

张启燕, 史维鑫, 刘晓, 等. 高光谱扫描在碳酸盐岩矿物组成分析中的应用[J]. 岩矿测试, 2022, 41(5): 815-825.
ZHANG Qiyan, SHI Weixin, LIU Xiao, et al. Application of Hyperspectral Scanning in Mineral Composition Analysis of Carbonate Rocks[J]. Rock and Mineral Analysis, 2022, 41(5): 815-825. 【DOI: 10. 15898/j. cnki. 11-2131/td. 202112100200】

高光谱扫描在碳酸盐岩矿物组成分析中的应用

张启燕, 史维鑫*, 刘晓, 回广骥, 原春雨
(自然资源实物地质资料中心, 北京 100083)

摘要: 矿物组成及其微观特征对研究油气藏的沉积环境、岩石骨架及储集空间等方面具有重要意义。本文利用高光谱扫描和扫描电镜矿物组成定量分析技术(QEMSCAN), 对羌塘盆地二叠系龙格组碳酸盐岩岩心样品的矿物组成、含量及其空间分布规律等进行研究, 为羌塘盆地古生代碳酸盐储层油气藏评价提供矿物组成和微观特征方面的依据。结果表明: 龙格组岩性以微晶灰岩和粒屑灰岩为主, 矿物组成主要为方解石和白云石, 两者含量之和普遍大于 90%, 其次为石英及少量的黏土矿物和长石。矿物组成具有明显纵向分段特征: 上段方解石和白云石含量均较高; 中段白云石含量较高, 且白云化程度较为强烈, 孔隙度和渗透率均有所下降; 下段以方解石为主。黏土矿物特征分析显示, 龙格组地层经历了复杂的沉积-成岩作用和后期热扰动作用及流体作用, 这对该地区油气运移及保存有较强的影响。

关键词: 矿物组成; 高光谱扫描; QEMSCAN; 碳酸盐岩; 二叠系龙格组

- 要点:**
- (1) 高光谱扫描能快速高效地解译岩心纵向上矿物的组成特征及变化规律。
 - (2) QEMSCAN 能精细刻画、定量分析岩心矿物的组成、含量及其微观特征。
 - (3) 两个方法结合, 分层次从矿物组成空间变化到微观特征进行研究, 效果良好。

中图分类号: P575.4 **文献标识码:** B

羌塘盆地位于青藏高原腹地, 是中国陆上面积最大的中生代海相残留盆地^[1-2]。目前盆地内发现油气显示达 250 多处, 类型多样, 层位丰富, 烃源岩以各类碳酸盐岩和泥质岩为主^[2]。油气主要沿盆地断裂带及中央隆起带的边缘分布, 南羌塘隆鄂尼地区岩石露头有油气显示^[3], 隆鄂尼—昂达尔错发现碳酸盐岩古油藏带^[4-5]。在北羌塘坳陷西梁山地区发现灰岩和泥质白云岩中含油^[6]。此外在中央隆起带角木茶卡还发现了二叠系龙格组含油白云岩^[7], 而位于北羌塘坳陷的那底岗日的下二叠系含孔碳酸盐岩, 其孔隙度达 26.2%^[1], 是良好的油气储集层。这些油气显示和古油藏的发现, 均表明了羌塘盆地具有较好的油气资源前景^[8]。

石英、方解石等脆性矿物对储层裂隙发育具有控制作用, 对储集空间和渗流通道产生重要的影响^[9-10]。在油气勘探中, 认为较高含量的有机质和硅质矿物及低含量的黏土矿物和脆性裂缝发育对优质烃源岩是有利条件, 因此研究矿物组成对评价油气成藏条件、分析成藏环境以及后期的油气开采等具有重要意义。根据不同矿物在元素、化学以及色谱、光谱等性质上的差异, 矿物组成成分的分析 and 测定方法众多^[11], 如有扫描电镜矿物组成定量分析技术(QEMSCAN)、X 射线衍射技术(XRD)等。QEMSCAN 主要是通过测量矿物元素中电子由于激发而跃迁产生的能量, 判断元素种类, 分析矿物组成、含量、浓度等信息, 宋土顺等^[12]利用该技术对

收稿日期: 2021-12-10; 修回日期: 2022-03-02; 接受日期: 2022-03-13
基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“油气地质调查钻井岩心保存参数采集与应用”(DD20201113)
第一作者: 张启燕, 硕士, 工程师, 从事岩心数字化研究工作。E-mail: zqy25105@163.com。
通信作者: 史维鑫, 硕士, 高级工程师, 从事岩心多参数数字化与地质应用研究工作。E-mail: shiweixincugb@163.com。

松辽盆地大庆长垣扶余油层致密砂岩中矿物组成和含量进行分析,并确定矿物之间的矿物接触关系,为成岩演化提供依据。XRD 是利用岩石被 X 射线照射时,不同元素的原子或分子因其结构或形态不同而产生不同程度的衍射现象,以此研究矿物种类、元素或分子的构型等。Woodruff 等^[13]、冉敬等^[14-15]、王琦等^[16]利用 XRD 分析了黏土矿物、长石、蓝晶石、橄榄石的含量,与其他方法对比,具有准确性高的特点。根据不同矿物在短波、红外光谱以及热红外波段的特征峰(反射峰或吸收峰)的深度、半高宽等信息,可分析和计算矿物组成及含量。如孙灵芝等^[17]从月壤的混合光谱解算出矿物类型和含量比例,曹会等^[18]、张弘等^[19]通过高光谱数据定量计算出黏土矿物和石英含量。此外还利用化学分析手段,确定元素种类及矿物比例及矿物关系^[20]或利用自然伽马能谱测量方法计算黏土矿物的含量^[21]等。

目前羌塘盆地研究目标主要集中在中生代储层和烃源岩,而对于古生代储层研究较少。本文通过高光谱岩心扫描仪对羌资 5 井二叠系龙格组碳酸盐岩岩心进行全段扫描,并进行综合、系统的分析和解译,研究纵向上矿物组成及含量的相对变化特征,总结其变化规律,讨论盆地的地质作用对储层影响。此外,还利用高精度、高分辨率的 QEMSCAN 技术对地层的矿物组成和含量及微观特征进行精细刻画,讨论矿物组成对储层物性的影响。将两种方法结合,共同对龙格组地层矿物组成和变化规律进行系统分析和综合评价,为羌塘盆地中央隆起带油气勘探提供依据。

1 研究区背景

羌塘盆地从南到北依次划分为南羌塘坳陷、中央隆起带和北羌塘坳陷^[22]。盆地内各类灰岩和白云岩发育广泛。经前人研究,认为羌塘盆地发育 4 套油气组合,其中古生界油气组合主要位于石炭系和二叠系^[22],以碳酸盐岩或碎屑岩为主要储层,泥页岩或碳酸盐岩为主盖层。

2012 年中国地质调查局成都地质调查中心在盆地中央隆起带部署钻探羌资 5 井,该井位于羌塘盆地中央隆起带上,孔深 1001.4m,从上而下分别为第四系(10m)、二叠系龙格组(11~413m)和展金组(414~1001.4m),未钻穿展金组^[23]。第四系发育松散黄土和砂砾岩;龙格组以各类灰色薄中层、块状灰岩为主;展金组岩性丰富,包含泥岩、硅质岩、火山角

砾岩及碳酸盐等^[23]。该井是羌塘盆地少数钻遇二叠系地层的井位,为研究盆地内二叠系地层及其油气地质特征提供了一个重要的“窗口”。

2 实验部分

2.1 实验方法

2.1.1 龙格组岩心高光谱扫描

本次实验采用澳大利亚生产的 Hylogge-3TM 型光谱扫描仪对龙格组岩心以 2.5cm 间隔进行图像-光谱反射扫描,光谱测量范围主要包括可见光波段(400~1100nm,光谱分辨率为 3nm)、短波红外波段(1100~2500nm,光谱分辨率为 10nm)和热红外光谱(6000~14500nm,光谱分辨率为 18nm@6000nm、150nm@14000nm)。数据处理采用澳大利亚联邦科学与工业组织(CSIRO)开发的 TSG8.0(The spectral geologist)软件进行人机交互解译,该软件主要集成了各类分析算法及多重特征提取等方法^[24-25],可对岩石、土壤、矿物等地质样品进行波谱分析和解译^[26]。

2.1.2 矿物组成定量分析

QEMSCAN 可对矿物、岩石等进行定性定量分析,该系统包括扫描电镜、X 射线能谱仪(EDS)及自动分析处理数据的专用软件(iDiscover)。利用高能电子束对柱塞样表面进行扫描,然后利用 iDiscover 软件中 iMeasure 模块将能谱和背散射图像进行校准,再根据背散射图像灰度和 X 射线强度进行对应,得出元素的含量,随后在 iDiscover 软件中 iExplorer 模块结合矿物数据库(SIP)转化为矿物相,得出矿物集合体嵌布特征的分布图。本次采用美国 ThermoFisher 公司 Quanta 650F 场发射环境扫描电镜作为最主要的硬件平台(表 1),加速电压在 0.2~30kV,束流值在 0.78pA~26nA 之间,其整体扫描面覆盖面积为 25mm 直径圆面,分辨率为 25μm;局部精细扫描大小为 1mm×1mm,分辨率为 1μm。扫描结果由 iDiscover 和 iMeasure 专业处理软件进行数据处理及矿物数据管理。

2.2 实验样品

本次对 11~413m 龙格组碳酸盐岩岩心进行连续高光谱扫描,岩心颜色以深灰色、浅灰色及棕灰色为主,岩性以薄-中层泥晶灰岩及微晶灰岩为主,部分井段见块状角砾(砂屑)灰岩、泥页岩及硅质岩,偶见黑色沥青,部分位置见亮色方解石脉胶结。

表 1 矿物组成定量分析系统(QEMSCAN)设备技术参数
Table 1 Technical parameters of hardware equipment of QEMSCAN

参数	QEMSCAN 分析系统工作条件
加速电压	0. 2~30kV
探针电流	≤200nA,可连续调节
放大倍数	6~1. 0×10 ⁶ 倍
EDS 采集角	35°
水平视场宽度	工作距离为 10mm 时,水平视场宽度为 5mm, 工作距离为 65mm 时,水平视场宽度为 18. 8mm
样品要求	直径≤150mm 直径;高度≤60mm; 质量≤2000g;360°旋转
分辨率	高真空模式:0. 8nm(30kV,STEM);1. 0nm(30kV, SE);2. 5nm(30kV,BSE);3. 0nm(1kV,SE); 低真空模式:1. 4nm(30kV,SE);2. 5nm(30kV, BSE);3. 0nm(3kV,SE)

高光谱解译结果结合物性分析,在具有代表性和典型性的井段岩心上钻取直径约 2. 5cm 的 10 块柱塞样(表 2),岩性以各类碳酸盐为主,颜色以深灰-浅灰色-浅灰为主,样品编号以龙格组首字母命名,分别从 LG-1 到 LG-10 共 10 个样品进行矿物组成定量分析。其中,样品 LG-2 和 LG-6 为泥晶砂屑灰岩,LG-3 为灰质白云岩,LG-1 为微晶灰岩,其余样品为泥晶灰岩。本次 QEMSCAN 扫描和分析的样品是在柱塞样的基础上切取约 5mm 厚的薄片,经过洗油、洗盐处理,之后经过烘干、机械粗磨、氩离子精细抛光和喷碳等处理,形成表面平整且具有导电性的薄片,便于进行 QEMSCAN 扫描。

表 2 羌资 5 井龙格组碳酸盐岩样品信息
Table 2 Information of carbonate rock samples from the Longge Formation in Qiangzi-5 Well

样品编号	深度(m)	岩性
LG-1	58. 25	灰色微晶灰岩
LG-2	81. 43	深灰色泥晶砂屑灰岩
LG-3	111. 92	灰色灰质白云岩
LG-4	157. 93	浅灰色泥晶灰岩
LG-5	160. 43	灰色泥晶灰岩
LG-6	248. 35	灰色泥晶砂屑灰岩
LG-7	282. 83	灰色泥晶灰岩
LG-8	339. 69	深灰色泥晶灰岩
LG-9	358. 60	深灰色泥晶灰岩
LG-10	391. 44	深灰色泥晶灰岩

3 结果与讨论

3.1 矿物特征分析

3.1.1 高光谱特征

本次高光谱解译中,单个数据点代表面积约为

1cm×1cm 的岩心表面光谱信息。黏土矿物和石膏含量以其短波红外的光谱吸收强度标定(成正比关系),石英、长石和碳酸盐含量以其热红外波段区光谱解混比例标定,石膏包括硬石膏。碳酸盐类包含方解石和白云石,以短波波长区间区分碳酸盐种类,方解石波段为 2337~2340nm,白云石波段为 2326~2330nm。根据碳波长变化趋势判别方解石和白云石的主要位置。由于沉积地层中伊利石和蒙脱石一般为共生关系,且两者光谱特征相似,因此伊利石和蒙脱石未作区分,统称为伊/蒙混层。根据高光谱扫描矿物解译结果特征,龙格组岩心从上到下可分为上中下三段(图 1),具体特征描述如下。

上段:该段岩心深度在 11~80m,岩性以灰色、深灰色灰岩为主,夹多层砂质和泥质岩,矿物颗粒较小,主要为泥晶-微晶结构。光谱特征表现为碳酸盐相对低,局部变化较大,特别是在 31~41m 和 86~91m 处含量低。石英、石膏和黏土矿物含量高,长石含量较高,但局部变化较大。部分岩心发育碳酸盐-石英脉,且遭受不同程度的氧化后颜色变浅(黄褐色)。该段高含量的石英、黏土矿物等矿物组成指示了较丰富的陆源碎屑供给。

中段:该段岩心深度在 81~149m,岩性以浅灰色厚层的灰岩为主,局部夹薄层硅质岩。该段局部裂隙发育,多为泥质充填。根据短波红外光谱显示该处岩心以白云石(波长 2326nm)为主的碳酸盐组成,相较于上下两段,与陆源碎屑相关的石英、长石及黏土矿物等明显减少,而碳酸盐含量明显增加且趋于稳定。矿物组成变化特征显示该段沉积环境从近陆源碎屑供给较丰富的滨浅海沉积逐步过渡为海相沉积。局部岩心颜色呈紫红色(图 2),发育网脉,以碳酸盐填充为主,少量赤铁矿分布,表明其后期可能经历了交代蚀变作用。

下段:该段岩心在深度 150~413m,岩性以灰-灰黑色灰岩为主,普遍发育浅色细脉-网脉,局部密集,脉中主要方解石,局部可见石英。碳酸盐含量稳定在高水平,碳波长稳定在 2338~2340nm,表明该段是以方解石为主的碳酸盐。此外,石英和伊/蒙混层含量整体偏低,高岭石含量较高且连续分布,在 184~350m 处高岭石含量达到整组最高,随深度增加其含量有所降低。在底部(350~413m)部分矿物含量变化较大,如石膏和长石含量降低。在部分细脉和灰岩裂隙中矿物胶结充填(图 3),从反射光谱分析结果可见脉中含高结晶度的高岭石,为热液成因。

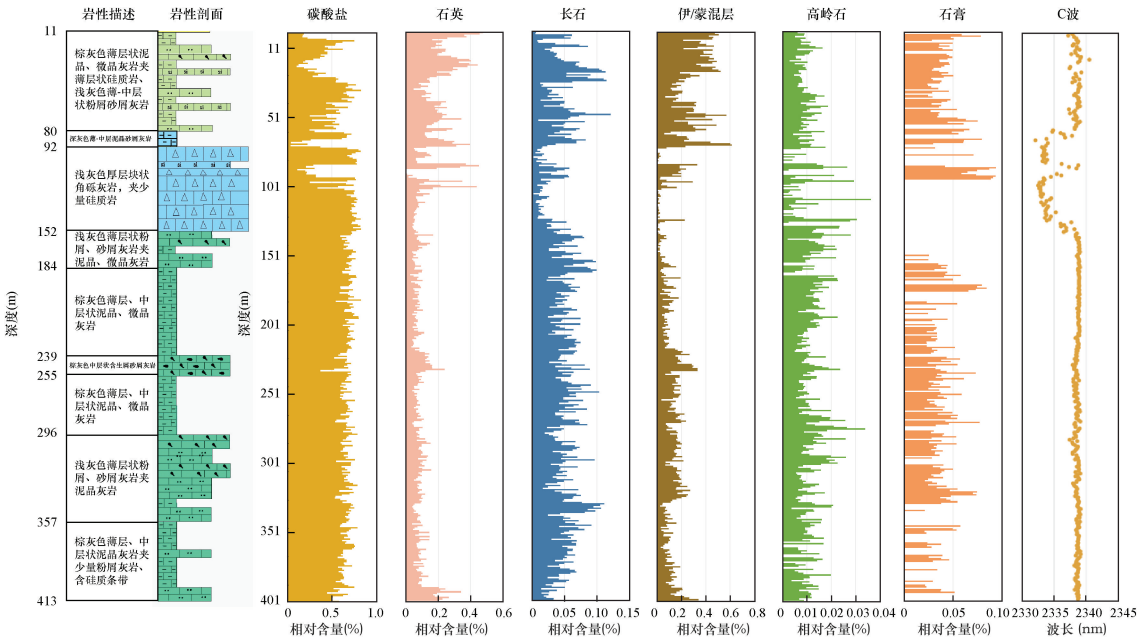


图 1 羌资 5 井龙格组碳酸盐岩样品光谱解译结果

Fig. 1 Spectral interpretation results of carbonate rock sample from the Longge Formation in Qiangzi-5 Well

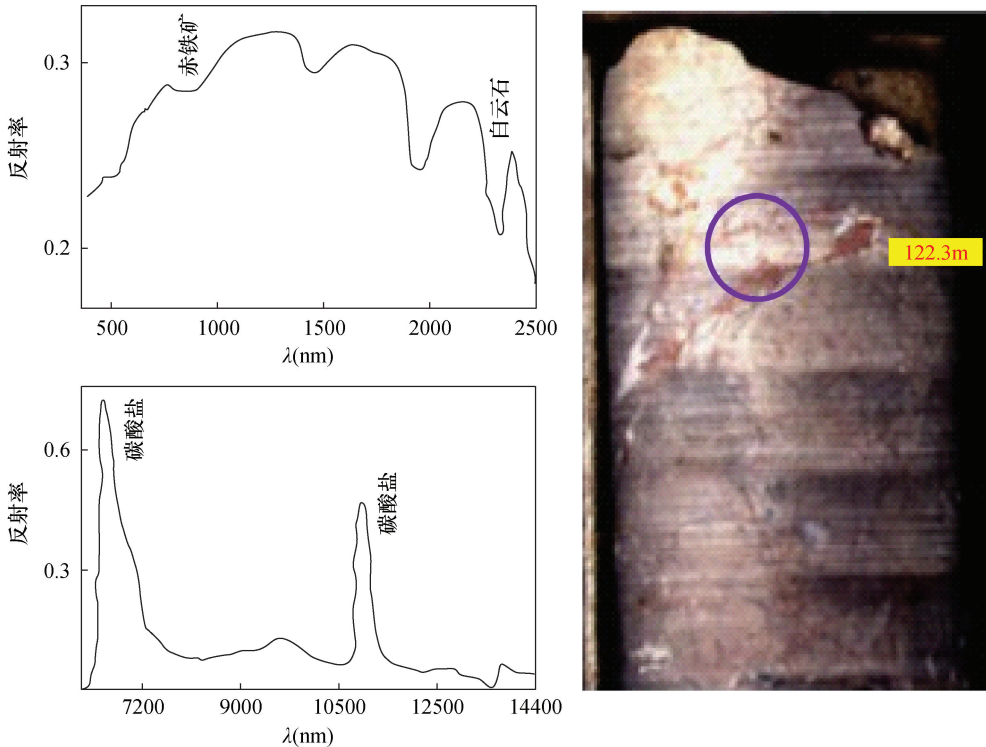


图 2 羌资 5 井龙格组碳酸盐岩样品反射光谱特征(深度 122.3m)

Fig. 2 Reflectance spectrum characteristics of carbonate rock sample from the Longge Formation in Qiangzi-5 Well (Depth: 122.3m)

3.1.2 矿物组成特征

QEMSCAN 结果显示,样品矿物以方解石和白云石为主,两种矿物含量普遍超过 90%,且随着深度的增加,碳酸盐矿物含量增加,该地层表现为稳定

的浅海沉积。少数样品如泥晶砂屑灰岩(LG-2 和 LG-6),其碳酸盐矿物含量在 81%~87%,其中代表陆源碎屑沉积的石英含量较高(8.28%~10.68%)。此外还有少量的黏土矿物(含量<2%)、黄铁矿

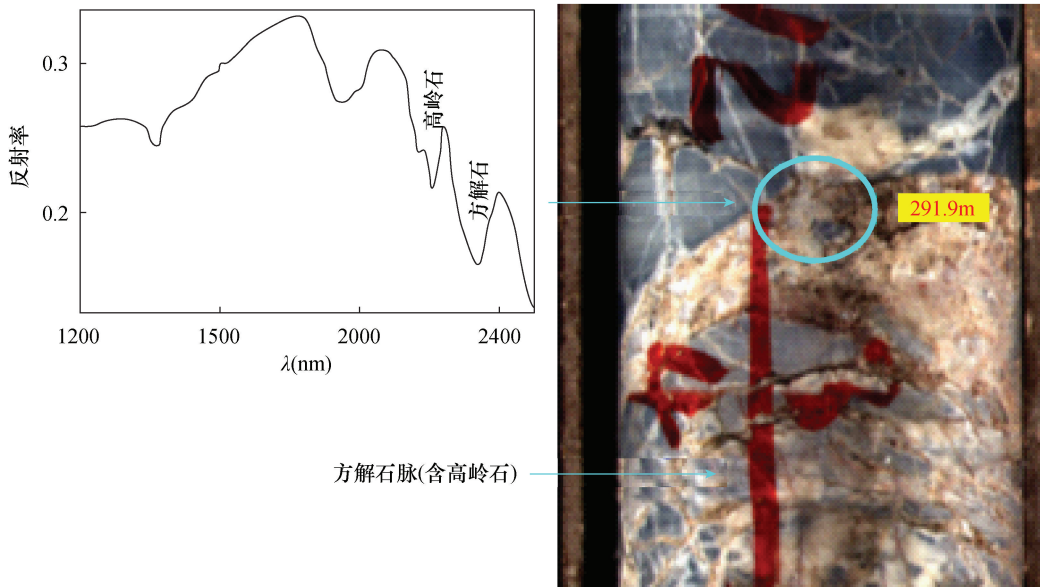


图 3 羌资 5 井龙格组含方解石脉灰岩反射光谱特征(深度 291.9m)

Fig. 3 Reflectance spectrum characteristics of limestone with calcite veins of the Longge Formation in Qiangzi-5 Well (Depth: 291.9m)

(含量<1%)、石膏、菱铁矿等(表 3),指示龙格组地层在沉积过程中,有较丰富的陆源碎屑物输入。

表 3 羌资 5 井龙格组碳酸盐岩样品主要矿物分析结果

Table 3 Main mineral composition analysis of carbonate rock sample from the Longe Formation in Qiangzi-5 Well

样品编号	岩性	矿物组成及含量
LG-1	微晶灰岩	方解石(96.71%),石英(3.09%),黄铁矿(0.09%)
LG-2	泥晶砂屑灰岩	方解石(50.68%),白云石(31.05%),石英(10.68%),菱铁矿(4.01%),磷灰石(2.82%)
LG-3	灰质白云岩	白云石(55.36%),方解石(44.31%),石英(0.15%)
LG-4	泥晶灰岩	方解石(99.04%),石英(0.89%),伊利石(0.04%)
LG-5	泥晶灰岩	方解石(99.33%),石英(0.55%),石膏(0.05%)
LG-6	泥晶砂屑灰岩	方解石(87.76%),石英(8.28%),高岭石(1.96%)
LG-7	泥晶灰岩	方解石(96.57%),石英(2.43%),高岭石(0.55%)
LG-8	泥晶灰岩	方解石(92.82%),石英(5.52%),黄铁矿(0.82%)
LG-9	泥晶灰岩	方解石(96.50%),石英(3.35%),高岭石(0.08%)
LG-10	泥晶灰岩	方解石(98.62%),石英(1.31%),高岭石(0.02%)

图 4 为 LG-1 样品的 QEMSCAN 整体和局部分析结果,该样品为灰色微晶灰岩,微晶结构,粒度细小。QEMSCAN 结果显示该样品矿物主要为方解石,含量高达 96.71%,少量石英分散分布,含量为 3.09%,此外还有微量的黄铁矿和高岭石,含量均小于 0.1%。挑选了 0.4mm×0.4mm 的局部区域进行分辨率为 1μm 的精细扫描,从图上可以清晰看到各类矿物颗粒的分布状态,该区域方解石含量为 96.99%,具有他形~半自形结构的石英颗粒广泛分布,颗粒细小,粒径基本在 8μm 以下,含量为 2.85%,其次为高岭石零星分布,最大粒径可达 25μm。此外局部偶见细粒的伊利石和黄铁矿。

图 5 分别为 LG-2(图 5a)、LG-3(图 5b)、LG-4(图 5c)和 LG-6(图 5d)岩心样品的 QEMSCAN 扫描图像。从图 5a 中可以看出 LG-2 样品明显分为上部和下部两个区域,中间以白云石条带分隔开。上部区域中分布有较丰富的生物碎屑颗粒,平均直径在 1~2mm 之间,指示了较强的沉积水动力环境,粒间常被石英等矿物充填,局部发生白云化,此外在该区域可见宽度 0.03~0.1mm 互相切割的微裂隙,裂隙中基本为方解石填充。下部以方解石为主,白云石化较弱,细小的白云石颗粒呈层状分布,多个大颗粒石英分布在该区域上部,粒径达 0.3~6mm,颗粒边缘发生不同程度的溶蚀作用。图像还显示了两条纵向发育的裂缝,其中裂缝(A)纵穿了上下两区域,宽度达 2~3mm,主要填充物为菱铁矿,而裂缝

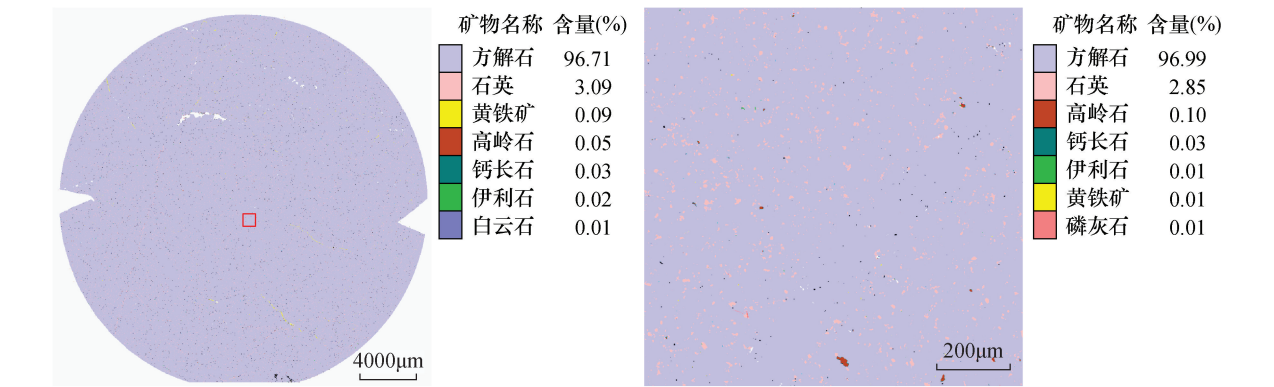
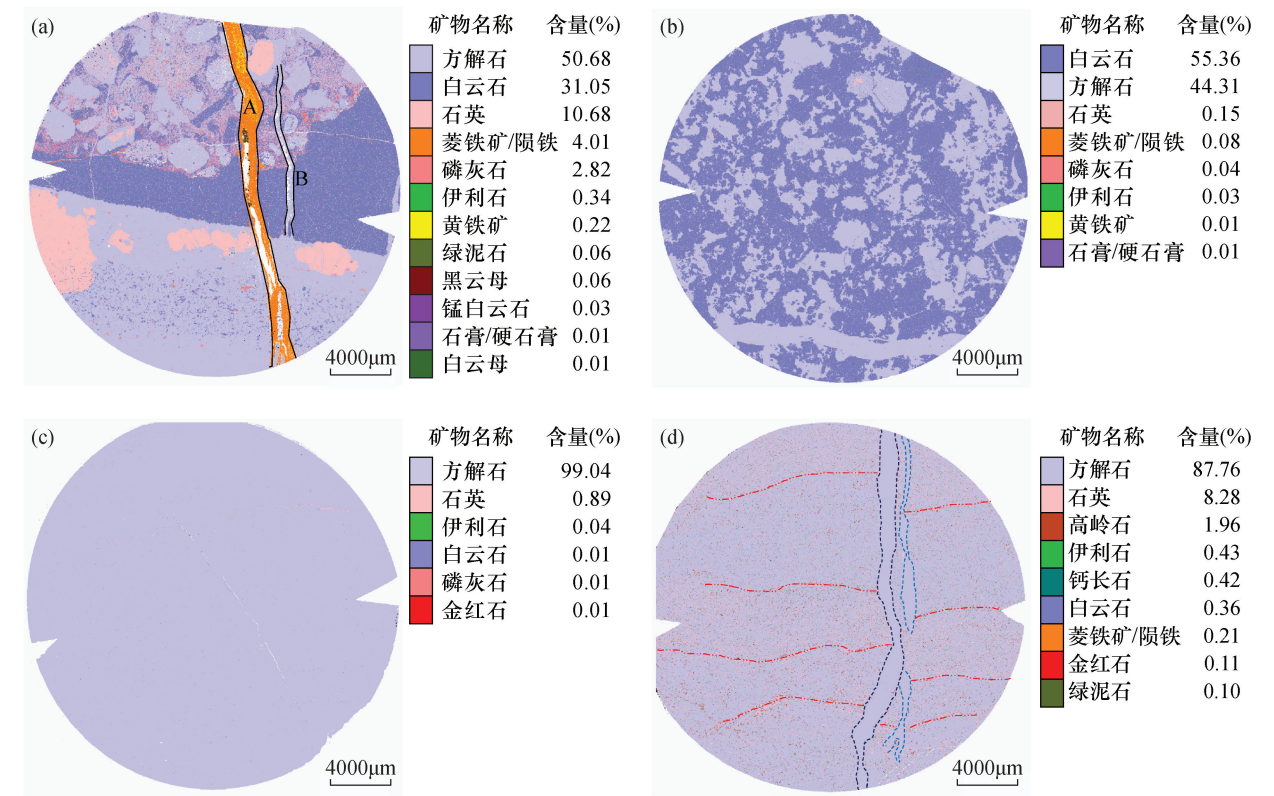


图4 羌资5井龙格组岩心样品LG-1的区域和局部矿物组成定量分析扫描图像

Fig. 4 Regional and local QEMSCAN scanning images of rock sample LG-1 from the Longge Formation in Qiangzi-5 Well



a: LG-2 号样品 QEMSCAN 扫描图像; b: LG-3 号样品 QEMSCAN 扫描图像;
c: LG-4 号样品 QEMSCAN 扫描图像; d: LG-6 号样品 QEMSCAN 扫描图像。

图5 羌资5井龙格组碳酸盐岩岩心样品 QEMSCAN 扫描图像

Fig. 5 QEMSCAN scanning images of carbonate rock sample from the Longge Formation in Qiangzi-5 Well

(B)宽度约为 0.8~1mm,该裂缝未贯穿到底部,其填充物主要为方解石。LG-3 样品为灰色灰质白云岩,微晶结构,晶屑少量。QEMSCAN 分析结果显示主要为白云石和方解石两种矿物,含量分别为 55.36%和 44.31%,占总量的 99.67%,其他矿物含量占比不足 1%。局部可见石英矿物颗粒,粒径细小。该样品显示发生了严重的重结晶和白云化成岩

作用,原生的碎屑颗粒形态已不复存在,白云化普遍发生且程度较高,严重的成岩作用导致了晶间孔隙几乎被破坏殆尽。下部显示有一条宽度为 1~2mm 的裂缝已经被方解石胶结充填。LG-4 样品为浅灰色泥晶灰岩,方解石含量超过 99%,其他矿物极少分布。LG-6 样品为灰色泥晶砂屑灰岩,方解石含量为 87.76%,该样品中可见较多的陆源碎屑石英

(含量 8.28%) 和黏土矿物(高岭石 1.96%、伊利石 0.43%) 以层理状发育,指示了远离沉积物源、长距离搬运和弱水动力沉积的特征。碎屑颗粒在纵向上呈现多期次的变化,指示了水动力的周期性变化特征。纵向发育的裂缝两侧发生了明显错断,距离达 2~3mm,该裂缝后期被方解石胶结充填。

此外,为了确保 QEMSCAN 测试结果的准确性,选取了 LG-2 岩心样品的同一区域进行扫描电镜(分辨率 200nm)和 QEMSCAN 的对比(图 6)。扫描电镜图像(图 6b)为灰度图,清晰可见矿物及毫米级裂缝,且显示裂缝局部被高亮度矿物充填。为了进一步确定矿物种类,在不同灰度的矿物位置(红点为灰度值较高位置,黄点为灰度值较低位置)进行能谱(EDS)测试,测试结果(图 6c)显示红点位置为方解石,而黄点位置为白云石,与 QEMSCAN 结果一致。从扫描电镜图像可以看出方解石呈浅灰色,白云石呈深灰色,白云石选择性交代了部分方解石,呈不同的形态分布于方解石周边。

3.2 二叠系龙格组地质特征

3.2.1 地质作用及其影响

区域热演化历史对研究盆地构造演化过程和盆地油气生成、运移和聚集成藏等有重要意义^[27]。羌塘盆地中央隆起带普遍经历多期次的构造-岩浆叠加改造作用^[28],通过红外反射光谱技术对羌资 5 井岩心中的伊/蒙混层和高岭石(地开石)两种矿物进行精确识别,这两种矿物可反映古生代地层在热演化过程中温度以及酸碱度等物化条件。

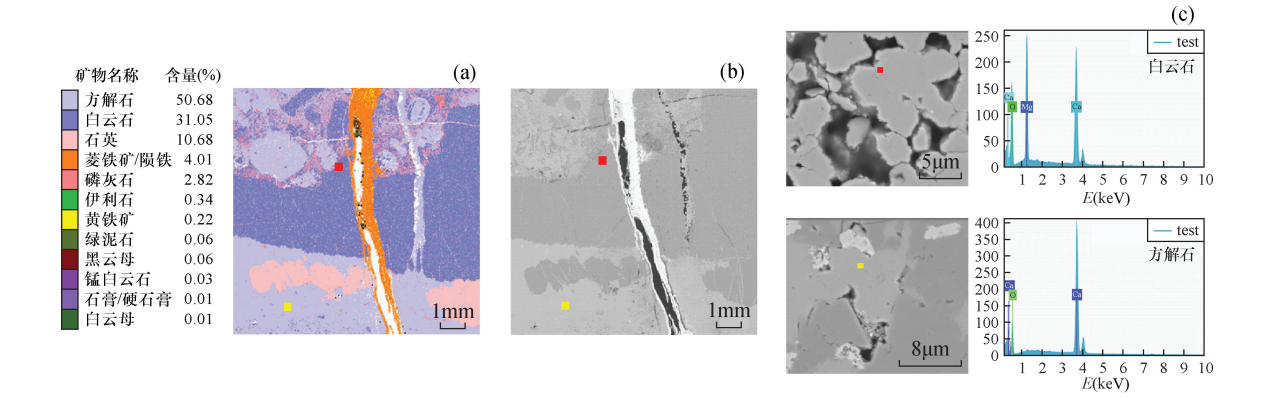
伊/蒙混层形成于近中性环境,覆盖温度范围广(50~250℃)^[29-30],是碎屑沉积岩中最常见的富铝层状硅酸盐矿物之一。在羌资 5 井龙格组中,伊/蒙

混层逐渐占较大比例,表明盆地内岩石普遍经历了较高温度的热演化过程。高岭石是常见的黏土蚀变矿物,形成于偏酸性、偏氧化环境,形成温度范围为 100~200℃。在羌资 5 井龙格组灰岩中,填充有细脉和网脉状高岭石,在部分砂岩和泥质岩中也可见到细脉状高岭石,反映了羌塘盆地中央隆起带龙格组在埋藏成岩阶段受到较强的偏酸性、氧化性流体作用。

从羌资 5 井光谱分析以及黏土矿物含量和分布来看,羌塘盆地中央隆起带所在的区域,在成岩过程中受到了后期热扰动和较普遍的流体作用。烃类在后期热扰动中,由其初始储藏位置沿着构造和降温方向迁移形成次生油藏。这种后期作用可能直接影响了原始油气的运移与保存。

3.2.2 物性特征及评价

龙格组以海相碳酸盐岩沉积为主,碳酸盐岩可作为油气的烃源岩和储层储层。矿物组成以方解石和白云石为主,并在纵向具有明显的分段特征,从上而下分为三段,上段以方解石和白云石组合为主,具有两者含量均较高的特点,而中段白云化程度较为强烈,白云石含量较高,下段灰岩以方解石为主。孔隙度分析显示上段孔隙度约 0.6%,以微米级的次生孔隙粒间溶孔、粒内溶孔、晶间孔以及晶间溶孔为主;中段孔隙度最低,约为 0.01%,主要为纳米级晶间孔;下段孔隙度分布范围较广,在 0.015%~1.02%之间,以微米级的粒间孔和纳米级的溶蚀孔为主。根据孔隙度结合矿物组成,分析得出龙格组白云化作用对储层物性产生了较大的影响。一般认为,白云岩之所以在深埋藏条件下具有比灰岩更好的孔隙,是由于白云石化作用改变了孔隙结构特征,



a: 样品 LG-2 的 QEMSCAN 扫描图像; b: 样品 LG-2 的扫描电镜图像; c: 样品 LG-2 的能谱测试结果。

图 6 羌资 5 井龙格组岩心样品 LG-2 的 QEMSCAN、扫描电镜和能谱测试结果

Fig. 6 Results of QEMSCAN, SEM and EDS of rock sample LG-2 from the Longge Formation in Qiangzi-5 Well

加之白云岩更抗压实,因而有利于孔隙的保存^[31];龙格组中段由于过度白云化作用,导致晶间孔隙被堵塞严重,反而造成空间储集空间结构更加致密,导致其孔隙度和渗透率下降,以纳米级为主,连通性较差,严重影响了储层质量。

4 结 论

高光谱扫描技术能高效、快速、准确地解译大尺度、全井段矿物特征并总结变化规律,而 QEMSCAN 可对矿物微观特征方面进行更为精确化和定量化分析,两种方法结合,从宏观到微观,有层次地对矿物组成、含量及变化特征进行系统分析。本文以羌塘盆地中央隆起带二叠系龙格组地层为研究对象,采用高光谱扫描和 QEMSCAN 相结合,分析了龙格组主要矿物种类、组合特征及空间分布规律,并提取了矿物的微观结构特征。龙格组主要为碳酸盐岩,矿物组成以方解石、白云石为主,两种矿物含量之和普遍超过 90%。局部白云化作用强烈,其孔隙度和渗透率均有所下降,严重影响了储层的质量。此外龙格组黏土矿物组成特征显示,该区域经历了复杂的沉积-成岩作用和后期热扰动以及流体作用,对原始油气的运移与保存有直接影响。

本次工作仅对龙格组地层的矿物特征进行精细表征,在未来的工作中可结合多尺度计算机断层扫描技术(Computed Tomography,CT),加强对地层孔隙、喉道和渗透率等进行三维空间结构分析。

致谢:在本论文数据处理和编写过程中,得到了南京优译谱科技有限公司杨凯老师、河南工程学院卢燕老师的指导和帮助,诸位审稿专家提出了许多建设性意见,在此一并表示感谢!

5 参 考 文 献

[1] 费宝生,刘建礼,陆艳芬.羌塘盆地油气勘探前景展望[J].海相油气地质,2006,11(4):13-21.
Fei B S, Liu J L, Lu Y F. Oil and gas prospect for exploration in Qiangtang Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2006, 11(4):13-21.

[2] 赵政璋,李永铁,叶和飞,等.青藏高原海相烃源层的油气生成[M].北京:科学出版社,2000.
Zhao Z Z, Li Y T, Ye H F, et al. Hydrocarbon generation in marine source beds of Qinghai—Tibet Plateau [M]. Beijing: Science Press, 2000.

[3] 赵光通,李俊武,邓翔,等.羌塘盆地隆鄂尼地区油砂矿地质特征及成藏模式[J].特种油气藏,2019,26

(2):40-44.

Zhao G T, Li J W, Deng X, et al. Geology characterization and hydrocarbon accumulation pattern of oil sand in Longeni of Qiangtang Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(2):40-44.

[4] 李启来,伊海生,梁定勇,等.羌塘盆地隆鄂尼—昂达尔错地区中侏罗统布曲组碳酸盐岩储层特征研究[J].科学技术与工程,2014,14(31):183-188.
Li Q L, Yin H S, Liang D Y, et al. Study on reservoir characteristics of the carbonate rocks in the middle Jurassic Buqu Formation in Longeni—Angdaercuo area, Qiangtang Basin [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(31):183-188.

[5] 刘建清,陈文斌,杨平,等.羌塘盆地中央隆起带南侧隆额尼—昂达尔错古油藏白云岩地球化学特征及成因意义[J].岩石学报,2008,24(6):1379-1389.
Liu J Q, Chen W B, Yang P, et al. The Longeni—Angdanrcopaello—oil dolomite geochemical characteristics in southern part of the central uplift zone of Qiangtang Basin and its significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(6):1379-1389.

[6] 王剑,付修根,沈利军,等.论羌塘盆地油气勘探前景[J].地质论评,2020,66(5):1091-1113.
Wang J, Fu X G, Shen L J, et al. Prospect of the potential of oil and gas resources in Qiangtang Basin, Xizang (Tibet) [J]. Geological Review, 2020, 66(5):1091-1113.

[7] 宋春彦,曹竣峰,王剑,等.羌塘盆地角木茶卡地区二叠系古油藏的发现及基本特征[J].新疆地质,2014,32(1):87-91.
Song C Y, Cao J F, Wang J, et al. The discovery and basic characteristics of ancient reservoir in Permian of Jiaomuchaka area, Qiangtang Basin [J]. Xinjiang Geology, 2014, 32(1):87-91.

[8] 王成善,尹海生,李亚林,等.西藏羌塘盆地古油藏发现及其意义[J].石油与天然气地质,2004,25(2):139-143.
Wang C S, Yi H S, Li Y L, et al. Discovery of paleo-oil reservoir in Qiangtang Basin in Tibet and its geological significance [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(2):139-143.

[9] Bowker K A. Barnett shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4):523-533.

[10] Ross D, Bustin R M. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs [J]. Marine & Petroleum Geology, 2009, 26(6):916-927.

- [11] 孙强强. 岩石矿物组成的测定与分析研究[J]. 山东工业技术, 2016(4): 112.
- Sun Q Q. Determination and analysis of rock mineral composition[J]. Shandong Industrial Technology, 2016(4): 112.
- [12] 宋土顺, 李轩, 张颖, 等. QEMSCAN 矿物定量分析技术在成岩作用研究中的运用: 以扶余油层致密砂岩为例[J]. 地质科技情报, 2016, 35(3): 193-198.
- Song T S, Li X, Zhang Y, et al. QEMSCAN mineral quantitative analysis of tight sandstone diagenesis in Fuyu Oil Layer, Daqing Placanticline [J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(3): 193-198.
- [13] Woodruff L, Cannon W F, Smith D B, et al. The distribution of selected elements and minerals in soil of the conterminous United States [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, 154: 49-60.
- [14] 冉敬, 杜谷, 王凤玉. X 射线衍射全谱拟合法快速分析长石矿物含量[J]. 岩矿测试, 2017, 36(5): 489-494.
- Ran J, Du G, Wang F Y. Rapid analysis of feldspar by X-ray diffractometry Rietveld refinement method [J]. Rock and Mineral Analysis, 2017, 36(5): 489-494.
- [15] 冉敬, 郭创锋, 杜谷, 等. X 射线衍射全谱拟合法分析蓝晶石的矿物含量[J]. 岩矿测试, 2019, 38(6): 660-667.
- Ran J, Guo C F, Du G, et al. Quantitative analysis of kinaler composition of kyanite by X-ray diffraction with Rietveld refinement method [J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(6): 660-667.
- [16] 王琦, 马龙, 黄康俊, 等. 蒙脱石, 高岭石和伊利石 X 射线衍射定量分析[J]. 贵州地质, 2021, 38(1): 71-78.
- Wang Q, Ma L, Huang K J, et al. Quantitative analysis of kaolinite, illite and montmorillonite by X-ray diffraction [J]. Guizhou Geology, 2021, 38(1): 71-78.
- [17] 孙灵芝, 凌宗成, 张江, 等. 基于辐射传输模型的月表铁镁质矿物定量反演: 以嫦娥三号着陆区为例[J]. 岩石学报, 2016, 32(1): 43-52.
- Sun L Z, Ling Z C, Zhang J, et al. Radiative transfer modeling of Lunar mafic minerals: A case study in Chang'E-3 landing region [J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(1): 43-52.
- [18] 曹会, 邢立新, 潘军, 等. 金厂沟梁地区土壤含水黏土矿物含量短波红外光谱反演[J]. 江西农业学报, 2013, 25(1): 55-59.
- Cao H, Xing L X, Pan J, et al. Inversion of hydrated clay mineral content in soil of Jinchanggouliang area based on SWIR [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2013, 25(1): 55-59.
- [19] 张弘, 高鹏鑫, 高卿楠. 热红外反射光谱技术在石英含量评价中的应用[J]. 岩矿测试, 2021, 40(5): 710-719.
- Zhang H, Gao P X, Gao Q N. Application of thermal infrared reflectance spectroscopy in the evaluation of quartz content [J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(5): 710-719.
- [20] 丛丽娟, 贾志业, 梁秀娟, 等. 岩矿石 NIR 光谱特征与地球化学异常成分之间的关系: 以内蒙古朱拉扎嘎金矿为例[J]. 地学前缘, 2017, 24(5): 299-305.
- Cong L J, Jia Z Y, Liang X J, et al. The relationship between the NIR spectral characteristics and geochemical anomaly components: Taking Zhulazhaga gold deposit of Inner Mongolia as an example [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(5): 299-305.
- [21] 王祝文, 刘菁华, 黄茜. 确定黏土矿物含量的自然伽马能谱测井方法[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(2): 108-111.
- Wang Z W, Liu J H, Huang Q. Using natural Gamma-ray spectroscopy log method to determine clay mineral content [J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(2): 108-111.
- [22] 赵政璋, 李永铁. 青藏高原中生界沉积相及油气储盖层特征[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- Zhao Z Z, Li Y T. The features of Mesozoic sedimentary facies, reservoir and seal rock in Tibet [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [23] 曹竣锋, 宋春彦, 付修根, 等. 藏北羌塘盆地羌资 5 井二叠系碳酸盐岩储层特征及影响因素[J]. 沉积与特提斯地质, 2014, 34(2): 86-91.
- Cao J F, Song C Y, Fu X G, et al. Permian carbonate reservoirs from the Qiangzi-5 well in Qiangtang Basin, northern Xizang: Characteristics and influencing factors [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2014, 34(2): 86-91.
- [24] 史维鑫, 易锦俊, 王浩, 等. 马坑铁矿钻孔岩心红外光谱特征及蚀变分带特征研究[J]. 岩矿测试, 2020, 39(6): 143-152.
- Shi W X, Yi J J, Wang H, et al. Study on the characteristics of the infrared spectrum and the alteration zoning of drill core in the Makengiron deposit [J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 39(6): 143-152.
- [25] 陈康, 纪广轩, 朱有峰, 等. 基于高光谱岩心扫描系统研究城门山铁路坎铜矿床的蚀变特征[J]. 岩矿测试, 2020, 39(6): 944-953.
- Chen K, Ji G X, Zhu Y F, et al. Study on alteration characteristics of the Chengmenshan Tielukan copper

deposit by a hyperspectral core scanning system [J].
Rock and Mineral Analysis, 2020, 39(6): 944-953.

[26] Laukamp C, Caccetta M, Chia J, et al. The uses, abuses and opportunities for hyperspectral technologies and derived geoscience information [C]//Proceedings of Geo - computing Conference Brisbane; AIG Bulletin, 2010; 73-76.

[27] 何将启, 丁汝鑫, 梁世友, 等. 基于磷灰石裂变径迹约束的北黄海盆地热演化研究 [J]. 地球物理学报, 2014, 57(1): 3347-3353.

He J Q, Ding R X, Liang S Y, et al. Study of thermal evolution of the North Yellow Sea Basin based on apatite fission track data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(1): 3347-3353.

[28] 李才, 王天武, 杨德明, 等. 西藏羌塘中央隆起区物质组成与构造演化 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2001, 31(1): 25-31.

Li C, Wang T W, Yang D M, et al. The lithological composition and tectonic evolution of Qiangtang central uplift region, Tibet [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2001, 31(1): 25-31.

[29] 周张健. 蒙脱石伊利石化的控制因素、转化机制及其转化模型的研究综述 [J]. 地质科技情报, 1994, 13(4): 41-46.

Zhou Z J. Summary of the studying for illitization of the smectite on its controlling factors, transformation mechanism and models [J]. Geological Science and Technology Information, 1994, 13(4): 41-46.

[30] 罗瑞兰, 卢书锬, 周国清, 等. 蒙脱石的成岩转化与油气的形成和初次运移 [J]. 石油实验地质, 1985, 7(4): 257-267.

Luo R L, Lu S E, Zhou G Q, et al. Diagenetic transformation of montmorillonite and primary migration of hydrocarbon, and oil - gas generation [J]. Petroleum Geology & Experiment, 1985, 7(4): 257-267.

[31] 黄擎宇, 刘伟, 张艳秋, 等. 白云石化作用及白云岩储层研究进展 [J]. 地球科学进展, 2015, 30(5): 539-551.

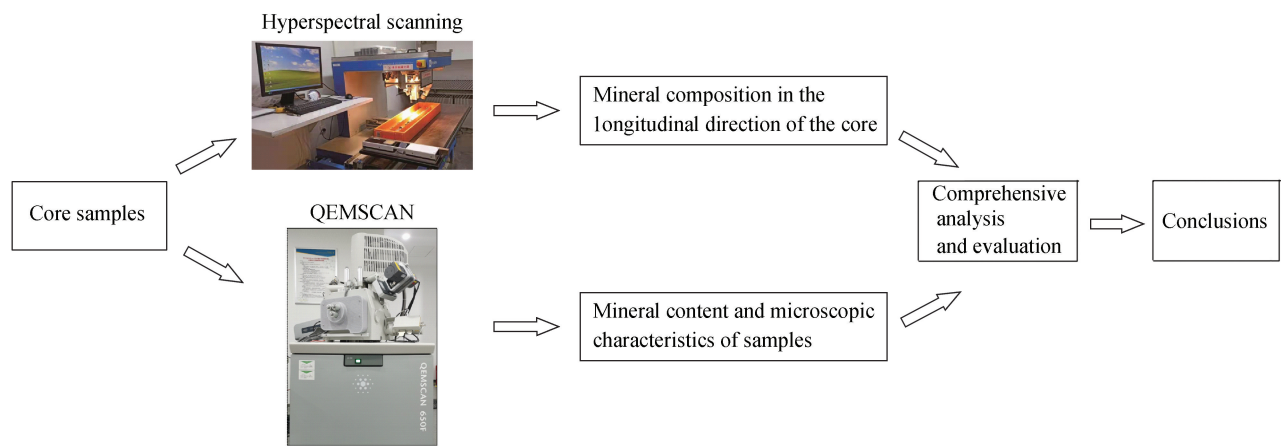
Huang Q Y, Liu W, Zhang Y Q, et al. Progress of research on dolomitization and dolomite reservoir [J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(5): 539-551.

Application of Hyperspectral Scanning in Mineral Composition Analysis of Carbonate Rocks

ZHANG Qiyang, SHI Weixin*, LIU Xiao, HUI Guangji, YUAN Chunyu
(Core and Samples Center of Land and Resources, Beijing 100083, China)

HIGHLIGHTS

- (1) Hyperspectral scanning can be used to quickly and efficiently interpret the characteristics and changes of mineral composition in the longitudinal direction of the core.
- (2) QEMSCAN can be used to finely depict and quantitatively analyze the mineral composition, content and micro characteristics of the core.
- (3) The two methods are combined to study the spatial changes of mineral composition and microscopic characteristics at different levels. Good results have been achieved.



ABSTRACT

BACKGROUND: Mineral composition and its microscopic characteristics are of great significance to the study of sedimentary environment, rock framework and reservoir space of oil and gas reservoirs.

OBJECTIVES: To investigate the mineral composition, content and spatial distribution of carbonate core samples of the Permian Longge Formation and provide the basis for oil and gas evaluation of the Paleozoic carbonate reservoirs in Qiangtang Basin.

METHODS: The sample was analyzed by hyperspectral scanning and QEMSCAN.

RESULTS: The Longge Formation is dominated by microcrystalline limestone and granulated limestone, and the minerals are mainly calcite and dolomite, the contents of which are generally greater than 90% , followed by quartz and a minor clay mineral and feldspar. The mineral composition has obvious characteristics of longitudinal segmentation. The contents of calcite and dolomite are higher in the upper section. The content of dolomite in the middle section is higher, and the degree of dolomitization is relatively strong. The porosity and permeability of this section have decreased. The lower section is mainly composed of calcite. In addition, the analysis of clay mineral characteristics shows that the Longge Formation has experienced complex sedimentary–diagenesis and late thermal disturbance and fluid replacement, which has a strong impact on oil and gas migration and preservation in this area.

CONCLUSIONS: Hyperspectral scanning technology can be used to quickly and efficiently interpret large–scale mineral features. QEMSCAN enables more precise and quantitative analysis of mineral microscopic features. The Longge Formation is dominated by carbonate and obviously affected by diagenesis and the local dolomitization is strong. The oil and gas conditions in this formation are poor.

KEY WORDS: mineral composition; hyperspectral scanning; QEMSCAN; carbonate rock; Permian Longge Formation