

塔里木盆地西克尔中奥陶统 礁滩相储层成岩特征与系统划分

周 刚¹ 郑荣才¹ 罗 平² 赵先超³ 刘 伟² 宋金民² 饶红娟⁴

(1.“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室,成都理工大学,四川 成都 610059;2.中国石油勘探开发研究院,北京 100083;3.安徽省地质调查院,安徽 合肥 230001;4.贵州省地质矿产勘查开发局 101 地质大队,贵州 凯里 556000)

摘要:通过对塔里木盆地西克尔地区中奥陶统生物礁滩成岩作用方式、成岩演化序列和相对应的地质作用产物、组合及稀土元素和碳、氧、锶稳定同位素地球化学特征综合研究,按“水文体制”将生物礁滩地层划分为不同成岩阶段的近地表海水-海源地层水、大气淡水、温压水和油田卤水 4 个成岩系统。各成岩系统流体来源、性质、水-岩石相互作用过程及其对储层的影响各不相同,其中与储层发育密切相关的成岩体系和成岩方式主要为:古表生期大气水成岩系统的岩溶作用、再埋藏成岩阶段温压水成岩系统和油田卤水成岩系统的深部溶蚀和各期构造破裂作用。

关键词:塔里木盆地;中奥陶统;生物礁滩;成岩系统;地球化学特征

中图分类号:P534.42;P618.130.2⁺ **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2012)01-0135-11

自塔中地区奥陶系礁滩复合体为储层的油气田发现以来,掀起了塔里木盆地礁滩体油气藏勘探热潮,对礁滩体储集层及其含油性等方面的研究均取得丰硕成果^[1-8],其储层成因及其控制因素和分布规律的研究,已成为该地区油气勘探领域最重要的基础地质任务之一。为进一步了解盆地奥陶系礁滩体储层成岩作用与储层发育关系,本文以西克尔 1.5 km² 的露头区生物礁滩详细地质填图为基础,以岩石学常规分析为主要技术手段,结合前人研究成果和新补充的部分流体包裹体、稀土元素和碳、氧、锶稳定同位素分析资料,从岩石特征和地球化学特征角度出发对西克尔地区中奥陶统生物礁滩体成岩作用特征和成岩系统划分展开深入研究,为进一步勘探开发塔里木盆地奥陶系礁、滩相油气藏提供有价值的基础地质资料。

1 地质概况及沉积地质特征

西克尔位于塔里木盆地西缘的天山南麓柯坪—

阿图什地区(图 1),构造上属于塔里木盆地中央隆起巴楚断隆西北部^[9]。该地区经历了多次构造运动,其中加里东运动和喜马拉雅运动最为重要,晚奥陶世(中加里东运动),受南天山洋向北俯冲消减作用的影响,该地区由被动大陆边缘转化为活动大陆边缘^[10],普遍抬升掀斜,中奥陶统灰岩广泛暴露并岩溶化,随后被上奥陶统一下志留统的铁热克阿瓦提组和柯坪塔格组覆盖。至始新世末,受印度板块与欧亚大陆板块的碰撞和持续向北移动,以及天山、昆仑山、喀喇昆仑山迅速抬升的影响,该地区发生强烈水平挤压,导致晚中新世—晚更新世(晚喜马拉雅运动)发育数排由北向南逆冲的推覆体构造面貌^[10,11]。该地区出露地层主要为上奥陶统赫南特阶铁热克阿瓦提组紫红色碎屑岩和中奥陶统大坪阶鹰山组上段灰色灰岩,二者之间为角度不整合接触,缺失一间房组、吐木休克组和良里塔格组^[12]。

中奥陶世大坪阶期,塔里木盆地西北缘表现为向北倾斜的缓坡型碳酸盐台地^[5,6],西克尔地区位于

收稿日期:2011-08-02;改回日期:2011-10-22

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973”项目(2006CB202300)资助。

作者简介:周刚,男,1984 年生,博士生,主要从事沉积学与储层地质学研究工作;E-mail:zhougang29@126.com。

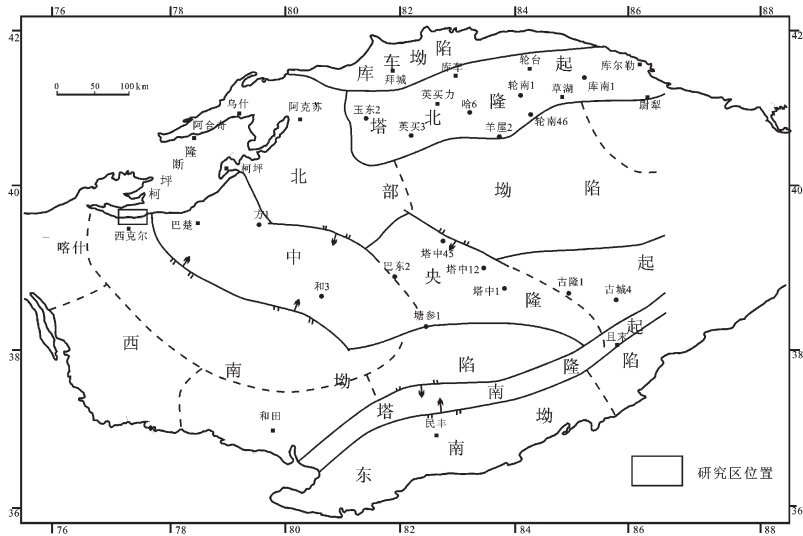


图1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

开阔台地台内生物礁滩相带位置,以灰色或灰褐色生屑(棘屑)灰岩、砂(砾)屑灰岩和生物礁灰岩为主,造礁生物主要为托盘类,其次为蓝细菌、苔藓虫、海绵等,其中托盘类生物主要起障积作用,钙藻类生物起粘结托盘类和其他生物屑或颗粒作用,形成重要的抗浪作用。礁体无礁前、礁后和礁翼之分,但自下而上可划分出礁基、礁核和礁盖3个亚相,礁基以棘屑灰岩为主,礁核以托盘障积礁灰岩、藻-托盘粘结-障积礁灰岩为主,礁盖以亮晶砂屑灰岩为主。其生长发育受古地貌格局、造礁生物种类、海水进退等因素控制,礁的主体由为6~8个小“扁豆体”状礁体夹生物滩组成横向延续、纵向叠置的大“扁豆体”状礁体(图2),礁滩体的核心部位最厚可达40余米^[6]。

2 成岩特征及成岩演化序列

2.1 成岩特征

西克尔生物礁滩体成岩作用类型众多,包括胶结作用、压实-压溶作用、古表生期溶蚀作用、埋藏期溶蚀作用、充填作用和构造破裂作用等,偶见有钠长石化、自生石英、石膏充填等成岩现象。按成岩作用与储层发育关系可划分为破坏性和建设性两种成岩作用类型。

2.1.1 破坏性成岩作用

(1) 胶结作用

胶结作用在该地区中奥陶统礁滩体中普遍发育,常见微晶和亮晶胶结结构,以共轴纤状或二世代

亮晶胶结作用较为常见(图3-I)。第一世代方解石胶结物主要呈纤状、短柱状及粒状胶结,与奥陶纪海水性质有关,部分栉壳状胶结,与近地表大气淡水成岩环境有关,第二世代方解石胶结物多为等轴粒状,亮晶砂屑灰岩、亮晶棘屑灰岩中,常见砂屑或棘屑周围形成共轴增长胶结,局部可见粒状悬垂状胶结,反映了生物礁滩早期局部上升处于淡水渗流带环境。阴极射线下方解石胶结物大部分不发光,只有少量共轴生长的胶结物发暗色光,少量残余孔隙边缘胶结物发暗黄色光,说明早期近地表胶结作用曾受到氧化性大气淡水影响,之后的成岩作用发生在埋藏环境的还原性流体中。

(2) 压实和压溶作用

压实、压溶作用主要表现为颗粒的压实变形、移位和压溶,缝合线的发育等现象,在宏观露头上可见被压变形的托盘类生物个体。由压实变形造成孔隙的强烈缩小是对储层发育不利的主要原因;由压溶形成的缝合线也因被压溶残渣充填或被次生的方解石、黄铁矿或少量自生石英充填呈封闭状,而一般不具备储集和渗透性。

(3) 充填作用

详细的地质填图结果,表明研究区内于中奥陶统生物礁滩地层中发育有20个不同规模的古溶洞,古溶洞的横剖面大多数小于5 m,超过10 m的仅4个,规模最大的达13.2 m。古溶洞充填有如下特征:①部分溶洞壁发育有淡黄色钙结壳,为古岩溶洞穴

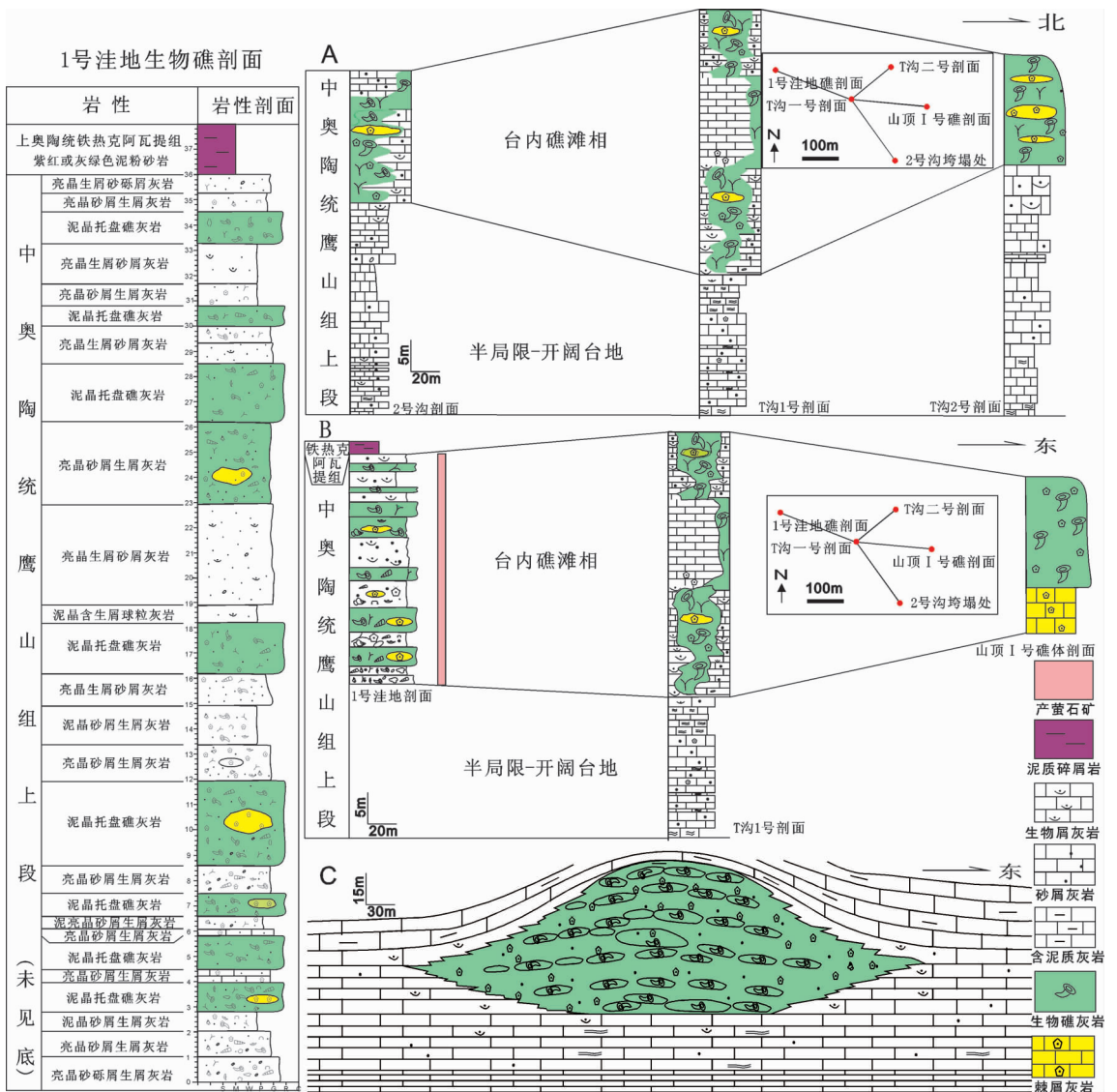


Fig.2 Sedimentary model of Middle Ordovician reef-beach complex in Xekar area

钟乳石一类的化学沉积物;②所有溶洞都半充填或全充填棕黄-灰绿色泥岩和泥质粉砂岩等(图 3-II),薄片鉴定与物质组分对比分析结果,表明充填古溶洞的碎屑物与上覆的上奥陶统铁热克阿瓦提组碎屑岩相同,不仅证明其来源于铁热克阿瓦提组沉积期的碎屑物,同时也为确定古溶洞形成于加里东期提供了依据;③17个溶洞中沿外来充填物与基岩接触面之间充填有囊状和脉状粗-巨晶方解石和紫色萤石等后期的热液次生矿物。

野外观察表明,溶洞内淡黄色钙结壳、碎屑充填物、萤石和巨晶方解石具有一定的期次关系,通过接

触关系,可较容易地判断钙结壳形成时间最早,为古表生初期最早沉淀的淡水胶结物,其次为陆源砂泥质充填物,形成时间应与上奥陶统铁热克阿瓦提组沉积期接近,较晚期的是粗晶-巨晶方解石和萤石,为古表生期后再埋藏期成岩作用的产物,依据该期萤石 ESR 测年结果为 287.5~212 Ma^[7],表明萤石形成时间为海西期,明显晚于钙结壳和陆源碎屑物的胶结和充填时间。但充填溶洞的萤石与方解石的接触关系相对较复杂,两者或独立存在或共生,可以有明显的界限,也可形成“你中有我,我中有你”的混杂接触关系。常见的现象是溶洞中先充填块状方解石

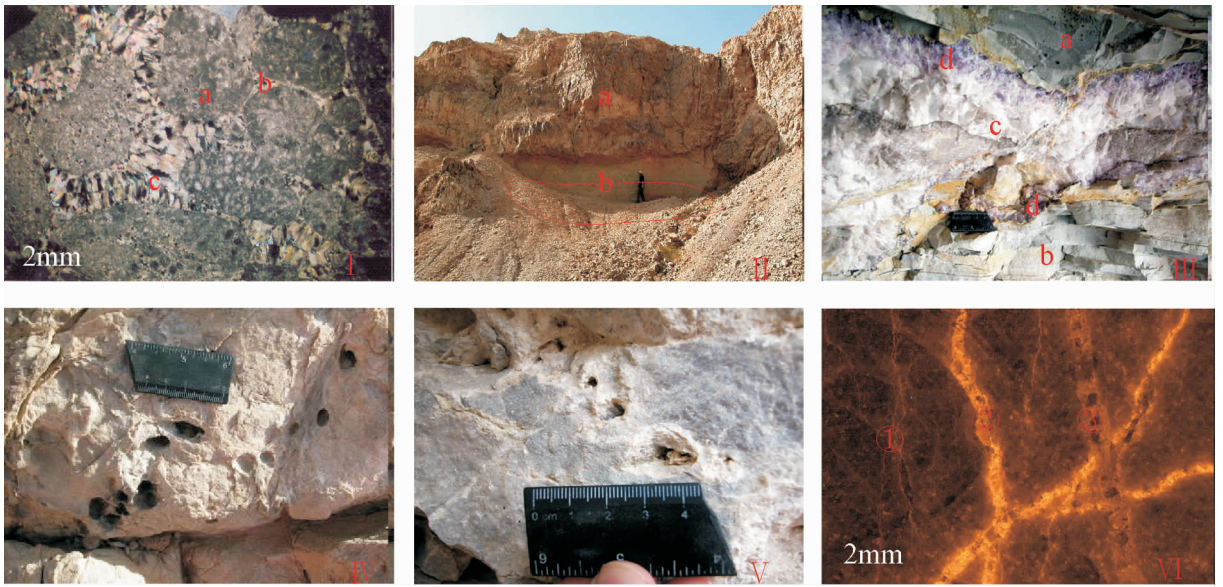


图 3 西克尔地区中奥陶统生物礁滩体常见的成岩作用类型

I—二世代胶结作用,亮晶砾屑灰岩,a为砾屑,b为一世代纤状—短柱状方解石胶结物,c为二世代共轴纤状方解石胶结物,正交偏光;II—碎屑岩充填作用,a为生物礁灰岩,b为灰绿色粉砂岩、泥质粉砂岩;III—热液矿物、碎屑岩充填作用,a为生物礁灰岩,b为具层理结构的泥质粉砂岩,c为巨晶方解石,d为切割巨晶方解石的紫色脉状萤石;IV—古表生期溶蚀孔洞,溶蚀空间主要为生物腔孔和铸模孔;V—再埋藏期热液溶蚀孔,孔隙以干净明亮为显著特征;VI—发育三期裂缝,缝内均被方解石充填,①为最早线状微缝,发橙黄色光,②为较早的构造充填缝,呈枝杈状发橙黄色光,③为较晚的构造充填缝,呈细脉状,发不均的橙色光,阴极发光照片

Fig.3 Different diagenetic types of Middle Ordovician reef-beach in Xekar area

I—Second generation calcite cementation, sparry calcirudites, (a)—Gravel, (b)—First generation fibrous—short columnar calcite cementation, (c)—Second generation co-axial fibrous calcite cementation, crossed nicols; II—Clastic rock—filling processes, (a)—Reef limestone, (b)—Grayish green siltstone and argillaceous siltstone; III—Hydrothermal ores and clastic rock—filling processes, (a)—Bioherm limestone, (b)—Argillaceous siltstone with bedding structure, (c)—Gigantic calcite, (d)—Purple fluorite veins, which cut through gigantic calcite; IV—Ancient epigenetic dissolution pores and caves, primary dissolution space being organic visceral pores and moldic pores; V—Pores dissolved by hydrothermal solution at re-burial diagenetic stage, with cleanness and brightness as the most prominent features; VI—Three different stages of structural fractures, filled with sparry calcite, ①—Early—tectonic linear slit fracture, orange-colored under cathodoluminescence, ②—Fairly early tectonic branch fracture, orange-colored under cathodoluminescence, ③—Late tectonic fracture, unevenly orange-colored under cathodoluminescence

巨晶集合体,然后围绕方解石巨晶集合体充填紫色萤石巨晶集合体,形成包裹方解石集合体“壳”,部分紫色萤石呈切割方解石集合体的脉体产出(图3—III)。由4件巨晶方解石和2件萤石包裹体样品分析结果,方解石以发育气、液二相无机盐水包裹体为主,50个测点的温度区间为69.8~127.5℃,峰值出现在80~90℃,平均为89.4℃。萤石以气、液二相有机烃类包裹体为主,20个测点的温度区间为72.8~126.3℃,峰值出现在100~110℃,平均为104.6℃。结合方解石与萤石的接触关系,不难确定方解石和萤石是两期热液活动产物,其中沉淀方解石的热液活动相对较早和具备无机热液性质,而沉淀萤石的热液流体活动相对较晚和具备有机热液性质。

综上所述,研究区中奥陶统生物礁滩相地层中

的古溶洞充填物可以分为4类,依次为古表生初期的淡水方解石胶结物,古表生早期的陆源碎屑物充填物(或溶洞基岩坍塌充填物),再埋藏早—中期的热液方解石充填,及再埋藏晚期的萤石充填物。

2.1.2 建设性成岩作用

(1) 古表生期大气淡水溶蚀作用

中奥陶统沉积后,受加里东运动影响西克尔地区抬升为陆地,进入区域性的古岩溶作用阶段,形成广泛发育的古风化壳和相对应的层内古岩溶岩体系^[12]。由大气水溶蚀作用形成的储层类型,包括有多孔状或溶洞状的溶蚀生物礁灰岩(图3—IV)、溶蚀颗粒灰岩和古岩溶洞穴及充填洞穴的岩溶角砾岩。各类古岩溶储层的发育不仅受岩性影响,同时还明显受到古表生期岩溶地貌和地下水动力场分带性控制,特

点为:岩溶高地处于碳酸钙不饱和的地下水垂直渗流带和活跃潜流带,溶解作用强烈,有利于岩溶型储层发育;岩溶盆地处在对碳酸钙过饱和的地下水静止潜流带,溶解作用较弱而方解石沉淀与充填胶结作用强,对岩溶型储层发育不利,但可形成岩溶型遮挡圈闭;岩溶斜坡位于岩溶高地向岩溶盆地过渡的转换带,以发育对碳酸钙不饱和的地下水活跃潜流带为主,溶解作用最为强烈,对储层发育最为有利,是岩溶型储层主要发育部位^[13]。研究区半局限-开阔台地相地层大多处于岩溶盆地位置,而生物礁滩体处于岩溶高地或斜坡位置,溶洞非常发育,在大约 1.5 km² 的范围内,在中奥陶统地层内于古表生期形成有大小溶洞 20 个,溶洞都被溶裂缝连通。

(2) 再埋藏期深部溶蚀作用

再埋藏期深部溶蚀作用发生在晚奥陶世末期上奥陶统铁热克阿瓦提组沉积之后,溶蚀流体主要为来自与深循环大气水密切相关的深部热液,在其流动过程中对礁滩体多孔基岩进行热液岩溶而产生更大规模的溶蚀孔、洞、缝。因此,对储层发育非常有利。此期溶蚀作用主要表现为对古表生期岩溶产物进行溶蚀和充填叠加改造,由于西克尔地区是主要成矿区,而非热液岩溶发育有利区,所以该地区礁滩体中热液溶蚀并不发育,所形成的溶洞规模有限,并被自身产物完全充填或近完全充填。识别标志主要有如下 4 点:①热液溶蚀洞穴规模通常较小,单个洞穴不超过 0.5~1 m²,小的溶孔直径仅为数毫米;②溶蚀孔洞的形状不规则,通常表现为若干个瘤状或树根状洞体的组合,洞穴之间为树枝状通道相互连通,缺乏分带性;③溶蚀孔、洞、缝较干净,一般无外来的泥沙质充填物(图 3-V);④在裂缝、溶洞中充填有巨晶方解石、萤石、少量自生石英(图 3-III),以及微量的重晶石、方铅矿和黄铁矿等特征的次生热液矿物,在一些溶孔内的洞壁上生长有晶簇状方解石。

(3) 构造破裂作用

破裂作用在礁滩体地层中也普遍较发育,主要形成于再埋藏成岩阶段,可划分为 3 种成因类型:①压实作用形成的小裂缝,表现为颗粒破碎、错位等;②构造破裂作用形成的较大裂缝,形态呈平直、弯曲或分叉状等;③在破裂缝基础上发生溶蚀而形成的裂溶缝,沿裂溶缝往往发育有串珠状分布的各种溶孔、溶洞。阴极发光薄片显示发育三期构造缝(图 3-VI),缝内均被方解石充填,推测发橙黄色光线状微

缝为早成岩期产物,呈枝杈状发橙黄色光的构造裂缝形成于古表生期,呈细脉状、发不均的橙色光的构造充填缝形成最晚,为印支-喜山构造期。

2.2 成岩演化序列和模式

不同成岩阶段具有不同成岩环境和制约着不同成岩作用与产生不同成岩组构和成岩矿物组合,因此,不同的成岩组构与成岩矿物组合是反演成岩环境和进行成岩演化序列划分的依据。通过岩石学、矿物学特征、阴极发光特征、热液矿物包裹体特征、微量元素和碳、氧、锶稳定同位素地球化学特征分析,按西克尔地区中奥陶统礁滩体的成岩组构与成岩矿物组合特征,可确定其经历了准同生阶段近地表海水成岩环境,早成岩阶段大气水渗流-海水潜流成岩环境,古表生期大气淡水成岩环境,再埋藏期中一晚成岩阶段温压水成岩环境以及再埋藏晚成岩-构造隆升阶段油田卤水成岩环境(图 4)的成岩演化历史。

3 各成岩阶段地球化学特征

以各成岩阶段标志性成岩产物——不同成岩蚀变强度的岩石和不同期次与成因类型的次生矿物为对象,开展稀土元素和碳、氧、锶稳定同位素等研究。各类次生矿物样品用微钻取自新鲜岩石,并配有铸体薄片进行镜下检测和 X 衍射分析,以保证按结构-成因类型划分的样品代表性(表 1),所取样品经过去杂质、去有机质纯化处理,以保证单矿物样品的可靠性。

3.1 各成岩阶段稀土元素特征

沉积岩中稀土元素(REE)的丰度和配分模式可提供物质来源信息^[14],同时由于 REE 具有很强的金属性和 Ce⁴⁺、Eu²⁺的变价性和易溶性,如在氧化环境中,Ce³⁺将不断氧化成相对易溶的 Ce⁴⁺离子被迁移而贫化,出现 Ce 负异常($\delta Ce < 1$);又如在低温碱性环境中,Eu³⁺被还原为相对易溶的 Eu²⁺被迁移而贫化,出现 Eu 负异常($\delta Eu < 1$),但在氧化性或高温的环境中易被氧化为难溶的 Eu⁴⁺发生相对富集而出现 Eu 正异常($\delta Eu > 1$),因此,成岩期不同蚀变强度的岩石和不同类型的次生矿物的 Ce 和 Eu 异常,可被作为判断成岩环境和岩溶流体物化条件的标志^[15]。西克尔地区 18 件中奥陶统生物礁滩体中不同成岩阶段和不同成岩蚀变强度的岩石与成因类型的次生矿物 REE 特征如下:

(1) 各类样品都具平缓右倾轻稀土富集配分模式,同类样品 $\sum REE$ 和配分模式基本一致(表 1,图

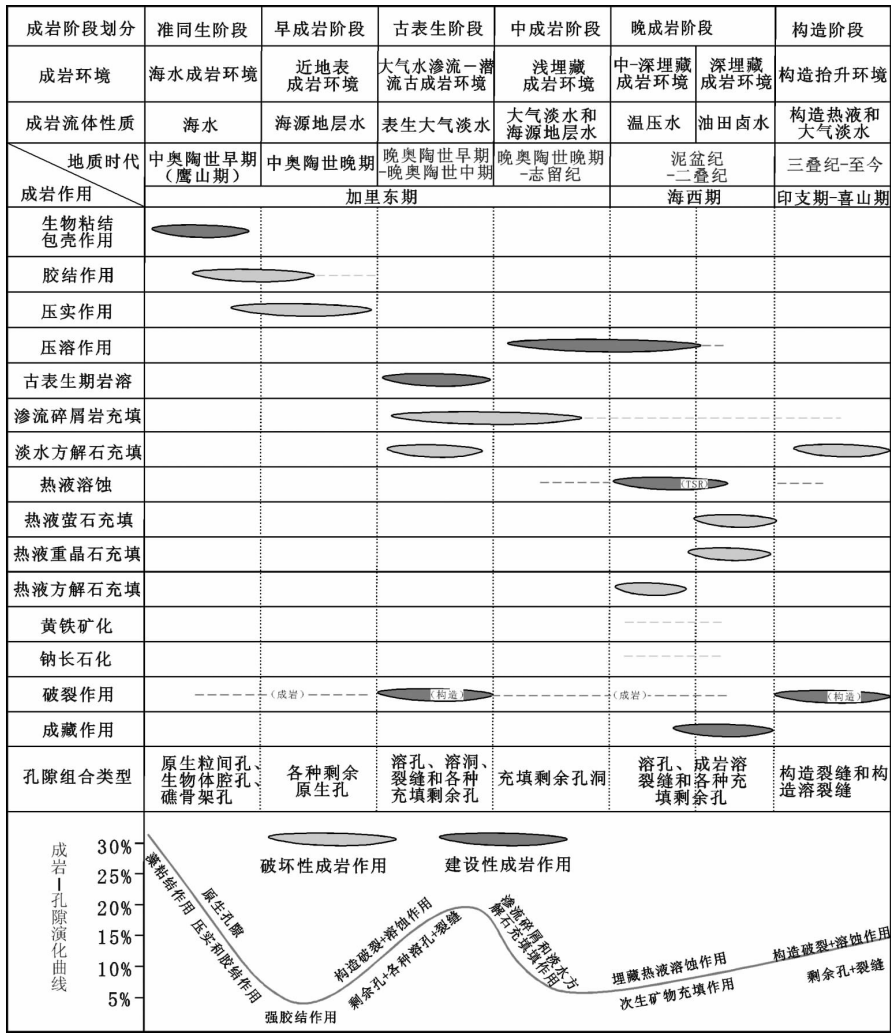


图4 西克尔地区生物礁滩体成岩阶段划分和演化模式

Fig.4 Diagenetic stage division and evolution pattern of Middle Ordovician reef-beach complex in Xekar area

表1 西克尔地区中奥陶统各类碳酸盐岩及胶结物样品稀土元素与同位素特征

Table 1 Distribution of REE and isotopes of middle Ordovician different carbonate rocks and cements in Xekar area

碳酸盐岩成因分类	稀土元素				碳、氧同位素 (PDB)			锶同位素	
	样数	$\Sigma \text{REE}/10^{-6}$	δCe	δEu	样数	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$	样数	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
正常海相微晶灰岩	1	9.6	0.88	1.01	4	-0.18	-7.45	4	0.709183
早成岩期致密颗粒灰岩	1	6.48	0.73	1.1	15	0.25	-6.46	8	0.708959
古表生期溶孔颗粒灰岩	1	2.96	0.14	2.12	2	-0.15	-7.6	2	0.709067
古表生期淡水方解石	3	9.25	0.66	2.49	3	0	-6.9	3	0.709062
再埋藏期交代残余灰岩	/	/	/	/	7	-1.35	-9.7	/	/
再埋藏期热液方解石	6	21.3	0.765	2.82	5	-1.44	-11.1	1	0.709625
再埋藏期热液萤石	6	20.93	0.65	26.40	/	/	/	3	0.710726

注:①稀土元素样品由核工业北京地质研究院分析测试研究中心,采用 Finnigan—MAT 公司制造的 HR—ICP—MS(Element I) 高分辨电感耦合等离子体质谱仪测试样品中的稀土含量; ② $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值由核工业部北京地质研究院实验测试中心分析完成, 分析仪器为 MAT—253, $\delta^{13}\text{C}$ 的分析误差范围为 0.006~0.042, $\delta^{18}\text{O}$ 的分析误差范围为 0.009~0.043; ③ Sr 同位素测试由核工业部北京地质研究院实验测试中心分析完成, 测试仪器为 MAT262 固体同位素质谱仪, 实验条件为温度 22℃, 湿度 50%, 检测依据采用美国国家标准局标准样品 NBS987, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值测定误差小于 0.02%。

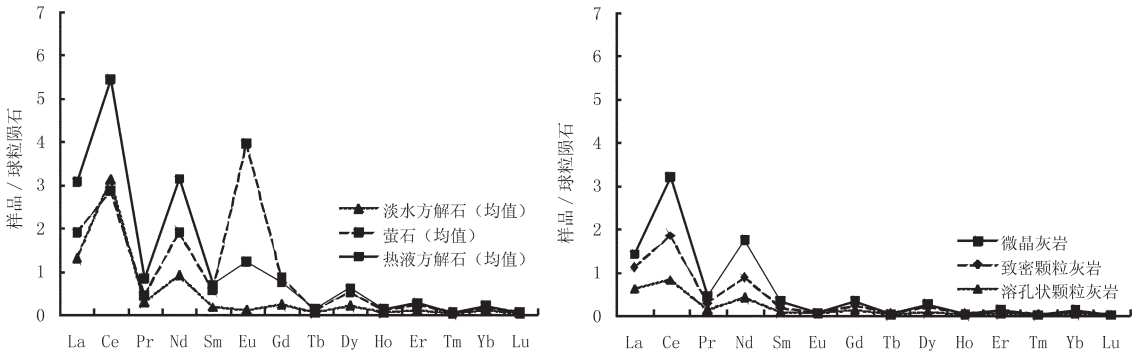


图 5 各类碳酸盐岩及胶结物样品稀土元素配分模式图

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns of middle Ordovician different carbonate rocks and cements in Xekar area

5),说明按结构-成因分类取样结果是可靠的,也反映了各类样品的成岩流体具有不同的性质。

(2)各类样品 $\sum\text{REE}$ 变化于 $2.96 \times 10^{-6} \sim 28.35 \times 10^{-6}$,由低到高依次为古表生期溶蚀的溶孔颗粒灰岩、早成岩期致密颗粒灰岩、古表生期淡水方解石、正常海相微晶灰岩、再埋藏期沉淀的热液方解石和萤石,平均值为 17.115×10^{-6} 。各类样品 $\sum\text{REE}$ 显示成岩过程中流体对基岩的REE具有迁移贫化而在次生矿物中富集的作用。

(3) δCe 变化范围为0.14~0.88,表现为Ce负异常状态; δEu 值变化范围为0.92~76.9,除一个样品(δEu 值为0.92)外,其余样品均表现为Eu正异常,尤其是以萤石锔正异常为极高。

(4)正常海相微晶灰岩具有很弱Ce负异常和最弱Eu正异常,以其作为低温还原性成岩流体标志,不同成岩阶段的样品Ce、Eu异常有如下特点:①早成岩期致密颗粒灰岩轻微的Ce负异常和Eu正异常,反映成岩流体的还原性增强和温度略增高的环境特点,与其形成于浅水台内礁滩相地层封存的海源孔隙水流体相一致;②古表生期溶孔颗粒灰岩具极高Ce负异常和Eu正异常,反映成岩流体氧化性极强的环境特点,与其形成于暴露地表环境相一致;③古表生期淡水方解石具略高的Ce负异常和Eu正异常,亦反映成岩流体氧化性增强的环境特点;④再埋藏期的热液方解石和萤石Ce负异常略增高,而Eu正异常出现极高值,结合碳、氧、锶同位素特征,反映成岩流体属于具备较强还原性质的热液流体,与此二类次生矿物形成于再埋藏期的深部热液环境相一致。

3.2 各成岩阶段碳、氧同位素特征

36件不同成岩阶段的样品碳、氧稳定同位素组成如表1所示,利用Keith和Weber^[16]提出的盐度指数(Z)计算公式计算正常海相微晶灰岩的Z平均值为123.23(以Z=120为咸水和淡水分界线,Z值越高反映的流体盐度越高),反映其具有正常海水性质,以其作为原始正常海相碳酸盐沉积物 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的背景值标志,不同成岩阶段的样品碳、氧稳定同位素有如下特点:①早成岩期致密颗粒灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 相对正常海相微晶灰岩分别偏高4.3‰和9.9‰,Z平均值较高为124.59,反映成岩流体具有盐度和温度稍微增大的地层封存卤水性质;②古表生期溶孔颗粒灰岩与正常海相微晶灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 相当,比早成岩期致密颗粒灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别偏低4.0‰和11.4‰,Z平均值下降为123.21,反映对其进行溶蚀改造的成岩流体具有淡化趋势;③古表生期淡水方解石相对正常海相微晶灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别偏高1.8‰和5.5‰,而Z平均值略下降为123.0,也反映淡化成岩流体性质;④再埋藏期沉淀的被热液交代残余灰岩和热液沉淀的方解石出现 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 强烈负偏移的热分馏现象,相对正常海相微晶灰岩,二者的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值分别偏低11.7‰和12.6‰, $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别偏低22.5‰和36.5‰,反映成岩流体具有深部热液性质,由Z平均值分别为119.7和118.47的淡化迹象,反映了成岩流体的来源很可能属于深循环加热的大气水;⑤在 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系图中,不同成因类型的样品具有很好的分区性(图6),出现2个显著特点,其一是伴随大气水溶蚀强度加大,与大气水

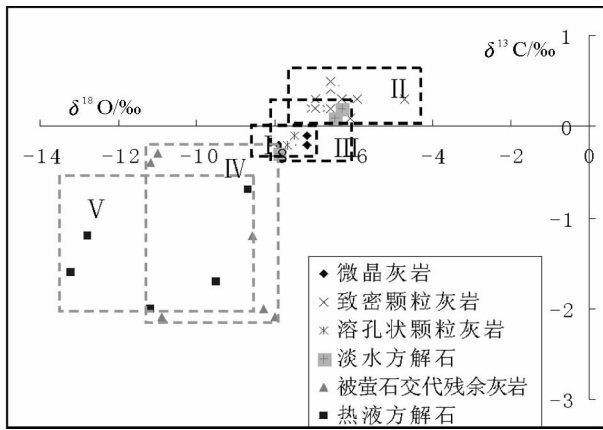


图 6 各类碳酸盐岩及胶结物的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系

Fig.6 The relationship between $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ for middle Ordovician different carbonate rocks and cements in Xekar area

溶蚀有关的各类样品 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 负偏移演化趋势明显, 其中 $\delta^{18}\text{O}$ 负偏移幅度明显大于 $\delta^{13}\text{C}$, 此特征与大气水-碳酸盐基岩反应过程中, 氧同位素负偏移分馏系数大于碳同位素 1.2‰ 的性质是相一致的^[17], 可证明古表生期的岩溶作用是在大气水中进行的。其二是伴随埋藏过程中温压水系统热液溶蚀作用增强, 与热液有关的样品 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 出现强烈负偏移演化趋势, 且热液方解石比被热液交代残余灰岩具有更大的负偏移幅度, 此特征与热液为再埋藏阶段深循环加热的大气水性质是相一致的; ⑥需指出的是, 沉淀萤石的热液碳、氧同位素特征目前虽然不清楚, 但依据萤石富含气、液二相有机包裹体和部分包裹体中含有石膏和石盐等卤水矿物子晶, 可确定成岩流体具有油田热卤水性质, 也与其形成于海西期再埋藏阶段深部热液环境相一致。

3.3 各成岩阶段 Sr 同位素特征

21 件不同成岩阶段的样品 Sr 同位素分析结果由表 1 所示, 各成岩阶段 Sr 同位素特征如下: ①微晶灰岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 均值为 0.709 183, 高于全球中奥陶世正常海水 0.708 505 的均值^[18], 其原因与微晶灰岩中含有少量泥质组分而较富壳源的 ^{87}Sr 有关; ②早成岩期致密颗粒灰岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 均值为 0.708 959, 略高于全球中奥陶世正常海水, 可作为分析各成岩阶段 Sr 同位素特征的参照物; ③古表生期二类样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 均值为基本一致的 0.709 062~0.709 067, 大于早成岩期致密颗粒灰岩和全球中奥陶世正常海水, 但与微晶灰岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 均值接近; ④再埋藏期热

液方解石和萤石分别具有很高和极高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值。

由上述各类样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 组成特征, 可得出如下几点认识: ①早成岩期致密颗粒灰岩的成岩作用主要在海源的地层水中进行, 因此, 基本上保持了沉积物的原始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值; ②古表生期虽然受到强烈的大气淡水溶蚀改造, 但成岩流体主要对微晶灰岩为主的基质岩进行溶蚀作用, 由于流体中锶主要来源于基质岩, 因此, 大气水溶蚀产物具有接近微晶灰岩的较高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值; ③再埋藏期的热液方解石反映了成岩流体具有很高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值, 其成因与源于深循环大气水的热液循环过程中对下伏下寒武统下部炭质和硅质泥岩及磷块岩的溶蚀和萃取富 ^{87}Sr 壳源锶有关^[19]; ④而再埋藏期的萤石反映了成岩流体具有极高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值, 其成因与成岩流体来源于富 ^{87}Sr 的油田卤水有关, 而油田热卤水富 ^{87}Sr 的原因则与其来源于下寒武统下部碳、硅、泥建造的烃源岩系有关^[20]。

4 成岩系统划分及其与储层发育关系

4.1 成岩系统划分

沉积盆地中, 基于流体-岩石相互作用过程、产物和成岩流体与储层在时间-空间上的耦合与匹配关系的成岩系统划分, 是当今石油地质学界最前缘的研究热点之一^[21]。综合各阶段成岩组构、演化序列和各成岩阶段产物的地球化学特征所反映的成岩环境和成岩流体性质^[22], 按“水文体制”可将西克尔地区中奥陶统生物礁滩相储层的演化过程划分为 4 个成岩系统, 即准同生-早成岩期相对封闭和弱还原性的浅埋藏环境海源地层水成岩系统, 古表生期开放和氧化性的暴露环境大气水成岩系统, 再埋藏期开放和还原性的中-深埋藏环境温压水成岩系统, 以及仍具备开放和还原条件的深埋藏环境油田热卤水成岩系统。

4.2 成岩系统与储层发育关系

综上所述, 塔里木盆地西北缘西克尔地区中奥陶统生物礁滩储层经历了 4 个不同流体性质的成岩作用改造, 不同成岩系统对奥陶系生物礁滩储层发育的贡献差异性很大, 有如下演化特点。

4.2.1 准同生-早成岩期海源地层水成岩系统与储层发育关系

准同生-早成岩期的成岩作用发生在相对封闭

和弱还原浅埋藏环境的海源地层水成岩系统中,以压实、压溶、胶结和文石向低镁方解石转化的新生变形作用为主,原生的粒间孔和粒内孔大部分被充填,由于原生孔隙被强烈缩减而不利于储层发育,产物主要为微晶灰岩和致密颗粒灰岩。

4.2.2 古表生期大气水成岩系统与储层发育关系

加里东中期柯坪地区于中奥陶世晚期经历了数次抬升和剥蚀作用^[10,11]而处于古表生期大气水成岩系统,成岩环境和流体具有较强的氧化性和低温性质,以大气水强烈溶蚀作用为主,溶洞中普遍发育的淡黄色钙结壳可作为存在低温流体溶蚀的胶结作用的证据。中奥陶统生物礁滩相地层接受广泛侵蚀和多期岩溶作用的基础上,于不整合面之下的一定深度范围内沿构造裂隙及风化裂隙形成大规模的溶蚀孔、洞、缝系统而形成特征的古岩溶型储层,研究区内以溶洞—裂缝型储层最为发育,其次是礁滩复合体中颗粒灰岩中发育的溶蚀孔洞更为广泛,因此,古表生期大气水成岩系统是形成古岩溶型储层发育基础的时期。

4.2.3 再埋藏早中期深部温压水成岩系统与储层发育关系

晚奥陶世研究区处于稳定沉降状态和接受上奥陶统赫南特阶热克阿瓦提组紫红色碎屑岩沉积超覆作用,岩溶作用终止,沿古表生期发育的溶裂缝、溶蚀孔洞和洞穴被来自上覆地层的泥、粉砂质碎屑物半充填或全充填。伴随埋藏深度加大,上覆地层压力增大,在溶洞顶部形成破裂角砾岩和网络镶嵌状角砾岩储层,这也是溶洞储层系统中很重要的一种储层类型。随着海西中期巴楚—柯坪地区发生短暂的拉张裂陷运动^[9],沿盆地基底断裂带大气水下渗入地层深部,在其深循环过程中不断被地热增温和从下寒武统下部的炭质、硅质、泥岩和磷块岩及奥陶系碳酸盐岩中萃取富⁸⁷Sr的壳源Sr²⁺离子和Ca²⁺、F⁻、CO₃²⁻离子,形成高矿化度的深部热液,在热对流、沉积压实、矿物相变、构造运动等动力作用驱动下,沿断裂带上升进入中奥陶统生物礁滩相地层而形成温压水成岩系统,受深部热液活动影响,广泛发育热液溶蚀和各种次生热液矿物、特别是粗—巨晶热液方解石和萤石的沉淀作用,更是深部热液活动的直接证据。在此温压水成岩系统,随着埋藏深度加大和温度、压力增高,除深部热液进行继承性交代、重结晶和沉淀次生矿物等作用外,更重要的是逐渐加强

的深部热液溶蚀作用,因此,再埋藏期温压水成岩系统是对古岩溶型储层进行改造和扩大储层发育规模的重要时期。

4.2.4 再埋藏晚期深部油田卤水成岩系统与储层发育关系

伴随海西期构造活动与断裂系统的形成,下寒武统烃源岩也进入成熟和排烃期,载烃流体也沿盆地海西期基底断裂带运移、聚集,并与同一疏导系统中深循环的、同样富壳源Sr²⁺离子和Ca²⁺、F⁻、CO₃²⁻离子的高矿化度大气水热液混合后,进入再埋藏晚期成岩阶段的中奥陶统生物礁滩相地层为基质岩背景的古岩溶体系中聚集,形成海西晚期古岩溶型油藏和油田热卤水成岩系统。随着海西晚期拉张裂陷运动的继续^[9],造成研究区海西期油气藏部分或全部被破坏,同时油田卤水沿断层及不整合面向处于高部位的礁滩运移,侵入过程中在相对开放条件下进行,使得洞缝进一步扩溶,形成更多更大的容矿空间。随着流体—岩石相互反应,流体的酸性减弱,溶蚀作用降低的同时,沉淀海西晚期萤石和伴生的方解石和微量重晶石、黄铁矿等热液矿物,局部富集成囊状和脉状萤石矿。在古岩溶洞穴和溶裂缝中局部残留的大块沥青充填物,可作为西克尔地区中奥陶统生物礁滩相地层曾经历过古油藏演化阶段的重要标志。因此,具强烈溶蚀作用的再埋藏期深部油田热卤水成岩系统是提高古岩溶型储层品质和沉淀萤石成矿(或油气充注成藏)的关键。

5 结论

(1)西克尔地区中奥陶统生物礁滩经历了复杂的破坏性和建设性成岩作用,前者包括胶结作用、压实—压溶作用和充填作用,后者包括古表生期岩溶、再埋藏期的多次热液溶蚀和破裂作用。

(2)按成岩组构与成岩矿物组合特征,可确定其经历了准同生—早成岩阶段近地表海水—海源地层水成岩环境,古表生期大气淡水成岩环境,再埋藏早—中成岩阶段温压水成岩环境,以及再埋藏晚成岩阶段油田热卤水成岩环境的成岩演化历史。

(3)按“水体制”,可将西克尔地区中奥陶统生物礁滩的成岩流体划分为海源地层水、大气水、温压水、油田热卤水4个连续演化的成岩系统,各成岩系统的流体来源、性质、水—岩相互作用过程及成岩作用方式完全不同,各成岩系统产物的组构,流体包裹

体和稀土元素及碳、氧、锶稳定同位素地球化学特征各不相同,对古岩溶型储层发育和萤石成矿(或油气充注成藏)的控制也不同;可归纳为3个要素:①古表生期大气水成岩系统是形成古岩溶型储层发育基础;②再埋藏期深部温压水成岩系统改造和扩大了古岩溶型储层的发育规模;③具强烈溶蚀作用的再埋藏期油田热卤水成岩系统是提高古岩溶型储层的品质和萤石沉淀成矿(或油气充注成藏)的关键。

参考文献(References):

- [1] 顾家裕,方辉,蒋凌志.塔里木盆地奥陶系生物礁的发现及其意义[J].石油勘探与开发,2001,28(4):1-7.
Gu Jiayu, Fang Hui, Jiang Lingzhi. The significance of Ordovician reef discovery in Tarim basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(4):1-7(in Chinese with English abstract).
- [2] 朱忠德,胡明毅,刘秉理,等.中国早中奥陶世生物礁研究[M].北京:地质出版社,2006.
Zhu Zhongde, Hu Mingyi, Liu Bingli, et al. Organic Reefs in Early -Middle Ordovician in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006(in Chinese).
- [3] 刘静江,刘池洋,孙洪海.塔里木盆地轮南地区奥陶系沉积储层研究新进展[J].中国地质,2007,34(3):515-521.
Liu Jingjiang, Liu Chiyang, Sun Honghai. New advances in the study of Ordovician sedimentary reservoirs in Lunnan, Tarim basin [J]. Geology in China, 2007, 34 (3):515-521 (in Chinese with English abstract).
- [4] 张宝民,刘静江,边立曾,等.礁滩体与建设性成岩作用[J].地学前缘,2009,16(1):270-289.
Zhang Baomin, Liu Jingjiang, Bian Lizeng, et al. Reef-banks and reservoir constructive diagenesis[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16 (1):270-289(in Chinese with English abstract).
- [5] 刘伟,张兴阳,顾家裕.塔里木盆地台盆区中西部中下奥陶统鹰山组沉积环境研究[J].沉积学报,2009,27(3):435-442.
Liu Wei, Zhang Xingyang, Gu Jiayu. Sedimentary environment of Lower -Middle Ordovician Yingshan Formation in mid -western Tarim basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(3):435-442 (in Chinese with English abstract).
- [6] 周刚,郑荣才,罗平,等.塔里木盆地西克尔地区中奥陶统鹰山组生物礁沉积特征[J].新疆石油地质,2010,31(4):365-368.
Zhou Gang, Zheng Rongcai, Luo Ping, et al. Sedimentary characteristics of Middle Ordovician Reefs in Yingshan Formation, Xike-er area, Tarim basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(4):365-368(in Chinese with English abstract).
- [7] 张兴阳,顾家裕,罗平,等.塔里木盆地奥陶系萤石成因及其油气地质意义[J].岩石学报,2006,88(8):2220-2228.
Zhang Xingyang, Gu Jiayu, Luo Ping, et al. Genesis of the fluorite in the Ordovician and its significance to the petroleum geology of Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 88(8):2220-2228(in Chinese with English abstract).
- [8] 刘伟,罗平,顾家裕,等.塔里木盆地西克尔地区古岩溶储层露头表征[J].地质学报,2010,84(8):1215-1222.
Liu Wei, Luo Ping, Gu Jiayu, et al. Outcrop characteristics of Paleokarst reservoir in the Xekar Area, Tarim Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84 (8):1215-1222 (in Chinese with English abstract).
- [9] 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.
Jia Chengzao. Structure Characteristics and Hydrocarbon Accumulation in Tarim Basin, China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997(in Chinese with English abstract).
- [10] 张臣,郑多明,李江海.柯坪断隆古生代的构造属性及其演化特征[J].石油与天然气地质,2001,22(4):314-318.
Zhang Chen, Zheng Duomin, Li Jianghai. Attribute of Paleozoic structures and its evolution characteristics in Keping fault-uplift [J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(4):314-318(in Chinese with English abstract).
- [11] 方茂龙,王树红,韩晓青,等.新疆柯坪新生代推覆岩席的走向连接与成因分析[J].中国地质,2009,36(2):322-332.
Fang Maolong, Wang Shuhong, Han Xiaoping, et al. The striking connection of Cenozoic thrust sheets in Kalpin fault uplift, Xinjiang, and their formation mechanism [J]. Geology in China, 2009, 36(2):322-332(in Chinese with English abstract).
- [12] 邓胜徽,黄智斌,景秀春,等.塔里木盆地西部奥陶系内部不整合[J].地质论评,2008,54(6):741-747.
Deng Shenghui, Huang Zhibin, Jing Xiuchun, et al. Unconformities in the Ordovician of Western Tarim Basin, NW China [J]. Geological Review, 2008, 54 (6):741-747 (in Chinese with English abstract).
- [13] 郑荣才,彭军,高红灿.渝东黄龙组碳酸盐岩储层的古岩溶特征和岩溶旋回[J].地质地球化学,2003,31(1):28-35.
Zheng Rongcai, Peng Jun, Gao Hongcan. Palaeokarst-related characteristics and cycles of carbonate reservoirs in Huanglong Formation, Upper Carboniferous, eastern Chongqing [J]. Geology Geochemistry, 31(1):28-35(in Chinese with English abstract).
- [14] 陈德潜,陈刚.实用稀土元素地球化学[M].北京:冶金工业出版社,1990:59-172.
Chen Deqian, Chen Gang. Applied REE Geochemistry [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990:59-172 (in Chinese with English abstract).
- [15] 雷国良,王长生,钱志鑫,等.贵州岩溶沉积物稀土元素地球化学研究[J].矿物学报,1994,14(3):298-308.
Lei Guoliang, Wang Changsheng, Qian Zhixin, et al. REE geochemistry of karst sediments in Guizhou Province [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1994,14(3):298-308(in Chinese with English abstract).
- [16] Keith M L, Weber J N. Carbon and oxygen isotopic composition of mollusk shells from marine and fresh-water environments [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1964, 28(10/11):1786-1816.

- [17] 魏菊英. 同位素地球化学[M]. 北京:地质出版社, 1988:129-146.
Wei Juying. Isotope Geochemistry [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1988:129-146(in Chinese).
- [18] McArthur J M, Howarth R J, Bailey T R. Strontium Isotope Stratigraphy: LOWESS Version 3: Best Fit to the Marine Sr - Isotope Curve for 0-509 Ma and Accompanying Look-up Table for Deriving Numerical Age [J]. J Geol., 2001, 109:155-170.
- [19] Cai C F, Li K K, Li H T, et al. Evidence for cross formational hot brine flow from integrated $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, REE and fluid inclusions of the Ordovician veins in Central Tarim [J]. Applied Geochemistry, 2008, 23:2226-2235.
- [20] 于炳松, 樊太亮. 塔里木盆地寒武系—奥陶系泥质烃源岩发育的构造和沉积背景控制[J]. 现代地质, 2008, 22(4):534-540.
Yu Bingsong, Fan Tai liang. Sedimentary-tectonic control on the development of muddy hydrocarbon source rocks of cambrian - Ordovician from Tarim Basin [J]. Geoscience, 2008, 22(4):534-540(in Chinese with English abstract).
- [21] 李忠, 韩登林, 寿建峰. 沉积盆地成岩作用系统及其时空属性[J]. 岩石学报, 2006, 22(8):2151-2164.
Li Zhong, Han Denglin, Shou Jianfeng. Diagenesis systems and their spatio-temporal attributes in sedimentary basins [J]. Acta Petrologica, 2006, 22(8):2151-2164 (in Chinese with English abstract).
- [22] 郑荣才, 党录瑞, 郑超, 等. 川东-渝北地区黄龙组储层成岩系统[J]. 石油学报, 2010, 31(2):59-67.
Zheng Rongcai, Dang Lurui, Zheng Chao, et al. Sedimentary - diagenetic systems of carbonatite reservoirs in the Huanglong Formation, Eastern of Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(2):237-245(in Chinese with English abstract).

Diagenetic characteristics and system of Xekar Middle Ordovician organic reef-beach facies reservoirs in Tarim basin

ZHOU Gang¹, ZHENG Rong-cai¹, LUO Ping²,
ZHAO Xian-chao³, LIU Wei², SONG Jin-ming², RAO Hong-juan⁴

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 3. Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, Anhui, China; 4. No. 101 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development, Kaili 556000, Guizhou, China)

Abstract: The diagenetic manner and evolution stage as well as the corresponding geological products and geochemical characteristics of REE, carbon, oxygen and strontium stable isotopes of Xekar Middle Ordovician Organic Reef-beach facies reservoirs were comprehensively studied in this paper. According to the "hydrological system", the Middle Ordovician organic reef-beach facies strata were divided into four diagenetic systems, i.e., pore water, atmosphere water, temperature-pressure water and oilfield brines. The source and property of fluid flow and the interaction process between fluid and rock of each diagenetic system were different from each other, and their effects on the reservoir development were varied. Therefore, the diagenetic systems and manners closely related to the reservoir development mainly include the role of the karstification of atmospheric water at the ancient epigenetic stage, the role of temperature-pressure water and oilfield brines at the re-burial diagenetic stage, and the role of tectonic disruption at the middle-late re-burial diagenetic stage.

Key words: Tarim basin; Middle Ordovician; Organic Reef-beach; diagenetic system; geochemical characteristics

About the first author: ZHOU Gang, male, born in 1984, doctor candidate; mainly engages in the study of sedimentology and reservoir geology; E-mail: zhougang29@126.com.