

鄂尔多斯盆地大牛地地区奥陶系 马家沟组马五₅亚段白云岩地球化学特征及成因

于春勇¹, 贾雨萌¹, 任战利², 王起琮³, 任虎俊¹

1 中国煤炭地质总局水文地质局; 2 西北大学大陆动力学国家重点实验室; 3 西安石油大学油气资源学院

摘要 鄂尔多斯盆地大牛地地区马五₅亚段发育优质白云岩储层,白云岩成因是天然气勘探中储层预测的关键。结合岩石学特征,通过对碳氧同位素、微量元素及流体包裹体等测试资料的分析,深入探讨了大牛地地区马五₅亚段白云岩的地球化学特征及成因机制。研究表明:①马五₅亚段主要发育泥晶白云岩和粉细晶白云岩,泥晶白云岩主要发育于马五₅亚段底部,粉细晶白云岩主要发育于马五₅亚段中上部。②泥晶白云岩中发育水平藻纹层、鸟眼及针状石膏假晶等原始沉积构造,孔隙不发育;白云石有序度较低;微量元素Sr、Na含量高,Fe、Mn含量低;岩石形成时期的盐度与泥晶灰岩基本一致。推断泥晶白云岩为准同生阶段的产物。③粉细晶白云岩中常见残余砂屑和雾心亮边结构,孔隙发育且以晶间孔为主;白云石有序度相对偏高,与泥晶白云岩相比,Sr、Na含量低,而Fe、Mn含量高;岩石形成时期盐度与泥晶灰岩相似。推断粉细晶白云岩为回流渗透作用下的产物。④马五₅亚段白云石化流体主要为海源性流体,无大气淡水及热液流体的参与。基于上述岩石学和地球化学特征,建立了大牛地地区马家沟组马五₅亚段准同生和回流渗透白云石化模式,为研究区优质白云岩储层的预测及地质勘探方向选择提供了理论指导。

关键词 微量元素; 流体包裹体; 白云岩成因; 奥陶纪; 大牛地地区; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.2 **文献标识码**: A

0 前言

鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组为一套以碳酸盐岩为主、夹蒸发岩的地层,自下而上可分为6个段,依次为马一段—马六段,马五段自上而下又可划分为10个亚段,依次为马五₁—马五₁₀亚段,其中马五₅亚段白云岩在盆地中东部广泛发育,是马家沟组主要的天然气产出层位之一。近年来,马五₅亚段白云岩的成因一直备受广大地质学者的关注,取得了一定的认识,但还存在以下问题:①成因机理仍存在较大分歧,尤其是结晶程度较高的白云岩的成因,存在混合水白云石化^[1-2]、回流渗透白云石化^[3-5]、埋藏白云石化^[6-7]等多种认识;②已往研究多集中于中央古隆起东侧,对盆地东部马五₅亚段白云岩成因的研究甚少,即便涉及研究区,也主要是在全盆地基础上通过沉积相对其进行推断,缺乏针对性、系统性的研究,因而制约了大牛地地区马五₅亚段白云岩储层中天然气的勘探;③应用地球化学手段来判断白云岩成因,往往具有多解性,为确保解释结果的正确性,需通过多种地球化学或其他地质手段进行全面综合的分析,以便相互印证^[8-12]。

本文结合岩石学特征,通过碳氧同位素、微量元素及流体包裹体等测试资料的综合分析,深入探讨大牛地地区马五₅亚段白云岩的地球化学特征及成因机制,并建立研究区白云石化模式,以期为马五₅亚段白云岩天然气的勘探工作提供科学依据。

1 地质背景

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北克拉通西部,是在太古宇和古元古界变质岩基底上发育的多旋回克拉通型盆地,是我国非常重要的大型含油气盆地之一^[13]。盆内马家沟组碳酸盐岩地层相对平缓,且断层与褶皱不发育,整体呈东北向西南方向倾伏,倾角一般小于3°^[9,14]。大牛地气田位于伊陕斜坡北缘

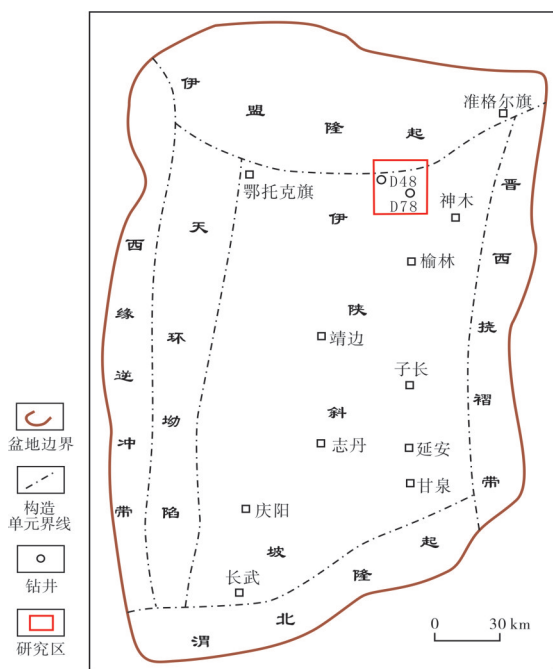
收稿日期: 2021-01-20; 改回日期: 2021-04-13; 网络出版日期: 2021-12-01

本文受国家重点研发计划课题“超深层及中新元古界油气成藏富集规律与勘探方向”(编号:2017YFC0603106)、国家自然科学基金重点项目“鄂尔多斯、沁水沉积盆地中生代晚期古地温场对岩石圈动力学演化及油气赋存的约束作用”(编号:41630312)及国家科技重大专项课题“鄂尔多斯西南部中新元古界—下古生界构造演化与保存条件”(编号:2017ZX05005-002-008)联合资助

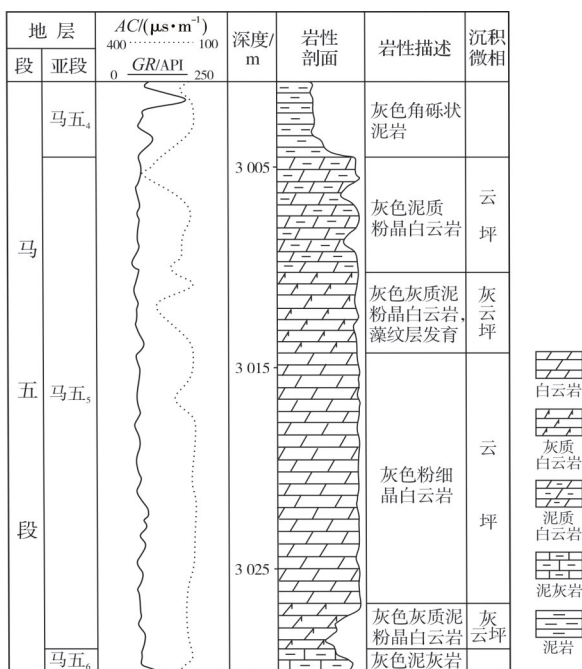
第一作者: 于春勇, 博士, 高级工程师, 从事碳酸盐岩沉积、储层及异常压力等方面研究。通信地址: 300121 天津市红桥区芥园道国投大厦13层; E-mail: 444104901@qq.com

(图1a),东北方向分别被伊盟隆起、晋西挠褶带所环绕,面积约为2 600 km²,构造为一以乌拉庙东为构造高点、呈NE—SW向展布的低缓隆起^[15-16]。马五₅亚段沉积时期,古气候转变为干热,海平面动荡升降,呈现出快速海侵、缓慢海退的特征,期间水下古隆起广泛发育,台地坡度缓,大牛地地区主要发

育浅水碳酸盐台地相,以潮下带—潮间带沉积环境为主;岩性以灰色泥晶白云岩、深灰色藻砂屑灰岩、藻叠层石白云岩及含膏泥晶白云岩为主(图1b),纵向上岩性变化频繁。早期沉积的石灰岩经白云石化作用可形成有效白云岩储层,为后期天然气的富集奠定良好的基础^[17-18]。



(a) 研究区位置



(b) 岩性综合柱状图

图1 鄂尔多斯盆地大牛地地区位置及马五₅亚段岩性综合柱状图

Fig. 1 Location of the study area and comprehensive lithologic column of O₁m₅⁵ in Daniudi area, Ordos Basin

2 样品与实验方法

样品均取自大牛地地区2口井(D48井、D78井)的马五₅亚段白云岩岩心。为排除杂质及有机质的干扰,确保测试结果的可靠性,对测试样品逐一进行手标本观察后,均采用微型牙钻取样。测试分析内容主要包括4个方面:薄片鉴定(35件)、微量元素(33件)、碳氧同位素(20件)及流体包裹体(7件)。

薄片鉴定在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。观察前用茜素红与铁氰化钾混合溶液对薄片进行染色,采用DMLP-217400高倍显微镜进行观察,检测环境为室温。

微量元素测试在同济大学海洋地质国家重点实验室完成。采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)、离线测试系统(VGX7)测定,检测精度优于±5%。

同位素测试在中国石油大学(北京)油气资源

与探测国家重点实验室完成。测试前首先将碳酸盐岩样品置于25℃、真空条件下,与纯磷酸进行恒温反应,石灰岩样品反应24 h,白云岩样品反应72 h;然后将分离出的CO₂送入MAT253-C033气相质谱仪进行碳氧稳定同位素测定(PDB标准),检测精度为±0.05%。

包裹体测温在中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室完成。采用Olympus显微镜及THMSG600冷热台进行显微测温,分析精度为±0.1℃。

3 实验结果

3.1 岩石学特征

薄片观察发现,大牛地地区马五₅亚段主要发育白云岩、石灰岩及其过渡岩石类型(如灰质白云岩、白云质灰岩)。根据岩石结构及成因,白云岩可进一

步划分为泥晶白云岩和粉细晶白云岩2种类型。

泥晶白云岩主要发育于马五₅亚段底部。晶粒主要呈他形一半自形结构, 粒径一般小于40 μm, 晶体形态较难识别, 可见近水平藻纹层、少量针状石膏假晶及生物钻孔等原始沉积构造(图2a, 2b); 孔隙相对不发育; 白云石有序度较低, 平均值为0.63。

粉细晶白云岩主要发育于马五₅亚段中上部,

占整个马五₅亚段白云岩的50%以上。晶粒以自形一半自形结构为主, 呈镶嵌式接触, 粒径一般介于50~200 μm, 常与黄铁矿共生, 常见溶蚀残余砂屑及雾心亮边等结构(图2c, 2d); 晶间孔及溶蚀孔发育; 晶间可见残余泥灰质, 局部可见白云石化交代不彻底现象(图2e); 缝合线发育, 多切割白云石晶粒(图2c, 2f); 白云石有序度偏高, 平均值为0.89。

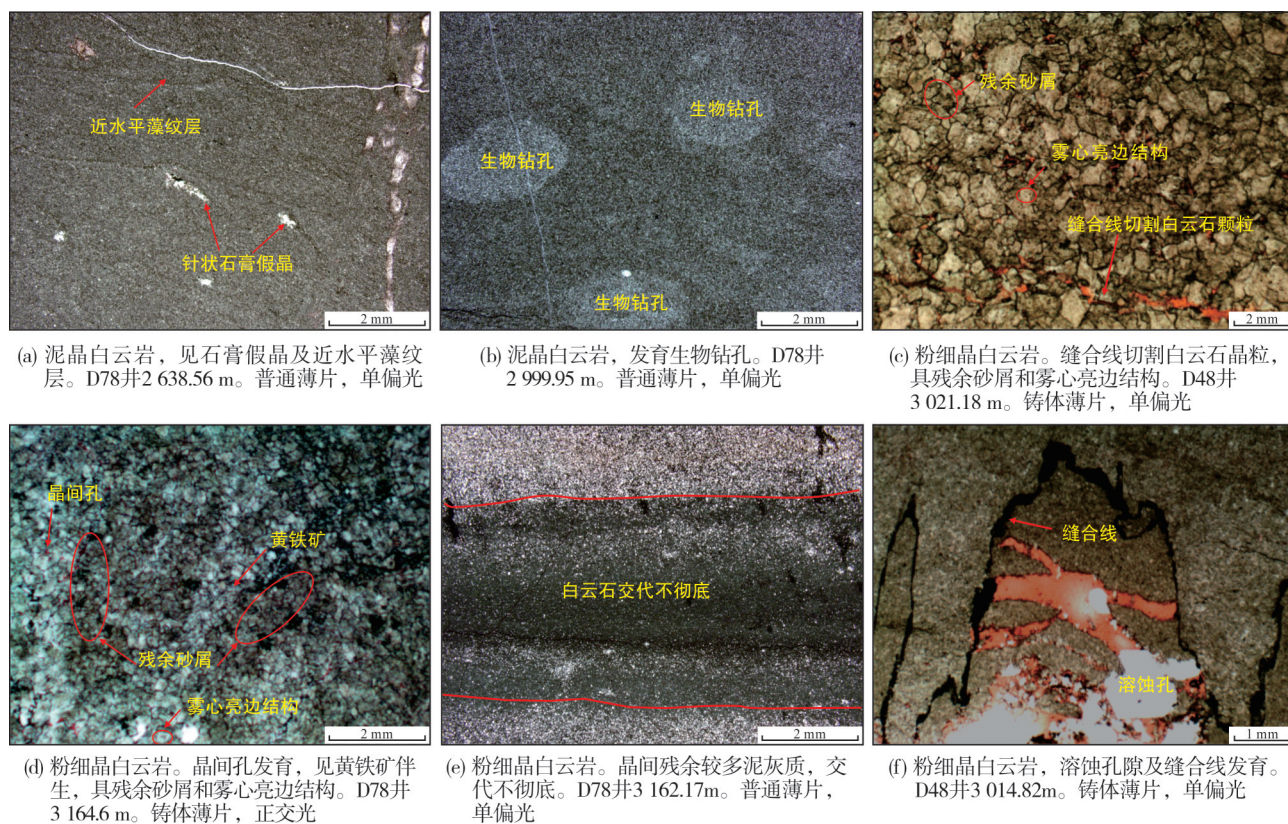


图2 鄂尔多斯盆地大牛地地区马五₅亚段白云岩显微特征

Fig. 2 Microscopic characteristics of dolomites of O₁m₅⁵ in Daniudi area, Ordos Basin

3.2 碳氧同位素特征

大牛地地区马五₅亚段不同岩性的碳氧同位素特征有差别。泥晶灰岩的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值分布范围为-1.74‰~-0.42‰, 平均值为-1.05‰; $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值分布范围为-9.79‰~-6.42‰, 平均值为-8.24‰。泥晶白云岩和粉细晶白云岩 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值分布范围分别为-1.15‰~0.10‰、-1.96‰~-0.45‰, 平均值分别为-0.65‰、-1.33‰, 均与同期海水值一致(早奥陶世海水的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围约为-2.0‰~0.5‰^[10]); $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值分布范围分别为-7.06‰~-6.07‰、-9.82‰~-7.82‰, 平均值分别为-6.65‰、-8.91‰, 与同期海水值(早奥

陶世海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布范围约为-6.6‰~-4.0‰)相比, 均表现为显著偏负的特征^[5, 19]。

3.3 微量元素特征

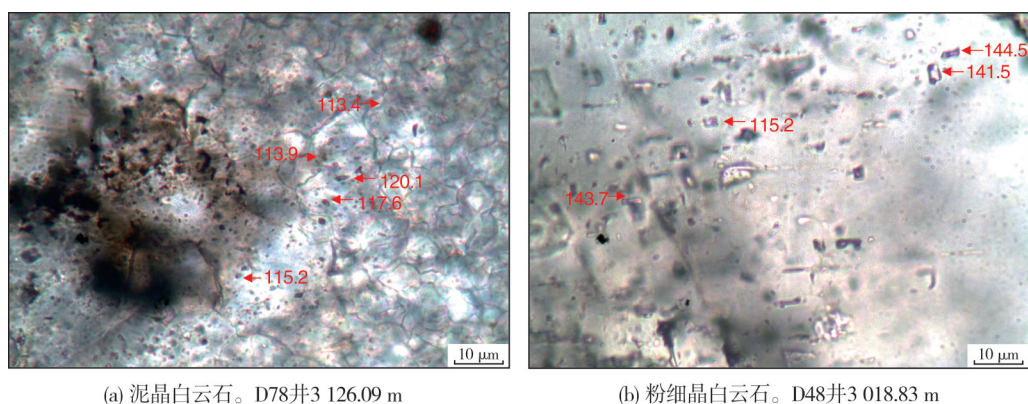
研究区泥晶灰岩的Fe含量介于195~410 μg/g, 平均值为349 μg/g; Mn含量介于12~36 μg/g, 平均值为25 μg/g; Sr含量介于143~197 μg/g, 平均值为164 μg/g; Na含量介于234~285 μg/g, 平均值为265 μg/g。与泥晶灰岩相比, 白云岩的Fe、Mn、Na元素含量均偏高, Sr元素含量相对偏低; 泥晶白云岩的Fe、Mn、Sr、Na元素含量平均值分别为1 202 μg/g、49 μg/g、151 μg/g、488 μg/g; 粉细晶白云岩的Fe、

Mn、Sr、Na元素含量平均值分别为1 974 $\mu\text{g/g}$ 、77 $\mu\text{g/g}$ 、78 $\mu\text{g/g}$ 、426 $\mu\text{g/g}$ 。粉细晶白云岩的Fe、Mn元素含量显著高于泥晶白云岩,而Sr、Na元素含量明显偏低,这一特征表明粉细晶白云岩后期可能遭受风化淋滤的改造,说明二者应具有不同的沉积环境和成岩演化史。

3.4 包裹体特征

大牛地地区马五₅亚段泥晶白云岩和粉细晶白云岩晶体内部、晶体环带及晶体边缘广泛发育包裹

体,且以白云石晶体内部赋存为主。包裹体多呈长方形或椭圆形规则状、轮廓清晰,大小一般介于3~10 μm ,多呈气-液两相存在,气液比一般介于5%~15%。包裹体常以5~9个的组合形式出现,还可见少量单一液相与气-液两相包裹体共存(图3),共存频率约为1/5。共存包裹体多发育于同一晶体内部不同区域或晶体环带内,大小相近,呈离散状分布,与两相包裹体无明显配对关系。对原生气-液两相包裹体进行显微测温,获得研究区白云岩中包裹体的均一温度和冰点温度(表1)。



(a) 泥晶白云石。D78井3 126.09 m
(b) 粉细晶白云石。D48井3 018.83 m
注:红色数字指相应包裹体的均一温度(单位:℃)

图3 鄂尔多斯盆地大牛地地区马五₅亚段白云岩包裹体微观照片

Fig. 3 Micrographs of dolomite inclusions of $O_1m_5^5$ in Daniudi area, Ordos Basin

表1 鄂尔多斯盆地大牛地地区马五₅亚段白云岩包裹体特征参数

Table 1 Characteristics and parameters of dolomite inclusions of $O_1m_5^5$ in Daniudi area, Ordos Basin

岩性	井名	深度/m	宿主矿物	数量	大小/ μm	气液比/%	均一温度/℃	冰点温度/℃	盐度/%
泥晶白云岩	D78井	3 062.47	白云石晶体	9	3.6~6.3	5~18	82.5~135.5	-22.9~-22.6	16.4~30.1
		3 126.09	白云石晶体	8	2.1~8.5	5~12	97.5~138.4	-23.0~-22.7	25.6~28.3
		3 012.30	白云石晶体	8	3.2~10.4	6~12	105.7~145.0	-20.2~-20.0	9.8~25.4
粉细晶白云岩	D48井	3 014.82	白云石晶体	10	2.7~9.8	5~10	115.0~155.8	-20.5~-19.7	13.7~26.9
		3 018.83	白云石晶体	8	3.3~9.5	5~12	126.1~140.8	-20.3~-20.2	10.2~27.3
	D78井	3 162.17	白云石晶体	7	3.8~10.1	10~15	121.7~141.1	-20.3~-19.9	16.4~26.6
		3 213.60	白云石晶体	6	3.8~7.8	8~17	122.4~136.7	-20.6~-20.1	9.9~29.4

注:盐度据公式 $S = 0.00 + 1.769\,58T_i - 0.042\,384T_i^2 + 0.000\,527\,78T_i^3 \pm 0.028$ [20]求得,式中: S 为盐度,%; T_i 为冰点温度,℃。

4 讨论

4.1 成岩蚀变的影响

若海相碳酸盐岩后期遭受强烈的成岩蚀变作用,这种情况下利用碳氧同位素分析白云岩的成岩环境及成因机理,结果往往是不正确的。已有研究表明,Mn/Sr值可用来判断碳酸盐矿物的成岩蚀变程度:当Mn/Sr值 <2 时,原岩发生了较弱的成岩蚀变,碳酸盐岩基本保持了原始海水同位素的

信息^[19,21-23]。大牛地地区马五₅亚段样品的Mn/Sr值均小于2,说明白云岩后期未遭受强烈的成岩蚀变作用。此外,Kaufman等^[24]认为碳氧同位素之间若存在相关性,则碳氧同位素值不能够代表原始沉积信息。分析表明,大牛地地区样品碳氧同位素之间整体不具有明显相关性(图4)。因此,测试样品未遭受强烈成岩蚀变作用,所测得的碳氧同位素值能够用来解释研究区白云岩的成岩环境和成因机理。

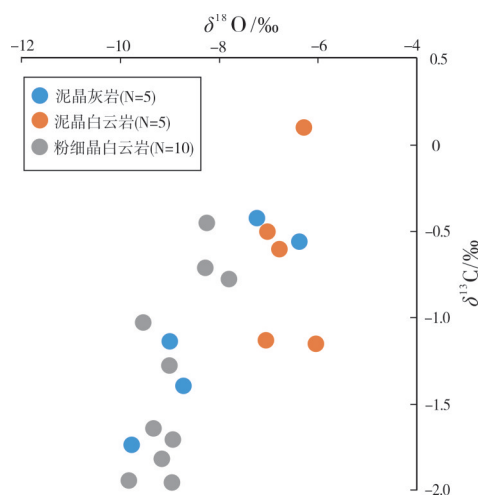


图4 鄂尔多斯盆地大牛地地区马五₅亚段碳酸盐岩碳氧同位素组成相关关系

Fig. 4 Correlation between carbon and oxygen isotopic compositions of carbonate rocks of O₁m₅ in Daniudi area, Ordos Basin

4.2 碳氧稳定同位素对白云岩成因的指示

碳氧同位素常用于白云岩成因解释。白云岩的碳氧同位素组成特征主要受控于白云石化对象自身的碳氧同位素组成及成岩流体的盐度和温度^[19,25]。局限蒸发环境下形成的白云岩,其 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均较高;高温高压深埋藏条件下形成的白云岩,其 $\delta^{18}\text{O}$ 值较低;热液环境下形成的白云岩,其 $\delta^{18}\text{O}$ 值多数小于 -10.0‰ ^[19]。同沉积期海水的碳氧同位素值是不同成因白云岩的碳氧同位素值变化的基础,故需将白云岩碳氧同位素值与同期海水进行对比才能更合理地进行成因解释^[26]。

如前所述,大牛地地区马五₅亚段白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与同期海水一致, $\delta^{18}\text{O}$ 值与同期海水相比显著偏负,这与黄正良等^[27]的认识一致。由图4可知,研究区白云岩样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值均大于 -10.0‰ ,基本排除了白云岩为热液成因的可能性; $\delta^{13}\text{C}$ 值全部位于同期海水值范围的现象,则表明研究区白云石化流体应主要为海源性流体。已有研究表明,白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要受有机质以及硫酸盐还原反应(TSR)的影响,温度对其影响相对较小,后期成岩过程中 $\delta^{13}\text{C}$ 值通常不发生显著变化,仍表现为原岩特征;而白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负的原因,则可能主要与大气淡水混入和埋藏环境下的高温有关^[19]。研究区白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与同期海水一致,排除了受上述因素影响的可能性。泥晶白云岩位于马五₅亚段底部,镜下观察发现其未遭受明显的大气淡水改造,且与泥晶灰

岩相比具有相对偏高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,反映其应形成于高盐度的蒸发环境。粉晶白云岩位于马五₅亚段中上部,其 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对更为偏负(图4),考虑晚中生代伊陕斜坡发生构造反转可能使其间歇性暴露于地表这一因素,粉晶白云岩可能是早期大气淡水改造与埋藏增温叠加作用的结果,至少反映了其受到埋藏增温作用的影响。

此外,根据Keith等^[28]提出的由碳氧同位素推导盐度指数(Z)的经验关系式 $Z = 2.048 \times (\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} + 50) + 0.498 \times (\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} + 50)$,对大牛地地区不同类型白云岩的成岩环境进行恢复。研究区马五₅亚段泥晶白云岩 Z 值均大于120,粉晶白云岩虽然部分样品低于120,但仍与120接近,表明白云石化流体均主要为海源性流体,且泥晶白云岩形成于盐度较高的咸化海水成岩环境,粉晶白云岩形成于盐度较低的浅埋藏环境。

4.3 微量元素对白云岩成因的指示

微量元素的变化特征可以用来判断白云石化流体的性质及沉积和成岩环境,其中Fe、Mn、Sr、Na、K在碳酸盐岩成岩作用和流体性质判别方面尤为有效。Fe、Mn含量在海水中通常较低,而在地层孔隙水中则相对较高,且随成岩作用强度的增加,呈现逐渐增加的趋势,这主要与Fe、Mn元素对还原环境的敏感性有关,即还原性越强,越容易以类质同象方式进入白云石的晶格^[28]。Sr作为常用的示踪元素,主要富集于海水中,随成岩作用强度的增加,Sr含量逐渐减少。Na含量可用来反映成岩流体的盐度^[29-30]。

有学者认为埋藏作用为鄂尔多斯盆地马五₅亚段白云岩的主要成因机制,马五₅亚段白云岩中Sr、Na贫乏,Fe、Mn富集^[31]。这一观点与研究区的实际资料不符:如前所述,大牛地地区马五₅亚段白云岩中Fe、Mn、Na、K含量总体相对较高,Sr含量相对较低。由图5a与图5b可知,随着成岩作用的加强,白云岩中Fe、Mn含量整体呈增加的趋势:泥晶白云岩的增加趋势不显著,反映其形成环境具有一定的氧化性;粉晶白云岩的增加趋势显著,反映其形成环境具有一定的还原性。泥晶白云岩的Na含量较泥晶灰岩的高,平均值为 $488 \mu\text{g/g}$,其与墨西哥湾、阿拉伯海湾现代海洋白云石的Na含量($1\,000 \sim 10\,000 \mu\text{g/g}$)接近^[32-34]。这表明泥晶白云岩形成于盐度较高的海水中,符合近地表蒸发环境准同生白云石化成因的特

征。由图5c可知,粉细晶白云岩的Na含量介于泥晶灰岩和泥晶白云岩之间,且多数样品的Na含量仍分布在泥晶白云岩的Na含量范围内,说明三者之间流体具有一定的继承性。对于粉细晶白云岩,白云石化流体为中等盐度,可能主要与浅埋藏阶段回流渗透作用有关^[35]。研究区粉细晶白云岩的Mn含量

平均值为77 $\mu\text{g/g}$,Na含量平均值为42 $\mu\text{g/g}$,应为浅埋藏期回流渗透白云石化作用的产物^[10]。有研究表明:早奥陶世马五₅亚段沉积初期,主要发育海退旋回,气候干热;马五₅亚段沉积末期,主要发育海侵旋回,气候相对潮湿^[3-4]。这与由微量元素推断的沉积环境相吻合。

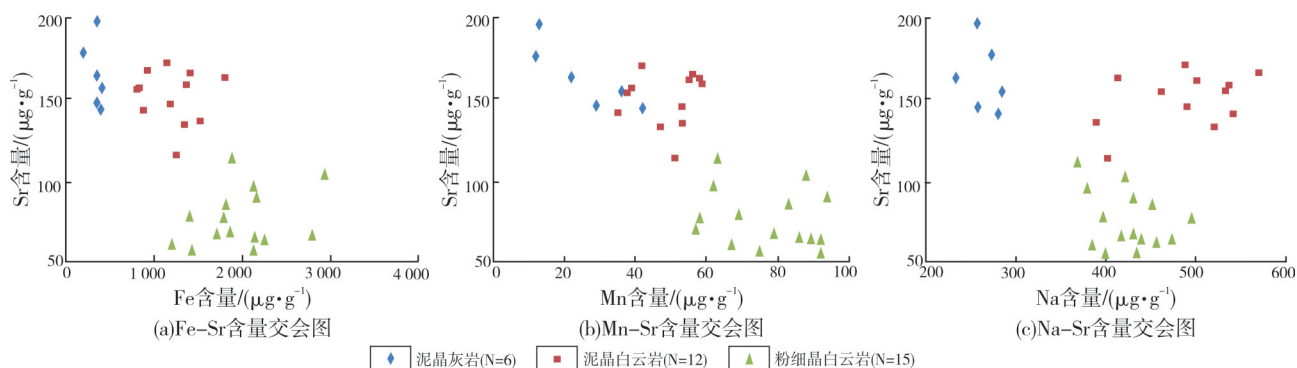


图5 鄂尔多斯盆地大牛地地区马五₅亚段碳酸盐岩微量元素含量交会图

Fig. 5 Crossplots of trace element contents of carbonate rocks of $O_1m_5^5$ in Daniudi area, Ordos Basin

4.4 包裹体温度与盐度对白云岩成因的指示

流体包裹体作为研究地层流体的一种重要地质手段,亦可应用于判断白云石化流体性质。为确保包裹体显微测温数据的可靠性,首先结合包裹体形态特征,对单一液相包裹体进行冷冻、人工拉伸处理,单一液相包裹体未能获取气泡,排除了单一液相包裹体是由卡脖子及非亚稳态造成的可能性,同时也表明单一液相包裹体形成于近地表环境且温度低于50℃^[22]。由表1可知:泥晶白云岩原生包裹体均一温度为82.5~138.4℃,平均值为112.6℃;粉细晶白云岩为105.7~155.8℃,平均值为140.8℃。两者相比,前者整体上明显偏低(图6)。

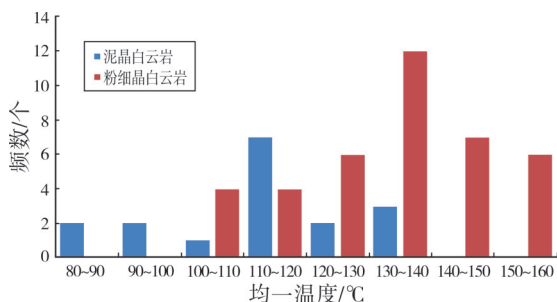


图6 鄂尔多斯盆地大牛地地区马五₅亚段白云岩包裹体均一温度直方图

Fig. 6 Homogenization temperature histogram of dolomite inclusions of $O_1m_5^5$ in Daniudi area, Ordos Basin

根据 Potter 等^[20]提出的盐度(S)与冰点温度(T_i)的换算公式 $S = 0.00 + 1.76958T_i - 0.042384T_i^2 + 0.00052778T_i^3 \pm 0.028$, 计算得到大牛地地区马五₅亚段粉细晶白云岩中包裹体的盐度(平均值为22.6%)较泥晶白云岩(平均值为24.2%)略微偏低,反映粉细晶白云岩的 Mg^{2+} 来源应为回流渗透机制的下渗富 Mg^{2+} 卤水,近地表低水体的岩层不断吸入海水是导致粉细晶白云岩的盐度较泥晶白云岩偏低的主要原因^[19]。

5 白云岩成因模式及油气地质意义

早奥陶世马五₅亚段沉积时期,鄂尔多斯盆地处于赤道附近^[36],气候整体干旱,海水强烈蒸发浓缩,促使大牛地地区浅水碳酸盐岩台地潮坪海水盐度不断升高,高盐度的海水不仅为白云石化提供了大量 Mg^{2+} ,促使泥晶白云岩的形成,还为后期浅埋藏阶段回流渗透白云石化提供了较强的水体动力,即为粉细晶白云岩的形成奠定了良好基础^[37]。

研究区马五₅亚段沉积初期,发育海侵旋回,沉积了一套以泥晶灰岩为主的地层。马五₅亚段沉积中期,发育海退旋回,研究区表现为水体受限、盐度较高、以蒸发为主的浅陆表海沉积环境,充足的高盐度海水迅速交代早期沉积物表层的灰泥岩,形成了一套层薄、横向不稳定、颗粒相对较小的准同生

泥晶白云岩(图7)。至马五₅亚段沉积末期,虽然盆地东部局部发生构造反转,但沉积物埋深依旧相对增大,使得地层还原性增强,地层温度相应升高;在上覆沉积物和横向挤压应力的共同作用下,高盐度的富 Mg^{2+} 海水向下伏尚未被压实的石灰岩发生缓慢

渗流,不断驱替沉积物中的原生孔隙水,发生交代白云石化作用,最终形成层厚、横向稳定、颗粒较粗的粉细晶白云岩(图7)。然而,由于回流渗透作用具有一定限度,地层深部往往发育交代不彻底的灰质白云岩、白云质灰岩等过渡岩类。

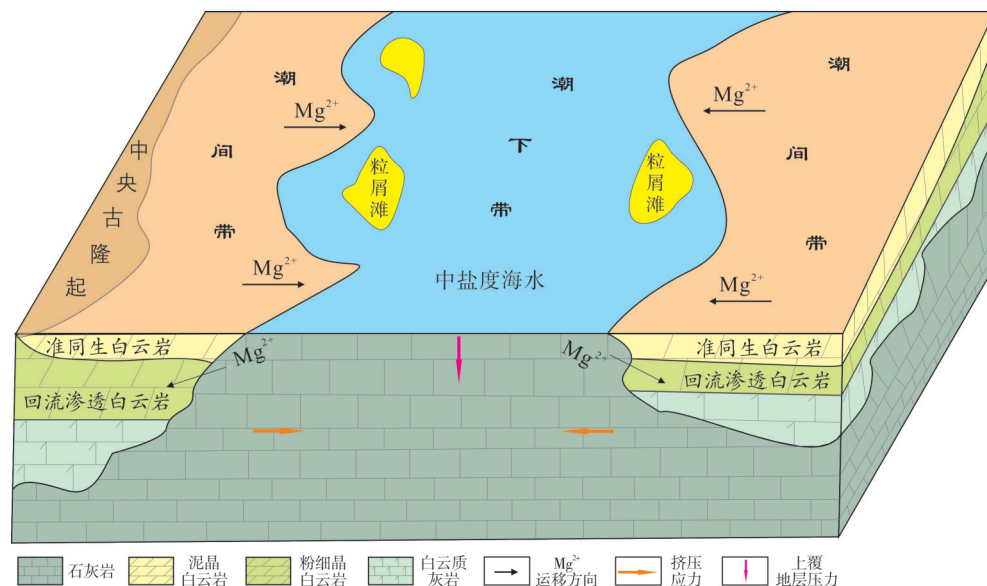


图7 鄂尔多斯盆地大牛地地区马五₅亚段白云石化作用模式

Fig. 7 Dolomitization model of O₁m₅ in Daniudi area, Ordos Basin

白云石化的一个重要结果就是岩石孔隙度的增加,尤其是晚期成岩白云石化作用,对高孔、高渗优质白云岩储层的形成起着至关重要的作用。与马五₅亚段中上部相比,研究区马五₅亚段底部泥晶白云岩的白云石化作用发育程度较低,白云石化不彻底,白云石化作用对储层储集空间的保存相对较弱,储层非均质性较强,储层质量差。回流渗透白云石化成因的粉细晶白云岩,其孔隙度明显高于蒸发浓缩白云石化成因的泥晶白云岩^[5],马五₅亚段中上部储集层基质孔隙度、渗透率平均值分别为4.57%、 $0.041 \times 10^{-3} \mu m^2$,显著高于马五₅亚段底部(孔隙度1.6%,渗透率 $0.011 \times 10^{-3} \mu m^2$)。结合马五₅亚段主要滩体及白云岩的分布特征^[9],从成岩作用角度对大牛地地区马五₅亚段有利白云岩储层发育区进行预测,认为马五₅亚段中上部白云岩发育,而且横向上滩体大面积稳定分布,因而储层均质性强、物性好,为研究区有利勘探层位(图7)。

尽管当前针对马五₅亚段中上部优质白云岩的勘探主要集中在大牛地地区,但依据本文白云岩成因模式分析,马五₅亚段优质白云岩储层亦可向大

牛地南部地区延伸(靖西地区东部)。靖西地区以马五₅亚段白云岩储层为含气层的多个含气区的发现^[38]充分印证了上述认识。该研究成果为后期扩展天然气勘探区带及评价资源总量提供了科学依据。

6 结 论

(1)鄂尔多斯盆地大牛地地区奥陶系马五₅亚段主要发育泥晶白云岩和粉细晶白云岩,泥晶白云岩主要发育于马五₅亚段底部,粉细晶白云岩主要发育于马五₅亚段中上部。泥晶白云岩中发育鸟眼、针状膏岩假晶及水平藻纹层等原始沉积构造,白云石有序度低;粉细晶白云岩常见残余砂屑和雾心亮边结构,晶间孔、溶蚀孔发育,白云石有序度相对较高。

(2)泥晶白云岩和粉细晶白云岩的 $\delta^{13}C$ 值与同期海水一致, $\delta^{18}O$ 值显著偏负,微量元素Fe、Mn、Na、K含量相对较高,Sr含量低。相较粉细晶白云岩,泥晶白云岩 $\delta^{18}O$ 值及Sr、Na含量偏高,Fe、Mn含量偏低。两类白云岩形成时期的盐度分别为24.2%、

22.6%。泥晶白云岩应为准同生阶段的产物,粉细晶白云岩应为回流渗透作用的产物,白云石化流体主要为海源性流体,无大气淡水和热液流体的参与。

(3)基于岩石学和地球化学的系统分析,建立了研究区准同生和回流渗透两种白云石化模式,马五₃亚段中上部白云岩具备大规模发育的地质条件,大牛地南部地区可成为扩大天然气勘探的新勘探领域。

参考文献

- [1] 陈志远,马振芳,张锦泉.鄂尔多斯盆地中部奥陶系马五₃亚段白云岩成因[J].石油勘探与开发,1998,25(6):37-39.
- [2] 赵俊兴,陈洪德,张锦泉,等.鄂尔多斯盆地中部马五段白云岩成因机理研究[J].石油学报,2005,26(5):42-45.
- [3] 宁博,王起琮,李百强,等.鄂尔多斯盆地马五₃亚段白云岩化成因模式[J].新疆石油地质,2015,36(5):531-538.
- [4] 杨西燕,包洪平,任军峰,等.鄂尔多斯盆地马家沟组马五₃亚段白云岩类型及稳定同位素特征[J].天然气地球科学,2015,26(4):650-656.
- [5] 于洲,丁振纯,吴东旭,等.鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马五₃亚段白云岩地球化学特征及成因模式[J].海相油气地质,2017,22(4):85-93.
- [6] 蒋传杰,杜孝华,张浩,等.苏里格气田东区下奥陶统马五₃亚段白云岩成因[J].新疆石油地质,2017,38(1):41-48.
- [7] 李凤杰,杜凌春,赵俊兴,等.鄂尔多斯盆地苏东地区马家沟组五段5亚段白云岩成因[J].石油学报,2016,37(3):328-338.
- [8] 张庄,杨西燕,董兆雄.鄂尔多斯盆地马家沟组中组合马五₃亚段白云岩特征及成因机理[J].海相油气地质,2016,21(2):65-71.
- [9] 姚泾利,王保全,王一,等.鄂尔多斯盆地地下奥陶统马家沟组马五段白云岩的地球化学特征[J].沉积学报,2009,27(3):381-389.
- [10] 赵卫卫,王宝清.鄂尔多斯盆地苏里格地区奥陶系马家沟组马五段白云岩的地球化学特征[J].地球学报,2011,32(6):681-690.
- [11] 杨华,王宝清,孙六一,等.鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组碳酸盐岩碳、氧稳定同位素特征[J].天然气地球科学,2012,23(4):616-625.
- [12] 苏中堂,陈洪德,徐粉燕,等.鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩地球化学特征及白云岩化机制分析[J].岩石学报,2011,27(8):2230-2238.
- [13] 杨俊杰,张伯荣.陕甘宁盆地油气区及油气藏序列[J].石油学报,1988,9(1):1-8.
- [14] 刘德良,孙先如,李振生,等.鄂尔多斯盆地奥陶系白云岩碳氧同位素分析[J].石油实验地质,2006,28(2):155-161.
- [15] 周文,张哨楠,李良,等.鄂尔多斯盆地塔巴庙地区上古生界储层裂缝特征及分布评价[J].矿物岩石,2006,26(4):54-61.
- [16] 白晓亮,张哨楠,丁晓琪,等.鄂尔多斯盆地大牛地奥陶系马五₂段储层成岩相[J].地质科技情报,2014,33(5):25-33.
- [17] 冯增昭,鲍志东,康祺发,等.鄂尔多斯早古生代古构造[J].古地理学报,1999,1(2):84-91.
- [18] 侯方浩,方少仙,董兆雄,等.鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境与岩相发育特征[J].沉积学报,2003,21(1):106-112.
- [19] 贺训云,寿建峰,沈安江,等.白云岩地球化学特征及成因:以鄂尔多斯盆地靖西马五段中组合为例[J].石油勘探与开发,2014,41(3):375-384.
- [20] POTTER R W, CLYNNE M A, BROWN D L. Freezing point depression of aqueous sodium chloride solutions[J]. Economic geology, 1978, 73(2): 284-285.
- [21] MACHEL H G, MOUNTJOY E W. Chemistry and environments of dolomitization: a reappraisal[J]. Earth-Science reviews, 1986, 23(3): 175-222.
- [22] GOLDSTEIN R H, REYNOLDS T J. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals[M]. SEPM short course 31, 1994.
- [23] 杜洋,樊太亮,高志前.塔里木盆地中下奥陶统碳酸盐岩地球化学特征及其对成岩环境的指示:以巴楚大板塔格剖面 and 阿克苏蓬莱坝剖面为例[J].天然气地球科学,2016,27(8):1509-1523.
- [24] KAUFMAN A J, KNOLL A H, AWRAMIK S M. Biostratigraphic and chemostratigraphic correlation of Neoproterozoic sedimentary successions: Upper Tindir Group, northwestern Canada, as a test case[J]. Geology, 1992, 20(2): 181-185.
- [25] EMERY D, ROBINSON A. Inorganic geochemistry: applications to petroleum geology[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1993.
- [26] ALLAN J R, WIGGINS W D. Dolomite reservoirs: geochemical techniques for evaluating origin and distribution[M]// AAPG, continuing education course notes series 36, 1996: 36-129.
- [27] 黄正良,包洪平,任军峰,等.鄂尔多斯盆地南部奥陶系马家沟组白云岩特征及成因机理分析[J].现代地质,2011,25(5):925-930.
- [28] KEITH M L, WEBER J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestone and fossils[J]. Acta geochemica et cosmochemica, 1964, 28(10): 1787-1816.
- [29] WALKER G, ABUMERE O E, KAMALUDDIN B. Luminescence spectroscopy of Mn²⁺ centres in rock-forming carbonates[J]. Mineralogical magazine, 1989, 53(370):201-211.
- [30] VAHRENKAMP V C, SWART P K. New distribution coefficient for the incorporation of strontium into dolomite and its implication for the formation of ancient dolomites[J]. Geology, 1990, 18(5): 387-391.

- [31] 李振宏,杨永恒,郑聪斌.鄂尔多斯盆地天环北段白云岩体成因及储集性能[J].海相油气地质,2005,10(3):19-24.
- [32] VEIZER J. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater[J].Chemical geology, 1999, 161(1/3): 59-88.
- [33] WARREN J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations [J]. Earth-Science reviews, 2000, 52(1/3): 1-81.
- [34] LAND L S, HOOPS G K. Sodium in carbonate sediments and rocks: a possible index to the salinity of diagenetic solutions [J]. Journal of sedimentary research, 1973, 43(3): 614-617.
- [35] 强子同.碳酸盐岩储层地质学[M].东营:中国石油大学出版社,1998.
- [36] 任战利.鄂尔多斯盆地热演化史与油气关系的研究[J].石油学报,1996,17(1):17-24.
- [37] 于春勇,崔军平.鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部马家沟组马五₅亚段白云岩地球化学特征及其成因[J].地球科学,2019,44(8):2761-2774.
- [38] 孔庆芬,张文正,李剑锋,等.鄂尔多斯盆地靖西地区下古生界奥陶系天然气成因研究[J].天然气地球科学,2016,27(1):71-80.

编辑:董庸

Geochemical characteristics and genesis of the Ma5₅ dolomite of Ordovician Majiagou Formation in Daniudi area, Ordos Basin

YU Chunyong, JIA Yumeng, REN Zhanli, WANG Qicong, REN Hujun

Abstract: Since the discovery of high quality dolomite reservoirs in Submember Ma5₅ of the Ordovician Majiagou Formation ($O_1m_5^5$) in Daniudi area of the Ordos Basin, the dolomite genesis has become the key to natural gas exploration in this interval. Based on petrological characteristics, the geochemical characteristics and genesis of $O_1m_5^5$ dolomite in Daniudi area are systematically studied with geochemical test data such as isotopic compositions, trace element contents, and fluid inclusion data. The results show that: (1) There are two types of dolomite, i.e., micrite dolomite and very fine-fine crystalline dolomite in $O_1m_5^5$, and the former mainly developed at the bottom, the latter mainly developed in the upper-middle part. (2) In the micrite dolomite, the original sedimentary structures such as horizontal algae lamina, bird's eye and acicular gypsum pseudocrystal are developed, the pores were not developed. The order degree of dolomite was low, with an average value of 0.63. The average value of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ are -0.65‰ and -6.65‰ respectively. The content of Sr and Na ($151\text{ }\mu\text{g/g}$ and $488\text{ }\mu\text{g/g}$ respectively) is high, and the content of Fe and Mn ($1\,202\text{ }\mu\text{g/g}$ and $49\text{ }\mu\text{g/g}$ respectively) is low. The salinity (24.2%) during the formation period is basically consistent with that of micrite limestone. It is inferred that micrite dolomite should be the product of the quasi syngenetic stage in tidal flat environment of limited platform. (3) In the very fine-fine crystalline dolomite, the sedimentary structures of residual sand debris and "fog core and bright edge" are common, and the intercrystalline pores are developed. The order degree of dolomite is relatively high, with an average value of 0.89. The average values of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ are -1.33‰ and -8.91‰ respectively. Compared with the micrite dolomite, the content of Sr and Na ($78\text{ }\mu\text{g/g}$ and $426\text{ }\mu\text{g/g}$ respectively) is low, while the content of Fe and Mn ($1\,974\text{ }\mu\text{g/g}$ and $77\text{ }\mu\text{g/g}$ respectively) is high. The salinity (22.6%) during the formation period is similar to that of micrite limestone. It is inferred that the very fine-fine crystalline dolomite should be the product of reflux infiltration in shallow burial stage in tidal flat shoal environment. (4) The dolomitization fluid of $O_1m_5^5$ is mainly sea-sourced, without the participation of atmospheric fresh water and hydrothermal fluid. Based on the above petrological and geochemical characteristics, the quasi syngenetic and reflux infiltration dolomitization models of the $O_1m_5^5$ in Daniudi area are established, which provides a theoretical guidance for the prediction of high quality dolomite reservoirs and the selection of geological exploration directions in the study area.

Key words: trace element; fluid inclusion; genesis of dolomite; Ordovician; Daniudi area; Ordos Basin

YU Chunyong, First author: PhD, Senior Engineer, mainly engaged in sedimentology and reservoir geology of carbonate rocks. Add: Hydrogeology Bureau of CNACG, 13th floor, Guotou Building, Jieyuan Rd., Hongqiao District, Tianjin 300121, China