

颜冠山,刘宗宾,宋洪亮,等. 渤海盆地 JZ 油田沙河街组白云岩成因分析[J].海洋地质前沿,2020,36(6):26-35.

渤海盆地 JZ 油田沙河街组白云岩成因分析

颜冠山,刘宗宾,宋洪亮,韩雪芳,张振杰,程大勇

(中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院,天津 300459)

摘要:研究区以生屑白云岩及含砂屑的鲕粒白云岩为主,相邻井区白云岩类型及厚度变化大。为确定各类白云岩的成因,通过孢粉及微体古生物化石、碳氧同位素、微量元素 B 含量等分析手段,对本区的古气候、古环境、古沉积介质的物理化学性质进行系统地分析,自沙三段以来,由温暖的亚热带气候变得逐渐干燥,水体逐渐咸化,为白云岩的形成提供了必要条件。具有硬的基底的滨浅湖台地,水体能长期保持清澈,有利于底栖生物生长繁殖,适宜碳酸盐岩的形成、沉积了巨厚的生屑白云岩,其生屑含量高、孔隙较发育、方解石也被交代的更加彻底,建立了该类白云岩滨浅湖台地渗透回流成因模式。滨浅湖隆起带区域,淡水与咸水在此交汇,易形成具雾心亮边的粉晶白云岩和具有同心圆结构的鲕粒云岩或生物碎屑云岩,但常常白云石化不彻底,方解石含量高,个别井段甚至发育云质鲕粒灰岩,建立了该类白云岩滨浅湖隆起带混合水成因模式。此研究丰富了湖相白云岩成因模式,对渤海湾盆地碳酸盐岩的勘探具有重要的指导意义。

关键词:生屑白云岩;白云岩成因;沉积模式;沙河街组

中图分类号:P618.13;P736

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2019.158

0 引言

渤海湾盆地古近系碳酸盐岩沉积属于湖相沉积或是海相沉积一直存在着争论,近 30 年来随着新研究方法的应用和资料的不断丰富,研究不断深入,对渤海湾盆地古近系沙河街组各类白云岩成因研究取得了长足的进展。姚益民等^[1]发现了不少代表海相或海陆过渡相的化石多毛纲虫管化石、广盐性有孔虫、新单角介;彭世福等^[2]从古生物群、地球化学、指相矿物及碳氧同位素等资料分析,认为渤海湾盆地沙河街组存在至少 4 次海侵。袁文芳等^[3]在渤海湾盆地东营凹陷沙河街组发

现海相遗迹化石。孙钰等^[4]根据岩心、录井、地化及微观资料分析了渤海湾盆地惠民凹陷沙河街组白云岩岩性组合及各类白云岩的成因。南山等^[5]根据岩相组合认为渤海辽东湾北部沙二亚段发育生物滩、碳酸盐局限台地、碎屑滩和深湖 4 种沉积类型。赵俊青等^[6]建立了渤海湾盆地陡坡型、缓坡型 2 种湖相碳酸盐岩沉积模式。戴朝成等^[7]利用湖相暗色页岩夹泥-微晶白云岩的微量元素和稀土元素地球化学特征提出了深湖相白云岩热水沉积成因的观点。曲长伟等^[8]通过碳氧同位素和微量元素分析认为渤海湾盆地沙三段泥晶和粉晶白云岩系同生—准同生期渗透回流白云岩化作用形成。潘文静等^[9]认为渤海湾盆地石臼坨北侧的生屑白云岩是多期次多成因综合作用的结果。

前人从沉积学、古地貌、古生物和古气候等宏观角度对湖相白云岩的形成条件进行了深入探讨,取得了许多重要认识,但对湖相生屑白云岩的成因模式研究较少,或在研究过程中对各类影响因素未作系统的考虑,事实上湖相白云岩的生成

收稿日期:2019-07-12

资助项目:“十三五”国家科技重大专项“渤海重点地区古近系优质储层评价与成藏分析技术”(2016ZX05024-003-005)

作者简介:颜冠山(1989—),男,硕士,工程师,现主要从事沉积学和储层评价研究工作。E-mail:yangsh6@cnooc.com.cn

条件极其苛刻,是各类因素影响的集合体。目前 JZ 油田沙河街组碎屑岩储层单层测试和试采获得了高产的战果,在此基础上,寻找沙河街组优质白云岩储层成为研究区滚动开发评价的关键问题。本文通过对 JZ 油田古近系白云岩岩石学、地球化学特征等的描述,对该区域古地貌、古气候、古沉积介质的物理化学性质进行系统的分析,对本区生屑白云岩的成因模式展开探讨,这对湖相碳酸盐岩储层的勘探开发工作具有重要指导意义。

1 区域沉积背景

JZ 油田位于辽东湾辽西凹陷的北洼,是辽河中央凸起向辽西凹陷倾没的部分。其北东侧为鸳鸯沟洼陷,南西侧为辽西洼陷,其北西侧为燕山褶皱带(图 1)。构造基底为中生界基性火山岩,古近系沙河街组上覆于中生界潜山垒块,形成披覆构造并呈 NE 向延伸。区域上沙河街组从下至上

可分为沙四段、沙三段、沙二段和沙一段。研究区除沙四段缺失外,其余 3 个层段在本区均有分布。辽东湾拗陷属于裂陷盆地,构造对盆地的充填样式和沉积作用起着控制作用^[10]。沙四段地层沉积时期辽东湾拗陷处于盆地形成的初始裂陷期,统一的盆地还未形成,处于拗陷边缘的 JZ 区域仍属于受剥蚀区。沙三段地层沉积时期处于盆地快速裂陷期,统一的盆地基本形成^[11-13],盆地边缘的辽河水系及凌河水系向 JZ 油田区域汇入,但各水系分布不稳定,以扇三角洲和近岸水下扇为主,局部发育碳酸盐岩沉积,盆地的沉降速率大,沉积层厚度大。渤海湾盆地经过沙三段沉积末期短暂的抬升和局部剥蚀后,沙二段、沙一段沉积时期盆地进入热沉降阶段,盆地由快速断陷转为缓慢沉降^[11-13]。随着先期物源区的侵蚀和盆地的填平补齐,使得二者的距离也相对变远。相对稳定的沉积环境及该时期的海侵作用,也造就了辽西凸起在陆源碎屑供给不充分的情况下形成碳酸盐浅滩沉积^[2,13]。

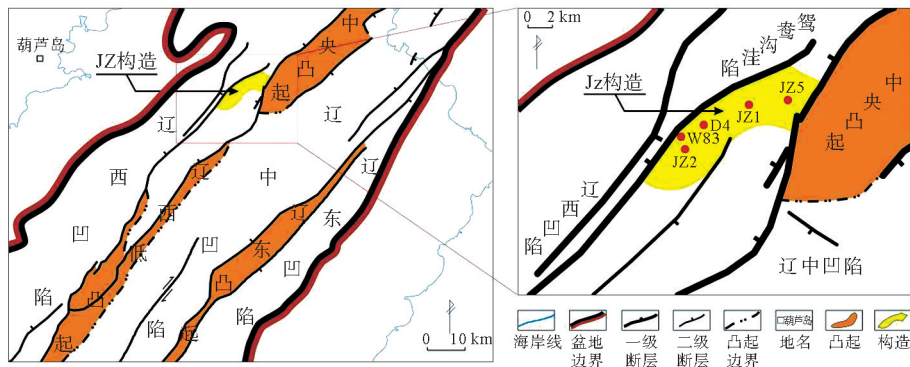


图 1 JZ 油田区域位置图

Fig.1 Location map of JZ Oilfield

2 地层发育特征

2.1 地层岩性

JZ 油田沙河街组属于碎屑岩与碳酸盐岩的混合类型,碳酸盐岩主要分布在沙二段,碳酸盐岩类型复杂,以生屑白云岩及含砂屑的鲕粒白云岩为主;各井钻遇白云岩类型及厚度也呈现巨大差

异(图 2)。沙三段下部为粉、细砂岩,含砾砂岩、砂砾岩与泥岩互层,上部为大段泥岩夹少量砂岩,含砾砂岩及钙质页岩。沙二段主要岩性包括生屑白云岩、白云岩、泥岩夹砂岩、含砾砂岩;生屑白云岩厚度变化较大,钻遇沙河街组的 8 口井中仅 JZ5 井沙二段钻遇 132 m 巨厚生屑白云岩外,其余井生屑白云岩或白云岩仅零星分布,单层厚度最大不超过 24 m;砂岩大多具有方解石胶结。沙一段为油页岩、泥岩互层,零星分布薄层白云岩。

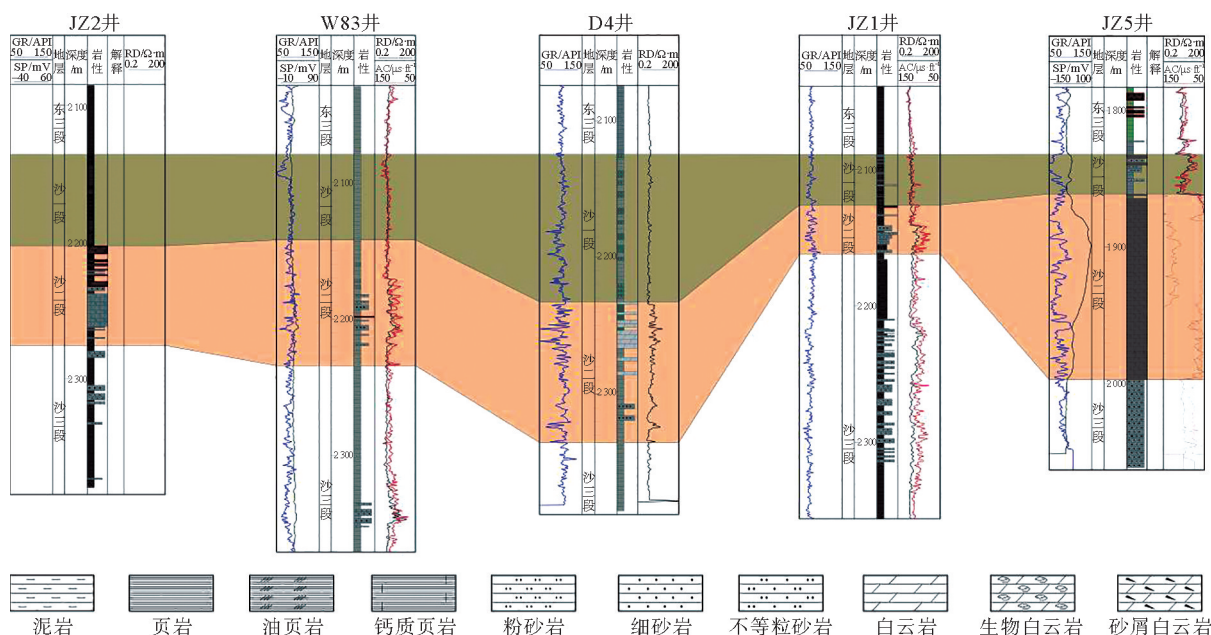


图2 JZ油田沙河街组地层对比

Fig.2 Stratigraphic correlation of Shahejie Formation in JZ Oilfield

2.2 碳酸盐岩岩石学特征

本区碳酸盐岩发育的一个显著特点是与陆源碎屑岩伴生,同时伴有陆源碎屑和碳酸盐矿物混积,岩性复杂多样。按碳酸盐岩分类标准^[14],该区碳酸盐岩可划分为为生屑白云岩(图 3a、3b)、鲕粒粉晶白云岩(图 3c)、云质鲕粒灰岩(图 3d)。生屑白云岩呈巨厚层状,主要分布在具有硬的基底且远离淡水注入的 JZ5 井区;鲕粒白云岩或鲕粒灰岩则主要与砂泥岩呈薄互层分布,附近还可偶见页岩或油页岩。

(1) 生屑白云岩

生物碎屑含量 30%~67%,以腹足类化石碎屑为主,个别保存完整,部分生物壳屑被溶蚀形成铸模孔。可见一定数量的鲕粒,一般在 5%~10%,主要为表鲕,部分具同心放射结构。石英、长石、岩屑等陆屑含量较高,最高可达 17%,粒间充填物主要为泥晶白云石。通过岩石薄片和扫描电镜分析及孔渗测试表明,生屑白云岩白云石化较彻底、溶蚀孔洞较发育(图 3a、3b、3f),溶蚀孔洞的多少与生物碎屑的含量呈正比关系,因此它是本区沙河街组最有利的碳酸盐岩储层。

(2) 鲕粒粉晶白云岩

白云石具粉晶结构,半自形-他形粉晶白云石

镶嵌组成。方解石含量较少,大部分方解石白云石化(图 3e)。鲕粒多呈圆形或椭圆形,主要为表鲕,鲕粒含量一般在 30%~70%。具较清晰的同心环带构造,核心多为石英、长石,也有生物碎屑等陆源碎屑。局部可见少量生物碎屑。

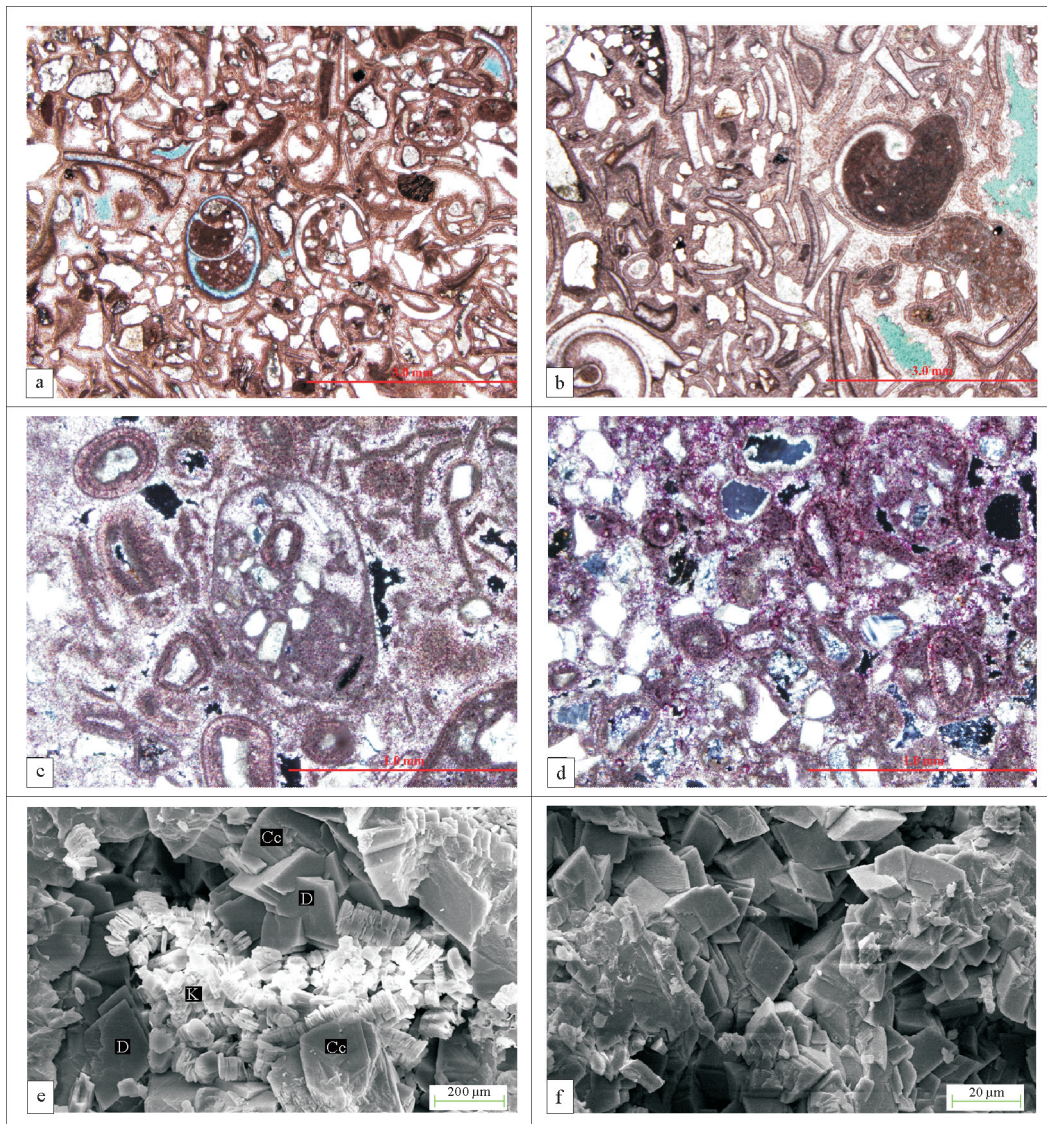
(3) 云质鲕粒灰岩

以方解石为主,鲕粒多呈圆形或椭圆形,主要为表鲕,鲕粒含量一般在 30%~70%。具较清晰的同心环带构造,核心多为石英、长石,也有生物碎屑等陆源碎屑。鲕粒间部分方解石白云石化,白云石颗粒较小,多为粉晶白云石。晶间及粒间溶蚀孔、洞较发育。

2.3 古生物特征

本区主要发育大量代表陆相的介形类、腹足类、瓣鳃类、叶肢介、轮藻、孢子花粉等。

沙三段主要特征是被子植物花粉占优势,以栎粉属(*Quercoidites*)为主、榆粉属(*Ulmipollenites*)次之,山核桃粉属(*Carya pollenites*),胡桃粉属(*Juglans pollenites*),桤木粉属(*Alnipollenites*),桦科(*Betulaceae*)也常见;裸子植物花粉中松科(*Pinaceae*)、杉科(*Taxodiaceae*)也较常见;草本植物花粉很少;藻类丰富,发育大量的广盐性藻类渤海藻属(*Bohaidina*)和副渤海藻属(*Parabohaidina*),



(a) JZ5 井, 1 881.1 m, E_3S_2 , 含陆屑生屑白云岩, 1.25×10 , 铸体薄片, 单偏光
 (b) JZ5 井, 1 878.0 m, E_3S_2 , 含鲕粒生屑白云岩, 1.25×10 , 铸体薄片, 单偏光
 (c) JZ1 井, 2 146.0 m, E_3S_2 , 鲕粒粉晶白云岩, 4×10 , 染色薄片, 正交偏光
 (d) JZ1 井, 2 150.0 m, E_3S_2 , 云质鲕粒灰岩, 4×10 , 染色薄片, 正交偏光
 (e) JZ1 井, 2 146.0 m, E_3S_2 , 菱面体白云石和方解石共生, 孔隙中充填高岭石, 扫描电镜
 (f) JZ5 井, 1 878.0 m, E_3S_2 , 大多数为白云石, 粒间孔较发育, 扫描电镜

图 3 JZ 油田沙河街组生屑白云岩特征

Fig.3 Photos showing lithologic characteristics of bioclastic dolostone from the Paleogene in JZ Oilfield

及棒球藻属 (*Fillisphaeridium*)、锥藻属 (*Conicoidium*)、光面球藻属 (*Leiosphaeridia*) 等。沙二段也是被子植物花粉占优势, 裸子植物花粉次之。被子植物花粉以栎粉属 (*Quercoidites*) 占优势, 榆粉属 (*Ulmipollenites*) 次之, 常见山核桃粉属 (*Carya pollenites*), 胡桃粉属 (*Juglans pollenites*), 枫香粉属 (*Liquidambar pollenites*), 芸香粉

属 (*Rutaceoipollis*); 裸子植物花粉中常见麻黄粉属 (*Ephedripites*) 和杉科 (*Taxodiaceae*) 花粉; 藻类中常见薄球藻属 (*Tenua*), 光面球藻属 (*Leiosphaeridia*), 粒面球藻属 (*Granodiscus*), 刺球藻属 (*Baltisphaeridium*), 角凸藻属 (*prominangularia*) 等。沙一段以被子植物花粉为主, 藻类化石次之, 裸子植物花粉含量较低, 蕨类植物孢子贫

乏;被子植物花粉以栎粉属(*Quercoidites*)占优势,其次为榆粉属(*Ulmipollenites*),胡桃科(*Juglandaceae*)分子和桦科(*Betulaceae*)分子占有一定比例,常见枫香粉属(*Liquidambarpollenites*),棘粉属(*Meliaceoidites*),唇形三沟粉属(*Lahitricolpites*);裸子植物花粉含量不高,主要为单、双束松粉属(*Pinuspollenites*),杉粉属(*Taxodiaceapollenites*)和麻黄粉属(*Ephedripites*);藻类化石含量虽有较高含量,有时在组合中占优势地位,但种类比较单一,主要为薄球藻属(*Tenua*),棒球藻属(*Fillisphaeridium*),菱球藻属(*Rhombodella*),繁棒藻属(*Cleistosphaeridium*)。孢粉中喜温湿的杉粉属、枫香粉属的出现一般指示了温湿的亚热带气候;芸香粉属和麻黄粉属共生,表明气候干燥^[15]。因此,通过以孢粉特征研究表明研究区沙河街组沉积时期,整体为温暖的亚热带气候,但自沙二段沉积时期气候变得干燥。

介形类化石丰富,能较好的反映水体环境^[16]。研究区沙三段以华北介(*Huabeinia*)占优势,*Huabeinia*属微咸水和半咸水介形类,不仅适应于平静深水泥底环境,也能适应浅水环境。沙二段以椭圆拱星介(*Camarocypriselliptica*)占优势,*Camarocypriselliptica*适应于浅水动荡环境,表明研究区沙二段沉积时期水体变浅。沙一段发育惠民小豆介(*Phacocypris huiminensis*),而在典型陆相地层或淡水湖泊中未有发现 *Phacocypris huiminensis*,推断它们可能为微咸水至半咸水的介形类属群。沙一段又以泥岩沉积为主,故推测沙一段沉积时期为相对安静的微咸水至半咸水的深水环境。

腹足类化石除渤海湾盆地古近系地层常见的盘螺科(*Valvatidae*)和豆螺科(*Bithyniidae*)^[9],还发育有适宜咸水环境的大民屯狭口螺(*Stenothyradamintunensis*)、豆状狭口螺(*Stenothyra fabariformis*)、习见恒河螺(*Gangetiavulgaris*)、长圆恒河螺(*Gangetialongirota*)、规则豆螺(*Bithyniaregularis*)等,指示了水体咸化的特征。

综上所述,沙河街组沉积时期整体为温暖的亚热带气候。沙三段沉积时期气候湿热,湖水不深,水体有一定规模,水质以微咸水至半咸水;进入沙二段沉积时期后,水体进一步变浅,加之气候

逐渐干燥,进一步加剧了湖水的咸化;沙一段沉积时期为相对安静的微咸水至半咸水的深水环境。

2.4 地球化学特征

2.4.1 碳氧同位素特征

碳氧同位素分析是目前碳酸盐岩研究的一个重要的方法,其可行性、可靠性和全球可对比性已得到了大量的证实^[17-19]。碳氧同位素对沉积介质的盐度和温度变化反映敏感^[20-24]。特别是侏罗纪以来沉积的白云岩,受后期成岩改造作用较弱,可以较好的反映其古沉积环境^[25-27]。

本次选取了辽西低凸起区域沙河街组碳酸盐岩岩心样品进行碳氧同位素测试,并根据 Urey^[20]提出的古温度计算公式(后经 Epstein^[21]、Shackleton^[22]进一步修正)、Epstein 和 Mayeda 建立的古盐度计算公式^[21]、Keith 和 Weber 提出的古盐度指数^[23]计算了古盐度指数、古盐度及古温度,分析结果见表 1。有如下几个特点:

(1) $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 具明显偏正, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 具明显高负值的特征。生屑白云岩 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值 $1.02\text{‰} \sim 6.10\text{‰}$, 平均值为 3.34‰ ; $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值 $-4.89\text{‰} \sim -15.88\text{‰}$, 平均值为 -12.02‰ 。陆屑白云岩 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值 12.26‰ ; $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值 -12.66‰ 。陆屑云质灰岩 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值 8.35‰ ; $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值 -10.53‰ 。对于不同岩性的碳酸盐岩样品,碳同位素值具有明显的规律性,陆屑灰岩较陆屑白云岩低,表明白云石的形成可能与强蒸发环境及海水的侵入有关;生屑白云岩较陆屑白云岩低,这可能与古生物介壳 ^{12}C 富集有关。氧同位素在沉积后的交换作用很强,使沉积物中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值随地质年代的变迁而发生变化。本区 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 具明显高负值的特征,明显低于现代海洋 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 的平均值 -7‰ 。根据前人的研究^[25],成岩作用越强, $\delta^{18}\text{O}$ 值越低。表明研究区受到了明显的白云石化作用,白云石化作用越强, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值越低。

(2) 在漫长的地质历史中,原始沉积物中的 $^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值受成岩作用及成岩环境影响,从而降低了 $^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值测定古盐度、古温度的精度,但对于同一地区,由于其成岩环境基本一致,仍然可以定性的反映不同岩石的古温度、盐度的相对大小。陆屑白云岩较生屑白云岩具有较高的古盐度、陆屑白云岩和生屑白云岩较陆屑灰岩

具有较高的古温度,也进一步说明研究区白云岩的成因与高温炎热的强蒸发环境有关。古盐度计算得到的古温度可达到 100 °C,远高于古沉积介质的温度,这可能与后期热液流体的交换有关,而样品 5 由于物性差,受后期热液流体的改造较弱。

(3)根据前人对大量的碳酸盐岩样品的古盐度指数研究^[25],淡水碳酸盐岩的 Z 值一般 <120,咸水碳酸盐岩的 Z 值一般 >120。研究区所有样品的 Z 值均 >120,表明研究区碳酸盐岩是在咸水环境下形成。

表 1 辽东湾坳陷辽西低凸起地区沙河街组碳酸盐岩碳、氧同位素分析数据

Table 1 Carbon and oxygen isotopic data of the Shahejie Formation carbonate rocks in Liaoxi low uplift area of Liaodongwan Depression

样品号	岩性	井深/ m	层位	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/$ ‰	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/$ ‰	古盐度 指数 Z	古温度 T/°C	古盐度 S/‰
1	陆屑白云岩	2 234.3	E ₂ S ₃	12.26	-12.66	146.10	93.83	14.00
2	生屑白云岩	1 877.35	E ₂ S ₁	3.86	-15.58	127.45	116.24	9.21
3	生屑白云岩	1 639.68	E ₃ S ₁	6.1	-14.5	132.57	107.77	10.98
4	生屑白云岩	2 047.2	E ₃ S ₁	2.37	-13.1	125.63	97.17	13.28
5	生屑白云岩	2 341.0	E ₃ S ₂	1.02	-4.89	126.95	43.25	26.74
6	陆屑灰岩	2 224.7	E ₃ S ₂	8.35	-10.53	139.16	78.70	17.49

注:古盐度指数 $Z=2.048 \times (\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}+50)+0.498 \times (\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}+50)$;古盐度 $S=(\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}+21.2)/0.61$;古温度 $T=16.9-4.38 \times (\delta\text{C}-\delta\text{w})+0.10 \times (\delta\text{C}-\delta\text{w})^2$,其中 $\delta\text{C}=41.2$, $\delta\text{w}=40.93+1.04093 \times \delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 。

2.4.2 微量元素特征

对于同一地区,不同层段之间的微量元素含量的变化往往是各种元素本身的地球化学性质与形成环境所导致的必然结果。本次选取具有连续微量元素分析的 JZ1 井的 B 元素分析 JZ 油田沙河街期沉积演化规律。通过前人的研究,水体中 B 元素含量与盐度呈线性关系。

自然环境中 B 元素含量变化较大,变化范围 $(0.15 \sim 980) \times 10^{-6}$,一般海相沉积物中 B 元素含量 $>100 \times 10^{-6}$,陆相淡水沉积物 $<100 \times 10^{-6}$ ^[28]。JZ 油田 B 元素含量为 $(26 \sim 85) \times 10^{-6}$,所有样品 B 元素含量 $<100 \times 10^{-6}$,显示了湖泊沉积物的 B 元素特征。各地质历史时期 B 元素含量的盈亏反映了湖盆水体的咸化与淡化的交替过程。JZ 地区 B 元素含量在沙二段末期达到顶峰(图 3),表明 JZ 地区沙河街期湖盆水体在沙二段末期盐度达到极大值,进一步证实了沙三段和沙二段沉积时期海水侵入或者强蒸发的过程。

3 白云岩成因分析

结合以上对生屑白云岩岩性、古生物和地球化学特征及其古环境的分析,认为研究区生屑白

云岩受古地貌和沉积介质的化学性质共同作用形成。

研究区白云岩主要分布在辽西低凸起斜坡部位,其中具有硬的基底滨浅湖台地(JZ5 井区)是白云岩分布的主要区域,另外,滨浅湖的局部隆起带也是陆屑白云岩或生屑白云岩分布的主要区域,并发育大量的反映高能环境的鲕粒。隆起带两侧随着水体的加深逐步过渡为褐灰色泥岩及灰白色灰质页岩(图 4)。具有硬的基底的滨浅湖台地及隆起带有利于生物的附着,附近淡水的注入也带来了丰富的有机质,都对生物的富集具有重要的积极作用。

对于化学岩类,沉积介质的化学性质对其成因起了决定性作用,综合前人的研究^[29-32],形成白云岩至少需要满足以下 4 个条件:①高 Mg/Ca 比;②高盐度;③较高的 pH 值;④较高温度(28~35 °C 或更高)。水体中丰富的藻类,通过光合作用,消耗了水体中大量的 CO₂,而水体中的 CO₂ 主要由 HCO₃⁻ 产生(2HCO₃⁻ → CO₃²⁻ + CO₂ ↑ + H₂O)。随着 CO₂ 被消耗,水体中的 HCO₃⁻ 也越来越少,使得 pH 值逐渐升高。同时,CO₃²⁻ 越来越多,当 CO₃²⁻ 达到一定浓度,将与 Ca²⁺ 发生化学反应,生成 CaCO₃ 沉淀。从碳氧同位素分析本

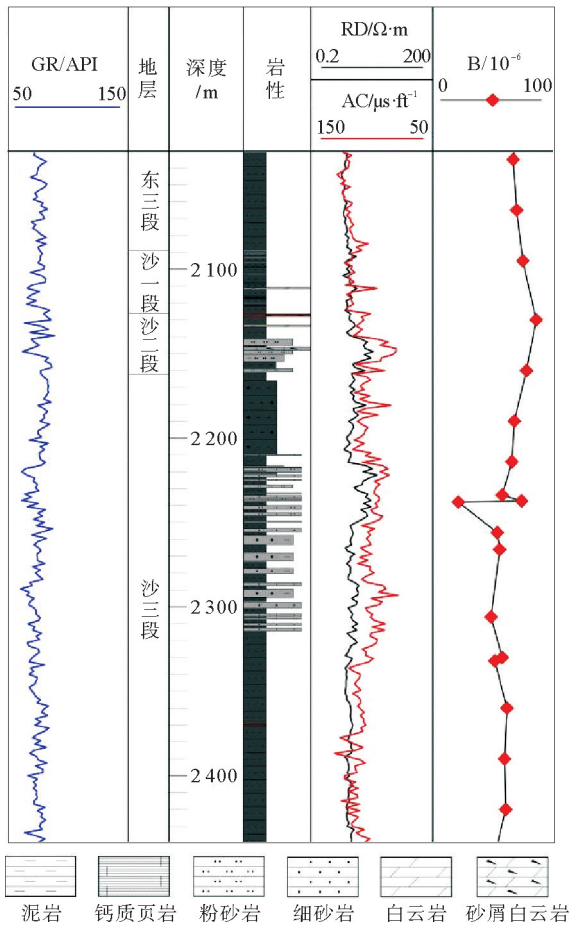


图4 JZ1井沙河街组B元素含量变化

Fig.4 Changes of B element content in Shahejie Formation of JZ1 well

区具有较高的水体温度,这也使得水体中 CO_3^{2-} 过饱和。沙二段沉积时期,湖盆的沉降,为海水的侵入提供了可能,也为白云岩的形成带来了高盐度海水、并携带大量的 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 。通过前面的分析,我们知道研究区沙二段沉积时期,气候干燥、蒸发作用强,加剧了水体的咸化。研究区沙二段发育大量的二螺化石等富集 Ca^{2+} 生物,使得 Mg/Ca 比逐步提高。这使得 $\text{CaCO}_3 \rightarrow (\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$ 形成白云岩的关键一步成为可能。

4 白云岩沉积模式

JZ地区沙二段储集层为陆源碎屑与生屑云岩共存的混合沉积的类型,表现为扇三角洲沉积→湖湾(滨浅湖台地)→滨浅湖隆起带→深湖-半深湖沉积相带逐渐过渡(图5)。位于半封闭湖湾区的D1井和W83井以黑灰色油页岩和泥岩为主,位于滨浅湖隆起带的D4和JZ2井以白云岩、砂屑白云岩为主,由于滨浅湖隆起带的阻挡作用,使得湖浪的携砂能力大大降低,使得砂质碎屑在此沉降;位于硬的基底的滨浅湖台地(JZ5井区),由于受陆源碎屑干扰较少,砂屑含量则大大降低,以生屑白云岩为主。根据研究区的古地貌和白云岩分布情况,建立了研究区滨浅湖台地渗透回流白云岩成因模式和滨浅湖隆起带混合水成因模式(图5)。

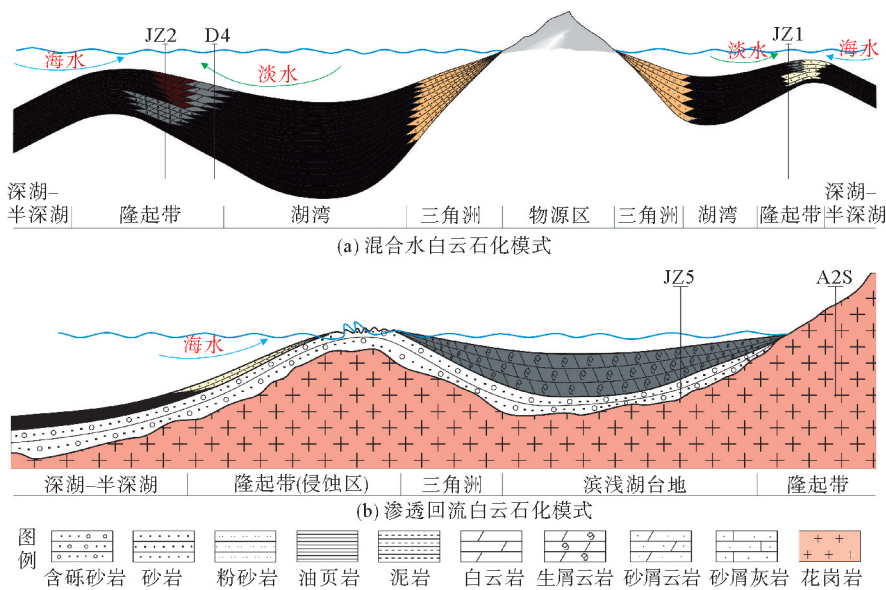


图5 JZ油田沙河街组白云岩成因模式

Fig.5 Dolomite genetic model for Shahejie Formation in JZ Oilfield

根据 Badiozamani^[33]提出的混合水白云石化作用机理,5%~30%的海水与淡水的混合液,将发生方解石被白云石交代。这很好的解释了本区具有湖湾阻隔的滨浅湖隆起带上薄层白云岩的成因,由三角洲带来的淡水与海侵带来的海水在此交汇,使得先期形成的方解石被白云石交代,微小的方解石颗粒被交代成具雾心亮边的粉晶白云石。由于混合水白云石化形成条件的局限性,使得白云石化常常不彻底,灰质含量高,个别井段甚至发育云质鲕粒灰岩。滨浅湖隆起带又往往具有较强的波浪作用,因此易形成鲕粒灰岩或云岩。

根据最先由 Adams 等^[34]提出渗透回流模式,在本区相对封闭的滨浅湖台地环境中,由于与广海的连通性不好,在蒸发作用下必然形成高盐度卤水。富 Mg^{2+} 的卤水密度较大,向下渗透至未固结的碳酸钙沉积物中发生白云石化。沙二段沉积期,JZ5 井处于花岗岩潜山边缘(据邻近的 A2S 井揭示),这样的“硬底”环境使得水体能长期保持清澈,有利于底栖生物生长繁殖,这对 $CaCO_3$ 的形成极为有利,后期经历富 Mg^{2+} 的卤水交代形成白云石。因此,在 JZ5 井附近沙二段形成巨厚的生屑白云岩。镜下薄片观察表明,孔隙愈是发育,方解石愈被交代的更加彻底。

5 结论

通过岩石学、矿物学和地球化学特征的综合分析,结合前人的白云岩成因研究成果,对辽东湾拗陷 JZ 地区沙河街组湖相白云岩成因及沉积模式进行了探讨。

(1)沉积介质的化学性质对 JZ 地区沙二段白云岩形成起了关键作用,而沉积介质的化学性质又与古环境和古气候相关。沙二段沉积时期,芸香粉属和麻黄粉属共生,表明气候变的干燥;沙河街沉积期藻类的繁盛,使得水体的 pH 值提高;大量的介壳类化石的出现,消耗了水体中大量的 Ca^{2+} ;本区 $\delta^{13}C_{PDB}$ 具明显偏正,反映其较高的的盐度;微量元素 B 含量的变化也进一步证实了自沙三段以来水体逐渐咸化的过程。这些古生物及地球化学特征证实了沙二段沉积时期高 Mg/Ca 比、高盐度、较高的 pH 值、较高温度等形成白云岩的必要条件。

(2)研究区以生屑白云岩及含砂屑的鲕粒白云岩为主,古地貌控制着 JZ 地区各类白云岩的分布。巨厚的生屑白云岩,主要分布在具有硬的基地的滨浅湖台地,而含有较多砂屑的鲕粒白云岩或鲕粒灰岩则主要分布在具有一定水深的滨浅湖隆起带之上。结合经典的白云岩成因学说和研究区白云岩的特征,建立了研究区 2 类白云岩的成因模式。位于滨浅湖台地地区的 JZ5 井区,适宜碳酸盐岩的形成、沉积了巨厚的生屑白云岩,生屑含量高、陆屑含量低、方解石被交代的更加彻底,建立了该类白云岩渗透回流成因模式。具湖湾阻隔的滨浅湖隆起带,易形成具雾心亮边的粉晶白云岩和具有同心圆结构的鲕粒云岩或生物碎屑云岩,建立了该类白云岩的混合水成因模式。

参考文献:

- [1] 姚益民,梁鸿德,蔡治国,等.中国油气区第三系(IV)渤海湾盆地油气区分册[M].北京:石油工业出版社,1994:1-240.
- [2] 彭世福,许红,温珍河.试论渤海湾盆地沙河街组海侵作用与油气[J].海洋地质与第四纪地质,1989,9(1):17-28.
- [3] 袁文芳,陈世悦,曾昌民,等.渤海湾盆地东营凹陷古近纪 Paleodictyon 遗迹化石的发现及其意义[J].地质科学,2007,42(4):779-786.
- [4] 孙钰,钟建华,袁向春.惠民凹陷沙河街组一段白云岩特征及其成因分析[J].沉积与特提斯地质,2007,27(3):78-84.
- [5] 南山,韩雪芳,潘玲黎,等.辽东湾海域锦州 20-2 气田沙河街组沉积相研究[J].岩性油气藏,2013,25(3):36-42.
- [6] 赵俊青,夏斌,纪友亮,等.湖相碳酸盐岩高精度层序地层学探析[J].沉积学报,2005,23(4):646-656.
- [7] 戴朝成,郑荣才,文华国,等.辽东湾盆地沙河街组湖相白云岩成因研究[J].成都理工大学学报(自然科学版),2008,35(2):187-193.
- [8] 曲长伟,林春明,蔡明俊,等.渤海湾盆地北塘凹陷古近系沙河街组三段白云岩储层特征[J].地质学报,2014,88(8):1588-1602.
- [9] 潘文静,王清斌,刘士磊,等.渤海海域石臼坨地区古近系沙河街组湖相生屑白云岩成因[J].古地理学报,2017,19(5):835-848.
- [10] 徐长贵,于水,林畅松,等.渤海海域古近系湖盆边缘构造样式及其对沉积层序的控制作用[J].古地理学报,2008,10(6):627-635.
- [11] 徐长贵,许效松,丘东洲,等.辽东湾地区辽西凹陷中南部古近系构造格架与层序地层格架及古地理分析[J].古地理学报,2005,7(4):449-459.
- [12] 常艳艳,林畅松,周心怀,等.辽西凹陷北洼沙河街组沉

- 积层序结构与有利砂体分布[J]. 地球科学, 2014, 39(10):1371-1380.
- [13] 朱筱敏, 董艳蕾, 杨俊生, 等. 于水. 辽东湾地区古近系层序地层格架与沉积体系分布[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2008, 38(S1):1-10.
- [14] 冯增昭, 王英华, 刘焕杰, 等. 中国沉积学[M]. 北京:石油工业出版社, 1994: 105-127, 623-631, 662-685.
- [15] 刘士磊, 王启飞, 龚莹杰, 等. 渤海海域古近纪微体化石组合特征及油气勘探意义[J]. 地层学杂志, 2012, 36(4): 700-709.
- [16] 项 华, 周心怀, 任志勇, 等. 渤海湾盆地锦州 JZ25-1 南地区古近纪生物组合及地层特征[J]. 微体古生物学报, 2005, 22(3):322-328.
- [17] 张 葳, 李智武, 冯 逢, 等. 川中东北部中一下侏罗统湖相碳酸盐岩碳氧同位素特征及其古环境意义[J]. 古地理学报, 2013, 15(2):247-259.
- [18] 曹姝璐, 朱志军, 刘 腾, 等. 信江盆地白垩纪周田组碳、氧同位素特征及意义[J]. 四川地质学报, 2016, 36(3): 506-509.
- [19] 贾 鹏, 李 伟, 李 明, 等. 四川盆地东部地区寒武系洗象池群碳酸盐岩碳、氧同位素特征及其意义[J]. 古地理学报, 2017, 19(3):503-512.
- [20] Urey H C. Oxygen isotopes in nature and in the laboratory [J]. Science, 1948, 108(2810):489-496.
- [21] Epstein S, Mayeda T. Variation of O^{18} content of waters from natural sources [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1953, 4(5):213-224.
- [22] Shackleton N J. Attainment of isotopic equilibrium between ocean water and the benthonic foraminifera genus *Uvigerina*: isotopic changes in the ocean during the last glacial [J]. Colloques Internationaux du Centre National de Recherche Scientifique, 1974, 219: 203-209.
- [23] Keith M L, Weber J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1964, 28(10/11):1787-1816.
- [24] Weber J N, Williams E G, Keith M L. Paleoenvironmental significance of carbon isotopic composition of siderite nodules in some shales of Pennsylvanian age [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1964, 34(4):814-818.
- [25] 张秀莲. 碳酸盐岩中氧、碳稳定同位素与古盐度、古水温的关系[J]. 沉积学报, 1985, 3(4):17-30.
- [26] 刘 策, 曹颖辉, 周 波, 等. 古城地区中下奥陶统白云岩碳氧同位素特征及成因[J]. 特种油气藏, 2017, 24(2): 30-34.
- [27] 任 影, 钟大康, 高崇龙, 等. 四川盆地东部下寒武统龙王庙组碳、氧同位素组成及古环境意义[J]. 海相油气地质, 2016, 21(4):11-20.
- [28] 王永炜, 李荣西, 高胜利, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷湖相碳酸盐岩微量元素特征及沉积环境[J]. 石油实验地质, 2017, 39(6):849-857.
- [29] 赫云兰, 刘 波, 秦 善. 白云石化机理与白云岩成因问题研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 46(6): 1010-1020.
- [30] 江青春, 胡素云, 汪泽成, 等. 四川盆地中二叠统中-粗晶白云岩成因[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(4):503-510.
- [31] 胡作维, 黄思静, 张 超, 等. 碳酸盐白云化作用模式研究进展 [J]. 海洋地质前沿, 2010, 27(10):1-13.
- [32] Eugster H P. Geochemistry of evaporitic lacustrine deposits [J]. Annual Review of Earth & Planetary Sciences, 1980, 8(1):35-63.
- [33] Badiozamani K. The dorag dolomitization model application to the Middle Ordovician of Wisconsin [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1973, 43(4):965-984.
- [34] Adams J F, Rhodes M L. Dolomitization by seepage refluxion [J]. AAPG Bulletin, 1960, 44:1912-1920.

GENESIS OF THE DOLOMITE IN THE SHAHEJIE FORMATION OF JZ OILFIELD, BOHAI BASIN

YAN Guanshan, LIU Zongbin, SONG Hongliang, HAN Xuefang,
ZHANG Zhenjie, CHENG Dayong

(Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China)

Abstract: Bioclastic dolomite and sand-bearing oolitic dolomite are widely distributed in the study area. Drilling shows that the lithology and thickness of dolomite vary greatly from well to well. In order to reveal the genesis of the dolomite, the physical and chemical properties of the depositional media, paleoclimate and paleoenvironment of the area are systematically studied by means of sporopollen and micro paleontology, carbon and oxygen isotopes and trace element B. It is found that since the 3rd Member of the Shahejie Formation, warm subtropical climate had gradually turned to dry, and the water body become salty, which provided basic conditions for the dolomite to form. On the nearshore and shallow lake platform with hard basement, however, water was clean, which was in favor of the growth and reproduction of benthic organisms and the formation of limestone and bioclastic dolomite with huge thickness. As the bioclastic content is high, pores are well developed, and the calcite is also more thoroughly replaced by dolomite. Upon the basis, a seepage reflux model for such kind of dolomite platform is established by the authors. In the uplifting zone of the nearshore and shallow parts of the lake, where fresh and saline water mixed, it is easy to form the silty dolomite with sparry edge and cloudy nucleus and the oolitic dolomite or bioclastic dolomite with concentric structure. However, dolomitization is often incomplete, calcite content is high sometimes, and therefore dolomitic oolitic limestone is common in some wells. For these dolomitic deposits, a genetic model of mixed water is proposed specially for nearshore-shallow lake uplift zones. The genetic models of lacustrine dolomite are of important significance for hydrocarbon exploration in carbonate rocks in Bohai Bay Basin.

Key words: bioclastic dolomite; genesis of dolomite; sedimentary model; Shahejie Formation