

刘晓, 张启燕, 史维鑫, 等. 北美塘盆地东部上三叠统波里拉组碳酸盐岩矿物特征分析[J]. 岩矿测试, 2024, 43(3): 440-448. DOI: 10.15898/j.ykcs.202212010227.

LIU Xiao, ZHANG Qiyang, SHI Weixin, et al. Mineralogical Characteristics of Carbonate Rocks of the Upper Triassic Bolila Formation in the Eastern Part of the North Qiangtang Basin[J]. Rock and Mineral Analysis, 2024, 43(3): 440-448. DOI: 10.15898/j.ykcs.202212010227.

北美塘盆地东部上三叠统波里拉组碳酸盐岩矿物特征分析

刘晓, 张启燕*, 史维鑫, 葛天助, 宋利强

(中国地质调查局自然资源实物地质资料中心, 河北 三河 065201)

摘要: 北美塘东部上三叠统波里拉组是北美塘盆地重点油气勘探目标层位, 受沉积和成岩作用影响, 地层压实作用强烈, 矿物颗粒极小, 属于致密油气储层。本文采用数字岩心技术——背散射扫描电镜成像技术(MAPS)和矿物成分定量分析技术(QEMSCAN), 对波里拉组矿物进行微观尺度扫描和分析, 表征其矿物成分、颗粒形态、空间分布及结构特征。结果表明: 波里拉组方解石以泥晶为主, 胶结作用明显, 物性致密, 孔径小($<5\mu\text{m}$), 局部发生白云化作用, 白云石主要为粉-细晶, 以自形晶为主, 多呈线接触。矿物在纵向呈规律变化: 底部为泥灰岩, 陆源碎屑含量较高($>56.57\%$), 其次为方解石(25.79%), 磨圆度较差, 成分成熟度和结构成熟度均较低; 中段陆源碎屑矿物和方解石呈条带交错分布, 方解石较石英含量增加(方解石47.43%, 石英28.54%), 沿晶间普遍发育的草莓状黄铁矿簇直径可达 $10\mu\text{m}$, 整体为氧化界面之下的还原环境; 顶部以方解石为主($>90\%$), 颗粒直径多为 $10\sim 50\mu\text{m}$, 颗粒间多呈线接触, 粒间孔几乎不发育, 局部发生层状白云化作用。矿物特征显示波里拉组沉积物源受浅海碳酸盐岩沉积环境和陆源碎屑输入双重影响, 具有典型的混积岩特征, 沉积环境从早期陆源碎屑供给较为充足, 到晚期以碳酸盐岩沉积为主, 整体为海相碳酸盐沉积。

关键词: 波里拉组碳酸盐岩; 矿物微观特征; 沉积环境; 背散射扫描电镜成像技术; 矿物成分定量分析技术

- 要点:**
- (1) 背散射扫描电镜成像和矿物成分定量分析技术相结合, 精细刻画波里拉组致密储层的微观结构、构造、矿物颗粒空间分布特征。
 - (2) 矿物的含量特征、几何特征、分布特征和变化规律可以指示沉积环境和演化规律。
 - (3) 波里拉组沉积物源受浅海碳酸盐沉积环境和陆源碎屑输入双重影响。沉积早期陆源碎屑供给充足, 晚期以海相碳酸盐沉积为主。

中图分类号: P592

文献标识码: B

致密油气研究是目前油气资源调查研究的热点和难点^[1-2], 随着开采技术和经济条件的提高, 致密储层中的油气可获得的工业产量越来越可观^[3]。近年来, 在鄂尔多斯、四川盆地以及松辽盆地等发现了大量致密储层油, 表明中国在致密油气勘探方面具有巨大潜力^[4-6]。研究表明, 矿物的成分、含量、

分布等特征直接影响储层孔隙的演化和保存^[7-8], 其中石英、方解石等脆性矿物对岩石脆性评价具有重要意义^[9-11], 特别是对于致密、非常规类型的油气储层, 由于其矿物、储集空间微观结构复杂, 常规实验测试方法难以准确地识别和分析^[12-14], 应用数字岩心等新技术对矿物成分、微观结构等特征进行研究,

收稿日期: 2022-12-01; 修回日期: 2023-10-22; 接受日期: 2024-01-12

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“岩心数字化与应用示范”(DD20230601)

第一作者: 刘晓, 硕士, 工程师, 主要从事石油地质和岩心数字化应用。E-mail: sea_251@163.com。

通信作者: 张启燕, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩心数字化方向及应用。E-mail: zqy25105@163.com。

对储层精细描述和油气勘探与开发是一项重要课题。

矿物成分是研究储层油气运移和渗透以及基质孔隙度的基础^[15-16],主要分为定性识别和定量计算两个方面。定性识别是通过镜下鉴定或测试等手段对岩石的矿物类型进行鉴定和分析研究,用以研究岩石的类型、沉积环境、成岩作用等地质特征;定量分析则主要是指通过测试技术手段获得所含矿物的含量比例,可用于改造性分析和岩石脆性等物理特征进行定量,为后续储层评价提供一定基础。目前进行矿物成分分析的方法有色谱分析法、元素分析法、化学分析法、热差法、光谱分析法等^[17-18],但各种方法都具有一定的局限性^[14,19]。

羌塘盆地主要油气储层多数集中在中生代地层(三叠系和侏罗系),以海相碳酸盐岩为主^[20-22]。其中上三叠统波里拉组碳酸盐岩是北羌塘东部重要的致密油气储层,由于沉积和成岩作用影响,地层压实作用强烈,岩石致密,物性差,非均质性较强,矿物颗粒多小于1mm,孔隙以微米-纳米级为主^[23-24]。以往常规实验测试方法难以精确识别矿物空间结构和分布状态,因此制约了对波里拉组沉积特征和储层微观特征的深入研究。本文主要通过数字岩心分析技术对波里拉组碳酸盐岩储层的矿物成分进行定性和定量分析,从而获取该储层微纳米级别的结构

构造特征,总结矿物空间分布规律,进行储层评价,为下一步工作提供依据。

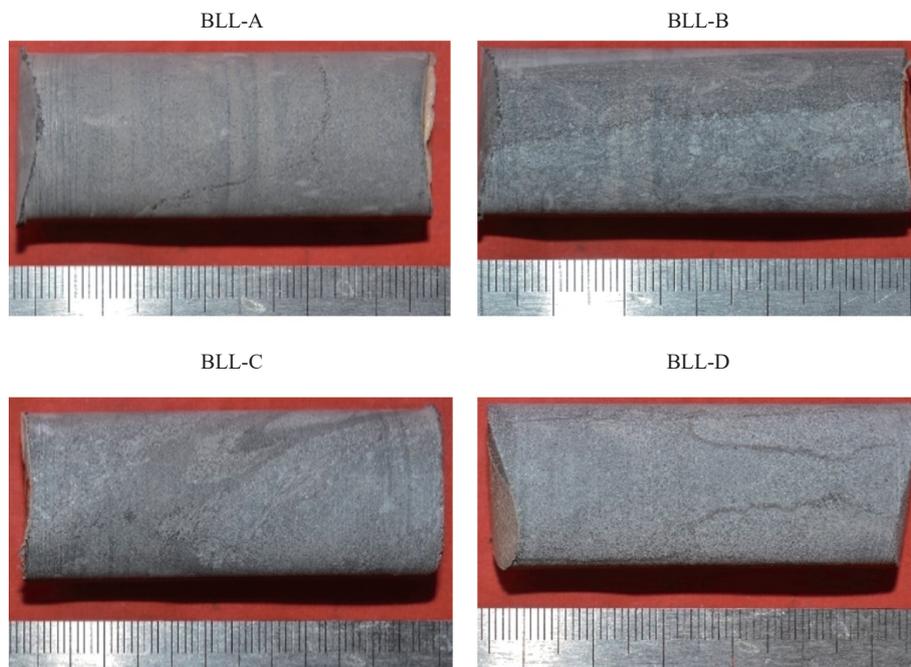
1 地质背景

羌塘盆地位于金沙江缝合带与班公错—怒江缝合带之间,是在羌塘地体之上发育的、与缝合带相关复合型叠加沉积盆地,北羌塘坳陷东部在晚三叠世处于滨岸—三角洲相区^[25],在此背景下,沉积的上三叠统波里拉组在区域上以大套灰岩的出现和消失作为上下层位的划分标准,下覆甲丕拉组杂色砾岩,上覆巴贡组灰色、深灰色泥页岩。波里拉组整体由褐灰色泥晶灰岩、砂屑灰岩、深灰色粉细砂岩、钙质泥岩组成^[26]。下部为灰色泥晶灰岩夹钙质泥岩,裂隙较发育,裂隙中常见方解石脉、黏土矿物和有机质充填;中部为含砾砂屑灰岩夹薄层钙质泥岩及泥晶灰岩,多为薄层状,以夹层形式产出,裂隙充填方解石;上部为泥晶灰岩。在波里拉组沉积时期,沉积水体变化频繁,岩心可见平行层理、波状层理、小型交错层理等多种层理构造。

2 实验部分

2.1 实验样品

实验样品主要来自北羌塘盆地东部雀莫错地区



BLL-A: 泥晶灰岩; BLL-B: 泥晶砂屑灰岩; BLL-C: 砂屑灰岩; BLL-D: 泥灰岩。

图1 波里拉组岩心表面图像

Fig. 1 Core surface images of Bolila Formation.

上三叠统波里拉组地层岩心(图1),取自QZ-8井,该井位于白滩湖—雀莫错裂隙槽,累计进尺501.7m,主要钻遇地层为上三叠统波里拉组和巴贡组,波里拉组岩性为灰色灰岩和泥质粉砂岩。本次实验样品BLL-A、BLL-B采自波里拉组上部的泥晶灰岩和泥晶砂屑灰岩,样品BLL-C是该组中部的砂屑灰岩,样品BLL-D为该组下部的泥灰岩。实验样品的地质信息见表1。

表1 实验样品地质信息

Table 1 Geological information of experimental samples.

| 样品编号 | 深度(m) | 岩性 |
|-------|--------|-----------|
| BLL-A | 236.89 | 灰色泥晶灰岩 |
| BLL-B | 278.74 | 灰绿色泥晶砂屑灰岩 |
| BLL-C | 471.87 | 灰色砂屑灰岩 |
| BLL-D | 489.46 | 浅灰色泥灰岩 |

2.2 样品测试方法

本实验采用的数字岩心分析技术为背散射扫描电镜成像技术(MAPS)和矿物成分定量分析技术(QEMSCAN),两者均为无损、高精度的数字岩心技术,其中背散射二维大面积扫描电镜成像可对样品进行大面积观察和扫描,并进行微纳级别孔隙和固体矿物分离。矿物定量分析主要用于分析矿物成分和含量。两者结合从定性和定量两个方面对储层微观特征进行精细的分析和研究。

MAPS分析中,在选定区域内扫描出一系列连续且边缘重叠的大量高分辨率图像,扫描完成后将这些图像进行拼接,进而得到一幅超高分辨率、超大面积的二维背散射电子图像。本实验仪器为Helios NanoLab 650,在MAPS模式下进行,小于25mm的片状样品扫描,扫描像素大小为0.8~800nm,电压1~30kV,束流0.78pA~26nA。本次MAPS整体扫描分辨率为25 μ m,扫描区域为27mm \times 27mm,对目标区矿物的成分、形态、结构和分布等特征进行分析。精细扫描分辨率为1 μ m,扫描区域范围为1mm \times 1mm。

QEMSCAN分析中,主要是利用仪器发出X射线能谱对样品表面进行扫描,样品表面原子由于电子跃迁而激发背散射电子过程中产生的特征X射线能量,根据不同元素的特征X射线能量识别样品元素种类,并依据元素分布信息在后台的矿物种数据库中进行元素组合,得出矿物分布信息及矿物含

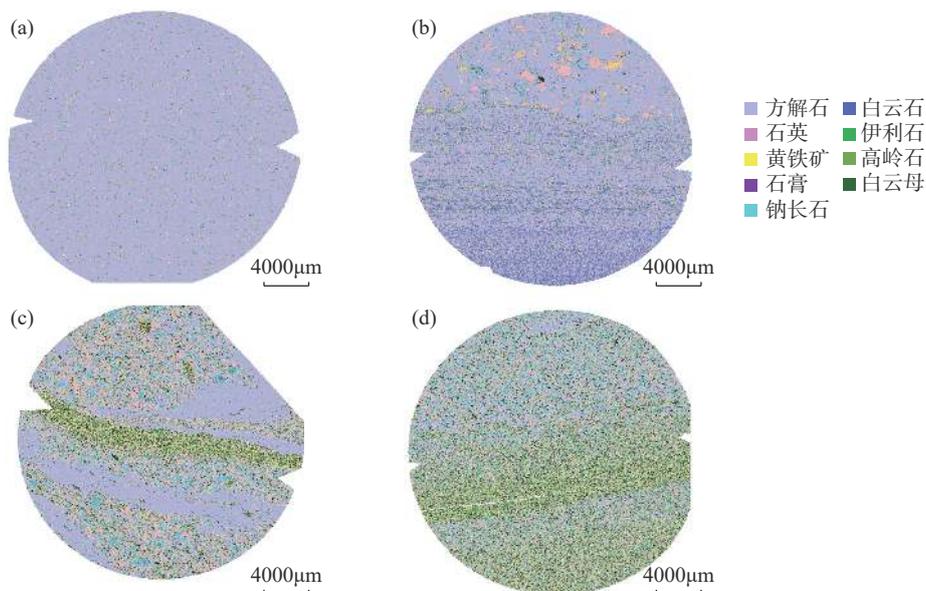
量^[27]。本次实验基于Quanta 650F场发射环境扫描电镜作为平台,实验电压30kV,探针电流 \leq 200nA;可放大6~1000000倍,根据探头距离不同,其视场大小有所差异,当工作距离在10mm时为5mm,当工作距离在65mm时为18.8mm。分为整体扫描和精细扫描,对目标区矿物的成分、形态、结构和分布等特征进行分析。整体扫描分辨率一般为25 μ m,区域一般使用27mm \times 27mm;精细扫描分辨率一般为1 μ m,区域一般使用1mm \times 1mm。分析结果由专业矿物定量分析软件iDiscover和iMeasure进行数据处理及矿物种类和含量研究。为了保证矿物成分定量分析结果的准确性,一方面在每次扫描时通过中国计量科学研究院对随机样品进行矿物能谱峰值和含量的校准,同时也通过不同实验室之间进行矿物成分定量分析结果验证和对比,定量分析结果均在误差范围之内。

3 结果与讨论

3.1 矿物成分定量分析

通过对北羌塘东部雀莫错地区上三叠统波里拉组4个不同深度的岩心样品进行整体和局部扫描,发现矿物成分纵向呈现不同的变化特征。BLL-A和BLL-B样品来自于波里拉组顶部(图2中a和b),整体以碳酸盐岩为主,局部有大颗粒石英、黄铁矿和钠长石。其中BLL-A样品的矿物成分以方解石为主(图2a),含量高达93.19%,其次为石英和黏土矿物(高岭石和伊利石),石英含量为3.80%,伊利石含量为1.71%,含有少量黄铁矿(0.7%)和石膏(0.13%)。样品BLL-B矿物成分主要为方解石(0.04%)和白云石(15.58%),其次为石英(8.45%),此外伊利石与黄铁矿分别占比2.44%和1.17%(图2b)。发现样品BLL-B分为上下两个差异比较明显的区域,下半部分矿物以方解石和白云石为主,最底部以白云石为主,上部以方解石为主,其中交错沉积了薄层白云石,表明该处沉积水动力较弱,而顶部含有大颗粒的石英、黄铁矿和钠长石等矿物,磨圆度较高,显示一次短期快速变化水动力环境带来较丰富的陆源碎屑矿物。而样品BLL-A方解石含量高,颗粒小,陆源碎屑矿物少,表示该时期为稳定的海相碳酸盐沉积。

样品BLL-C矿物成分以方解石和石英为主(图2c),含量分别为47.43%和28.54%,其次为白云母(6.54%)、伊利石(5.94%)、钠长石(4.84%)、黄铁矿(3.91%)。陆源碎屑矿物和方解石呈条带状交错分布,其中黏土矿物、有机质、黄铁矿较发育,长石发



a—样品 BLL-A 的整体矿物成分定量分析结果; b—样品 BLL-B 的整体矿物成分定量分析结果; c—样品 BLL-C 的整体矿物成分定量分析结果; d—样品 BLL-D 的整体矿物成分定量分析结果。

图2 波里拉组岩心样品矿物成分定量分析结果

Fig. 2 QEMSCAN results of core samples in the Bolila Formation.

生较强的蚀变。矿物颗粒大小和空间分布各向异性明显 (图 2c), 主要分为: ①大颗粒的钠长石、白云母为主的矿物层; ②小颗粒的高岭石和伊利石为主的矿物层; ③方解石填充区为主的三个明显的矿物层。下部主要为三个矿物层纵向呈层状交错分布, 而上部以方解石填充和大颗粒钠长石、白云母为主的矿物层横向分布。通过上下矿物空间分布差异说明, 沉积水体较为动荡, 沉积物受双向水流的影响。

样品 BLL-D 矿物成分以石英和方解石为主, 含量分别为 37.08% 和 25.79%, 此外含有白云母和黏土矿物 (伊利石和高岭石), 含量分别为 10.09% 和 9.4%(图 2d), 具有较高的陆源碎屑含量 (>56.57%)。该样品位于波里拉组底部, 矿物呈层性明显, 主要分为 4 层, 底部以矿物颗粒较小的高岭石和伊利石等黏土矿物为主, 随后以方解石为主的矿物呈层状沉积, 颗粒较小, 之后又沉积以高岭石和伊利石为主的矿物, 逐渐过渡到以较大颗粒的方解石、白云石、白云母、钠长石以及少量黄铁矿沉积为主。沉积矿物类型和颗粒大小的特征显示, 整体为海陆交互沉积背景, 沉积水体动力较弱, 陆源碎屑供给较为丰富。

矿物含量对比结果 (图 3) 显示, 波里拉组从下而上矿物成分变化明显, 底部以石英为主的陆源碎屑沉积, 碳酸盐含量较少, 表明该段以陆源碎屑沉积为主; 中部矿物成分除了陆源碎屑沉积 (石英、长石

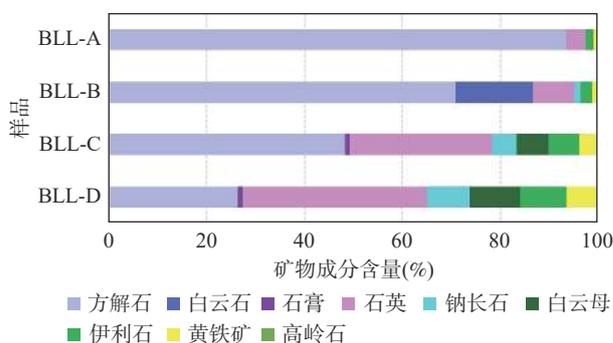
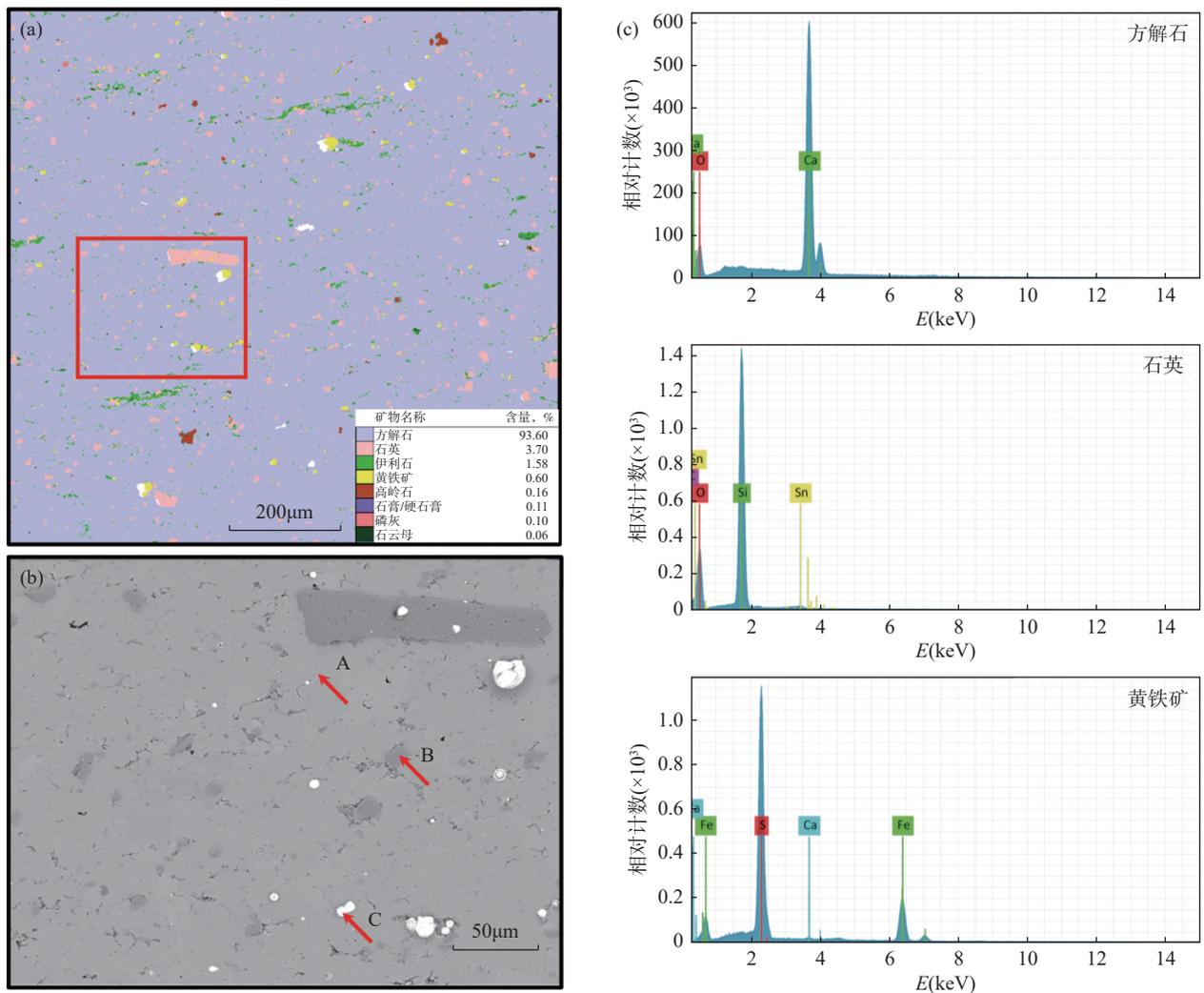


图3 波里拉组岩心样品矿物含量对比

Fig. 3 Comparison of mineral content of core samples in the Bolila Formation.

等) 之外, 碳酸盐矿物成分增加, 达到近 50%; 上部碳酸盐岩主要成分为方解石, 随深度变浅, 方解石含量增加, 最高可达 93%。

此外, 为了保证矿物成分定量分析的可靠性, 本次选取局部 QEMSCAN 图像与扫描电镜 (MAPS, 分辨率 200nm) 结果进行对比验证 (图 4)。MAPS 图像 (图 4b) 为灰度图, 不同的灰度代表不同矿物种类, 分别选取三个不同灰度的矿物颗粒进行能谱 (EDS) 测试, 结果 (图 4c) 表明灰度最低的矿物显示为方解石, 较深的矿物为石英, 而亮度最高的矿物颗粒为黄铁矿, 测试结果与矿物成分定量分析结果一致。



a—局部 QEMSCAN 扫描图像；b—MAPS 图像；c—能谱测试结果。

图4 波里拉组岩心样品 QEMSCAN、MAPS 和能谱结果

Fig. 4 Results of QEMSCAN, MAPS and EDS mineral content of core samples in the Bolila Formation.

3.2 矿物微观特征

3.2.1 矿物空间形态

通过对波里拉组上部的样品 BLL-A 进行 QEMSCAN 局部分析,图 5a 显示该样品方解石含量在 90% 以上,石英、伊利石、黄铁矿等矿物零散分布。MAPS 局部精扫结果 (图 5b) 显示方解石颗粒直径多为 10 ~ 50µm,矿物颗粒间多呈线接触,粒间孔几乎不发育,仅局部发育晶间孔,孔径较小,普遍小于 5µm,石英颗粒较大,直径在 5µm 左右,黄铁矿主要在矿物晶体间零星分布,直径 2 ~ 8µm,多呈圆形。

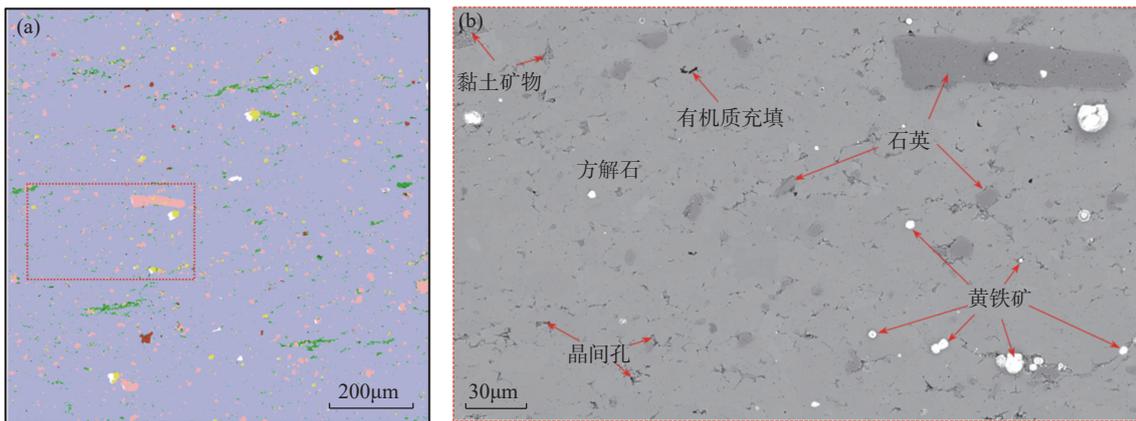
图 6 为波里拉组中部的样品 BLL-C 的 MAPS 局部高精度扫描结果,精度为 10nm,该样品陆源碎屑含量较丰富,长石发生较强的蚀变,黏土矿物、有机质和黄铁矿均比较发育。沿晶间普遍发育的草莓

状黄铁矿簇直径可达 10µm,主要形成于沉积期—准沉积期。

3.2.2 矿物粒径分布

通过对岩心样品 BLL-B 进行矿物颗粒粒径的分布统计 (图 7),上部区域颗粒较丰富,主要为石英、方解石,粒径普遍大于 200µm,分选较差,方解石晶间被细粒的黏土矿物包裹。下部方解石—白云石—石英—黏土矿物形成了极细的沉积纹层,矿物颗粒粒径多小于 150µm。

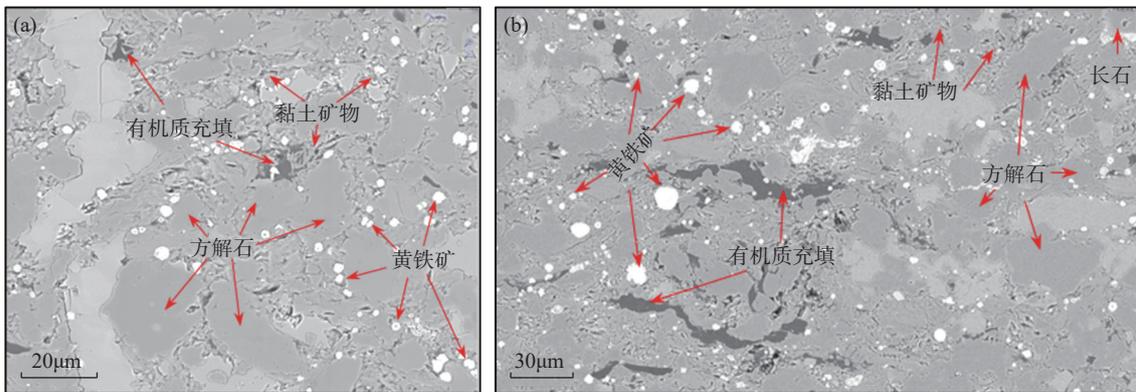
通过 MAPS 和 QEMSCAN 分析结果表明,波里拉组碳酸盐矿物平均含量为 62.35%,石英平均含量为 11.56%,黏土矿物平均含量为 15.81%。整体为碳酸盐沉积,陆源碎屑较丰富,矿物颗粒较小,指示了较弱的沉积水动力条件。



a—QEMSCAN 精扫; b—MAPS 精扫。

图5 样品 BLL-A 矿物微观结构特征

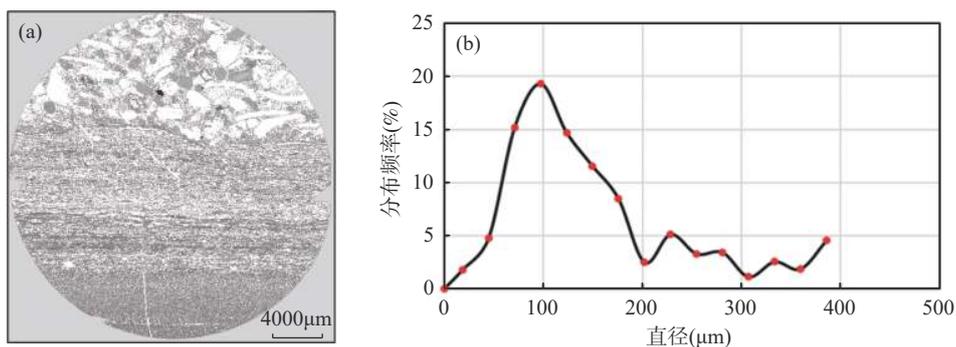
Fig. 5 The microstructure characteristics of the minerals in sample BLL-A.



a—MAPS 精扫区域 1; b—MAPS 精扫区域 2。

图6 样品 BLL-C 矿物微观结构特征

Fig. 6 The microstructure characteristics of the minerals in sample BLL-C.



a—颗粒形态; b—矿物颗粒粒径分布。

图7 样品 BLL-B 矿物颗粒粒径分布

Fig. 7 Distribution diagram of mineral grain size for sample BLL-B.

波里拉组底部样品岩性为灰色泥灰岩, 矿物成分以石英和方解石为主, 次要矿物为长石、伊利石、黄铁矿等, 颗粒磨圆度较差, 压实致密。随着沉积环境的变化, 石英含量逐渐增加, 中段岩性变为砂屑灰

岩, 陆源碎屑物和海相沉积物交错沉积形成明显的互层, 黏土、有机质等矿物较为发育, 长石发生较强蚀变。随着沉积相的变化, 至波里拉组顶部, 沉积物逐渐变为海相碳酸盐岩, 方解石含量超过 90%(表 2),

表2 波里拉组岩心样品矿物微观特征描述

Table 2 Mineral microscopic characteristics of core samples in the Bolila Formation.

| 样品编号 | 样品位置 (m) | 岩性 | 主要矿物成分 | 矿物分布和微观结构特征 |
|-------|-------------|--------|------------------------------|--|
| BLL-A | 236.89 | 泥晶灰岩 | 方解石 (93.19%) | 方解石含量超过 90%, 其他矿物零星分布 |
| BLL-B | 278.74 | 泥晶砂屑灰岩 | 方解石 (70.04%) 白云石 (15.58%) | 上部区域颗粒较丰富, 主要为石英、方解石, 粒径普遍大于 200 μm , 方解石颗粒被细粒的黏土矿物包裹。下部方解石—白云石—石英—黏土矿物形成极细纹层 |
| BLL-C | 471.87 | 砂屑灰岩 | 方解石 (47.43%) 石英 (28.54%) | 陆源碎屑矿物和方解石呈条带状交错分布, 黏土矿物、有机质、黄铁矿均比较发育。长石发生较强的蚀变, 黄铁矿沿晶间发育 |
| BLL-D | 489.46 | 泥灰岩 | 石英 (37.08%) 方解石 (25.79%) | 黏土矿物含量较高且呈层理分布, 黄铁矿含量较高 |

其他矿物含量逐渐减少。

4 结论

采用数字岩心技术 (MAPS 和 QEMSCAN) 对北羌塘盆地东部雀莫错地区上三叠统波里拉组岩心样品的矿物空间分布状态、颗粒形态、粒径分布等进行了定性分析和定量计算。波里拉组矿物成分和含量在纵向具有明显的规律性, 底部为灰色泥灰岩, 矿物成分以石英和方解石为主, 颗粒磨圆度较差, 压实致密; 中段石英含量较高, 陆源碎屑矿物和方解石条带交错分布, 沿晶间普遍发育的草莓状黄铁矿, 直径可达 10 μm ; 顶部碳酸盐矿物含量超过 90%, 局部发生层状白云岩化。矿物空间变化特征表明波里拉组

整体为海相碳酸盐沉积, 沉积物源受浅海碳酸盐岩沉积环境和陆源碎屑输入双重影响, 早期陆源碎屑供给较为充足, 晚期以方解石为主的碳酸盐岩海相沉积, 具有典型的混积岩特征。

数字岩心技术对储层矿物和孔隙微观结构特征研究方面具有独特优势, 特别是对致密储层的研究优于其他常规分析测试技术, 但费用和时间成本较高, 可针对重点地层重点样品有目的地进行精细研究, 辅以光薄片、主-微量元素测试等保证其精度和成效性。另外, 本次实验只是基于波里拉组微观二维结构特征进行分析, 今后可结合微纳米 CT 等技术手段, 更加全面地对地层的矿物骨架和三维空间孔隙空间结构等特征进行分析。

Mineralogical Characteristics of Carbonate Rocks of the Upper Triassic Bolila Formation in the Eastern Part of the North Qiangtang Basin

LIU Xiao, ZHANG Qiyan*, SHI Weixin, GE Tianzhu, SONG Liqiang

(Core and Samples Center of Land and Resources, China Geological Survey, Sanhe 065201, China)

HIGHLIGHTS

- (1) MAPS and QEMSCAN were used to characterize the microstructure and spatial distribution of minerals in the tight reservoir of the Bolila Formation on a microscopic scale.
- (2) Sedimentary environment and evolution could be indicated by the characteristics of content, geometry, distribution and change rules of minerals.
- (3) The deposition of the Borila Formation is affected by both the depositional environment of shallow-marine carbonate and the input of terrigenous clastics. Terrigenous clastics were supplied adequately in the early depositional stage, and the marine carbonate deposits dominated in the late stage.

ABSTRACT: Carbonate rocks of the upper Triassic Bolila Formation in the eastern area of the North Qiangtang Basin are important tight oil and gas reservoirs. Due to the influence of sedimentation and diagenesis, the mineral particles are mostly less than 1mm. Analytical methods such as modular automated processing system (MAPS) based on the backscattered electron and automatic mineral identification system (QEMSCAN) were used to analyze the minerals and to research their composition, morphology and structure on a microscopic scale for four samples. The vertical variation of the minerals shows that at the bottom, the mineral composition is dominated by quartz and calcite, and the roundness of mineral particles is poor. The quartz content is relatively high in the middle. The terrigenous minerals and calcite bands are staggered. At the top, the carbonate mineral content is more than 90%, and layered dolomitization occurs locally. Mineral characteristics indicate that the source of Borila Formation sediments is affected by both shallow marine and terrigenous clastics. The supply of terrigenous clastics was relatively sufficient in the early stage. Subsequently, the supply of terrigenous clastics decreased, and the content of carbonate minerals increased gradually. The sedimentary environment was dominated by carbonate deposits at the late period of the Borila Formation.

KEY WORDS: Borilla Formation carbonate; mineral microscopic characteristics; sedimentary environment; MAPS; QEMSCAN

参考文献

- [1] 曾溅辉, 杨智峰, 冯泉, 等. 致密储层油气成藏机理研究现状及其关键科学问题[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(6): 651-661.
Zeng J H, Yang Z F, Feng X, et al. Study status and key scientific issue of tight reservoir oil and gas accumulation mechanism[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(6): 651-661.
- [2] 朱筱敏, 潘荣, 朱世发, 等. 致密储层研究进展和热点问题[J]. *地学前缘*, 2018, 25(2): 141-146.
Zhu X M, Pan R, Zhu S F, et al. Research progress and core issues in tight reservoir exploration[J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(2): 141-146.
- [3] 邹才能, 杨智, 朱如凯, 等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. *地质学报*, 2015, 91(6): 979-1007.
Zou C N, Yang Z, Zhu R K, et al. Progress in China's unconventional oil & gas exploration and development and theoretical technologies[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 91(6): 979-1007.
- [4] 邹才能, 杨智, 何东博, 等. 常规-非常规天然气理论、技术及前景[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(4): 575-587.
Zou C N, Yang Z, He D B, et al. Theory, technology and prospects of conventional and unconventional natural gas[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(4): 575-587.
- [5] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(2): 129-136.
Jia C Z, Zheng M, Zhang Y F. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(2): 129-136.
- [6] 邹才能, 贾进华, 侯连华, 等. “连续型”油气藏及其在全球的重要性: 成藏、分布与评价[J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(6): 669-682.
Zou C N, Jia J H, Hou L H, et al. Global importance of “continuous” petroleum reservoirs: Accumulation, distribution and evaluation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(6): 669-682.
- [7] 吕利刚, 张涛, 李杰, 等. 储层矿物类型对致密油藏 CO₂ 驱替效果的影响[J]. *大庆石油地质与开发*, 2023, 42(1): 159-168.
Lyu L G, Zhang T, Li J, et al. Influence of reservoir mineral types on CO₂ displacement effect of tight reservoir[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2023, 42(1): 159-168.
- [8] 尤源, 梁晓伟, 冯胜斌, 等. 鄂尔多斯盆地长7段致密储层主要黏土矿物特征及其地质意义[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(8): 1233-1241.
You Y, Liang X W, Feng S B, et al. Features and geological significance of main clay minerals in Chang 7 tight sandstone reservoir, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(8): 1233-1241.
- [9] 汪贺, 师永民, 徐大卫, 等. 非常规储层孔隙结构表征技术及进展[J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(5): 21-30.
Wang H, Shi Y M, Xu D W, et al. Unconventional reservoir pore structure characterization techniques and progress[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(5): 21-30.
- [10] 卢宇, 陈XY, 唐JT, 等. 页岩孔隙结构与力学性质对超临界二氧化碳饱和度影响[J]. *Energy*, 2019, 172: 270-285.
Lu Y Y, Chen X Y, Tang J T, et al. Relationship between pore structure and mechanical properties of shale on supercritical carbon dioxide saturation[J]. *Energy*, 2019, 172: 270-285.
- [11] 黄道军, 李新虎, 刘燕, 等. 鄂尔多斯盆地中东部本溪组致密砂岩储层特征及有利层段优选[J]. *西安科技大学学报*, 2023, 43(1): 109-118.
Huang D J, Li X H, Liu Y, et al. Characteristics and favorable intervals selection of tight sandstone reservoirs in Benxi Formation, Central-Eastern Ordos Basin[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2023, 43(1): 109-118.

- 2023, 43(1): 109–118.
- [12] 朱如凯, 金旭, 王晓琦, 等. 复杂储层多尺度数字岩石评价[J]. 地球科学, 2018, 43(5): 1773–1782.
Zhu R K, Jin X, Wang X Q, et al. Multi-scale digital rock evaluation on complex reservoir[J]. Earth Science, 2018, 43(5): 1773–1782.
- [13] 林承焰, 吴玉其, 任丽华, 等. 数字岩心建模方法研究现状及展望[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(2): 679–689.
Lin C Y, Wu Y Q, Ren L H, et al. Review of digital core modeling methods[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(2): 679–689.
- [14] 陈秀娟, 刘之的, 刘宇曦, 等. 致密储层孔隙结构研究综述[J]. 物探与化探, 2022, 46(1): 22–31.
Chen X J, Liu Z D, Liu Y X, et al. Research into the pore structure of tight reservoirs: A review[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 22–31.
- [15] 于兴河, 李顺利, 杨志浩. 致密砂岩气储层的沉积-成岩成因机理探讨与热点问题[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(1): 1–13.
Yu X H, Li S L, Yang Z H. Discussion on deposition-diagenesis genetic mechanism and hot issues of tight sandstone gas reservoir[J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(1): 1–13.
- [16] 刘亢, 曹代勇, 林中月, 等. 湘西北地区下志留统龙马溪组页岩矿物成分特征及意义[J]. 海相油气地质, 2018, 23(2): 70–76.
Liu K, Cao D Y, Lin Z Y, et al. Characteristics and significance of mineral compositions of shale in lower Silurian Longmaxi Formation, Northwestern Hu'nan[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2018, 23(2): 70–76.
- [17] 王坤阳, 杜谷, 杨玉杰, 等. 应用扫描电镜与X射线能谱仪研究黔北黑色页岩储层孔隙及矿物特征[J]. 岩矿测试, 2014, 33(5): 634–639.
Wang K Y, Du G, Yang Y J, et al. Characteristics study of reservoirs pores and mineral compositions for black shale, Northern Guizhou, by using SEM and X-ray EDS[J]. Rock and Mineral Analysis, 2014, 33(5): 634–639.
- [18] 冯笑含, 赵万春, 王婷婷. 非均质致密储层微观力学特征分析及脆性评价方法研究[J]. 特种油气藏, 2019, 26(6): 113–117.
Feng X H, Zhao W C, Wang T T. Micromechanical analysis and brittleness evaluation of heterogeneous tight reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(6): 113–117.
- [19] 肖光武, 刘丽萍, 秦文凯, 等. 应用矿物成分评价致密油储集层脆性方法[J]. 录井工程, 2017, 28(2): 66–71, 139–140.
Xiao G W, Liu L P, Qin W K, et al. Application of mineral composition to evaluating the brittleness of tight oil reservoir[J]. Mud Logging Engineering, 2017, 28(2): 66–71, 139–140.
- [20] 沈安江, 付小东, 张建勇, 等. 羌塘盆地上三叠统—下侏罗统海相页岩油特征及发现意义[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(5): 962–974.
Shen A J, Fu X D, Zhang J Y, et al. Characteristics and discovery significance of the upper Triassic—lower Jurassic marine shale oil in Qiangtang Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(5): 962–974.
- [21] 杨易卓, 黄志龙, 赵珍, 等. 羌塘盆地毕洛错地区古油藏地球化学特征与油源对比[J]. 地球科学, 2022, 47(5): 1834–1848.
Yang Y Z, Huang Z L, Zhao Z, et al. Geochemical characteristics and oil source correlation of paleo-reservoirs in Biluocuo area, Qiangtang Basin[J]. Editorial Committee of Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2022, 47(5): 1834–1848.
- [22] 王剑, 付修根. 论羌塘盆地沉积演化[J]. 中国地质, 2018, 45(2): 237–259.
Wang J, Fu X G. Sedimentary evolution of the Qiangtang Basin[J]. Geology in China, 2018, 45(2): 237–259.
- [23] 刘中戎, 杨平, 张国常, 等. 北美羌塘坳陷上三叠统沉积模式及对油气勘探的启示[J]. 沉积与特提斯地质, 2022, 42(3): 465–480.
Liu Z R, Yang P, Zhang G C, et al. Sedimentary model and its implications for oil and gas exploration of upper Triassic in Northern Qiangtang Depression[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2022, 42(3): 465–480.
- [24] 曾胜强, 王剑, 陈文彬, 等. 羌塘盆地东部晚三叠世—早中侏罗世沉积环境转变研究——来自地质浅钻岩芯的证据[J]. 地质论评, 2021, 67(5): 1231–1244.
Zeng S Q, Wang J, Chen W B, et al. Late Triassic to early—middle Jurassic depositional environment transformation process study in the Eastern Qiangtang Basin: Evidence from the record by the core samples[J]. Geological Review, 2021, 67(5): 1231–1244.
- [25] 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.
- [26] 刘若涵, 何碧竹, 郑孟林, 等. 羌塘盆地东部晚三叠世—侏罗纪构造-沉积演化[J]. 岩石学报, 2019, 35(6): 1857–1874.
Liu R H, He B Z, Zheng M L, et al. Tectonic-sedimentary evolution during late Triassic—Jurassic period in the eastern part of the Qiangtang Basin, Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(6): 1857–1874.
- [27] 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 Q Y, Shi W X, Liu X, et al. Application of hyperspectral scanning in mineral composition analysis of carbonate rocks[J]. Rock and Mineral Analysis, 2022, 41(5): 815–825.