

文章编号: 0253-2697(2015)07-0791-08 DOI:10.7623/syxb201507003

塔河油田奥陶系古岩溶径流带缝洞化学充填物成因和分布

金强¹ 康逊¹ 田飞²

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院 山东青岛 266580; 2. 中国科学院地质地球物理研究所 北京 100029)

摘要:岩溶缝洞是塔河油田奥陶系碳酸盐岩储集空间,其常被沉积、垮塌和化学充填物所充填,化学充填物由方解石和钙华组成,还有少量石膏、硫磺和萤石等,径流岩溶带化学充填物以方解石为主。通过岩心观察,采集了不同产状的方解石及奥陶系灰岩,进行了薄片、阴极发光、流体包裹体和微量元素等分析,发现溶洞充填的巨晶方解石与裂缝充填的粗晶方解石为热液成因,裂缝充填的细晶方解石为成岩胶结成因,溶洞充填砾岩的砾间方解石和钙华碎屑是成岩早期淀积形成的(埋藏期有少量改造);还发现裂缝充填细晶方解石与围岩具有亲缘关系、为其母液溶蚀了奥陶系灰岩再沉淀形成,巨晶方解石与深部热液物质相关、与围岩没有关系,钙华为地表水溶蚀产物。岩溶缝洞化学充填物成因研究有助于了解该类储层特征和演化。

关键词:岩溶缝洞;化学充填物;热液成因巨晶方解石;胶结成因细晶方解石;钙华成因方解石;塔河油田

中图分类号:TE122.14

文献标识码:A

Genesis of chemical fillings in fracture-caves in paleo-karst runoff zone in Ordovician and their distributions in Tahe oilfield, Tarim Basin

Jin Qiang¹ Kang Xun¹ Tian Fei²

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Shandong Qingdao 266580, China;

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Karst fractures and caves are the major reservoir spaces of Ordovician carbonate in Tahe oilfield, which are often filled with chemical, deposited, and collapsed fillings. Chemical fillings are mainly composed of calcite and travertine, as well as a small amount of gypsum, sulfur and fluorite, etc., but dominated by calcites in runoff zone. Through cores observation, the authors collected a series of calcites and Ordovician limestone with different occurrence, and then made analyses on thin sections, cathode luminescence, fluid inclusion and trace elements. It is found that megacrystal calcite filled in caves and coarse-crystalline calcite in fractures are formed by hydrothermal fluids, while fine-crystalline calcite in fractures is developed by diagenetic cementation. Besides, intergravel calcite and travertine debris in caves have been deposited in the early stage of diagenesis (slightly transformed during the burial period). It also has been found that the fine-crystalline calcite in fractures has a genetic relationship with surrounding rocks, which is re-precipitated after the corrosion of Ordovician limestone under the action of its mother liquor. Megacrystal calcite has certain relation with deep hydrothermal fluids rather than surrounding rocks, while travertine is a production of surface water dissolution. Genesis study of chemical fillings in fracture-caves contributes a lot to the understanding of reservoir characteristics and evolution.

Key words: karst fractures and caves; chemical fillings; megacrystal calcite formed by hydrothermal fluids; fine-crystalline calcite developed by cementation; calcite originated from travertine; Tahe oilfield

引用:金强,康逊,田飞.塔河油田奥陶系古岩溶径流带缝洞化学充填物成因和分布[J].石油学报,2015,36(7):791-798,836.

Cite: Jin Qiang, Kang Xun, Tian Fei. Genesis of chemical fillings in fracture-caves in paleo-karst runoff zone in Ordovician and their distributions in Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(7): 791-798, 836.

岩溶碳酸盐岩是世界上非常复杂的一类储层,在中国碳酸盐岩油田中占很高比例,塔河油田就是石油地质储量超过 10×10^8 t、原油产量高、埋藏深度大的岩溶缝洞储层^[1,2]。该油田位于塔北隆起高部位,其奥陶系灰岩经历了长期的岩溶,形成了岩溶缝洞系统^[2-4],前人及作者通过现代岩溶考察和塔河油田的综合研究,识别出了表层岩溶带、渗流岩溶带和径流岩溶带等^[5,6],认为径

流带地下河系统是重要的油气聚集场所^[5-7]。然而,地下河缝洞空间被岩溶期沉积的砂泥岩、垮塌角砾岩充填^[6,8],埋藏期充填了大量方解石等化学充填物,以至缝洞的充填率达到了75%以上。塔河油田早期的油气勘探和开发主要针对未充填的缝洞空间进行,获得很高的原油产量^[2],随着油田开发的深入,发现溶洞内沉积、垮塌和化学充填物导致了缝洞分隔和缝洞单元,方解石等

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目“碳酸盐岩缝洞型油藏缝洞单元形成机制及模式研究”(2011CB201001)和中国石油化工股份有限公司科技项目“塔河油田缝洞成因机制与结构模式研究”(P11090)资助。

第一作者及通信作者:金强,男,1956年5月生,1982年获华东石油学院学士学位,1994年获石油大学博士学位,现为中国石油大学(华东)地球科学与技术学院教授,主要从事油气地质研究与教学工作。Email: jinqiang@upc.edu.cn

化学充填物大大降低了缝洞及其充填物的储集性能,因此,查明地下河系统中化学充填物成因类型和分布规律具有重要的岩溶地质和油田开发实际意义。

不少学者在岩溶地质学指导下,利用地质-地球物理方法对古岩溶进行了岩溶分带和缝洞识别等工作^[9-11],取得了瞩目的成果^[12-14]。笔者通过深入研究,同时借鉴同行研究成果和方法^[15-18],查明塔河主体区径流岩溶带由厅堂洞、干流洞、支流洞和末梢洞等组成^[6],发现这些溶洞被地下河沉积物、垮塌角砾岩和方解石及钙华等化学物质所充填^[6,10,14],并试图对方解石化学充填物的成因类型和形成过程进行分析,以期深化对塔河油田岩溶地质的认识。

1 样品和实验

在塔河油田主体区(4区、6区和7区)奥陶系缝洞储层取心井岩心观察的基础上,在6口井采集了奥陶系灰岩(原岩)、溶洞内巨晶方解石、裂缝充填细晶方解石、溶洞内沉积砾岩胶结物和砾石间钙华碎屑等50余块样品,样品性质参见表1—表4。

在室内进行了样品的薄片分析以后,重点对缝洞充填方解石样品进行了包裹体均一温度及冰点温度、微量元素、稀土元素和碳、氧同位素等地球化学分析测试。包裹体均一温度在中国石油大学(华东)油气储层包裹体实验室测定,测定仪器是LINKAM-THMS-G600型冷热台,检测依据是EJ/T 1105-1999^[19]。微量元素(含稀土元素)在核工业北京地质研究院分析测试研究中心测定,测

定仪器是ELEMENT XR高分辨电感耦合等离子体质谱仪,测试依据是GB/T14506.30-2010^[20]。碳、氧同位素分析在中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司地质科学研究院石油地质测试中心测试,测试仪器是MAT251同位素质谱仪,测试依据是SY/T5238-2008^[21]。

2 实验结果与讨论

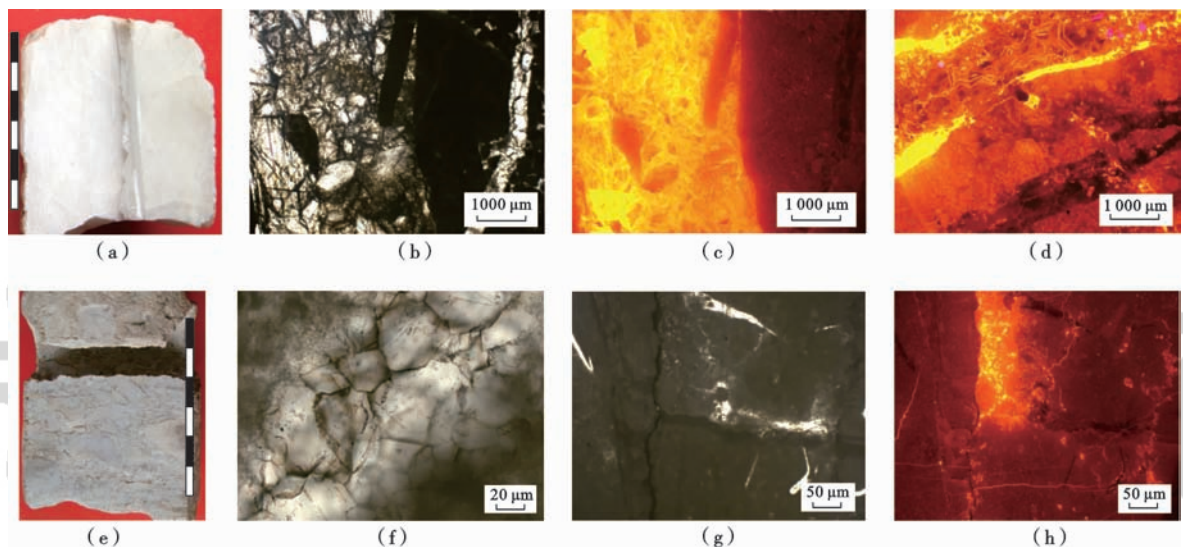
径流带溶洞十分发育,包括地下河和垮塌作用形成的厅堂洞、干流洞、支流洞和末梢洞等^[6],笔者发现在洞穴内产出巨晶方解石(部分为冰洲石)、垮塌角砾岩颗粒间产出方解石胶结物和钙华碎屑,裂缝充填的方解石主要有2种产状:粗晶方解石和细晶方解石,粗晶方解石洁白透明,与巨晶方解石相似、为快速沉淀形成;细晶方解石颗粒小于0.1 mm并具有平行裂缝壁的纹层,类似普通钙华。

2.1 缝洞充填方解石岩矿特征

2.1.1 巨晶方解石

巨晶方解石也称冰晶石,白色透明,单个晶体常在10 mm以上,厚度常在10 cm以上,充填在溶洞中,有些末梢洞完全由巨晶方解石充填。在溶蚀裂缝中,常以白色粗晶方解石出现。其明显是快速结晶形成的,没有辨认出后期成岩改造作用,认为是热液作用形成。S75井5681.57~5695.03 m为支流洞,发现有很纯的冰洲石充填物[图1(a)],其晶体完整、裂隙含油。

裂缝充填粗晶方解石具有2个“世代”:第I世代为晶粒大小不等的方解石,双晶纹粗糙,阴极射线下呈



(a) 支流洞巨晶方解石(比例尺每格1 cm), S75井 5682.43 m; (b) 裂缝充填粗晶方解石(单偏光), S65井 5578.92 m; (c) 样品视域同(b), 阴极发光薄片; (d) 裂缝充填粗晶方解石, 阴极发光薄片, T615井 5558.45 m; (e) 厅堂洞砾间方解石和钙华碎屑充填(比例尺每格1 cm), T403井 5538.47 m; (f) 裂缝充填细晶方解石: 第I世代方解石(左侧细小颗粒状)及第II世代方解石(右侧大颗粒), 单偏光, S75井 5534.24 m; (g) 裂缝充填细晶方解石(单偏光), S74井 5534.24 m; (h) 样品视域同(g), 第III世代方解石阴极发光呈暗桔红色。

图1 塔河油田径流岩溶带缝洞方解石充填物岩心和薄片特征

Fig. 1 Characteristics of cores, thin sections and cathode luminescence of calcite fillings in fractures or caves, Tahe oilfield

桔黄色、黄色[图 1(b)和图 1(c)];第Ⅱ世代为等轴粒状方解石,晶面洁净,零散分布于第Ⅰ世代方解石间,阴极射线下呈桔红色[图 1(d)]。

2.1.2 洞穴堆积物粒间方解石或钙华碎屑

指地下河沉积物颗粒或垮塌碎屑颗粒间亮晶方解石或钙华碎屑,方解石是粒间水淀积出来的胶结物,少数是重结晶成因^[22],钙华碎屑是洞穴发育过程中形成的。T403 井发育一个 67 m 高的厅堂洞,其被 10 个正韵律的垮塌角砾和沉积碎屑充填,砾石间常被方解石和钙华碎屑充填[图 1(e)]。

2.1.3 裂缝充填细晶方解石

指地下河岩壁(奥陶系灰岩)裂缝中的方解石,其常呈不等粒产出,晶粒多数小于 0.1 mm,具有沿裂缝呈纹层分布特点。在阴极发光显微镜下,方解石呈 3 个“世代”:第Ⅰ世代方解石呈细粒状(10~60 μm)分布在颗粒周围,晶形不完整[图 1(f)],阴极射线下呈暗红色;第Ⅱ世代方解石为等轴粒状(50~200 μm),呈它

形或半自形,晶面洁净[图 1(f)],阴极射线下呈暗红色—暗桔红色;第Ⅲ世代方解石为完整自形晶,晶粒常大于 100 μm,双晶纹发育[图 1(c)、图 1(d)],阴极射线下呈暗桔红色。裂缝充填细晶方解石应该是岩溶发育期或埋藏期流水淀积作用形成的^[22]。

2.2 缝洞充填方解石地球化学特征

在对缝洞及其充填物中的方解石岩矿特征分析之后,选取溶洞内巨晶方解石、裂缝内粗晶方解石、裂缝内细晶方解石和砾岩粒间方解石进行了包裹体温度和微量元素等分析,进一步讨论其成因特征。

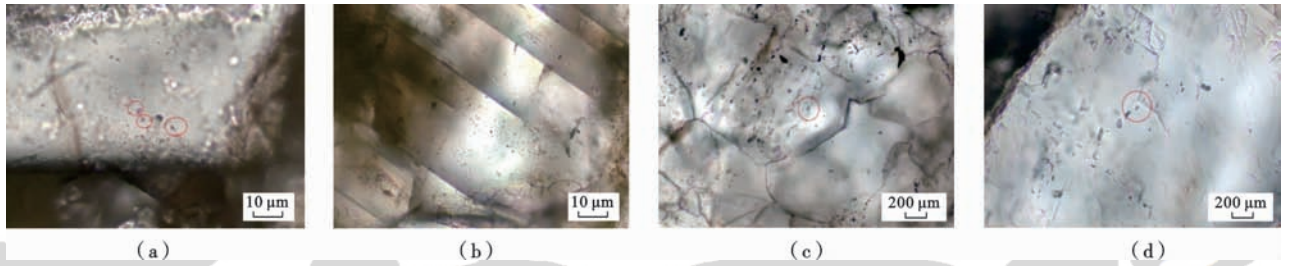
2.2.1 包裹体特征

在塔河油田的 T403 井、S75 井、S65 井和 S74 井所取到的样品磨制了 34 片包裹体薄片,测得 227 个包裹体均一温度数据点、冰点温度 128 个(部分数据见表 1)。热液成因方解石中包裹体多数为等轴状随机分布,地下河沉积碎屑粒间成岩胶结方解石呈长轴状沿方解石晶轴方向分布,包裹体大小见表 1、形态特征见图 2。

表 1 塔河油田岩溶径流带缝洞充填方解石部分盐水包裹体均一温度与冰点温度数据

Table 1 Homogeneous temperatures and freezing point temperatures of fluid inclusions of calcites filled in fractures or caves in runoff zones of karst Ordovician carbonates in Tahe oilfield

井号	深度/m	方解石产状	方解石成因	类型	大小/μm	气/液比/%	均一温度/℃	冰点温度/℃	盐度/‰
T403	5538.47	砾石间方解石	胶结	盐水	15×3	9	83.1	-6.5	9.90
T403	5538.47	砾石间方解石	胶结	盐水	10×1.5	5	100.2	-3.3	10.20
T403	5538.47	砾石间方解石	胶结	盐水	12×1	6	121.8	-7.1	10.61
T403	5538.47	砾石间方解石	胶结	盐水	5×1	4	118.4	-9.6	13.51
T403	5538.47	砾石间方解石	胶结	盐水	8×4	5	120.3	-4.7	7.45
T403	5538.47	砾石间方解石	胶结	盐水	12×2.5	8	118.5	未测到	未测到
T403	5538.47	砾石间方解石	胶结	盐水	7×3.5	6	121.5	-1.2	2.07
T403	5538.47	砾石间方解石	胶结	盐水	5×2.5	7	115.6	-3.2	5.26
T403	5538.47	砾石间方解石	胶结	盐水	8×1	6	104.0	-3.5	5.71
T403	5538.47	砾石间方解石	胶结	盐水	6.5×4	9	84.9	-13.2	17.08
S75	5683.90	巨晶方解石	热液	盐水	4×4.5	12	174.9	-5.8	8.95
S75	5683.90	巨晶方解石	热液	盐水	6×3.5	11	180.9	未测到	未测到
S75	5683.90	巨晶方解石	热液	盐水	7.5×3	5	83.1	-5.5	8.55
S75	5683.90	巨晶方解石	热液	盐水	6×4	5	84.2	-6.0	9.21
S75	5683.90	巨晶方解石	热液	盐水	5×3.5	6	85.3	-5.4	8.41
S75	5683.90	巨晶方解石	热液	盐水	6.5×3	6	89.1	-8.2	11.93
S75	5683.90	巨晶方解石	热液	盐水	5×3.5	5	90.2	-8.1	11.81
S75	5683.90	巨晶方解石	热液	盐水	6×2.5	6	92.4	-8.4	12.16
S75	5683.90	巨晶方解石	热液	盐水	5.5×3	5	93.4	-8.2	11.93
S75	5683.90	巨晶方解石	热液	盐水	5×3	8	94.1	-8.3	12.05
S75	5683.90	巨晶方解石	热液	盐水	4×2.5	7	132.6	-3.3	5.41
S65	5578.92	裂缝粗晶方解石	热液	盐水	5.5×2	5	105.3	未测到	未测到
S65	5578.92	裂缝粗晶方解石	热液	盐水	6×2.5	6	74.7	-4.5	7.17
S65	5578.92	裂缝粗晶方解石	热液	盐水	5×5	8	114.5	-3.2	5.26
S65	5578.92	裂缝粗晶方解石	热液	盐水	8×12	9	101.7	-14.2	17.96
S65	5578.92	裂缝粗晶方解石	热液	盐水	5.5×3	5	92.3	未测到	未测到
S65	5578.92	裂缝粗晶方解石	热液	盐水	4.5×2.5	8	73.6	-4.5	7.17
S74	5533.24	裂缝细晶方解石	胶结	盐水	5×2.5	3	76.4	-0.2	0.35
S74	5533.24	裂缝细晶方解石	胶结	盐水	5×3	5	80.6	-1.2	2.07
S74	5533.24	裂缝细晶方解石	胶结	盐水	2×3	5	82.3	-2.1	3.55
S74	5533.24	裂缝细晶方解石	胶结	盐水	2.5×3	5	86.8	-2.1	3.55
S74	5533.24	裂缝细晶方解石	胶结	盐水	5×4	3	87.6	-1.7	2.90
S74	5533.24	裂缝细晶方解石	胶结	盐水	4×2.5	6	92.7	-1.8	3.06
S74	5533.24	裂缝细晶方解石	胶结	盐水	4×3.5	5	93.2	-4.6	7.31



(a)和(b) 溶蚀裂缝充填粗晶方解石等轴状包裹体随机分布,S65井 5 578.92 m;(c)和(d) 裂缝充填细晶方解石长轴状包裹体沿方解石晶轴方向延伸发育,S74井 5 533.24 m。

图2 塔河油田径流带方解石充填物气-液包裹体特征

Fig.2 Characteristics of gas-liquid inclusions of calcite fillings in fractures or caves of runoff zone in Tahe oilfield

对形体比较大、气-液两相清楚的包裹体测量了均一温度和冰点温度,发现热液成因方解石包裹体均一温度并不都很高,而是分布较广:①均一温度 > 145℃,最高达 193℃[图 3(a)],与奥陶系所受最高温度相比(图 4)要高出 40℃,该温度只出现在第 I 世代方解石中[图 1(b)和图 1(c)],应当属于热液成因包裹体;②均一温度在 70~140℃ 的比较多[图 3(a),平均 112.3℃],这些包裹体在第 I 和第 II 世代方解石中均有分布[图 1(d)],反映出后者形成的温度低一些;③均一温度低于 65℃[图 3(a)],其成因不详,这些包裹体靠近巨晶方解石裂隙附近,可能与裂隙附近重结晶有关。

径流带溶洞碎屑充填物的粒间成岩胶结方解石均一温度也为 3 组:①小于 65℃(平均 54.3℃);②在 65~105℃(平均 88.7℃);③在 110~140℃[平均 123.6℃,

图 3(b)]。可见,这些包裹体均一温度低于热液成因方解石,与图 4 反映的地温范围相似。

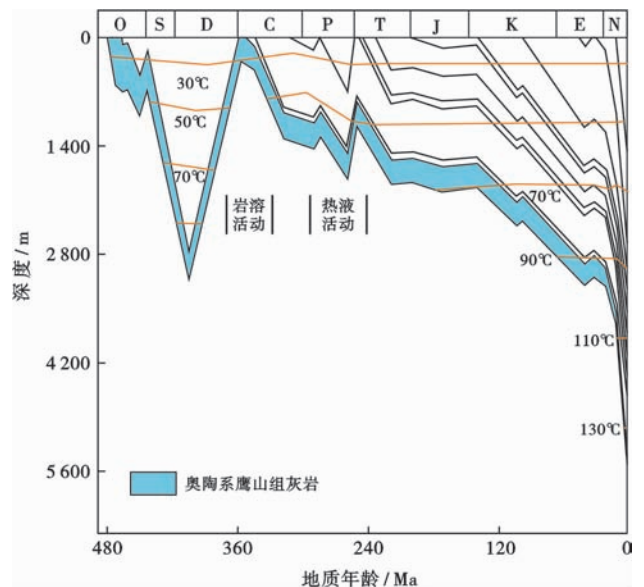


图4 塔河七区 S75 井埋藏史(据文献[11]修改)

Fig.4 Burial history curves of Well S-75 in Tahe oilfield

包裹体盐度数据分布在 0.9%~17.92%,热液成因的巨晶方解石和裂缝充填的粗晶方解石盐水包裹体盐度可以超过 10%(表 1),地下河沉积砂岩粒间和垮塌角砾间方解石包裹体盐度不超过 8%,说明前者是高盐度的卤水,后者盐度总体较低,而且盐度低于 3.5%的在成岩胶结流体中占多数,反映了岩溶发育期地表水溶蚀原岩充填缝洞的过程^[10]。

2.2.2 碳、氧同位素特征

裂缝充填的粗晶方解石和溶洞充填的巨晶方解石碳、氧同位素组成相对较重, $\delta^{13}C(PDB) > -2.19\%$ 、 $\delta^{18}O(PDB) > -12.95\%$;溶洞堆积砾岩颗粒间的淀积方解石和裂缝充填的细晶方解石组成相对轻一些, $\delta^{13}C < -2.19\%$ 而 $\delta^{18}O$ 分布比较宽(-12.95%~ -6.68%);奥陶系灰岩 $\delta^{13}C$ 值多数在-1%~-2%(表 2)。表 2 中的

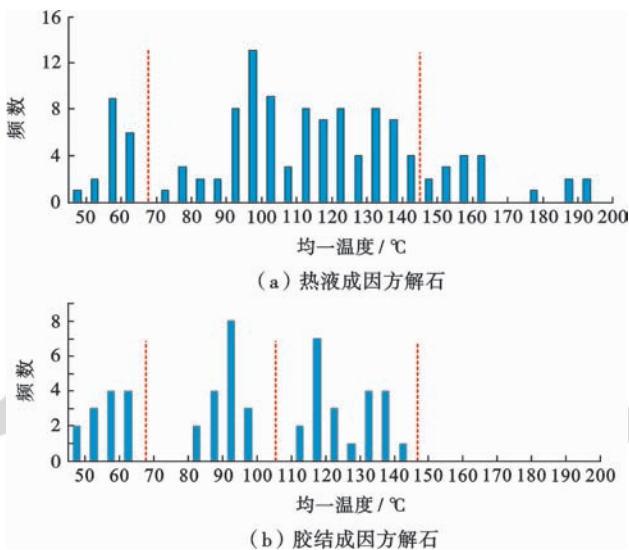


图3 径流带热液成因方解石和成岩胶结方解石包裹体均一温度分布

Fig.3 Homogeneous temperatures of gas-fluid inclusions of the calcites formed by hydrothermal fluids and diagenetic cementation

Z 值和温度分别用式(1)^[23]和式(2)^[24]计算得到。

$$Z = 2.048 \times (\delta^{13}\text{O} + 50) + 0.498 \times (\delta^{18}\text{O} + 50) \quad (1)$$

$$T = 16.9 - 4.38 \times \delta^{18}\text{O} + 0.1 \times (\delta^{18}\text{O})^2 \quad (2)$$

Z 值一般反映方解石形成时的水体盐度,表 2 所列溶洞巨晶方解石、淀积方解石样品均分布在 111~121,表现出半咸水特征,或者说热液与溶洞埋藏期流体的盐度差别不大。同时,利用方解石氧同位素

计算的温度比包裹体测量值要低,其中巨晶方解石的同位素温度比其他方解石的要高一些。因为塔河油田奥陶系古岩溶形成于志留纪—早石炭世,现今埋藏深度超过 5 400 m(图 4),经历长期的地质改造作用,方解石的碳、氧同位素组成可能发生一定的分馏作用,所以不建议利用其反映成岩流体盐度和温度。

表 2 塔河油田径流带不同成因方解石碳、氧同位素特征

Table 2 Carbon and oxygen isotope compositions of calcites with different origins in the runoff zone of Tahe oilfield

样品号	与风化壳距离/m	产状	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ (PDB)	Z 值	计算温度/ °C
S75-1-TF	192.43	溶洞巨晶方解石	-1.70	-11.12	118.28	77.97
S75-2-TF	193.90	溶洞巨晶方解石	-1.83	-12.81	117.17	89.41
S75-3-TF	194.37	溶洞巨晶方解石	-2.19	-12.95	116.37	90.39
S47-11(2-3/51)	95.30	支流洞巨晶方解石	-0.64	-11.73	120.15	82.04
S47-11(2-3/51)	95.40	支流洞巨晶方解石	-0.31	-10.94	121.22	76.78
S47-14(9/.14)	120.30	末梢洞巨晶方解石	-0.73	-9.46	121.09	67.28
T403-6(26/36)	82.40	厅堂洞砾间方解石	-5.16	-11.13	111.19	78.04
T417-6(25/55)	182.00	裂缝细方解石	-2.02	-11.46	117.46	80.23
S65-1	105.50	裂缝粗晶方解石	-0.82	-7.74	121.77	56.79
S65-2	107.20	裂缝粗晶方解石	-1.93	-9.57	118.58	67.97
S65-3	127.50	裂缝粗晶方解石	-1.21	-8.82	120.43	63.31
S65-5 578. 92	127.92	裂缝细晶方解石	-1.26	-6.68	121.39	50.62
T417-2	181.65	裂缝细晶方解石	-3.24	-9.76	115.80	69.17
T615-5 605. 48	84.48	裂缝细晶方解石	-3.75	-10.94	114.17	76.79
T615-5 606. 26	85.26	沉积物粒间方解石	-4.31	-12.53	112.23	87.48
S65-5 546. 4-Y	95.40	灰岩(原岩)	-1.81	-8.28	119.47	60.02
S65-5 578. 92-Y	127.92	灰岩(原岩)	-0.83	-7.26	121.98	53.97
S75-5 553. 83-Y	43.83	灰岩(原岩)	-4.42	-10.41	113.06	73.33
TK407-W-1	56.40	灰岩(原岩)	-2.35	-9.83	117.59	69.61
TK409-W-1	98.30	灰岩(原岩)	-1.24	-8.74	120.40	62.82
T416-W-1	35.40	灰岩(原岩)	-1.45	-8.42	120.13	60.87
T416-W-2	107.20	灰岩(原岩)	-1.25	-7.78	120.86	57.03

把不同产状的方解石碳、氧同位素数据投点到图 5,可以看出巨晶方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分布趋势符合热液成因特征,而溶洞充填颗粒间方解石、裂缝细晶方解石与奥陶系灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分布具有相同趋势,受大气淡水影响比较明显^[25]。

2. 2. 3 微量元素特征

笔者将所得到的微量元素数据分两部分进行讨论,一是常用微量元素比值(表 3),讨论方解石形成时的氧化-还原性;二是稀有元素组成,讨论形成方解石矿液的来源和成因(表 4)。

裂缝充填细晶方解石 U/Th 比值在 0.698~2.033 之间、V/Cr 为 1.887~3.730、V/(V + Ni)为 0.612~0.648,反映出还原环境成因。溶洞巨晶方解石样品 U/Th 比值在 0.249~1.333(平均 0.683)、V/Cr 比值为 0.022~2.506(平均 1.452)、V/(V + Ni)为 0.021~

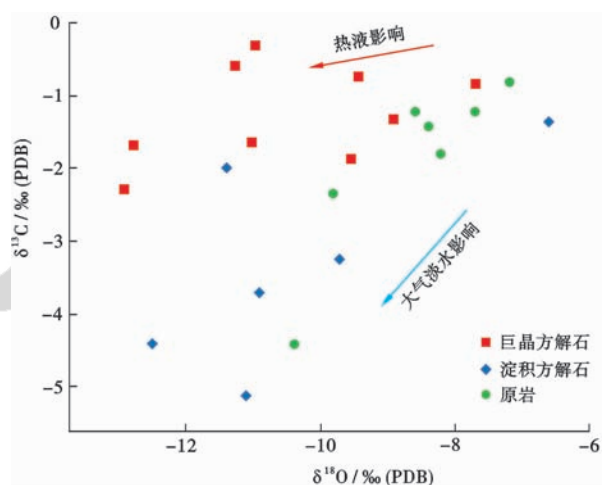


图 5 塔河四区和七区径流岩溶带方解石碳、氧同位素分布
Fig. 5 Relationship between $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of calcites from runoff zones in the No. 4 and No. 7 blocks of Tahe oilfield

0.287(均值 0.183),反映出氧化—弱氧化环境。T403 井 5 538.47 m 厅堂洞内的沉积砾石间方解石胶结物,其 U/Th 比值为 0.270、V/Cr 为 0.912、V/(V+Ni) 为 0.477,反映出方解石胶结物形成于氧化—弱氧化环境。

奥陶系灰岩样品 Sr 含量分布稳定,为 $(223\sim 253) \times 10^{-6}$; 溶洞巨晶方解石 Sr 含量变化很大,为 $(111\sim 846) \times 10^{-6}$; 而裂缝充填细晶方解石和洞内砾间方解

石 Sr 含量较低。裂缝细晶方解石和沉积砾石间充填方解石的 Ba 含量变化很大,为 $(18.23\sim 84.45) \times 10^{-6}$; 溶洞巨晶方解石 Ba 含量变化较小,为 $(3.75\sim 13.5) \times 10^{-6}$ 。裂缝细晶方解石和砾间方解石胶结物 Sr/Ba 值较低为 1.308~11.783,溶洞巨晶方解石 Sr/Ba 值整体偏高,为 45.481~81.41。这些特征显示出热液成因方解石的成矿流体盐度比淀积方解石的要高,与包裹体盐度测量结果一致。

表 3 塔河油田径流带方解石微量元素组成

Table 3 Trace element compositions of calcites in runoff zone of Tahe oilfield

样品号	产状	Sr/ 10^{-6}	Ba/ 10^{-6}	Zn/ 10^{-6}	Pb/ 10^{-6}	Sr/Ba	U/Th	V/Cr	V/V+Ni	成岩环境
S65-5 578.92	裂缝细晶方解石	215	18.230	0.001	0.466	11.783	2.033	3.730	0.648	还原
S65-5 578.92	奥陶系灰岩	223	8.667	1.647	2.149	25.741	2.700	0.097	0.267	
T615-5 605.48	裂缝细晶方解石	111	84.450	1.080	0.490	1.308	0.698	1.887	0.612	还原
T615-5 605.48	奥陶系灰岩	236	8.900	0.870	0.230	26.517	1.804	0.808	0.616	
S75-1-TF	溶洞巨晶方解石	241	3.750	2.260	0.278	64.270	0.500	2.418	0.271	氧化—弱氧化
S75-2-TF	溶洞巨晶方解石	508	6.240	0.907	0.284	81.410	0.607	2.506	0.285	氧化—弱氧化
S75-3-TF	溶洞巨晶方解石	846	10.800	—	0.286	78.330	0.725	2.261	0.287	氧化—弱氧化
S75-5 682.43	支流洞巨晶方解石	643	11.900	3.300	0.376	54.034	0.249	0.055	0.052	氧化—弱氧化
S75-5 684.37	支流洞巨晶方解石	614	13.500	0.215	0.226	45.481	1.333	0.022	0.021	氧化—弱氧化
T403-5 538.47	砾石间方解石	139	50.900	21.700	5.560	2.731	0.270	0.912	0.477	氧化—弱氧化
T403-5 486.21	奥陶系灰岩	227	50.500	2.280	3.230	4.495	1.478	0.216	0.178	

表 4 塔河四区和七区径流带方解石稀土元素特征参数

Table 4 Feature indexes of rare earth elements of calcite samples from runoff zones in the No. 4 and No. 7 blocks of Tahe oilfield

样品号	产状	$\Sigma\text{REE}/10^{-6}$	$\Sigma\text{LREE}/10^{-6}$	$\Sigma\text{HREE}/10^{-6}$	L/H	δCe	δEu	$(\text{La}/\text{Sm})_N$	$(\text{Gd}/\text{Lu})_N$
S65-5 578.92	裂缝细晶方解石	6.800	6.265	0.535	11.710	0.746	0.537	4.418	1.880
S65-5 578.92-Y	奥陶系原岩	3.657	3.265	0.392	8.329	0.657	0.456	3.039	1.467
T615-5 605.48	裂缝细晶方解石	3.984	3.675	0.309	11.893	0.828	0.736	3.458	1.868
T615-5 605.48-Y	奥陶系原岩	2.828	2.571	0.257	10.004	0.633	0.450	4.045	1.538
S75-5 682.43	支流洞巨晶方解石	15.511	13.779	1.732	7.956	0.933	0.707	2.320	32.842
S75-2-TF	溶洞巨晶方解石	1.719	1.380	0.339	4.071	0.749	0.590	1.657	2.106
S75-3-TF	溶洞巨晶方解石	2.194	1.734	0.460	3.770	0.775	0.534	1.407	1.859
T403-5 538.47	砾石间胶结方解石	149.530	136.800	12.733	10.744	1.382	0.564	2.896	17.598
T403-5 486.21-Y	奥陶系原岩	5.151	4.640	0.511	9.080	0.911	0.395	3.184	1.752

裂缝细晶方解石和沉积砾岩粒间方解石的稀土元素总量比奥陶系灰岩大,为 $(3.984\sim 6.800) \times 10^{-6}$,其中砾间方解石胶结物稀土元素含量最高达 149.53×10^{-6} ; 溶洞巨晶方解石稀土元素总含量变化范围大,为 $(1.719\sim 15.511) \times 10^{-6}$; 奥陶系灰岩稀土元素含量较低,最高为 5.151×10^{-6} (表 4)。轻稀土元素总量与重稀土元素总量比值(L/H)与稀土元素总量具有相同变化趋势。裂缝充填方解石 L/H 比值为 11.710~11.893,高于围岩的 7.126~9.080; 溶洞巨晶方解石 L/H 比值为 3.770~7.956,普遍低于围岩; 砾间方解石胶结物 L/H 值为 10.744,高于围岩。

奥陶系灰岩 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 比值为 2.546~4.045,裂缝充填细晶方解石与其相近(3.458~4.418),溶洞巨晶方解石和厅堂洞沉积砾间方解石为 1.407~2.896,比前者

低,反映轻稀土元素分馏不显著(表 4)。裂缝细晶方解石 $(\text{Gd}/\text{Lu})_N$ 比值变化小(1.868~1.880),溶洞巨晶方解石 $(\text{Gd}/\text{Lu})_N$ 变化大(1.859~32.842),沉积砾间方解石 $(\text{Gd}/\text{Lu})_N$ 比较高(17.598),均高于奥陶系灰岩,反映出方解石重稀土元素分馏相对于原岩显著(表 4)。

从稀土元素科利尔图可以看出(图 6),砾岩胶结物的方解石稀土元素含量最高,与陆相沉积一致^[26],说明径流带沉积与地表河具有相似特征。裂缝细晶方解石与奥陶系灰岩稀土元素分布非常相似,但溶洞充填的巨晶方解石有的稀土元素含量较高(如 S75 井 5682.43m 样品)、有的轻稀土含量低(如 S75-2-TF 和 S75-3-TF 样品),说明裂缝细晶方解石可能来源于奥陶系灰岩溶蚀的碳酸钙,巨晶方解石肯定不是来自周围奥陶系灰岩的溶蚀、而是热液。

包括巨晶方解石和沉积砾石间方解石胶结物在内的所有样品, δEu 为负异常(0.534~0.736, 图6), 反映了氧化—弱氧化环境; 裂缝方解石 δCe 和 δEu 均较对应原岩值高, 整体为弱还原环境。

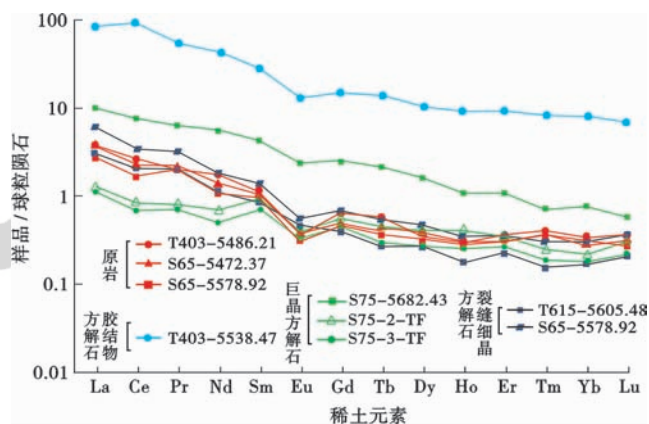


图6 塔河四区和七区径流带方解石稀土元素配分模式

Fig. 6 Distribution of rare earth elements of calcites from runoff zones in the No. 4 and No. 7 blocks of Tahe oilfield

3 径流带不同成因方解石充填过程

依据缝洞内方解石产状、岩矿和地球化学特征, 认为塔河油田奥陶系径流岩溶带方解石是岩溶期(表生)、埋藏胶结和热液作用3种不同过程形成的。

3.1 岩溶期方解石形成及充填过程

加里东中期和海西早期整个塔北隆起处于构造抬升、沉积间断的岩溶发育期, 也称表生成岩环境^[22]。此时流体是从表层岩溶带—渗流岩溶带进入到径流岩溶带的地表水, 该水一路溶蚀奥陶系灰岩, 矿化度不断增高, 会在裂缝和洞穴堆积物形成钙华或泥—细晶方解石, 因此, 这种成因方解石中流体包裹体盐度较低(或者为淡水特征)、包裹体均一温度较低、微量元素特征值表现出氧化—弱氧化特征、稀土元素总量高、碳氧同位素偏负程度大等特征。

3.2 晚海西期热液方解石充填过程

海西晚期塔里木盆地北缘岩浆活动显著^[27], 虽然研究区并未见岩浆岩, 但热液活动是存在的^[22, 28]。即深部温度较高的地层水通过断层、裂隙和岩溶缝洞向径流带侵入, 并在溶洞或溶蚀裂缝中迅速冷却、快速沉淀形成巨晶方解石或粗晶方解石。热液成因方解石晶体硕大、晶形完整、双晶发育, 单偏光下晶面粗糙, 阴极发光下较亮, 显示为黄色、桔黄色, 其中包裹体均一温度较高、流体盐度较高, 微量元素特征值反映为弱还原环境, 稀土元素总含量较低。

3.3 燕山—喜马拉雅期方解石胶结物形成过程

燕山—喜马拉雅期奥陶系进入深埋藏阶段, 地层

温度超过110℃, 此时奥陶系古岩溶径流带的洞穴及其充填物中流体活动很弱, 方解石等化学充填物形成量很少。可以见到少量方解石晶体增大、泥晶方解石重结晶形成细晶方解石, 它们在单偏光下呈等轴粒状, 阴极发光下为桔红色、桔黄色, 方解石包裹体均一温度超过100℃, 微量元素特征值反映了弱还原—还原环境, 稀土元素组成受洞穴内碎屑堆积物影响显著。

结合塔河油田奥陶系埋藏史(图4), 径流岩溶带缝洞及其堆积物方解石充填过程为: 泥盆纪以地表水溶蚀奥陶系灰岩在裂缝、洞穴壁和洞穴堆积物形成钙华和泥—细晶方解石为主, 在二叠纪—三叠纪以热液方解石充填为主, 新近纪以来塔河油田奥陶系缝洞地下水活动减弱, 方解石等化学充填基本停止。

径流岩溶带方解石产状与其成因具有良好的关系: 溶洞内巨晶方解石和溶蚀裂缝中粗晶方解石是晚海西期热液成因, 裂缝充填的细晶方解石主要是岩溶期地表水溶蚀奥陶系灰岩再淀积成因的, 少量为燕山期—喜马拉雅期胶结或重结晶形成的, 洞穴堆积物颗粒间方解石和钙华是岩溶期形成的。

热液成因方解石主要充填在溶洞和溶蚀裂缝等空间, 起着减小岩溶缝洞体积的作用。岩溶期由地表水溶蚀奥陶系灰岩再在径流带裂缝、溶洞壁和洞穴沉淀充填, 白垩纪—古近纪方解石主要在洞穴堆积物和裂缝中以胶结物形式形成, 新近纪塔河油田缝洞地下水活动减弱, 方解石等化学充填基本停止。

4 结论

塔河油田奥陶系古岩溶径流带缝洞发育, 其中约75%被沉积、垮塌角砾和化学充填物所充填, 化学充填物约占充填物的10%~20%, 化学充填物中方解石和钙华占90%以上。因此, 研究方解石和钙华的成因和分布规律, 对于岩溶缝洞储层具有重要意义。

(1) 径流岩溶带方解石产状与其成因具有良好的关系: 溶洞内巨晶方解石和溶蚀裂缝中粗晶方解石是晚海西期热液成因, 裂缝充填的细晶方解石主要是岩溶期地表水溶蚀奥陶系灰岩再淀积成因的, 少量为燕山期—喜马拉雅期胶结或重结晶形成的, 洞穴堆积物颗粒间方解石和钙华是岩溶期形成的。

(2) 热液成因方解石主要充填在溶洞和溶蚀裂缝等空间, 起着减小岩溶缝洞体积的作用。岩溶期由地表水溶蚀奥陶系灰岩再在径流带裂缝、溶洞壁和洞穴堆积物颗粒间淀积形成方解石或钙华, 主要起降低缝洞储集物性的作用, 埋藏期普通胶结作用形成的方解石也是起着减小缝洞储集体孔隙度和渗透性的作用。

致谢 本文得到中国石油化工股份有限公司副总

工程师李阳院士和康玉柱院士的指导,得到中国石油化工股份有限公司西北分公司鲁新便副总工程师的支持,在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 康玉柱. 塔里木盆地海相古生界油气勘探的进展[J]. 新疆石油地质, 2002, 23(1): 77-79.
Kang Yuzhu. Advances in oil and gas exploration in marine Paleozoic, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2002, 23(1): 77-79.
- [2] 李阳. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发理论及方法[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 115-121.
LI Yang. The theory and method for development of carbonate fractured-cavity reservoirs in Tahe oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 115-121.
- [3] 韩庆之, 曾克峰, 梁杏. 特殊的地表岩溶形态及成因探讨[J]. 中国岩溶, 1998, 17(4): 392-397.
Han Qingzhi, Zeng Kefeng, Liang Xing. Prospect to special geography and its origin[J]. China Karst, 1998, 17(4): 392-397.
- [4] 荣元帅, 赵金洲, 鲁新便, 等. 碳酸盐岩缝洞型油藏剩余油分布模式及挖潜对策[J]. 石油学报, 2014, 35(6): 1138-1146.
Rong Yuanshuai, Zhao Jinzhou, Lu Xinbian, et al. Remaining oil distribution patterns and potential-tapping countermeasures in carbonate fracture-cavity reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(6): 1138-1146.
- [5] 何治亮, 彭守涛, 张涛. 塔里木盆地塔河地区奥陶系储层形成的控制因素和复合-联合成因机制[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 743-752.
He Zhiliang, Peng Shoutao, Zhang Tao. Controlling factors and genetic pattern of the Ordovician reservoirs in the Tahe area, Tarim Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2010, 31(6): 743-752.
- [6] 金强, 田飞. 塔河油田岩溶型碳酸盐岩缝洞结构研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(5): 15-21.
Jin Qiang, and Tian Fei. A study on constructions of fracture-cave in karst carbonates in Tahe Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2013, 37(5): 15-21.
- [7] 鲁新便, 蔡忠贤. 缝洞型碳酸盐岩油藏古溶洞系统与油气开发——以塔河碳酸盐岩溶洞型油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 22-27.
Lu Xinbian, Cai Zhongxian. A study of the paleo-cavern system in fractured-vuggy carbonate reservoirs and oil/gas development: taking the reservoirs in Tahe oilfield as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 22-27.
- [8] 鲁新便, 何成江, 邓光校, 等. 塔河油田奥陶系油藏喀斯特古河道发育特征描述[J]. 石油实验地质, 2014, 36(3): 268-274.
LU Xinbian, He Chengjiang, Deng Guangxiao, et al. Development features of karst ancient river system in Ordovician reservoirs, Tahe Oil Field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(3): 268-274.
- [9] 杨柳, 李忠, 吕修祥, 等. 塔中地区鹰山组岩溶储层表征与古地貌识别——基于电成像测井的解析[J]. 石油学报, 2014, 35(2): 265-275, 293.
Yang Liu, Li Zhong, Lü Xiuxiang, et al. Paleotopographic characterization and reconstruction of karst reservoirs in Yingshan Formation, Tazhong area, Tarim Basin: a research based on borehole image log interpretation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(2): 265-275, 293.
- [10] 钟建华, 毛毳, 李勇, 等. 塔北硫磺沟奥陶系含油古溶洞的发现及意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(11): 1660-1680.
Zhong Jianhua, Mao Cui, Li Yong, et al. Discovery of the ancient Ordovician oil-bearing karst cave in Liuhuanggou, North Tarim Basin, and its significance [J]. Science China: Earth Sciences, 2012, 55(9): 1406-1426.
- [11] 康玉柱, 康志宏. 塔河大油田勘探实践与技术创新[M]. 北京: 中国石化出版社, 2009.
Kang Yuzhu, Kang Zhihong. Exploration practice in Tahe huge oilfield and technical innovation [M]. Beijing: Sinopec Publish House, 2009.
- [12] 李阳. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶洞型储集体识别及定量表征[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2012, 36(1): 1-7.
Li Yang. Identification on reservoir bodies in Ordovician karst carbonates in Tahe Oilfield[J]. Journal of China University: Edition of Natural Science, 2012, 36(1): 1-7.
- [13] 黄成毅, 邹胜章, 潘文庆, 等. 古潮湿环境下碳酸盐岩缝洞型油气藏结构模式——以塔里木盆地奥陶系为例[J]. 中国岩溶, 2006, 25(3): 250-255.
Huang Chengyi, Zou Shengzhang, Pan Wenqing, et al. Fracture-cave structures in karst reservoirs formed in paleo-humic weather, a case study of Ordovician in Tarim Basin[J]. China Karst, 2006, 25(3): 250-255.
- [14] 夏日元, 唐建生, 邹胜章, 等. 碳酸盐岩油气田古岩溶研究及其在油气勘探开发中的应用[J]. 地球学报, 2010, 27(5): 503-509.
Xia Riyuan, Tang Jiansheng, Zou Shengzhang, et al. Palaeo-karst research of the carbonate oil-gas field and its application to oil-gas exploration and development[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2010, 27(5): 503-509.
- [15] Loucks RG, Mescher PK, and McMechan GA. Three-dimensional architecture of a coalesced, collapsed-paleocave system in the Lower Ordovician Ellenburger Group, central Texas[J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(4): 545-564.
- [16] Ford DC. Paleokarst as a target for modern karstification[J]. Carbonates and Evaporites, 1995, 10(2): 138-147.
- [17] Palmer AN. Deep-seated geochemical environments in karst: An introduction[J]. Environmental Geology, 1995, 25(1): 1-11.
- [18] Loucks RG. Paleocave carbonate reservoirs: origins, burial modifications, spatial complexity, and reservoir implication [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(11): 1795-1834.
- [19] 国家能源局. SY/T 6010-2011 沉积盆地流体包裹体显微测温方法[S]. 中华人民共和国石油天然气行业规范, 北京: 石油工业出版社, 2011.
Bureau of National Energy. SY/T 6010-2011 Test method for fluid inclusion in sedimentary basins by microthermometry[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.

- 式及挖潜对策[J]. 石油学报, 2014, 35(6): 1138-1146.
Rong Yuanshuai, Zhao Jinzhou, Lu Xinbian, et al. Remaining oil distribution patterns and potential-tapping countermeasures in carbonate fracture-cavity reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(6): 1138-1146.
- [6] Audebert F, Nichols D, Rekdal T, et al. Imaging complex geologic structure with single-arrival Kirchhoff prestack depth migration [J]. Geophysics, 1992, 40(10): 1533-1543.
- [7] Gray S H, May W P. Kirchhoff migration using eikonal equation traveltimes [J]. Geophysics, 1994, 59(5): 810-817.
- [8] 张宇. 振幅保真的单程波方程偏移理论[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1410-1430.
Zhang Yu. The theory of true amplitude one-way wave equation migration [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1410-1430.
- [9] Baysal E, Kosloff D D, Sherwood J W C. Reverse time migration [J]. Geophysics, 1983, 48(11): 1514-1542.
- [10] Symes W W. Reverse time migration with optimal checkpointing [J]. Geophysics, 2007, 72(5): 213-221.
- [11] Zhang Y, Sun J, Gray S. Reverse-time migration: amplitude and implementation issues [R]. SEG 2007-2145, 2007.
- [12] 黄超, 董良国. 可变网格与局部时间步长的高阶差分地震波数值模拟[J]. 地球物理学报, 2009, 52(1): 176-186.
Huang Chao, Dong Lianguo. High-order finite-difference method in seismic wave simulation with variable grids and local time-steps [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(1): 176-186.
- [13] Berenger J-P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves [J]. Journal of Computational Physics, 1994, 114(2): 185-200.
- [14] 王守东. 声波方程完全匹配层吸收边界 [J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(1): 31-34.
Wang Shoudong. Absorbing boundary condition for acoustic wave equation by perfectly matched layer [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2003, 38(1): 31-34.
- [15] 赵茂强, 吴国忱. 基于高阶有限差分纵横波分解的弹性波数值模拟[J]. 物探化探计算技术, 2010, 32(5): 487-494.
Zhao Maoqiang, Wu Guochen. High order finite difference numerical simulation of elastic wave with separated P waves and S waves [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 32(5): 487-494.

(收稿日期 2014-12-17 改回日期 2015-05-04 编辑 宋宁)

(上接第 798 页)

- [20] 李冰, 杨红霞, 刘崑. GB/T 14506. 30-2010 硅酸盐岩石化学分析方法 第 30 部分: 44 个元素量测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
Li Bing, Yang Hongxia, Liu Wei. GB/T 14506. 30-2010 Methods for chemical analysis of silicate rocks—Part 30: Determination of 44 elements [S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2010.
- [21] 李志生, 李祥臣, 马成华, 等. SY/T 5238-2008 有机物和碳酸盐岩碳、氧同位素分析方法 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
Li Zhisheng, Li Xiangchen, Ma Chenghua, et al. SY/T 5238-2008 Analysis method for carbon and oxygen isotope of organic matter and carbonate [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [22] 蔡春芳, 李开开, 李斌, 等. 塔河地区奥陶系碳酸盐岩缝洞充填物的地球化学特征及其形成流体分析 [J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2399-2404.
Cai Chunfang, Li Kaikai, Li Bin, et al. Geochemistry of fillings in fracture-cave of Ordovician karst in Tahe area and their forming fluids [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(10): 2399-2404.
- [23] Keith M L, Weber J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestone and fossils [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1964, 28(10/11): 1787-1816.
- [24] 刘存革, 李国蓉, 朱传玲, 等. 塔河油田中下奥陶统岩溶缝洞方解石碳、氧、锶同位素地球化学特征 [J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2008, 33(3): 377-385.
Liu Cunge, Li Guorong, Zhu Chuanling, et al. Geochemistry characteristics of carbon, oxygen and strontium isotopes of calcites filled in karstic fissure-cave in lower-middle Ordovician of Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2008, 33(3): 377-385.
- [25] Irwin H, Curtis C, Coleman M. Isotopic evidence for source of diagenetic carbonates formed during burial of organic-rich sediments [J]. Nature, 1977, 269(5625): 209-213.
- [26] 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. Re geochemistry of karst sediments in Guizhou Province [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1994, 14(3): 298-308.
- [27] 崔欢, 关平, 简星. 塔北西部岩浆热液-地层水流体系统及碳酸盐岩储层的成岩作用响应 [J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2012, 48(3): 433-443.
Cui Huan, Guan Ping, Jian Xing. Magmatic hydrothermal fluids-formation water compound system and diagenetic response of carbonate reservoir rocks in northern Tarim Basin [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48(3): 433-443.
- [28] 李朋, 任建业, 阳怀忠, 等. 巴楚地区断裂带内热液流体活动及对碳酸盐岩改造的特征分析 [J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(3): 378-385.
Li Peng, Ren Jianye, Yang Huaizhong, et al. Hydrothermal activities in the fault system and their effects on carbonate rocks in the Bachu area [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2011, 35(3): 378-385.

(收稿日期 2014-12-03 改回日期 2015-04-16 责任编辑 张怡)