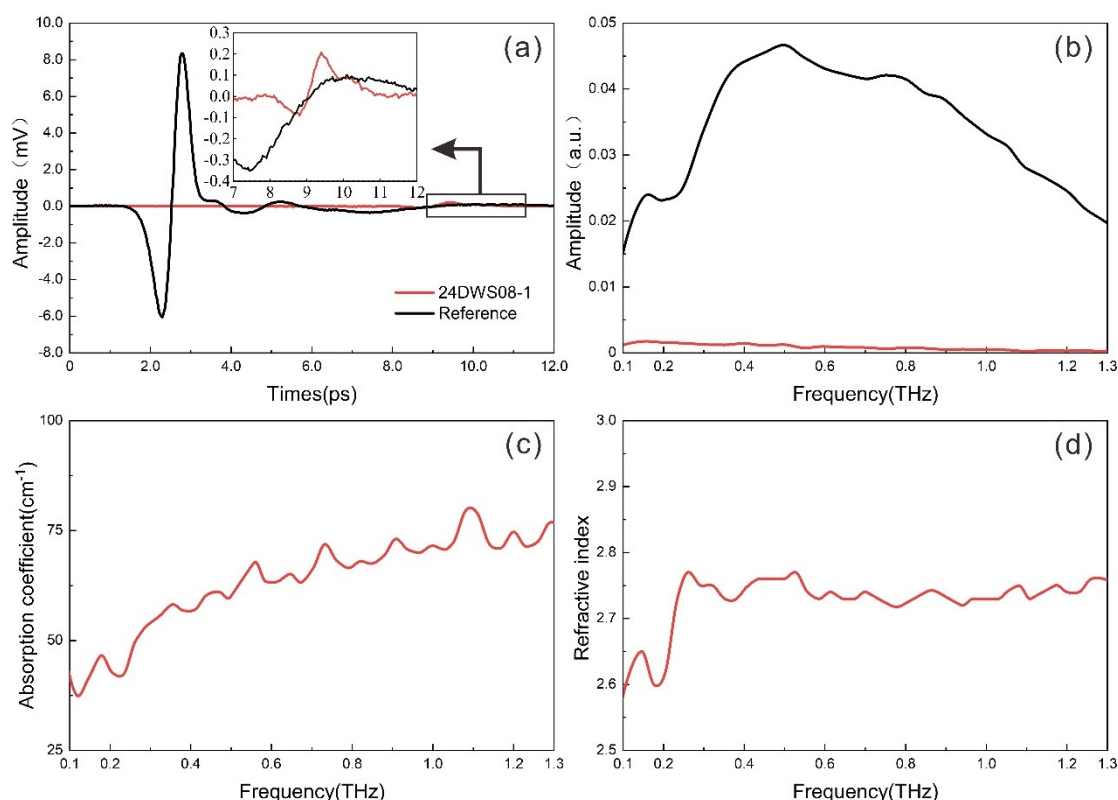


图 11 黄铁矿

(a):时域—振幅光谱图;(b):频域—振幅光谱图;(c):频率—吸收系数光谱图;(d):频率—折射率光谱图

Fig.11 Pyrite

(a): Time-domain amplitude Spectrum;(b): Frequency-domain amplitude spectrum;

(c): Frequency-absorption coefficient spectrum;(d): Frequency-refractive index spectrum

太赫兹时域光谱分析结果显示,岩浆型铁矿床不同类型矿石及磁铁矿、绿泥石、斜长石与黄铁矿等矿物在太赫兹波段存在明显的光谱差异(图 8-图 12)。所有矿石及其矿石矿物和脉石矿物均出现明显的振幅衰减与时间延迟,可能与矿物自身的吸收、散射等产生了能量消耗有关(Bao et al., 2019)。磁铁矿

吸收系数与其铁含量具有正相关关系，反映铁含量的相对高低（Zhang et al., 2024a; Zhang et al, 2024b）。其中，辉长岩型铁磷矿磁铁矿的太赫兹光谱具有更强的吸收效应和振幅衰减，反映出磁铁矿含量相对较高。相比之下，辉长苏长岩型铁磷矿与橄榄辉长岩型钒钛磁铁矿磁铁矿太赫兹光谱吸收系数整体偏低且振幅相对较弱（图 8）。已有研究指出，绿泥石晶体结构中富含羟基与结构水，在太赫兹频段内具有显著的特征吸收，因此其吸收系数与折射率随矿物含量增加而升高（Li et al., 2023b）。因此，与辉石岩型钒钛磁铁矿相比，辉长苏长岩型铁磷矿中的绿泥石表现出更高的吸收系数、折射率和明显的振幅衰减，可能与绿泥石含量相对较高有关（图 9）。斜长石的太赫兹响应亦表现出一定差异性。其中，辉长苏长岩型钒钛磁铁矿中斜长石相较辉长岩型铁磷矿具有更高的吸收系数与折射率，并呈现更明显的振幅衰减特征，可能受斜长石含量及共生磁铁矿、绿泥石等矿物影响（图 10）。相比于其他矿物，黄铁矿太赫兹光谱则呈现出低吸收系数、低振幅强度以及高折射率的特征（图 11）。此外，不同类型矿石在太赫兹波段同样表现出明显差异（图 12）。相较于铁磷矿石，钒钛磁铁矿具有更显著的振幅衰减与时间延迟、较低的频域谱幅度以及更强的吸收特征，反映其整体矿化程度可能较高，并指示磁铁矿富集更为显著。太赫兹时域光谱能够获取矿物的相位信息，识别弱磁性矿物、蚀变矿物，反映磁铁矿含量（Zhang et al., 2024a）。在大乌苏南沟铁矿床中，磁铁矿太赫兹光谱吸收效应和振幅衰减的变化反映出了不同矿物组合及矿化程度的差异，为识别矿化信息提供依据。本研究表明，太赫兹时域光谱除了可以反映不同矿物间的结构差异外，对矿物含量变化的表征也比较敏感，能够为矿体圈定和找矿勘查提供依据。

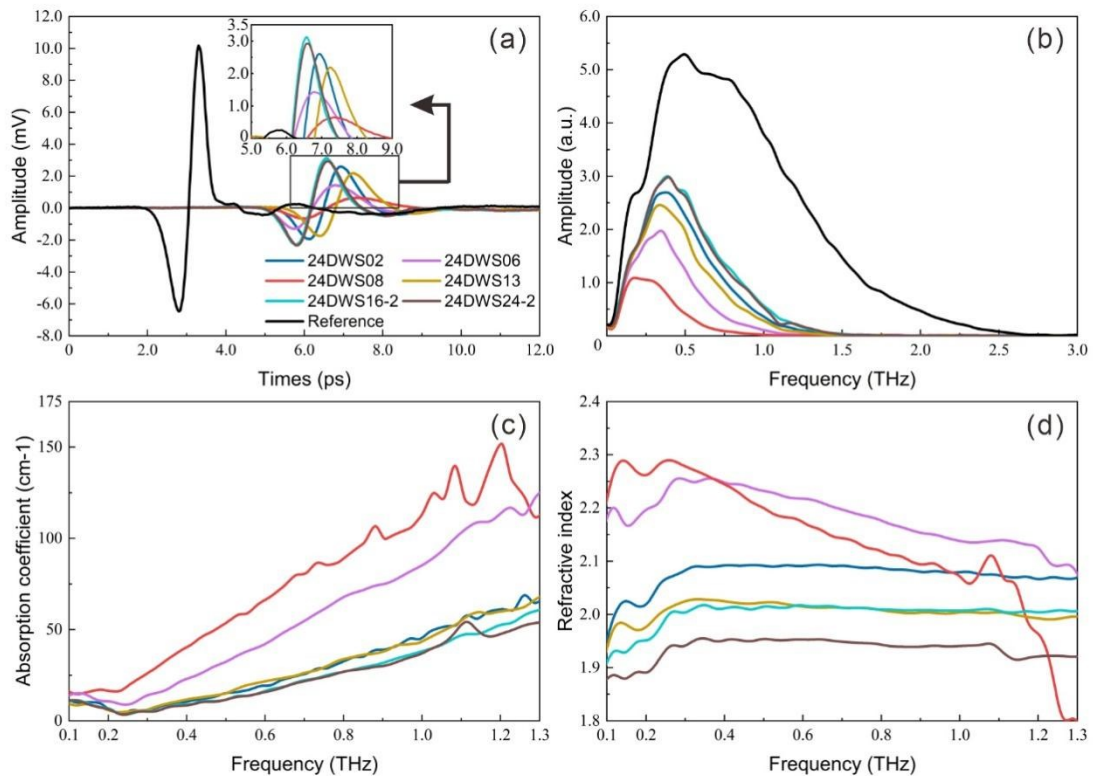


图 12 铁矿石全岩

(a):时域—振幅光谱图;(b):频域—振幅光谱图;(c):频率—吸收系数光谱图;(d):频率—折射率光谱图

Fig.12 Whole-rock iron ore

(a):Time-domain amplitude Spectrum;(b):Frequency-domain amplitude spectrum;
(c):Frequency-absorption coefficient spectrum;(d): Frequency-refractive index spectrum

6 结论与未来展望

本研究利用太赫兹时域光谱技术, 对大乌苏南沟铁矿床典型矿石, 及其矿石矿物、脉石矿物进行了光谱学分析。结果表明, 不同类型矿石在太赫兹波段表现出明显差异。钒钛磁铁矿较铁磷矿具有更显著的振幅衰减与时间延迟以及强吸收特征。磁铁矿、绿泥石、斜长石和黄铁矿在太赫兹波段吸收系数和折射率具有不同的光谱特征, 这些差异主要受矿物结构和含量控制。研究表明, 太赫兹时域光谱技术可用于不同类型矿石特征分析和矿物识别, 为铁矿床勘探提供了一种新的勘查手段。

致谢: 本文撰写过程中得益于《地球科学》编辑部专业指导和支持。感谢匿名审稿人及编辑对本文提出的宝贵修改意见及建议!

References

- Bai, X.S., Zhang, H.N., Zhang, L.J., et al., 2018. Preliminary Analysis of Metallogenic Regularity of 'Rich Ore' in Damiao-type Iron Deposits, Chengde. *Science and Technology Innovation Herald*, 15(27): 130-131+134 (in Chinese).
- Bao, R.M., Qin, F.K., Chen, R., et al., 2019. Optical Detection of Oil Bearing in Reservoir Rock: Terahertz Spectroscopy Investigation. *IEEE Access*, 7:121755–121759. doi : 10.1109/ACCESS.2019.2938027
- Chen, J., Ji, Y.B., Du, L.J., et al., 2022. The study of hydrothermal alterations and ore-forming process of the Kengtougou deposit, southeastern Guizhou, China. *Acta Geologica Sinica*, 96(07):2479-2493 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, J.W., Liu, X.X., Zhang, J., et al., 2023. Infrared Spectral Analysis and Prospecting of Alteration Minerals of Baijian Skarn-Type Iron Deposit in Han-Xing Area. *Earth Science*, 48(04):1551-1567 (in Chinese with English abstract).
- Deng, J., Qiu, K.F., Wang, Q.F., et al., 2020a. In-situ dating of hydrothermal monazite and implications on the geodynamic controls of ore formation in the Jiaodong gold province, Eastern China. *Economic Geology*, 115(3): 671–685. doi : 10.5382/econgeo.4711
- Deng, J., Yang, L.Q., Groves, D.I., et al., 2020b. An integrated mineral system model for the gold deposits of the giant Jiaodong province, eastern China. *Earth-Science Reviews*, 208:103274. doi : 10.1016/j.earscirev.2020.103274
- He, D.Y., Qiu, K.F., Simon, A.C., et al., 2024. Mantle oxidation by sulfur drives the formation of giant gold deposits in subduction zones, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(52), e2404731121. doi : 10.1073/pnas.2404731121
- Huang, H.H., Liu, Z., Ruggiero, M.T., et al., 2025. Terahertz Geoscience: THz Time-Domain Spectroscopy for Mineral Materials. *Crystal Growth & Design*, 25(10):3578–3594. doi : 10.1021/acs.cgd.4c01423
- Ju, N., Yang, G., Liu, X., et al., 2025. The genesis, material source and metallogenic tectonic background of the Yushugou Nb Ta-REE deposit in the eastern section of the northern margin of the North China Craton. *Earth Science*. <https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20250910.1552.015> (in Chinese with English abstract).
- Li, H.M., Zhang, Z.H., 2013. Characteristics and Scientific Research Issues of China's Iron Ore Resources. *Rock and Mineral Analysis*, 32(1): 128-130 (in Chinese with English abstract).
- Li, L.X., Li, H.M., Zi, J.W., et al., 2019. The Link Between an Anorthosite Complex and Underlying Olivine–Ti-Magnetite-Rich Layered Intrusion in Damiao, China: Insights Into Magma Chamber Processes in the Formation of Proterozoic Massif-Type Anorthosites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 174(6):48. doi : 10.1007/s00410-019-1586-2
- Li, S.S., Palin, R.M., Santosh, M., 2023a. Contrasting mechanisms and timescales of subduction and exhumation as recorded by Paleoproterozoic and Late Paleozoic high-pressure granulites in the North China Craton. *Geological Society of America Bulletin*, 135(1-2), 29-47. doi : 10.1130/B36380.1

- Li, S.S., Qiu, K.F., HernándezUribe, D., et al., 2023b. Water Recycling in the Deep Earth: Insights From Integrated μ -XRF, THz-TDS Spectroscopy, TG, and DCS of High-Pressure Granulite. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(3). doi : 10.1029/2022JB025915
- Li, S.S., Palin, R.M., Santosh, M., et al., 2020. Extreme thermal metamorphism associated with Gondwana assembly: Evidence from sapphirine-bearing granulites of Rajapalayam, southern India. *Geological Society of America Bulletin*, 132(5-6), 1013-1030. doi : 10.1130/B35378.1
- Liu, S., Fedi, M., Hu, X.Y., et al., 2018. Three-Dimensional Inversion of Magnetic Data in the Simultaneous Presence of Significant Remanent Magnetization and Self-Demagnetization: Example From Daye Iron-Ore Deposit, Hubei Province, China. *Geophysical Journal International*, 215(1):614–634. doi : 10.1093/gji/ggy299
- Long, Z.Y., Moynier, F., Bögels, T.F.J., et al., 2025a. Impact-induced sublimation drives volatile depletion in carbonaceous meteorites. *Nature Communications*, 16(1): 6146. doi : 10.1038/s41467-025-61115-3
- Long, Z.Y., Moynier, F., Dai, W., et al., 2025b. Revisiting the Eoarchean Akilia quartz-pyroxene rock with potassium isotopes: Implications for early-ocean sedimentation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 122(31): e2510228122. doi : 10.1073/pnas.2510228122
- Long, Z.Y., Moynier, F., Debret, B., et al., 2025c. Heavy potassium isotopes in carbonatites reveal oceanic crust subduction as the driver of deep carbon cycling. *Science advances*, 11(24): eadt1023. doi : 10.1126/sciadv.adt1023
- Lou, D.B., Song, G.X., Li, N., et al., 2008. The Application of Magnetic Method in National Mineral Prediction. *Progress in Geophysics*, 23(1): 249-256 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Y., Li, J., Bai, X.S., et al., 2008. The Application of Magnetic Method in National Mineral Prediction. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 38(4): 698-702 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, K.F., Romer, R.L., Long, Z.Y., et al., 2024a. The role of an oxidized lithospheric mantle in gold mobilization. *Science Advances*, 10(41): eado6262. doi : 10.1126/sciadv.ado6262
- Qiu, K.F., Romer, R.L., Long, Z.Y., et al., 2024b. Potassium isotopes as a tracer of hydrothermal alteration in ore systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 368: 185-196. doi : 10.1016/j.gca.2024.01.005
- Qiu, K.F., Deng, J., Li, S.S., et al., 2024c. Roles and perspectives of A- and I-type magmas in rare earth element and gold mineralization. *Geological Society of America Bulletin*, 136(3-4): 1238-1250. doi : 10.1130/B36802.1
- Qiu, K.F., Long, Z.Y., Romer, R.L., et al., 2025. The mantle source of REE-rich alkaline silicate magmas can be enriched by continent-derived sediment subduction. *Nature Communications*, 16(1): 11191. doi : 10.1038/s41467-025-66213-w
- Sheng, G.Y., Chen, J.W., Wang, H.T., et al., 2017. Discussion on Geological Characteristics and Ore-controlling Factors of V-Ti-bearing Magnetite Deposit in Dawusugou District of Chengde. *Mineral Resources and Geology*, 31(2): 285-289+294 (in Chinese with English abstract).
- Sun, J., Du, W.H., Wang, D.Z., et al., 2009. Geological Characteristics and Genesis of the Heishan V-Ti Magnetite Deposit in Damiao Chengde Hebei Province. *Acta Geologica Sinica*, 83(9): 1344-1364 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Chen, X.F., Di, Q.Y., et al., 2025. Deep Mineral Exploration: Opportunities and Challenges in Reflection Seismics. *Earth Science*, 50(11):4284-4299 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z.C., Xu, L.Y., Zhou, R.Z., et al., 2026. Fracture Modes in Hydrothermal Ore-Forming Processes. *Earth Science*. <https://link.cnki.net/urlid/42.1874.p.20260209.1603.004> (in Chinese with English abstract).
- Xu, P., Li, H., Xie, J.T., et al., 2022. Metallogenic Regularity and Prospecting Direction of Marine Volcanic-type Iron Deposits in Northwest Hubei Province. *Mineral Exploration*, 13(5): 548-566 (in Chinese with English abstract).

- Yang, H., Xiong, S.Q., Yang, X., et al., 2022. Relationship between Aeromagnetic Anomaly Feature and Spatial Distribution of Iron Ore Deposits in China. *Mineral Deposits*, 41(5): 893-916 (in Chinese with English abstract).
- Yu, H.C., Long, Z.Y., Williams-Jones, A.E., et al., 2026. Tracking high-field-strength-element enrichment pathways in alkaline granites: Insights from potassium and barium isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 420, 1-18. doi : 10.1016/j.gca.2026.03.017
- Yu, H.C., Qiu, K.F., Deng, J., et al., 2022. Exhuming and preserving epizonal orogenic Au-Sb deposits in rapidly uplifting orogenic settings. *Tectonics*, 41, e2021TC007165. doi : 10.1029/2021TC007165
- Yuan, G.Q., Xiong, S.Q., Meng, Q.M., et al., 2011. Application Research of Geophysical Prospecting Techniques. *Acta Geologica Sinica*, 85(11): 1744-1805 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L.J., Yang, L., Fu, X.J., et al., 2025. Magnetic Anomaly Characteristics and Prospecting Direction of Vanadium-titanium Magnetite in Damiao Area. *Mineral Exploration*, 16(1): 184-194 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, M.R., Zheng, Z.Z., Zhang, T., et al., 2024a. Quantitative Assessment of Whole-Rock Iron Content in Magnetite Protolith Based on Terahertz Time-Domain Spectroscopy. *Applied Optics*, 63(10): 2528-2534. doi : 10.1364/AO.517400
- Zhang, S.Q., Zheng, Z.Z., Zhang, M.R., et al., 2024b. The Application of THz-TDS in the Characterization of Bayan Obo Magnetite Ore Composition. *Scientific Reports*, 14(1):1-10. doi : 10.1038/s41598-024-65772-0
- Zhang, Z.C., Li, H.M., Li, J.W., et al., 2021. Geological Settings and Metallogenesis of High-grade Iron Deposits in China. *Scientia Sinica Terrae*, 51(6): 827-852 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G.C., Sun, G., Wilde, S.A., et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton: Key Issues Revisited. *Precambrian Research*, 136(2):177-202. doi : 10.1016/j.precamres.2004.10.002
- Zhao, L.Q., Wang, C.N., Zhang, M., et al., 2020. Current Exploration Status and Supply-demand Situation of Iron Ore Resources in China Mainland. *Geology and Exploration*, 56(3): 635-643 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X.K., 2020. Metallogenic Regularity and Prospective Prediction of Damiao Complex in Chengde, Hebei Province. *World Nonferrous Metals*, (4): 216+219 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白雪山, 张唤楠, 张立剑, 等, 2018. 承德大庙式铁矿“富矿”成矿规律浅析. 科技创新导报, 15(27):130-131+134.
- 陈军, 吉彦冰, 杜丽娟, 等, 2022. 黔东南坑头金矿床热液蚀变特征及成矿过程研究. 地质学报, 96(07):2479-2493.
- 成嘉伟, 刘新星, 张娟, 等, 2023. 河北邯邢地区白洞铁矿蚀变矿物红外光谱分析及找矿研究. 地球科学, 48(04):1551-1567.
- 鞠楠, 杨高, 刘欣, 等, 2025. 华北克拉通北缘东段榆树沟 Nb-Ta-REE 矿床成因、物质来源及成矿构造背景[J/OL]. 地球科学.
- 李厚民, 张作衡, 2013. 中国铁矿资源特点和科学研究问题. 岩矿测试, 32(01):128-130.
- 卢焱, 李健, 白雪山, 等, 2008. 地面磁法在隐伏铁矿勘查中的应用——以河北滦平Ⅱ号铁矿为例. 吉林大学学报(地球科学版), (04):698-702.
- 娄德波, 宋国玺, 李楠, 等, 2008. 磁法在我国矿产预测中的应用. 地球物理学进展, (01):249-256.
- 盛恭勇, 陈景伟, 王海涛, 等, 2017. 承德大乌苏沟含钽钛磁铁矿矿床地质特征与控矿因素探讨. 矿产与地质, 31(02):285-289+294.
- 孙静, 杜维河, 王德忠, 等, 2009. 河北承德大庙黑山钽钛磁体矿床地质特征与成因探讨. 地质学报, 83(09):1344-1364.
- 王赟, 陈晓非, 底青云, 等, 2025. 深部找矿: 金属矿地震技术的机遇与挑战. 地球科学, 50(11):4284-4299.
- 王张弛, 许洛源, 周荣志, 等, 2026. 热液成矿过程岩石差异破裂机制[J/OL]. 地球科学.
- 徐鹏, 李欢, 谢家涛, 等, 2022. 鄂西北地区海相火山岩型铁矿成矿规律及找矿方向. 矿产勘查, 13(05):548-566.
- 杨海, 熊盛青, 杨雪, 等, 2022. 中国航磁异常特征与铁矿床空间分布关系. 矿床地质, 41(05):893-916.

- 袁桂琴,熊盛青,孟庆敏,等,2011.地球物理勘查技术与应用研究.地质学报,85(11):1744-1805.
- 张立剑,杨磊,付新建,等,2025.承德大庙一带钒钛磁铁矿磁异常特征及找矿方向探讨.矿产勘查,16(01):184-194.
- 张招崇,李厚民,李建威,等,2021.我国铁矿成矿背景与富铁矿成矿机制.中国科学:地球科学,51(06):827-852.
- 赵立群,王春女,张敏,等,2020.中国铁矿资源勘查开发现状及供需形势分析.地质与勘探,56(03):635-643.
- 赵向奎,2020.河北承德大庙杂岩体成矿规律研究及远景预测.世界有色金属,(04):216+219.