

滨里海盆地东缘北特鲁瓦地区白云岩特征 及其储层发育机制

郭凯¹ 程晓东¹ 范乐元¹ 严世帮² 倪国辉¹ 付海波¹

(1. 中国石油长城钻探工程有限公司解释研究中心 北京 100101; 2. 成都理工大学沉积地质研究院 成都 610059)

摘要 白云岩是滨里海盆地盐下石炭系碳酸盐岩的重要储层类型。在岩芯、薄片、物性与地球化学等资料分析的基础上,对研究区KT-I油组的白云岩类型与储集性能进行了分析,并探讨了其储层发育的控制因素与模式。结果表明,白云岩类型与其储集物性具有较明显的相关性,以生屑铸模孔及溶蚀扩大孔为主的残余生屑白云岩物性与含油气性最好,以晶间(溶)孔为主的粉细晶白云岩和以生屑铸模孔及晶间孔为主的泥粉晶白云岩次之,而以晶间微孔为主的泥晶白云岩最差,难以成为有效储层。原生孔隙发育的相对高能生屑滩环境是该区优质白云岩储层发育的相带基础。晚石炭世准同生期大气淡水溶蚀作用与以渗透回流白云化(白云石有序度分布于0.32~0.67, $\delta^{13}\text{C}$ 介于-0.22‰~5.94‰, $\delta^{18}\text{O}$ 介于-1.09‰~2.45‰)为主的早期白云化作用为白云岩储层早期孔隙的发育与保存奠定了坚实的基础;早二叠世以来埋藏期各类裂缝的发育及酸性流体的溶蚀作用则对储层的晚期扩孔改造至关重要。

关键词 储集特征 白云岩化 溶蚀作用 石炭系 滨里海盆地

第一作者简介 郭凯 男 1986年出生 博士 石油地质综合研究 E-mail: gk1228@126.com

中图分类号 TE122.2 **文献标识码** A

0 引言

作为哈萨克斯坦境内油气储量和资源量巨大的含油气盆地,滨里海盆地盐上与盐下层系已发现了众多油气田。其中,尤以盐下层系最为显著,盆地内大部分探明油气储量均分布在盐下层系内,已发现田吉兹、扎纳若尔、卡莎甘等9个油气储量大于5亿桶的大型或特大型油气田^[1]。而石炭系台地相背景下的灰岩和白云岩储层是盐下层系的最主要储层^[1-2],因此对白云岩储层的研究意义重大。许多学者研究认为,白云岩储层的发育可受原岩沉积环境^[3]、白云化作用^[3-6]、准同生期或表生期大气淡水溶蚀作用^[5,7]、埋藏期溶蚀作用^[8]、热液交代或蚀变作用^[8-10]及断裂或裂缝作用^[10-12]等多种因素控制,更有学者提出了TSR及超压作用促进白云岩次生孔隙的发育和保存^[12-13]等新颖观点。滨里海盆地石炭系主要包括KT-I和KT-II两套碳酸盐岩沉积,白云岩储层为KT-I油层组的主要储集岩性。前人主要从白云岩储层储集特点及白云化成因的角度探讨了KT-I白云岩储层特征^[2,14-16],如赵中平对比分析了扎纳若尔和肯基亚克油田白云岩储层特征^[2]。但是,针对盆

地东缘近年来新发现的北特鲁瓦油田及其周边石炭系白云岩储层却少有系统研究,对该区白云岩储层的形成原因也知之甚少,限制了对该区白云岩的进一步勘探开发工作。因此,本文旨在白云岩储层类型及含油气性分析的基础上,探讨该区白云岩储层发育的控制因素及发育模式,进而加深对该区白云岩储层油气分布规律的认识。

1 地质背景

北特鲁瓦油田位于滨里海盆地东缘中区块,在同属中区块的扎纳若尔油田南部,构造上处于延别克—扎尔卡梅斯隆起与乌拉尔褶皱带之间的东南部拗陷带(图1a)。盆地东缘在晚泥盆世—晚石炭世发育多个浅海碳酸盐岩台地,沉积了厚层碳酸盐岩,该时期西部为古地貌高地,地层东厚西薄,呈现出东倾特征;石炭纪末期到早二叠世盆地东缘受西部乌拉尔褶皱造山带挤压的影响,地层发生明显反转,至晚二叠世形成了至今东高西低的构造形态^[17-18](图1b)。北特鲁瓦地区石炭系台地碳酸盐岩主要包括上部KT-I和下部KT-II两套油层组,KT-I油层组由上至下可分为A、B和B共3段,白云岩主要发育于A段的A₃

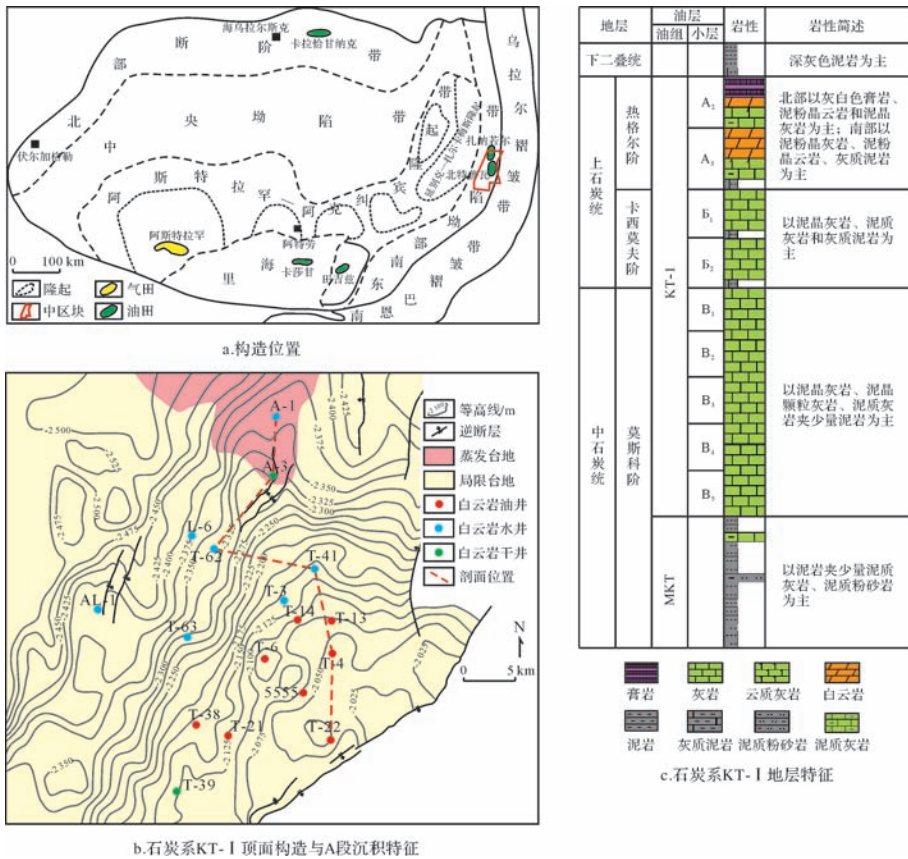


图1 北特鲁瓦地区KT-I构造与地层特征

Fig.1 The structural and stratigraphic characteristics of KT-I in North Truva

小层,少量发育于上部A₂小层(图1c)。KT-I油组主要发育开阔台地、局限台地和蒸发台地相,其中,A段和B段主要发育局限台地和蒸发台地相^[17,19]。勘探实践表明,该区KT-I油组工业油流井主要集中于白云岩储层,但白云岩的发育并不意味着油层的分布,发育于油田主体构造高部位的白云岩往往含油性较好,而向西部斜坡部位白云岩含油性则明显变差(图1b)。因此,研究白云岩储层特征及其形成分布的控制因素对于深入该区白云岩油藏勘探具有重要意义。

2 白云岩特征

2.1 白云岩类型与储集特征

结构特征是白云岩分类的主要依据,以往对白云岩的分类主要侧重对其晶体结构的分类,而目前国内外多注意到白云岩类型与其结构组分之间的关系^[20-21],更倾向于根据残余结构组分和晶体特征等进行综合分类^[21-23]。本次结合前人的结构分类方法以残余颗粒结构特征、晶体特征及发育环境等对研究

区白云岩进行了分类,并分析了各类型的储集特征(表1)。

2.1.1 残余生屑白云岩

此类白云岩见于以T-4井A₃小层为代表的北特鲁瓦地区东部构造高部位,少量见于T-62井A₃小层。主要包括残余生屑粉晶云岩和(泥)粉晶残余生屑云岩,含较多的有孔虫、蜓类等生屑颗粒,生屑含量主要在30%~75%,平均含量达51%。据薄片观察,其原岩为粒屑结构,颗粒多可分辨,交代残余结构明显,生屑颗粒已被不同程度的溶蚀、交代,甚至仅保留轮廓,形成残余粒屑结构或残余粒形结构^[21,23],主要以白云化的泥—粉晶胶结物或颗粒支撑为主。较高的颗粒含量表明其原岩形成于相对高能的浅滩环境,储集空间主要为粒间(溶)孔、各种生屑颗粒的体腔孔、铸模孔及溶蚀扩大孔,较强的溶蚀作用使得此类白云岩溶孔溶洞发育,孔洞直径主要介于0.1~5 mm,甚至可达到厘米级,多形成孔缝洞连通的网状储集空间(图2a~c),在岩芯上可见大小不一连通较好的溶洞(图2d)。

表1 北特鲁瓦地区 KT- I 白云岩类型与特征

Table 1 Classification and characteristics of dolostones in KT- I of North Truva

类型	主要特征	主要储集空间	发育环境	代表井
残余生屑白云岩	残余粒屑或粒形结构,生屑等颗粒含量高	粒间(溶)孔、体腔孔、生屑铸模孔、溶扩孔洞	局限台地内较高能生屑滩	T-4井 A ₃ 层
含膏粉细晶白云岩	晶粒结构,粉细晶为主,生屑等颗粒含量低	晶间溶孔、膏模孔	局限台地内较高能杂屑滩	T-62井 A ₃ 层
与膏盐层共生粉晶白云岩	晶粒结构,粉晶为主,几乎无颗粒	晶间溶孔、膏模孔	蒸发台地内低能灰泥坪	A-3井 A ₃ 层
含膏泥粉晶白云岩	晶粒结构,泥粉晶为主,生屑等颗粒含量低	晶间(溶)孔、生屑铸模孔、壳壁孔、膏模孔	局限台地内低能灰泥坪	T-22井 A ₃ 层
含膏泥晶白云岩	晶粒结构,泥晶为主,生屑等颗粒含量低	晶间微孔、生屑铸模孔、壳壁孔、膏模孔	局限台地内低能灰泥坪	T-41井 A ₃ 层

2.1.2 含膏粉细晶白云岩

此类白云岩主要分布于西斜坡低部位的 L-6 井和 T-62 井 A₃ 小层,多为粉晶至细晶级白云石,晶粒主要介于 0.01~0.1 mm,为半自形—自形晶。其残余颗粒类型较多,以有孔虫和棘皮类等生屑、藻类和砂砾屑为主,残余含量多在 8%~25%,原始结构大多遭到强烈破坏,主要以残余颗粒影像的晶粒结构为主^[21],细晶白云石中“雾心亮边”结构明显。结合薄片分析认为,其原岩主要为相对高能的杂屑滩灰岩,孔隙类型以晶间溶孔为主,孔径大小不一,主要在 0.02~0.15 mm,此外还可见到较多的膏模孔和少量粒模孔(图 2e~f)。

2.1.3 与膏盐层共生粉晶白云岩

此类白云岩见于 A-3 井区附近的蒸发台地内,往往与石膏层共生,其上可见含白云石的硬石膏岩(图 2g)。白云岩基本不含残余生屑颗粒,几乎全由等晶的半自形—自形粉晶白云石组成,晶粒大小主要在 0.01~0.05 mm。白云岩与膏盐层共生表明其具有萨布哈地层序列特征,由蒸发浓缩作用形成的高 Mg/Ca 卤水使得潮上与毗邻的潮下灰泥沉积物发生准同生白云化,而大气淡水的进入导致硬石膏及未白云化的文石、高镁方解石等溶解,使白云石菱面体汇集形成晶体支撑结构^[24]。其孔隙主要以较均匀的晶间溶孔为主,孔径主要分布在 0.02~0.1 mm(图 2h)。

2.1.4 含膏泥粉晶白云岩

此类白云岩以北特鲁瓦地区东部构造高部位的 T-22 井 A₃ 小层为代表,主要由泥—粉晶级白云石组成,晶粒多小于 0.05 mm,以半自形晶为主,部分为他形晶,残余生屑颗粒含量较少,含量在 9%~15%,还

含少量硅质、泥质,主要包括含生屑泥粉晶白云岩和灰质白云岩。岩芯上多呈灰褐色,见溶孔发育,但未见与白云岩互层产出的硬石膏层,白云岩总体表现出较明显的斑块状特征,说明其白云化作用并不彻底(图 2i)。根据岩芯薄片分析其原岩可能属于局限台地内相对低能的潮坪沉积,孔隙主要以晶间(溶)孔、生屑铸模孔和壳壁孔为主,此外还发育部分膏模孔,并且可见粒状石膏充填生屑铸模孔或体腔孔(图 2j)。

2.1.5 含膏泥晶白云岩

此类白云岩主要见于北特鲁瓦构造较低部位的 T-41 井 A₃ 小层,主要由泥晶白云石组成,晶粒极小,以他形晶为主,残余生屑颗粒含量低,主要在 5%~18%,平均 11%。其原岩为局限台地内潮下低能灰泥沉积物,孔隙类型包括晶间微孔、生屑铸模孔和壳壁孔,以发育较多的柱状或平行四边形膏模孔为重要特征,较致密的泥晶白云石使其孔隙连通性很差(图 2k~l)。

2.2 白云岩物性与含油气性

对各类型白云岩的实测孔渗分析表明,残余生屑白云岩物性最好,其孔隙度多大于 8%,渗透率一般大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最高可达数百毫达西;而含膏粉细晶白云岩物性相对较差,孔隙度多在 10%左右,渗透率变化较大,一般多介于 $0.05 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;含膏泥粉晶白云岩物性也较差,孔隙度主要在 10%~15%,渗透率最高仅为数个毫达西;含膏泥晶白云岩物性最差,渗透率多在 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下(图 3)。结合试油资料可知,以 T-4 井 A₃ 小层 2 339~2 352 m 为代表的残余生屑白云岩储层试油获约 390 t/d 的

高产油流,而以 T-22 井 A₃ 小层 2 368~2 376 m 为代表的泥粉晶白云岩储层仅获不到 23 t/d 的工业油流;发育于构造低部位的含膏粉细晶白云岩尽管物性类似于泥粉晶白云岩,但试油为水层,推测可能受构造位置较低的影响;而物性最差的泥晶白云岩试油也为水层(表 2)。与膏盐层共生粉晶白云岩缺少物性

与试油数据,但根据储集空间类型与孔径大小推测其储集性能应接近含膏粉细晶白云岩。综合物性分析与试油成果认为,残余生屑白云岩为研究区最优质白云岩储层,而泥粉晶白云岩和粉细晶白云岩次之,泥晶白云岩最差,即白云岩的类型与储层物性具有明显的相关性。

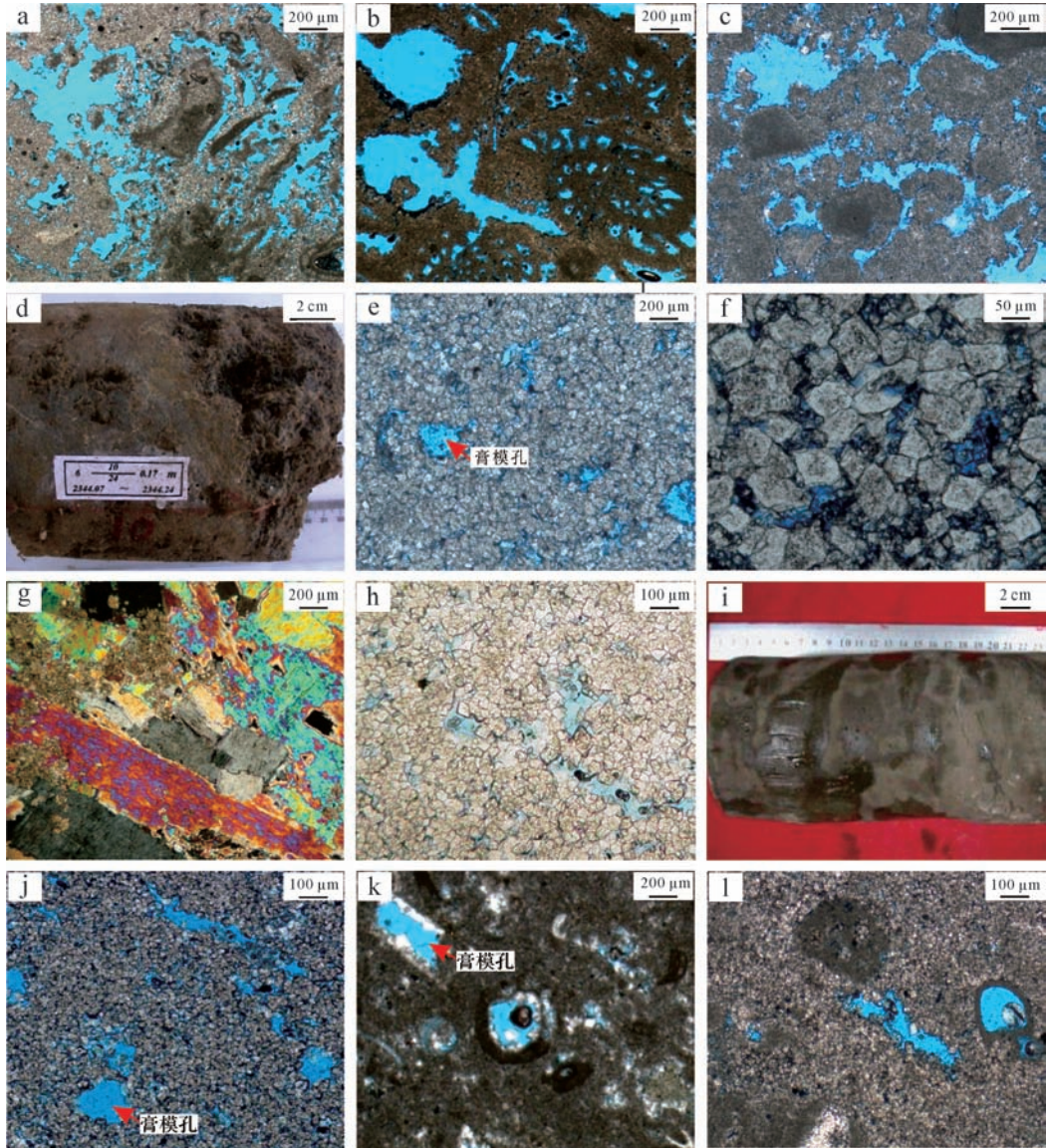


图2 白云岩岩芯及显微照片

a.泥粉晶残余生屑白云岩,生屑铸模孔、粒间溶蚀扩大孔、晶间溶孔及溶缝连为一体,T-4,A₃,2 344.8 m;b.泥晶残余蛭白云岩,发育铸模孔、蛭类体腔孔及溶蚀扩大孔,孔隙边缘与内部见黑色沥青,T-4,A₃,2 341.4 m;c.残余生屑白云岩,生屑被强烈泥晶白云化,粒间溶孔十分发育,T-62,A₃,2 656.5 m;d.灰色油斑溶孔溶洞白云岩,见厘米级溶洞,T-4,A₃,2 344.5 m;e.粉晶云岩,半自形晶为主,见生屑残片,晶间溶孔发育,含粗大膏模孔,T-62,A₃,2 662.3 m;f.细晶白云岩,自形晶为主,“雾心亮边”结构明显,晶间溶孔发育,黑色沥青半充填,L-6,A₃,2 720.6 m;g.板柱状硬石膏岩,部分硬石膏被泥粉晶白云石交代,A-1井,A₃,2 664.5 m;h.粉晶白云岩,半自形至自形晶,晶间溶孔发育,溶孔内见黑色沥青,A-1井,A₃,2 666 m;i.浅灰褐色油斑含溶孔白云岩,油斑呈斑块状分布,T-22,A₃,2 371 m;j.泥粉晶白云岩,半自形至他形晶,生屑铸模孔、晶间溶孔发育,见石膏交代蛭类残片,T-22,A₃,2 371 m;k.泥晶白云岩,发育晶间微孔、生屑铸模孔、壳壁孔及膏模孔,T-41,A₃,2 448.9 m;l.泥晶白云岩,发育晶间微孔及溶孔、生物体腔孔,孔隙连通差,T-41,A₃,2 453.3 m。

Fig.2 Core photographs and micrographs of dolostones

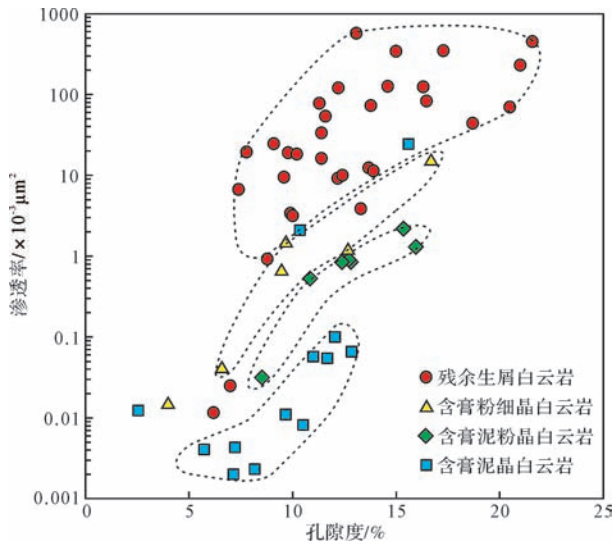


图3 白云岩孔隙度与渗透率交会图

Fig.3 The porosity and permeability cross plot for different types of dolostones

表2 不同类型白云岩储层试油结果

Table 2 Oil test results for different types of dolostones

井号	试油井段/m	储层类型	试油产量/l/d	试油结论
T-4	2 339~2 352	残余生屑白云岩	390	高产油层
T-22	2 367.8~2 376	含膏泥粉晶白云岩	<23	油气层
T-62	2 646~2 661	含膏粉细晶白云岩	22.8	水层
L-6	2 710~2 728	含膏粉细晶白云岩	—	水层
T-41	2 448~2 452	含膏泥晶白云岩	24.3	水层

3 储层发育的控制因素

3.1 有利沉积相带

白云岩基质孔隙除来自白云化过程中因白云石体积减小产生的孔隙增量外^[6],很大一部分继承自原岩孔隙,或不破坏原岩结构而继承,或破坏原岩结构而重新分布^[10],即原岩类型是控制白云岩基质孔隙发育的主要因素^[12]。而原岩类型显然受沉积环境控制,相对高能的滩相沉积原生孔隙发育,其原生孔隙在白云化后会以不同的形式被继承使得滩相白云岩具有较高的原生孔隙度,同时滩相灰岩较高的原生孔隙也为大气淡水等溶蚀流体及白云化流体的流动提供条件,有利于白云岩储层的形成及溶蚀改造。研究表明,该区优质颗粒白云岩储层主要发育在生屑滩等高能沉积环境,而较致密的泥粉晶或泥晶白云岩主要发育在灰泥坪或潟湖等低能环境^[17]。尽管原岩的原始结构受白云化作用破坏而难以完全恢复,但有时根据白云岩中的残余颗粒及其结构可推测原岩沉积环境^[3],如T-4井A₃小层的残余生屑白云岩具有较高的生屑颗粒含量,原岩沉积环境可能为台内高能滩,其孔隙度多在8%以上,平均达13.2%,渗透率高达数十毫达西;而T-41井A₃小层致密的泥晶白云岩生屑颗粒含量低且为泥晶结构,反映其原岩为低能沉积环境的产物,其平均孔隙度仅为9.2%,渗透率多低

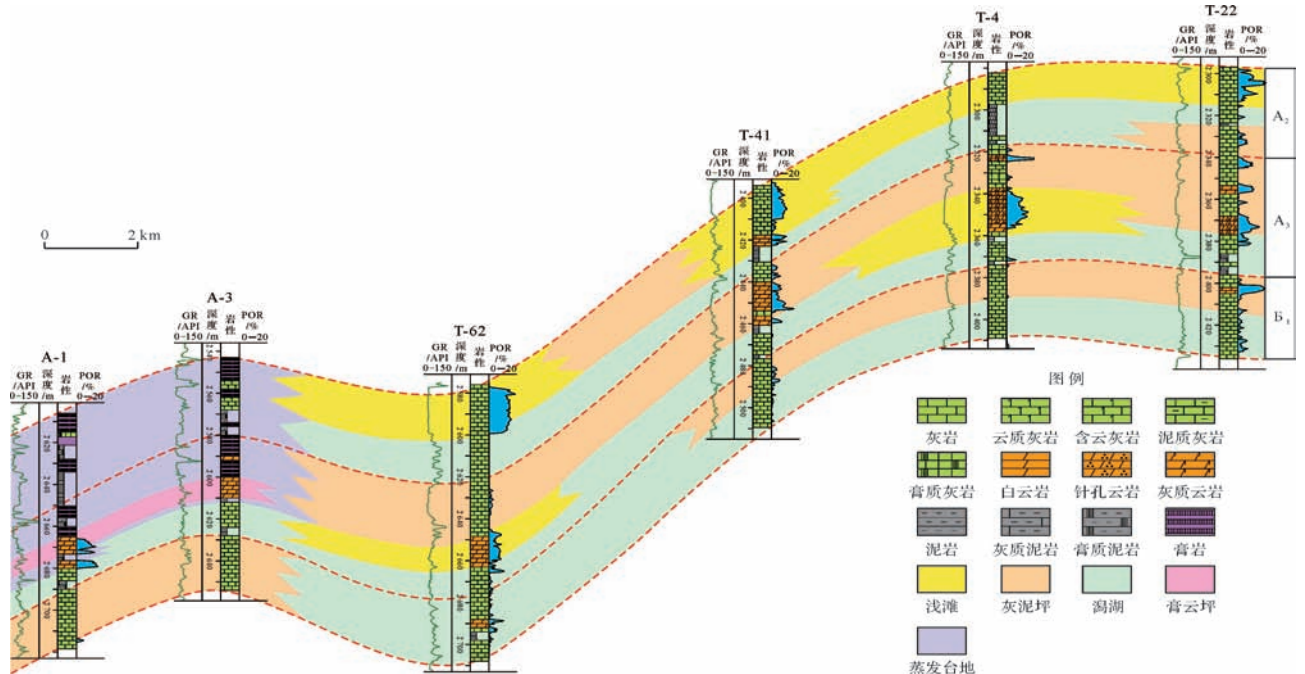


图4 北特鲁瓦地区KT-I白云岩沉积微相与孔隙度对比图(剖面位置见图1)

Fig.4 Cross section showing variations on microfacies and porosity for dolostones in KT-I of North Truva(section location is shown in Fig.1)

于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 3, 4)。可见, 原始沉积相带的差异是不同类型白云岩储层发育的重要控制因素, 水动力较强的滩相沉积是优质白云岩储层发育的基础, 并且滩相沉积又往往是沉积古地貌高点, 易受海平面升降变化而暴露, 从而更有利于大气淡水的溶蚀改造。

3.2 多期溶蚀作用

3.2.1 准同生期大气淡水溶蚀作用

研究表明, 自然伽马曲线能较敏感地反映地层中泥质含量变化及相应的海平面升降变化, 因而可作为识别碳酸盐岩沉积旋回的有效手段^[25], 本次通过对自然伽马曲线进行综合预测误差滤波分析 (INPEFA)^[26], 提取分析了目的层段的高频碳酸盐岩沉积旋回及海平面变化。根据 INPEFA 曲线的解释^[26]可知, T-4 井 A₃ 小层 2 320~2 370 m 包括三个厚度在 8~32 m 不等的高频旋回, 每个旋回均由完整的水进水退半旋回组成, 其白云岩多发育于海平面下降半旋回即向上变浅旋回的上部, 垂向上形成多套白云岩叠置发育的特点 (图 5)。这种特征意味着受海平面升降旋回的影响, 形成白云岩的灰岩原岩即颗粒滩甚至灰泥坪沉积物极易完全或局部暴露在大气淡水环境中。在大气淡水的淋滤作用下, 以不稳定矿物文石、高镁方解石为主的生屑等颗粒发生组构选择性溶解, 或产生大规模溶解使得颗粒内部结构破坏而形成生屑铸模孔, 或仅发生小规模溶解而保留颗粒结构形成粒内溶孔^[5] (图 2b), 其所形成的孔隙和溶解释放的镁离子还能进一步为渗透回流的白云化流体提供良好的通道和镁来源。对于蒸发台地膏云坪及局限台地内含石膏的碳酸盐沉积物, 大气淡水还可溶解石膏或未白云化的灰泥形成膏模孔等孔隙 (图 2e, k), 并可进一步使准稳定的泥晶白云石重结晶而使晶间孔隙增大^[27]。可见, 大气淡水溶蚀作用是白云岩储层早期孔隙发育的主要因素。

3.2.2 埋藏期酸性溶蚀作用

有机质成熟生烃所产生的有机酸和 CO₂ 进入碳酸盐岩储层后有利于溶蚀作用的发生, 可使得储层孔隙度有效增加, 从而进一步改造储层^[28]。与埋藏期烃类生成有关的酸性流体一般通过先期存在的优势孔隙通道进入储层中, 以非组构选择性溶蚀为主使得铸模孔少见, 可切割所有的组构单元甚至是晚期埋藏胶结物^[5], 酸性流体主要沿运移通道溶蚀加大早期形成的各类孔隙, 甚至溶解白云石晶粒 (图 6a), 最终可形成溶蚀孔洞, 研究区构造高部位的 T-4 井残余生屑白云岩及构造低部位的 T-62 与 L-6 井粉细晶白云

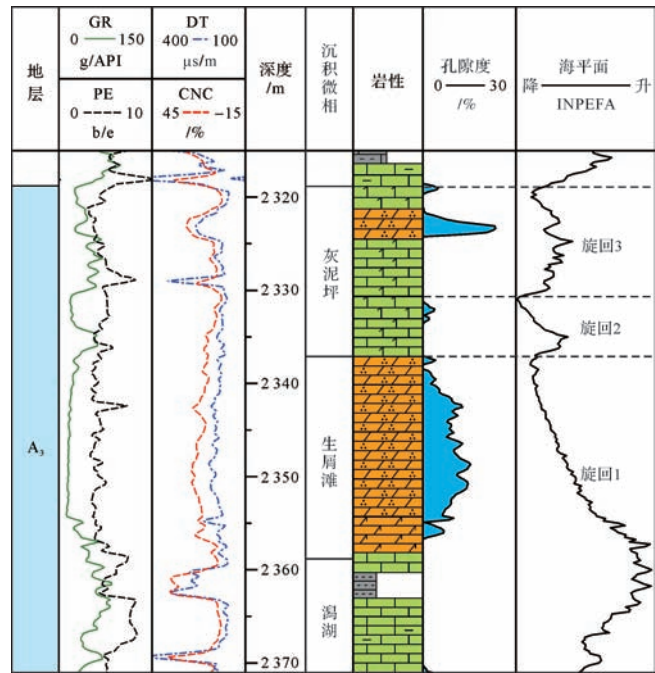


图 5 沉积旋回与白云岩发育位置的关系 (T-4 井, 岩性图例见图 4)

Fig.5 Relationship between sedimentary cycle and dolomite development (Well T-4, lithology legends are shown in Fig.4)

岩中均可见到此类晚期溶蚀扩大孔洞 (图 2a~c)。而且埋藏期酸性溶蚀作用形成的溶蚀孔洞内常可见黑色沥青 (图 2b, f, h), 以及书页状自生高岭石和自形石英 (图 6b)。由于该区白云岩发育层位远离 KT-I 顶部不整合, 溶孔内生自生高岭石不大可能是表生溶蚀的产物, 其与自生石英进一步表明了该区埋藏条件下酸性溶蚀作用的发生^[11], 而这种酸性流体很可能来自烃类生成作用。

3.3 早期白云化作用

据上述岩石学分析可知, 该区白云岩主要以晶粒细小 (泥—粉晶为主)、自形晶至他形晶均有的白云石组成, 这种晶粒细小的白云石很可能是在近地表、低温、高盐度环境下的白云化作用产物^[29]。研究区泥—粉晶白云石的有序度主要分布在 0.32~0.67 (图 7), 由于有序度主要受控于结晶温度^[30-31], 因而这种低有序度白云石应是在较低温度下的准同生阶段或成岩早期所形成。

对不同晶粒大小的白云岩碳、氧同位素进行分析可知, 其氧同位素分布在 $-1.09\text{‰} \sim 2.45\text{‰}$, 平均 0.476‰ , 碳同位素分布在 $-0.22\text{‰} \sim 5.94\text{‰}$, 平均 4.69‰ (表 3、图 8)。白云石氧同位素主要受成岩温度和白云化流体同位素组成的影响, 较高的温度 (如

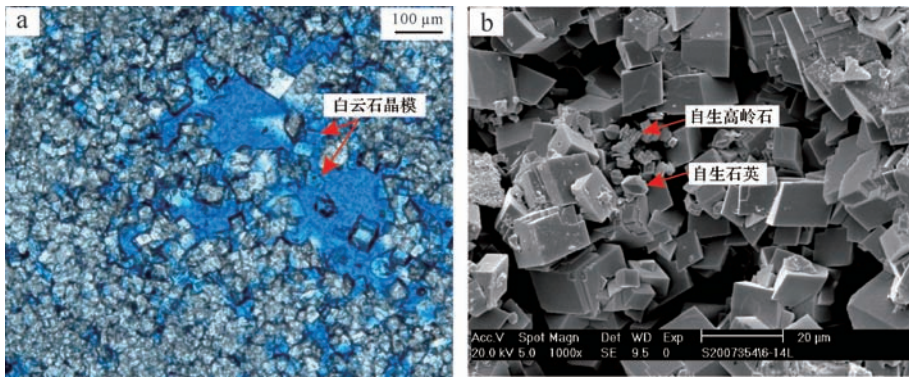


图6 白云岩酸性溶蚀标志

a. 粉晶白云岩中见白云石溶蚀晶模孔及沥青半充填, L-6, A₃, 2 722.82 m; b. 生屑粉晶白云岩溶孔内见书页状自生高岭石及自生石英, T-4, A₃, 2 344.77 m。

Fig.6 Acidic dissolution marks in dolostones

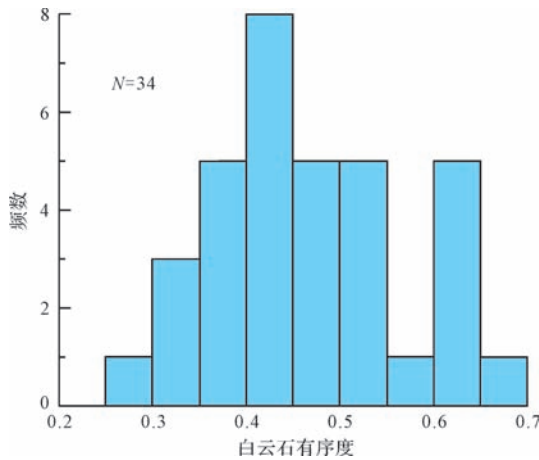


图7 白云石有序度分布直方图

Fig.7 Histogram of dolomite order degree

深埋或热液作用)或淡水的介入都会导致氧同位素组成表现出较强烈的贫¹⁸O特征^[9,32](图8);而其碳同位素组成主要受先存灰岩的影响,其次为甲烷生成和有机质热解作用^[32-33]。本区白云石氧同位素组成仅表现出轻微的负漂移甚至富¹⁸O的特征,明显不同于热液或埋藏成因的白云岩,表明其未受高温埋藏或深部热液作用的影响,而更接近低温条件下的渗透回流白云石(图8)。与石炭纪正常海相灰岩相比,其氧同位素组成也明显偏重,结合沉积环境认为该区强烈的蒸发环境使得其海水比正常海水相对富集¹⁸O,这种高密度蒸发海水向下交代碳酸盐沉积物所形成的白云岩必然具有相对偏高的氧同位素组成。同时,较重的碳同位素组成表明其基本未受有机质热解的影响而贫¹³C,可能更多地反映了原始灰岩的碳同位素组成特征,或因甲烷生成作用而偏重^[33]。综上所述,

蒸发海水为该区的主要白云化流体,近地表低温条件下的渗透回流白云化作用形成了研究区以泥—粉晶为主的白云岩。

表3 北特鲁瓦地区白云岩碳、氧同位素组成
Table 3 Isotopic composition of dolomite carbon and oxygen in North Truva

井号	岩性	层位	井深/m	$\delta^{13}C_{PDB}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{PDB}/\text{‰}$
5555	粉晶白云岩	A ₃	2 331.66	4.25	-0.2
5555	粉晶白云岩	A ₃	2 345	5.26	-1.06
5555	粉晶白云岩	A ₃	2 341.45	5.27	0.98
5555	粉晶白云岩	A ₃	2 354	5.61	1.03
5555	粉晶白云岩	A ₃	2 345.98	5.78	2.3
5555	粉晶白云岩	A ₃	2 345.69	5.94	2.31
5555	泥晶白云岩	A ₃	2 332.48	4.61	-0.15
5555	泥晶白云岩	A ₃	2 333.88	4.96	0.29
5555	泥晶白云岩	A ₃	2 336.98	5.34	0.05
5555	泥晶白云岩	A ₃	2 337.5	5.37	-0.72
5555	泥晶白云岩	A ₃	2 343.81	5.38	-0.08
5555	泥晶白云岩	A ₃	2 347.14	5.39	0.1
5555	泥晶白云岩	A ₃	2 341.78	5.53	0.86
5555	泥晶白云岩	A ₃	2 340.94	5.94	2.45
5555	泥晶白云岩	A ₃	2 335.62	5.3	-0.13
T-4	粉晶白云岩	A ₃	2 351.49	3.36	-0.08
T-4	粉晶白云岩	A ₃	2 347.53	3.82	0.38
T-4	粉晶白云岩	A ₃	2 344.08	4.89	0.63
L-6	细晶白云岩	A ₃	2 717.14	-0.22	-1.09
L-6	粉晶白云岩	A ₃	2 720.68	2.11	1.65

虽然研究区与高盐度蒸发海水有关的白云化作用所形成的细小白云石主要以较小的晶间孔为主^[16],甚至可能因过白云化作用而导致孔隙总量减少^[4,6],如研究区 T-41 井灰泥坪环境发育的致密泥晶白云岩,但其对孔隙的保存却具有重要意义^[3]。由

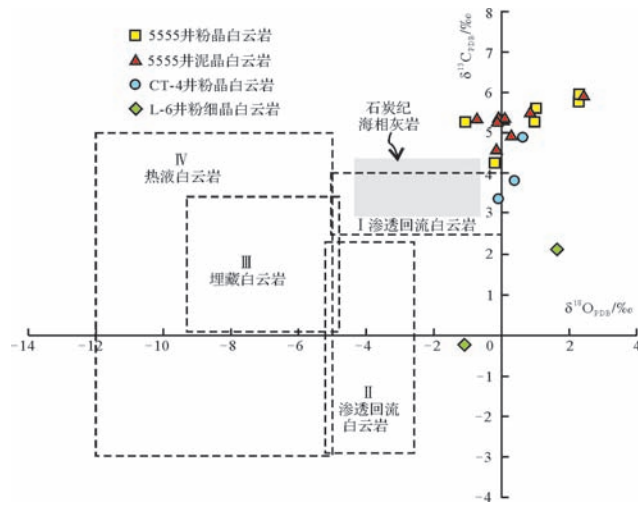


图8 KT-I白云岩碳、氧同位素组成及其与相关数据的比较
注:5555井和CT-4井数据来自文献[14-15],石炭纪海相灰岩分布范围据文献[34],各类白云岩分布范围据文献[7,10-11,35]。

Fig.8 Isotopic composition of carbon and oxygen of KT-I dolostones and its comparison with other data

于白云岩抗压实压溶能力较强,在埋藏成岩过程中白云岩更倾向于被压裂而有利于孔隙保存,灰岩则更易于发生压实压溶或被方解石胶结而损失孔隙,因而相同条件下白云岩孔隙度随埋深的减小速率要比灰岩慢^[36-37],如图4中可清楚看到A₃小层白云岩的孔隙度比上下紧邻的灰岩孔隙度高得多。因此,基于白云石的这种性质认为,研究区准同生期或早成岩期白云化作用的进行不但有利于原生孔隙及早期大气淡水溶蚀孔隙的保存,还有利于后期酸性溶蚀流体的进入而改造储层。

3.4 局部裂缝的发育

岩芯与薄片分析表明,研究区白云岩发育较多的

构造裂缝及压实破裂缝等多种裂缝,这些裂缝主要是在埋藏期压实压溶阶段或早二叠世以来的构造挤压所形成^[17]。在所统计的84个白云岩薄片,发育裂缝的占63%,缝面孔率占总面孔率多在0.5%~11%,平均约6%,这些裂缝已不同程度的被溶蚀形成溶缝(图9)。尽管这些裂缝对孔隙增量的贡献不大,但是它们的存在能够有效沟通白云岩中较孤立的生屑铸模孔、体腔孔和晶间孔等各类孔隙,提高孔隙的连通性,并有利于晚期酸性流体进入形成各种溶缝从而进一步改造储层,甚至形成孔缝洞一体的网状储集空间(图9b)。可见,在该区以渗透回流作用形成的较致密的泥粉晶白云岩为主的背景下,局部裂缝的存在无疑对白云岩储渗性能的改善及晚期酸性溶蚀流体的进入具有较重要的意义。

4 储层发育模式

晚石炭世KT-I油层组上部A段主要以蒸发台地和局限台地沉积为主,受海平面升降旋回的控制,台内古地貌高点浅滩甚至是灰泥坪沉积物多次暴露于大气淡水环境,遭受大气淡水不同程度的淋滤作用使得生屑等高镁方解石、文石颗粒形成铸模孔等早期组构选择性溶孔。同时,强烈蒸发作用所形成的蒸发卤水在准同生期和成岩早期渗透回流导致研究区灰岩不同程度的白云化,尽管受白云化流体作用时间的不同孔隙或增加或减少,但这种早期白云化的发生却有利于压实压溶阶段孔隙的保存(图10a)。石炭纪末期至早二叠世,海西乌拉尔造山运动使得研究区东部挤压抬升,导致东高西低构造格局的形成以及白云岩内构造裂缝的发育。与此同时,石炭系烃源岩在晚二叠世—三叠世成熟生烃^[17],大量的有机酸等酸性

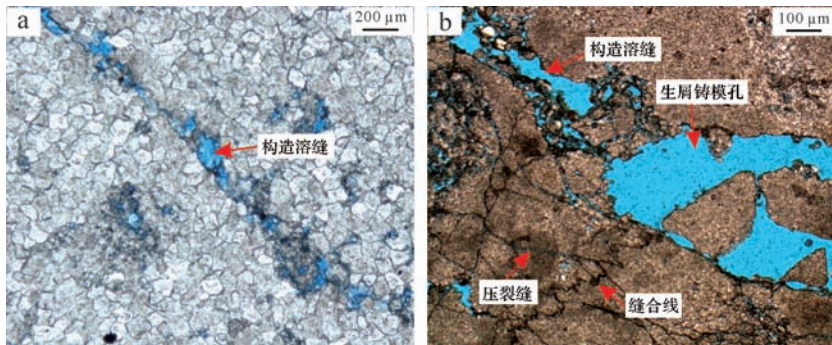


图9 白云岩中发育的裂缝特征

a.细晶白云岩中发育构造溶缝,L-6,A₃,2722.2 m;b.残余生屑泥晶白云岩中压实破裂缝、构造缝和生屑铸模孔相互沟通如网状,T-4,A₃,2341.8 m。

Fig.9 Fracture characteristics in dolostones

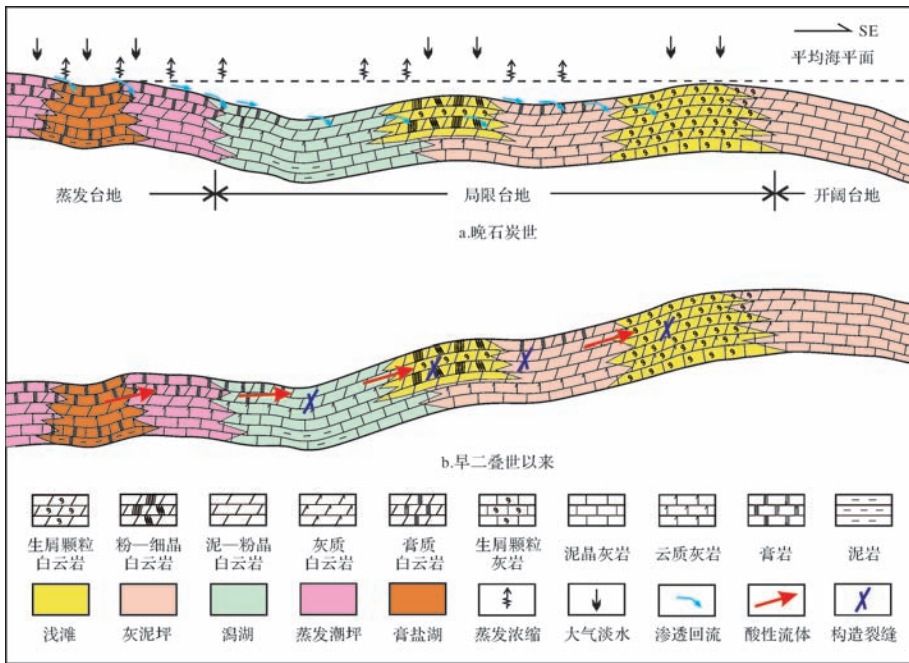


图 10 北特鲁瓦地区 KT-I 白云岩储层发育模式

Fig.10 Development models for dolomite reservoir of KT- I in North Truva

流体进入白云岩,沿先存孔隙通道溶蚀改造储层,尤其是孔隙性较好的颗粒滩白云岩,此阶段的酸性溶蚀以非组构选择性溶蚀为主,发育大量的晚期溶蚀扩大孔洞,形成现今以残余生屑白云岩为代表的多类白云岩储层(图 10b)。

5 结论

(1) 以残余颗粒结构和晶体结构为主要依据,将白云岩划分为残余生屑白云岩等 5 类,其中,以生屑铸模孔及溶蚀扩大孔为主的残余生屑白云岩为最优质储层,含油气性最好,以晶间(溶)孔为主的与膏盐层共生或含膏粉细晶白云岩和以生屑铸模孔及晶间孔为主的泥粉晶白云岩次之,而以晶间微孔为主的泥晶白云岩最差,主要为水层。

(2) 通过白云石晶粒细小(泥-粉晶为主)、低有序度(0.32~0.67)及较重的氧同位素组成(-1.09‰~2.45‰)等分析认为该区白云岩是在近地表低温条件下与蒸发海水有关的渗透回流白云化作用所形成,这种准同生期或早成岩期白云化作用的发生有利于埋藏阶段白云岩孔隙的保存。

(3) 晚石炭世原生孔隙发育的高能滩相沉积是优质白云岩储层发育的基础,同时该区白云岩主要发育于向上变浅旋回意味着其原岩易受准同生期大气淡水溶蚀作用而发生组构选择性溶解形成大量早期

溶蚀孔隙。早二叠世以来发育的以构造裂缝为主的各种裂缝以及与烃类生成有关的酸性流体的非组构选择性溶蚀则对储层的晚期扩孔改造起重要作用。

参考文献 (References)

- 1 邓西里,汪红,鲍志东,等. 滨里海盆地油气分布规律及勘探潜力分析[J]. 中国石油勘探,2012(5):36-47. [Deng Xili, Wang Hong, Bao Zhidong, et al. Distribution law and exploration potential of oil and gas in Pre-Caspian Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2012(5): 36-47.]
- 2 赵中平,牟小清,陈丽. 滨里海盆地东缘石炭系碳酸盐岩储层主要成岩作用及控制因素分析[J]. 现代地质,2009,23(5):828-834. [Zhao Zhongping, Mou Xiaoqing, Chen Li. Analysis on main diageneses and controlling factors of Carboniferous carbonate reservoirs in the eastern margin of Pre-Caspian Basin[J]. Geoscience, 2009, 23(5): 828-834.]
- 3 郑剑锋,沈安江,乔占峰,等. 柯坪—巴楚露头区蓬莱坝组白云岩特征及孔隙成因[J]. 石油学报,2014,35(4):664-672. [Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Qiao Zhanfeng, et al. Characteristics and pore genesis of dolomite in the Penglaiba Formation in Keping-Bachu outcrop area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 664-672.]
- 4 Saller A H, Henderson N. Distribution of porosity and permeability in platform dolomites: insight from the Permian of west Texas[J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(8): 1528-1550.
- 5 Moore C H. Carbonate Reservoirs: Porosity Evolution and Diagenesis in A Sequence Stratigraphic Framework [M]. Amsterdam: Elsevier, 2001: 1-444.

- 6 张学丰,刘波,蔡忠贤,等.白云岩化作用与碳酸盐岩储层物性[J].地质科技情报,2010,29(3):79-85. [Zhang Xuefeng, Liu Bo, Cai Zhongxian, et al. Dolomitization and carbonate reservoir formation[J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(3): 79-85.]
- 7 郑剑锋,沈安江,刘永福,等.塔里木盆地寒武系与蒸发岩相关的白云岩储层特征及主控因素[J].沉积学报,2013,31(1):89-98. [Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Liu Yongfu, et al. Main controlling factors and characteristics of Cambrian dolomite reservoirs related to evaporite in Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(1): 89-98.]
- 8 赵文智,沈安江,郑剑锋,等.塔里木、四川及鄂尔多斯盆地白云岩储层孔隙成因探讨及对储层预测的指导意义[J].中国科学:地球科学,2014,44(9):1925-1939. [Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, et al. The porosity origin of dolostone reservoirs in the Tarim, Sichuan and Ordos Basins and its implication to reservoir prediction [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(9):1925-1939.]
- 9 Smith L B, Jr. Origin and reservoir characteristics of Upper Ordovician Trenton-Black River hydrothermal dolomite reservoirs in New York[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1691-1718.
- 10 Davies G R, Smith L B, Jr. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: an overview [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1641-1690.
- 11 Wierzbicki R, Dravis J J, Al-Aasm I, et al. Burial dolomitization and dissolution of upper Jurassic Abenaki platform carbonates, Deep Panuke reservoir, Nova Scotia, Canada [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1843-1861.
- 12 张静,胡见义,罗平,等.深埋优质白云岩储集层发育的主控因素与勘探意义[J].石油勘探与开发,2010,37(2):203-210. [Zhang Jing, Hu Jianyi, Luo Ping, et al. Master control factors of deep high-quality dolomite reservoirs and the exploration significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 203-210.]
- 13 马永生,郭彤楼,赵雪凤,等.普光气田深部优质白云岩储层形成机制[J].中国科学(D辑):地球科学,2007,37(增刊II):43-52. [Ma Yongsheng, Guo Tonglou, Zhao Xuefeng, et al. The formation mechanism of high-quality dolomite reservoir in the deep of Puguang gas field[J]. Science China (Ser. D): Earth Sciences, 2007, 37(Suppl. II): 43-52.]
- 14 石新,程绪彬,汪娟,等.滨里海盆地东缘石炭系KT-I油层组白云岩地球化学特征[J].古地质量,2012,14(6):777-785. [Shi Xin, Cheng Xubin, Wang Juan, et al. Geochemical characteristics of the Carboniferous KT- I interval dolostone in eastern margin of coastal Caspian Sea Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(6): 777-785.]
- 15 Wang Shuqin, Zhao Lun, Cheng Xubin, et al. Geochemical characteristics and genetic model of dolomite reservoirs in the eastern margin of the Pre-Caspian Basin[J]. Petroleum Science, 2012, 9(2): 161-169.
- 16 何伶,赵伦,李建新,等.碳酸盐岩储集层复杂孔渗关系及影响因素——以滨里海盆地台地相为例[J].石油勘探与开发,2014,41(2):206-214. [He Ling, Zhao Lun, Li Jianxin, et al. Complex relationship between porosity and permeability of carbonate reservoirs and its controlling factors: A case of platform facies in Pre-Caspian Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2): 206-214.]
- 17 徐可强.滨里海盆地东缘中区块油气成藏特征和勘探实践[M].北京:石油工业出版社,2011:1-302. [Xu Keqiang. Characteristics of Hydrocarbon Accumulation and Exploration Experience of Central Block in the Eastern Margin of Pre-Caspian Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 1-302.]
- 18 胡杨,夏斌,王燕妮,等.滨里海盆地东缘构造演化及油气成藏模式分析[J].沉积与特提斯地质,2014,34(3):78-81. [Hu Yang, Xia Bin, Wang Yankun, et al. Tectonic evolution and hydrocarbon accumulation model in eastern Precaspian Basin [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2014, 34(3): 78-81.]
- 19 梁爽,郑俊章,张玉攀.滨里海盆地东南缘晚古生代碳酸盐岩台地特征及控制因素[J].地质科技情报,2013,32(3):52-58. [Liang Shuang, Zheng Junzhang, Zhang Yupan. Characteristics and controlling factors of Late Paleozoic carbonate platform in the southeast part of Precaspian Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(3): 52-58.]
- 20 Jones B. Inside-out dolomite [J]. Journal of Sedimentary Research, 2007, 77(7): 539-551.
- 21 张学丰,蔡忠贤,李林,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):475-485. [Zhang Xuefeng, Cai Zhongxian, Li Lin, et al. Relict textures of dolomite and the related porosity classification [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(3): 475-485.]
- 22 黄思静,吕杰,兰叶芳,等.四川盆地西部中二叠统白云岩/石的主要结构类型——兼论其与川东北上二叠统—三叠系白云岩/石的差异[J].岩石学报,2011,27(8):2253-2262. [Huang Sijing, Lü Jie, Lan Yefang, et al. The main texture of dolomite of Middle Permian, western Sichuan Basin: concurrently on the differences with Upper Permian-Triassic, Northeast Sichuan Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2253-2262.]
- 23 黄擎宇,张哨楠,孟祥豪,等.塔里木盆地中央隆起区寒武—奥陶系白云岩结构特征及成因探讨[J].沉积学报,2014,32(3):537-549. [Huang Qingyu, Zhang Shaonan, Meng Xianghao, et al. Textural types and origin of the Cambrian-Ordovician dolomite in the central Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(3): 537-549.]
- 24 Ruzyla K, Friedman G M. Factors controlling porosity in dolomite reservoirs of the Ordovician Red River Formation, Cabin Creek Field, Montana [M]//Roehl P, Choquette P W. Carbonate Petroleum Reservoirs. New York: Springer, 1985: 39-58.
- 25 伊海生.测井曲线旋回分析在碳酸盐岩层序地层研究中的应用[J].古地质量,2011,13(4):456-466. [Yi Haisheng. Application of well log cycle analysis in studies of sequence stratigraphy of carbonate rocks [J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(4): 456-466.]
- 26 Nio S D, Brouwer J, Smith D, et al. Spectral trend attribute analysis: applications in the stratigraphic analysis of Wireline logs [J]. First Break, 2005, 23(4): 71-75.

- 27 Land L S. The origin of massive dolomite[J]. Journal of Geological Education, 1985, 33(2): 112-125.
- 28 Mazzullo S J, Harris P M. An overview of dissolution porosity development in the deep-burial environment, with examples from carbonate reservoirs in the Permian Basin[C]//Candelaria M P. Permian Basin Plays: Tomorrow's Technology Today; West Texas Geological Society. California: Stanford University, 1991: 125-138.
- 29 Gregg J M, Shelton K L. Dolomitization and dolomite neomorphism in the back reef facies of the Bonnetterre and Davis Formations (Cambrian), southeastern Missouri[J]. Journal of Sedimentary Research, 1990, 60(4): 549-562.
- 30 穆曙光,周茂,华永川. 川东北地区下三叠统飞仙关组白云岩成因类型[J]. 天然气工业, 1994, 14(3): 23-27. [Mu Shuguang, Zhou Mao, Hua Yongchuan. Dolomite genetic types in Feixianguan Formation of Lower Triassic series in northeast area of Sichuan[J]. Natural Gas Industry, 1994, 14(3): 23-27.]
- 31 钟倩倩,黄思静,邹明亮,等. 碳酸盐岩中白云石有序度的控制因素——来自塔河下古生界和川东北三叠系的研究[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(3): 50-55. [Zhong Qianqian, Huang Sijing, Zou Mingliang, et al. Controlling factors of order degree of dolomite in carbonate rocks: A case study from Lower Paleozoic in Tahe oilfield and Triassic in northeastern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(3): 50-55.]
- 32 Mazzullo S J, Chilingarian G V. Dolomite reservoirs: geochemical techniques for evaluating origin and distribution[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1996, 14(3/4): 262-263.
- 33 Laponi F. Late burial, hydrothermal dolomitization of the Cambrian Lúncara Fm. (Cantabrian Zone, NW Spain): origin of the dolomitizing fluids and relation to the geodynamic setting[D]. Heidelberg: Heidelberg University, 2007: 1-160.
- 34 Ronchi P, Ortenzi A, Borromeo O, et al. Depositional setting and diagenetic processes and their impact on the reservoir quality in the late Viséan-Bashkirian Kashagan carbonate platform (Pre-Caspian Basin, Kazakhstan)[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(9): 1313-1348.
- 35 Jiang Lei, Cai Chunfang, Worden R H, et al. Reflux dolomitization of the Upper Permian Changxing Formation and the Lower Triassic Feixianguan Formation, NE Sichuan Basin, China[J]. Geofluids, 2013, 13(2): 232-245.
- 36 Lucia F J. Carbonate Reservoir Characterization: An Integrated Approach[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2007: 218-233.
- 37 Ehrenberg S N, Eberli G P, Keramati M, et al. Porosity-permeability relationships in interlayered limestone-dolostone reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(1): 91-114.

Characteristics and Development Mechanism of Dolomite Reservoirs in North Truva of Eastern Pre-Caspian Basin

GUO Kai¹ CHENG XiaoDong¹ FAN LeYuan¹ YAN ShiBang² NI GuoHui¹ FU HaiBo¹

(1. Geoscience Center, CNPC Greatwall Drilling Company, Beijing 100101, China;

2. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Dolostone is a significant reservoir type of pre-salt Carboniferous carbonate rocks in Pre-Caspian Basin. Based on the analysis of core, thin section, petrophysical properties, geochemical data and other related data, reservoir classification and performance of dolostones in KT-I Formation were analysed, and their controlling factors and development models were also investigated. The results show that types of dolostones have a significant influence on their petrophysical properties. Among all the types, reservoir property and oil richness of residual bioclast dolostone mainly with moldic pore and dissolution enlarged pores is the best, that of silt to fine crystalline dolostone mainly with intercrystal pore and its dissolution pore is medium, as well as mud to silt crystalline dolostone mainly with moldic pore and intercrystal pore, but mud crystalline dolostone mainly with intercrystal micropore is poor on reservoir property. Bioclast shoal with more primary porosity formed in the relatively high hydrodynamic environment is favorable for dolomite reservoir formation of high quality. Penecontemporaneous dissolution of fresh water and early dolomitization mainly via seepage-reflux dolomitization (dolomite order degree falls in between 0.32 and 0.67, $\delta^{13}\text{C}$ ranges from -0.22‰ to 5.94‰ and $\delta^{18}\text{O}$ ranges from -1.09‰ to 2.45‰) before massive compaction have a dominant effect on early porosity formation and preservation for dolomite reservoir in the Late Carboniferous. At the burial diagenesis stage the formation of fractures with different causes and dissolution of acidic fluids are the vital factors for further porosity increment of dolomite reservoir since the Early Permian.

Key words: reservoir characteristics; dolomitization; dissolution; carboniferous; Pre-Caspian Basin