

微生物碳酸盐岩分类、沉积环境与沉积模式

胡安平^{1,2}, 沈安江^{1,2}, 郑剑锋^{1,2}, 王鑫^{1,2}, 王小芳^{1,2}

1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室

摘要 针对现有微生物碳酸盐岩分类不够系统、岩石类型及组合的环境意义不明确、岩相古地理重建缺乏微生物碳酸盐岩沉积模式指导等科学问题,通过塔里木盆地、四川盆地和鄂尔多斯盆地2个元古宇剖面和3个显生宇剖面详细的岩类学和岩石组合序列研究,取得3项成果与认识:①建立了构造尺度和形态特征相结合的系统的微生物碳酸盐岩分类方案。②明确了微生物碳酸盐岩岩石类型及组合的环境意义。风暴浪基面之下远端以欠补偿黑色泥岩和硅质岩沉积为主,近端的下斜坡以具丘状结构的纹理石碳酸盐岩和灰泥丘建造为主;风暴浪基面和正常浪基面之间的上斜坡以小—中型泡沫状、团块状凝块石碳酸盐岩和小—中型柱状、锥状、穹窿状叠层石碳酸盐岩建造为主;正常浪基面与平均低潮线之间以大—中型波状叠层石碳酸盐岩建造为主;平均低潮线之上的潮坪环境以大—中型层(席)状微生物碳酸盐岩、丘状微生物碳酸盐岩建造为主。③建立了缓坡沉积体系和镶边沉积体系微生物碳酸盐岩沉积模式。这些认识对微生物碳酸盐岩岩相古地理重建和储层分布预测具有重要的指导意义。

关键词 构造尺度;形态特征;分类;微生物碳酸盐岩;沉积模式;缓坡沉积体系;镶边沉积体系

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

0 前言

微生物碳酸盐是由底栖的原核或真核微生物群落通过捕获或粘结碎屑颗粒,或由微生物引发的碳酸盐沉淀而形成的沉积物^[1-2],构成微生物碳酸盐沉积的微生物组分主要包括细菌、藻类、真菌以及参与生物膜和微生物席生长的物质^[3]。最早的微生物碳酸盐岩(尤指叠层石)出现在接近35亿年前的太古宙地层中^[4-6],在中元古代地层中达到丰度、形态类型和分布范围的高峰,大量微生物碳酸盐岩发育于中元古代和早古生代^[7]。微生物碳酸盐岩不仅与许多金属矿床(如Fe、Mn等矿床)的形成和富集密切相关^[8],而且是非常重要的油气勘探对象^[9]。美国阿拉巴马州、俄罗斯东西伯利亚地区、巴西桑托斯盆地、阿曼盐盆、哈萨克斯坦以及中国的四川盆地和华北地区在微生物碳酸盐岩储层中均有重大油气发现^[10-19],尤其是前寒武系(主要是中新

元古界)微生物白云岩、古生界—三叠系碳酸盐岩—膏盐岩沉积体系的微生物白云岩中的油气发现较多。

尽管微生物碳酸盐岩研究已经在岩石类型、形成微生物岩的微生物种类、微生物的沉积和成矿作用、地质历史时期微生物碳酸盐岩的分布等方面取得了丰硕的研究成果^[20-27],但仍然存在以下3个方面的地质问题:①微生物碳酸盐岩分类仍存在分歧,叠层石、凝块石、树枝石和均一石的四分方案^[1]并非为真正意义上的系统分类,实际的岩石类型要多得多,而且树枝石和均一石迄今未见可靠的实例报导^[27];②微生物碳酸盐岩岩石类型及组合的环境意义不明确,尤其是缺乏微生物碳酸盐岩沉积模式;③岩相古地理重建缺乏微生物碳酸盐岩沉积模式的指导。

本文通过5个剖面(3个露头 and 2口单井)微生物碳酸盐岩岩石类型及组合序列研究,建立了构造

收稿日期:2021-01-29;改回日期:2021-02-02

本文受国家科技重大专项课题“寒武系—中元古界碳酸盐岩规模储层形成与分布研究”(编号:2016ZX05004-002)、中国石油天然气股份有限公司直属院所基础研究和战略储备技术研究基金“古老海相碳酸盐岩定年、定温与微量—稀土元素面扫描技术研发及应用”(编号:2018D-5008-03)、中国石油天然气股份有限公司科技项目“深层碳酸盐岩—膏盐岩组合沉积建模、成储机理研究与储层实验技术研究”(编号:2019-5009-16)联合资助

第一作者: 胡安平,博士,高级工程师,主要从事碳酸盐岩储层研究与地球化学实验技术研发工作。通信地址:310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号;E-mail: huap_hz@petrochina.com.cn

通信作者: 沈安江,博士,教授级高级工程师,主要从事碳酸盐沉积储层研究。通信地址:310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号;E-mail: shenaj_hz@petrochina.com.cn

尺度和形态特征相结合的更为系统的微生物碳酸盐岩分类方案,明确了岩石类型及组合的环境意义,建立了缓坡沉积体系和镶边沉积体系微生物碳酸盐岩沉积模式。这些认识为微生物碳酸盐岩岩相古地理重建和储层预测提供了依据。

1 微生物碳酸盐岩分类

1.1 微生物碳酸盐岩分类综述

Riding^[1]将微生物碳酸盐岩划分为叠层石、凝块石、树枝石和均一石等4类。Kalkowsky^[28]定义的叠层石为内部结构呈纹层状紧密排列的生物沉积灰岩。Riding^[29]根据叠层石的内部结构、宏观特征和微生物沉积之间的作用方式等特点,将叠层石细分为骨骼叠层石、粘结叠层石、细粒叠层石、泉华叠层石、陆生叠层石等5类。凝块石是指宏观上呈凝块状的底栖微生物沉积,这种微生物碳酸盐岩有着不规则的颗粒形态,可细分为钙化微生物凝块石、粗糙粘结凝块石、树枝凝块石、泉华凝块石、沉积后-生物扰动形成的凝块石、增生型凝块石和次生凝块石等7类^[1]。树形石由微生物钙化而成,不是由颗粒粘结而成,呈厘米级灌木状枝体。均一石是一种相对无结构、隐晶质或泥晶质、凝块或树枝状结构、宏观结构缺少清晰纹层的微生物碳酸盐沉积。

梅冥相^[20]将纹理石和核形石补充到微生物碳酸盐岩中,建立了微生物碳酸盐岩的六分方案。纹理石指发育纹理化构造的泥晶灰岩,纹理化构造单

个纹理的厚度在0.5~1.5 mm之间,是一种未受改造的有机纹理,明显不同于水平状叠层石。核形石是指由微生物粘结或引发碳酸盐沉淀而形成的球状、椭球状核形构造碳酸盐岩,大小为毫米至厘米级,常与凝块石共生,发育于前寒武纪及显生宙地层中。杨仁超等^[30]将核形石分为椭球状同心纹层核形石、椭圆形不规则纹层核形石、叶状不连续纹层核形石及迷雾状核形石等4种类型。

Shapiro^[31]按照构造尺度将微生物碳酸盐岩划分为大型构造(>1 m)、中型构造(0.5~1 m)、小型构造(1~50 cm)和微型构造(<1 cm)等4类。大型构造指微生物碳酸盐岩形成的岩层特征,如微生物层、微生物丘等;中型构造指微生物碳酸盐岩的形态特征,如柱状、穹隆状、锥状、团块状等;小型构造指中型构造内部用肉眼能够观察到的微生物碳酸盐岩结构,如波状、纹层状、泡沫状、叠层状等;微型构造指显微镜下能够观察到的微生物碳酸盐岩显微结构与组分,包括钙化微生物残留体、沉积物和胶结物等。

1.2 构造尺度和形态特征相结合的微生物碳酸盐岩分类

本文解剖了塔里木盆地上震旦统奇格布拉克组、下寒武统肖尔布拉克组,四川盆地上震旦统灯影组、中三叠统雷口坡组,鄂尔多斯盆地奥陶统马家沟组等5条剖面(3个露头,2口单井)微生物白云岩的岩类学特征(详见后文地质剖面介绍),提出了构造尺度和形态特征相结合的微生物碳酸盐岩分类方案(表1)。

表1 构造尺度和形态特征相结合的微生物碳酸盐岩分类方案

Table 1 Classification of microbial carbonate rocks based on the combination of structural scale and morphological characteristics

形态特征	构造尺度			
	大型构造(>1 m)	中型构造(0.5~1 m)	小型构造(1~50 cm)	微型构造(<1 cm)
层状	层(席)状微生物碳酸盐岩	-	-	-
丘状	大型丘状微生物碳酸盐岩	中型丘状微生物碳酸盐岩	小型丘状微生物碳酸盐岩	-
	大型灰泥丘	中型灰泥丘	小型灰泥丘	-
波状	大型波状叠层石碳酸盐岩	中型波状叠层石碳酸盐岩	小型波状叠层石碳酸盐岩	-
柱状	大型柱状叠层石碳酸盐岩	中型柱状叠层石碳酸盐岩	小型柱状叠层石碳酸盐岩	-
穹隆状	大型穹隆状叠层石碳酸盐岩	中型穹隆状叠层石碳酸盐岩	小型穹隆状叠层石碳酸盐岩	-
锥状	大型锥状叠层石碳酸盐岩	中型锥状叠层石碳酸盐岩	小型锥状叠层石碳酸盐岩	-
泡沫状	-	-	-	泡沫状凝块石碳酸盐岩
团块状	大型团块状凝块石碳酸盐岩	中型团块状凝块石碳酸盐岩	小型团块状凝块石碳酸盐岩	-
球粒状	-	-	核形石(鲕粒)碳酸盐岩	
树枝状	-	-	小型树枝石碳酸盐岩	微型树枝石碳酸盐岩
均一状	均一石碳酸盐岩	-	-	-
层纹状	纹理石碳酸盐岩	-	-	-

层状形态特征属岩层特征,主要对应于大型构造($>1\text{ m}$)。丘状形态特征虽然也属岩层特征,但丘体的大小可以对应大型构造、中型构造($0.5\sim 1\text{ m}$)和小型构造($1\sim 50\text{ cm}$),在露头中 $1\sim 50\text{ cm}$ 大小的微生物丘或灰泥丘也是非常常见的。波状、柱状、穹窿状和锥状主要指叠层石的形态特征,柱状、穹窿状和锥状体的大小(包括波峰或波谷间的距离)主要对应小型构造,但中型构造尺度的波状、柱状、穹窿状和锥状体也常见,甚至偶见大型构造尺度的波状、柱状、穹窿状和锥状体。泡沫状和团块状主要指凝块石的形态特征,泡沫状凝块石主要对应微型构造($<1\text{ cm}$),需要在显微镜下才能观察到其显微结构与组分,而团块状凝块石主要对应中型构造和小型构造, $1\text{ cm}\sim 1\text{ m}$ 的凝块石团块常见,甚至偶见大型构造尺度的凝块石团块。球粒状主要指核形石和鲕粒的形态特征,除核形石外,越来越多的证据表明很多鲕粒也是微生物成因的^[32]。树枝状形态特征主要对应小型构造和微型构造,而且以厘米级的树枝为主。均一石和纹理石也属于岩层特征,主要对应于大型构造。

需要说明的是灰泥丘的归属问题。灰泥丘指具有明显的丘状几何形态,与上下及相邻地层在几何形态、灰泥含量及矿物组分等方面具有明显差异,主要由灰泥、泥级球粒灰泥、微晶方解石和微生物构成,通常被解释为微生物作用下的原地堆积^[33],应该纳入微生物碳酸盐岩分类体系中。另外,微生物粘结(藻)砂屑碳酸盐岩、藻砂屑碳酸盐岩的成因也与微生物作用有关,理论上也应纳入到微生物碳酸盐岩分类体系中,但在Dunham^[34]碳酸盐岩分类体系中的绑结岩(boundstone)和泥粒灰岩(packstone),已经有它们的位置。

后文介绍的3条露头和2口单井剖面的微生物碳酸盐岩均按表1的分类方案命名。与Riding^[1,29]、梅冥相^[20]、Shapiro^[31]的分类方案相比,表1的分类方案是一个更适用于露头和井场的系统分类方案,同时岩石类型及组合的环境意义更加明确,为微生物碳酸盐岩沉积环境恢复和沉积模式的建立奠定了基础。同一形态特征的微生物碳酸盐岩可以出现在不同的沉积环境,不同形态特征的微生物碳酸盐岩可以出现在相同的沉积环境,但综合考虑构造尺度和岩石组合序列,微生物碳酸盐岩岩石类型和沉积环境具有明确的相关性。

2 典型剖面沉积环境分析

本节重点介绍塔里木盆地肖尔布拉克西沟剖面上震旦统奇格布拉克组、四川盆地南江杨坝剖面上震旦统灯影组2个元古宇剖面和塔里木盆地阿克苏什艾日克剖面下寒武统肖尔布拉克组、鄂尔多斯盆地靳2井下奥陶统马家沟组五段、四川盆地鸭深1井中三叠统雷口坡组3个显生宇剖面的微生物白云岩类型、特征、组合序列及环境意义。

2.1 元古宇剖面介绍与沉积环境分析

2.1.1 塔里木盆地肖尔布拉克西沟剖面奇格布拉克组

上震旦统奇格布拉克组主体为一套微生物白云岩建造,由下至上划分为奇一段、奇二段、奇三段、奇四段,厚约 175 m 。该组上覆于下震旦统苏盖特布拉克组泥岩之上,呈整合接触;下伏于下寒武统玉尔吐斯组粉砂岩、硅质岩和黑色泥岩之下,呈不整合接触(图1)。

奇一段以大型层(席)状微生物白云岩、大—中型丘状微生物白云岩为主,夹藻砂屑白云岩、泥质泥粉晶白云岩、粉砂岩薄层,反映沉积地貌平坦、水体很浅、可容纳空间受到限制、水体能量偏低的近岸潮坪环境,以潮汐作用为主,并不时地受到陆源碎屑沉积物的干扰,间歇性的季风或风暴作用导致先期沉积物被打碎和薄层藻砂屑沉积的发育。

奇二段以小—中型波状叠层石白云岩为主,夹薄层微生物粘结(藻)砂屑白云岩、藻砂屑(鲕粒/砾屑)白云岩和小型凝块石白云岩,并以泥岩为隔层,构成2个旋回。波状叠层石的波峰和波谷幅差 $<1\text{ cm}$,几乎未见穹窿状、柱状、锥状叠层石,同样反映沉积地貌平坦、水体较浅、可容纳空间受限、水体能量偏低的沉积环境,但基本不受陆源碎屑沉积物的干扰。与奇一段沉积相比,更远离陆源,波浪作用占主导地位,高频海平面旋回导致静水和波浪作用频繁交替,造成微生物粘结(藻)砂屑白云岩的发育。

奇三段以小—中型团块状、泡沫状凝块石白云岩为主,常见凝块石角砾($2\sim 10\text{ cm}$)被微生物再次粘结包覆,夹小—中型穹窿状、柱状、锥状叠层石白云岩,几乎见不到波状叠层石白云岩。这反映水体较奇一段、奇二段沉积时要深,可容纳空间增大。从角砾大小分析,凝块石角砾非潮汐或波浪作用所能形成,应该与风暴作用有关。该时期总体为静水

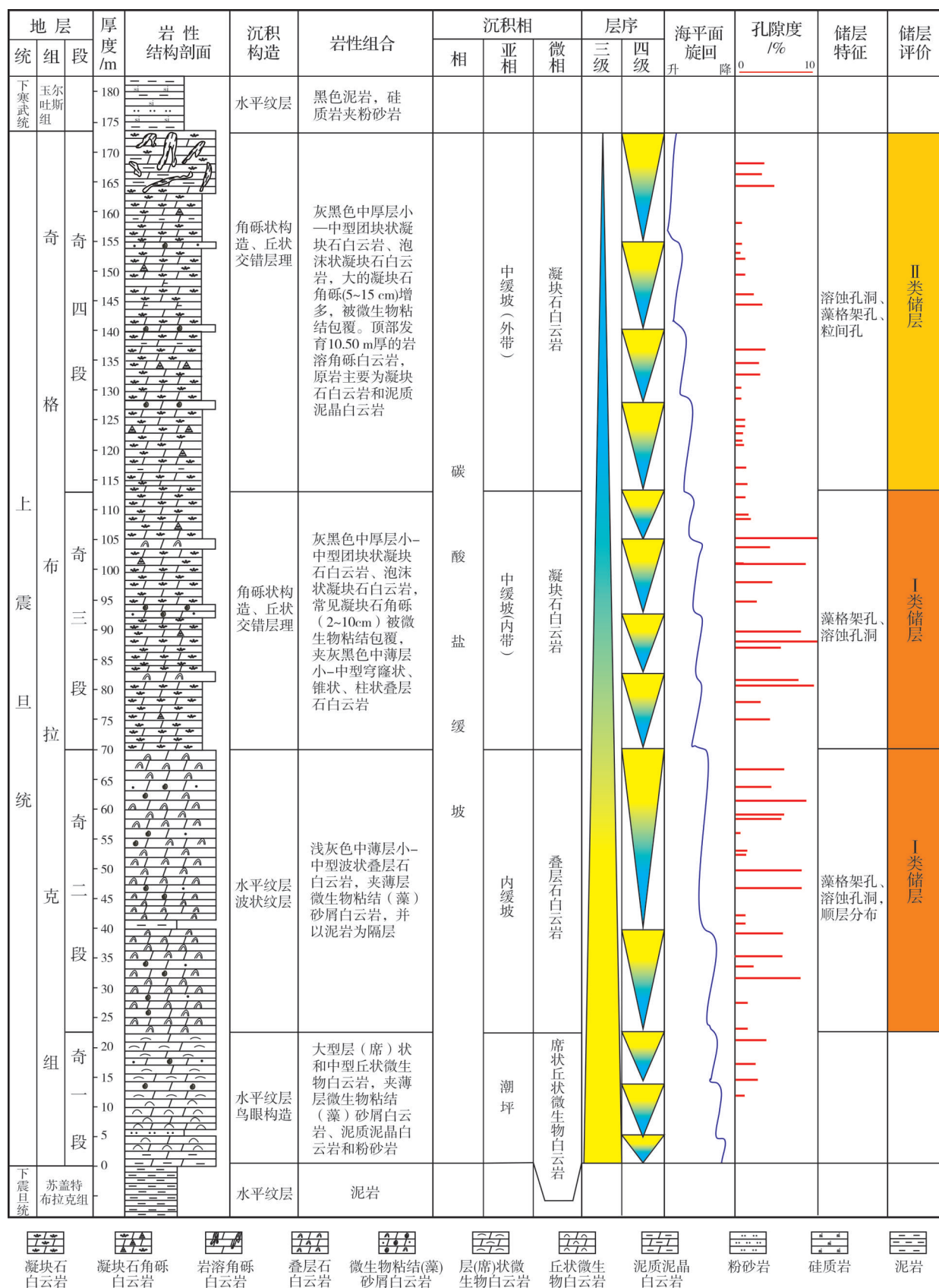


图1 塔里木盆地上震旦统奇格布拉克西沟剖面奇格布拉克组沉积储层综合柱状图

Fig. 1 Sedimentary-reservoir comprehensive column of the Upper Sinian Qigebulake Formation of Xigou section in Xiaerbulake, Tarim Basin

环境,间歇性风暴浪作用导致先期凝块石和叠层石沉积被打碎成角砾后再被微生物粘结包覆。

奇四段以小—中型团块状、泡沫状凝块石白云岩为主,未见穹窿状、柱状、锥状叠层石白云岩,大的凝块石角砾(5~15 cm)增多。顶部发育厚约10.50 m的岩溶角砾岩,原岩主要为凝块石白云岩和泥质泥晶白云岩,反映沉积环境与奇三段相似,水体略为偏深,更靠近风暴浪基面。

总之,微生物白云岩类型、特征和组合序列揭示塔里木盆地肖尔布拉克西沟剖面的上震旦统奇格布拉克组沉积期是一个由潮汐→波浪→风暴作用的水体逐渐变深的序列。

2.1.2 四川盆地南江杨坝剖面灯影组

上震旦统灯影组主体为一套微生物白云岩建造,由下至上划分为灯一段、灯二段、灯三段、灯四段,厚约315 m。该组上覆于上震旦统观音崖组砂岩之上,呈整合接触;下伏于下寒武统筇竹寺组黑色泥岩之下,呈整合接触(图2)。

灯一段以具丘状形态特征的大型纹理石白云岩为主,显微镜下仍能见到纹层状微生物痕迹,含硅质结核及条带,未见代表高能相带的颗粒岩或波浪、风暴浪改造的角砾,应该为风暴浪基面之下的较深灰泥丘建造。

灯二段下部以小—中型团块状/泡沫状凝块石白云岩为主,常见凝块石角砾(2~5 cm),夹薄层穹窿状、锥状、柱状叠层石白云岩,构成2个向上变浅的高频旋回。灯二段上部以波状叠层石白云岩为主,夹中薄层葡萄花边白云岩、微生物粘结(藻)砂屑白云岩和微—小型团块状/泡沫状凝块石白云岩,构成3个向上变浅的旋回。葡萄花边白云岩实际上是波状、穹窿状叠层石白云岩经历后期成岩改造的产物。总体上,灯二段下部的沉积水体深度要大于灯二段上部,前者主要受风暴浪作用影响,后者主要受波浪作用影响,但高频旋回频繁发育,反映沉积地貌平坦、水体较浅,微小的海平面震荡就可导致岩石类型和组合序列的变化。

灯三段以深灰—黑色薄层泥质粉砂岩和粉砂质泥岩为主,夹灰绿色中厚层状石英砂岩,为潮坪相沉积,以潮汐作用为主,并不时地受河流沉积的干扰。

灯四段下部岩性特征和组合序列与灯一段相似;灯四段上部岩性特征和组合序列与灯二段相

似,同样由5个高频旋回构成,但葡萄花边白云岩不如灯二段发育。

总之,微生物白云岩类型、特征和组合序列揭示四川盆地南江杨坝剖面上震旦统灯影组由风暴→波浪→潮汐→风暴→波浪作用两个水体逐渐变浅的序列构成:灯一段至灯三段为一个完整的向上变浅旋回,结束于极浅水陆源碎屑潮坪沉积;灯四段自身构成一个不完整的旋回,灯四早期水体快速加深,形成与灯一段相似的沉积,灯四段顶部缺少陆源碎屑潮坪沉积。

2.2 显生宙剖面介绍与沉积环境分析

2.2.1 塔里木盆地阿克苏什艾日克剖面肖尔布拉克组

下寒武统肖尔布拉克组主体为一套微生物白云岩建造,夹藻砂屑白云岩,由下至上划分为肖下段、肖中1亚段、肖中2亚段、肖中3亚段、肖上段等5个地层单元,厚约160 m。该组上覆于下寒武统玉尔吐斯组粉砂岩、硅质岩和黑色泥岩之上,呈整合接触;下伏于下寒武统吾松格尔组泥质云岩、膏盐岩之下,呈整合接触(图3)。

玉尔吐斯组主体为粉砂岩、硅质岩和黑色泥岩建造,水平纹层发育,在塔里木盆地广泛分布,厚度稳定,形成于缺氧的深水环境。实测剖面夹一套厚近5 m的藻砂屑白云岩,但在侧向上分布局限,应是碳酸盐浊积砂沉积。这套沉积组合不但揭示了风暴浪基面之下的深水缺氧环境,还暗示了较陡斜坡的存在。

肖下段—肖中1亚段主体为灰黑色纹理石白云岩建造,发育的水平纹层为微生物痕迹,在28 km×2 km的储层建模区范围内追踪,呈丘状展布,说明沉积水体依然较深,但与玉尔吐斯组相比略为变浅,应为台缘前斜坡(下斜坡)的灰泥丘建造。

肖中2亚段以灰黑色小—中型团块状、泡沫状凝块石白云岩为主,上部夹藻砂屑白云岩,常见凝块石角砾(5~15 cm)。凝块石白云岩的发育证明沉积水体较深,有足够的可容纳空间;凝块石角砾的发育可能与风暴浪的作用有关,上部所夹的藻砂屑白云岩应该来自镶边台缘滩相沉积向台缘前斜坡(上斜坡)的搬运。

肖中3亚段下部主体为一套浅灰色中厚层藻砂屑白云岩夹微生物粘结藻砂屑白云岩,发育交错层

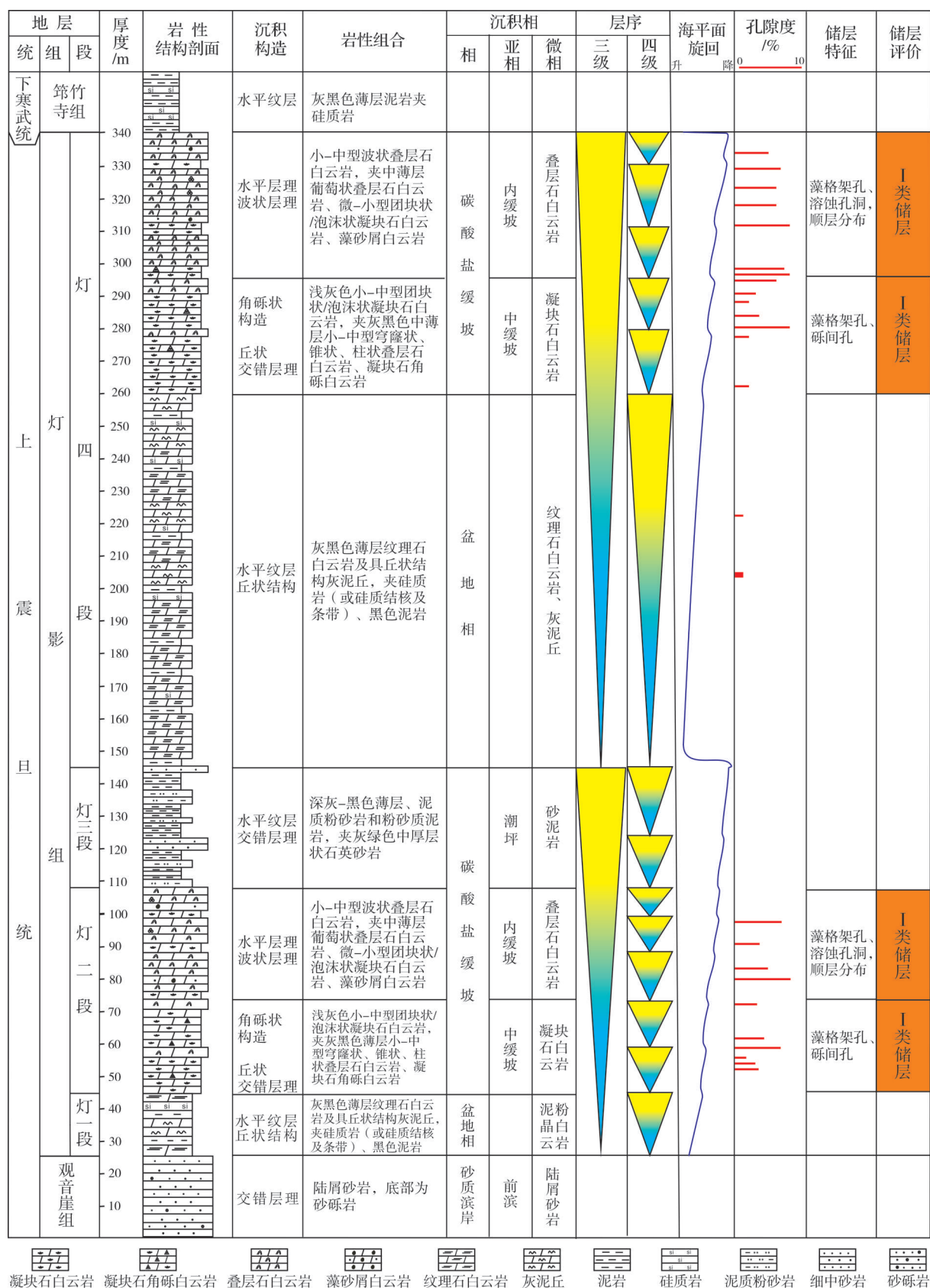
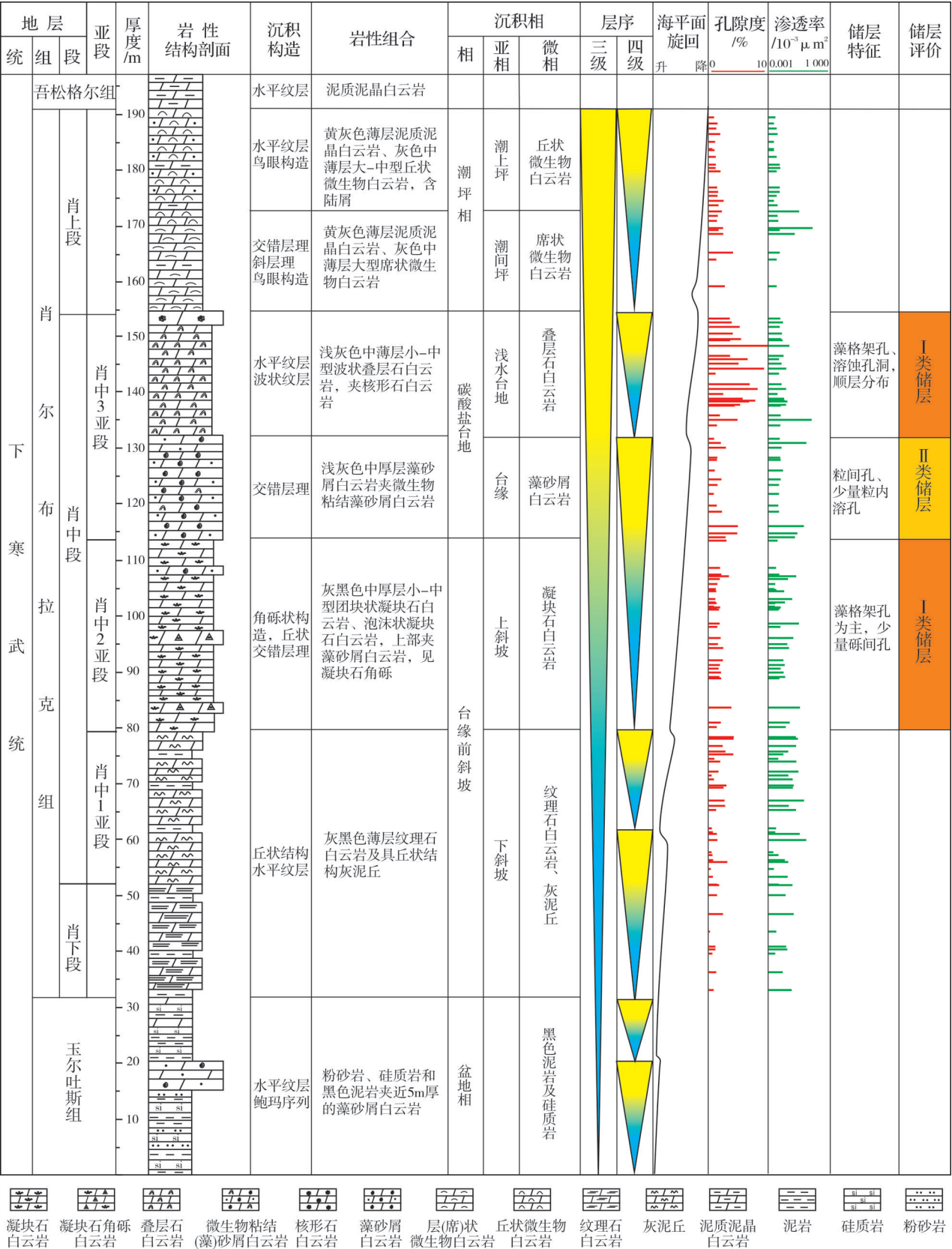


图2 四川盆地南江杨坝剖面上震旦统灯影组沉积储层综合柱状图

Fig. 2 Sedimentary-reservoir comprehensive column of the Upper Sinian Dengying Formation of Yangba section in Nanjiang, Sichuan Basin



理,为典型的浪基面之上受波浪改造的台缘高能相带沉积。肖中3亚段上部主体为一套浅灰色小—中型波状叠层石白云岩,顶部出现一层厚近3 m的核形石白云岩(核形石直径3~5 cm),未见穹隆状、柱状、锥状叠层石,说明可容纳空间受限,属以波浪作用为主的台内沉积环境。

肖上段以黄灰色薄层泥质白云岩、灰色大—中型层(席)状微生物白云岩为主,见少量泥质和陆源碎屑,与肖中3亚段上部相比,更靠近陆源,为典型的碳酸盐潮坪沉积。

总之,微生物白云岩类型、特征和组合序列揭示塔里木盆地阿克苏什艾日克剖面下寒武统玉尔吐斯组至肖尔布拉克组构成一个由风暴→波浪→潮汐作用水体逐渐变浅的旋回。

2.2.2 鄂尔多斯盆地靳2井马家沟组五段

靳2井下奥陶统马家沟组五段十亚段(马五₁₀亚段)—五段六亚段(马五₆亚段),厚约135 m,主体为一套微生物白云岩-膏盐岩建造,夹藻砂屑白云岩。该套地层上覆于马家沟组四段之上,呈整合接触;下伏于马五₃泥晶灰岩之下,呈整合接触(图4)。

马四段—马五₁₀亚段以泥晶白云岩、泥质泥晶白云岩、微生物粘结(藻)砂屑白云岩为主,垂向上构成2个旋回,形成于受波浪作用改造的弱镶边台缘带。

马五₉—马五₈亚段以大—中型波状叠层石白云岩、膏质白云岩、膏盐岩为主,夹微生物粘结藻砂屑白云岩和少量大—中型凝块石白云岩,构成3个向上变浅的旋回。膏盐岩的发育证实了镶边台缘的存在,高频海平面变化导致浅水台地叠层石白云岩、微生物粘结藻砂屑白云岩与蒸发潟湖膏盐岩相互叠置,少量凝块石白云岩可能形成于潟湖环境。

马五₇亚段以浅灰色中厚层微生物粘结(藻)砂屑白云岩为主,上覆膏质白云岩、膏盐岩,构成2个向上变浅的旋回,总体展示弱镶边台缘的沉积特征。高频海平面变化和膏盐湖面积的扩大,导致膏质白云岩、膏盐岩直接覆盖于台缘微生物粘结(藻)砂屑白云岩之上。

马五₆亚段下部主体为蒸发潟湖膏质白云岩、膏盐岩建造,夹薄层微生物粘结(藻)砂屑白云岩和小—中型凝块石白云岩,构成2个高频旋回,总体展现蒸发潟湖的沉积特征。

马五₅亚段中部以浅灰色大—中型波状叠层石白云岩、膏质白云岩为主,夹微生物粘结(藻)砂屑白云岩和膏盐岩,构成2个向上变浅的旋回,总体展现浅水台地沉积特征。高频海平面变化可导致蒸发潟湖膏盐岩、膏质白云岩直接覆盖于叠层石白云岩、微生物粘结(藻)砂屑白云岩之上。

马五₄亚段上部主体为蒸发潟湖膏质白云岩、膏盐岩建造,夹薄层小—中型穹隆状、锥状、柱状叠层石白云岩,总体展现蒸发潟湖的沉积特征。

总之,靳2井马五₁₀—马五₄亚段主体为微生物白云岩-膏盐岩建造,高频旋回发育,总体展现干旱气候背景下浅水台地微生物白云岩和蒸发潟湖膏质白云岩、膏盐岩的沉积特征。

2.2.3 四川盆地鸭深1井雷口坡组

鸭深1井钻揭中三叠统雷口坡组雷五段、雷四₃亚段、雷四₂亚段,雷四₂亚段未见底。雷五段—雷四₂亚段主体为一套微生物白云岩、藻砂屑/生物碎屑白云岩、膏盐岩建造,厚约165 m,上覆上三叠统马鞍塘组生物碎屑灰岩、泥岩,呈整合接触(图5)。

雷四₂亚段(厚25 m,未揭穿)为一套膏盐岩,系典型的局限台地或蒸发潟湖沉积环境,同时也揭示了向海方向障壁的存在。

雷四₃亚段下部(厚约10 m)为一套浅灰色中薄层微生物粘结(藻)砂屑白云岩,夹膏质白云岩,属典型的紧邻镶边台缘内侧的局限台地沉积环境。雷四₃亚段中上部(厚约45 m)为一套浅灰色中厚层藻屑、砂屑、生物碎屑白云岩,交错层理发育,往往重结晶成残留颗粒结构的晶粒白云岩,属典型的镶边台缘沉积环境。

雷五段(厚约85 m)缺资料的井段较多,下部为浅灰色中厚层藻屑、砂屑、生物碎屑白云岩,中部为小—中型叠层石灰岩、灰质白云岩、白云质灰岩,上部为浅灰色中厚层藻屑、砂屑、生物碎屑灰岩。推断应为一套台地相灰质白云岩、白云质灰岩,顶部相变为泥晶灰岩,夹浅灰色中薄层藻屑、砂屑、生物碎屑灰岩,气候由干旱向潮湿转变。

总之,鸭深1井雷四段为典型的蒸发潟湖膏盐和镶边台缘颗粒滩沉积,高频海平面上升导致由下至上潟湖相膏盐岩、局限台地(或蒸发潟湖)膏质白云岩和微生物白云岩、台缘颗粒滩的叠置;雷五段主体演化为潮湿气候背景的台地相生物碎屑灰岩沉积。

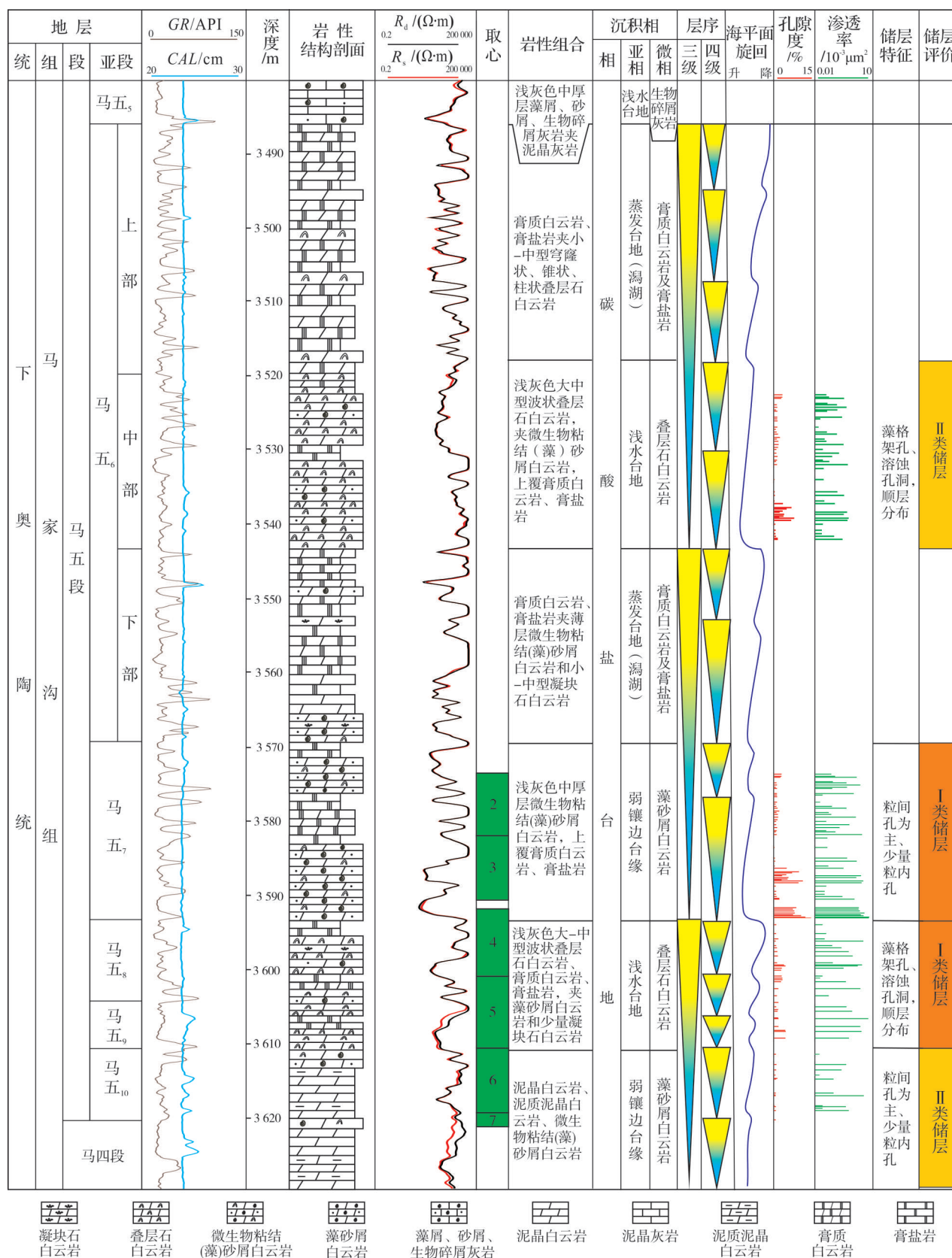
图4 鄂尔多斯盆地新2井下奥陶统马家沟组马四段—马五₆亚段沉积储层综合柱状图

Fig. 4 Sedimentary-reservoir comprehensive column of the Majiagou Member 4-Submember 5 of Lower Ordovician in Well Jin 2, Ordos Basin

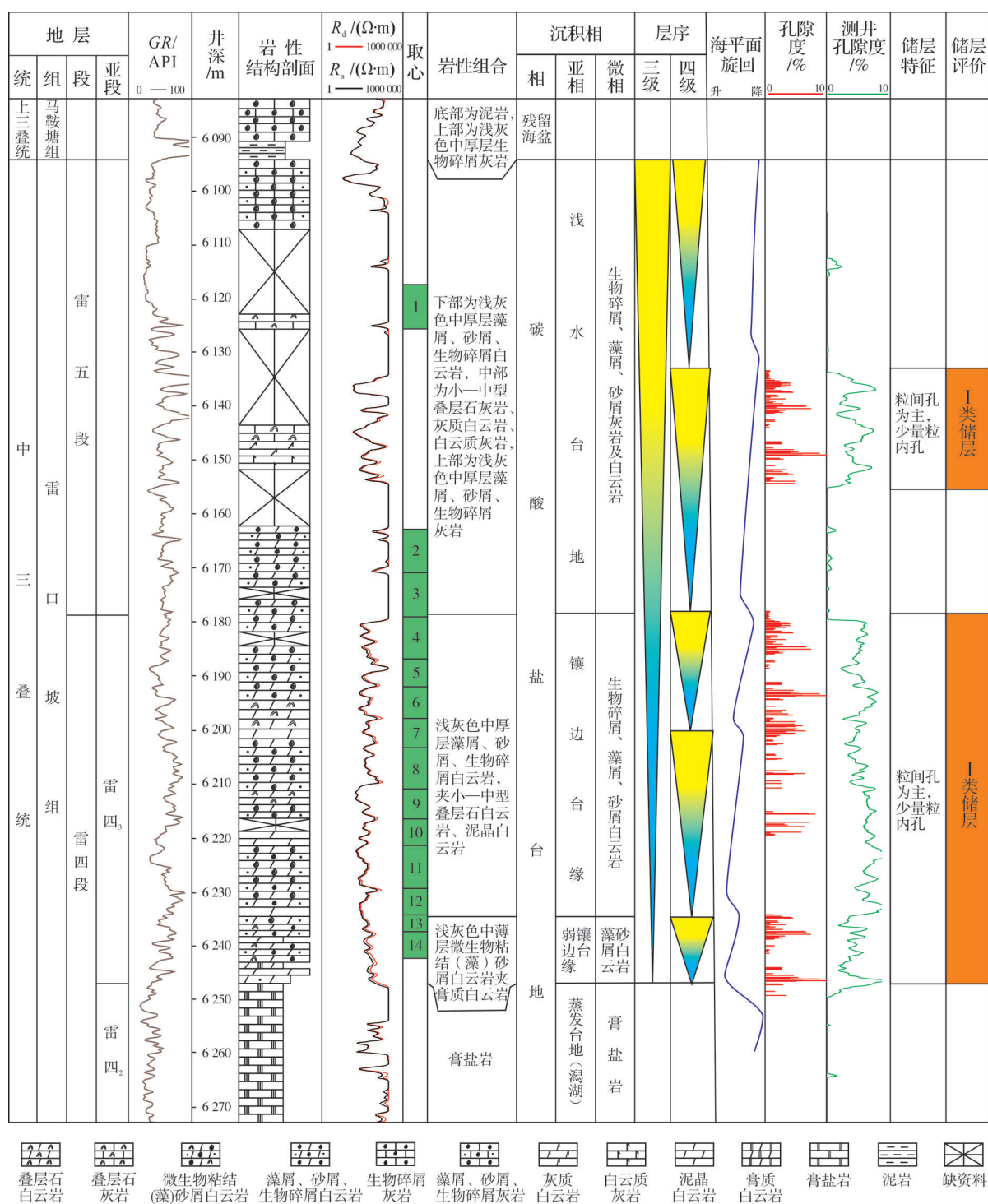


图5 四川盆地鸭深1井中三叠统雷口组雷四段二亚段—雷五段沉积储层综合柱状图

Fig. 5 Sedimentary-reservoir comprehensive column of the Leikoupo Submember 42-Member 5 of Middle Triassic in Well Yashen 1, Sichuan Basin

3 微生物碳酸盐岩沉积模式

从上述5条剖面的介绍可知,元古宙和显生宙微生物碳酸盐岩类型和组合序列有很大的差异。元古宙以原地的微生物碳酸盐岩建造为主,反映以

低能(潮汐作用为主)开放的潮汐-缓坡沉积体系为主;显生宙除原地的微生物碳酸盐岩建造外,还发育高能相带的藻砂屑/生物碎屑等颗粒碳酸盐岩、异地沉积的颗粒(包括角砾)碳酸盐岩和膏盐岩,反映以高能台缘、斜坡、局限台地和波浪作用为特征的

波浪-镶边沉积体系为主。

3.1 缓坡沉积体系微生物碳酸盐岩沉积模式

塔里木盆地肖尔布拉克西沟剖面上震旦统奇格布拉克组、四川盆地南江杨坝剖面上震旦统灯影组两个元古宙剖面代表了宏体生物出现之前,以微生物碳酸盐岩为主导的沉积特征。晚震旦世,以微生物为主导的海洋生态体系^[35-37],在大气和海水缺氧、大气环流

作用弱的条件下^[38-39],形成3个沉积响应特征:①元古宙海洋以潮汐作用为主,波浪作用弱,风暴浪作用偶尔发生,这是导致元古宙高能颗粒滩沉积不如显生宙发育的主要原因;②元古宙以碳酸盐缓坡为主,没有明显的镶边台缘,这是因为缺乏宏体造礁生物和碳酸盐生产率低,难以形成坚固的抗浪格架;③元古宙气候潮湿,膏盐层不发育。据此,根据沃尔索相律^[40],建立了缓坡沉积体系微生物碳酸盐岩沉积模式(图6)。

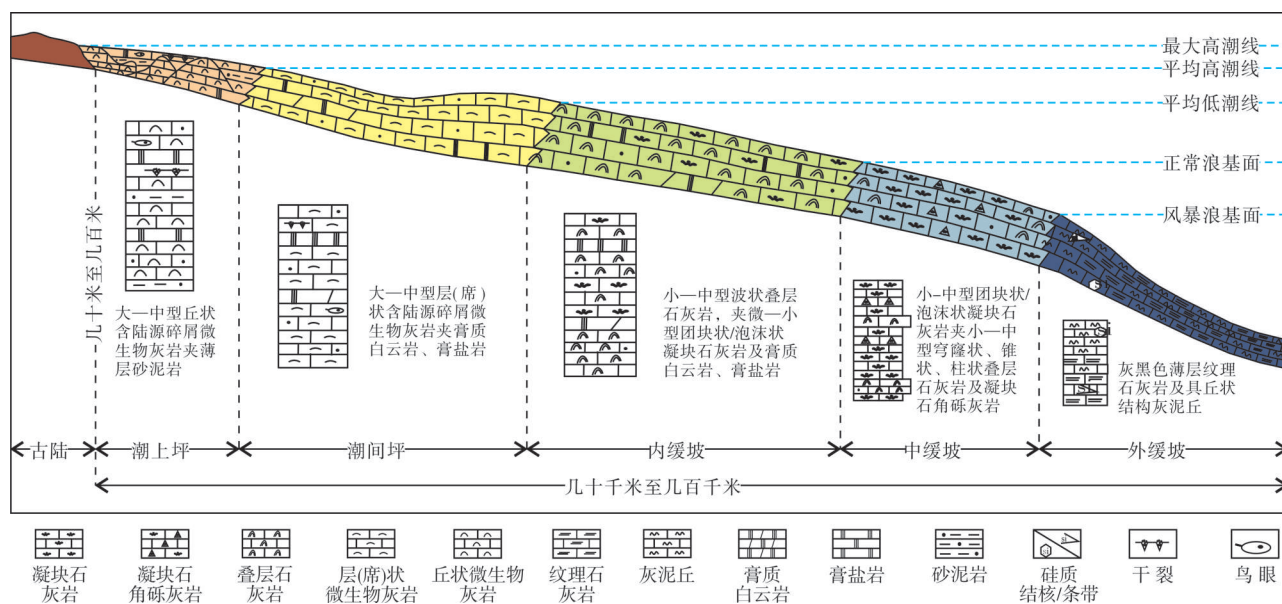


图6 缓坡沉积体系微生物碳酸盐岩沉积模式

Fig. 6 Sedimentary model of microbial carbonate in ramp sedimentary system

碳酸盐缓坡指从海岸到盆地坡度很小(一般小于 $1^{\circ}\sim 2^{\circ}$)的碳酸盐沉积体系^[41],Wright^[42]根据风暴、波浪和潮汐影响程度将碳酸盐缓坡划分为内缓坡、中缓坡、外缓坡和盆地。外缓坡一盆地位于风暴浪基面之下;中缓坡位于风暴浪基面和正常浪基面之间;内缓坡位于正常浪基面与平均低潮线之间;平均低潮线之上为潮坪环境,以潮汐作用为主(本文将潮坪/萨布哈环境从内缓坡剥离出来)。

外缓坡一盆地主要为大型纹理石碳酸盐岩及灰泥丘建造,含硅质结核及条带,夹灰黑色薄层泥岩,以四川盆地南江杨坝剖面灯一段、灯四段下部(图2)为代表。

中缓坡主要为小-中型团块状、泡沫状凝块石碳酸盐岩建造,常见凝块石角砾(2~15 cm),夹小-中型穹窿状、柱状、锥状结构叠层石碳酸盐岩,以塔里木盆地肖尔布拉克西沟剖面奇三段、奇四段(图1)和四川盆地南江杨坝剖面灯二段下部、灯四段上部

(图2)为代表。

内缓坡主要为小-中型波状叠层石碳酸盐岩建造,夹薄层微生物粘结藻砂屑/鲕粒/砾屑碳酸盐岩和微-小型凝块石碳酸盐岩,以塔里木盆地肖尔布拉克西沟剖面奇二段和四川盆地南江杨坝剖面灯二段上部、灯四段上部为代表。

潮坪环境主要为大-中型层(丘)状微生物碳酸盐岩建造,夹薄层藻砂屑碳酸盐岩、泥质碳酸盐岩、深灰色—黑色泥质粉砂岩和粉砂质泥岩及灰色中层状石英砂岩,以塔里木盆地肖尔布拉克西沟剖面奇一段、四川盆地南江杨坝剖面灯三段为代表。

无论是剖面的垂向序列还是平面的展布特征,均展示了沉积环境的能量分带、可容纳空间大小对微生物碳酸盐岩岩石类型和组合序列的控制:高幅度的叠层构造代表可容纳空间充足的较深水沉积环境,微波状叠层构造代表可容纳空间不足的浅水沉积环境,风暴浪、波浪和潮汐作用可以形成规模

不等的凝块石角砾或藻砂屑碳酸盐岩夹层。

随着水体变浅,微生物碳酸盐岩呈灰泥丘→凝块石碳酸盐岩→叠层石碳酸盐岩→席状、丘状微生物碳酸盐岩的变化特征。风暴浪基面之下以灰泥丘建造为主,风暴浪基面和正常浪基面之间以小—中型凝块石碳酸盐岩建造为主,正常浪基面与平均低潮线之间以小—中型叠层石碳酸盐岩建造为主,平均低潮线之上的潮坪环境以大—中型席状、丘状微生物碳酸盐岩建造为主。高频海平面变化可导致不同相带岩石组合序列的频繁交替。

大规模的缓坡沉积体系微生物碳酸盐沉积主要见于元古宙,如东西伯利亚地区新元古界发育里菲期—文德期沉积的两套潮汐—缓坡背景的微生物白云岩,碳酸盐缓坡面积达到 $400 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[43]。但显生宙在特定的地质条件下,如以潮汐作用为主和缺乏宏体生物及以微生物为主导的环境,同样可以发育缓坡沉积体系微生物碳酸盐沉积。

3.2 镶边沉积体系微生物碳酸盐岩沉积模式

塔里木盆地阿克苏什艾日克剖面下寒武统肖尔布拉克组、鄂尔多斯盆地靳2井下奥陶统马家沟组五段、四川盆地鸭深1井中三叠统雷口坡组3个显生宙剖面代表了显生宙宏体生物出现之后,微生物碳酸盐岩、高能礁滩相沉积和膏盐岩并存的沉积

特征。以宏体生物为主导的海洋生态体系^[37],在大气和海水普遍富氧、大气环流作用强的条件下^[39],形成3个沉积响应特征:①显生宙海洋波浪作用和潮汐作用并存,障壁海岸以波浪作用为主,风暴浪作用也很常见,潮坪环境以潮汐作用为主,这是显生宙高能礁滩相沉积比元古宙发育的主要原因;②显生宙以镶边台地为主,即使是碳酸盐缓坡,也因造礁生物的繁盛和高的碳酸盐生产率,很快会演变为镶边台地;③微生物碳酸盐岩的规模发育往往与高盐度海水有关。这导致微生物碳酸盐岩、高能礁滩相沉积、膏盐岩共生(塔里木盆地阿克苏什艾日克剖面肖尔布拉克组虽然未出现膏盐岩,但其上覆地层吾松格尔组发育大套的膏盐岩),暗示了障壁岛的存在。据此,根据沃尔索相律^[40],建立了镶边沉积体系微生物碳酸盐岩沉积模式(图7)。

镶边碳酸盐台地指碳酸盐台地与盆地之间有明显的坡折,斜坡坡度 60° 以上,边缘发育障壁礁或滩,内侧发育低能潟湖,潟湖向陆方向过渡为陆源碎屑海岸,向海方向逐渐过渡为浅水碳酸盐台地。干旱气候条件下,潟湖中还会有蒸发岩沉积^[44]。

盆地相主要为黑色泥页岩夹硅质岩条带和泥质粉砂岩,水平纹层发育,厚度薄,分布广,为欠补偿沉积,以塔里木盆地玉尔吐斯组为代表。

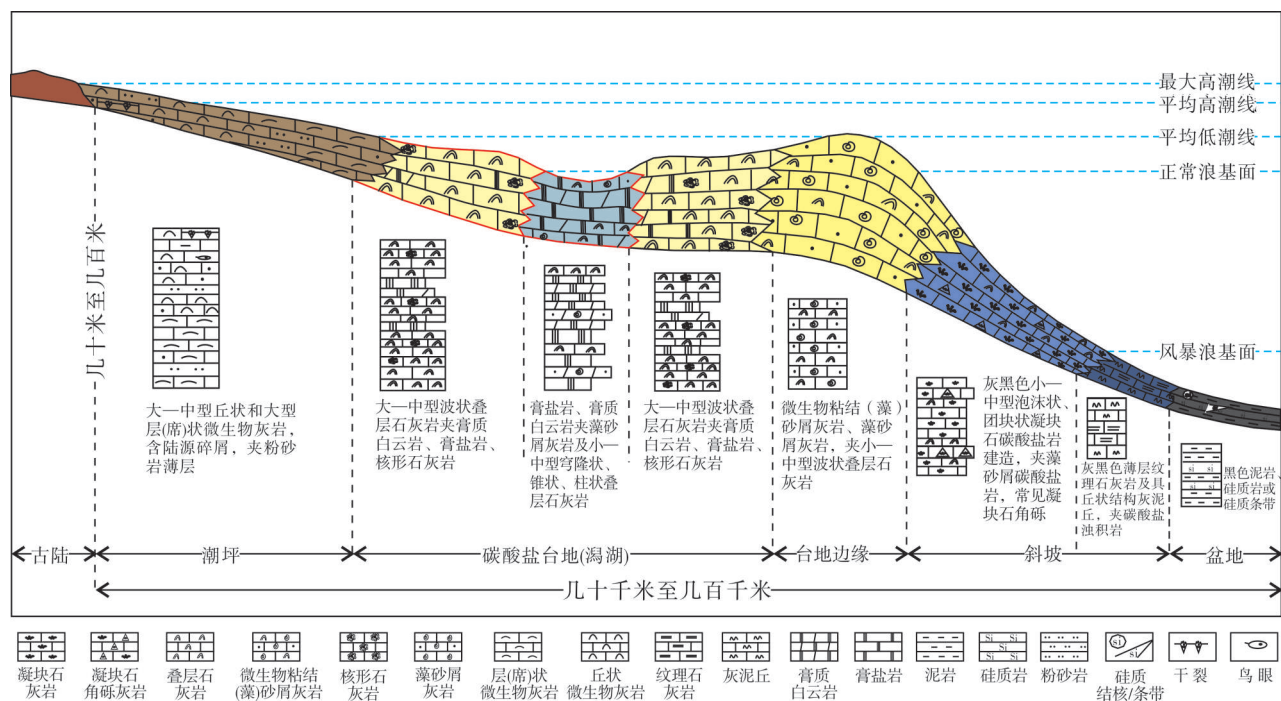


图7 镶边沉积体系微生物碳酸盐岩沉积模式

Fig. 7 Sedimentary model of microbial carbonate in rimmed sedimentary system

台缘前斜坡下部(下斜坡)主要为灰黑色大型纹理石碳酸盐岩及灰泥丘建造,发育的水平纹层为微生物痕迹,以塔里木盆地肖下段—肖中1亚段为代表(图3)。

台缘前斜坡上部(上斜坡)主要为灰黑色小—中型团块状、泡沫状凝块石碳酸盐岩建造,夹藻砂屑碳酸盐岩,常见凝块石角砾(5~15cm),以塔里木盆地肖中2亚段为代表。

镶边台缘主要为浅灰色中厚层微生物粘结(藻)砂屑碳酸盐岩、藻砂屑碳酸盐岩建造,发育交错层理,以塔里木盆地肖中3亚段下部(图3)和鄂尔多斯盆地马四段—马五₁₀、马五₇亚段(图4)以及四川盆地雷口坡组雷四₃亚段中上部(图5)为代表。

碳酸盐台地主要为浅灰色大—中型波状叠层石碳酸盐岩建造,常伴生核形石(鲕粒)碳酸盐岩、微生物粘结藻砂屑碳酸盐岩、(泥质)泥晶灰岩或(泥质)泥晶白云岩,潟湖中可见少量小—中型穹窿状、柱状、锥状叠层石碳酸盐岩及微—小型泡沫状、团块状凝块石碳酸盐岩,以塔里木盆地肖中3亚段上部和鄂尔多斯盆地马五₉—马五₈亚段、马五₆亚段中部以及四川盆地雷口坡组雷四₃亚段下部、雷五段为代表。

蒸发潟湖主要为膏盐岩、膏质白云岩建造,夹(泥质)泥晶碳酸盐岩及少量微生物粘结(藻)砂屑碳酸盐岩,以鄂尔多斯盆地马五₉—马五₈、马五₇、马五₆亚段和四川盆地雷口坡组雷四₂亚段为代表。

潮坪环境主要为黄灰色薄层泥质碳酸盐岩、浅灰色大—中型层(席)状、丘状微生物碳酸盐岩建造,见少量泥质和陆源碎屑,以塔里木盆地肖上段为代表。

与缓坡沉积体系微生物碳酸盐岩沉积模式相似,无论是剖面的垂向序列还是平面的展布特征,均展示了沉积环境的能量分带、可容纳空间大小对微生物碳酸盐岩岩石类型和组合序列的控制。风暴浪基面之下的盆地相区以黑色泥页岩、硅质岩建造为主,下斜坡以大型纹理石碳酸盐岩建造为主;风暴浪基面和正常浪基面之间的上斜坡以灰黑色小—中型团块状、泡沫状凝块石碳酸盐岩建造为主;正常浪基面之上的镶边台缘以微生物粘结(藻)砂屑碳酸盐岩、藻砂屑碳酸盐岩建造为主;碳酸盐台地以大—中型波状叠层石碳酸盐岩建造为主;蒸发潟湖以膏盐岩和膏质白云岩建造为主;潮坪环境

以大—中型层(席)状、丘状微生物碳酸盐岩建造为主。高频海平面变化可导致不同相带岩石组合序列的频繁交替。

大规模的镶边沉积体系微生物碳酸盐沉积主要见于显生宙,但元古宙在特定的地质条件下,同样可以发育镶边沉积体系微生物碳酸盐沉积,如四川盆地川中地区德阳—安岳台内裂隙周缘的灯影组微生物碳酸盐沉积,虽然灯影期上扬子板块主体为碳酸盐缓坡背景。德阳—安岳灯影期台内裂隙周缘的镶边既非典型的镶边台缘,更不是沉积型镶边,而是构造型镶边;恰恰通过灯影期微生物碳酸盐的沉积作用,逐渐由灯二段沉积期的构造型镶边向灯四段沉积期的碳酸盐缓坡演化^[45]。

4 结 论

本文通过塔里木盆地、四川盆地和鄂尔多斯盆地3个露头、2口井共5条剖面的岩石类型和组合序列研究,取得3项成果和认识:

(1)建立了构造尺度和形态特征相结合的微生物碳酸盐岩分类方案。该分类方案是一个更适用于露头 and 井场的系统分类方案,同时岩石类型及组合序列的环境意义更加明确,为微生物碳酸盐岩沉积环境恢复和沉积模式的建立奠定了基础。

(2)明确了微生物碳酸盐岩岩石类型及组合序列的环境意义。风暴浪基面之下远端以欠补偿黑色泥岩和硅质岩沉积为主,近端的下斜坡以具丘状结构的纹理石碳酸盐岩和灰泥丘建造为主;风暴浪基面和正常浪基面之间的上斜坡以泡沫状、团块状凝块石碳酸盐岩和柱状、锥状、穹窿状叠层石碳酸盐岩建造为主;正常浪基面与平均低潮线之间以波状叠层石碳酸盐岩建造为主;平均低潮线之上的潮坪环境以层(席)状微生物碳酸盐岩、丘状微生物碳酸盐岩建造为主。

(3)建立了缓坡沉积体系和镶边沉积体系微生物碳酸盐岩沉积模式。

关于微生物碳酸盐岩的分类目前依然存在很大分歧,本文提供的分类方案也肯定存在不足之处,但期望该方案能对微生物碳酸盐岩岩类学研究起到促进作用。虽然不同类型的微生物碳酸盐岩可以出现在同一沉积环境,不同沉积环境也可以出现同类型的微生物碳酸盐岩,但基于本文构造尺度和形态特征相结合的分类方案,岩石类型和组合序

列的环境意义是基本明确的。不同地质历史时期均可能发育缓坡沉积体系和镶边沉积体系微生物碳酸盐沉积,但元古宙以缓坡沉积体系为主,显生宙则以镶边沉积体系为主。

参考文献

- [1] RIDING R. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms [J]. *Sedimentology*, 2000, 47(S1): 179-214.
- [2] BURNE R V, MOORE L S. Microbialites: organosedimentary deposits of benthic microbial communities [J]. *Palaios*, 1987, 2(3): 241-254.
- [3] RIDING R. Classification of microbial carbonates [M]// RIDING R. *Calcareous algae and stromatolites*. Berlin: Springer-Verlag, 1991: 21-51.
- [4] LOWE D R. Stromatolites 3,400 Myr old from the Archean of Western Australia [J]. *Nature*, 1980, 284: 441-443.
- [5] SCHIDLOWSKI M. A 3,800-million-year isotopic record of life from carbon in sedimentary rocks [J]. *Nature*, 1988, 333: 313-318.
- [6] 曹瑞骥. 前寒武纪叠层石命名和分类的研究历史及现状 [J]. *地质调查与研究*, 2003, 26(2): 80-83.
- [7] RIDING R. Microbial carbonate abundance compared with fluctuations in metazoan diversity over geological time [J]. *Sedimentary geology*, 2006, 185: 229-238.
- [8] 戴永定, 刘铁兵, 沈继英. 生物成矿作用和生物矿化作用 [J]. *古生物学报*, 1994, 33(5): 575-594.
- [9] 史晓颖, 张传恒, 蒋干清, 等. 华北地台中元古代碳酸盐岩中的微生物成因构造及其生烃潜力 [J]. *现代地质*, 2008, 22(5): 669-682.
- [10] 王兴志, 侯方浩, 刘仲宣, 等. 资阳地区灯影组层状白云岩储集层研究 [J]. *石油勘探与开发*, 1997, 24(2): 37-40.
- [11] MANCINI E A, BENSON D J, HART B S, et al. Appleton field case study (eastern Gulf coastal plain): field development model for Upper Jurassic microbial reef reservoirs associated with paleotopographic basement structures [J]. *AAPG bulletin*, 2000, 84(11): 1699-1717.
- [12] MANCINI E A, LLINÁS J C, PARCELL W C, et al. Upper Jurassic thrombolite reservoir play, northeastern Gulf of Mexico [J]. *AAPG bulletin*, 2004, 88(11): 1573-1602.
- [13] MANCINI E A, PARCELL W C, AHR W M, et al. Upper Jurassic updip stratigraphic trap and associated Smackover microbial and nearshore carbonate facies, Eastern Gulf Coastal Plain [J]. *AAPG bulletin*, 2008, 92(4): 417-442.
- [14] GROTZINGER J P, AMTHOR J E. Facies and reservoir architecture of isolated microbial carbonate platforms, Terminal Proterozoic-Early Cambrian Ara Group, South Oman Salt Basin [C]. Houston: AAPG Annual Meeting, 2002.
- [15] 费宝生, 汪建红. 中国海相油气田勘探实例之三: 渤海湾盆地任丘古潜山大油田的发现与勘探 [J]. *海相油气地质*, 2005, 10(3): 43-50.
- [16] 刘树根, 马永生, 孙玮, 等. 四川盆地威远气田和资阳含气区震旦系油气成藏差异性研究 [J]. *地质学报*, 2008, 82(3): 328-337.
- [17] WRIGHT P V, RACEY A. Pre-salt microbial carbonate reservoirs of the Santos Basin, offshore Brazil [C]. Denver: AAPG Annual Convention and Exhibition, 2009.
- [18] AHR W M, MANCINI E A, PARCELL W C. Pore characteristics in microbial carbonate reservoirs [C]. Houston: AAPG Annual Convention and Exhibition, 2011.
- [19] MUNIZ M C, BOSENCE D. Carbonate platforms in non-marine rift system in the Early Cretaceous (Pre-salt) of the Campos Basin, Brazil [C]. Long Beach: AAPG Annual Convention and Exhibition, 2012.
- [20] 梅冥相. 微生物碳酸盐岩分类体系的修订: 对灰岩成因结构分类体系的补充 [J]. *地学前缘*, 2007, 14(5): 221-234.
- [21] 韩作振, 陈吉涛, 迟乃杰, 等. 微生物碳酸盐岩研究: 回顾与展望 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(4): 30-39.
- [22] 王月, 沈建伟, 杨红强, 等. 微生物碳酸盐沉积及其研究意义 [J]. *地球科学进展*, 2011, 26(10): 1038-1049.
- [23] 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): 53-65.
- [24] 杨华, 王宝清. 微生物白云石模式评述 [J]. *海相油气地质*, 2012, 17(2): 1-7.
- [25] 王红梅, 吴晓萍, 邱轩, 等. 微生物成因的碳酸盐矿物研究进展 [J]. *微生物学通报*, 2013, 40(1): 180-189.
- [26] 郝雁, 张哨楠, 张德民. 微生物碳酸盐岩研究现状及进展 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(4): 415-427.
- [27] 吴亚生, 姜红霞, 李莹, 等. 微生物碳酸盐岩的显微结构基本特征 [J]. *古地理学报*, 2021, 23(2): 1-15.
- [28] KALKOWSKY E. Oolith und stromatolith im norddeutschen Buntsandstein [J]. *Zeitschrift der deutschen geologischen gesellschaft*, 1908, 60: 68-125.
- [29] RIDING R. The nature of stromatolites: 3,500 million years of history and a century of research [M]// REITNER J, et al. *Advances in stromatolite geobiology*. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 2011: 29-74.
- [30] 杨仁超, 樊爱萍, 韩作振, 等. 核形石研究现状与展望 [J]. *地球科学进展*, 2011, 26(5): 465-474.
- [31] SHAPIRO R S. A comment on the systematic confusion of thrombolites [J]. *Palaios*, 2000, 15(2): 166-169.
- [32] 梅冥相. 鲕粒成因研究的新进展 [J]. *沉积学报*, 2012, 30(1): 20-32.
- [33] KAUFMANN B. Middle Devonian reef and mud mounds on a carbonate ramp: Mader Basin (eastern Anti-Atlas, Morocco) [M]// *Geological Society London Special Publications* 149, 1998: 417-435.
- [34] DUNHAM R J. Classification of carbonate rocks according to their depositional texture [M]// AAPG memoir, 1962: 108-121.
- [35] BLUMENBERG M, THIEL V, RIEGEL W, et al. Biomarkers

- of black shales formed by microbial mats, Late Mesoproterozoic (1.1 Ga) Taoudeni Basin, Mauritania[J]. Precambrian research, 2012, 196/197: 113–127;
- [36] LENTON T M, BOYLE R A, POULTON S W, et al. Co-evolution of eukaryotes and ocean oxygenation in the Neoproterozoic era[J]. Nature geoscience, 2014, 7(4): 257–265.
- [37] 赵文智, 王晓梅, 胡素云, 等. 中国元古宇烃源岩成烃特征及勘探前景[J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 2019, 46(6): 939–964.
- [38] PLANAVSKY N J, REINHARD C T, WANG X, et al. Low Mid-Proterozoic atmospheric oxygen levels and the delayed rise of animals[J]. Science, 2014, 346: 635–638.
- [39] LYONS T W, REINHARD C T, PLANAVSKY N J. The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere[J]. Nature, 2014, 506: 307–315.
- [40] WALTHER J. Einleitung in die Geologie als historische Wissenschaft[J]. The journal of geology, 1894, 2(8): 856–860.
- [41] TUCKER M E. Shallow marine carbonate facies and facies models [M]// Geological Society of London Special Publications. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [42] WRIGHT V P. A revised classification of limestones[J]. Sedimentary geology, 1992, 76: 177–185.
- [43] HOWARD J P, BOGOLEPOVA O K, GUBANOV A P, et al. The petroleum potential of the Riphean–Vendian succession of southern East Siberia [M]// Geological Society of London Special Publications 366, 2012: 177–198.
- [44] TUCKER M E, WRIGHT V P. Carbonate sedimentology [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1990.
- [45] 沈安江, 陈娅娜, 张建勇, 等. 中国古老小克拉通台内裂陷特征及石油地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 15–25.

编辑: 董 庸

The classification, facies and sedimentary models of microbialites

HU Anping, SHEN Anjiang, ZHENG Jianfeng, WANG Xin, WANG Xiaofang

Abstract: In view of the problems that the lack of a systematic microbialites classification, the uncertain of facies significance of different microbialites types and the lack of sedimentary models, this paper made a series of detailed study on petrology and rock assemblage sequence of two Proterozoic profiles and three Phanerozoic profiles in Tarim, Sichuan and Ordos Basins, acquiring three achievements and understanding: (1) Establish a new microbialites classification based on structure scale and morphological characteristics which is more systematic. (2) Make out the facies significance of the microbialites: laminated carbonate is the dominant type below the storm wave base; foamed and crumbed thrombolites, and domed, tapered, columnar stromatolites are mostly developed between storm wave base and normal wave base; wavy stromatolites are mostly developed between normal wave base and average low tidal base; and the lime–mud mound, sheet–like and mound–like microbial carbonates mainly exist in tidal flat environment over the average low tidal base. (3) Establish two microbialite sedimentary models for ramp sedimentary system and rimmed sedimentary system. These understandings are of great significance for reconstruction of lithofacies palaeogeography and prediction of reservoirs distribution of microbial carbonate.

Key words: structure scale; morphological characteristics; classification; microbialites; sedimentary models; ramp sedimentary system; rimmed sedimentary system

HU Anping, First author: PhD, Senior Engineer, mainly engaged in carbonate reservoir research and experimental technology development. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China

SHEN Anjiang, Corresponding author: PhD, Professoriate Senior Engineer, mainly engaged in sedimentology and reservoir geology of carbonate. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China