

基于红外光谱技术的区域矿物格架 及地层划分研究

——以北羌塘盆地玛曲地区侏罗统雀莫错组为例

葛天助¹⁾, 安仰生²⁾, 宋利强¹⁾, 刘晓¹⁾, 罗林涛¹⁾, 郭东旭¹⁾

1) 自然资源实物地质资料中心, 北京, 100083; 2) 山东省鲁南地质工程勘察院, 山东兖州, 272100



Pre-pub. on line: www.
geojournals.cn/georev

内容提要:厘清岩芯中的矿物的主要成分及其含量对地层划分等地质研究具有重要作用。笔者等利用红外光谱反射技术对北羌塘盆地玛曲地区内 QZ16 井雀莫错组岩芯进行矿物的定性—半定量识别研究, 分析其矿物组合特征和岩性对应关系, 最后结合层序地层学等结果, 通过多种矿物的相对含量曲线对侏罗系雀莫错组地层开展精细划分。结果显示红外光谱反射技术能否识别矿物种类及获得其相对含量信息, 对岩性识别具有良好的指示意义。石英、石膏、黏土矿物和碳酸盐矿物的相对含量值具有明显的三段式结构, 与雀莫错组的雀一段、雀二段、雀三段具有良好的对应关系。且根据测试结果将雀莫错组的三段进一步划分成雀一段: 雀一¹、雀一²、雀一³。雀二段: 雀二¹、雀二²。雀三段: 雀三¹、雀三²、雀三³, 共计 8 个小层。并进一步识别出对应的沉积亚相特征, 由下至上依次为冲洪积—河道沉积—河漫滩—咸化潟湖—淡化潟湖—前三角洲—三角洲前缘—前三角洲。本次测试结果表明, 红外光谱技术在大批量、大尺度岩芯扫描及地层精细划分方面具有显著的优势, 可为后续区域地质的沉积体系等研究提供科学依据。

关键词: 北羌塘盆地; 红外光谱; 雀莫错组; 矿物分析; 地层划分

矿物是岩石的骨架和基质的主要组成部分, 其中沉积岩中的主量矿物的种类和含量更是受沉积物源和后期的地质改造作用控制 (Clark et al., 2003)。例如砂泥岩(碎屑岩)的矿物组成以石英、长石为主夹黏土矿物等; 灰岩的主要矿物组成为白云石和方解石 (Laukamp et al., 2010); 膏岩的主要矿物组成则为石膏类矿物、黏土矿物等组成等 (Francos et al., 2021)。因此准确识别矿物的主要成分对岩性判别具有重要意义 (张弘等, 2021)。目前用于矿物分析的方法主要分为两类: 一类为红外光谱分析技术, 主要包括短波红外、可见光—近红外、中红外、热红外等 (代晶晶等, 2020), 具有无损、快速的优点, 但受技术和其他影响因素干扰, 其测试的结果准确度有待提高 (Zhu Ying et al., 2021)。一类是化学分析方法, 它对矿物的种类和含量鉴定结果准确度较高, 但需要对样品进行破碎等工作, 不利于样品保存 (孙强强, 2016; 王庆生, 2016; 赵振华等, 2019)。两种方法相互配合, 更有利于揭示研究

区从宏观到微观的地质现象。

羌塘盆地位于青藏高原北部腹地, 是我国陆上最大的中生代海相沉积残余盆地 (付修根等, 2010; 赵政璋等, 2000)。在近年的勘探工作中共发现 250 余处出露油苗 (杨莉等, 2015)。王成善、付修根等科学家围绕羌塘盆地各区域、各地层的构造、沉积、油气成藏等方面的科学问题进行细致的研究和论述 (李亚林等, 2008a; 张玉修等, 2007, 王剑等, 2020), 初步建立了羌塘盆地总体的地层格架。受羌塘盆地面积过大, 工区研究钻孔数量少, 实物地质资料获取困难的影响, 羌塘盆地的研究以露天剖面 and 单井为主 (薛伟伟等, 2020), 区域地质研究工作总体处于较早阶段。单井高精度地层划分是区域地层精细研究的基础 (王营等, 2019), 其目的在于划分出具有同时期沉积特征, 或有前后联系的更小的地层单元, 以便更加准确的确定目的层在地层空间的分布规律。传统单井地层划分主要依赖单井的岩性、测井反映的岩性组合特征及厚度、比例、韵律关系作为划

注: 本文为中国地质调查局油气地质调查钻井岩芯保存参数采集与应用项目 (编号: DD20201113) 的成果。

收稿日期: 2022-08-12; 改回日期: 2023-04-13; 网络首发: 2023-04-20; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2023.04.021

作者简介: 葛天助, 男, 1993 年生, 硕士, 助理工程师, 主要从事沉积与层序地层研究工作; Email: getianzhu@126.com。通讯作者: 安仰生, 男, 1975 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事矿产勘查和地质工程工作; Email: anyangsheng@126.com。

分的依据(孙佳珺等,2016)。QZ16 井于 2017 年完钻并记录了完整的中生代地层(谢小国等,2018),笔者等以 QZ16 井岩芯为研究对象,运用红外光谱技术对 QZ16 井雀莫错组的地层格架开展研究,并结合地层划分的方法,利用矿物相对含量曲线对其地层进行进一步的划分,为区域雀莫错组沉积体系的研究提供科学依据。

1 区域地质概况

羌塘盆地是欧亚大陆上的典型特提斯构造带(丘东洲等,2007),自下而上发育石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、和新近系地层(刘若涵等,2019)。北羌塘盆地雀莫错组自下至上是从陆相到碳酸盐岩台地相,再到海陆过渡相,整体上是一个由陆到海变化的海侵序列(王剑等,2020;杜少荣等,2021)。玛曲盆地位于北羌塘盆地东部,受乌拉山和唐古拉两个凸起控制(李亚林等,2008b)。QZ16 井位于玛曲盆地东部(图 1),地层上主要发育中生界海相沉积地层(王若等,2018)。雀莫错组发育在中一下侏罗统,与上覆地层布曲组为整合接触,与下伏地层鄂尔隆巴组为不整合接触(王丽波等,2012)。

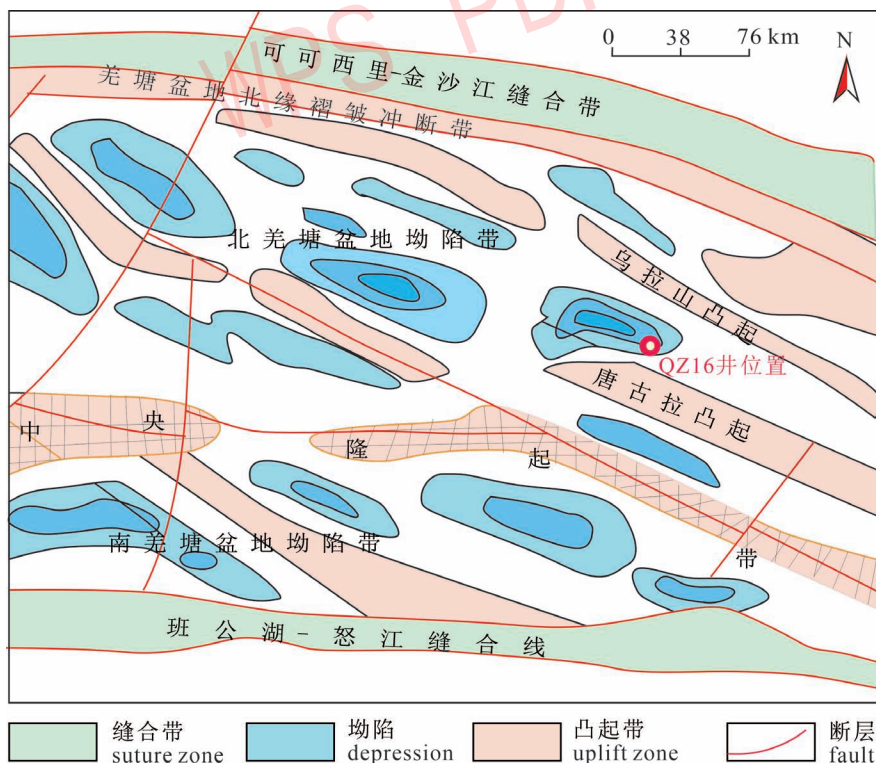


图 1 北羌塘盆地 QZ16 井位置(据赵政璋等,2000 修改)

Fig. 1 Location of the Well QZ16 in North Qiangtang Basin
(modified from Zhao Zhengzhang et al., 2000&)

2 实验部分

2.1 实验样品

本次实验样品为 QZ16 井侏罗系雀莫错组岩芯。QZ16 井位于玛曲地区中部,处于羌塘盆地东部。QZ16 井钻深 1600 m,整孔取心,完整取心率达 96%。雀莫错组深度 0~826 m,,岩芯保存情况良好,厚度较大,地质信息丰富,具有极高的研究价值。

在地层上,雀莫错组发育雀一段(0~231 m)、雀二段(231~615 m)和雀三段(615~826 m)的三段式地层。其中雀一段主要为砂岩、粉砂岩、泥岩等碎屑岩沉积,雀二段主要为膏岩、膏质泥岩等沉积岩,雀三段主要为砂砾岩、砂岩、粉砂岩和泥岩沉积。

2.2 实验方法及数据处理

本次红外测试实验使用的仪器为澳大利亚 HyLogge-3TM,其红外探测波长覆盖范围为 400~14500 nm,采样间隔 2.5 cm/点,光谱分辨率为 3nmVNIR(400~1100 nm);10 nmSWIR(1100~2500 nm);18nm@6000nm;150nm@14000nm。波长涵盖可见光、近红外、短波红外及热红外(史维鑫等,2020)。在测试时采用多波段红外光谱对岩芯表面的

矿物信息进行采集,可识别出硅酸盐、碳酸盐、硫酸盐、磷酸盐等矿物(陈康等,2020)。测试工作开始前,环境温度控制在 20~25℃。开启仪器预热,使仪器达到温控平衡后进行黑体校准和标准矿物识别工作,均达到正确结果后,开始测试工作。使用 TSG(The Spectral Geologist)光谱地质分析软件对提取的数据依照其自动分析解译处理,最终得到矿物的热红外光谱特征及半定量结果。

3 实验结果

3.1 典型矿物光谱特征及分布

根据岩芯扫描特征提取和数据解译结果,对 QZ16 井雀莫错组岩芯识别出主要矿物识别出石英、石膏类、碳酸盐岩、黏土矿物 4 类矿物。

3.1.1 石英

石英($\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)作为稳定

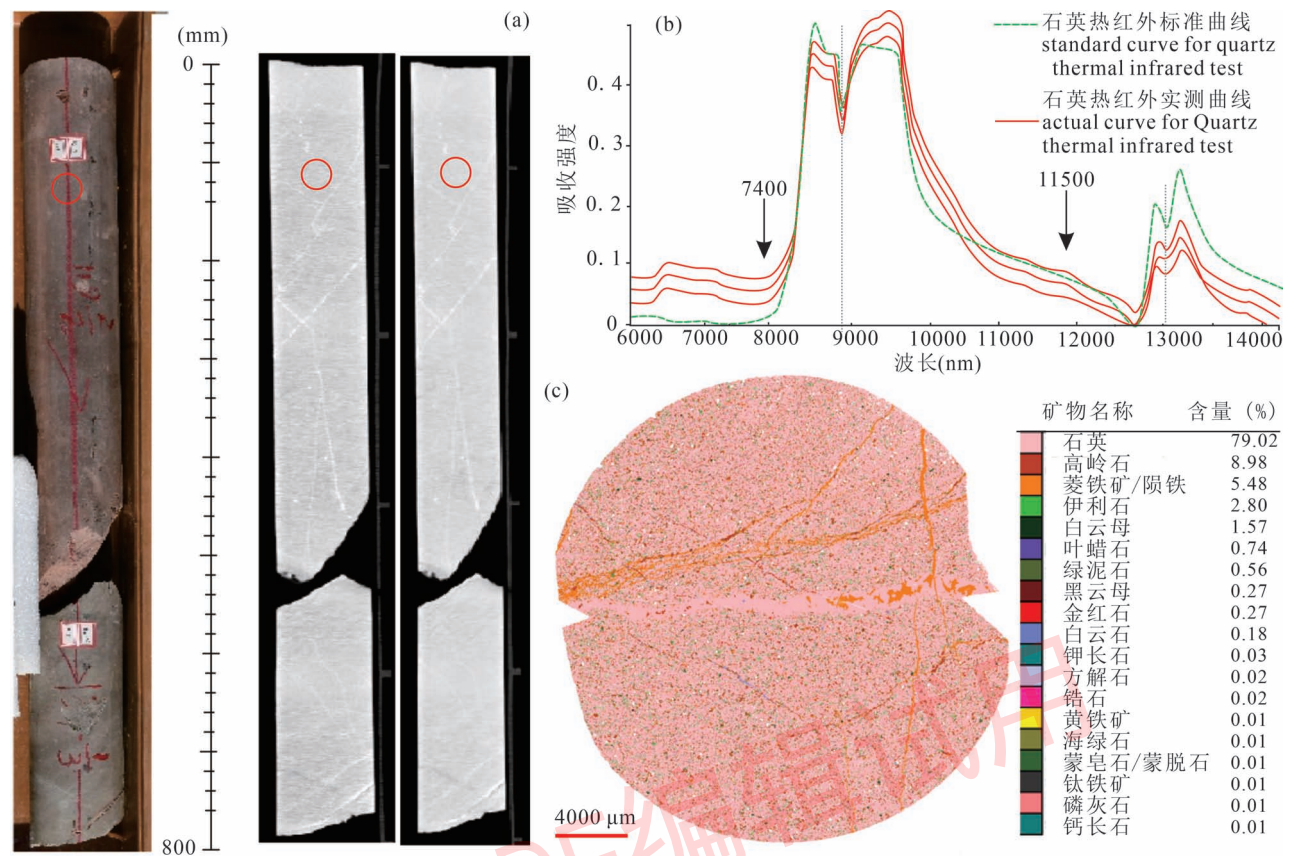


图2 雀莫错组石英砂岩红外光谱特征与 QEMSCAN 测试结果(180.74~181.29 m,暗红色粉岩段,裂缝较为发育,方解石填充,岩芯下部含少量泥质条带;红圈为测试位置)

Fig. 2 Infrared spectrum characteristics and QEMSCAN test results of Quemoco Formation quartz sandstone(180.74~181.29 m, dark red siltstone section, relatively developed fractures, calcite filled, a small amount of argillaceous bands below the core; red circle is the test location)

的碎屑岩沉积矿物,具有典型的“M”型热红外波谱特征,在8620 nm、12655 nm 和14450 nm 位置附近具有较明显的反射峰。8620 nm 处吸收峰极值最高,12650 nm 处吸收峰次之。14450 nm 位置吸收峰较宽,归属为Si—O 键的对称伸缩振动(图2)。

3.1.2 石膏类

石膏类矿物主要包括石膏和硬石膏,其区别在于化学组成中是否含有结晶水。石膏和硬石膏的红外光谱特征吸收峰大致相同,在短波红外和热红外均有明显的波谱特征。在短波红外上,石膏和硬石膏的吸收峰均处于1437 nm、1760 nm 处,2170 nm 处吸收峰极值最高,1760 nm 处吸收峰次之。硬石膏在1550 nm 处具有一处较宽的低值吸收峰,这与其化合物中结晶水中氢键的单极振动相关(图3)。

3.1.3 碳酸盐岩矿物

碳酸盐岩矿物是方解石和白云岩及其他碳酸类矿物的统称,在短波和热红外光谱上均具有明显的

识别特征。在短波红外上,典型的碳酸盐矿物特征峰出现在1440~2350 nm,一般在1440 nm 存在一个较高的吸收峰,在1800 nm 和2340 nm 左右存在一个幅度较小的吸收峰,碳酸盐特征峰很强,其他吸收峰比较弱。碳酸盐矿物的高光谱谱型类似,碳酸根在6450 nm、11560 nm 处具有明显的上升峰,在13750 nm 处出现明显的坡折谷。利用碳酸盐岩的红外光谱特征发现,钻孔中的碳酸盐岩在雀二段向雀三段演化时期与膏质泥岩交替发育,表明此时水动力变化剧烈(图4)。

3.1.4 黏土矿物

黏土矿物作为细粒沉积物基质的主要组成部分,其种类繁多。笔者等依据测试结果,选取其中相对含量较高的3种矿物:绿泥石、伊利石和高岭石。绿泥石的在近—中红外光谱特征表现为规律的5个吸收峰,在1415 nm、2260 nm、2368 nm 处吸收峰值较低,在1907 nm、2008 nm 处吸收峰值较高(图

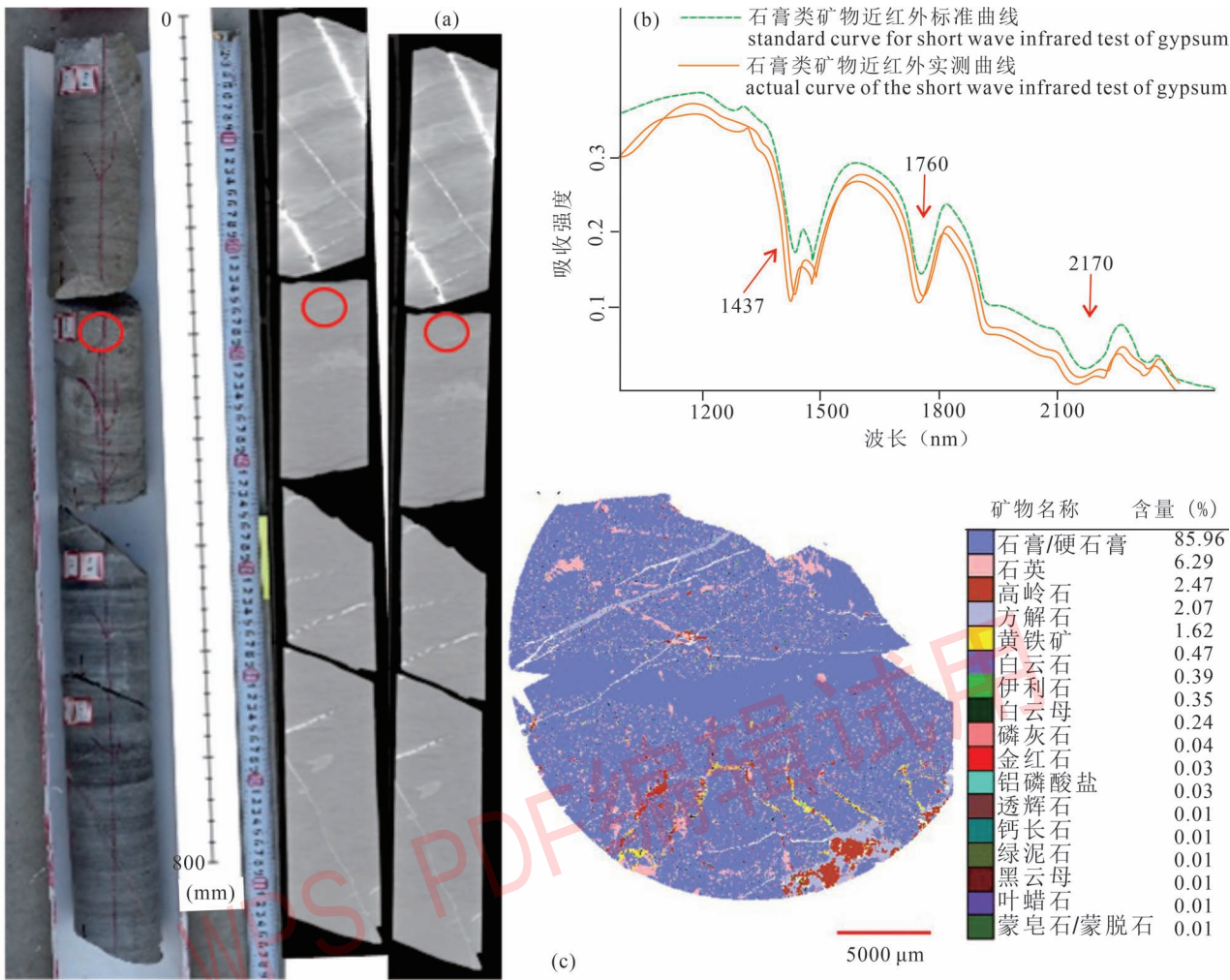


图 3 雀莫错组膏质泥岩红外光谱特征与 QEMSCAN 测试结果(435.52~435.72 m,灰白色膏质泥岩中下部石膏与泥质条带交互沉积;红圈为测试位置)

Fig. 3 Infrared spectrum characteristics and QEMSCAN test results of Quemoco Formation paste mudstone(435.52~435.72 m, grey paste mudstone, gypsum interdeposited with argillaceous bands in the middle and lower parts; red circle is the test location)

5a)。高岭石的红外光谱特征在短波层段有明显型态,其中在 1413 nm 的位置显示高值吸收峰,在 2150 nm 和 2215 nm 处显示一处宽频低值吸收峰(图 5b)。伊利石在热红外红外光谱特征表现出双峰态,吸收峰波长处于 9450 nm,左侧峰值较高,右侧峰值较低(图 5c)。在短波红外波段,伊利石在 1408 nm、2196 nm 的位置存在两个吸收峰,且 1408 nm 处吸收峰值约为 2196 nm 处的两倍(图 5d)。

3.2 地层矿物组合与岩性组合特征对比

地层矿物的发育与岩性组合具有明显的相关性。相同岩性组合中发育的主要矿物种类一般保持相对稳定。明确该地层中的矿物与岩性组合关系,可以进一步通过矿物组合的变化对地层岩性进行更精细的识别和划分。笔者等选取 QZ16 井的雀莫错

组地层岩芯作为研究对象,从岩性、矿物组合可以得出以下特征:该钻孔从底部到顶部岩性具有明显三段式结构,岩性沉积与矿物发育有良好的对应关系(图 6)。

底部雀一段岩性主要为碎屑岩。底部(782~826 m)主要为粗碎屑岩组合,下部为砾岩、含砾砂岩、石英砂岩、岩屑砂岩。向上至雀一段顶部(782~615 m),岩性过渡为以细粒碎屑岩为主的泥岩、粉砂岩、岩屑砂岩、等薄互层。该段的矿物则主要为石英+黏土矿物+碳酸盐矿物+少量长石组合沉积。在 782~856 m 深度内,石英是含量成分最高的矿物,黏土矿物含量较低。深度上升至 615 m,石英含量相对减少,黏土矿物和方解石的含量逐渐增加,至雀一段上部位置,石英含量逐渐降低至约 40%,黏土矿

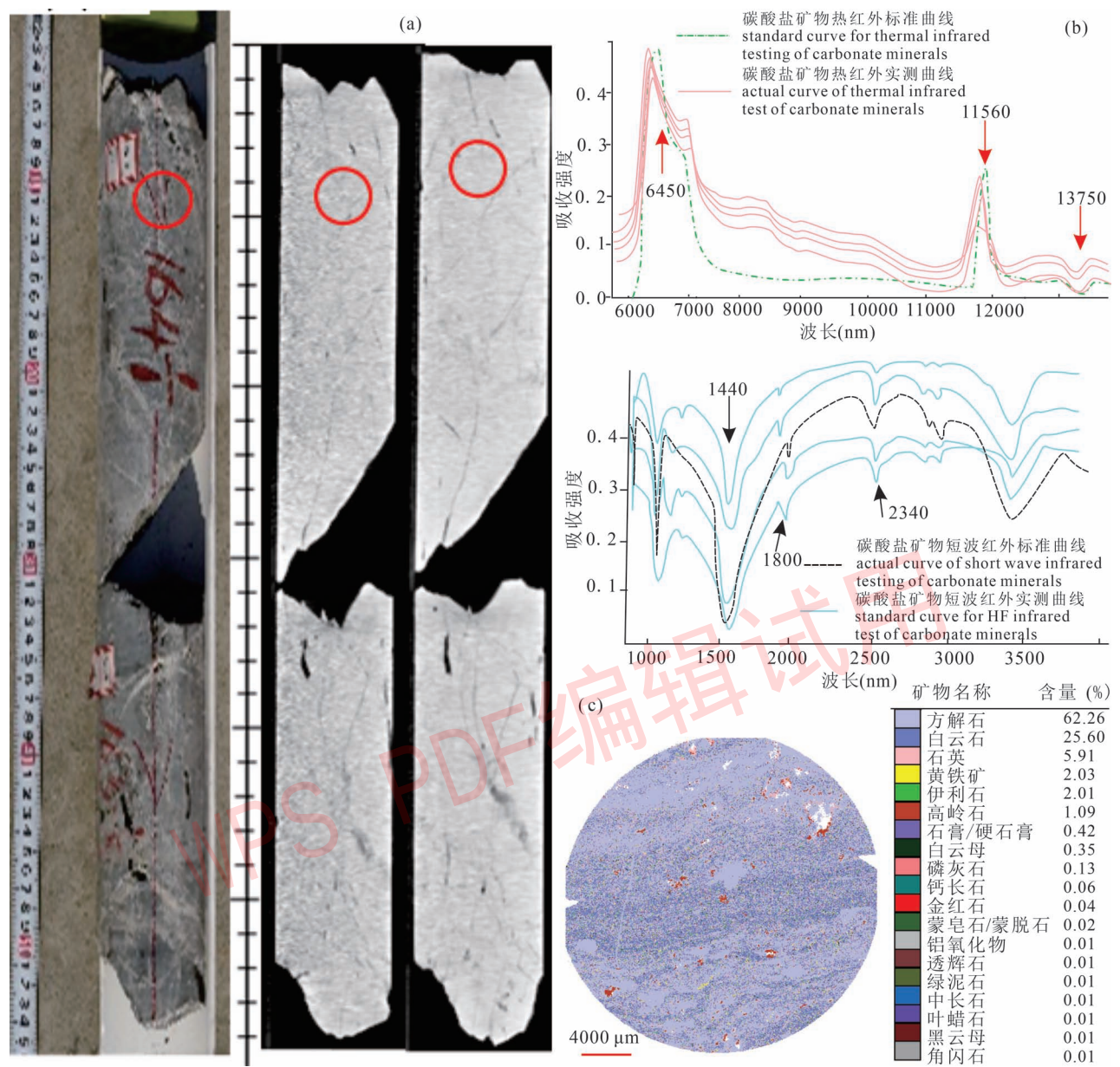


图4 雀莫错组碳酸盐岩红外光谱特征与 QEMSCAN 测试结果 (248.74~249.00 m, 灰色泥晶灰岩, 裂缝较为发育, 泥质填充, 无明显层理构造; 红圈为测试位置)

Fig. 4 Infrared spectrum characteristics and QEMSCAN test results of the Quemoco Formation carbonate rock (248.74~249.00 m, gray micrite, the cracks are relatively developed and filled with mud obvious bedding structure; red circle is the test location)

物和碳酸盐矿物含量逐渐上升至 55% 左右, 这一发现也表明此时的水深逐渐增加, 物源供应相对减少。

雀二段底部 (615~424 m) 发育一小段灰岩和碳质泥岩, 向上过渡为石膏、硬石膏、和极少量的膏质泥岩沉积。424~429 m 发育一段较纯的碳酸盐岩沉积, 表明该期间由于风暴潮或短期海平面上升导致该地持续处于水下环境, 并存在海水补给环境。随着深度上升至 310 m 左右, 岩性变为较纯的石膏类矿物+膏质泥岩+碳酸盐岩。再向上至 235 m 左右,

岩性中的泥岩含量逐渐增加, 岩性过渡为泥岩+灰岩+石膏+碳质泥岩。该段矿物则主要为石膏类矿物夹少量碳酸盐矿物、黏土矿物发育。其中从 615~429 m 石膏和硬石膏为主要的发育矿物, 总体含量超过 63%, 整体呈现以石膏类矿物为主, 伴碳酸盐类矿物交替发育, 部分位置发育少量黏土矿物沉积, 至 429 m 位置, 发育一段厚度约 5 m 的碳酸盐岩矿物沉积, 自 429~310 m, 石膏类矿物发育占比平均超过 50%, 石膏杂黏土矿物伴生沉积, 少量碳酸盐矿

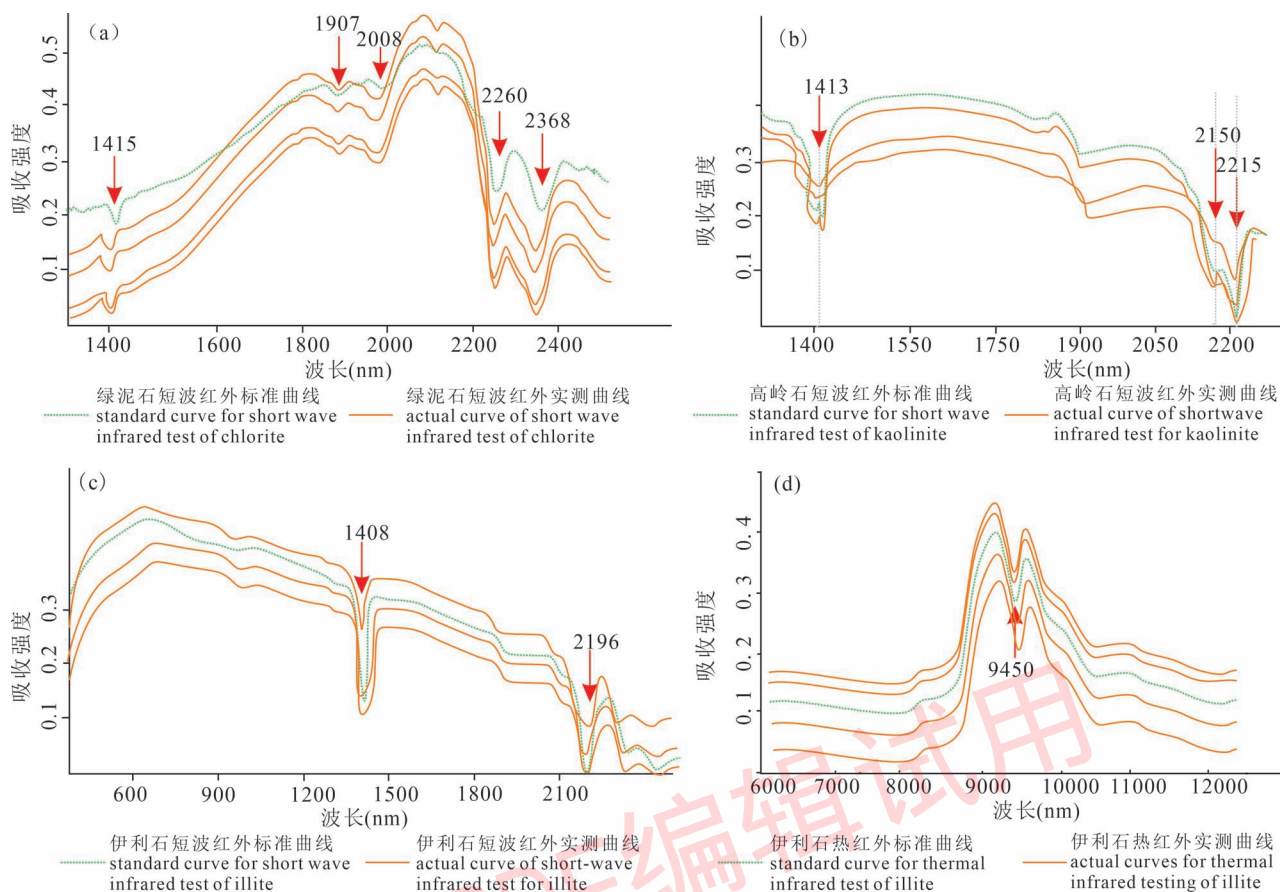


图 5 黏土矿物红外光谱特征曲线

Fig. 5 Thermal infrared spectral characteristic curve of clay minerals

物发育的矿物特征,在这一时期,出现极少量石英沉积,表明这一时期有少量陆源碎屑供应,推测为风暴潮、或海平面下降导致陆源进积。在 310 m 至 249 m 的位置,发育的主要矿物组合过渡为碳酸盐类矿物、黏土矿物和少量的石膏类矿物,表明该时期沉积环境以水下沉积环境为主。

雀三段(0~249 m)的岩性主要以碎屑岩为主,底部夹少量的灰岩、砾岩等沉积。随着深度上升,泥质含量逐渐增加。其矿物发育为以石英发育为主的矿物组合特征,依据石英和黏土矿物的发育比例大致可分为三个小层。第一小层 182~249 m 为石英+黏土矿物+碳酸盐矿物,其中的碳酸盐矿物多为角砾岩沉积携带。第二小层 123~182 m 发育为石英+黏土矿物+少量方解石,在 160 m 位置,石英的含量超过 70%,随后向上逐渐减少。第三小层 0~123 m 矿物组合较第二段类似,但各组分含量变化明显,在这一小层中,黏土矿物的含量大幅增加,表明这一时期的沉积岩性以细粒沉积为主,整体呈现水位逐渐上升的态势。顶部发育一段褐红色泥岩沉积,表明

当时的海泛面由深入水下的还原环境在构造作用下迅速下降,使细粒沉积物暴露在空气中,进而被空气氧化。

4 矿物的相对含量曲线在地层划分上的应用

4.1 单种矿物地层划分

笔者等根据层序地层学原理,结合岩石地层学、矿物学等,对石英、石膏类矿物、碳酸盐类矿物和黏土矿物 4 种矿物的相对含量变化趋势进行研究,结合测井曲线特征划分单矿物地层。寻找矿物和岩性变化的作用规律,为该地区的地层的深入研究提供有利参考。

石英是碎屑岩组成的主要矿物,常以石英胶结物的形式在砂岩中存在,并多发生次生加大反应(史丹妮等,1999)。在沉积中,石英因其本身硅质结构不易发生氧化或还原反应,所以其母岩一般为外源输入。在物源研究中,石英一直被作为研究沉积地与物源距离的一个重要指标来使用(史丹妮

等,1999)。

在 QZ16 井的雀莫错组,石英的相对含量曲线较好的展示了其在三段地层的分布特征。与测井曲

线中的 RT 曲线表现出较好的一致性。在雀一段,石英普遍发育,相对含量范围为 0.75~0.35,平均相对含量为 0.51,表明该段沉积主要是碎屑岩沉积。

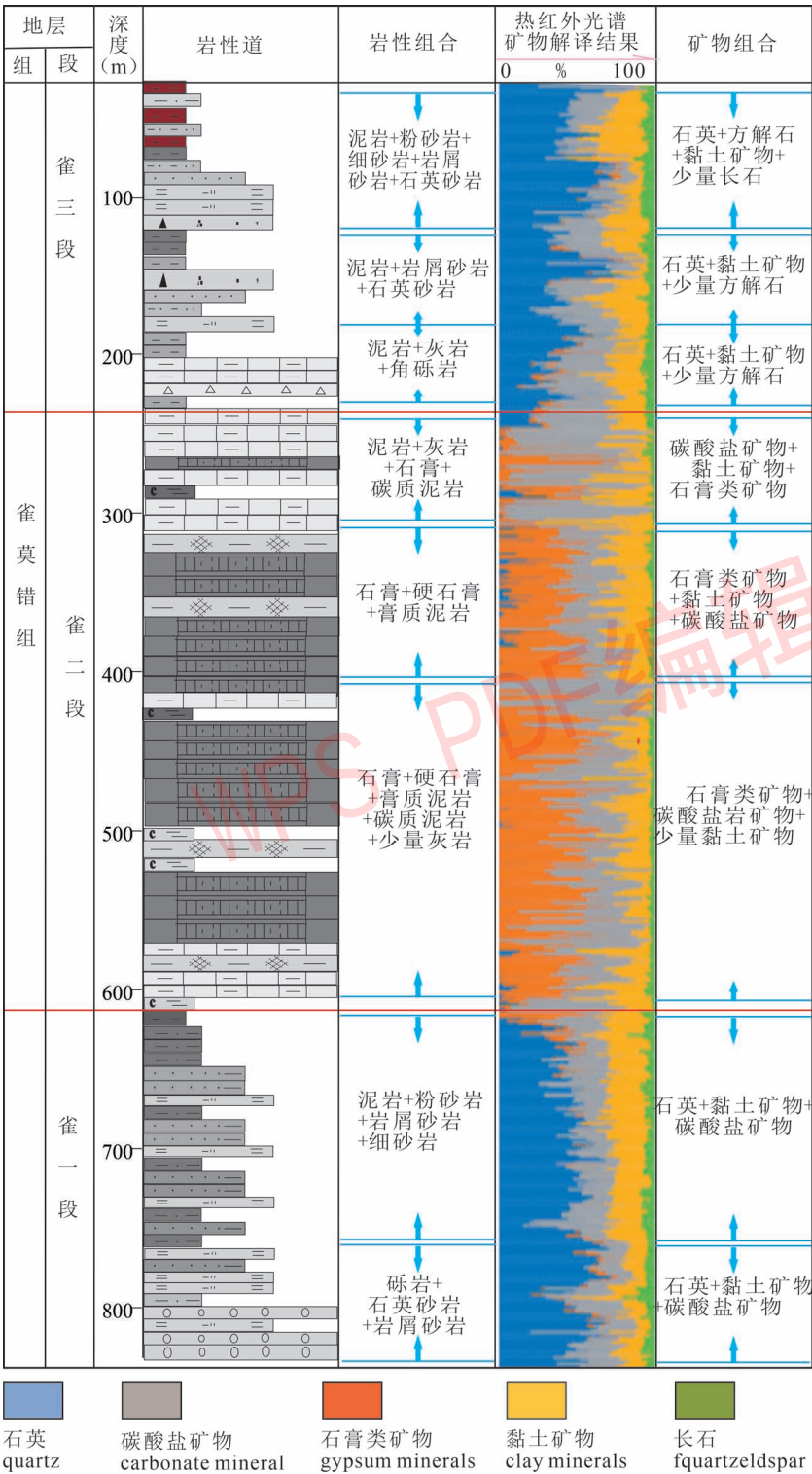


图 6 QZ16 井雀莫错组地层的岩性组合与矿物组合特征

Fig. 6 Lithologic assemblage and mineral assemblage characteristics of the Quemocuo Formation in the Well Qz 16

在雀二段,石英相对含量较少,相对含量范围为 0.12~0.03,平均值为 0.06,表明该时期地层多以自沉积为主。在雀三段,石英较为发育,相对含量范围为 0.51~0.26,平均相对含量值为 0.35,表明该时期主要为碎屑岩沉积(图 7)。

在三段地层内,通过对石英相对含量曲线的数值及变化趋势进行研究,进一步划分出段以下小层。在雀一段,划分出三个小层,自下而上分别命名为:雀一¹、雀一²、雀一³。在雀一¹中,石英含量自下而上相对含量由 0.75 逐渐降低至 0.36 左右,表明粗碎屑供给逐渐减少,随后相对含量由 0.36 逐渐增加至 0.7 左右,并一直维持至 782 m,而后迅速减少,RT 值曲线特征呈现明显的齿状和箱型的复合结构,表现出一个环境变化较剧烈的完整的先水进再水退的超短期旋回特征。在雀一²中,石英含量稳定在 0.4~0.5 之间,RT 的曲线变化较稳定,偶见指状结构。表明这段沉积时期,陆源碎屑供给较为稳定。在雀一³中,石英相对含量呈现先稳定沉积后逐渐降低的趋势,RT 曲线特征表现为下部为稳定的箱型,上部为钟摆型,表明沉积环境开始逐渐变化,呈现水进的特征。

在雀二段,石英含量维持在低位,其相对含量变化趋势亦不明显,RT 值始终保持高位,曲线特征表现主要为箱型,故不对地层进行更加精细的划分。

在雀三段,划分出 3 个小层,自下而上分别命名为雀三¹、雀三²、雀三³。在雀三¹中,石英含量自下而上相对含量由<0.1 逐渐增加至 0.3 左右,经历短暂突变后上升至 0.5 左右,RT 曲线表现出剧烈的齿状变

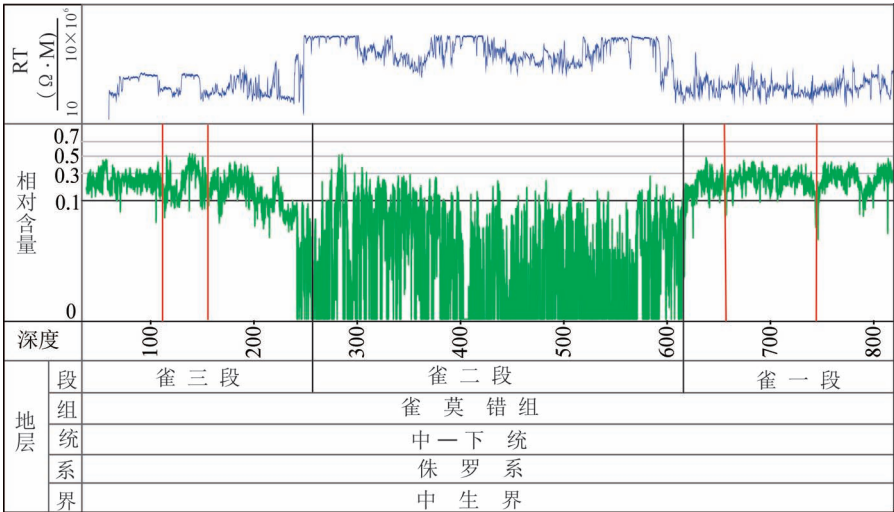


图 7 石英地层划分结果

Fig. 7 Quartz stratigraphic division results

化,表明环境变化逐渐剧烈,粗碎屑供给逐渐增加,并保持较长时间的稳定供应。在雀三²中,石英相对含量变化较剧烈,其值域处于 0.25 至 0.6 之间波动,RT 曲线表现出明显的箱型,表明这段沉积时期,陆源碎屑总体持续供给,但供给量较不稳定。在雀三³中,石英相对含量系数一直维持在 0.5 左右,RT 曲线表现为阶梯状特征,供给较稳定随后迅速降低至 0.1 以下,表明沉积进入下一时期。

石膏类矿物包括石膏和硬石膏等硫酸钙矿物(以下统称石膏)。是在浓盐水中,过饱和状态下形成的,一直作为沉积学中对潟湖、蒸发盆地等封闭沉积环境研究的重要指标(郭佩等,2022)。在 QZ16 井的录井及现场的岩芯观察中,雀莫错组二段总厚约 366 m,存在大段较纯的石膏和硬石膏层。其性质致密、厚度大,被众多研究学者作为玛曲地区油气系统中的优质盖层对待(谢小国等,2016)。

在石膏相对含量变化曲线上,同样较为明显的展示了雀莫错组的三段式特征。在雀一段和雀三段,石膏的相对含量值为 0.02~0.04,且保持相对稳定,结合地质认识,表明在这两段中,石膏为外源携带沉积,不作为地层划分依据。但在雀二段,石膏类矿物相对含量保持在 0.4~0.6。表明该时期石膏类矿物是其主要沉积物质。众多的研究学者也通过这一特征将其划分为干旱环境。

依据石膏的相对含量曲线的数值及变化趋势,将雀二段划分为 3 个小层,自下而上分别命名为:雀二¹、雀二²、雀二³。在雀二¹中,石膏含量自下而上相对含量由<0.1 逐渐增加至 0.5 左右,在保持一段时间后,相对含量逐渐增加至 0.65,表明沉积环境逐渐封闭或气候长期干旱,而后在 429 m 处,石膏相对含量值迅速降低。在雀二²中,石膏相对含量变化较强,其值处于 0.2 至 0.5 之间波动,表明这时期,石膏仍处于沉积的过程中,或受风暴,洪水等影响,石膏含量间歇性

变化。在雀三³中,石膏的相对含量系数>0.3,且变化剧烈,在 252 m 左右迅速降低至 0.03,地层进入雀一段(图 8)。

碳酸盐矿物在岩石中较为常见,在沉积中主要为白云岩和方解石两种矿物发育,其成因有沉积型、热液型、岩浆型、风化型(郭佩,2022)。在形态上多见六角晶簇或碎屑状晶片。在雀莫错组中,碳酸盐矿物曲线总体上相对含量较低,但韵律特征明显,自下而上划分为 7 个小层。

雀一段根据相对含量变化曲线,划分为雀一¹和雀一²两个小层。在雀一¹中,相对含量的平均值在 0.03 左右,极值差距较大,表明该段中沉积环境变化较剧烈,雀一²中,相对含量的平均值为 0.035,但是曲线较平滑,表明此时沉积环境较稳定。在雀二段,碳酸盐矿物的相对含量变化较为剧烈,最高值

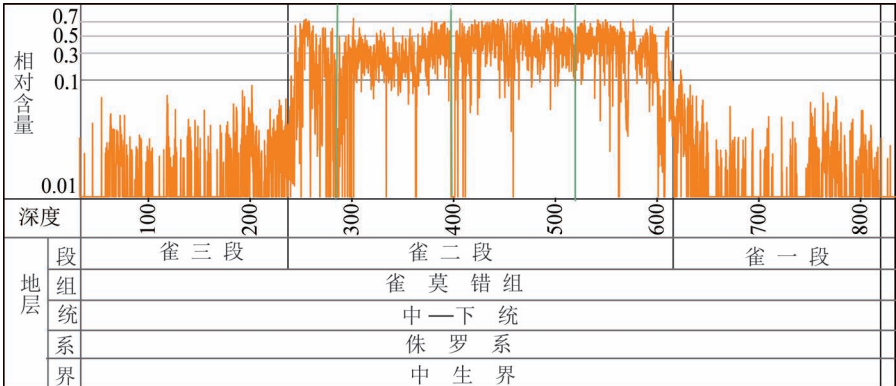


图 8 石膏地层划分结果

Fig. 8 Gypsum strata division results

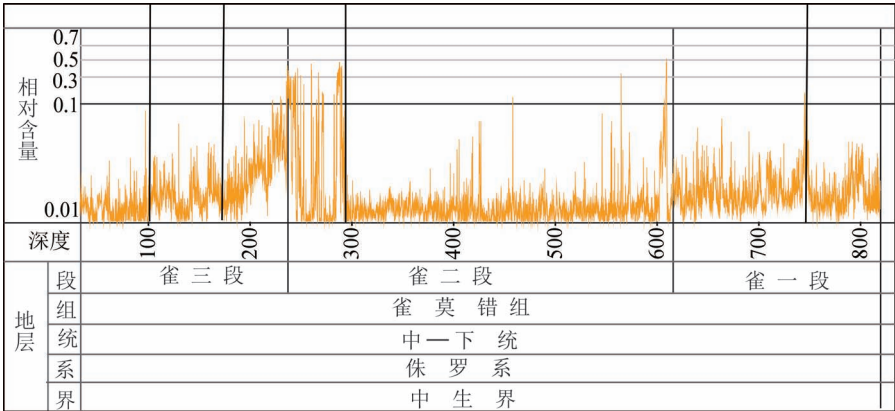


图 9 碳酸盐矿物地层划分结果
Fig. 9 Calcite stratigraphic division results

多为 0.5,最低值为 0。在雀二¹ 中,碳酸盐岩物成分的相对含量大致保持在 0.02 左右,偶有大于 0.05 出现,推测为风暴潮或短期特大潮导致海水迅速填充导致。而在雀二² 中,碳酸盐岩矿物成分的相对含量大致保持在 0.02,偶有大于 0.05 出现,推测为风暴潮或短期特大潮导致海水迅速填充导致。在雀三段中,根据其曲线变化趋势及相对值将其划分为 3 个小层。在雀三¹ 中,碳酸盐岩矿物的相对含量持续下降,由峰值 0.3 下降至 0.05,在雀三² 中,其相对含量变化剧烈,保持在 0.06~0.01 间波动,在雀三³ 中,碳酸盐岩矿物的相对含量保持较为稳定,平均含量为 0.015(图 9)。

黏土矿物作为沉积岩基质的主要组成部分,其种类繁多。一般以细粒沉积物或孔隙填充物形态居多。黏土矿物的相对含量的多少与沉积环境的变化对应关系明显,相对含量的曲线特征与 GR 表现出明显的正相关关系。黏土矿物在雀莫错组的发育具有明显的三段式特征,雀一段和雀三段比较发育,平均值含量超过 0.15,但在雀二段,黏土矿物的相对含量平均低于 0.02,形成典型的“凹”型曲线。

根据其相对含量的曲线变化情况,雀一段划分出雀一¹、雀一²、雀一³ 三个小层。雀一¹ 中,黏土矿物的含量保持相对较高,平均值在 0.2 左右 GR 值变化程度较大,表现为两个

钟形特征,雀一² 中,黏土矿物的含量变化剧烈,最大值超过 0.2,最小值小于 0.01,GR 曲线表现为剧烈的齿状。雀一³ 中,黏土矿物的相对含量的值呈现持续下降的态势,平均值为 0.06。雀三段中黏土矿物的相对含量曲线呈现明显的三段发育特征,划分出划分出雀一¹、雀一²、雀一³ 三个小层,GR 曲线在雀三段与黏土矿物的相对含量变化曲线特征变化一致,表现为明显的三段式(图 10)。

4.2 多矿物联合地层划分

综合测井、岩性等方面,对 QZ16 井地层进一步划分,结合各矿物的相对含量曲线,对其进行比对和矫正。由此得出结论,雀一段自下而上划分为三个小层,分别命名为雀一¹、雀一²、雀一³。雀二段在测井上没有明显特征,而根据矿物的变化曲线则划分为 2 个小层,自下而上命名为雀二¹、雀二²。雀三段自下而上则划分为 3 个小层,自下而上命名为:雀三¹、雀三²、雀三³(图 11)。

雀一段中雀一¹ 的岩性主要发育为砾岩沉积,识别沉积相为河口坝或冲洪积,矿物发育以石英为主,黏土矿物和碳酸盐岩矿物相对含量次之,测井上表现为 RT、AC、DEN 值较高 GR 值较低,雀一² 中的岩性以中砂岩与泥岩互层沉积,下部砂岩含量较高向上含量逐渐减少,识别为多期河道叠加,其矿物主

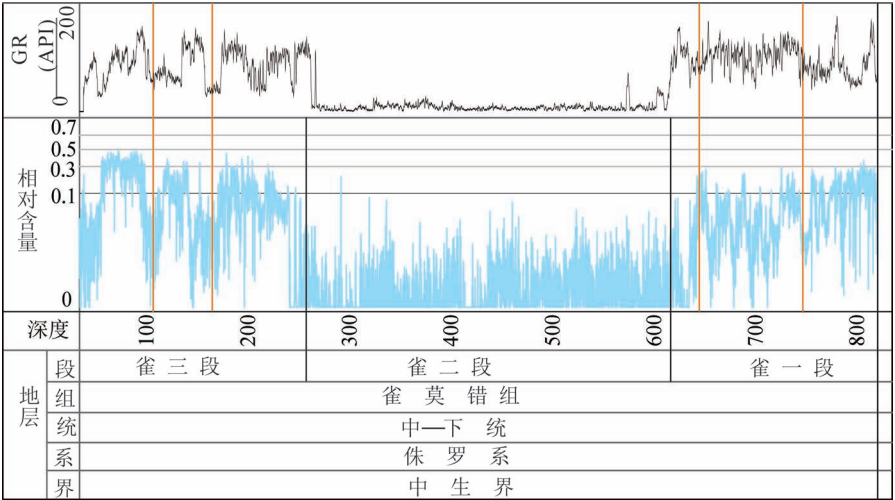


图 10 黏土矿物地层划分结果
Fig. 10 Clay minerals stratigraphic division results

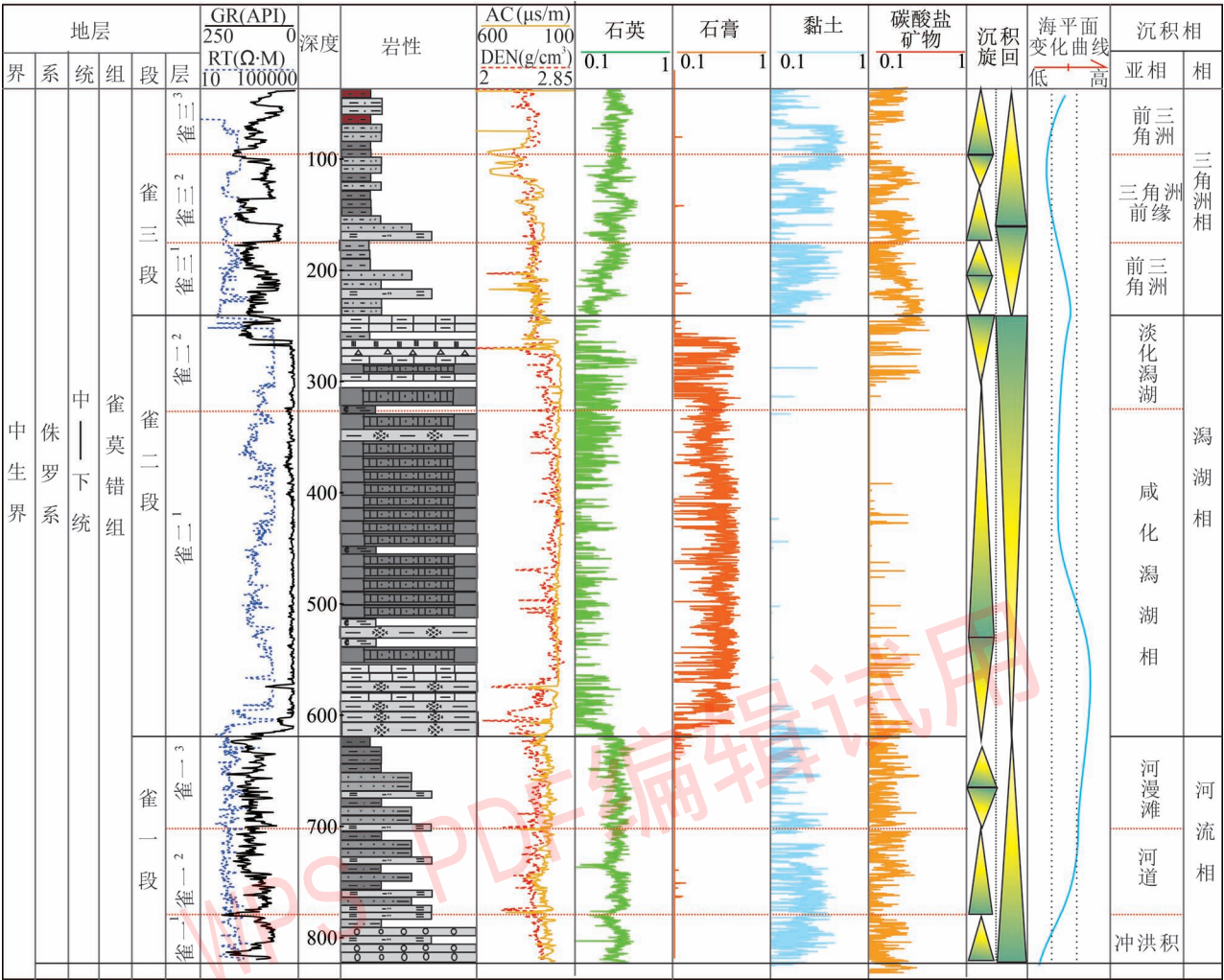


图 11 玛曲地区测井曲线与矿物相对含量综合柱状图

Fig. 11 Comprehensive profile of log curves and relative content of minerals in Maqu area

要为石英发育,黏土矿物次之,测井上表现为 GR 值先较低而后增加的箱型与钟型式样、RT 值较稳定,曲线形态呈现幅度较小的齿状,佐证了这一论断。雀一³ 岩性中泥质含量逐渐增加,粒度逐渐减小,沉积相识别为河漫滩沉积,在该小层中,黏土矿物发育呈现间层状,表明此时受外界因素影响较大,水供给充足时,黏土较发育,水供给不足时,沉积岩性则以中细砂岩为主,测井上则表现为 GR 和 RT 均为明显的齿状式样,这也佐证了该层在这一时期的水动力变化较大。

雀二段整体发育潟湖相沉积,雀二¹ 的岩性发育石膏、膏质泥岩和少量的薄层泥岩,下部发育少量的碳酸盐岩,矿物组合主要为石膏、硬石膏和少量的黏土矿物碳酸盐岩矿物,测井上没有明显特征,此时的沉积相识别为咸化潟湖沉积,雀二² 则发育少量

泥岩、薄层石英砂岩,结合多段碳酸盐矿物,表明此时应处于较湿润的气候中,沉积供给主要来自陆源碎屑沉积,在矿物组合上,雀二² 矿物组合较为复杂,为黏土矿物、石英、碳酸盐岩矿物和部分石膏组成,沉积相识别为淡化潟湖沉积。

在雀三段中,雀三¹ 沉积岩性自下而上为泥岩、中—细砂岩、石英砂岩、粉砂岩、泥岩,为明显的先向上变粗再逐渐变细的完整的粒序特征,此时石英含量呈现一个先逐渐增加再逐渐减少的曲线特征,黏土矿物的相对含量逐与碳酸盐岩矿物则明显相反,测井曲线的表现为 GR 为齿状箱型结构,RT 则较平缓,局部出现指状式样,识别沉积相为前三三角洲,海平面逐渐降低,沉积由陆向海进积。雀三² 则主要为泥质粉砂岩、中细砂岩沉积岩性,识别沉积相为三角洲前缘,表现为一个完整的沉积粒序测井曲线

GR 表现为两个低值的箱型结构,RT 则表现为明显的低值,,这与石英的相对含量曲线比较类似。在雀三³ 中,沉积岩性以细粒沉积为主,多见泥岩沉积,此时黏土矿物的相对含量最高,石英次之,识别沉积相为水下三角洲的前三角洲亚相。

5 讨论与结论

综合 QZ16 井的测井曲线、岩性、矿物等信息,矿物的相对含量曲线与录井岩性具有高度的拟合性。石英的相对含量曲线与砂岩等粗碎屑沉积物对应关系较好,黏土矿物的相对含量曲线与泥岩等细粒碎屑沉积物存在较高的拟合度。石膏类矿物的相对含量曲线则与雀二段的膏岩层的岩性变化高度相似。

在测井特征上,石英的相对含量曲线与伽马,电阻曲线的曲线特征在雀一段和雀三段比较类似,而与雀二段的测井曲线特征呈相反的特征。黏土矿物与 GR 曲线特征较为相近。

与测井、岩性等传统的地层划分方法对比,矿物因成因和物源不同,在地层变化上极为敏感,对于岩芯观察和传统方法无法识别的地层可以通过矿物的相对含量变化对其进行划分。通过这一方法,可以更好的发现地层中的岩性变化情况,进而知道其物源供应—环境变化等情况,为研究区的沉积环境变化、海平面升降提供更多有利的依据。

同时必须注意的是,由于当前设备和计算方式差异,岩芯中矿物的精确含量无法直接得出,而更趋向于使用矿物相对含量的变化趋势与传统研究方法结合。在矿物的相对含量的计算结果中,对于一个点位的数值,矿物的相对含量之和小于或等于 1,所以如能得到矿物的精确含量数值,这无疑能对地质学研究中的地层划分,物源分析,沉积相识别提供更加直观和准确的依据。

致谢:本次论文的实验和数据处理过程中得到了自然资源实物地质资料中的张启燕、张弘等工程师的大力协助,论文撰写过程中得到了自然资源实物地质资料中心的史维鑫高级工程师的指导,诸位审稿专家对本文提出了许多建设性意见,再此一并表示感谢!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
陈康,纪广轩,朱有峰,张华川. 2020. 基于高光谱岩芯扫描系统研

究城门山铁路坎铜矿床的蚀变特征. 岩矿测试, 39(6): 10.
代晶晶, 赵龙贤, 姜琪, 王海宇, 刘婷玥. 2020. 红外高光谱技术在地质找矿中的应用综述. 地质学报, 94(8): 2520~2533.
杜少荣, 苗忠英, 郑绵平, 张永生, 张雪飞, 陈文西. 2021. 北羌塘盆地中侏罗统夏里组蒸发岩锶同位素地球化学特征及物质来源. 矿床地质, 40(5): 1072~1084.
付修根, 王剑, 吴滔, 何江林. 2010. 羌塘盆地胜利河地区雀莫错组地层及其古环境. 中国地质, 37(5): 1305~1312.
郭佩, 李长志. 2022. 含油气盆地蒸发盐矿物成因类型及其地质意义. 古地理学报, 24(2): 210~225.
刘若涵, 何碧竹, 郑孟林. 2019. 羌塘盆地东部晚三叠世—侏罗纪构造—沉积演化. 岩石学报, 35(6): 1857~1874.
李亚林, 王成善, 黄继钧. 2008a. 羌塘盆地褶皱变形特征、定型时间及其与油气的关系. 石油与天然气地质, 29(3): 283~289+296.
李亚林, 王成善, 李永铁. 2008b. 西藏羌塘盆地侏罗系膏盐岩与油气成藏. 石油学报, 29(2): 173~178.
丘东洲, 乃东专, 李晓清, 陈明. 2007. 羌塘盆地与特提斯域油气盆地类比及其含油气远景. 沉积与特提斯地质, 27(3): 1~13.
史丹妮, 金巍. 1999. 砂岩中自生石英的来源、运移与沉淀机制. 岩相古地理, 19(6): 65~70
史维鑫, 易锦俊, 王浩, 田荣军. 2020. 马抗铁矿钻孔岩芯红外光谱特征及蚀变分带特征研究. 岩矿测试, 39(6): 934~943.
孙佳珺, 辛仁臣. 2016. 塔北南坡志留系柯坪塔格组下段底部砂岩亚段沉积体系分析. 新疆地质, 34(2): 240~244.
孙强强. 2016. 岩石矿物成分的测定与分析研究. 山东工业技术, 16(4): 112~112.
王剑, 付修根, 沈利军, 谭富文, 宋春彦, 陈文彬. 2020. 论羌塘盆地油气勘探前景. 地质论评, 66(5): 1091~1113.
王丽波, 苏爱国, 郑有业, 李超, 久凯. 2012. 羌塘盆地中生界海相黑色泥页岩特征及页岩气远景区预测. 地学前缘, 19(3): 264~279.
王庆生. 2016. 岩石矿物成分的测定与分析研究. 世界有色金属, 5(4): 126~128.
王若, 张帅, 刘晓, 祝有海, 李志伟. 2018. 基于 F—X 预测滤波的基追踪算法在雀莫错地区低信噪比资料处理中的应用. 石油物探, 57(3): 428~435.
王营, 辛仁臣. 2019. 苏丹 Muglad 盆地 Moga 地区 Abu Gabra 组二段层序及沉积微相. 西安石油大学学报(自然科学版), 34(5): 1~13.
谢小国, 陈文彬, 曾胜强, 罗兵, 申华梁. 2018. 羌塘盆地玛曲地区膏岩盖层测井评价. 盐湖研究, 26(3): 14~19+43.
薛伟伟, 马安林, 胡修棉. 2020. 羌塘盆地侏罗系—白垩系岩石地层格架厘定. 地质论评, 66(5): 1114~1129.
杨莉, 马伯永, 李尚林, 王根厚. 2015. 西藏羌塘盆地东部中侏罗统混合沉积层序地层学研究. 中国地质, 42(4): 1037~1045.
张弘, 高卿楠, 郭东旭. 2021. 花岗伟晶岩型锂矿红外反射光谱特征及锂元素定量反演研究. 矿物岩石, 41(1): 25~31.
张玉修, 张开均, 李勇, 李亚林, 谢尧武, 黎兵. 2007. 西藏羌塘盆地东部中—上侏罗统沉积特征及沉积相划分. 大地构造与成矿学, 31(1): 52~62.
赵政璋, 李永铁. 2000. 青藏高原中生界沉积相及油气储盖层特征. 北京: 科学出版社.
赵振华, 严爽. 2019. 矿物—成矿与找矿. 岩石学报, 35(1): 31~68.
Clark R N, Swayze G A, Livo K E, Kokaly R F, Sutley S J, Dalton J B, McDougal R R, Gent C A. 2003. Imaging spectroscopy: Earth and planetary remote sensing with the usgs Tetracorder and expert

- systems. *Journal of Geophysical Research*, 108(E12): 5131.
- Chen Kang, Ji Guangxuan, Zhu Youfeng, Zhang Huachuan. 2020&. Study on alteration characteristics of the Chengmenshan Tielukan copper deposit by a hyperspectral core scanning system. *Rock and Mineral Analysis*, 39(6): 143~152.
- Dai Jingjing, Zhao Longxian, Jiang Qi, Wang Haiyu, Liu Tingyue. 2020&. Review of infrared spectroscopy applied in geological ore exploration. *Acta Geologica Sinica*, 94(8): 2520~2533.
- Du Shaorong, Miao Zhongying, Zheng Jinping. 2021&. Strontium isotopic geochemical characteristics and origin of evaporites from Middle Jurassic Xiali Formation in North Qiangtang Basin. *Mineral Deposits*, 40(5): 1072~1084.
- Francos N, Notesco G, Ben D E. 2021. Estimation of the relative abundance of quartz to clay minerals using the visible—near-infrared-shortwave—infrared spectral region. *Applied Spectroscopy*, 75(7): 986~1005.
- Fu Xiugen, Wang Jian, Wu Tao, He Jianglin. 2010&. Stratigraphy and paleoenvironment of the Quemo Co Formation in Shengli. *Geology in China*, 37(5): 1305~1312.
- Guo Pei, Li Changzhi. 2022&. Genesis of evaporates in petroliferous basins and the sedimentary and climatic significances. *Journal of Palaeogeography*, 24(2): 210~225.
- Laukamp C, Caccetta M, Chia J, Noffke N. 2010. The uses, abuses and opportunities for hyperspectral technologies and derived geoscience information. *Proceeding of Geo-computing Conference Brisbane*: AIG Bulletin: 73~76.
- Liu Ruohan, He Bizhu, Zheng Menglin. 2019&. Tectonic—sedimentary evolution during Late Triassic—Jurassic period in the eastern part of the Qiangtang basin, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 35(6): 1857~1874.
- Li Yalin, Wang Chengshan, Huang Jijun. 2008a&. Deformation characteristics and finalizing age of the folds in the Qiangtang Basin and their relations to oil and gas accumulation. *Oil and Gas Geology*, 29(3): 283~289+296.
- Li Yalin, Wang Chengshan, Li Yongtie. 2008b&. Characteristics of the Jurassic saline deposits and its significance to hydrocarbon accumulation in Qiangtang Basin of Tibet area. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 173~178.
- Qiu Dongzhou, Nai Dongzhuan, Li Xiaoxing, Chen Ming. 2007#. The analogy between the Qiangtang Basin and the Tethyan petroliferous basins and their petroliferous prospects. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 27(3): 1~13.
- Shi Danni, Jin Wei. 1999&. The source migration and precipitation mechanism of authigenic quartz in sandstone. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 19(6): 65~70.
- Shi Weixin, Yi Jinjun, Wang Hao, Tian Rongjun. 2020&. Study on the characteristics of the infrared spectrum and the alteration zoning of drill core in the Makeng iron deposit. *Rock and Mineral Analysis*, 39(6): 143~152.
- Sun Jiajun, Xin Renchen. 2016&. Analysis of depositional system of bottom sandstone sub-member in lower member of Kalpintag Formation, Silurian in Southern Slope of Tabei Uplift. *Xin Jiang Geology*, 34(2): 240~244.
- Sun Qiangqiang. 2016#. Determination and analysis of rock mineral composition. *Shandong Industrial Technology*, 16(4): 112~112.
- Wang Jian, Fu Xiugen, Shen Lijun, Tan Fuwen, Song Chenyan, Chen Wenbin. 2020&. Prospect of the potential of oil and gas resources in Qiangtang Basin, Xizang (Tibet). *Geological Review*, 66(5): 1091~1113.
- Wang Libo, Su Aiguo, Zheng Youye, Li Chao, Jiu Kai. 2012&. Characteristics of Mesozoic marine black shales and prediction of shale gas prospective area in Qiangtang Basin, Tibet. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 264~279.
- Wang Qingsheng. 2016&. Determination and analysis of mineral composition of rock. *World Nonferrous Metals*, 5(4): 126~128.
- Wang Ruo, Zhang Suai, Liu Xiao, Zhu Youhai, Li Zhiwei. 2018&. Application of F—X prediction filtering-based basis pursuit method on seismic data with low SNR of Quemocuo area in the Qiangtang Basin in Tibetan Plateau. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 57(3): 428~435.
- Wang Ying, Xin Renchen. 2019&. Sequence and sedimentary microfacies of the second member of Abu Gabra Formation in Moga area of Mu—glad Basin, Sudan. *Journal of Xi'an Shiyong University (Natural Science Edition)*, 34(5): 1~13.
- Xie Xiaoguo, Chen Wenbin, Zeng Shengqiang, Luo Bing, Shen Hualiang. 2018&. Evaluation of caprock logging cream in Maqu area of Qingtang Basin. *Journal of Salt Lake Research*, 26(3): 14~19+43.
- Xue Weiwei, Ma Anlin, Hu Xiumian. 2020&. The redefinition of the Jurassic—Cretaceous lithostratigraphic framework in the Qiangtang Basin, Xizang Plateau. *Geological Review*, 66(5): 1114~1129.
- Yang Li, Ma Boyon, Li Shanglin, Wang Genhou. 2015 &. An analysis of mixed siliciclastic and carbonate sedimentary sequence in the Middle Jurassic strata in the eastern part of the Qiangtang basin, Tibet. *Geology in China*, 42(4): 1037~1045.
- Zhang Hong, Gao Qingnan, Guo Dongxu. 2021&. Characteristics of infrared reflectance spectra and quantitative inversion of lithium element in granite pegmatite type lithium deposit. *Mineralogy and Petrology*, 41(1): 25~31.
- Zhang Yuxiu, Zhang Kaijun, Li Yong, Li Yalin, Xie Xiaowu, Li Bing. 2007&. Characteristics and sedimentary facies of the middle—upper Jurassic rocks in Qiangtang Basin, Tibet. *Geotectonica et Metallogenia*, 3(1): 52~62.
- Zhao Zhengzhang, Li Yongtie. 2000#. The Features of Mesozoic Sedimentary Facies, Reservoir and Seal Rock in Tibet. Beijing: Science Press.
- Zhao Zhenhua, Yan Shuang. 2019&. Minerals and relevant metallogeny and exploration. *Acta Petrologica Sinica*, 35(1): 31~68.
- Zhu Ying, Li Yanzhang, Ding Hongrui, Lu Anhuai, Li Yan, Wang Changqiu. 2021. Multifactor-controlled mid-infrared spectral and emission characteristic of carbonate minerals (MCO_3 , $\text{M}=\text{Mg}, \text{Ca}, \text{Mn}, \text{Fe}$). *Physics and Chemistry of Minerals*, 48(4): 46~67.

Research on regional mineral framework and stratigraphic division based on infrared spectroscopy

—Taking the Jurassic Quemocuo Formation in the Maqu area of the North Qiangtang Basin as an example

GE Tianzhu¹⁾, AN Yangsheng²⁾, SONG Liqiang¹⁾, LIU Xiao¹⁾, LUO Lintao¹⁾, GUO Dongxu¹⁾

1) Core and Samples Center of Land and Resources, China Geological Survey, Beijing, 100083;

2) Lunan Geo-engineering Exploration Institute, Yanzhou, Shandong, 272100

Objectives: The spectroscopy, petrology, and sequence stratigraphy were used to study and analyze the cores of the QZ16 Quemocuo Formation in the Maqu area of the Northern Qiangtang Basin, for more accurately classify and identify the stratigraphy and sedimentary facies of the Quemoco Formation.

Methods: The infrared spectral reflection technology was used to scan the cores of QZ16 well, analyzes the relative content curve of minerals by using the principle of sequence stratigraphy, well logging and petrology, and identifies the sedimentary facies in combination with the principle of sedimentology.

Results: Quartz, gypsum, clay minerals and carbonate minerals were identified and their relative content curves were obtained. According to the test results, the stratum is divided into eight small layers, including Que¹ Member: Que¹⁻¹, Que¹⁻², Que¹⁻³; Que² Member: Que²⁻¹, Que²⁻²; Que³ Member: Que³⁻¹, Que³⁻², Que³⁻³. Combining with petrology and well logging methods, the sedimentary subfacies can be further divided into alluvial diluvial sediments—channel sediments—floodplain—saline lagoons—desalting lagoons—pre-delta—delta front—pre-delta subfacies.

Conclusions: The infrared spectral reflection technology can be used to accurately identify mineral types and obtain their relative content information. This technology has significant advantages in large-scale core scanning and fine stratigraphic division, which can provide scientific basis for the subsequent research on sedimentary system of regional geology.

Keywords: North Qiangtang Basin; infrared spectroscopy; Quemocuo Formation; mineral analysis; stratigraphic division

Acknowledgements: The paper is the result of drilling core preservation parameter collection and application project of Oil and Gas Geological Survey of China Geological Survey (No. DD20201113). In the process of writted articles, obtained the SHI Weixin, SUN Huafeng and others guidance and help, and hereby express our gratitude.

First author: GE Tianzhu, male, born in 1993, master, assistant engineer, mainly engaged in sedimentary and sequence stratigraphy research; Email: getianzhu@126.com.

Corresponding author: An Yangsheng, male, born in 1971, senior engineer, mainly engaged in mineral geological exploration; Email: anyangsheng@126.com

Manuscript received on: 2022-08-12; Accepted on: 2023-04-13; Network published on: 2023-04-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2023.04.021

Edited by: LIU Zhiqiang

WPS PDF编辑试用