

引用格式:郑剑锋,黄理力,袁文芳,等.塔里木盆地柯坪地区下寒武统肖尔布拉克组地球化学特征及其沉积和成岩环境意义[J].天然气地球科学,2020,31(5):698-709.

ZHENG Jianfeng, HUANG Lili, YUAN Wenfang, et al. Geochemical features and its significance of sedimentary and diagenetic environment in the Lower Cambrian Xiaerblak Formation of Keping area, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(5): 698-709.

DOI: 10.11764/j.issn.1672-1926.2020.04.008

塔里木盆地柯坪地区下寒武统肖尔布拉克组 地球化学特征及其沉积和成岩环境意义

郑剑锋^{1,2}, 黄理力^{1,2}, 袁文芳³, 朱永进^{1,2}, 乔占峰^{1,2}

(1. 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室, 浙江 杭州 310023;

2. 中国石油杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023;

3. 中国石油塔里木油田公司, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:下寒武统肖尔布拉克组是塔里木盆地寒武系盐下领域主要勘探目的层之一,然而当前沉积相及储层成因认识不深制约了勘探的突破。以柯坪地区肖尔布拉克剖面为对象,在野外实测描述的基础上,优选样品开展了碳氧稳定同位素、锶同位素、白云石有序度、微量元素、稀土元素、U—Pb同位素定年和团簇同位素分析。结果表明:①肖尔布拉克组主要发育层纹石、凝块石、黏结颗粒、泡沫绵层石和叠层石5种微生物白云岩,自下而上的岩相组合特征可将其分为3个段5个亚段,整体构成一个三级层序;②柯坪地区早寒武世肖尔布拉克组沉积期整体处于温热—干热气候,相对正常—较高海水盐度、水体向上逐渐变浅和氧含量逐渐增加的海洋环境,发育碳酸盐缓坡背景下的外缓坡微生物层—中缓坡微生物丘—内缓坡微生物丘滩—潮坪沉积序列;③白云岩形成于准同生—浅埋藏期相对较低温度环境,白云石化流体为具有较高盐度的海水;④储层储集空间类型主要为原生微生物格架孔和受早表生期大气淡水溶蚀作用改造的溶蚀孔洞,沉积微相、高频层序界面和早期白云石化作用是控制储层发育的主要因素。研究成果可以为该领域岩相古地理编图和储层分布预测提供依据。

关键词:沉积与成岩环境;地球化学特征;下寒武统;肖尔布拉克组;柯坪地区;塔里木盆地

中图分类号:TE122.1⁺13

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2020)05-0698-12

0 引言

塔里木盆地寒武系盐下油气资源量巨大,同时具有优质的储盖组合,是发现大型油气田直接战略性领域^[1-4]。近20年来该领域勘探一直没有取得突破,直到2012年中深1井获得成功,揭示了该领域具有优越的成藏条件^[5]。然而随着玉龙6、新和1、楚探1、和田2等探井相继失利,使得其勘探方向及潜力受到了一定质疑。2019年塔里木油田公司将寒武系盐下作为风险勘探的三大主攻领域之一,随

之该领域的研究也得到进一步加强。2020年轮探1井在8 200 m超深层获得工业油气流,标志着塔里木盆地寒武系盐下超深层领域勘探取得重大突破,坚定了石油人寻找大油气田的信心和决心。

下寒武统肖尔布拉克组是寒武系盐下的主要勘探层系,也是近年来的研究热点,在沉积研究方面:杨永剑等^[6]认为早寒武世沉积相由广海陆棚转变为蒸发台地;倪新锋等^[7]认为肖尔布拉克组沉积期发育缓坡型台地,并且北部发育台缘带;李保华等^[8]认为柯坪地区存在台缘带,颗粒滩是最有利的

收稿日期:2020-03-23;修回日期:2020-04-04.

基金项目:国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(编号:2016ZX05004-002);中国石油重大科技项目“古老碳酸盐岩油气成藏分布规律与关键技术”(编号:2019B-0405)联合资助.

作者简介:郑剑锋(1977-),男,浙江龙游人,高级工程师,硕士,主要从事碳酸盐岩沉积、储层研究.E-mail:zhengjf_hz@petrochina.com.cn.

相带;胡明毅等^[9]认为盆地西高东低、南高北低的构造古地貌格局下发育混积潮坪、局限一半蒸发台地、开阔台地、台地边缘、斜坡—盆地相;郑剑锋等^[10]认为肖尔布拉克组沉积期为一具有“微生物席—丘滩—潮坪”沉积体系的缓坡型碳酸盐岩台地;乔占峰等^[11]认为于柯坪—巴楚地区发育匀斜缓坡背景下的微生物丘和藻砂屑滩。在储层研究方面:陈文玲等^[12]认为主要发育台地相颗粒白云岩,沉积作用是储层的主控因素之一;宋金民等^[13]、黄擎宇等^[14]、邓世彪等^[15]、余浩元等^[16]认为主要发育微生物岩,储层发育受控于沉积古地貌、成岩作用和微生物结构;沈安江等^[17]、严威等^[18]、王珊等^[19]、郑剑锋等^[20]认为微生物礁滩相储层品质好,沉积相及早表生期大气淡水溶蚀作用是储层发育的主控因素;李斌等^[21]认为储层经历多种白云石化作用改造,以埋藏白云石化作用为主,并受热液作用影响。可以看出,目前对于肖尔布拉克组的沉积相类型、白云岩成因和储层主控因素的认识仍存在较大分歧,制约了该领域勘探的进一步突破。

沉积物地球化学特征对古沉积环境和成岩环境具有指示意义,因此研究以柯坪地区肖尔布拉克

剖面为对象,在对露头进行系统描述的基础上,优选样品开展了碳氧同位素、锶同位素、白云石有序度、微量稀土元素测试,分析了肖尔布拉克组沉积期的古沉积环境和白云岩形成环境;同时优选储集空间中主要的碳酸盐胶结物样品开展了团簇同位素测温及U—Pb同位素定年分析,探讨了孔隙的形成环境,以期对研究塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组岩相古地理、储层成因及分布规律研究有所裨益。

1 地质背景

塔里木盆地是一个由古生代克拉通盆地和中、新生代前陆盆地组成的多旋回叠合含油气盆地^[22],面积达 $56 \times 10^4 \text{ km}^2$,依据现今构造单元划分成果,可划分为“三隆四坳”7个一级构造单元,分别为塔北隆起、中央隆起、东南隆起、库车坳陷、北部坳陷、东南坳陷及西南坳陷。柯坪露头区位于盆地西北部,构造分区属于塔北隆起柯坪断隆东段^[23],柯坪断隆古生界地层与构造特征属于塔里木盆地的一部分^[24],肖尔布拉克剖面位于阿克苏市西南约50 km处(图1)。

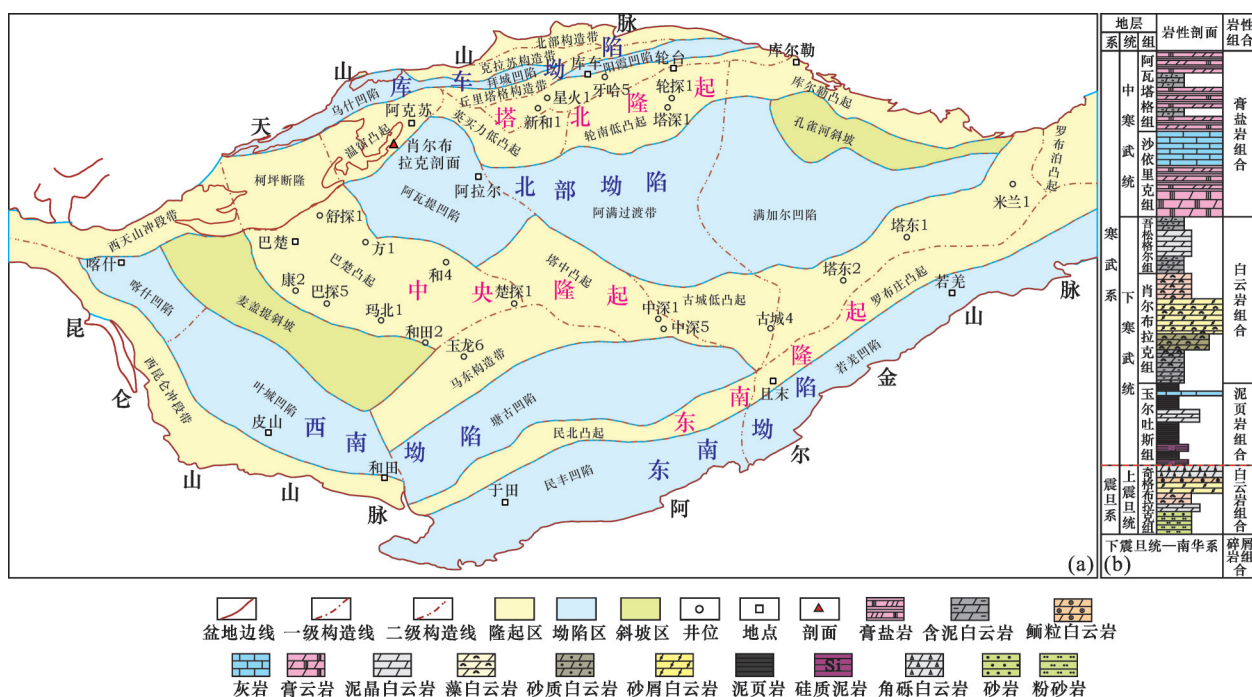


图1 塔里木盆地构造单元图(a)与前寒武系—寒武系地层综合柱状图(b)

Fig.1 Structural units map(a) and stratigraphic section of Precambrian-Cambrian formations(b), Tarim Basin

塔里木盆地前寒武纪构造演化与哥伦比亚超大陆、罗迪尼亚超大陆的聚合—裂解旋回密切相关^[25],新元古代末,受罗迪尼亚超大陆裂解影响,南

华纪—早震旦世以大陆拉张作用为主,塔里木板块进入裂谷体系发育阶段,形成“两隆夹一坳”的古构造格局;晚震旦世塔里木盆地整体继承了前期古构

造格局,同时裂谷的持续扩张导致洋盆周缘沉降而出现坳陷,形成以滨浅海碳酸盐岩台地为主的坳陷盆地^[26-27];震旦纪末,“柯坪运动”导致塔里木板块内部强烈构造隆升,震旦系与寒武系之间广泛发育不整合。下寒武统玉尔吐斯组沉积期塔里木盆地为缓坡陆棚沉积体系,在经历快速海侵后形成了优质烩源岩^[28];随后全盆地处于缓慢的海退期,“三隆两洼”的古构造格局控制肖尔布拉克组沉积期裂后沉降碳酸盐岩缓坡体系^[29];随着古气候变的干旱炎热及台地自身“桶状”结构的发育,中寒武世广泛分布厚层蒸发岩,构成了区域的优质直接盖层^[30]。

肖尔布拉克剖面震旦系—寒武系出露完整,下寒武统玉尔吐斯组与上震旦统齐格布拉克组呈平行不整合接触,肖尔布拉克组与玉尔吐斯组和吾松格尔组呈整合接触。肖尔布拉克组实测厚度约158 m,依据颜色、岩性、沉积结构等特征,可以将肖尔布拉克组划分为肖上段、肖中段、肖下段3个段,其中肖中段又可分为肖中1、肖中2、肖中3共3个亚段(图2),整体构成一个三级层序。肖下段主要岩相为黑灰色纹—薄层状层纹石白云岩[图3(a)];肖中1亚段主要岩相为深灰色薄层状多溶蚀孔洞凝块石(连续状)白云岩[图3(b)],肖中2亚段主要岩相为灰色中层状多孔凝块石(分散状)白云岩[图3(c)],肖中3亚段主要岩相为浅灰—灰白色厚层一块状晶粒白云岩[图3(d)]、泡沫绵层石白云岩[图3(e)]和具有黏结结构的颗粒白云岩[图3(f)],其中中部泡沫绵层石白云岩溶孔非常发育,晶粒白云岩推测原岩为颗粒灰岩^[21];肖上段主要岩相为灰色中层状叠层石(水平层状和丘状为主)白云岩[图3(g)]和灰色、黄灰色薄层状泥质白云岩、泥粒白云岩夹黄色泥岩[图3(h)],常见帐篷构造[图3(i)]、泥裂等现象。实测GR显示肖上段值较高且呈锯齿状,其他层段则整体表现为低值低幅的特征。

2 样品及方法

研究所需样品均采自柯坪露头区肖尔布拉克剖面肖尔布拉克组,共110件,全部为未受风化或蚀变等影响的新鲜样品,所有样品都有一套对应的铸体薄片。优选89件样品进行碳氧同位素分析,建立肖尔布拉克组碳同位素趋势线;其中的13件样品又分别进行锶同位素、白云石有序度、微量和稀土元素分析,样品覆盖肖尔布拉克组3个段5个亚段的8种主要岩石类型;此外为了解决白云岩成岩环境及

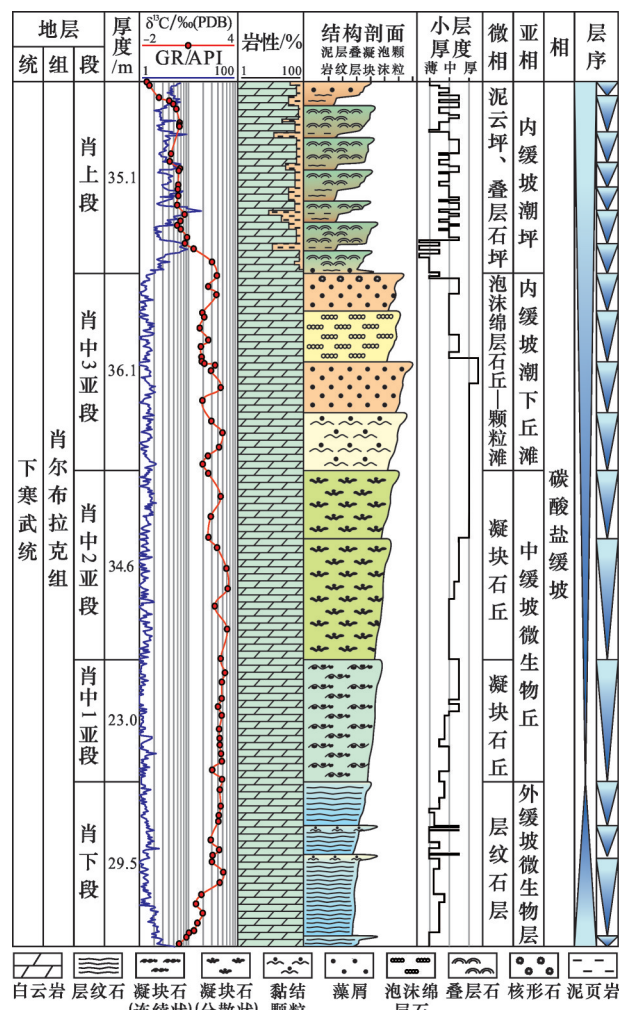


图2 肖尔布拉克组综合柱状图

Fig.2 Lithological column of Xiaoerblak Formation

储层成因问题,优选5件包含碳酸盐胶结物的样品,对围岩和胶结物分别进行U—Pb同位素年龄测试,并对碳酸盐胶结物进行团簇同位素分析。为了避免碳酸盐胶结物与围岩的相互影响,利用小型微取样钻机钻取单一结构组分的样品,并利用玛瑙研钵分别将样品研磨至200目,然后用透明绘图纸分包。

碳氧同位素、锶同位素、白云石有序度、微量和稀土元素检测均在中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室(杭州)完成,碳氧同位素检测仪器型号为Delta V Advantage同位素质谱仪,锶同位素检测仪器型号为Triton Plus热电离同位素质谱仪,白云石有序度检测仪器型号为X'pert Pro型X-射线衍射仪,微量稀土元素检测仪器型号为PANalytical Axios XRFX射线荧光光谱仪。碳酸盐激光原位U—Pb年龄检测在澳大利亚昆士兰大学地球科学学院放射性同位素实验室完成,激光剥蚀系统为

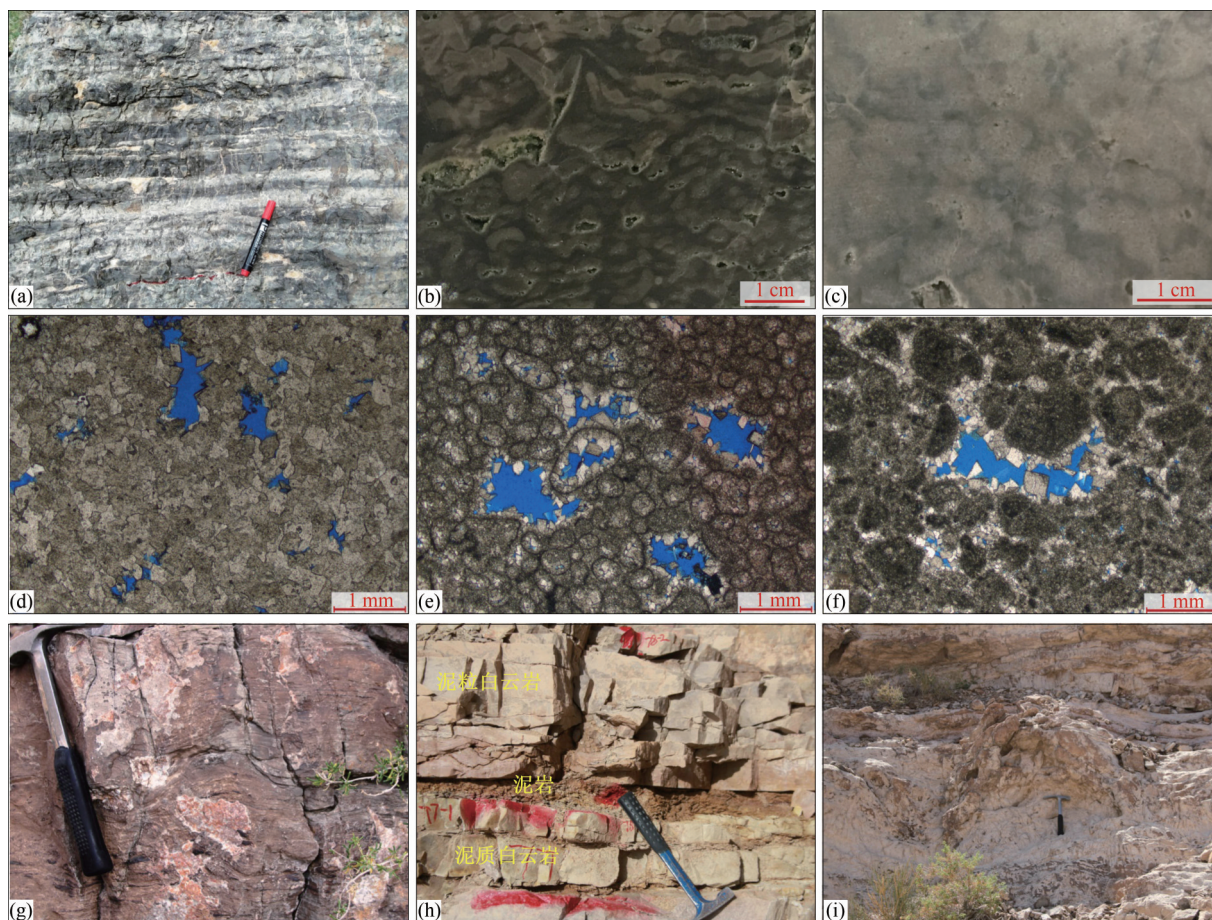


图3 肖尔布拉克组白云岩类型及岩石特征

Fig.3 Dolomite types and features of Xiaerblak Formation

(a)层纹石白云岩,微波状暗纹层相间,肖下段,露头;(b)凝块石白云岩,凝块层状连续分布,肖中1亚段,露头;(c)凝块石白云岩,凝块网状分布,暗色比例少,肖中2亚段,露头;(d)细一中晶白云岩,见发育晶间溶孔,肖中3亚段,蓝色铸体;(e)泡沫绵层石白云岩,窗格溶孔发育,肖中3亚段,蓝色铸体;(f)颗粒白云岩,具有微生物黏结结构,粒间残留少量溶孔,肖中3亚段,蓝色铸体;(g)叠层石白云岩,呈低幅丘状,肖上段,露头;(h)泥质白云岩、泥岩与泥质白云岩互层,肖上段,露头;(i)泥粒白云岩,具帐篷构造,肖上段,露头

ASI RESOLUTION SE,检测仪器型号为Nu Plasma II多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS);团簇同位素检测在美国迈阿密大学的同位素实验室完成,检测仪器型号为Mat-253气体稳定同位素质谱仪。

3 测试结果

3.1 碳氧稳定同位素

稳定碳氧同位素组成与引起白云石化的流体介质有关,主要受介质盐度和温度的影响,因此可用于判断白云石化流体性质和成岩环境。根据89个样品测试结果得到的碳氧同位素交会图(图4),可以看出碳氧同位素无相关性,说明成岩作用对岩石的影响弱,数据可以反映当时的环境。肖尔布拉克组白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(PDB标准)、 $\delta^{18}\text{O}$ 值(PDB标

准)范围分别为 $-0.78\text{‰} \sim 3.39\text{‰}$ 和 $-8.24\text{‰} \sim -5.41\text{‰}$,平均值分别为 1.94‰ 和 -6.86‰ ,与VEIZER等^[31]基于全球早一中寒武世海水统计得到

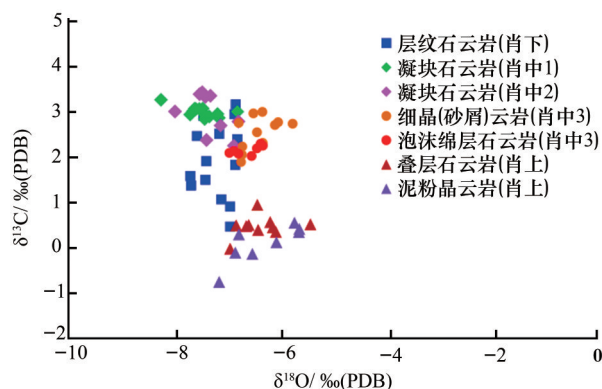


图4 肖尔布拉克组白云岩碳氧同位素交会图

Fig.4 Carbon and oxygen isotope crossplot of Xiaerblak Formation

的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 $-6\text{‰}\sim-8\text{‰}$ 接近。不同层段的 $\delta^{13}\text{C}$ 值具有一定的可区分性,而 $\delta^{18}\text{O}$ 值可区分性不强。

3.2 锶同位素

碳酸盐岩中锶同位素受环境及流体影响,是指示古气候及成岩流体性质的重要参数。根据测试结果(表1),肖尔布拉克组白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值范围为0.708 843~0.713 343,平均值为0.709 790,其中肖上段2个含泥质样品略高于其他样品,除去受泥质影响样品,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值为0.709 156,整体与DENISON等^[32]基于全球早一中寒武世海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值统计得到数据0.709 0近似;此外还可以看出, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值与微生物岩类型无关。

3.3 白云石有序度

白云石有序度是衡量白云岩结晶速度、结晶温度与演化程度的一个重要指标^[33]。根据测试结果(表1),肖尔布拉克组白云岩的白云石有序度值范围为0.45~0.77,平均值为0.59,都属于低有序度范围。

3.4 元素分析

碳酸盐岩的元素地球化学可以较好地揭示岩石的沉积、成岩背景,如古气候、氧化—还原环境、水体深度等^[34]。根据测试结果(表2),除肖上段2个含泥质白云岩外,其余样品的MgO/CaO值接近0.71,说明所选样品都为纯白云岩;Al、Na、Sr、Fe和Mn的含量相对较高,其范围分别为 $(100\sim9\,090)\times 10^{-6}$ 、 $(240\sim$

表1 肖尔布拉克组白云岩碳氧同位素、锶同位素、有序度测试结果
Table 1 Order degree, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ value of Xiaerblak Formation dolomite

样品 编号	岩性	层段	$\delta^{13}\text{C}/$ ‰(PDB)	$\delta^{18}\text{O}/$ ‰(PDB)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}\pm 2\sigma$	古盐度(Z)	古温度(T) /℃	有序度
X1-1	层纹石白云岩	肖下段	0.88	-6.93	0.709 374±3	125.7	21.6	0.77
X1-2	层纹石白云岩	肖下段	1.34	-7.67	0.708 992±8	126.2	25.0	0.50
X2-1	凝块石白云岩	肖中1亚段	2.85	-7.33	0.708 843±6	129.5	23.4	0.55
X2-2	凝块石白云岩	肖中1亚段	2.91	-7.42	0.709 289±13	129.6	23.8	/
X3-1	凝块石白云岩	肖中2亚段	3.03	-7.45	0.709 167±7	129.8	24.0	0.60
X3-2	凝块石白云岩	肖中2亚段	3.35	-7.51	0.709 189±4	130.4	24.2	0.68
X4-1	细晶(砂屑)白云岩	肖中3亚段	2.66	-7.11	0.709 122±8	129.2	22.4	0.65
X4-2	粘结砂屑白云岩	肖中3亚段	2.67	-6.09	0.709 113±17	129.7	17.8	0.59
X4-3	泡沫绵层白云岩	肖中3亚段	2.10	-6.86	0.709 105±6	128.2	21.2	0.45
X4-4	泡沫绵层白云岩	肖中3亚段	2.26	-6.36	0.709 113±10	128.8	19.0	0.56
X5-1	叠层石白云岩	肖上段	0.36	-6.40	0.709 412±6	124.9	19.2	0.60
X5-2	含泥颗粒白云岩	肖上段	-0.13	-6.83	0.713 218±2	123.6	21.1	/
X5-3	泥质泥晶白云岩	肖上段	-0.78	-7.51	0.713 343±11	122.0	24.2	/

表2 肖尔布拉克组白云岩元素测试结果
Table 2 Constant elements compositions of Xiaerblak Formation dolomite

样品 编号	V/ (10^{-6})	Cr/ (10^{-6})	Mn/ (10^{-6})	Ni/ (10^{-6})	Cu/ (10^{-6})	Zn/ (10^{-6})	Ga/ (10^{-6})	Sr/ (10^{-6})	Ba/ (10^{-6})	Pb/ (10^{-6})	K/ (10^{-2})	Na/ (10^{-2})	Fe/ (10^{-2})	Al/ (10^{-2})	CaO/ (10^{-2})	MgO/ (10^{-2})
X1-1	6.86	1.19	180	6.19	2.69	3.74	0.12	111.8	3.68	0.54	<0.01	0.040	0.028	0.038	29.96	21.63
X1-2	7.77	4.43	283	7.08	2.55	14.10	0.10	108.2	3.41	0.89	0.01	0.041	0.134	0.025	30.00	21.48
X2-1	6.67	4.90	271	6.60	2.73	9.01	0.10	159.1	7.67	0.89	<0.01	0.063	0.164	0.022	30.06	21.61
X2-2	6.26	4.20	322	6.81	3.49	9.61	0.12	63.8	7.98	2.08	<0.01	0.039	0.230	0.030	29.82	21.79
X3-1	5.75	3.26	239	7.05	2.92	8.25	0.08	97.6	5.85	1.25	<0.01	0.048	0.155	0.023	29.94	21.77
X3-2	5.23	1.81	205	6.04	2.25	9.33	0.07	107.8	5.74	1.04	<0.01	0.051	0.122	0.020	30.19	21.61
X4-1	5.02	2.12	157	6.56	3.21	5.05	0.05	59.8	2.00	1.00	<0.01	0.038	0.106	0.014	29.69	22.06
X4-2	5.17	1.26	141	6.42	1.87	6.21	0.04	72.8	11.30	0.39	<0.01	0.097	0.058	0.013	30.56	21.52
X4-3	5.47	0.45	90	9.33	1.01	2.66	0.02	78.5	27.30	0.84	<0.01	0.024	0.021	0.010	30.19	21.70
X4-4	5.28	1.37	129	7.49	2.33	4.64	0.04	79.4	13.53	0.91	<0.01	0.053	0.062	0.012	30.15	21.76
X5-1	9.64	3.22	150	9.95	3.46	26.70	0.20	93.8	12.20	1.38	0.03	0.031	0.119	0.077	30.44	21.43
X5-2	15.62	11.10	373	17.83	29.30	95.90	1.33	135.2	23.20	20.70	0.23	0.105	0.925	0.569	23.66	16.42
X5-3	15.66	7.89	148	18.80	9.89	68.30	1.12	88.8	28.10	19.10	0.20	0.068	1.574	0.909	18.49	13.15

$1\ 050) \times 10^{-6}$ 、 $(63.8 \sim 159.1) \times 10^{-6}$ 、 $(280 \sim 15\ 740) \times 10^{-6}$ 和 $(90 \sim 373) \times 10^{-6}$,其平均值分别为 $1\ 360 \times 10^{-6}$ 、 540×10^{-6} 、 97×10^{-6} 、 $2\ 840 \times 10^{-6}$ 和 207×10^{-6} ;V、Cr、Ni、Cu、Ga、Ba、Pb含量较低,都小于 10×10^{-6} ,但无一例外肖上段的含量比其他层段明显要高。

碳酸盐岩矿物中稀土元素相对丰度主要取决于流体中稀土元素的含量和地球化学性质,故可以判断白云石化流体的来源^[35]。

根据测试结果经球粒陨石标准化(表3)可以看

出,除了肖上段2个含泥质白云岩样品的总稀土含量(ΣREE)具有较高值外 $(90.2 \sim 99.3) \times 10^{-6}$,其余不同岩相白云岩的 ΣREE 值范围为 $(1.8 \sim 31.3) \times 10^{-6}$,平均值为 8.7×10^{-6} 。稀土元素配分曲线(图5)表现为轻稀土元素(ΣLREE)大于重稀土元素(ΣHREE)的配分模式,与寒武系泥晶灰岩的稀土元素配分模式一致^[33];此外,不同层段的白云岩具有一定的可区分性,总体具有肖下段和肖上段较高,肖中段较低的特征。

表3 肖尔布拉克组白云岩稀土元素测试结果

Table 3 REE compositions of Xiaerblak Formation dolomite

样品 编号	Y/ (10^{-6})	La/ (10^{-6})	Ce/ (10^{-6})	Pr/ (10^{-6})	Nd/ (10^{-6})	Sm/ (10^{-6})	Eu/ (10^{-6})	Gd/ (10^{-6})	Tb/ (10^{-6})	Dy/ (10^{-6})	Ho/ (10^{-6})	Er/ (10^{-6})	Tm/ (10^{-6})	Yb/ (10^{-6})	Lu/ (10^{-6})	$\Sigma\text{REE}/$ (10^{-6})
X1-1	3.15	9.762	5.533	4.203	3.528	1.913	0.982	1.350	0.968	0.821	0.806	0.706	0.602	0.594	0.517	32.283
X1-2	1.68	4.101	3.279	2.609	2.236	1.261	0.704	0.868	0.599	0.487	0.495	0.392	0.326	0.311	0.284	17.951
X2-1	0.89	2.037	1.240	1.159	0.972	0.609	0.335	0.386	0.335	0.256	0.253	0.212	0.175	0.219	0.181	8.369
X2-2	0.48	1.164	0.768	0.543	0.444	0.274	0.173	0.199	0.141	0.138	0.150	0.122	0.125	0.119	0.103	4.465
X3-1	0.57	1.131	0.753	0.630	0.524	0.313	0.208	0.227	0.194	0.156	0.176	0.135	0.163	0.136	0.149	4.895
X3-2	0.69	0.979	0.697	0.616	0.514	0.330	0.242	0.264	0.229	0.169	0.219	0.161	0.251	0.142	0.207	5.019
X4-1	0.21	0.344	0.307	0.203	0.167	0.109	0.081	0.061	0.070	0.062	0.081	0.047	0.100	0.064	0.103	1.799
X4-2	0.23	0.370	0.307	0.217	0.181	0.096	0.069	0.090	0.070	0.062	0.092	0.055	0.075	0.068	0.078	1.831
X4-3	0.19	0.344	0.287	0.196	0.167	0.109	0.104	0.064	0.106	0.054	0.069	0.047	0.100	0.087	0.129	1.862
X4-4	0.25	0.353	0.302	0.205	0.171	0.104	0.095	0.092	0.098	0.067	0.089	0.063	0.114	0.077	0.108	1.938
X5-1	0.54	1.349	0.973	0.870	0.708	0.370	0.231	0.248	0.264	0.210	0.207	0.157	0.150	0.210	0.155	6.103
X5-2	6.24	19.259	15.881	13.261	10.819	6.609	3.002	4.148	3.521	2.795	2.535	2.314	2.080	2.237	1.731	90.193
X5-3	7.22	15.159	14.754	14.058	12.472	9.217	4.619	5.595	4.754	3.821	3.341	2.980	2.757	3.151	2.584	99.261

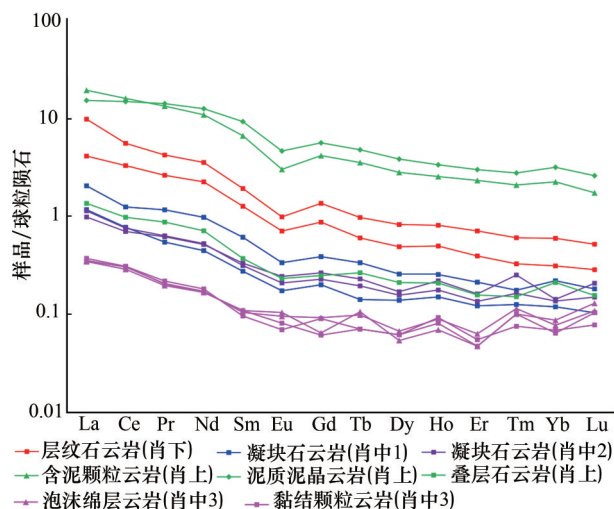


图5 肖尔布拉克组白云岩稀土元素配分模式

Fig.5 REE patterns of Xiaerblak Formation dolomite

3.5 U—Pb 同位素年龄

碳酸盐岩激光原位U—Pb测年技术可以解决古老碳酸盐岩围岩及其胶结物的年龄问题^[36],根据

测试结果(表4),5个微生物岩围岩的年龄范围为 $(480 \pm 25) \sim (517 \pm 25)$ Ma,都在国际地层委员会2018年更新的国际地质年代表寒武统年龄范围内,且都大于其对应的孔缝洞中碳酸盐胶结物的年龄,说明测试数据是可靠的;3个溶蚀孔洞中充填的粗晶方解石的年龄分别为 495 ± 12 Ma、 471 ± 10 Ma和 481 ± 29 Ma,也在寒武纪年龄范围内;2个裂缝中方解石胶结物的年龄分别 204 ± 37 Ma和 205 ± 10 Ma,属于三叠纪年龄范围内;2个孔缝中充填的鞍状粗晶白云石的年龄分别为 45 ± 69 Ma和 29 ± 43 Ma,属于古近纪年龄范围内。

3.6 团簇同位素

团簇同位素是一种近年新兴的用于测定碳酸盐岩矿物成岩温度的实验技术^[37],根据测试结果(表5),不同产状的碳酸盐胶结物形成于不同的温度环境,2个溶缝中充填的鞍状粗晶白云石的形成温度较高,分别为 $85.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $83.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,其成岩流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{w}}$ 值(SMOW标准)分别为 1.93‰ 和 1.33‰ ;3个

表 4 肖尔布拉克组微生物白云岩及其碳酸盐胶结物 U—Pb 同位素年龄测试结果

Table 4 U-Pb isotopic dating of Xiaerblak Formation microbial dolomite

样品编号	产状	同位素年龄/Ma	样号	产状	同位素年龄/Ma
X1-C1a	微生物岩围岩	517±30	X1-C3b	孔洞中方解石	471±10
X1-C1b	孔缝中鞍状白云石	45±69	X1-C4a	微生物岩围岩	512±11
X1-C1b	孔缝中鞍状白云石	29±43	X1-C4b	裂缝中方解石	204±37
X1-C2a	微生物岩围岩	515±32	X1-C4c	裂缝中方解石	205±10
X1-C2b	孔洞中方解石	495±12	X1-C5a	微生物岩围岩	499.6±8.3
X1-C3a	微生物岩围岩	480±25	X1-C5b	孔洞中方解石	481±29

表 5 肖尔布拉克组碳酸盐胶结物团簇同位素测试结果

Table 5 Cluster isotope test data of Xiaerblak Formation microbial dolomite

样品编号	产状	$\delta^{13}\text{C}_m$ /‰(PDB)	标准偏差 (S_d)	$\delta^{18}\text{O}_m$ /‰(PDB)	标准偏差 (S_d)	$\Delta 47$	$T/^\circ\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}_w$ /‰(SMOW)
X1-C1b	孔缝中鞍状白云石	0.87	0.01	-10.59	0.01	0.555	85.3	1.93
X1-C1b	孔缝中鞍状白云石	-0.46	0.02	-10.92	0.02	0.555 9	83.4	1.33
X1-C2b	孔洞中方解石	-2.49	0.01	-10.57	0.01	0.647	41.8	-5.00
X1-C3b	孔洞中方解石	-2.81	0.01	-11.21	0.01	0.638	45.3	-5.02
X1-C4b	裂缝中方解石	-0.68	0.02	-13.66	0.03	0.576	74.0	-2.82
X1-C5b	孔洞中方解石	-2.25	0.05	-9.5	0.05	0.668	34.0	-5.38

溶蚀孔洞中充填的粗晶方解石的形成温度较低,分别为 41.8℃、45.3℃和 34℃,流体 $\delta^{18}\text{O}_w$ 值(SMOW 标准)值分别为 -5.00‰、-5.02‰和 -5.38‰;裂缝中充填的粗晶方解石的形成温度为 74℃, $\delta^{18}\text{O}_w$ 值(SMOW 标准)为 -2.82‰。

4 讨论

4.1 沉积环境

随着沉积地球化学学科的发展,利用沉积岩或沉积物在沉积—成岩过程中所含元素及同位素迁移、聚集与分布规律分析沉积环境是沉积学研究的重要手段之一,沉积环境包括古盐度、古水温、古气候、古水深、古氧化还原状态等。

通常碳氧同位素随流体介质盐度升高而升高,其中碳同位素与古盐度关系最为密切,并且受温度影响较小。KEITH 等^[38]提出用碳氧同位素计算海水古盐度参数(Z)公式: $Z=2.048\times(\delta^{13}\text{C}+50)+0.498\times(\delta^{18}\text{O}+50)$,其中 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值都为 PDB 标准,并认为 $Z<120$ 代表海水环境, $Z>120$ 代表海水环境。根据计算结果,肖尔布拉克组白云岩的 Z 值范围为 122.0~130.4,平均值为 127.5,为正常海水一较高盐度海水范围,其中肖中段 Z 值最高,肖下段次之、肖上段最低,其平均值分别为 129.4、125.9 和 123.5,自下而上,海水古盐度总体具有先增高后降低的特征。

水体温度是控制碳酸盐稳定氧同位素的重要因素,因此 $\delta^{18}\text{O}$ 值可以用来作为测定古水温^[39]的可靠标志。邵龙义等^[40]基于“年代效应”对 SHACK-LETON 等提出的用氧同位素计算海水古温度(T)公式加以校正: $T=15.976-4.28\times(\delta^{18}\text{O}-\Delta\delta^{18}\text{O})+0.13\times((\delta^{18}\text{O}-\Delta\delta^{18}\text{O})+0.22)^2$,其中 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 PDB 标准, $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 值为肖尔布拉克组白云岩氧同位素平均值(-6.86‰)与第四纪海相碳酸盐岩氧同位素平均值(-1.2‰)之差的绝对值。根据计算结得到的 T 值范围为 17.8~25.0℃,平均值为 22.1℃,说明其处于温热气候背景;但肖上段 Na、K 含量极大增高则说明该时期为干热气候背景。

元素的聚散与水深度(离岸距离)具有相关性,是元素在沉积作用过程中所发生的机械分异、化学分异作用和生物化学等作用的结果^[41]。微量元素测试结果显示低 Cr、Mn、Ni、Cu、Zn 和 Ba,高 Sr、Na、Fe、Al 含量指示肖尔布拉克组沉积整体离岸较近、水深较浅,稀土元素整体较低的 ΣREE 和 Ce 无异常说明同样指示了浅水沉积环境。肖上段受陆源物质的影响,导致了 MgO 和 CaO 含量的降低和 Al、Fe 等元素及 ΣREE 极大增高,更进一步说明其近岸沉积的特征,顶部水体最浅;此外 $\delta^{13}\text{C}$ 与海平面变化具有相关性,根据 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线可以看出(图 2),肖下段 $\delta^{13}\text{C}$ 值由偏负逐渐偏正,肖中段整体偏正情况下逐渐变小,肖上段突然变小,反映海平面整体

先逐渐升高,再缓慢降低,最后快速降低的变化过程。

$V/(V+Ni)$ 值可以较好地反映氧化还原的程度,通常 $V/(V+Ni)$ 值0.45指示富氧的环境,介于0.45~0.6之间为贫氧环境,大于0.6为缺氧的环境^[42]。根据微量元素计算结果, $V/(V+Ni)$ 值范围为0.37~0.54,平均值为0.46,说明肖尔布拉克组整体氧含量变化较大,有明显的分段性,肖下段(平均值0.53)为缺氧环境,肖中1亚段(平均值0.49)为相对贫氧的还原环境,肖中2亚段(平均值0.46)介于贫氧、富氧环境之间,肖中3段(平均值0.42)为相对

富氧的氧化环境,肖上段(平均值为0.47)位于贫氧、富氧环境之间。

综上所述,研究区早寒武世肖尔布拉克组沉积期整体处于温热气候、浅水环境,肖下段为风暴浪基面之下的低能沉积环境,肖中1—2亚段为正常浪基面之下的中高能沉积环境,肖中3亚段为潮下带高能沉积环境,肖上段为潮间—潮上带中低能沉积环境。自下而上的古海水深度、盐度、氧含量特征和岩石特征指示了向上变浅的外缓坡微生物层—中缓坡微生物丘—内缓坡微生物丘—潮坪沉积序列(图6)。

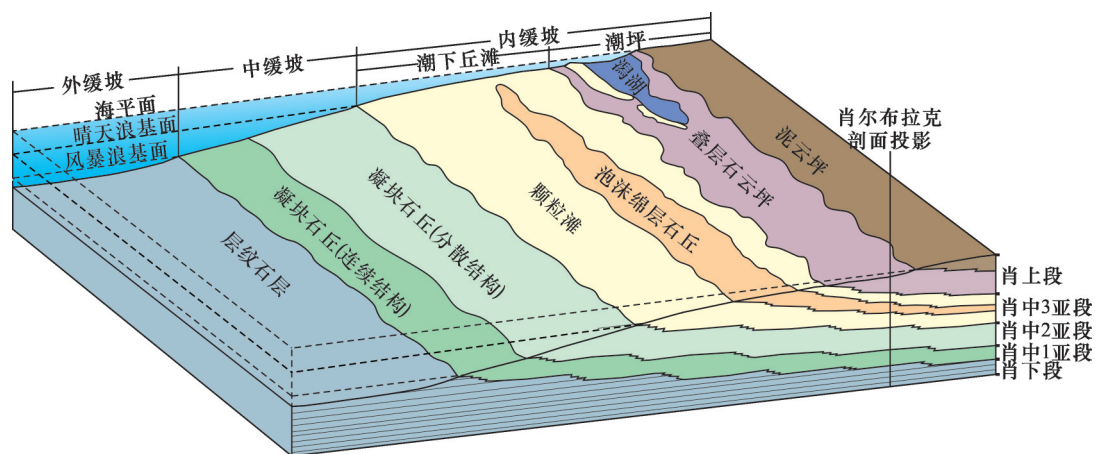


图6 柯坪地区肖尔布拉克组沉积期沉积模式

Fig.6 Sedimentary pattern of Xiaorbulake Period in Keping area

4.2 白云石化作用环境

早期白云石化作用对原生孔和早成岩期形成的孔隙的保存具有重要建设性作用,而晚期白云石化作用对早期孔隙的保存作用不大,甚至起破坏孔隙作用,因此判断白云石化作用发生的时间非常重要。早期白云石化作用主要发生在准同生—浅埋藏期,晚期白云石化作用主要发生在中—晚埋藏期,两者之间成岩环境差异使得地球化学特征也具有明显差异。

肖尔布拉克组白云岩 $\delta^{13}O$ 值、 $\delta^{18}O$ 值、 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值在寒武纪早期海水值的范围内和低 ΣREE ($< 30 \times 10^{-6}$)、轻稀土元素(La—Eu)较重稀土元素(Gd—Lu)富集的“右倾”稀土配分模式说明当时白云石化流体为海水;较高盐度参数 Z 值(> 122)和高 Sr ($> 50 \times 10^{-6}$)、 Na ($> 100 \times 10^{-6}$)含量则说明了海水具有较高盐度;低有序度(< 0.75)的特征反映了白云石化作用发生时处于较低温度、快速交代、晶体快速生长的过程;此外5个微生物白云岩围岩的

U—Pb同位素年龄在寒武系年龄范围内,也可能间接反映白云石化作用发生在准同生期—浅埋藏期^[36]。结合多数样品以泥晶、粉晶白云岩为主,并且都较好地保留了原始微生物、颗粒沉积结构的岩石特征,综合认为肖尔布拉克组白云岩为准同生—浅埋藏期相对较低温度环境下白云石化作用的产物,白云石化流体为具有较高盐度的海水。

4.3 孔隙形成环境

前文叙及,肖尔布拉克组白云岩储层中的孔隙是沉积期原生孔还是表生期次生溶孔,亦或是晚期埋藏溶蚀为主仍处在争议,这直接影响储层主控因素认识及分布预测。围岩及其孔缝洞碳酸盐胶结物形成于不同时期和不同成岩环境,根据质量守恒定律,在封闭体系物质有溶解必有沉淀,因此通过对比分析它们的地球化学特征,可以推断孔隙形成时间及环境。

露头宏观特征研究表明肖尔布拉克组中主要有3种产状的胶结物,分别是溶蚀孔洞中的粗晶方

解石、裂缝中的粗晶方解石和肖下段溶孔溶缝的鞍状白云石,其中溶蚀孔洞中的粗晶方解石比例最高。3个溶蚀孔洞方解石胶结物的年龄接近或大于寒武系顶界年龄(485.4 ± 1.9 Ma)并且都略小于其围岩的年龄,说明在胶结物形成之前这些溶孔已经存在,因此可以判断肖尔布拉克组中下段微生物白云岩中广泛发育溶蚀孔洞形成于同沉积期或准同生期;2个裂缝中方解石胶结物的年龄接近三叠纪末的年龄,说明其与印支期构造运动有关;肖下段2个孔缝中鞍状白云石胶结物的年龄为古近纪年龄,说明其与喜马拉雅晚期构造运动有关。基于团簇同位素测得的溶蚀孔洞中方解石胶结物具有温度不高(平均值为 40.4°C)、流体 $\delta^{18}\text{O}_w$ 值偏负(-5.13% , SMOW 标准)的特征,根据 HUDSON 利用 T 和 $\delta^{18}\text{O}_w$ 判断成岩环境的方法^[37],可以判断其形成于大气淡水成岩环境;裂缝中方解石胶结物具有较高温(74°C)相对偏负 $\delta^{18}\text{O}_w$ (-2.82% , SMOW 标准)的特征,反映含大气水的埋藏成岩环境;孔缝中鞍状白云石胶结物较高温(平均值为 84.4°C)和相对富集的 $\delta^{18}\text{O}_w$ (平均值为 1.63% , SMOW 标准),反映含卤水的埋藏成岩环境。可见3种产状的碳酸盐胶结物形成于3种不同的成岩阶段和环境,从而反映其对应储集空间形成于3个不同阶段和环境。中下段广泛顺层分布的溶蚀孔洞为同生—准同期早表生大气淡水环境下产物的认识,揭示了这些溶蚀孔洞主要为原生微生物格架孔或受早表生期淡水溶蚀作用改造的格架溶孔,为明确岩相和高频层序界面是肖尔布拉克组储层发育的主控因素提供了有利依据。

5 结论

(1)肖尔布拉克组主要发育层纹石、凝块石、粘结颗粒、泡沫绵层石和叠层石5种微生物白云岩,自下而上的岩相组合特征可将其分为3个段5个亚段,整体构成一个三级层序。

(2) $\delta^{13}\text{O}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、盐度参数、微量元素含量、稀土元素配分模式能较好地指示沉积环境,早寒武世肖尔布拉克组整体处于温热—干热气候,相对正常—较高海水盐度、水体向上逐渐变浅和氧含量逐渐增加的海洋环境,发育碳酸盐缓坡背景下的外缓坡微生物层—中缓坡微生物丘—内缓坡微生物丘滩—潮坪沉积序列,肖下段为风暴浪基面之下的低能沉积环境,肖中1—2亚段为正常浪基面之下的中高能

沉积环境,肖中3亚段为潮下带高能沉积环境,肖上段为潮间—潮上带中低能沉积环境。

(3)综合有序度、 $\delta^{13}\text{O}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 Sr、Na 元素含量、稀土元素配分模式特征及岩石学特征,判断肖尔布拉克组白云岩形成于准同生—浅埋藏期相对较低温度环境,白云石化流体为具有较高盐度的海水。

(4)碳酸盐 U—Pb 同位素定年和团簇同位素测温技术可以很好地分析孔隙成因问题,肖尔布拉克组储集空间类型主要为原生微生物格架孔和受早表生期大气淡水溶蚀作用改造的溶蚀孔洞,岩相、高频层序界面和早期白云石化作用是控制储层发育的主要因素。

参考文献 (References)

- [1] 杨海军. 塔里木盆地古生界内幕白云岩勘探认识与勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(7):1213-1223.
YANG H J. Exploration knowledge and direction of Lower Proterozoic Inner Dolostones, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(7):1213-1223.
- [2] 杜金虎, 潘文庆. 塔里木盆地寒武系盐下白云岩油气成藏条件与勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3):327-339.
DU J H, PAN W Q. Accumulation conditions and play targets of oil and gas in the Cambrian subsalt dolomite, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3):327-339.
- [3] 朱光有, 曹颖辉, 闫磊, 等. 塔里木盆地8000m以深超深层海相油气勘探潜力与方向[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(6):755-772.
ZHU G Y, CAO Y H, YAN L, et al. Petroleum exploration potential and favorable areas of ultra-deep marine strata deeper than 8000 meters in Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(6):755-772.
- [4] 易士威, 李明鹏, 郭绪杰, 等. 塔里木盆地寒武系盐下勘探领域的重大突破方向[J]. 石油学报, 2019, 40(11):1281-1295.
YI S W, LI M P, GUO X J, et al. Breakthrough direction of Cambrian pre-salt exploration fields in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(11):1281-1295.
- [5] 王招明, 谢会文, 陈永权, 等. 塔里木盆地中深1井寒武系盐下白云岩原生油气藏的发现与勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(2):1-13.
WANG Z M, XIE H W, CHEN Y Q, et al. Discovery and exploration of Cambrian subsalt dolomite original hydrocarbon reservoir at Zhongshen-1 Well in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(2):1-13.
- [6] 杨永剑, 刘家铎, 田景春, 等. 塔里木盆地寒武纪层序岩相古地理特征[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3):450-459.
YANG Y J, LIU J D, TIAN J C, et al. Sequence Lithofacies Paleogeography of Cambrian in Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3):450-459.

- [7] 倪新锋, 沈安江, 陈永权, 等. 塔里木盆地寒武系碳酸盐岩台地类型、缘分段特征及勘探启示[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(7):1245-1255.
- NI X F, SHEN A J, CHEN Y Q, et al. Cambrian carbonate platform types, platform margin segmentation characteristics and exploration enlightenment in Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(7):1245-1255.
- [8] 李保华, 邓世彪, 陈永权, 等. 塔里木盆地柯坪地区下寒武统台缘相白云岩储层建模[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(7):1233-1244.
- LI B H, DENG S B, CHEN Y Q, et al. The reservoir modeling of platform margin dolostone of Xiaoerblak Formation, Lower Cambrian, Kalpin area, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(7):1233-1244.
- [9] 胡明毅, 孙春燕, 高达. 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组构造—岩相古地理特征[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(1):12-23.
- HU M Y, SUN C Y, GAO D. Characteristics of tectonic-lithofacies paleogeography in the Lower Cambrian Xiaoerbulake Formation, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1):12-23.
- [10] 郑剑锋, 袁文芳, 黄理力, 等. 塔里木盆地肖尔布拉克露头区下寒武统肖尔布拉克组沉积相模式及其勘探意义[J]. 古地理学报, 2019, 21(4):589-602.
- ZHENG J F, YUAN W F, HUANG L L, et al. Sedimentary facies model and its exploration significance of the Lower Cambrian Xiaoerblak Formation in Xiaoerblak area, Tarim Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 21(4):589-602.
- [11] 乔占峰, 沈安江, 倪新锋, 等. 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组丘滩体系类型及其勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(2):392-402.
- QIAO Z F, SHEN A J, NI X F, et al. Types of mound-shoal complex of the Lower Cambrian Xiaoerbulake Formation in Tarim Basin, northwest China, and its implications for exploration[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2):392-402.
- [12] 陈文玲, 罗平, 单钰铭, 等. 塔里木苏盖特布拉克地区肖尔布拉克组白云岩储层特征分析[J]. 石油地质与工程, 2010, 24(1):12-15.
- CHEN W L, LUO P, SHAN Y M, et al. Features of dolomite reservoir of Xiaoerblak Formation in Sugaitblak area, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2010, 24(1):12-15.
- [13] 宋金民, 罗平, 杨式升, 等. 塔里木盆地寒武统微生物碳酸盐岩储集层特征[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(4):404-413.
- SONG J M, LUO P, YANG S S, et al. Reservoirs of Lower Cambrian microbial carbonates, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(4):404-413.
- [14] 黄擎宇, 胡素云, 潘文庆, 等. 台内微生物丘沉积特征及其对储层发育的控制——以塔里木盆地柯坪—巴楚地区下寒武统肖尔布拉克组为例[J]. 天然气工业, 2016, 36(6):21-29.
- HUANG Q Y, HU S Y, PAN W Q, et al. Sedimentary characteristics of intra-platform microbial mounds and their controlling effects on the development of reservoirs: A case study of the Lower Cambrian Xiaoerbulake Formation in the Keping-Bachu area, Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(6):21-29.
- [15] 邓世彪, 关平, 庞磊, 等. 塔里木盆地柯坪地区肖尔布拉克组优质微生物碳酸盐岩储层成因例[J]. 沉积学报, 2018, 36(6):1218-1232.
- DEN S B, GUAN P, PANG L, et al. Genesis of excellent xiaoerbulak microbial carbonate reservoir in Kalpin area of Tarim Basin, NW China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(6):1218-1232.
- [16] 余浩元, 蔡春芳, 郑剑锋, 等. 微生物结构对微生物白云岩孔隙特征的影响——以塔里木盆地柯坪地区肖尔布拉克组为例[J]. 石油实验地质, 2018, 40(2):233-243.
- YU H Y, CAI C F, ZHENG J F, et al. Influence of microbial textures on pore characteristics of microbial dolomites: A case study of Lower Cambrian Xiaoerbulake Formation in Keping area, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(2):233-243.
- [17] 沈安江, 郑剑锋, 陈永权, 等. 塔里木盆地中下寒武统白云岩储集层特征、成因及分布[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3):340-349.
- SHEN A J, ZHENG J F, CHEN Y Q, et al. Characteristics, origin and distribution of dolomite reservoirs in Lower-Middle Cambrian, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3):340-349.
- [18] 严威, 郑剑锋, 陈永权, 等. 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组白云岩储层特征及成因[J]. 海相油气地质, 2017, 22(4):35-43.
- YAN W, ZHENG J F, CHEN Y Q, et al. Characteristics and genesis of dolomite reservoir in the Lower Cambrian Xiaoerblak Formation, Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2017, 22(4):35-43.
- [19] 王珊, 曹颖辉, 杜德道, 等. 塔里木盆地柯坪—巴楚地区肖尔布拉克组储层特征与主控因素[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(6):784-795.
- WANG S, CAO Y H, DU D, et al. The characteristics and main controlling factors of dolostone reservoir in Lower Cambrian Xiaoerbulak Formation in Keping-Bachu area, Tarim Basin, NW China[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(6):784-795.
- [20] 郑剑锋, 陈永权, 黄理力, 等. 苏盖特布拉克剖面肖尔布拉克组储层建模研究及其勘探意义[J]. 沉积学报, 2019, 37(3):601-609.
- ZHENG J F, CHEN Y Q, HUANG L L, et al. Reservoir modeling of Low Cambrian Xiaoerblak Formation in Sugaitblak Section and its significance on exploration regions, Tarim Basin, NW China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(3):601-609.

- [21] 李斌, 彭军, 杨素举, 等. 塔里木盆地巴楚地区寒武系肖尔布拉克组储层特征及成因模式[J]. 石油实验地质, 2017, 39(6):797-804.
- LI B, PENG J, YANG S J, et al. Genetic model and characteristics of the Cambrian Shorebulake reservoir in Bachu area, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(6):797-804.
- [22] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997:1-4.
- JIA C Z. Tectonic Characteristics and Petroleum of Tarim Basin, China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997:1-4.
- [23] 吴根耀, 李曰俊, 刘亚雷, 等. 塔里木西北部乌什—柯坪—巴楚地区古生代沉积—构造演化及成盆动力学背景[J]. 古地理学报, 2013, 15(2):203-218.
- WU G Y, LI Y J, LIU Y L, et al. Paleozoic sediment-tectonic evolution and basin dynamic settings in Wushi-Kalpin-Bachu area, northwest Tarim[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(2):203-218.
- [24] 陈永权, 严威, 韩长伟, 等. 塔里木盆地寒武纪/前寒武纪构造—沉积转换及其勘探意义[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(1):39-50.
- CHEN Y Q, YAN W, HAN C W, et al. Structural and sedimentary basin transformation at the Cambrian/Neoproterozoic interval in Tarim Basin: Implication to subsalt dolostone exploration[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(1):39-50.
- [25] 何登发, 贾承造, 李德生, 等. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(1): 64-77.
- HE D F, JIA C Z, LI D S, et al. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(1): 64-77.
- [26] 杨云坤, 石开波, 刘波, 等. 塔里木盆地西北缘震旦纪构造—沉积演化特征[J]. 地质科学, 2014, 49(1): 19-29.
- YANG Y K, SHI K B, LIU B, et al. Tectono-sedimentary evolution of the Sinian in the northwest Tarim Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2014, 49(1): 19-29.
- [27] 杨鑫, 李慧莉, 岳勇, 等. 塔里木盆地震旦纪末地层—地貌格架与寒武纪初期烃源岩发育模式[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(2):189-198.
- YANG X, LI H L, YUE Y, et al. The strata and palaeo-geomorphology framework at the end of Neoproterozoic and development mode of source rocks at the beginning of Cambrian[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(2):189-198.
- [28] 潘文庆, 陈永权, 熊益学, 等. 塔里木盆地寒武统烃源岩沉积相研究及其油气勘探指导意义[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(7):1224-1232.
- PAN W Q, CHEN Y Q, XIONG Y X, et al. Sedimentary facies research and implications to advantaged exploration regions on Lower Cambrian source rocks, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(7):1224-1232.
- [29] 朱永进, 倪新锋, 刘玲利, 等. 裂后沉降期碳酸盐岩缓坡沉积响应及成储特征——以塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组为例[J]. 沉积学报, 2019, 37(5):1044-1057.
- ZHU Y J, NI X F, LIU L L, et al. Depositional differentiation and reservoir potential and distribution of Ramp Systems during Post-rift Period: An example from the Lower Cambrian Xiaoerbulake Formation in the Tarim Basin, NW China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(5):1044-1057.
- [30] 刘伟, 张光亚, 潘文庆, 等. 塔里木地区寒武纪岩相古地理及沉积演化[J]. 古地理学报, 2011, 13(5):529-538.
- LIU W, ZHANG G Y, PAN W Q, et al. Lithofacies palaeogeography and sedimentary evolution of the Cambrian in Tarim[J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(5):529-538.
- [31] VEIZER J, ALA D, AZMY K, et al. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, ^{13}C and ^{18}O evolution of Phanerozoic seawater[J]. Chemical Geology, 1999, 161(1): 59-88.
- [32] DENISON R E, KOEPNICK R B, BURKE W H, et al. Construction of the Cambrian and Ordovician seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ curve[J]. Chemical Geology, 1998, 152(3/4):325-340.
- [33] 郑剑锋, 沈安江, 乔占峰, 等. 塔里木盆地奥陶统蓬莱坝组白云岩成因及储层主控因素分析——以巴楚大班塔格剖面为例[J]. 岩石学报, 2013, 29(9):3223-3232.
- ZHENG J F, SHEN A J, QIAO Z F, et al. Genesis of dolomite and main controlling factors of reservoir in Penglaiba Formation of Lower Ordovician, Tarim Basin: A case study of Dabantage outcrop in Bachu area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(9):3223-3232.
- [34] 何宏, 彭苏萍, 邵龙义. 巴楚寒武—奥陶系碳酸盐岩微量元素及沉积环境[J]. 新疆石油地质, 2004, 25(6): 631-633.
- HE H, PENG S P, SHAO L Y. Trace elements and sedimentary settings of Cambrian-Ordovician carbonates in Bachu area, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2004, 25(6): 631-633.
- [35] LOTTEMOSER B G. Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes[J]. Ore Geology Reviews, 1992, 7(1): 25-41.
- [36] 沈安江, 胡安平, 程婷, 等. 激光原位 U-Pb 同位素定年技术及其在碳酸盐岩成岩—孔隙演化中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(6):1062-1074.
- SHEN A J, HU A P, CHEN T, et al. Laser ablation in situ U-Pb dating and its application to diagenesis-porosity evolution of carbonate reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(6):1062-1074.
- [37] 郑剑锋, 李晋, 季汉成, 等. 二元同位素测温技术及其在白云岩储层成因研究中的应用——以塔里木盆地中下寒武统为例[J]. 海相油气地质, 2017, 22(2):1-7.
- ZHENG J F, LI J, JI H C, et al. Clumped isotope thermometry and its application in dolomite reservoir: A case study of the Middle-Lower Cambrian in Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2017, 22(2):1-7.
- [38] KEITH M H, WEBER J N. Isotopic composition and environmental classification of selected limestones and fossils[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1964, 28:1787-1816.

- [39] 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.
ZHANG X L. Relationship between carbon and oxygen stable isotope in carbonate rocks and paleosalinity and paleotemperature of seawater[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1985, 3(4): 17-30.
- [40] 邵龙义, 窦建伟, 张鹏飞. 西南地区晚二叠世氧、碳稳定同位素的古地理意义[J]. 地球化学, 1996, 25(6):575-581.
SHAO L Y, DOU J W, ZHANG P F. Paleogeographic significances of carbon and oxygen isotopes in Late Permian rocks of southwest China[J]. Geochimica, 1996, 25(6):575-581.
- [41] 熊小辉, 肖加飞. 沉积环境的地球化学示踪[J]. 地球与环境, 2011, 39(3): 405-414.
XIONG X H, XIAO J F. Geochemical indicators of sedimentary environments-A summary [J]. Earth and Environment, 2011, 39(3): 405-414.
- [42] 林良彪, 余瑜, 黄棋, 等. 川北旺苍地区奥陶系地球化学特征及沉积环境分析[J]. 岩石学报, 2017, 33(4):1272-1284.
LIN L B, YU Y, HUANG Q C, et al. The geochemical characteristics and sedimentary environment analysis of Ordovician in Wangcang region, northern Sichuan Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(4):1272-1284.

Geochemical features and its significance of sedimentary and diagenetic environment in the Lower Cambrian Xiaerblak Formation of Keping area, Tarim Basin

ZHENG Jian-feng^{1,2}, HUANG Li-li^{1,2}, YUAN Wen-fang³, ZHU Yong-jin^{1,2}, QIAO Zhan-feng^{1,2}

(1. The Key Laboratory of Carbonate Reservoirs CNPC, Hangzhou 310023, China;

2. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou 310023, China;

3. Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000, China)

Abstract: Lower Cambrian Xiaerblak Formation is an important exploration target of Cambrian pre-salt in Tarim Basin, but the limited knowledge of sedimentary facies and reservoir genesis led to the restriction of exploration. This study took Xiaerblak outcrop of Keping area as an example. Based on detailed description, 110 thin sections identification and multi-parameters geochemical (order degree, trace elements, rare earth elements, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, U-Pb dating and cluster isotopes) data analysis, it was found that Xiaerblak Formation can be divided into three members, and microbial dolomite is the main lithology. The characteristics of lithofacies assemblage from bottom to up indicate that it can be described as a complete three-order sequence. The sedimentary environment of Early Cambrian Xiaerblak Period in Keping area characterized by warm-dry climate, normal-higher sea salinity, gradually increase oxygen content and upward shallower water. The sedimentary sequence was microbial layer-microbial mound/shoal-tidal flat in carbonated ramp background. Dolomitization took place in penecontemporaneous-early diagenetic stage and the main dolomitization fluid was high-saline seawater. Primary microbial framework pores and vugs which formed by the dissolution atmospheric water are the main reservoir spaces. Reservoir was mainly controlled by sedimentary microfacies, high frequency sequence interface and early dolomitization. These research results are of great significance for sedimentary facies mapping and reservoir prediction in Cambrian pre-salt field.

Key words: Sedimentary and diagenetic environment; Geochemical features; Lower Cambrian; Xiaerblak Formation; Keping area; Tarim Basin

Foundation items: The China National Science and Technology Major Project (Grant No. 2016ZX05004-002); The PetroChina Science and Technology Major Project (Grant No. 2019B-0405).