

白云岩的残余结构及其沉积相的意义

——以塔中地区中-下奥陶统为例

张学丰¹, 李晓峰², 李宗杰³, 刘波¹, 宋海强⁴

(1. 北京大学 地球与空间科学学院 石油与天然气研究中心, 北京 100871; 2. 中国石油 海外勘探开发公司, 北京 100034;

3. 中国石化 西北油田分公司, 新疆 乌鲁木齐 830000; 4. 陕西延长石油国际勘探开发工程有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要:白云岩虽然是一种沉积岩, 原生、同生或准同生时期形成的泥晶-粉晶白云岩也常被视为局限-蒸发环境的指示标志, 但埋藏条件下形成的交代白云岩或热液改造白云岩则不能直接作为沉积相标志, 必须辨别白云岩的残余结构, 并恢复原始灰岩的沉积环境。这对确定其沉积相及开展储层成因研究至关重要。以塔中地区中-下奥陶统白云岩发育段为例, 这些白云岩就常被认为是局限-蒸发台地的标志。通过对取心段岩石类型的详细鉴定, 以云质灰岩中的云化部分与未云化部分进行对比, 建立了白云岩残余结构的识别标准。识别了白云岩的3种残余结构, 发现白云岩以残余影像结构为主, 残余粒屑结构和残余粒形结构很少, 由此认为白云岩的原岩主要是一套颗粒滩相灰岩。中央隆起带早-中奥陶纪不属于前人所说的局限-蒸发台地相, 而是开阔台地相, 且以发育台内滩亚相-高能砂屑滩微相为主。

关键词:白云岩; 残余结构; 开阔台地相; 奥陶系; 塔里木盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Relict texture of dolostones and its significance to sedimentary facies: A case study from the Middle-Lower Ordovician in Tazhong area, Tarim Basin

Zhang Xuefeng¹, Li Xiaofeng², Li Zongjie³, Liu Bo¹, Song Haiqiang⁴

(1. Institute of Oil & Gas, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. PetroChina International

Exploration & Development Company, Beijing 100034, China; 3. Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi 830000, China;

4. Shaanxi Yanchang Petroleum and Development Engineering Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: As a kind of sedimentary rock, primary, contemporaneous and penecontemporaneous dolostones with mud- or silt-sized crystalline structures are generally related to restricted-evaporative sedimentary setting. However, those formed by replacement or hydrothermal alteration during burial process could not be used as direct indicators of sedimentary facies, at least not until the relict texture of the dolostone is recognized and the original limestone depositional setting is restored. This is critical to sedimentary- and reservoir-related research on dolostone. The Middle-Lower Ordovician dolostone from the Central Uplift Zone, Tarim Basin, may serve as a good example. It is commonly regarded as signature of restricted-evaporative platform facies. However, an investigation of the dolostone in the study area proved otherwise. We identified the lithology of samples taken from the area through systematic core/thin section observation and established criteria for relict texture identification by comparing the dolomitized and the un-dolomitized parts of the same samples. The results show that dolostones in the area are characterized by three relict textures, among which the relict ghost texture dominates. The other two relict textures, i. e., the relict granular/biogenetic texture and the relict grain shape texture, are uncommon. We therefore suggest that the Ordovician dolostones originated mainly from a set of grained shoal limestone, and the sedimentary facies during the Early-Middle Ordovician was an open platform rather than a restricted platform. The predominant microfacies are intraplatform high-energy arenstritic shoal.

Key words: dolostone, relict texture, open platform facies, Ordovician, Tazhong area, Tarim Basin

收稿日期: 2016-07-11; 修订日期: 2017-07-03。

第一作者简介: 张学丰(1982—), 男, 博士、副研究员, 碳酸盐岩沉积与储层学。E-mail: zhangxf@pku.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672123, 41002029, 41272137, 41572117)。

白云岩的成因复杂,部分白云岩形成于原生或同生-准同生时期的局限-蒸发环境,常具泥晶-粉晶结构,且可见如石膏假晶、膏模孔、藻纹层等指示咸化、暴露的沉积标志;但很多白云岩与蒸发岩无关,也难以找到局限-蒸发环境的沉积标志,常为埋藏条件下经富镁流体交代而形成的,因此,这类白云岩并不具有指示局限-蒸发环境的意义^[1-2]。在后一种情况下,白云岩中常可见原始灰岩的交代残余,形成“残余结构”。

白云岩的残余结构很早就引起了学者的注意^[3],但在实际研究过程中其沉积相指示意义容易被忽略。张学丰等^[4]曾基于对川东北地区飞仙关组鲕粒滩储层的研究,把白云岩的残余结构定义为一种特殊的碳酸盐岩结构,描述了原始粒屑结构的灰岩经白云岩化及重结晶、溶蚀、胶结等成岩作用改造之后,岩石原始结构遭到不同程度的破坏,但仍残留下来的部分原始结构的现象。据此,可进一步根据颗粒/骨架与胶结物的可识别性和颗粒/生物内部结构的保存程度,把白云岩残余结构分为3种。①残余粒屑/生物结构:颗粒或生物轮廓及内部结构均较为清晰,可以确定颗粒/生物百分含量;②残余粒形/外形结构:仅能识别颗粒/生物轮廓,可以确定颗粒/生物百分含量,内部结构基本消失;③残余影像结构:仅隐约可见颗粒或生物外形,不能定量颗粒/生物百分含量。这里所说的颗粒,包括碳酸盐岩中常见的内碎屑、鲕粒、豆粒、球粒、似球粒、包粒、核形石、骨粒/生物碎屑等^[5]。

白云岩的残余结构,在恢复岩相古地理、沉积相、海平面变化,研究成岩作用、孔隙演化及储层发育与保存机理,并寻找有利储层等方面有重要指示意义^[3-4,6-10]。笔者以塔里木盆地塔中隆起、塔中南坡玉北和塔中北坡顺南等地区的奥陶统白云岩为例,说明了如何识别白云岩的残余结构以及残余结构在恢复沉积相方面的重要作用,这对于研究该区岩相古地理环境和储层预测具有一定指导意义。

1 地质背景

塔里木盆地是在前震旦纪陆壳基底之上发展起来的大型复合叠合盆地,演化历史长,经历了震旦纪一中泥盆世、晚泥盆世—三叠纪和侏罗纪—第四纪3个伸展-聚敛旋回,形成了多个隆、坳构造单元。塔中位于盆地中部,构造区划上包括塔中隆起、巴楚隆起、麦盖提斜坡、塘沽巴斯凹陷和顺托果勒隆起等次级构造单元^[11]。

在塔中台地相区,蓬莱坝组以白云岩为主,鹰山组为白云岩-灰岩过渡,一间房组则以灰岩为主。前人

一般认为中央隆起带与塔里木盆地台地相区其他区域一样,中-下奥陶统整体经历了由局限到半局限,然后再到开阔台地的沉积环境演化。之所以定义为局限台地,明显受寒武系以准同生白云岩为主的局限台地相认识的影响,大多数学者认为中下奥陶统的白云岩也形成于局限台地相-潮坪亚相-(灰)云坪微相^[12-13]。

2 样品与方法

在对31口钻井取心进行了岩心观察描述的基础上,采取了200多块岩心、岩屑样品,磨制了大量普通染色多功能薄片、染色铸体薄片。然后在显微镜下进行详细的岩石学和矿物学研究,重点对岩性和岩石结构进行了分析与归类。通过显微镜下观察,识别取心段白云岩的残余结构。结合岩心观察所得到的沉积环境信息以及区域沉积背景,恢复其原始沉积相。

3 塔中地区奥陶系白云岩残余结构

受制于成岩作用对原始结构的破坏程度,识别白云岩的残余结构可能存在一定困难。张荫本^[3]总结的4条识别经验实用性强,即:①对光直观薄片;②用低倍显微镜观察;③染色试验分辨;④通过矿物习性判断。据毕义泉等^[9]介绍。如果在野外露头中的中厚层状地层岩石中可看到颗粒的轮廓,基本可判断为颗粒白云岩。另外,碳酸盐岩颗粒的泥晶套具有保护颗粒结构及形态免遭白云岩化等成岩作用彻底破坏的作用,因此在识别颗粒方面具有重要指示意义。总之,在对野外露头、岩石手标本和显微薄片进行自然光、显微镜或阴极发光观察,基本可判别白云岩的残余结构。

张学丰等^[4]介绍了白云岩残余结构的识别与分类标准:①颗粒/生物与胶结物/基质是否可分别定量;②颗粒/生物内部结构是否清晰。在此,根据前人及张学丰等^[4]的标准对塔里木盆地中央隆起带奥陶系白云岩的残余结构进行分类。

3.1 残余粒屑结构

一般来讲,对于没有内部结构的砂屑,岩石发生白云石化之后,我们仍很难判断其是否保存了原始结构;而鲕粒与豆粒等具明显内部层圈或放射结构的颗粒,其白云石化之后内部结构保存情况则一目了然。

在川东北的普光气田,就有飞仙关组亮晶鲕粒灰岩经白云岩化之后,形成颗粒形态完整、内部结构也清晰的残余鲕粒白云岩,其具典型的残余粒屑结构^[4]。

在塔里木盆地,奥陶系鲕粒发育很少。我们仅在玉北5井蓬莱坝组发现了残余粒屑结构的亮晶残余鲕粒硅质白云岩(图1)。其残余鲕粒间及部分粒内被硅质胶结,可能是原始结构保存较好的原因。

3.2 残余粒形结构

残余粒形结构在本区也不常见。其基本特征是颗粒外形基本清晰,也可识别出胶结物,但内部结构不清(图2)。

3.3 残余影像结构

因局部白云岩/石化强烈,原始粒屑结构的亮晶砂屑灰岩,变为具残余结构的中晶白云岩(图3a)。此类白云岩(或灰质白云岩)具较不明显的交代残余结构。白云石表面明显较脏,较脏部分呈分离的团块或团簇状,虽然颗粒边缘模糊,但隐见平滑的颗粒边界,通过与未白云岩/石化部分的岩石对比仍可识别出原始砂屑的幻影(图3a)。

关于这一判断依据,图3b展示了一个更为清楚的

实例。在部分白云石化的亮晶砂屑灰岩中,胶结物白云石化之后表面较干净,而砂屑白云石化之后白云石表面明显较脏,且显示明显的颗粒轮廓。可以想象,这些颗粒幻影在持续增强的白云岩化或重结晶作用下,原始颗粒的幻影将越来越难以保存,直至最终全部变为结晶白云岩。

由此推而广之,有的岩石会因白云岩化/白云石化更为强烈、彻底,全部变为结晶白云岩之后,基本没有原始灰岩结构残留。但是即便如此,我们仍可通过较脏的白云石表面,或所显示出的白云石的雾心亮边结构,且较脏部分呈团块或团簇状、隐约可见平滑颗粒边界(颗粒边界由清晰-模糊:图3c-e),将该白云岩判断为残余影像结构。更有甚者,有的在显微镜下完全看不出原始颗粒幻影,仅白云石表面较脏,但根据野外看到的岩层为中-厚层构造及岩石晶间孔特别发育(图3f),虽然不一定能直接判断出具体是何颗粒,但原始岩性应为泥晶/亮晶颗粒灰岩而非泥晶灰岩,因为泥晶灰岩白云岩化之后孔隙一般较差。

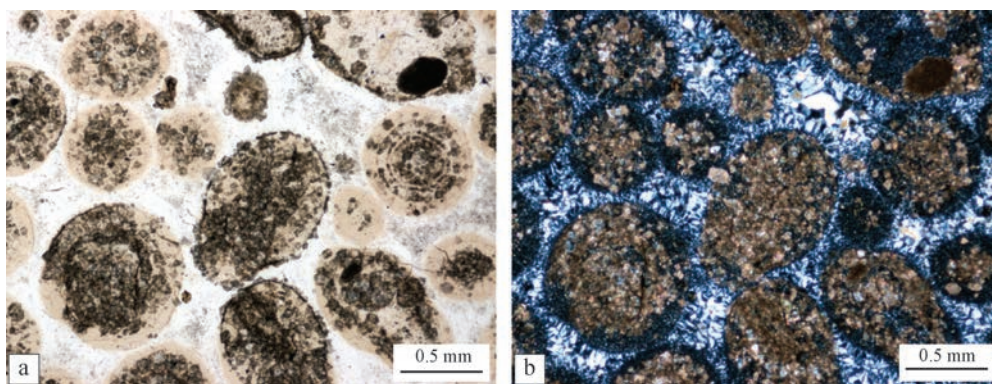


图1 塔中地区玉北5井残余鲕粒硅质白云岩残余粒屑结构

Fig. 1 Relict granular texture of siliceous oolitic dolostone in Well YB5 in Tazhong area

(玉北5井, O_1p , 埋深6 841.42 m)

a. 单偏光; b. 正交光

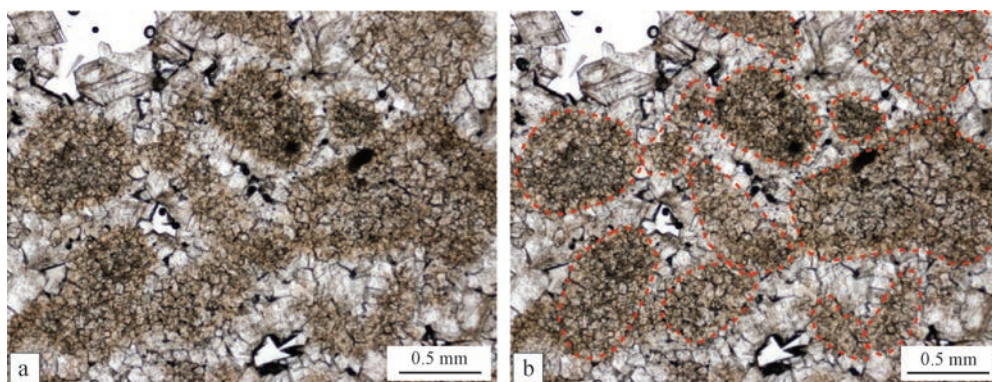


图2 塔中地区玉北5井亮晶残余鲕粒白云岩残余粒形结构

Fig. 2 Relict grain shape texture of sparry oolitic dolostone in Well YB5 in Tazhong area

(玉北5井, O_1p , 埋深6 841.42 m)

a. 原始照片; b. 显示了颗粒边界

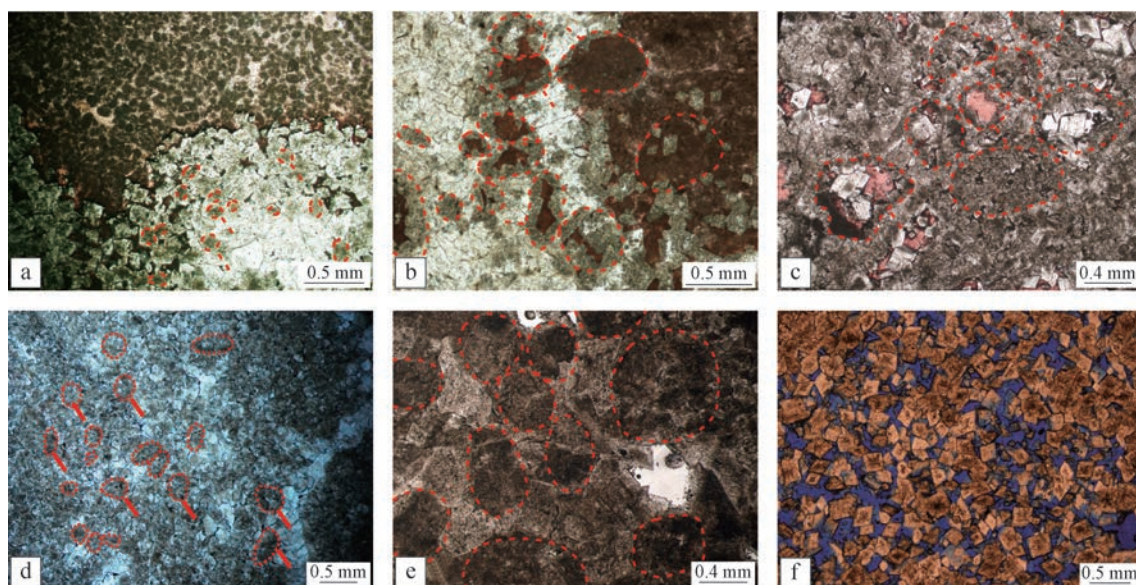


图3 塔里木奥陶系白云岩残余影像结构

Fig. 3 Relict ghost texture of the Ordovician dolostones, Tarim Basin

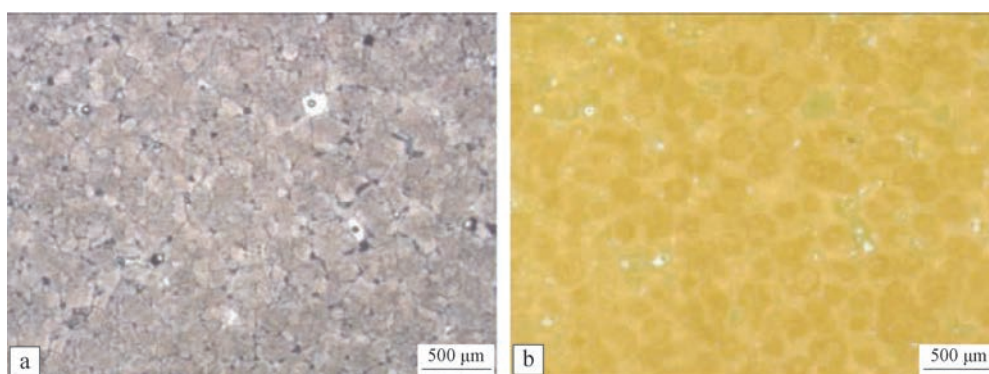
a. 顺南5井, O_1p , 埋深7 177.6 m, 亮晶粉屑灰岩-残余影像中晶白云岩以缝合线接触, 白云石表面较脏, 可见原始粉屑颗粒幻影(箭头); b. 中17井, $O_{1-2}y$, 埋深5 846.99 m, 亮晶砂屑云质灰岩, 部分白云岩化, 胶结物白云石化之后表面较干净, 砂屑白云石化之后白云石表面明显较脏, 且显示颗粒轮廓(箭头); c. 中11井, $O_{1-2}y$, 埋深5 640.1 m, 残余影像细晶白云岩, 可见较为明显的砂屑颗粒幻影, 箭头所指为溶蚀形成粒内孔, 且被白云石-方解石全充填; d. 古隆1井, $O_{1-2}y$, 埋深6 543.8 m, 残余影像细晶白云岩, 白云石表面较脏, 可见颗粒幻影, 部分颗粒被还原; e. 中4井, O_1p , 埋深3 611.61 m, 残余影像粗晶白云岩, 白云石表面较脏, 隐见颗粒幻影, 部分颗粒被还原; f. 中19井, $O_{1-2}y$, 埋深5 523.76 m, 溶蚀、白云岩化等成岩作用强烈改造, 致使原岩结构难以辨别, 但及其发育的孔隙, 暗示其原始岩性为颗粒结构。

在塔里木盆地, 这类残余结构的白云岩最为常见, 同时, 这是一类最难以识别, 也是最容易被忽视的残余影像结构。也有学者^[10]应用荧光或阴极发光等技术, 成功地恢复了塔里木盆地蓬莱坝组结晶白云岩的原始颗粒结构(图4)。实际上, 这种残余结构在世界范围内都很常见。许多学者都报道过, 白云石交代原始微生物灰岩、颗粒灰岩之后, 白云石表面显示较脏的结构残余, 或显示雾心亮边结构^[14-20], 正是原始微生物或颗粒结构的交代残余。

4 讨论

4.1 白云岩成因与沉积相的关系

自然界中白云岩很多, 但有关这些白云岩的成因问题却一直未能很好地解决。目前为止, 已提出多种白云岩成因假说模型, 常见的成因模式包括^[1-2]: 原生沉淀模式、毛细管浓缩模式、渗透回流模式、微生物白云岩化模式、混合水模式、埋藏交代模式、热对流模式

图4 巴楚大班塔格剖面蓬莱坝组细晶白云岩(a)及其残余颗粒结构(b)^[21]Fig. 4 Dolomite with fine crystalline (a) and its relict granular texture (b), the Ordovician Penglaiba Formation, Dabantage profile, Bachu area^[21]

a. 单偏光照片; b. 应用了白板技术的单偏光照片

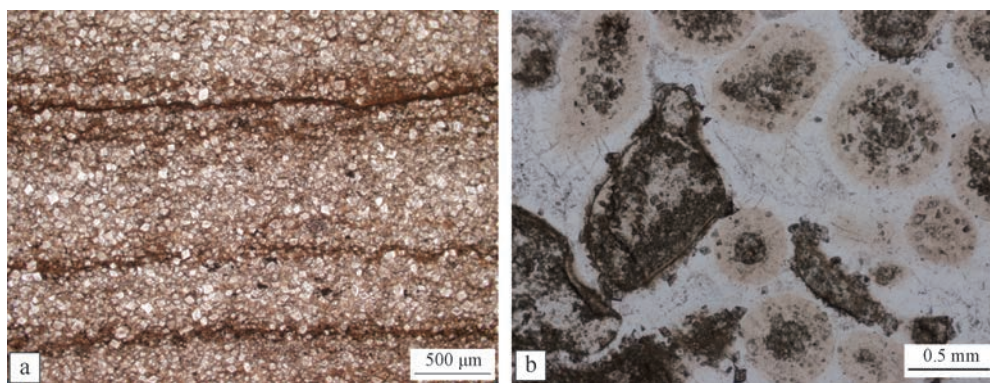


图 5 塔里木玉北 5 井蓬莱坝组发育的纹层状粉晶白云岩及其相邻的硅质交代鲕粒白云岩
Fig. 5 Laminated dolostone with silt-sized crystalline (a) neighbored by silicified oolitic dolostone (b)

from the Ordovician Penglaiba Formation in Well YB5, Tarim Basin

a. YB5 井, O_1p , 6 841.2 m, 纹层状泥-粉晶白云岩, 暗色条带含较多黄铁矿; b. YB5 井, O_1p , 6 841.42 m, 硅质交代鲕粒白云岩, 原岩为亮晶鲕粒灰岩

以及热液白云岩化模式等。

一般认为,自然界水体的盐度和 Mg/Ca 比值越高,越有利于形成白云岩^[1]。在局限-蒸发环境下,海水或湖水适度咸化,产生高密度、高盐度、高 Mg/Ca 比值的流体,通过毛细管浓缩、蒸发泵吸、卤水回流等作用,进入渗透性较好的原始灰岩地层,使其发生白云岩化,或在微生物作用下,形成直接沉淀的原生白云岩/白云石。如阿拉伯湾阿布扎比现代萨布哈潮上-潮下沉积物中,可见以薄层状、斑状产出的泥-粉晶白云岩/白云石,以交代产物或胶结物的形式发育。因此,这类常以纹层状或斑状产出的泥晶-粉晶白云岩,及其伴生发育的石膏假晶、膏模孔、藻纹层等沉积标志,可以指示局限-蒸发的沉积环境。

但是,很多白云岩在纵向上与蒸发岩无关,横向也不与局限-蒸发地层相邻,白云岩地层中也难以找到局限-蒸发环境的沉积标志,常为埋藏条件下经富镁流体交代而形成的^[1,2],因此,这类白云岩本身并不具有沉积相指示意义,而要通过恢复其“前身”,即原始灰岩的沉积结构来确定沉积环境。

4.2 塔里木盆地奥陶系白云岩成因及其沉积相指示意义

有关塔里木盆地奥陶系白云岩成因的研究很多,大多数学者^[10,14-23]认为发育准同生白云岩、埋藏白云岩和热液改造白云岩三大类。

在实际地层中,准同生的泥-粉晶白云岩发育较少^[16],见少量藻纹层白云岩^[17],且尚未发现与准同生膏质相关的泥-粉晶白云岩,由此推断奥陶纪不存在大规模的局限-蒸发条件。以玉北 5 井为例,最可能被认为是准同生成因的是少量发育的纹层状粉晶白云岩(图 5a),但其相邻地层原始岩性为亮晶鲕粒灰岩

(被硅质拟晶交代,图 5b),而且这些纹层状粉晶白云岩的暗色条纹中,可见大量黄铁矿颗粒,指示了还原环境。因此,这些泥-粉晶结构的白云岩更可能是低能滞间海沉积,后期被白云岩化了。

塔里木盆地奥陶系白云岩以埋藏白云岩化和热液白云岩化为主,白云岩化的流体一般认为是同期地层中封存的海水^[18,22],也可能是下部地层水向上运动从而发生白云岩化的结果^[20]。热液白云岩一般认为是在前期白云岩化的基础上,受沿断裂或不整合面等运移的热液改造而形成^[19,23]。无论如何,这些白云岩是在原始灰岩沉积的基础上经后期白云岩化的结果,不是在局限-蒸发环境下直接沉淀下来或交代而成的。

由这些埋藏交代或热液改造白云岩的残余结构分析,可获取其原始沉积灰岩的结构信息。从样品数量分布频率来讲,这些岩石恢复的原始结构以颗粒结构为

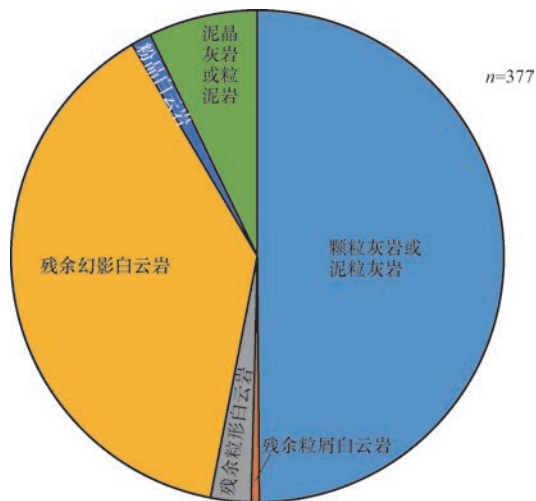


图 6 塔中中-下奥陶统岩石结构组成
Fig. 6 Sedimentary textures of the Lower-Middle Ordovician rocks in Tazhong area

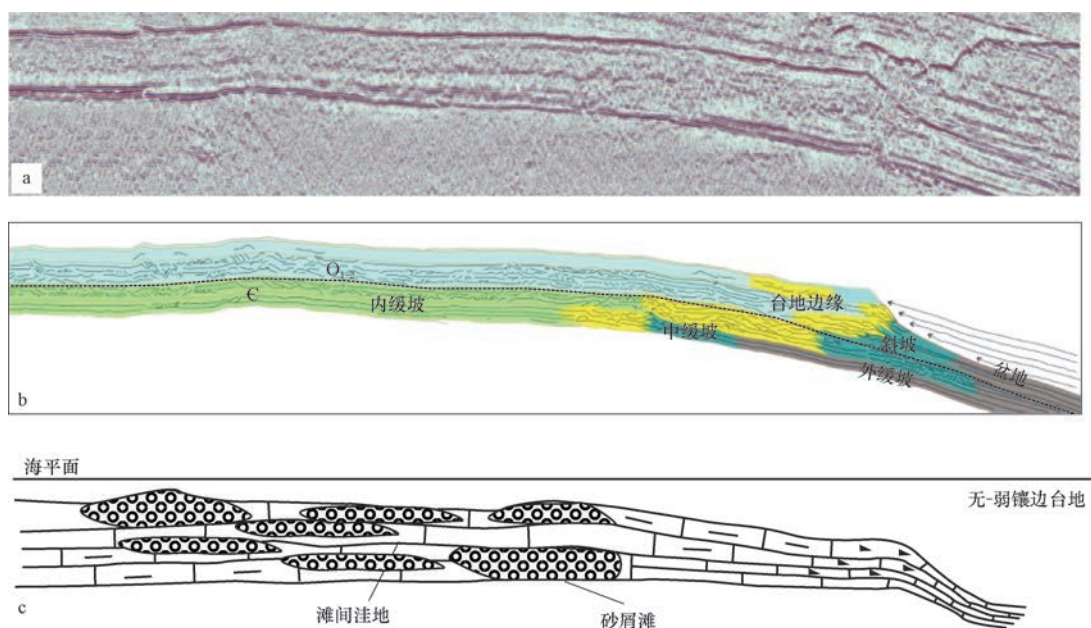


图7 中央隆起带中-下奥陶统地震剖面解释及沉积相模式

Fig. 7 Seismic interpretation and sedimentary facies model of the Lower-Middle Ordovician in central Uplift Zone

a. 地震测线 SN602, 塔中北斜坡; b. 地质解释剖面; c. 沉积相模式

主,包括砂屑、砾屑、藻屑(图6),具泥晶充填或亮晶胶结特征,显示原始沉积环境为水体能量或低或高的滩相环境。

4.3 塔中奥陶系沉积相

根据地震剖面解释结果(图7a),塔里木盆地西部下寒武统-上寒武统整体为缓坡沉积,地层厚度差异不大,没有明显的台地边缘。从下奥陶统开始,出现较为明显的台地边缘和斜坡,说明由缓坡向镶边台地逐渐过渡的生长过程。中央隆起带区早奥陶世为一无-弱镶边台地,台地内部为统一的开阔的碳酸盐岩台地相,发育台内砂屑滩和滩间洼地亚相,向东过渡为弱镶边的台地边缘相-斜坡-盆地相(图b)。

我们倾向认为塔里木盆地中-下奥陶统整体以开阔台地相-台内滩亚相沉积为主,主要发育砂屑滩沉积,显示沉积水动力较强;夹有低能滩间海沉积。高能砂屑滩微相岩性主要为亮晶砂屑灰岩和亮晶含砾砂屑灰岩,低能砂屑滩的岩性主要为泥晶砂屑灰岩和砂屑泥晶灰岩,滩间洼地的主要岩性为泥晶灰岩。纵向上,高能滩发育的位置,也是最容易受到准同生暴露-大气淡水或混合水溶蚀的位置,易形成渗流豆和溶蚀孔洞等^[24-25]。平面上,这些微相类型基本可以对比,横向存在小的相变,显示整体以大面积的台内滩为主。

5 结论

1) 不同成因的白云岩对于沉积环境的指示意义

不能一概而论。原生、同生或准同生时期形成的、以纹层状或斑状产出的泥晶-粉晶白云岩,与其伴生发育的石膏假晶、膏模孔、藻纹层等沉积标志,可以指示局限-蒸发的沉积环境。但大多数埋藏条件下形成的、原始结构信息缺失的交代白云岩或热液改造白云岩,并不具有沉积相指示意义,而应该根据其残余结构恢复期原始沉积环境。

2) 塔中中-下奥陶统白云岩的原岩绝大部分为颗粒灰岩,是一套开阔台地相的台内高能滩或低能滩和滩间洼地沉积,向东转变为台地边缘-斜坡以及盆地相。

参 考 文 献

- [1] Warren J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations[J]. Earth-Science Review, 2000, 52: 1-81.
- [2] 张学丰, 胡文瑛, 张军涛. 白云岩成因相关问题及主要形成模式[J]. 地质科技情报, 2006, 25(5): 32-40.
Zhang Xuefeng, Hu Wenxuan, Zhang Juntao. Critical problems for dolomite formation and dolomitization models[J]. Geological Science and Technology Information, 2006, 25(5): 32-40.
- [3] 张荫本. 碳酸盐岩中的残余结构[J]. 天然气工业, 1985, 5: 89-92.
Zhang Yinben. Relict texture in carbonates[J]. Natural Gas Industry, 1985, 5: 89-92.
- [4] 张学丰, 蔡忠贤, 胡文瑛, 等. 白云岩的残余结构及由此引发的孔隙分类问题[J]. 沉积学报, 2011, 29(3): 92-102.
Zhang Xuefeng, Cai Zhongxian, Hu Wenxuan, et al. Relict textures of dolomite and the related porosity classification[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(3): 92-102.
- [5] Flügel E. 碳酸盐岩微相——分析、解释及应用[M]. 马永生 主译, 北京: 地质出版社, 92-158.

- Flügel E. Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application[M]. Ma Yongsheng, eds. Beijing: Geology Express, 92 – 158.
- [6] Sander N. Diagenesis of carbonate rocks of marine origin[J]. AAPG Bulletin, 1967, 51(3): 325 – 336.
- [7] Kaldi J, Gidman J. Early diagenetic dolomite cements; examples from the Permian Lower Magnesian Limestone of England and the Pleistocene carbonates of the Bahamas [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1982, 52(4): 1073 – 1085.
- [8] Sibley D, F. Secular changes in the amount and texture of dolomite [J]. Geology, 1991, 19: 151 – 154.
- [9] 毕义泉, 田海芹, 赵勇生, 等. 论泥晶套与次生白云岩原岩结构特征的恢复及意义[J]. 岩石学报, 2001, 17(3): 491 – 496.
- Bi Yiquan, Tian Haiqin, Zhao Yongsheng, et al. On the micrite envelope to restoration of primary texture character of secondary dolomites and its significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(3): 491 – 496.
- [10] 郑剑锋, 沈安江, 乔占峰, 等. 塔里木盆地奥陶统蓬莱坝组白云岩成因及储层主控因素分析——以巴楚大班塔格剖面为例[J]. 岩石学报, 2013, 29(9): 3223 – 3232.
- Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Qiao Zhanfeng, et al. Genesis of dolomite and main controlling factors of reservoir in Penglaiba Formation of Lower Ordovician, Tarim Basin: A case study of Dabantage outcrop in Bachu area [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(9): 3223 – 3232.
- [11] 汤良杰, 黄太柱, 邱海峻. 塔里木盆地中央隆起带中、西段及邻区中、下寒武统盐相关构造及其变形机理[J]. 中国科学(D), 2013, 43: 33 – 43.
- Tang Liangjie, Huang Taizhu, Qiu Huajun, et al. Salt-related structure and deformation mechanism of the Middle-Lower Cambrian in the middle-west parts of the Central Uplift and adjacent areas of the Tarim Basin [J]. Science China: Earth Sciences, 2012, 55: 1123 – 1133.
- [12] 贺勇, 黄擎宇, 谢世文, 等. 塔里木盆地奥陶统蓬莱坝组沉积相特征[J]. 新疆地质, 2011, 29(3): 306 – 310.
- He Yong, Huang Qingyu, Xie Shiwen, et al. Characteristic of sedimentary facies of Tarim Basin's Lower Ordovician Penglaiba Group [J]. Xinjiang Geology, 2011, 29(3): 306 – 310.
- [13] 韩剑发, 王清龙, 陈军, 等. 塔里木盆地西北缘中一下奥陶统碳酸盐岩层序结构和沉积微相分布[J]. 现代地质, 2015, 29(3): 599 – 608.
- Han Jianfa, Wang Qinglong, Chen Jun, et al. Carbonate sequence structure and microfacies distribution of the Middle and Lower Ordovician in Northwestern Tarim Basin [J]. Geosciences, 2015, 29(3): 599 – 608.
- [14] 顾家裕. 塔里木盆地奥陶统白云岩特征及成因[J]. 新疆石油地质, 2000, 21(2): 120 – 122 + 170.
- Gu Jiayu. Characteristics and origin analysis of dolomite in Lower Ordovician of Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2000, 21(2): 120 – 122 + 170.
- [15] 杨威, 王清华, 刘效曾. 塔里木盆地和田河气田下奥陶统白云岩成因[J]. 沉积学报, 2000, 18(4): 544 – 548.
- Yang Wei, Wang Qinghua, Liu Xiaoceng. Dolomite origin of Lower Ordovician in Hetian River Gas Field, Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(4): 544 – 548.
- [16] 钱一雄, 尤东华. 塔中地区西北部奥陶系白云岩(化)成因分析[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(2): 146 – 150.
- Qian Yixiong, You Donghua. An analysis of Ordovician dolomitization origin in Northwestern Tazhong area [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(2): 146 – 150.
- [17] 陈永权, 周新源, 赵葵东. 塔里木盆地塔中1井藻纹层白云岩与竹叶状白云岩成因——基于岩石学、元素与同位素地球化学的厘定[J]. 地质学报, 2008, 82(6): 826 – 834.
- Chen Yongquan, Zhou Xinyuan, Zhao Kuidong, et al. Geochemical research on straticulate dolostone and spatulate dolostone in Lower Ordovician strata of Well Tazhong-1, Tarim Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(6): 826 – 834.
- [18] 张学丰, 胡文瑄, 张军涛, 等. 塔里木盆地奥陶统白云岩化流体来源的地球化学分析[J]. 地学前缘, 2008, 15(2): 80 – 89.
- Zhang Xuefeng, Hu Wenxuan, Zhang Juntao, et al. Geochemical analyses on dolomitization fluids of Lower Ordovician carbonate reservoir in Tarim basin [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2): 080 – 089.
- [19] 朱东亚, 金之钧, 胡文瑄. 塔中地区热液改造型白云岩储层[J]. 石油学报, 2009, 30(5): 698 – 704.
- Zhu Dongya, Jin Zhijun, Hu Wenxuan. Hydrothermal alteration dolomite reservoir in Tazhong area [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 30(5): 698 – 704.
- [20] 张静, 罗平. 塔里木盆地奥陶系孔隙型白云岩储层成因[J]. 石油实验地质, 2010, 32(5): 470 – 474.
- Zhang Jing, Luo Ping. Genesis of Ordovician matrix-porosity dolomite reservoir in the Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(5): 470 – 474.
- [21] 黄擎宇, 张哨楠, 叶宁, 等. 玉北地区下奥陶统白云岩岩石学、地球化学特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(3): 391 – 400.
- Huang Qingyu, Zhang Shaonan, Ye Ning, et al. Petrologic, geochemical characteristics and origin of the Lower Ordovician dolomite in Yubei area [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(3): 391 – 400.
- [22] 韩银学, 李忠, 韩登林, 等. 塔里木盆地塔北东部下奥陶统基质白云岩的稀土元素特征及其成因[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2405 – 2416.
- Han Yinxue, Li Zhong, Han Denglin, et al. REE characteristics of matrix dolomites and its origin of Lower Ordovician in eastern Tabei area, Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(10): 2405 – 2416.
- [23] 沈安江, 郑剑锋, 等. 塔里木盆地古生界白云岩储层类型及特征[J]. 海相油气地质, 2009, 14(04): 1 – 9.
- Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, Pan Wenqing, et al. Types and characteristics of Lower Paleozoic dolostone reservoirs in Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2009, 14(04): 1 – 9.
- [24] 蔡习尧, 李慧莉, 尤东华, 等. 塔里木盆地玉北5井下奥陶统蓬莱坝组沉积期的暴露标志及其意义[J]. 岩石学报, 2016, 32(03): 915 – 921.
- Cai Xiyao, Li Huili, You Donghua, et al. Exposure indicators and significance formed during the deposition of the Penglaiba Formation of Lower Ordovician of Well Yb5, Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(03): 915 – 921.
- [25] 孟庆强, 朱东亚, 解启来, 等. 蓬莱坝组白云岩孔隙成因的地球化学探讨[J]. 西安石油大学学报, 2011, 26(5): 1 – 5.
- Meng Qingqiang, Zhu Dongya, Xie Qilai, et al. Study on the pore genesis of the dolomite of Penglaiba Formation from geochemistry [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2011, 26(5): 1 – 5.