

江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组白云岩成因

吴世强¹,陈凤玲¹,姜在兴²,孔祥鑫²,陈晨²,管文静¹

[1. 中国石化 江汉油田分公司 勘探开发研究院,湖北 武汉 430223; 2. 中国地质大学(北京) 能源学院,北京 100083]

摘要:潜江凹陷位于江汉盆地,其古近系潜江组以含有由富有机质白云岩和蒸发岩组成的193个韵律层为特征。然而,潜江凹陷古近系潜江组白云石的成因一直存在争议,限制了进一步对非常规油气的勘探工作。根据盐间层岩相与矿物特征研究潜江组盐间层富白云石岩相的沉积成因。根据沉积特征观测(岩心和薄片)和矿物组分数据,可识别出3种主要的岩相结合:薄层-纹层状泥晶白云岩、纹层状含云泥晶灰岩和夹钙芒硝层状泥晶白云岩。研究发现前两种岩相组合纹层特征明显,可见有机质纹层与无机纹层交互现象,说明形成于水体较深的还原环境。白云石与方解石晶体含有有机质降解孔,且白云石与黄铁矿和有机质薄膜共生,说明其成因与微生物诱导活动有关。浮游微生物和底栖藻分别控制了方解石和白云石的沉淀。这些岩相组合含有较高的有机质含量。最后一种岩相组合具有较高的蒸发矿物含量和陆源碎屑物质,说明其形成于相对浅水环境。高盐度和强烈陆源输入不利于有机质的保存。此次研究发现盐湖内白云石的形成受微生物活动和蒸发环境控制,不同的成因对岩相沉积特征和有机质富集产生重要影响。

关键词:方解石;钙芒硝;微生物;白云岩;潜江凹陷;江汉盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Origin of Qianjiang Formation dolostone in Qianjiang Sag, Jianghan Basin

Wu Shiqiang¹, Chen Fengling¹, Jiang Zaixing², Kong Xiangxin², Chen Chen², Guan Wenjing¹[1. Research Institute of Exploration and Development of Jianghan Oilfield Branch Company, SINOPEC, Wuhan, Hubei 430223, China;
2. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract: The Paleogene Qianjiang Formation of Qianjiang Sag in central Jianghan Basin is characterized by 193 cyclothems composed of alternating organic-rich dolomites and evaporites. However, the origin of dolomites in the Qianjiang Formation has always been controversial, limiting the further exploration of unconventional resources. The main objective of the study lies in the origin of inter-salt dolomite-rich lithofacies in the formation through the analyses of sedimentary characteristics of inter-salt lithofacies and minerals. Three main lithofacies combinations are identified based on the observation of sedimentary features (in terms of core and thin section) and mineral composition, that is, the thin-bedded-to-lamellar dolomicrite, the lamellar marlstone bearing dolomite, and the lamellar dolomicrite interbedded with glauberite. The first two combinations show obvious laminated characteristics with alternating organic and inorganic lamellars, indicating deposition in a relatively deep and reducing environment. The calcite and dolomite crystals within these two combinations have pores resulted from organic degradation, and the dolomite crystals coexist with organic films and pyrite crystals, both of which just indicate that the origin of the two combinations may have something to do with microbial activities. Planktons and phytobenthos serve to control the precipitation of calcite and dolomite minerals respectively. Therefore, the two lithofacies combinations feature a higher content of organic matters. The third combination contains more evaporitic minerals and terrigenous clasts, indicating deposition in relatively shallower waters. The relatively higher salinity and large amount of terrigenous material inputs are not conducive to the preservation of organic matters. In addition, the formation of dolomite minerals in saline lakes is controlled by both microbial activities and evaporation environment, and the origin plays an important role in sedimentary characteristics of lithofacies and accumulation of organic matters.

Key words: calcite, glauberite, microbe, dolomite, Qianjiang Sag, Jianghan Basin

收稿日期:2019-08-01;修订日期:2019-11-20。

第一作者简介:吴世强(1979—),男,硕士、高级工程师,页岩油综合研究。E-mail: wusq.jhyt@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05049-005)。

潜江凹陷位于江汉盆地中部,是江汉盆地最主要的富烃凹陷之一^[1]。中晚始新世—早渐新世时期沉积了由蒸发岩和细粒沉积岩组成的193个韵律层^[2]。研究发现一个完整的韵律层的岩性变化自下而上为:石盐—钙芒硝岩—白云岩—泥岩—白云岩—钙芒硝岩—盐岩^[3]。这些层内的泥质白云岩富含有机物质,具有良好的生烃潜力^[2,4-5]。近来的生产发现这些白云岩同时也是潜在的优质储集岩,因此这套白云岩岩层是典型的源储一体式油藏^[3,6]。然而,有关潜江凹陷白云岩的成因一直存在争议^[7-8],从而限制了进一步的勘探工作。

碳酸盐岩广泛分布在现代和古代的湖盆中^[9-11],这些物质大多由泥级大小的(小于4 μm)碳酸盐颗粒组成。中国古代的咸化湖盆中大多发育泥晶白云岩,这使其成为湖相泥岩的重要组成成分^[8,12-13]。沉积白云岩的形成机制一直是沉积学领域重点关注的前沿课题^[14]。现代的实验已经证明在常温常压环境中,仅仅通过控制镁离子浓度和盐度无法形成白云石晶体^[15]。近来的研究发现硫酸盐还原细菌可以促进白云石晶体的沉淀,使得人们用微生物白云岩来重新审视古代白云岩沉积^[16-17]。然而,古代形成的白云岩大多经历了重结晶作用^[18],因此其微生物参与留下的痕迹常被忽视。

本文的主要目的为通过沉积分析,确定微生物活动在富含白云石泥岩里保留的原始沉积特征。

1 区域地质概况

潜江凹陷为北陡南缓的箕状凹陷^[19],位于江汉盆地中部,是一个中、新生代(K-E)断陷型盆地(图1a)^[20]。潜江凹陷总面积为2 530 km²,北部为荆门地堑、乐乡关地堑、汉水地堑和永隆河隆起,东北方向为龙赛湖低凸起和岳口低凸起,东南方向以通海口断层为界,西南抵丫角新沟低凸起(图1b)。

前白垩系的海相地层被中生代—新生代湖相地层覆盖。上覆地层从上至下包括第四系平原组,新近系广化寺组,古近系荆河镇组、潜江组、荆沙组、新沟咀组 and 沙市组,以及白垩系渔洋组。潜江组包含潜一段(E_q^1)、潜二段(E_q^2)、潜三段(E_q^3)和潜四段(E_q^4)(图1c)。潜四段可进一步划分为潜四下亚段(E_q^{4L})和潜四上亚段(E_q^{4U})。北部的蚌湖洼陷在潜四下亚段(图1c)。北部的蚌湖洼陷由潜北断裂控制,在潜四下亚段—潜二段沉积阶段为潜江凹陷的沉积中心^[21-22]。该区域发育江汉盆地潜在的生油岩^[23]。本次研究聚焦富含有机质的潜三段第四油组的第十韵律层($E_q^{3(4)}-10$)

和潜四下亚段第六、第十五和第十八韵律层($E_q^{4L}-6$ 、 $E_q^{4L}-15$ 、 $E_q^{4L}-18$)。

2 材料与方法

本次研究中,约有70 m岩心样品取自蚌页油1井 $E_q^{3(4)}-10$ 韵律和蚌页油2井 $E_q^{3(4)}-10$ 、 $E_q^{4L}-6$ 、 $E_q^{4L}-15$ 和 $E_q^{4L}-18$ 韵律。全岩矿物分析和总有机碳含量(TOC)测定由中石化江汉油田勘探开发研究院完成。岩性特征和矿物鉴定工作依靠中国地质大学(北京)偏光显微镜(德国蔡司)以及中国地质大学(北京)科学研究院S-4800场发射扫描电子显微镜(日本日立)完成。

3 结果

3.1 矿物组成

研究区盐间地层的岩石主要由碳酸盐矿物(方解石和白云石)、钙芒硝以及硅质碎屑物质(石英、长石和粘土)组成,其垂向变化规律如图2。

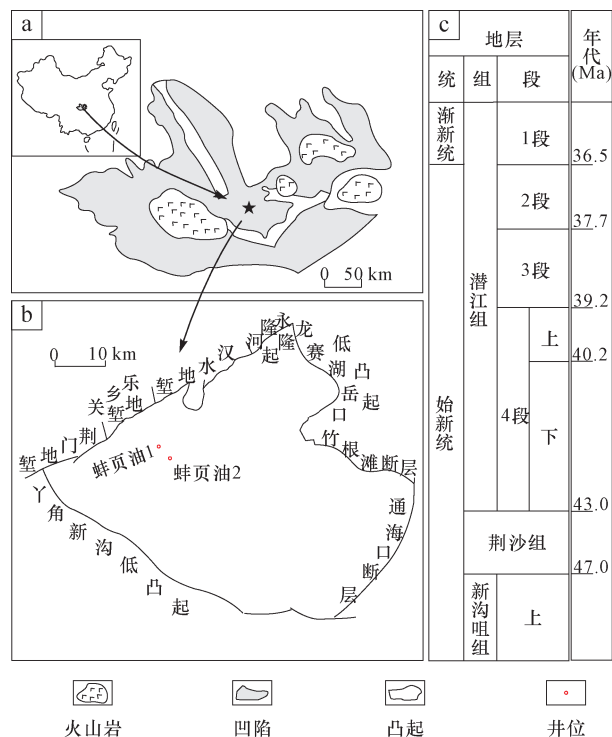
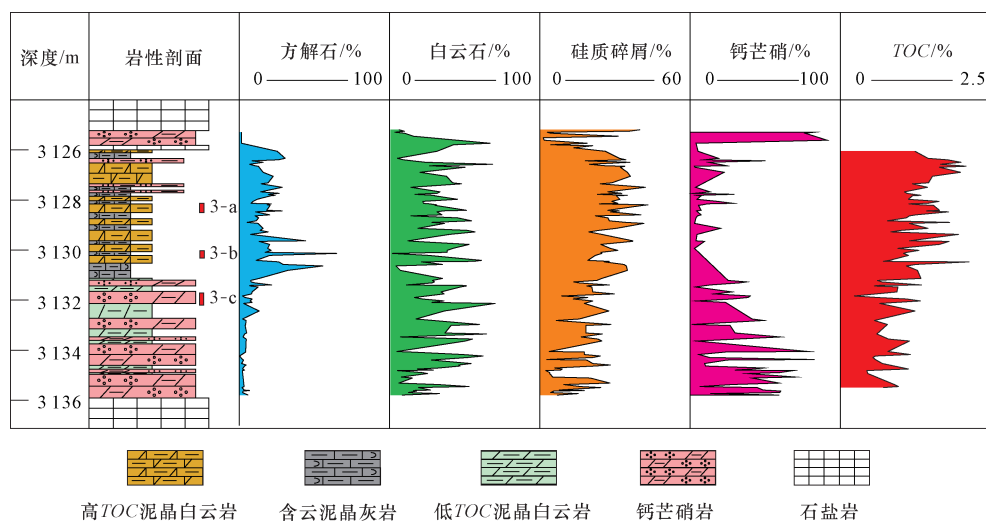


图1 江汉盆地研究区位置与地层

Fig. 1 The location and stratigraphic framework of the study area, Jiangnan Basin

a. 江汉盆地凹陷、凸起及火山岩构造位置; b. 江汉盆地潜江凹陷蚌页油1井与蚌页油2井井位; c. 江汉盆地潜江凹陷始新世—渐新世地层

图 2 江汉盆地蚌页油 1 井 $Eq^{3(4)}-10$ 矿物组合特征Fig. 2 Mineral association characteristics of the $Eq^{3(4)}-10$ cyclothem from Well BYY1 in the Jiangnan Basin

3.2 岩相特征

本文总结了 3 种主要的富含白云石的盐间泥岩岩相组合:薄层-纹层状泥晶白云岩、纹层状含云泥晶灰岩和夹钙芒硝层层状泥晶白云岩(图 3)。

3.2.1 薄层-纹层状泥晶白云岩

薄层-纹层状泥晶白云岩主要发育在 $Eq^{3(4)}-10$, $Eq^{4L}-6$ 和 $Eq^{4L}-15$ 韵律中上部,具有较高的 TOC 含量(图 2)。图 3a 中薄层-纹层状泥晶白云岩的方解石含量为 18.3%,白云石含量 53.5%,硅质碎屑物质含量为 20.8%,钙芒硝含量为 7.4%,TOC 值达到 1.8%。其在岩心上由黄褐色的泥晶白云石纹层/薄层和深灰色的泥质纹层组成,显示为较深水还原环境产物,局部夹有钙芒硝和硬石膏晶体或纹层(图 3a)。黄褐色的泥晶白云岩层厚度为 0.1 mm~3 cm(图 3a)。白云岩薄层内部可见钙芒硝晶体,部分泥晶白云岩纹层呈波状特征(图 3a)。显微照片显示薄层状泥晶白云岩在镜下呈弱纹层特征,由泥晶组成的暗色颗粒被亮色的微晶胶结(图 4a),纹层状泥晶白云岩由暗色灰泥层和浅色云质层组成(图 4b),云质层呈微波状,由微亮晶组成(图 4c),富含有机质(图 4d)。泥晶白云岩富集层段夹有富有机质泥岩,由富有机质纹层和富方解石纹层组成(图 4e,f)。

3.2.2 纹层状含云泥晶灰岩

纹层状含云泥晶灰岩主要发育在 $Eq^{3(4)}-10$ 和 $Eq^{4L}-15$ 韵律中部,具有中等 TOC 含量(图 2)。图 3b 中纹层状含云泥晶灰岩的方解石含量为 55.6%,

白云石含量为 10.1%,硅质碎屑物质含量为 34.3%,钙芒硝含量为 0,TOC 值达 1.35%。该岩相在岩心上呈灰色,纹层特征发育,形成于深水还原环境,局部夹有黄褐色纹层状泥晶白云岩(图 3b)。泥晶灰岩富集层段没有明显的硫酸盐纹层发育,此特征不同于泥晶白云岩富集层段内的泥质夹层。泥晶灰岩纹层厚度小于 1 mm(图 5a),所含纹层类型与薄层-纹层状泥

图 3 江汉盆地蚌页油 1 井 $Eq^{3(4)}-10$ 韵律岩相组合特征Fig. 3 Lithofacies combination characteristics of the $Eq^{3(4)}-10$ cyclothem from Well BYY1 in the Jiangnan Basin

a. 薄层-纹层状泥晶白云岩,埋深 3 128.32 m;b. 纹层状含云泥晶灰岩,埋深 3 129.91 m;c. 夹钙芒硝层层状泥晶白云岩,埋深 3 131.95 m

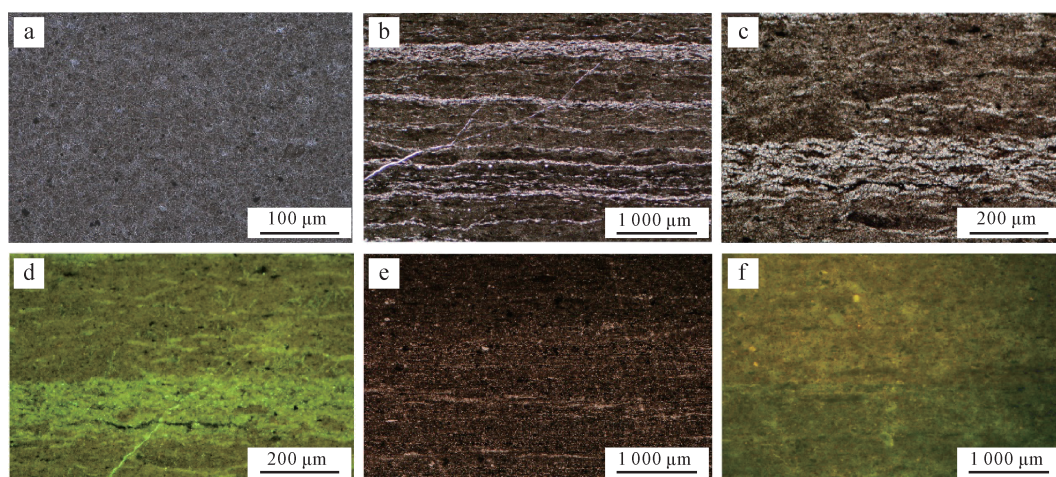


图4 江汉盆地蚌页油2井 $E_{q^{4L}}-6$ 韵律薄层-纹层状泥晶白云岩特征

Fig. 4 Characteristics of the thin-bedded-to-lamellar dolomiticrite of the $E_{q^{4L}}-6$ cyclothem from Well BYY2 in the Jiangnan Basin

a. 薄层状泥晶白云岩, 埋深 3 404.30 m; b. 纹层状泥晶白云岩 埋深 3 405.34 m;
c. 为 b 局部放大图; d. 为 c 荧光照片; e. 纹层状泥晶灰岩, 3 404.58 m; f. 为 e 荧光照片

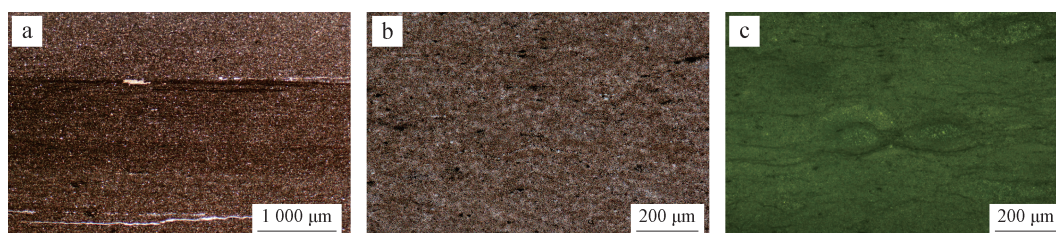


图5 江汉盆地蚌页油2井 $E_{q^{4L}}-6$ 韵律纹层状含云泥晶灰岩特征

Fig. 5 Characteristics of the lamellar marlstone bearing dolomite of the $E_{q^{4L}}-6$ cyclothem from Well BYY2 in the Jiangnan Basin

a. 层状泥晶灰岩, 埋深 3 404.44 m; b. 泥晶灰岩, 埋深 3 404.47 m; c. 为 b 荧光照片

晶白云岩岩相内部的纹层状泥岩类型相同。荧光下, 纹层内部可见波状有机质条带(图 5b,c)。

3.2.3 夹钙芒硝层层状泥晶白云岩

夹钙芒硝层层状泥晶白云岩主要发育在 $E_{q^{3(4)}}-10$, $E_{q^{4L}}-6$ 和 $E_{q^{4L}}-15$ 韵律下部和 $E_{q^{4L}}-18$ 韵律内。该岩相主要由钙芒硝、白云石及一定含量的硅质碎屑物质(粘土、石英和长石)组成, TOC 含量较低(图 2)。图 3c 中夹钙芒硝层层状泥晶白云岩含有方解石 6.80%, 白云石 41.16%, 硅质碎屑物质 20.25%, 钙芒硝 31.79%, TOC 值为 0.83%。岩心观察显示该岩相由泥晶白云岩层段和钙芒硝层段组成, 其中泥晶白云岩呈灰色, 局部具有黄褐色纹层, 钙芒硝层段呈灰白色, 厚度约 3~5 cm, 由钙芒硝纹层组成, 钙芒硝晶体不定向排列, 裂缝中可见被钙芒硝充填现象(图 3c)。薄片显示钙芒硝晶体具有向上变大的特征, 而晶体数量逐渐减少(图 6a)。位于薄片上部的基质主要由白云石、粘土等矿物组成, 可见泥质碎屑物质(图 6b)。泥晶白云岩富

集层段也可见明显的陆源碎屑物质颗粒(图 6c)。大量的蒸发矿物和陆源碎屑物质指示其形成于相对浅水环境。

3.3 矿物微观特征

3.3.1 白云石

薄层-纹层状泥晶白云岩内的白云石晶体直径小于 2 μm (图 7a)。这些泥晶白云石晶体以环状形式围绕一个中空的孔洞聚集在一起(图 7a)。这些中央孔洞的直径范围为 3~8 μm (图 7a,c)。大部分白云石晶体呈菱形或亚菱形(图 7a)。这些环状聚集物可以合并成更大的聚集体, 其彼此被较大的白云石颗粒胶结(图 7a)。较少有粘土和其它矿物在这种白云石富集的层内被发现。一些环状聚集物内的中央孔洞被微晶黄铁矿晶体充填。在泥晶白云岩富有机质层内可见泥晶白云石晶体与有机质膜和黄铁矿聚集在一起(图 7c)。

夹钙芒硝层层状泥晶白云岩内的白云石晶体大小大多在 3~4 μm (图 7d)。这些白云石晶体呈完美的

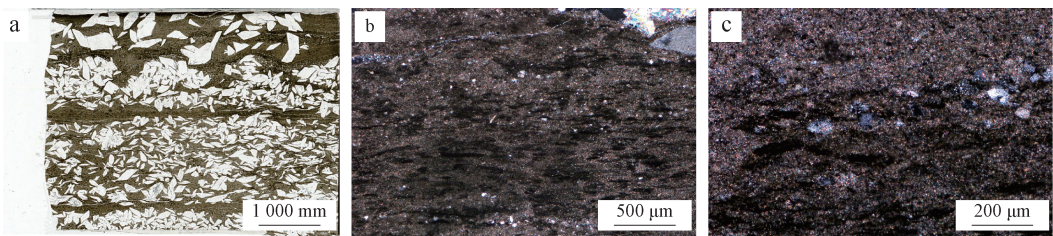


图 6 江汉盆地蚌页油 2 井 $Eq^{4L}-18$ 韵律夹钙芒硝层状泥晶白云岩特征

Fig. 6 Characteristics of the lamellar dolomicrite interbedded with glauberite of the $Eq^{4L}-18$ cyclothem from Well BYY2 in the Jiangnan Basin

a. 层状钙芒硝,埋深 3 647.32 m;b. 泥质碎屑,为 a 红色方框内的镜下特征,埋深 3 647.32 m;c. 陆源碎屑矿物,埋深 3 647.32 m

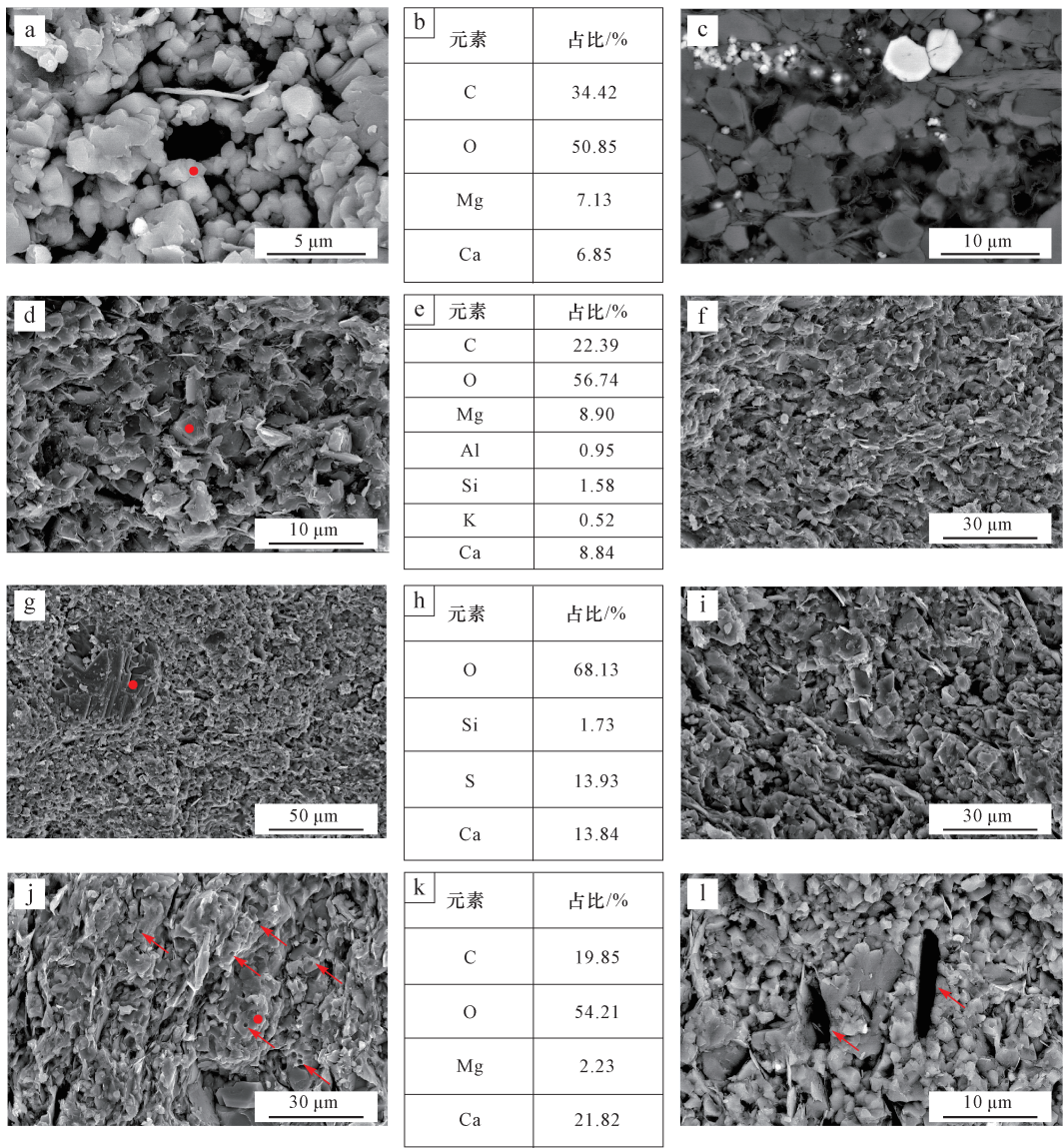


图 7 江汉盆地蚌页油 2 井 $Eq^{3(4)}-10,Eq^{4L}-6$ 和 $Eq^{4L}-15$ 韵律矿物电镜特征

Fig. 7 SEM photos of mineral characteristics of $Eq^{3(4)}-10,Eq^{4L}-6$, and $Eq^{4L}-15$ cyclothem from Well BYY2 in the Jiangnan Basin
a. 环状白云石组合,埋深 3 404.30 m;b. 为 a 的能谱结果;c. 泥晶白云石、黄铁矿与有机质薄膜,埋深 3 404.30 m;d. 粘土包裹的白云石,埋深 3 404.30 m;e. 为 d 的能谱结果;f. 粘土包裹的白云石,埋深 3 404.30 m;g. 白云岩内的硬石膏矿物,埋深 3 600.09 m;h. 为 g 的能谱结果;i. 方解石与粘土,埋深 3 596.77 m;j. 含有晶内孔的方解石,红色箭头指示晶内孔,埋深 3 597.43 m;k. 为 j 的能谱结果;l. 方解石与拉长的晶间孔,红色箭头指示晶间孔,埋深 3 404.22 m

菱形晶形(图7d)。没有环状构造或中空孔洞被发现(图7d)。片状和丝状粘土矿物被发现在该岩相内,其充填在白云石间的晶间孔隙内(图7f)。该岩相内白云石富集的层段中可见分散分布的硫酸盐矿物(如硬石膏和钙芒硝)(图7g)。这些矿物周边的基质内含有被粘土矿物围绕的白云石颗粒(图7g)。

3.3.2 方解石

纹层状含云泥晶灰岩内的泥晶方解石晶体随粘土矿物定向排列(图7i),并可见明显的纹层构造(图7i)。这些方解石晶体不具有完美的菱形晶形,且不显示明显的生物微结构特征。方解石晶体小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ (图7i,l)。一些圆形或椭圆形的孔或凹坑出现在泥晶方解石颗粒上,其大小小于 $2\text{ }\mu\text{m}$ (图7j)。一些拉长的椭圆形孔洞被泥晶方解石环绕,这些孔洞直径在 $8\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ (图7l)。

4 讨论

4.1 方解石与灰岩沉积成因

透光层内的浮游藻类可以通过光合作用移除 CO_2 ,增加水体中pH值和 CO_3^{2-} 的浓度,在其周围创造一个离子过饱和的微环境^[24]。Dittrich等^[25]的实验表明蓝藻细菌的细胞壁可以作为方解石晶体成核的基底。方解石晶体在细菌的细胞壁上结晶是因为细胞壁带有负电荷而能够吸附钙离子^[26]。因此,浮游微生物在泥晶方解石的形成过程中扮演了关键的角色^[11]。属于藻类诱导化学沉淀形成的方解石晶体具有相对一致大小的形状^[24]。

研究区纹层状含云泥晶灰岩内部的方解石晶体大小基本相同,且晶体内一般发育有晶内孔洞,这些特征与藻类诱导的方解石晶体相似。被相同泥晶方解石晶体围绕的长椭圆状孔洞的形状类似于浮游藻类的形态特征。这些孔洞的形成源于微生物对有机物质的降解作用^[25]。降解过程中释放的 H^+ 会溶解生物钙质壳壁,并形成重结晶方解石晶体。

纹层状含云泥晶灰岩内的细的连续的纹层表明它们是悬浮沉积的产物。高的伽马蜡烷含量指示一个高盐度的沉积环境^[27]。在这个沉积环境里,由于长期的盐度分层导致方解石晶体与粘土矿物一起沉淀,因此研究区内的大部分方解石晶体是与粘土混杂在一起的。而对于季节性分层的古湖盆,其内部的细粒沉积物显示方解石矿物和粘土物质一般出现在不同的纹层内^[11]。

4.2 白云石与白云岩成因

硫酸盐还原细菌可以通过降低硫酸盐浓度和提高水体的pH值和 CO_3^{2-} 的碱度来克服白云石沉淀过程中的化学动力学屏障^[28]。之前的研究在青海湖沉积物中发现了球状-亚球状的白云石聚集颗粒,并发现了大量的草莓状黄铁矿^[29]。使用青海湖沉积物内的硫酸盐还原细菌可以在实验中沉淀出白云石晶体,表明白云石可以在内陆盐湖中形成^[29]。

如前所述,研究区的白云石颗粒出现在富有机质和贫有机质两种岩相内(图2)。

薄层-纹层状泥晶白云岩的白云石聚集与有机质有着密切的联系。富有机质的微波状的亮晶云质层具有似藻席特征(图4c,d),说明其形成可能与底栖生物有关。泥晶白云石富集区内,也可见多孔的环状结构(图7a),且泥晶方解石周边聚集有黄铁矿和有机质薄膜(图7b),说明硫酸盐还原细菌可能在白云石结晶过程中发挥了重要作用,并形成黄铁矿和晶体表面吸附的有机质薄膜。多孔的环状结构可能与埋藏过程中有机物质降解作用有关^[26]。如前所述,因为细胞壁可以吸附钙离子,当 HCO_3^- 耗尽后,在高硫酸盐浓度环境下,细胞壁表面可以形成石膏等硫酸盐矿物,因此硫酸盐矿物的形成也与生物有关^[30]。所以在该岩相内部的富方解石夹层内可见钙芒硝与硬石膏纹层,这也表明了薄层-纹层状泥晶白云岩形成于咸化水体中。

夹钙芒硝层层状泥晶白云岩没有细胞状结构,且TOC含量较低。大量的粘土矿物出现在白云石晶体周围。存在厚的钙芒硝层说明其沉积时的盐度要高于层状-薄层状泥晶白云岩沉积的水体盐度。钙芒硝的粒序特征说明其是常年盐湖的水底沉积物,其具有卤水浓度波动的特征^[31]。白云石层和钙芒硝层内出现的大量的陆源碎屑物质和粘土矿物说明有陆源物质参与到蒸发矿物的化学沉淀中。大量的陆源碎屑物质的输入和蒸发矿物的形成会稀释盆内有机物质的浓度^[5]。此外,过高的盐度会限制微生物的种类和数量,并导致微生物发生降解活动从而影响有机质的保存^[5],因此该岩相TOC含量较低。我们无法将微生物活动从该岩相内白云石的形成过程中排除,因为噬盐菌在高盐湖中被发现且能诱导白云石的结晶^[18,32]。但是,高盐度和陆源物质输入会限制微生物的活动。受限的微生物可能不能完全对强蒸发环境下的形成的白云石负责。我们推测卤水过高的温度会对白云石的化学结晶产生影响^[37]。因此,贫有机质岩相内的白云石

晶体的形成可能是蒸发浓缩、高温和微生物共同参与的结果。

因此,研究区内白云石的形成受多种因素控制,在微生物主导沉积阶段,形成云质沉积物有机质含量较高,而在蒸发作用主要沉积时,形成的沉积物有机质含量相对较低。

5 结论

潜江凹陷潜江组主要岩相组合包括薄层-纹层状泥晶白云岩、纹层状含云泥晶灰岩和夹钙芒硝层状泥晶白云岩。沉积物中保留了部分微生物活动留下的痕迹。方解石由浮游微生物诱导结晶并悬浮沉积,白云石由底栖生物诱导原地结晶。有机质的丰度受微生物活动、陆源物质输入和有机质保存条件等控制。

研究结果表明,潜江凹陷潜江组富有机质页岩中的白云石为生物诱导成因的泥晶碳酸盐岩,白云石的沉淀与微生物活动密切相关,古生产力大,烃源条件好。这些泥晶白云石围绕生物降解孔呈环状分布,晶间孔(生物降解孔)发育,储集条件优越。生成的油气受顶底板盐岩封隔,大量滞留在盐间页岩系统中,形成连续型聚集的页岩油层。因此,生物诱导成岩的云质页岩相具有烃源好、储集优和含油量高的特点,是页岩油勘探开发的最有利岩相。

参 考 文 献

- [1] 方志雄. 潜江凹陷隐蔽油藏成藏主控因素及勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 804-812.
Fang Zhixiong. Main controlling factors and exploration direction of subtle oil reservoirs in Qianjiang depression[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6): 804-812.
- [2] 熊智勇, 吴世强, 王洋, 等. 江汉盐湖盆地盐间泥质白云岩油藏地质特征与实践[J]. 地质科技情报, 2015, 34(2): 181-187.
Xiong Zhiyong, Wu Shiqiang, Wang Yang, et al. Geological characteristics and practice for intersalt argillaceous dolomites reservoir in the Qianjiang depression of Jiangnan salt lake basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(2): 181-187.
- [3] 吴世强, 唐小山, 杜小娟, 等. 江汉盆地潜江凹陷陆相页岩油地质特征[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2013, 36(3): 282-286.
Wu Shiqiang, Tang Xiaoshan, Du Xiaojuan, et al. Geologic characteristics of continental shale oil in the Qianjiang depression, Jiangnan salt lake basin[J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science), 2013, 36(3): 282-286.
- [4] Li M, Chen Z, Cao T, et al. Expelled oils and their impacts on rock-eval data interpretation, Eocene Qianjiang formation in Jiangnan Basin, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 191: 37-48.
- [5] Li W, Lu S, Xue H, et al. Oil content in argillaceous dolomite from the Jiangnan Basin, China: Application of new grading evaluation criteria to study shale oil potential[J]. Fuel, 2015, 143: 424-429.
- [6] Li M, Wang W, Lu S, Xue H. Quantitative characterization on shale-hosted oil reservoir: A case study of argillaceous dolomite reservoir in the Jiangnan Basin[J]. Fuel, 2017, 206: 690-700.
- [7] 张永生, 侯献华, 张海清, 等. 江汉盆地潜江凹陷上始新统含盐岩系准原生白云岩的沉积学特征与形成机理[J]. 古地理学报, 2006, 8(4): 441-455.
Zhang Yongsheng, Hou Xianhua, Zhang Haiqing, et al. Sedimentary characteristics and formation mechanism of peneprimary dolostone in the Upper Eocene salt-bearing interval in Qianjiang Sag, Jiangnan Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(4): 441-455.
- [8] Shen J, Chen B, Chen F, et al. Paleogene lacustrine dolomitization, Xingou region, southern Qianjiang Depression, China[J]. Geosciences Journal, 2016, 20(2): 183-197.
- [9] Platt N H. Lacustrine carbonates and pedogenesis: sedimentology and origin of palustrine deposits from the Early Cretaceous Rupelo Formation, W Cameros Basin, N Spain[J]. Sedimentology, 1989, 36(4): 665-684.
- [10] Hargrave J E, Hicks M K, Scholz C A. Lacustrine carbonates from Lake Turkana, Kenya: A depositional model of carbonates in an Extensional Basin[J]. Journal of Sedimentary Research, 2014, 84(3): 224-237.
- [11] Kong X, Jiang Z, Han C, et al. Genesis and implications of the composition and sedimentary structure of fine-grained carbonate rocks in the Shulu sag[J]. Journal of Earth Science, 2017, 28(6): 1047-1063.
- [12] 宋柏荣, 韩洪斗, 崔向东, 等. 渤海湾盆地辽河坳陷古近系沙河街组四段湖相方沸石白云岩成因分析[J]. 古地理学报, 2015, 17(1): 33-44.
Song Bairong, Han Hongdou, Cui Xiangdong, et al. Petrogenesis analysis of lacustrine analcite dolostone of the Member 4 of Paleogene Shahejie Formation in Liaohe Depression, Bohai Bay Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(1): 33-44.
- [13] Liang C, Jiang Z, Cao Y, et al. Sedimentary characteristics and origin of lacustrine organic-rich shales in the salinized Eocene Dongying Depression[J]. GSA Bulletin, 2018, 130(1-2): 154-174.
- [14] 由雪莲, 孙枢, 朱井泉, 等. 微生物白云岩模式研究进展[J]. 地学前缘, 2011, 18(4): 52-64.
You Xuelian, Sun Shu, Zhu Jingquan, et al. Progress in the study of microbial dolomite model[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(4): 52-64.
- [15] Land, L S. Failure to precipitate dolomite at 25 degrees C from dilute solution despite 1000-fold oversaturation after 32 years[J]. Aquatic Geochemistry, 1998, 4(3-4): 361-368.
- [16] You X L, Sun S, Lin C S, et al. Microbial dolomite in the sabkha environment of the middle Cambrian in the Tarim Basin, NW China[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2018, 65(1): 109-120.
- [17] Fang Y, Xu H. Study of an ordoevian carbonate with alternating dolomite-calcite laminations and its implication for catalytic effects of

- microbes on the formation of sedimentary dolomite [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2018, 88(6): 679–695.
- [18] 黄春菊, 陈开远, 杨香华. 盐湖盆地层序地层特征[J]. *石油与天然气地质*, 2002, 23(2): 134–138.
- Huang Chunju, Chen Kaiyuan, Yang Xianghua. Characteristics of sequence stratigraphy in the saline lake basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2002, 23(2): 134–138.
- [19] 由雪莲, 孙枢, 朱井泉. 塔里木盆地中上寒武统叠层石白云岩中微生物矿化组构特征及其成因意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(8): 1777–1790.
- You Xuelian, Sun Shu, Zhu Jingquan. Significance of fossilized microbes from the Cambrian stromatolites in the Tarim Basin, Northwest China [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 44(8): 1777–1790.
- [20] 王国力, 杨玉卿, 张永生, 等. 江汉盆地潜江凹陷王场地区古近系潜江组沉积微相及其演变[J]. *古地理学报*, 2004, 6(2): 140–150.
- Wang Guoli, Yang Yuqing, Zhang Yongsheng, et al. Sedimentary microfacies and evolution of the Qianjiang Formation of Paleogene at Wangchang area in Qianjiang Sag, Jianghan Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(2): 140–150.
- [21] 陈凤玲. 潜江凹陷潜江组层序地层划分[J]. *江汉石油职工大学学报*, 2003, 16(2): 37–39.
- Chen Fengling. On Qianjiang Depression about Qianjiang Formation sequence stratigraphic classification [J]. *Journal of Jianghan Petroleum University of Staff and Workers*, 2003, 16(2): 37–39.
- [22] 陈凤玲. 潜江盐湖构造演化及沉积充填与油气成藏[J]. *石油天然气学报*, 2007, 29(2): 50–53.
- Chen Fengling. Structural evolution and depositional packing as well as hydrocarbon accumulation in Qianjiang Salt Lake Basin [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2007, 29(2): 50–53.
- [23] Hou Y, Wang F, He S, et al. The properties and shale oil potential of saline lacustrine shales in the Qianjiang Depression, Jianghan Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 86: 1173–1190.
- [24] Kelts K, Hsü K. Freshwater carbonate sedimentation [M] // Baccini P. *Lakes: chemistry, geology, physics*. New York: Springer, 1978: 295–323.
- [25] Dittrich M, Müller B, Mavrocordatos D, et al. Induced calcite precipitation by cyanobacterium *synechococcus* [J]. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 2003, 31(2): 162–169.
- [26] De Muynck W, De Belie N, Verstraete W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2): 118–136.
- [27] Wang Z, Zheng Y, Chen F, et al. Biomarker geochemistry of $\text{Eq}^{3(4)}$ –10 cyclothem shale in Qianjiang Depression of the Jianghan salt lake facies Basin [J]. *Petroleum Science and Technology*, 2017, 36(2): 148–153.
- [28] 姜在兴. 沉积学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 321–322.
- Jiang Zaixing. *Sedimentology* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 321–322.
- [29] Deng S C, Dong H L, Guo L, et al. Microbial dolomite precipitation using sulfate reducing and halophilic bacteria: Results from Qinghai Lake, Tibetan Plateau, NW China [J]. *Chemical Geology*, 2010, 278(3–4): 151–159.
- [30] Thompson J B, Ferris F G. Cyanobacterial precipitation of gypsum, calcite, and magnesite from natural alkaline lake water [J]. *Geology*, 1990, 18(10): 995–998.
- [31] Salvany J M, Garcés-Veigas J, Ortí F. Glauberite-halite association of the Zaragoza Gypsum Formation (Lower Miocene, Ebro Basin, NE Spain) [J]. *Sedimentology*, 2007, 54(2): 443–467.
- [32] Adamski J C, Roberts J A, Goldstein R H. Entrapment of bacteria in fluid inclusions in laboratory-grown halite [J]. *Astrobiology*, 2006, 6(4): 552–562.
- [33] 王春连, 刘成林, 徐海明, 等. 江陵凹陷沙市组上段石盐包裹体特征及其记录的古气候信息[J]. *矿床地质*, 2012, 31(S1): 483–484.
- Wang Chunlian, Liu Chenglin, Xu Haiming, et al. Characteristics of halite inclusions in the upper Shashi formation of Jiangling depression and paleoclimate information recorded [J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31(S1): 483–484.
- [34] 赵桂萍. 鄂尔多斯杭锦旗地区上古生界储层流体包裹体特征与天然气成藏时期[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(5): 905–912.
- Zhao Guiping. Characterization of fluid inclusions and timing of gas accumulation in Upper Paleozoic reservoirs of Hangjinqi area, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(5): 905–912.
- [35] 林红梅, 程付启, 王永诗, 等. 渤海湾盆地渤南洼陷沙四段油气多期充注的流体包裹体证据[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(2): 209–218.
- Lin Hongmei, Cheng Fuqi, Wang Yongshi, et al. Fluid inclusion evidence for multi-period oil charge in Shahejie Member 4, Bonan Sub-sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(2): 209–218.
- [36] 潘安阳, 秦建中, 姚素平, 等. 单体烃类包裹体在油气地球化学中的应用: 以塔河油田为例[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(5): 675–681.
- Pan Anyang, Qin Jianzhong, Yao Suping, et al. Application of single hydrocarbon inclusions in petroleum geochemistry: A case study of the Tahe oilfield [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(5): 675–681.
- [37] 谭万仓. 群克构造志留系储层包裹体特征与油气成藏过程[J]. *大庆石油地质与开发*, 2018, 37(4): 38–43.
- Tan Wanchang. Fluid inclusion characteristics and hydrocarbon accumulation process for Silurian reservoirs in Qunke structure [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2018, 37(4): 38–43.

(编辑 张亚雄)