

文章编号: 1000-0550(2004)01-0103-07

塔里木盆地塔中地区中上奥陶统碳酸盐岩层序发育对同生期岩溶作用的控制

刘忠宝^{1,2} 于炳松^{1,2} 李廷艳¹ 樊太亮¹ 蒋宏忱¹

1(中国地质大学地球科学与资源学院 北京 100083)

2(中国地质大学岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室 北京 100083)

摘要 塔里木盆地塔中地区是塔里木油田的主要采油区。奥陶系碳酸盐岩是区内重要的目的层段之一。在剖面、测井和岩心资料的基础上,以 Cross 的高分辨率层序地层学理论为指导,对区内中上奥陶统进行了初步的层序地层研究,划分出了三级层序界面。结合镜下薄片分析,以特征成岩组构为大气淡水成岩作用的识别标志,识别出 4 个大气淡水成岩透镜体。在横向连井层序对比的基础上,结合大气淡水成岩透镜体的发育层位,建立了层序地层和大气淡水成岩透镜体对比剖面。揭示不同级别层序界面对台地边缘碳酸盐岩同生期岩溶的控制,对于正确预测碳酸盐岩储层的发育规律,具有重要的指导意义。

关键词 层序地层学 大气淡水成岩透镜体 同生期岩溶 塔里木盆地

第一作者简介 刘忠宝 男 1978 年出生 硕士 含油气盆地沉积学 石油地质

中图分类号 P539 **文献标识码** A

1 引言

塔里木盆地位于我国西北边陲,面积约 $5.6 \times 10^5 \text{ km}^2$,是我国最大的内陆盆地。塔中地区在区域构造位置上属中央隆起中段的塔中低隆起。北以塔中 1 号断裂带与满加尔凹陷相邻,西面及南面分别与阿瓦提凹陷和塘古孜巴斯凹陷呈斜坡过渡关系,东与塔中东凸起相邻,是塔里木油田的主要采油区(图 1)。以奥陶系碳酸盐岩为重点目的层的油气勘探已取得了重大突破。多年来,在该区已经开展了大量的地质基础研究工作,包括地层划分与对比、沉积学、层序地层学、储层岩石学、地球化学、测井储层评价、地震储层评价、地层测试、岩溶储层评价预测等。经过多年的研究,大家对碳酸盐岩储层发育规律已形成基本共识,即岩溶作用是控制碳酸盐岩储层质量的关键因素,为此,众多研究者运用各种理论和方法对碳酸盐岩储层的岩溶发育规律进行了多方面的研究。

碳酸盐沉积物沉积后,即使很小级别的海平面下降也会产生暴露而使其受到大气淡水成岩作用的改造,从而形成较多的反映沉积物从海水到淡水的成岩

层序^[1,2]。近年来,研究者普遍认为:大气淡水成岩作用的主要控制因素是矿物特征和气候。如果碳酸盐体是由文石和高镁方解石组成的,那它受到成岩作用的改造程度比低镁方解石组成的岩体大得多。而在干燥气候条件下,较低的降雨量将导致相对较低的淡水运动变化速率,通过渗流带注入的淡水量也就很少;在较潮湿的气候条件下,将产生纯粹的溶解作用,在土壤及渗流带中碳酸盐堆积作用的产物也就很少。此外,层序地层学作为一门重要的地层学分支学科,近年来已得到了长足的发展,层序地层学方法在碳酸盐岩油气勘探开发中的应用也已被广泛认可,故本文将层序地层学理论与成岩作用研究相结合,旨在探讨层序发育对同生期岩溶作用的控制,探索本区碳酸盐岩油气储层研究的新思路。

2 中上奥陶统碳酸盐岩层序

2.1 塔中地区中上奥陶统地层系统简述

塔中地区中上奥陶统主要为上奥陶统桑塔木组和中上奥陶统良里塔格组。桑塔木组以发育灰色、深灰色厚层泥岩和灰质泥岩为特征。而良里塔格组则为—

本项研究受国家自然科学基金项目(批准号:49976026)资助

陈永武,赵澄林等. 塔里木盆地储层与盖层研究. 中国石油天然气总公司, 1995

王振宇,曾伟等. 塔里木盆地塔中一号断裂构造带中上奥陶统岩溶系统研究. 西南石油学院, 1999

套厚层的灰色、褐灰色灰岩,从上到下可细分为泥质条带灰岩、颗粒灰岩和含泥灰岩三个岩性段。

2.2 塔中地区中上奥陶统层序划分

塔中地区奥陶系碳酸盐岩形成于浅水碳酸盐岩台地背景中,高级别层序的发育主要受海平面升降的控制,而低级别层序和高频旋回除了受海平面升降的周期变化控制外,气候变化也起到了一定的控制作用^[3]。本文在对钻井剖面、测井及岩心等资料进行详细分析研究的基础上,以 Cross 高分辨率层序地层学理论为指导,对塔中 54、44、16、161 和 24 井进行了短、

中期基准面旋回分析。同时,在深入分析短期旋回的特点和叠加方式的基础上,识别出了中期旋回的转换面,即三级层序界面。

2.2.1 短期旋回类型和特征

地层剖面中的沉积旋回记录了不同级次基准面的旋回性变化,钻井剖面及其对应的测井曲线,能反映短期和中期基准面旋回及沉积层序的发育状况^[3,4]。在塔中地区,我们重点选取 5 口井开展层序地层研究。其中短期旋回的叠加样式及组合特征可归纳为以下几种(图 2):

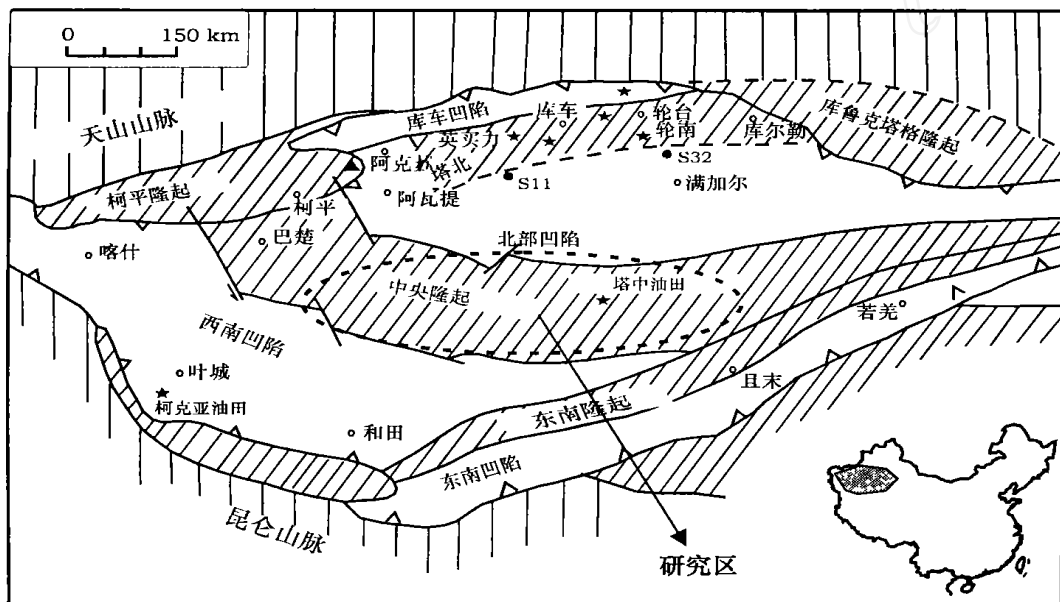


图1 研究区平面位置图

Fig. 1 Sketch map of the study area

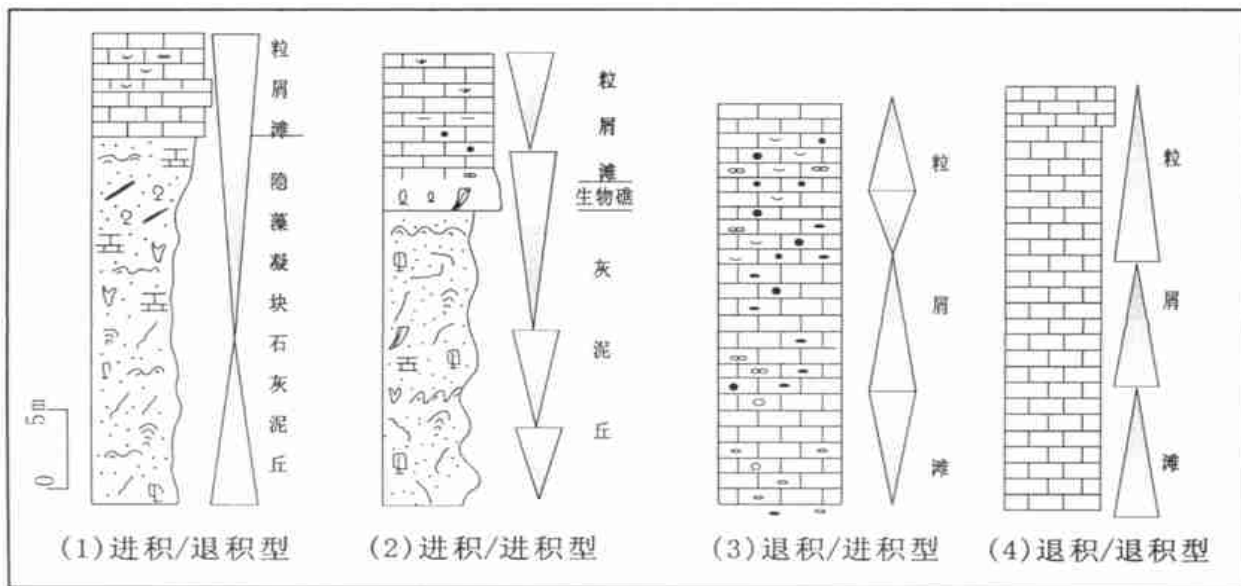


图2 短期旋回叠加样式图

Fig. 2 Stacking pattern map of short cycle

(1) 进积/退积型

发育有上升半旋回和下降半旋回,层序近对称,上升半旋往往为粒屑滩颗粒灰岩微相,或为灰泥丘生物屑粘结灰岩微相。这类短期旋回中从进积到退积的转换面往往也是三级层序的界面。

(2) 进积/进积型

仅发育有下降半旋回,一般是粒屑滩颗粒灰岩和生物礁骨架灰岩微相叠置在灰泥丘粘结灰岩微相之上,也可以发生在粒屑滩内部,其都反映了较长期基准面下降的背景下,短期基准面快速下降后停滞的沉积形式。界面上下的短期旋回往往构成特征的叠置形式,测井曲线上进积特征也比较明显。

(3) 退积/进积型

发育有上升半旋回和下降半旋回,通常是粒屑滩叠置在灰泥丘之上,也可以完全发育在灰泥丘或粒屑滩内部。它代表基准面快速下降之后又快速上升的沉积形式,界面之下的短期旋回一般都发育有上升半旋回的沉积,反映的是一个水体由浅-深-浅的沉积过程。

(4) 退积/退积型

仅发育有上升半旋回,反映了较长期的基准面上升,水体变深的沉积过程。与前三种类型相比发育较少见,仅在 54 井底部粒屑滩灰岩段中识别出有该类型发育。

2.2.2 中期旋回特征

在对短期旋回叠置样式、岩石沉积特征进行分析的基础上,进一步识别出了更大级别的中期旋回。其上升半旋回和下降半旋回呈不对称分布,多以下降半旋回为主,反映其长期处于海平面下降的海退体系中。中期旋回的转换面即为三级层序界面,该界面主要受周期性海平面变化,沉积物供应速率变化及构造运动控制。其分布可能是区域性的,也可能是局部的。

2.2.3 层序划分结果

在研究区内,我们对塔中 54、44、16、161、24 五口井进行了单井的层序划分,最多识别出 5 个三级层序(塔中 54 井、塔中 161、塔中 24 井)。测井岩性剖面从上到下依次为泥质条带灰岩、颗粒灰岩和含泥灰岩三个岩性段。由于泥质条带灰岩段地层厚度相对较薄,故层序主要发育在颗粒灰岩和含泥灰岩两个岩性段中。岩性段界面常常是中期旋回的转换面。

3 同生期岩溶发育特征及其与层序的关系

3.1 塔中地区中上奥陶统同生期大气淡水成岩组构特征

同生期岩溶作用发生于同生期大气成岩环境中。

受次级沉积旋回和海平面变化的控制,粒屑滩、骨架礁等浅水沉积体,尤其在海退沉积序列中,伴随海平面暂时性相对下降,时而出露海面或处于淡水透镜体内,在潮湿多雨的气候下,受到富含 CO_2 的大气淡水的淋滤,发生选择性和非选择性淋滤、岩溶作用,形成大小不一,形态各异的各种孔隙。

在塔中地区中上奥陶统成岩作用研究中,通过镜下薄片观察,见岩石中有粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔、溶洞、渗流粉砂、大气水胶结物等特征的成岩组构发育(图 3)。成岩组构及其特点描述如下:

粒间溶孔 发育于颗粒灰岩中,一般是在原生粒间孔和残余粒间孔的基础上遭受早期大气淡水溶蚀而成的孔隙,孔壁上常见有海底胶结物的溶蚀残余。常与粒内溶孔相伴生,指示其早期为大气淡水溶蚀成因。

铸模孔和粒内溶孔 发育于泥-亮晶颗粒灰岩中,是由鲕粒、砂屑、生屑等骨架颗粒发生选择性溶蚀形成的。粒内溶孔常出现在藻砂屑内。铸模孔保留有泥晶套,泥晶套外围为纤状、叶片状方解石充填。粒内溶孔和铸模孔主要形成于大气潜流溶解带环境中。

溶孔、溶洞 是大气水非选择性溶蚀作用的结果,它们是在溶孔或溶沟的基础上进一步溶蚀扩大形成的。孔洞多呈囊状或水平状,底部常发育渗流粉砂充填物。

溶沟 见于中上奥陶统顶部,主要为灰色泥质、渗流粉砂和细晶方解石充填。可进一步发展为溶洞。

大气淡水胶结物 是大气淡水作用的重要标志。悬垂型和新月型方解石胶结物,发育于颗粒灰岩中,是大气渗流带的典型特征成岩组构。灰岩粒屑滩沉积序列顶部发育的叶片状、马牙状和细柱状方解石胶结物,则是大气潜流带的特征成岩组构。棘屑的共轴生长存在两种情况,当在棘屑颗粒周围等厚环边分布时,为大气渗流环境;当棘屑偏离颗粒中心发育或出现于颗粒一侧时,为大气潜流环境。

3.2 同生期大气成岩透镜体的发育

以粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔、溶洞、渗流粉砂、大气水胶结物^[1,5]等特征的成岩组构为大气淡水成岩透镜体的识别标志。我们在塔中 16、161、24、44、和 54 井中最多识别出 4 个大气淡水成岩透镜体(图 4)。大气淡水成岩透镜体的发育层位主要是泥质条带~颗粒灰岩段。

岩溶作用和胶结作用在大气成岩透镜体的不同位置也出现不同的变化。在大气成岩透镜体上部,是大气渗流带的发育部位。在大气渗流带的上部,溶解作用较强,发育溶沟、不规则溶蚀孔洞,或使原生孔隙大量残留,通常会引起孔隙度的增高,但溶沟、溶蚀孔

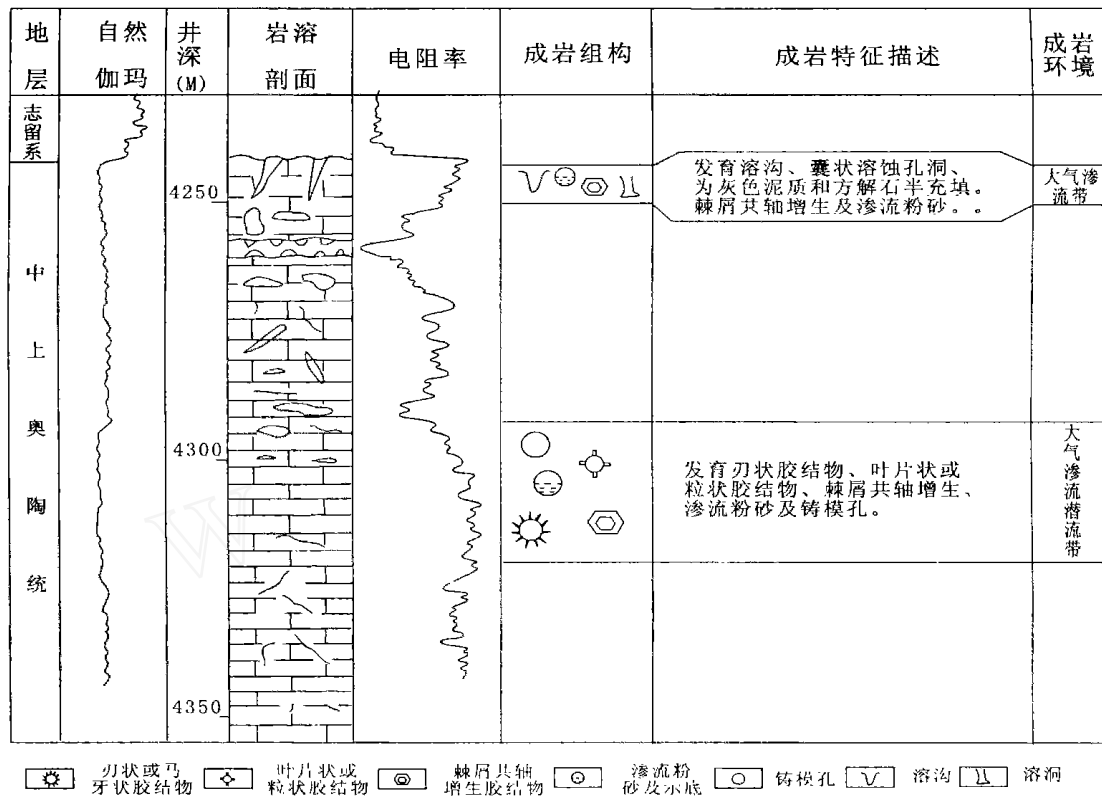


图3 塔中16井中上奥陶统岩溶剖面柱状图

Fig. 3 Karst profile of middle-upper Ordovician in Well Tazhong 16

洞中常发育有大量的泥质充填物和渗流粉砂充填物，使孔隙度降低。塔中161井、塔中24井中上奥陶统灰岩顶部的孔隙发育及孔隙度分布就是例证。在大气渗流带下部，溶解作用强度相对降低，并出现有方解石胶结物的沉淀，使孔隙度降低。大气成岩透镜体中部，岩溶作用强度增大，大量发育粒间溶孔、粒内溶孔和溶蚀孔洞，该部位胶结作用较弱，胶结物含量低，孔隙度值升高明显，这可能与潜水面附近的大规模溶解作用有关。

在大气成岩透镜体下部，溶解作用强度降低，胶结作用逐渐增强，孔隙度降低。未受大气水作用的海底潜流带中，由于极强的海底胶结作用，原生孔隙被大量充填，孔隙度值较低。

3.3 层序发育及其对大气淡水成岩透镜体的控制

3.3.1 中上奥陶统层序地层横向展布特点

在塔中地区，我们在对塔中54、44、16、161和24井进行单井层序地层分析的基础上，建立了塔中54-44-16-161-24井层序地层横向等时对比格架(图4)。从图中我们可以看到：塔中44井和塔中16井中上奥陶统底部岩层明显发生了沉积间断或者遭受了剥蚀作用，而与其它三口井相比缺少了底部层序的发育。

3.3.2 层序界面对大气淡水成岩透镜体的控制作用

在塔中54-44-16-161-24井层序地层对比格架的基础上，结合大气淡水成岩透镜体的发育层位，我们建立了层序地层和大气淡水成岩透镜体对比剖面图(图4)。

从层序地层与大气淡水成岩透镜体对比剖面图中可以看出，大气淡水成岩透镜体的发育与层序界面具有密切的相关性。本区中上奥陶统发育的4个淡水成岩透镜体，除顶部的一个因受奥陶纪末不整合岩溶的影响而跨几个层序外，其下部的3个淡水成岩透镜体的发育均在某一层序界面以下。这充分说明了层序界面对同生期大气淡水成岩透镜体发育的控制作用。因层序界面形成时的海平面下降，导致台地边缘礁滩相的碳酸盐岩暴露出水面接受大气淡水淋漓而形成同生期大气淡水成岩透镜体的发育。因此，建立层序地层格架，揭示不同级别层序界面对台地边缘碳酸盐岩同生期岩溶的控制，对于正确预测碳酸盐岩储层的发育规律，具有重要的指导意义。

4 同生期岩溶作用发育模式

通过对同生期岩溶作用的识别、大气透镜体的发

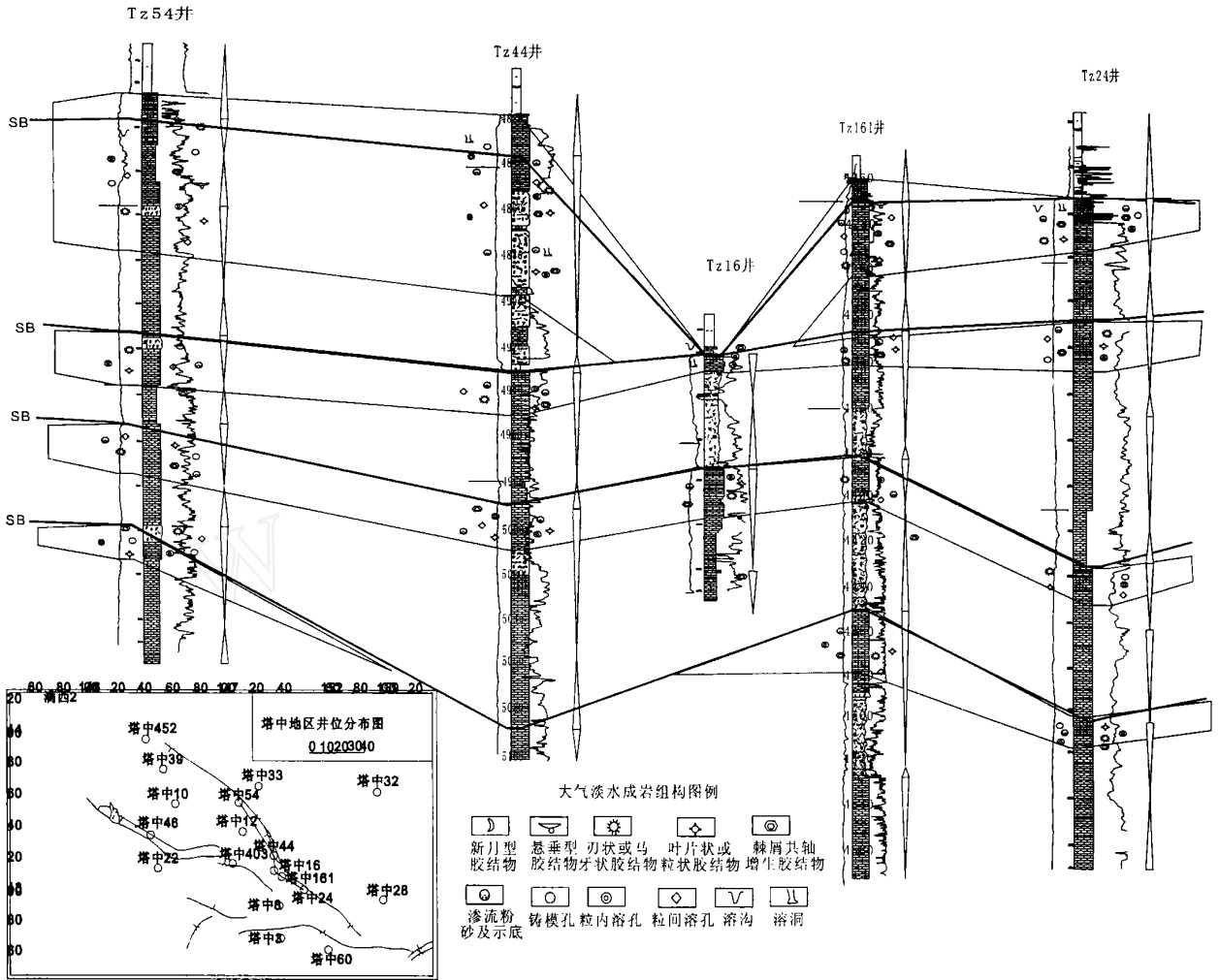


图 4 层序地层与大气淡水成岩透镜体对比剖面图

Fig. 4 Comparison of sequence stratigraphy and meteoric water diagenetic lens

育特征及其受中晚奥陶世次一级沉积旋回和海平面变化控制特点的综合分析,我们建立了奥陶系陆棚边缘碳酸盐岩同生期岩溶作用的成因模式(图 5)。

同生期海平面的相对下降,陆棚边缘碳酸盐岩沉积物浮露在海平面之上发生大气淡水成岩作用和大气淋滤风化作用,形成了大气淡水成岩透镜体。向下及向陆棚边缘内外两侧,沉积物孔隙被海水充填,过渡为海水潜流成岩作用带。在这种大气成岩透镜体内,根据地下水循环情况,可划分出潜水面之上的渗流带和之下的潜流带,各带中成岩变化的差异比较明显。

(1) 大气淡水渗流带

陆棚边缘的沉积物及海底胶结物主要由文石和高镁方解石组成,它们在海水中属稳定矿物,但在大气环境中是不稳定的。大气水环境中,伴随溶解作用的同时,还出现文石、镁方解石向方解石的转化作用及方解石的胶结作用。在大气渗流带上部,对 CaCO₃ 不饱和的大气淡水有快速向下运动的趋势,溶解是常见的作

用,文石质的鲕粒、生屑溶解产生铸模孔,但方解石质颗粒一般不溶解,而是直接转化为方解石。在空气与沉积物界面接触处,可见由淋滤、溶解作用形成的溶沟、溶蚀孔洞,常发育泥质和渗流粉砂充填物。受同生溶蚀作用期和后期充填胶结作用的影响,其孔隙度可发生变化,但在这一作用带中孔隙度趋于高值,甚至可保持原生孔隙度值。在渗流带下部,水对 CaCO₃ 的饱和度增加,达到饱和或过饱和,因此在伴随溶解作用的同时,可有方解石的胶结作用出现。

渗流带的厚度变化较大,它受气候、地貌、海平面升降幅度及局部洼地积水等各种因素的影响,在干燥气候下可以很厚甚至缺少潜水面,在潮湿气候下厚度可以很薄,甚至潜水面与地面一致。一般情况下渗流带厚度趋向于从暴露的高部位向海洋方向减薄。本区识别出的大气淡水成岩透镜体中,渗流带厚度一般为几米到几十米,精确确定其厚度很困难,同一个暴露阶段可能经历了多个次一级的相对海平面升降的变化,

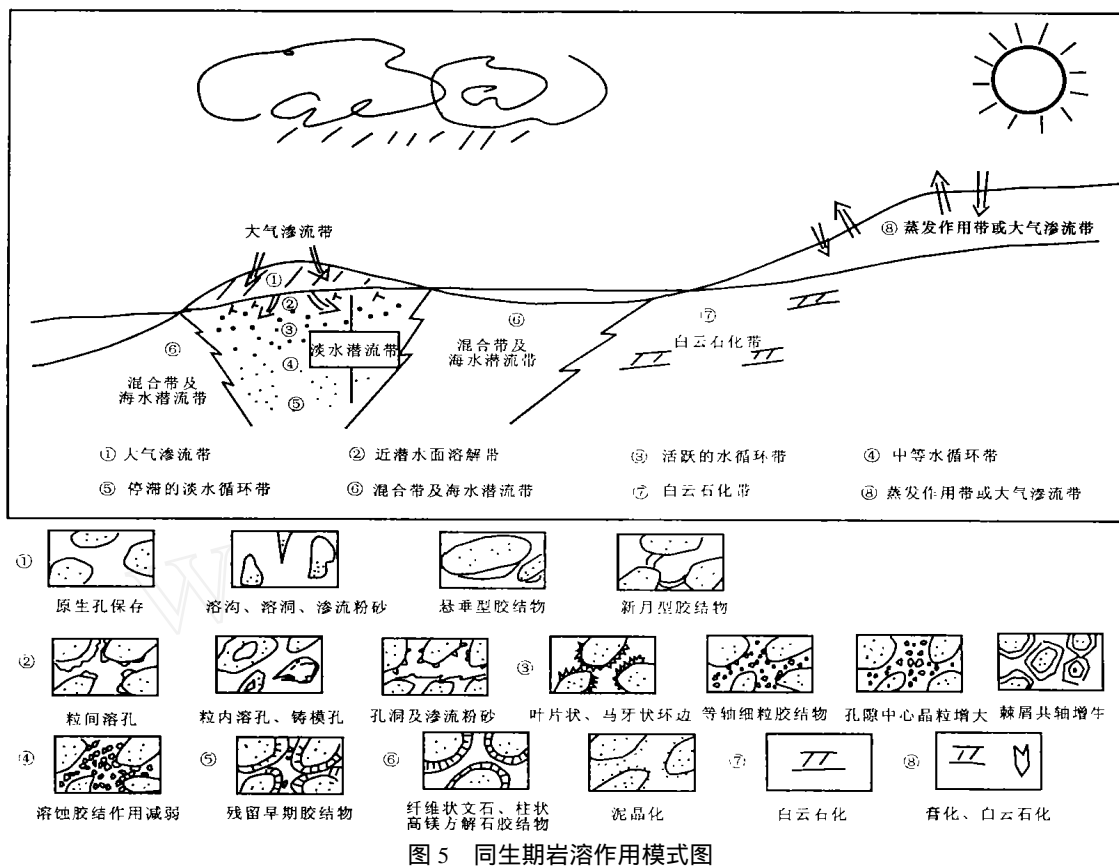


图 5 同生期岩溶作用模式图

Fig. 5 Mode map of iyngenesis Karstification

随着次一级潜水面的升降、迁移,同一位置处的沉积物可能受到多次淡水渗流、潜流作用的叠加,因此对渗流带的确定和厚度估计只是一个经多次作用叠加后的一个综合结果。

(2) 淡水潜流带

淡水潜流带位于大气淡水渗流带之下到海水与淡水混合带之上的中间地带,这个带内的孔隙空间充满着含有不同碳酸盐溶解的淡水,广泛而快速的胶结作用以及形成大量孔隙的溶蚀作用并存,使得淡水潜流带在陆棚边缘相中成为重要的成岩环境。

潜流带的几何形态和规模同样受地形、降雨、岩石中孔隙的分布和渗流性的控制。淡水带可延伸到较大的深度,本区中上奥陶统灰岩中识别出的大气透镜体的厚度在 15~70 m 之间,说明潜水面之下淡水带厚度在十几至几十米之间。结合对现代大气成岩透镜体的研究进展和本区的实际情况,将淡水潜流带分为以下几个带:

近潜水面的溶解带

在潜水面附近,大气水常常未被 CaCO_3 饱和,因而产生广泛的溶解作用,方解石和文石溶解形成溶蚀孔洞、粒间溶孔、粒内溶孔和铸模孔,引起孔隙度增高。该带受潜水面波动的控制。

活跃的饱和带

该带的水被 CaCO_3 饱和,但水的循环是活跃的。它对方解石是饱和的,而对文石是不饱和的,因此该带主要是文石溶解带和方解石沉淀带。溶解作用可产生粒间溶孔、粒内溶孔和铸模孔。但方解石胶结物在孔隙中的大量出现,使其晶粒向孔隙中心趋向于变大、变粗,形成胶结作用带,使孔隙度降低。同时在该带中文石颗粒也迅速新生变形为等粒状方解石。

中等循环 - 停滞带

水循环减弱或成为停滞状态,相应地溶解作用和胶结作用减弱。中等循环带的粒间孔中可大量残留早期的胶结物,等粒方解石胶结物可在残留的早期胶结物之外生长,并与之呈胶结不整合接触。停滞带中只有很少的水活动,胶结作用很弱,文石颗粒可缓慢新生变形并保留一些构造,相应地原生孔可得到保存,直到其它成岩环境中。

(3) 白云石化作用带

浅滩体系在干燥的气候条件下,由于强烈的蒸发作用以及文石、高镁方解石、石膏等的沉淀,导致孔隙水的 Mg/Ca 比值升高。这种由于海水蒸发浓缩、富含 Mg^{2+} 的超咸水可以导致白云石的沉淀并交代原始的碳酸钙沉积物。当然,在潮湿气候条件下,也可以发生

大气水的渗流作用。

5 结论

在研究区内,通过层序地层和成岩作用的研究,我们可以得出:海平面的相对变化控制了该区碳酸盐岩层序的发育,并对同生期成岩作用产生了一定的影响。在海平面上升时期,海水成岩作用一般出现在向上变浅的碳酸盐岩序列的潮下带中,而大气淡水成岩作用、白云石化作用和蒸发沉积作用常出现在潮间和潮上带。在海平面下降时期,大气淡水成岩作用和大气淋滤风化作用主要出现在碳酸盐岩浅滩。塔中地区中上奥陶统碳酸盐岩为特低孔和特低渗储层,因此对碳酸盐岩储层的岩溶发育规律进行研究,对于正确预测碳酸盐岩储层的发育规律,就显得尤为重要。本文将层序地层学理论与成岩作用研究相结合,探讨层序发育对同生期岩溶作用的控制,旨在探索本区碳酸盐岩的油气储层研究的新思路。

参考文献(References)

- 1 王琪,史基安,陈国俊,等.塔里木盆地西部碳酸盐成岩环境特征及其储层物性的控制作用.沉积学报,2001,19(4):548~554 [Wang Qi, Shi Ji'an, Chen Guojun, *et al.* Carbonate diagenesis environment characteristics and controls on reservoir physical characteristics in Western Tarim Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(4): 548~554]
- 2 马永生,梅冥相,陈小兵,等.碳酸盐岩储层沉积学.北京:地质出版社,1999 [Ma Yongsheng, Mei Minxiang, Chen Xiaobing, *et al.* Reservoir Sedimentology of Carbonate. Beijing: Geological Publishing House, 1999]
- 3 乐昌硕,于炳松,田成,等.新疆塔里木盆地北部层序地层及其沉积学研究.北京:地质出版社,1996 [Yue Changshuo, Yu Bingsong, Tian Cheng, *et al.* Study of Sequence Stratigraphy and Sedimentology in Northern Tarim Basin, Xinjiang. Beijing: Geological Publishing House, 1996]
- 4 郭建华.塔里木盆地轮南地区奥陶系潜山古岩溶及其所控制的储层非均质性.沉积学报,1993,11(1):56~63 [Guo Jianhua. Burial hill palaeokarst and its controlled reservoir heterogeneity in Ordovician, Lunnan Region of Tarim Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1993, 11(1): 56~63]
- 5 史基安,陈国俊,王琪,等.塔里木盆地西部地层与沉积成岩演化.北京:科学出版社,2001 [Shi Ji'an, Chen Guojun, Wang Qi, *et al.* Sequence Stratigraphy, Sedimentary and Diagenetic Evolution in the Western Tarim Basin. Beijing: Science Press, 2001]
- 6 陈强路,王恕一,钱一雄,等.塔里木盆地阿克库勒地区下奥陶统古岩溶及油气分布.沉积学报,2002,20(4):633~638 [Chen Qian-glu, Wang Shuyi, Qian Yixiong, *et al.* Old karst and distribution of oil-gas of Lower Ordovician in Akekule of Tarim Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(4): 633~638]
- 7 叶德胜,王恕一,张希明,等.新疆塔里木盆地北部储层沉积、成岩特征及储层评价.成都:成都科技大学出版社,1995.70~77 [Ye Desheng, Wang Shuyi, Zhang Ximing, *et al.* Sedimentation and Diagenetic Characteristics and Reservoir Evaluation in Northern Tarim Basin, Xinjiang. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1995. 70~77]

Sequence Development Controls on Iyngensis Karst of the Middle-upper Ordovician Carbonate in Tazhong Area, Tarim Basin

LIU Zhong-bao^{1,2} YU Bing-song^{1,2} LI Ting-yan¹ FAN Tai-liang¹ JIANG Hong-chen¹

1(China University of Geosciences, Beijing 100083)

2(Key Laboratory of Lithosphere Tectonics and Exploration, Ministry of Education, Beijing 100083)

Abstract Tazhong area is located in the middle of Tarim Basin, which is a major oil-production area of Tarim Oil-field. The carbonate of Ordovician is one of the most important target-strata for oil exploration. Guided with the theory of high-resolution sequence stratigraphy and based on the data of outcrop-sections, well logs and rock core, the primary research of sequence stratigraphy is conducted, and the interfaces of third-order sequences of middle-upper Ordovician in this area identified. Combined with the analysis of slices and by using characteristic diagenesis fabric to identify indications of meteorite water diagenesis, 4 meteoric water diagenetic lenses are identified, and outcrop-sections of sequence and meteoric water diagenetic lenses are constructed, by which sequence interfaces of different levels made on carbonate iyngensis karst at the edge of mesas, is of importantly instructive meaning to exactly forecast the development order of carbonate reservoir.

Key words sequence stratigraphy, meteoric water diagenesis lens, iyngensis karst, Tarim basin