

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.247>



# 塔里木盆地玉北地区奥陶系成岩流体演化与油气成藏时期的耦合关系

尚培<sup>1</sup>, 陈红汉<sup>1\*</sup>, 鲁子野<sup>1</sup>, 丰勇<sup>2</sup>, 云露<sup>3</sup>

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 432100

3. 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830011

**摘要:** 尽管流体包裹体均一温度—埋藏史投影法已被广泛地应用于油气成藏时期确定, 但对于多旋回叠合盆地仍存在不确定性, 即同一个均一温度可对应两个或者两个以上埋藏深度。为减少这种多解性, 对研究区 63 件样品进行了岩石学观察、碳氧同位素测试和流体包裹体系统分析测试, 运用成岩序列约束及流体包裹体均一温度和捕获压力双参数来约束确定油气成藏年龄。在确定油包裹体及其同期盐水包裹体的均一温度、油包裹体的气泡填充度和包裹体油组分基础之上, 利用 PVTsim 热动力学模拟软件恢复油包裹体最小捕获压力。将油包裹体捕获压力和其同期盐水包裹体均一温度投影到埋藏史图上求取油气充注年龄, 再把充注年龄标注在同一时间轴上进行油气成藏期次划分和成藏时期确定。结果表明, 塔里木盆地玉北地区奥陶系存在 3 期油充注: 第一期发生在加里东晚期 447.1~444.0 Ma; 第二期发生在海西晚期 295.0~274.7 Ma; 第三期发生在喜山期 14.7~8.8 Ma。第一期和第二期充注的油气在构造“跷跷板”运动过程中发生了破坏或调整, 第三期充注油气才可能是勘探的现实目标。

**关键词:** 流体包裹体; 均一温度; 捕获压力; 成岩序列; 成藏年龄; 塔里木盆地; 油气地质。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2020)02-569-14

收稿日期: 2018-11-22

## The Coupling Relationship between Diagenetic Fluid Evolution and Hydrocarbon Accumulation in the Ordovician of Yubei Area, Tarim Basin

Shang Pei<sup>1</sup>, Chen Honghan<sup>1\*</sup>, Lu Ziyi<sup>1</sup>, Feng Yong<sup>2</sup>, Yun Lu<sup>3</sup>

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 432100, China

3. The Northwest Oil Company, SINOPEC, Urumqi 830011, China

**Abstract:** Although the method of homogenization temperature (Th) of fluid inclusion projecting on burial history diagram with thermal curve to obtain hydrocarbon charging times has been widely and effectively used, some uncertainty arises on the multi-cycle superimposed basins, in which one Th can appear at two or more than two depths. For the purpose of reducing the multiple solutions, 63 samples of the Ordovician in Yubei area have been employed to make diagenetic observation, carbon and oxygen isotope analyses, and fluid inclusions analyses. Diagenetic sequence and two parameters of Th and trapping pressure (P<sub>t</sub>) have been utilized to doubly constrain the times of hydrocarbon charging. When the Th of oil inclusion and its coeval aqueous inclusion, gas to liquid ratio of oil inclusion and chemical components of oil inclusion are obtained, the trapping pressure of the oil inclusion can be

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划课题(No. 2012CB214804); 国家“十二五”重大科技专项(No. 2008ZX05008-003-30)。

**作者简介:** 尚培(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事油气成藏过程研究。ORCID: 0000-0001-5947-9640. E-mail: shangpei@hotmail.com

\* **通讯作者:** 陈红汉, ORCID: 0000-0001-6968-412X. E-mail: hhchen@cug.edu.cn

**引用格式:** 尚培, 陈红汉, 鲁子野, 等, 2020. 塔里木盆地玉北地区奥陶系成岩流体演化与油气成藏时期的耦合关系. 地球科学, 45(2):569-582.

thermodynamically modeled by the software PVTsim. After the  $P_i$  of oil inclusion and the Th of its coeval aqueous inclusion were projected doubly on burial history diagram for each well, the hydrocarbon charging time would be determined. Then, we put all the charging times on the same geological age axis, three events of hydrocarbon charging occurred in the Ordovician of Yubei area, Tarim basin: the first event took place from 447.1 Ma to 444.0 Ma (during the Late Caledonian); the secondary event from 295.0 Ma to 274.7 Ma (during the Late Hercynian); the tertiary event from 14.7 Ma to 8.8 Ma (during the Late Himalaya). The oil pools charged by the first and the secondary event were destroyed or adjusted in the process of tectonic movement, and the oil pools charged by the tertiary event maybe the favorable exploration target.

**Key words:** fluid inclusion; homogenization temperature; trapping pressure; diagenetic sequence; chronology of hydrocarbon accumulation; Tarim basin; oil-gas geology.

## 0 引言

成岩矿物捕获的流体包裹体保存了古流体的温度、压力及流体组分等信息 (Goldstein and Reynolds, 1994; 刘德汉等, 2007), 而被广泛地应用于油气运移路径追踪、油气充注压力恢复、油气成藏期次划分和油气成藏确定 (Aplin *et al.*, 1999; 刘斌和沈昆, 1999; Thiéry *et al.*, 2002; Munz *et al.*, 2004; Pironon *et al.*, 2004; Bourdet *et al.*, 2010; Ferket *et al.*, 2011). 然而, 对于多旋回叠合盆地, 由于地层经历多次抬升—沉降, 在应用均一温度—埋藏史投影法求取油气充注年龄时, 会出现同一个均一温度对应多个油气充注年龄的现象, 从而造成运用流体包裹体均一温度划分油气成藏期次和确定油气充注年龄的多解性和不确定性. 为此, 本文在储层成岩作用和成岩序次研究的基础上, 利用流体包裹体均一温度 (陈红汉等, 2002; 鲁子野等, 2016) 及其捕获压力 (平宏伟等, 2013a, 2013b) 双重约束, 来划分塔里木盆地玉北地区奥陶系油气成藏期次, 并确定其成藏年龄, 进而探讨成岩流体演化与油气成藏的耦合关系, 旨在为多构造旋回盆地复杂的油气成藏过程研究提供一种新的途径.

## 1 地质背景

玉北地区位于塔里木盆地麦盖提斜坡东南段, 北部为玛扎塔格构造带, 南邻叶城凹陷与和田凹陷, 东接塘古巴斯凹陷 (邱华标等, 2013; 斯尚华等, 2013). 麦盖提斜坡现今为一个西倾的大型斜坡带, 但在加里东期—海西期却是向 NE 向倾斜的, 西南为和田古隆起. 加里东早期, 和田古隆起雏形形成; 加里东中期—海西早期的持续隆升造成上奥陶系/志留系/泥盆系等沉积间断和地层剥蚀; 海西中晚期的沉降埋藏和印支—喜山期, 和田古隆起向西

掀斜而消失 (丁文龙等, 2012). 玉北地区奥陶系仅残留中一下奥陶鹰山组和蓬莱坝组, 鹰山组岩性主要为泥晶灰岩和亮晶胶结颗粒灰岩 (图 1), 蓬莱坝组岩性主要为白云岩.

玉北地区经历了多期构造运动和近地表岩溶作用. 加里东中期 ( $\epsilon_3$ - $O_{1-2}$ ), 巴楚—麦盖提地区为稳定的碳酸盐台地, 加里东中期 I 和 III 幕, 巴楚—麦盖提地区整体抬升, 中一下奥陶统暴露地表遭受剥蚀, 缺失一间房组, 下部地层遭受近地表岩溶作用; 加里东晚期—海西早期, 玉北地区持续隆升, 整体缺失志留系和泥盆系, 奥陶系再度遭受强烈的剥蚀以及多期裂隙—大气淡水共同影响下的溶蚀作用; 海西中期—海西晚期, 巴楚隆起雏形形成, 整体格局为北高南低; 印支期—喜山期, 巴楚隆起大规模整体隆升, 中生代地层缺失, 麦盖提地区挠曲沉降, 接受新生代沉积并最终定型 (游声刚, 2013; 钱一雄等, 2014; 郭春涛等, 2017). 玉北地区东部褶皱区在上寒武统一奥陶系主要发育 NE 向盖层滑脱型逆冲推覆断裂系统, 断裂系统在加里东中晚期活动强、幅度大并在海西晚期受到近 SN 向挤压应力影响, 在玉北 1 断裂带形成 2 期断裂叠加区, 为油气运移提供了重要的通道 (杜永明等, 2013; 李培军等, 2017) (图 1).

## 2 研究方法及设备

本研究观察了玉北地区 11 口井岩心, 并采集了奥陶系流体包裹体系统分析样品 63 块. 单偏光观察和阴极发光观察在中国地质大学 (武汉) “构造与油气资源” 教育部重点实验室完成. 阴极发光仪为 RELIOTRON III, 工作电流为 300~500  $\mu\text{A}$ , 工作电压为 5~8 kV. 油包裹体荧光观察是利用 Nikon Eclipse 80I 显微镜和 Maya 2000 Pro 显微荧光光谱分析仪进行光谱学分析, 流体包裹体显微测温是利

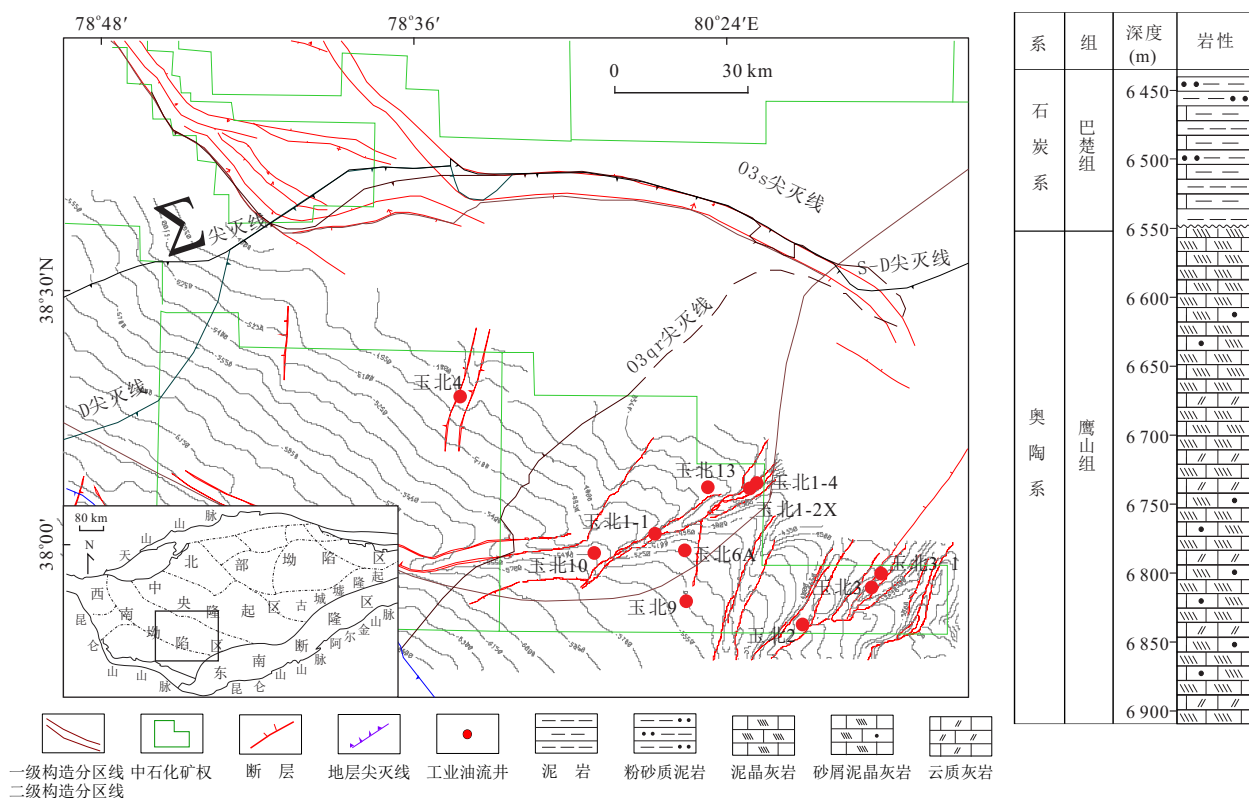


图 1 塔里木盆地玉北地区 T74 构造图及 YB9 井岩性柱状图

Fig.1 The structural map of T74 showing the sampling well locations in Yubei area Tarim Basin and the lithological column of the Ordovician in well YB9

用 Nikon Eclipse 80I 显微镜,另配 100 倍 8 mm 长焦工作镜头和 Linkam 公司产 THMS 600G 冷热台,分析精度  $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 油包裹体气泡填充度测定是利用 Leica 公司生产的 TCS-SPE 扫描激光/荧光共聚焦显微镜,激发光波长为 405 nm. 运用软件 Leica MM AF 对选定的油包裹体从顶端至底端进行系列切片扫描,并对系列切片进行 3D 模型重建以计算油包裹体体积. 气泡体积的计算是利用等效球体法进行计算 (Salim *et al.*, 2008; 王存武等, 2008). 油包裹体组分预测是根据油包裹体的组分与均一温度及其气泡填充度的函数关系推算而来 (平宏伟和陈红汉, 2014). 在获取油包裹体气泡填充度、均一温度和组分以及同期盐水包裹体均一温度等参数后,运用 PVTsim 软件模拟即可获取油包裹体最小捕获压力.

对碳酸盐岩而言,氧和碳是最为丰富和常用的稳定同位素,同样品的碳氧同位素组分的投点图可以用于确定样品之间同位素组分的关系和趋势,并有助于判断形成矿物的成岩流体类型. 大气淡水中  $\delta^{18}\text{O}$ (SMOW) 值相对较低,但由于受到纬度和海

拔高度的影响,氧同位素组分显示出较宽的变化范围 (Dickson, 1990), 总体上,从大气淡水中沉淀的方解石表现出较低的  $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB) 值 (尹观和倪师军, 2009); 埋藏成岩流体 (地层水和热液) 的氧同位素组分同样具有较宽的变化范围. 由于矿物的  $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB) 受到温度、成岩流体的  $\delta^{18}\text{O}$ (SMOW) 和矿物-流体分馏方程控制,埋藏环境下即使从高氧同位素组分的流体中沉淀的方解石,其  $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB) 值也可能相对较低 (一般情况下,埋藏环境温度高于大气淡水环境),以至于和大气淡水环境中形成的方解石的  $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB) 值重叠 (Moore and Wade, 2013). 因此对于方解石胶结物的氧同位素组分作出解释之前,需要有独立的证据证明其形成温度,例如流体包裹体方法 (下文详述). 海水的氧同位素值变化范围通常为千分之几,均值为 0, 实际研究中,通常选择不受成岩流体影响的泥晶灰岩进行碳氧同位素测试,作为相近的深度上仅受正常埋藏温度和海水氧同位素组分影响的背景值.

### 3 样品分析

#### 3.1 成岩作用类型

前人对玉北地区奥陶系碳酸盐岩储集体类型及特征进行了较为详细的研究,认为玉北地区岩溶作用主要受控于加里东期和海西期构造活动和地层剥蚀(吕海涛等, 2010; 张仲培等, 2011; 刘忠宝等, 2013). 本研究通过对玉北地区奥陶系采集样品的岩心和薄片观察,对样品中的胶结物和多期裂缝进行了成岩序次的厘定. 结果表明,在准同生期,溶蚀作用具有明显的组构选择性,生物介壳被溶蚀,形成早期溶孔和溶洞且被方解石充填(图 2b). 中浅

埋藏阶段沿着缝合线发生埋藏白云石化,缝合线有明显的扩溶现象且被沥青半充填,缝合线扩溶形成的晚期溶孔内充填的方解石阴极光呈橘黄色(图 2c, 2c'). 晚期溶孔充填方解石常见 2 个世代,溶孔边缘残留被溶蚀的白云石(图 2e). 正交偏光和阴极光观察表明,该地区至少发育两组以上裂缝(图 2a),早期方解石脉被晚期方解石脉切割. 早期方解石脉发暗紫色阴极光,并且含有沥青和零星分布且遭溶蚀的白云石(图 2d, 2d'). 晚期方解石脉发橘黄色阴极光,也含有沥青,并切割早期方解石脉(图 2f, 2f').

#### 3.2 碳氧同位素分析

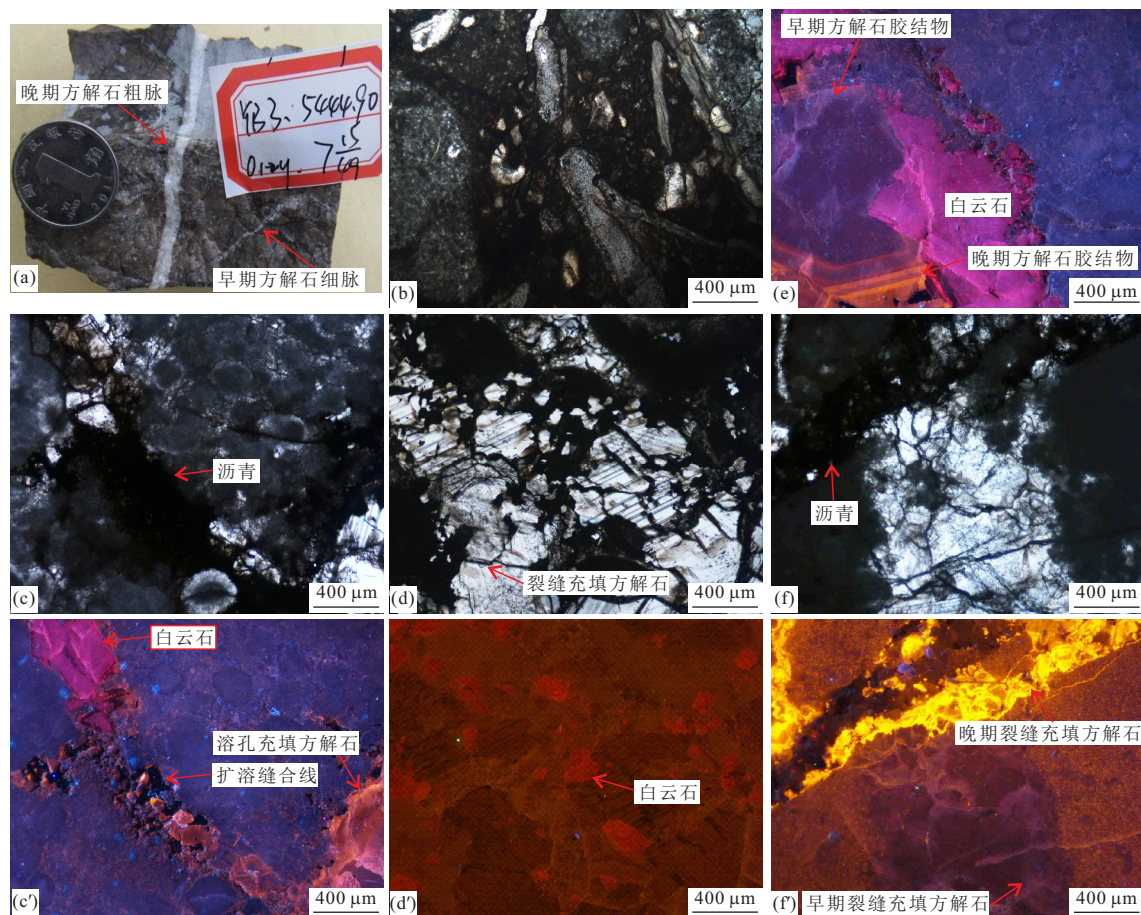


图 2 玉北地区奥陶系岩心及薄片裂缝、溶孔、溶洞充填方解石和白云石胶结物成岩作用显微照片

Fig.2 Micrographs of the Ordovician cores and thin sections showing the sequences of calcite and dolomite cement filling in fractures, pores and vugs in Yubei area

a. YB3 井, 5 444.90 m,  $O_{1-2}y$ , 泥晶灰岩中发育两组裂缝, 早期方解石细脉含有沥青, 晚期裂缝充填方解石较粗, 岩心照片; b. YB9 井, 6 561.70 m,  $O_{1-2}y$ , 泥晶灰岩中溶孔充填方解石, 被充填的溶孔具有明显的组构选择性 (b 为单偏光照片); c, c'. YB9 井, 6 883.25 m,  $O_{1-2}y$ , 颗粒灰岩中沿扩溶缝合线发育的白云石呈红色阴极光, 溶孔充填方解石呈橘色阴极光. 缝合线内充填有沥青 (c 为单偏光照片, c' 为同视域阴极光照片); d, d'. YB4 井, 5 843.13 m,  $O_{1-2}y$ , 亮晶胶结鲕粒灰岩中裂缝充填方解石呈暗色阴极光, 并分布有白云石呈红色阴极光和沥青 (d 为单偏光照片, d' 为同视域阴极光照片); e, e'. YB9 井, 6 883.25 m,  $O_{1-2}y$ , 颗粒灰岩中溶孔充填白云石和方解石, 其中白云石呈红色阴极光被溶蚀, 方解石至少存在两个世代, 早期方解石胶结物呈暗色阴极光, 晚期方解石胶结物呈橘黄色阴极光 (e 为阴极光照片); f, f'. YB1-1 井, 5 984.50 m,  $O_{1-2}y$ , 泥晶灰岩中发育两组裂缝, 早期裂缝充填方解石呈暗色阴极光, 晚期裂缝充填方解石呈橘黄色阴极光, 且含有沥青 (f 为单偏光照片, f' 为同视域阴极光照片).

表1 玉北地区奥陶系方解石胶结物  $\delta^{13}\text{C}$  -  $\delta^{18}\text{O}$  数据表Table 1 Data of the  $\delta^{13}\text{C}$  -  $\delta^{18}\text{O}$  of calcite cement in the Ordovician of Yubei area

井号	采样类型	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}(\text{‰})$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}(\text{‰})$ 均值	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}(\text{‰})$ 均值
YB3	裂缝充填方解石	-1.26~-2.70	-2.16	-7.71~-8.99	-8.22
YB9	泥晶灰岩	0.60		-5.05	
YB9	溶孔充填方解石	-0.89~-1.60	-1.18	-8.31~-9.80	-8.97
YB9	溶洞充填方解石	0.03~-1.54	-0.76	-7.77~-8.36	-8.06
YB10	溶孔充填方解石	-0.93~-1.49	-1.21	-4.70~-5.60	-5.15

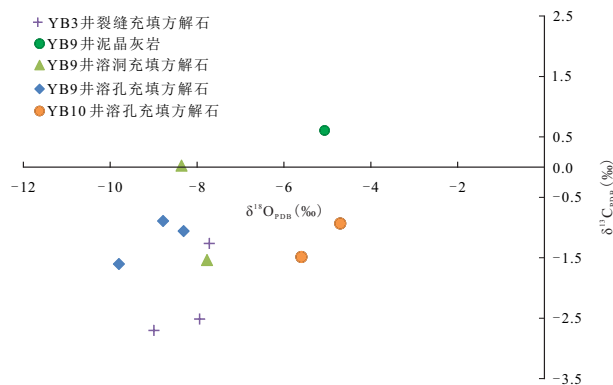
表2 玉北地区奥陶系流体包裹体平均均一温度数据表

Table 2 Data of averaged homogenization temperature of fluid inclusions in the Ordovician of Yubei area

层位	产状	油包裹体 荧光颜色	油包裹体平均均一温度( $^{\circ}\text{C}$ )	同期盐水包裹体平 均均一温度( $^{\circ}\text{C}$ )	充注幕次
O <sub>1-2y</sub>	粒间方解石胶结物	黄绿色	55.1~61.5	—	第一幕
		蓝绿色	50.6~64.0	69.5~71.3	
	溶孔充填方解石	黄色	50.2~60.2	65.4~71.2	第二幕
		黄绿色	49.1~64.5	63.9~78.5	
	溶孔充填方解石	—	—	78.7~99.2	第二幕
	粒间方解石胶结物	黄绿色	63.8~88.4	95.8~118.2	第三幕
	溶孔充填方解石	黄色	59.6~85.9	92.2~112.7	
		黄绿色	68.2~85.3	101.7~117.6	
	裂缝充填方解石	黄绿色	55.2~58.5	105.8~113.2	第四幕
	粒间方解石胶结物	黄绿色	106.6~107.4	120.3~126.7	
溶孔充填方解石	黄绿色	88.4~90.5	118.2~132.1		
裂缝充填方解石	黄绿色	72.8~85.1	118.4~125.7		
溶孔充填方解石	黄绿色	102.7~104.6	135.8~146.4	第五幕	

在成岩观察的基础上,本文对上述成岩矿物(包括溶孔充填方解石、溶洞充填方解石和裂缝充填方解石)和围岩进行了微区取样,并做碳氧同位素测试,结果如表1,图3所示

YB9井泥晶灰岩碳氧同位素特征与同期海水同位素接近,可视为背景值. YB10井溶孔充填方解石  $\delta^{18}\text{O}$  分布范围与泥晶灰岩背景值相近,可认为是早期溶蚀孔洞(同生期岩溶)的方解石胶结物,其  $\delta^{13}\text{C}$  主要受原岩影响与围岩相似. YB9井溶孔洞充填的方解石胶结物  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  分布范围变化较大,明显是受到大气淡水影响,推测其为加里东晚期—海西早期岩溶形成. 与背景值相比, YB3井裂缝充填方解石的  $\delta^{13}\text{C}$  较为偏负,可能是受到有机质氧化来源的  $^{13}\text{C}$  影响,其  $\delta^{18}\text{O}$  分布特点显示方解石胶结物受到大气淡水影响,推测该期次裂缝充填方解石胶结物为印支—燕山地层抬升,大气淡水沿深大断裂至此,同时部分油气藏遭到破坏后的产物. 即玉北地区奥陶系流体演化过程为同生海水(以 YB9井泥晶灰岩为代表)随埋藏加深演化为埋藏卤水(以

图3 玉北地区奥陶系方解石胶结物  $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$  关系图Fig.3 The  $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$  plot of calcite cement in the Ordovician of Yubei area

沿缝合线发育的白云石为代表),而后受构造抬升控制成岩流体遭受大气淡水影响(以 YB9井孔洞充填方解石胶结物为代表),随着地层再次埋藏和再次抬升成岩流体受到埋藏卤水、大气淡水和有机质影响(以 YB3井裂缝充填方解石胶结物为代表).

### 3.3 流体包裹体系统分析

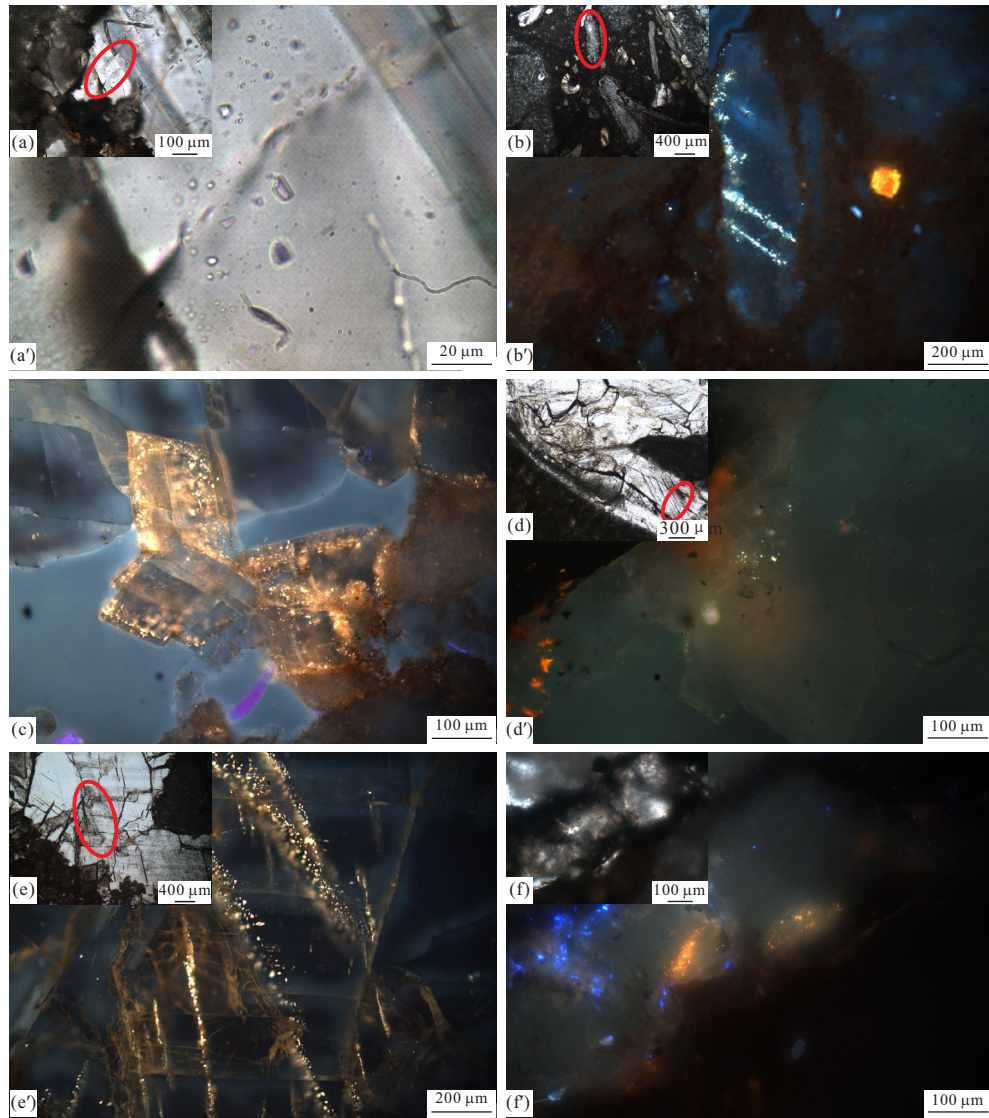


图4 玉北地区奥陶系油包裹体显微荧光照片

Fig.4 Fluorescent micrographs of oil inclusions in the Ordovician of Yubei area

a, a'. YB9井, 6 846.90 m,  $O_{1-2y}$ , 泥晶灰岩溶孔充填方解石中检测到单一液相盐水包裹体(a, a'均为单偏光照片); b, b'. YB9井, 6 561.70 m,  $O_{1-2y}$ , 泥晶灰岩溶孔充填方解石中检测到次生蓝绿色荧光油包裹体(b为单偏光照片, b'为荧光照片); c. YB9井, 6 561.70 m,  $O_{1-2y}$ , 泥晶灰岩溶孔边缘白云石中检测到原生黄绿色荧光油包裹体(c为荧光照片); d, d'. YB3井, 5 444.90 m,  $O_{1-2y}$ , 早期裂缝中检测到原生黄绿色荧光油包裹体(d为单偏光照片, d'为荧光照片); e, e'. YB9井, 6 847.20 m,  $O_{1-2y}$ , 泥晶灰岩溶孔充填方解石中检测到次生黄绿色荧光油包裹体(e为单偏光照片, e'为荧光照片); f, f'. YB1-1井, 5 984.50 m,  $O_{1-2y}$ , 泥晶灰岩晚期裂缝中检测到原生黄色荧光油包裹体, 并含有沥青(f为单偏光照片, f'为荧光照片)

#### (1) 油包裹体产状

镜下荧光观察表明, 早期溶孔充填方解石中检测到单一液相原生盐水包裹体(图4a, 4a'); 生物介壳内充填方解石裂缝中检测到一幕次生蓝绿色荧光油包裹体(图4b, 4b'); 晚期溶孔边缘发育有白云石且沿白云石的生长环带检测到原生黄绿色荧光油包裹体(图4c, 4c'); 晚期溶孔充填方解石中检测到次生黄绿色油包裹体(图4e, 4e'). 早期裂缝充填方解石中检测到原生黄绿色荧光油包裹体(图4d,

4d'), 晚期裂缝充填方解石中检测到原生黄色荧光油包裹体, 且晚期裂缝中含有沥青(图4f, 4f').

#### (2) 单个油包裹体光谱学特征

油包裹体的荧光特征参数包括油包裹体的荧光颜色、主峰波长( $\lambda_{max}$ )和 $QF_{535}$ 。随着荧光颜色蓝移, 表示包裹体油成熟度不断增加。包裹体油的成熟度与主峰波长( $\lambda_{max}$ )和 $QF_{535}$ 呈负相关关系(陈红汉, 2014)。

玉北地区奥陶系单个油包裹体显微荧光光谱

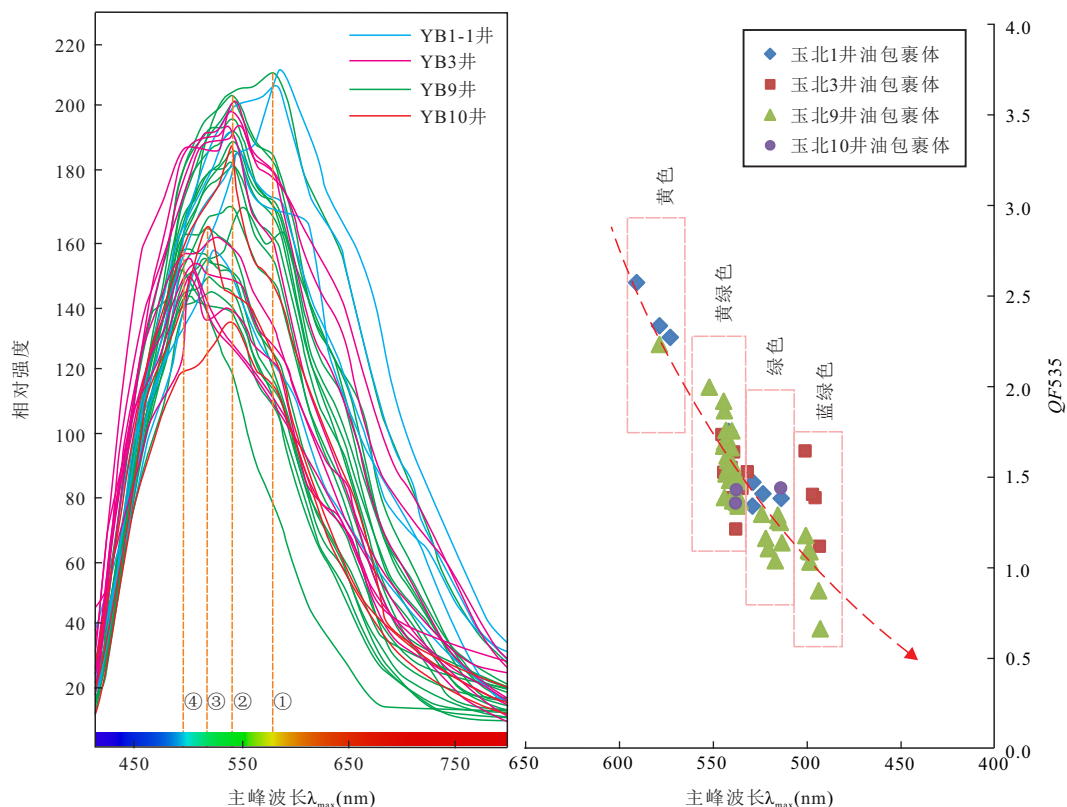


图5 玉北地区奥陶系单个油包裹体显微荧光光谱及 $QF_{535} \sim \lambda_{max}$ 关系图

Fig.5 Fluorescent spectrums and Plot of relationship between  $QF_{535}$  and  $\lambda_{max}$  of individual oil inclusions in the Ordovician of Yubei area

分析结果表明,发育4种不同荧光颜色的油包裹体:黄色、黄绿色、绿色和蓝绿色,分别代表了不同成熟度的油,对应于4幕油充注(图5)。

### (3) 流体包裹体显微测温

玉北地区奥陶系63块样品油包裹体及其同期盐水包裹体显微测温统计分析结果(表2、图6)表明,颗粒灰岩方解石胶结物中检测到3幕油包裹体平均均一温度:50.6~64.0 °C、63.9~88.4 °C和106.6~107.4 °C。与油包裹体同生的3幕盐水包裹体平均均一温度:69.5~71.3 °C、95.8~118.2 °C和120.3~126.7 °C。

溶孔充填方解石中检测到4幕油包裹体平均均一温度:49.1~64.5 °C、59.6~85.9 °C、88.4~90.5 °C和102.7~104.6 °C。与油包裹体同生的4幕盐水包裹体均一温度:63.9~78.5 °C、92.2~117.6 °C、118.2~132.1 °C和135.8~146.4 °C。

裂缝充填方解石中检测到2幕油包裹体平均均一温度:55.2~58.5 °C和72.8~85.1 °C。与油包裹体同生2幕盐水包裹体平均均一温度:105.8~113.2 °C和118.4~125.7 °C。

## 4 流体包裹体PVT<sub>x</sub>模拟

本研究挑选了单个油包裹体直径大于2 μm气液两相、且能够进行油包裹体气泡填充度测定的17组油包裹体和同期盐水包裹体“数据对”进行最小捕获压力恢复。

首先借助Leica激光/荧光扫描共聚焦显微镜,对不同宿主矿物以及不同荧光颜色的油包裹体,进行油包裹体的3D模型重建(图7),以获取单个油包裹体体积参数。其次,将油包裹体气相空间形态近似为球体进行气体体积计算,使得在单偏光下测量油包裹体气泡直径的误差达到最小(Salim *et al.*, 2008; 王存武等, 2008)。获得的结果列于表3。

单个油包裹体组分是根据油包裹体的均一温度( $Th_{oil}$ )及其室温下的气泡填充度( $F_v$ )之间的函数关系推算出来的(平宏伟和陈红汉, 2014)。由此获得玉北地区奥陶系黄色—黄绿色油包裹体 $C_1$ 组分含量范围为2.35%~44.56%, $C_{7+}$ 组分含量范围为27.34%~92.82%;蓝绿色油包裹体其 $C_1$ 组分含量为12.54%~16.82%, $C_{7+}$ 组分含量范围为58.26%~63.36%(表3)。

表 3 玉北地区奥陶系油包裹体组分预测

Table 3 Component prediction of oil inclusion in the Ordovician of Yubei area

井号	深度 (m)	荧光 颜色	$\lambda_{\max}$ (nm)	$QF_{535}$	油包裹体 均一温度 (°C)	同期盐水包 裹体均一温 度(°C)	气泡填充度 (%)	$C_1$ (%)	$C_{7+}$ (%)
YB1-1	5 984.50	黄绿色	541	1.81	79.5	96.8	4.96	29.70	44.54
YB1-1	5 984.50	黄绿色	546	1.95	80.5	128.5	10.02	44.56	27.34
YB1-1	5 985.50	黄绿色	546	1.68	80.1	98.5	5.01	29.41	44.87
YB3	5 444.90	黄绿色	545	1.74	72.8	118.4	7.97	42.61	29.61
YB3	5 450.00	黄绿色	522	1.21	86.4	95.8	8.03	38.82	34.16
YB9	6 561.70	蓝绿色	500	1.19	60.2	69.5	2.01	12.54	63.36
YB9	6 846.00	黄绿色	541	1.56	77.6	111.5	2.97	13.10	62.64
YB9	6 846.90	黄色	540	1.55	80.6	112.7	3.98	21.67	53.02
YB9	6 847.20	黄色	539	1.40	54.6	65.4	1.80	14.44	61.00
YB9	6 847.20	黄绿色	537	1.51	71.4	117.6	1.55	2.35	92.82
YB9	6 847.20	黄色	542	1.59	59.6	92.2	1.53	5.44	75.59
YB9	6 883.10	黄色	542	1.62	60.2	71.2	2.03	12.54	63.36
YB9	6 883.10	黄绿色	543	1.52	74.5	101.7	2.98	19.81	54.99
YB9	6 883.25	黄色	542	1.72	77.6	109.1	3.94	23.56	51.04
YB10	6 634.00	黄绿色	538	1.43	63.8	96.0	2.07	9.64	67.38
YB10	6 634.20	黄绿色	538	1.36	83.9	118.0	5.02	27.45	46.95
YB10	6 634.00	蓝绿色	509	1.44	64.0	71.3	2.51	16.82	58.26

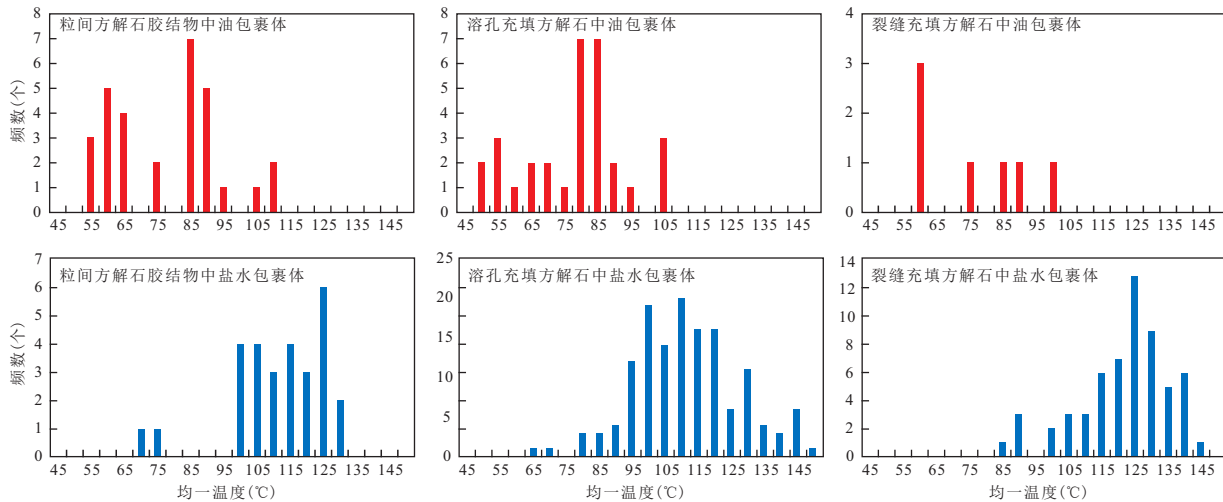


图 6 玉北地区奥陶系流体包裹体均一温度直方图

Fig.6 Homogenization temperature histogram of fluid inclusions in the Ordovician of Yubei area

## 4 成藏年龄确定

### 4.1 流体包裹体均一温度-埋藏史投影法确定成藏年龄

通过收集单井分层、地层剥蚀厚度和古热流等数据(倪斌等, 2017), 利用 BasinMod 软件绘制了研究区各单井埋藏史-热史图. 本文以 YB9 井为例, 将与油包裹体同期的盐水包裹体的平均均一温度投影到标有等温线的埋藏史图上(图 8), 对应于时

间轴上的年龄即为油气充注的年龄; 为了消除埋深的影响, 再将获得充注年龄统一标注到同一时间轴上进行成藏期次划分和成藏时期确定(图 9). 由此获得玉北地区奥陶系油气成藏期次划分和成藏时期确定图.

但对于塔里木盆地这样典型的多旋回叠合盆地来说, 经常会出现与油包裹体同期盐水包裹体的均一温度, 对应到埋藏-温度史上会出现两个或者



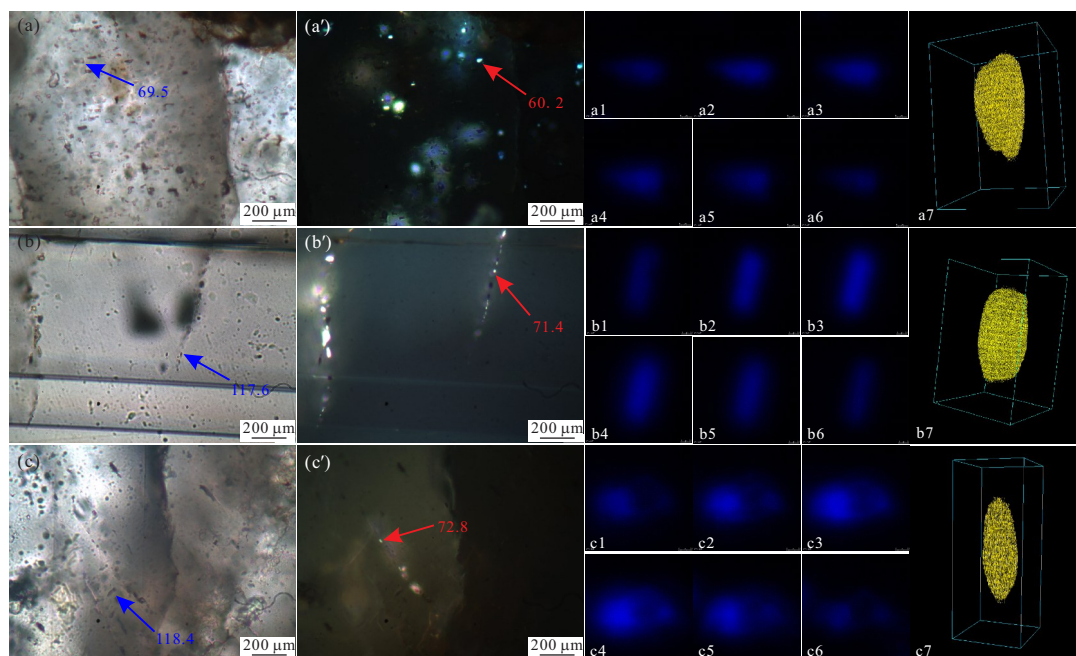


图7 玉北地区奥陶系油包裹体及其同期盐水包裹体产状、荧光颜色和均一温度与单个油包裹体3D模型重建

Fig.7 Occurences, fluorescence colors and homogenization temperature of oil inclusions and its coeval aqueous inclusions and 3D model of individual oil inclusion taken with Confocal Laser Scanning Microscope in the Ordovician of Yubei area

a, a'. YB9-6, 6 561.70 m,  $O_{1-2}y$ , 灰岩. 灰岩颗粒间方解石胶结物中检测到气液两相蓝绿色荧光的油包裹体及其同期气液两相盐水包裹体(a为透射光照片, a'为荧光照片), A1~A6为该油包裹体在激光扫描共聚焦显微镜下沿Z轴方向的6张切片, 切片间步长为 $0.4 \mu\text{m}$ , A7为该油包裹体3D模型重建; b, b'. YB9-11, 6 847.20 m,  $O_{1-2}y$ , 灰岩. 溶孔充填方解石中检测到气液两相黄绿色荧光的油包裹体及其同期气液两相盐水包裹体(c为透射光照片, b'为荧光照片), B1~B6为该油包裹体在激光扫描共聚焦显微镜下沿Z轴方向的6张切片, 切片间步长为 $0.5 \mu\text{m}$ , B7为该油包裹体3D模型重建; c, c'. YB3-3, 5 444.90 m,  $O_{1-2}y$ , 灰岩. 裂缝充填方解石中检测到气液两相黄绿色荧光的油包裹体及其同期气液两相盐水包裹体(c为透射光照片, c'为荧光照片) C1~C6为该油包裹体在激光扫描共聚焦显微镜下沿Z轴方向的6张切片, 切片间步长为 $0.4 \mu\text{m}$ , C7为该油包裹体3D模型重建. 红色箭头所指为油包裹体均一温度, 蓝色箭头所指为同期盐水包裹体温度

多个深度/年龄  $t_1$ ,  $t_2$  (表4), 例如与油包裹体同期盐水包裹体均一温度为 $110\sim 130\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 既可以投影到海西晚期, 亦可以投影到喜山期.

#### 4.2 流体包裹体最小捕获压力确定油气成藏年龄

正如上文所述, 流体包裹体均一温度—埋藏史投影法厘定油气成藏期次被广泛应用, 但是应用于多旋回叠合盆地时往往出现多解性. 为此, 本研究利用油包裹体最小捕获压力再次对油气充注年龄进行约束.

本研究采用的是进行PVT<sub>x</sub>模拟, 根据上述获得油包裹体及其同期盐水包裹体均一温度、油包裹体组分和气泡填充度等参数, 运用PVTsim软件模拟即可得出包裹体的最小捕获压力 $P_i$  (表4).

模拟结果显示, 第一期油气充注时流体包裹体宿主矿物为灰岩粒间方解石胶结物和溶孔充填方解石, 其平均均一温度范围为 $65.4\sim 71.3\text{ }^\circ\text{C}$ , 捕获压力范围为 $11.05\sim 12.67\text{ MPa}$ , 对应埋深范围为

$1\ 127\sim 1\ 292\text{ m}$ ; 第二期油气充注时流体包裹体宿主矿物为灰岩粒间方解石胶结物和溶孔充填方解石, 平均均一温度范围为 $92.2\sim 118.0\text{ }^\circ\text{C}$ , 捕获压力范围为 $22.78\sim 32.43\text{ MPa}$ , 对应埋深范围为 $2\ 324\sim 3\ 308\text{ m}$ ; 第三期油气藏调整时流体包裹体宿主矿物为裂缝充填方解石, 平均均一温度范围为 $118.4\sim 128.5\text{ }^\circ\text{C}$ , 捕获压力范围为 $44.12\sim 46.02\text{ MPa}$ , 对应埋深范围为 $4\ 502\sim 4\ 695\text{ m}$ .

因玉北地区奥陶系地层压力为常压, 则流体包裹体最小捕获压力近似等于捕获深度的静水压力. 这样就可以将最小捕获压力投影到埋藏史图上来求取油气充注年龄 (表4). 投影结果表明, 第一期油气成藏发生在加里东晚期 ( $447.1\sim 444.2\text{ Ma}$ ); 第二期发生在海西晚期 ( $290.3\sim 274.7\text{ Ma}$ ); 第三期发生在喜山期 ( $14.8\sim 9.7\text{ Ma}$ ) (图9).

表 4 玉北地区奥陶系流体包裹体均一温度和最小捕获压力约束充注年龄数据表

Table 4 Data of homogenization temperature and trapping pressure of fluid inclusions constraint on chronology of hydrocarbon charging in the Ordovician of Yubei area

井号	深度(m)	宿主矿物	$T_{h_{oil}}$ (°C)	$T_{h_{aq}}$ (°C)	均一温度确定 年龄(Ma)		$P_1$ (MPa)	捕获 深度(m)	捕获压力确定 年龄(Ma)	$\Delta t$ (Ma)	期次
					$t_1$	$t_2$					
YB9	6 561.70	粒间方解石胶结物	60.2	69.5	445.0	341.9	11.05	1 127.83	447.1	2.1	第一期
YB10	6 634.00	粒间方解石胶结物	64.0	71.3	444.0	336.8	11.27	1 149.54	446.3	2.3	
YB9	6 883.10	溶孔充填方解石	60.2	71.2	444.1	336.9	12.18	1 242.53	445.4	1.3	
YB9	6 847.20	溶孔充填方解石	54.6	65.4	445.2	349.6	12.67	1 292.60	444.2	1.0	
YB9	6 847.20	溶孔充填方解石	59.6	92.2	295.0	-	25.02	2 553.46	290.3	4.7	第二期
YB10	6 634.00	粒间方解石胶结物	63.8	96.0	292.5	-	25.25	2 576.78	289.5	3.0	
YB9	6 846.00	溶孔充填方解石	77.6	111.5	284.5	20.1	26.17	2 670.39	287.6	3.1	
YB9	6 846.90	溶孔充填方解石	80.6	112.7	287.4	19.6	27.65	2 821.38	284.4	3.0	
YB9	6 883.25	溶孔充填方解石	77.6	109.1	287.0	21.3	28.13	2 870.76	282.9	4.1	
YB9	6 883.10	溶孔充填方解石	74.5	101.7	289.9	24.5	28.44	2 902.01	282.6	7.3	
YB1-1	5 984.50	溶孔充填方解石	79.5	96.8	281.2	-	22.78	2 324.32	282.0	0.8	
YB1-1	5 985.50	粒间方解石胶结物	80.1	98.5	282.5	-	23.24	2 371.69	281.8	0.7	
YB10	6 634.20	粒间方解石胶结物	83.9	118.0	281.4	18.2	30.84	3 146.68	284.6	3.2	
YB9	6 847.20	溶孔充填方解石	71.4	117.6	281.8	18.6	32.43	3 308.97	277.0	4.8	
YB3	5 450.00	粒间方解石胶结物	86.4	95.8	276.2	-	23.70	2 418.59	274.7	1.5	第三期
YB1-1	5 984.50	裂缝充填方解石	80.5	128.5	11.0	276.3	46.02	4 695.49	14.8	3.8	
YB3	5 444.90	裂缝充填方解石	72.8	118.4	8.8	281.1	44.12	4 502.20	9.7	0.9	

注:  $T_{h_{oil}}$  为油包裹体均一温度;  $T_{h_{aq}}$  为同期盐水包裹体均一温度;  $t_1, t_2$  为流体包裹体均一温度厘定的油气充注年龄;  $P_1$  为流体包裹体捕获压力;  $\Delta t$  为流体包裹体均一温度和捕获压力厘定充注年龄的差值

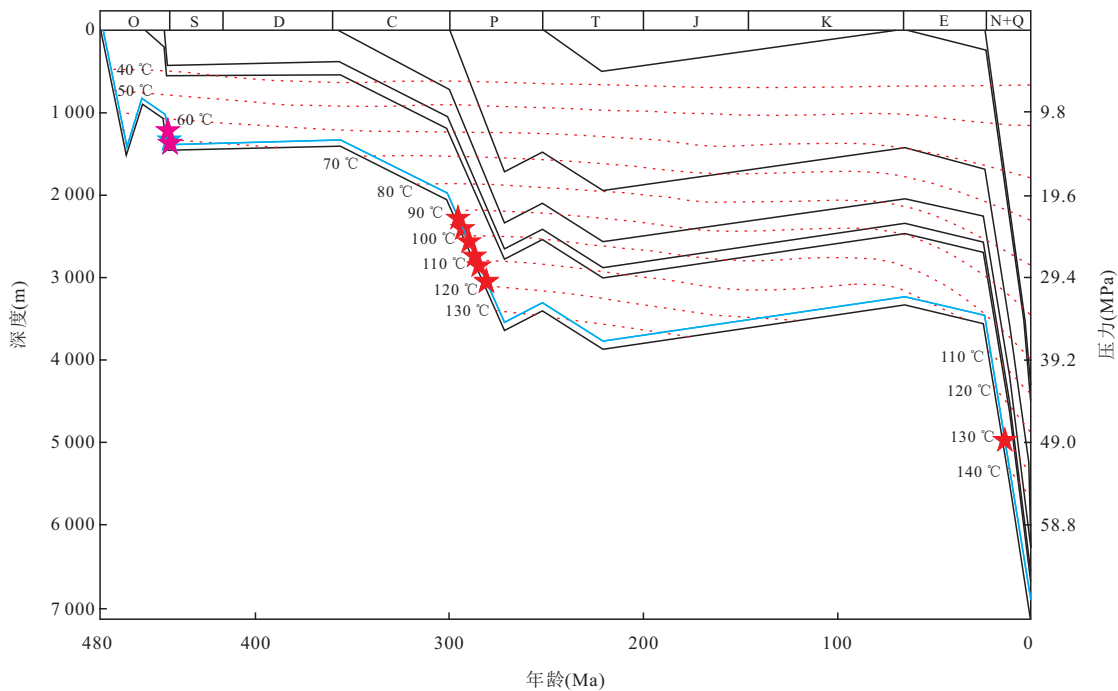


图 8 YB9 井奥陶系流体包裹体均一温度—埋藏史投影示意图

Fig.8 Schematic diagram of burial curve projected with homogenization temperatures of fluid inclusions in the Ordovician of well YB 9

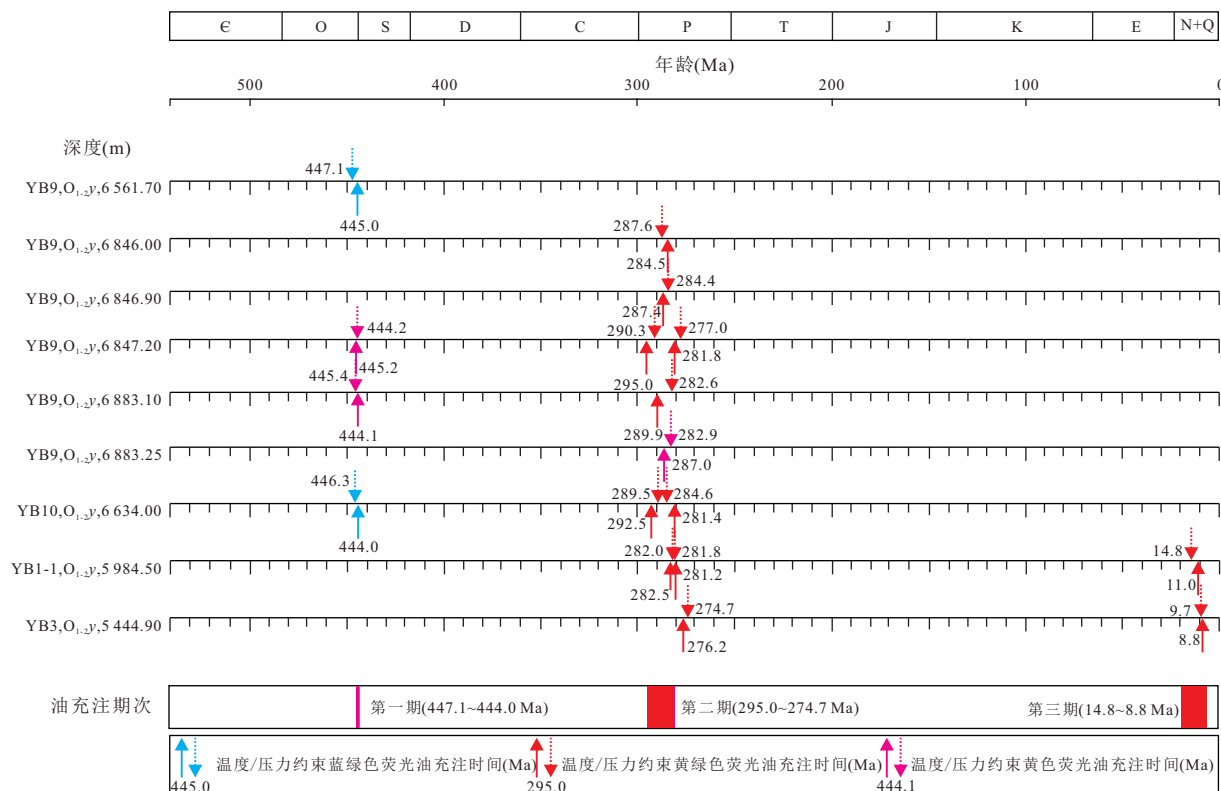


图 9 玉北地区奥陶系流体包裹体均一温度捕获压力约束成藏时间

Fig.9 Double constraint on chronology of hydrocarbon charging events by homogenization temperature and trapping pressure of fluid inclusions in the Ordovician of Yubei area

## 5 讨论

### 5.1 均一温度和最小捕获压力双重约束成藏年龄

本文前述研究既已表明,仅仅依据均一温度—埋藏史投影法求取这种多旋回沉降盆地的油气充注年龄的确存在多解性(表4)。成岩序次能够帮助确定捕获不同期次油包裹体的相对序次,虽不能确定其绝对年龄,但成岩序次中流体包裹体宿主矿物的特征有助于剔除包裹体投点过程中产生的多解性。譬如, YB10井6 634.00 m处粒间方解石胶结物中检测到原生蓝绿色油包裹体,其同期盐水包裹体均一温度为71.3℃,均一温度投影对应444.0 Ma和336.8 Ma两个年龄。然而,粒间方解石胶结物形成时间较早(图10),所以该投点年龄应取444.0 Ma; YB9井6 847.20 m处晚期溶孔充填方解石中检测到次生黄绿色油包裹体,其同期盐水包裹体均一温度为117.6℃,均一温度投影对应281.8 Ma和18.6 Ma两个年龄;而最小捕获压力为32.43 MPa,捕获古深度约为3 308.97 m,所以该投点年龄应取281.8 Ma(表4)。YB1-1井5 984.50 m处晚期裂缝充填方解石中检测到原生黄绿色油包裹体,其同期盐水包裹体

均一温度为128.5℃,均一温度投影对应11.0 Ma和276.3 Ma两个年龄,但该裂缝形成时间较晚(图3),其最小捕获压力为46.02 MPa,捕获古深度约为4 695.49 m,所以该投点年龄应取11.0 Ma(表4)。

由此可见,以成岩序次研究为基础,运用均一温度和最小捕获压力投影法双重约束油气成藏年龄,能在一定程度上消除多解性。本次研究中流体包裹体均一温度和最小捕获压力—埋藏史两种投影方法求取油气成藏年龄的差异介于0.9~7.3 Ma之间,哪一种年龄更加可靠以及造成这种误差可能来源有待下一步深入的研究。

### 5.2 成岩流体演化与油气成藏的耦合关系

前人研究认为,塔里木盆地玉北地区有两套有效烃源岩分别为下寒武统和上寒武统一奥陶统(马红强等,2006;吕修祥等,2010)。加里东晚期—海西早期由于构造抬升,使玉北地区上奥陶统一泥盆系剥蚀殆尽,下奥陶统形成表生岩溶型碳酸岩储层,海西晚期麦盖提斜坡由北倾向南倾转变,此时寒武—奥陶系烃源岩已进入主生油期,以玛南断裂为运移通道进行油气充注。喜山晚期麦盖提斜坡定型为南倾斜坡,玛南构造带停止活动最终定型,在

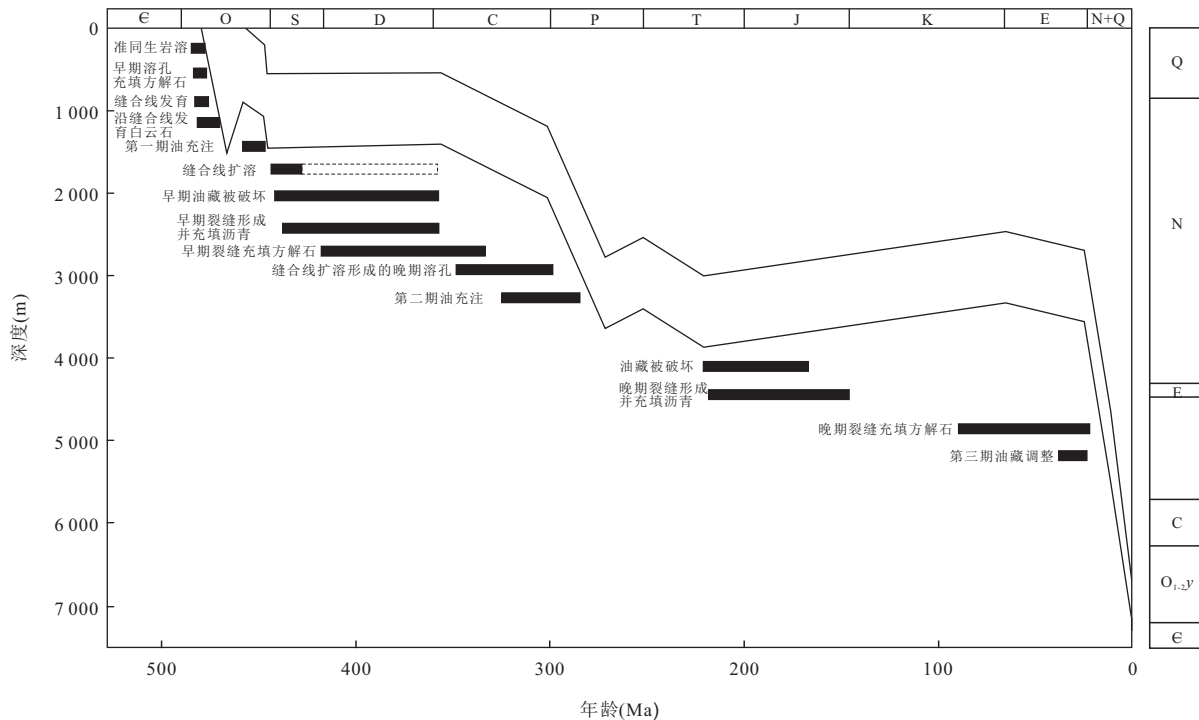


图 10 玉北地区奥陶系成岩作用类型、序次与含烃流体演化关系图

Fig.10 The evolution relationship among diagenetic types, sequence and the geofluids bearing hydrocarbon with the burial history in Yubei area, Tarim basin

这期间构造活动对古油藏进行调整改造。

据此归纳出玉北地区奥陶系成岩流体演化与油气成藏的耦合关系为:在加里东中期的准同生期,发生生物介壳溶蚀,并在之后的继续埋藏过程中介壳铸模孔内充填方解石,中浅埋藏时期缝合线开始发育,并在缝合线周围生长有白云石。在加里东晚期,发生第一期油气充注,生物介壳充填方解石裂纹中即捕获了该期次生油包裹体,沿缝合线发育的白云石捕获该期的原生油包裹体。加里东晚期—海西早期构造抬升,早期油藏被破坏,此时发育第一期裂缝并为方解石胶结物充填,被破坏的油藏形成沥青沿早期裂缝分布;海西中期,地层开始沉降,缝合线扩溶形成晚期溶孔,海西晚期发生第二期油气充注,大量溶孔/洞方解石胶结物捕获了该期油气包裹体。印支—燕山期,构造抬升对油藏进行破坏,并形成晚期裂缝并充填方解石胶结物和沥青。喜山期,强烈的构造变形和地层快速沉降对前期油藏进行调整成藏(图 10)。

## 6 结论

通过对玉北地区奥陶系岩心观察、成岩序列厘定和流体包裹体系统分析,在成岩序列和流体演化

的基础上,运用流体包裹体均一温度和最小捕获压力两种方法来约束其油气成藏年龄,获得了如下成果性认识:

(1)塔里木盆地玉北地区奥陶系存在 3 期油气成藏,第一期发生在加里东晚期 447.1~444.0 Ma,第二期发生在海西晚期 295.0~274.7 Ma,第三期发生在喜山期 14.7~8.8 Ma。

(2)玉北地区油气成藏时期为常压状态,加里东晚期油气充注时,地层压力系数为 0.93~1.17,海西晚期油气充注时,地层压力系数为 0.86~1.08,喜山期油气充注时,地层压力系数为 1.02~1.09。

(3)在对成岩流体演化研究的基础上,尤其是对烃类包裹体宿主矿物的成因研究,运用流体包裹体均一温度和最小捕获压力双重约束油气成藏年龄,为多旋回叠合盆地复杂油气成藏历史恢复提供了一种新的研究手段。

## References

Aplin, A. C., Macleod, G., Larter, S. R., et al., 1999. Combined Use of Confocal Laser Scanning Microscopy and PVT Simulation for Estimating the Composition and Physical Properties of Petroleum in Fluid Inclusions. *Marine and Petroleum Geology*, 16(2): 97-110. <https://>

- doi.org/10.1016/s0264-8172(98)00079-8
- Bourdet, J., Pironon, J., Levresse, G., et al., 2010. Petroleum Accumulation and Leakage in a Deeply Buried Carbonate Reservoir, Nispero Field (Mexico). *Marine and Petroleum Geology*, 27(1): 126–142. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.07.003>
- Chen, H. H., Dong, W. L., Zhang, S. L., et al., 2002. Application of Fluid Inclusion in Palaeopressure Modeling Research. *Oil & Gas Geology*, 23(3): 207–211 (in Chinese with English abstract).
- Chen, H. H., 2014. Microspectrofluorimetric Characterization and Thermal Maturity Assessment of Individual Oil Inclusion. *Acta Petrolei Sinica*, 35(3): 584–590 (in Chinese with English abstract).
- Dickson, J., 1990. Carbonate Mineralogy and Chemistry. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Ding, W. L., Qi, L. X., Yun, L., et al., 2012. The Tectonic Evolution and Its Controlling Effects on the Development of Ordovician Reservoir in Bachu-Markit Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2542–2556 (in Chinese with English abstract).
- Du, Y. M., Yu, T. X., Hao, J. L., et al., 2013. Fracture characteristics and control action on Hydrocarbon Accumulation in Yubei Area of Tarim Basin. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 20:170–174 (in Chinese with English abstract).
- Ferket, H., Guilhaumou, N., Roure, F., et al., 2011. Insights from Fluid Inclusions, Thermal and PVT Modeling for Paleo-Burial and Thermal Reconstruction of the Córdoba Petroleum System (NE Mexico). *Marine and Petroleum Geology*, 28(4): 936–958. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2010.01.020>
- Goldstein, R. H., Reynolds, T. J., 1994. Systematics of Fluid Inclusions in Diagenetic Minerals. SEM Short Course 31. Society of Sedimentary Geology (SEPM), Tulsa, 1–199.
- Guo, C. T., Gao, J., Li, Z., et al., 2017. Deposition and Provenance Records of Upper Devonian to Low Carboniferous Sandstones from Bachu Area, Northwest Tarim Basin: Implications for Tectonic Evolution. *Earth Science*, 42(3):421–434 (in Chinese with English abstract).
- Li, P. J., Chen, H. H., Tang, D. Q., et al., 2017. Coupling Relationship between NE Strike-Slip Faults and Hypogenic Karstification in Middle-Low Ordovician of Shunnan Area, Tarim Basin, Northwest China. *Earth Science*, 42(1):93–104 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Shen, K., 1999. Thermodynamic of Fluid Inclusions. Geological Press, Beijing (in Chinese).
- Liu, Z. B., Wu, S. Q., Liu, S. L., et al., 2013. Types and Main Controlling Factors of Ordovician Reservoirs in Yubei Area, Tarim Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 34(4): 638–646 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. H., Lu, H. Z., Xiao, X. M., 2007. Petroleum Inclusion and Its Application in Petroleum Exploration and Development. Guangdong Science and Technology Press, Guangdong(in Chinese).
- Lu, Z. Y., Chen, H. H., Yun, L., et al., 2016. The Coupling Relationship between Hydrothermal Fluid and the Hydrocarbon Gas Accumulation in Ordovician of Shunnan Gentle Slope, Northern Slope of Tazhong Uplift. *Earth Science*, 41(3):487–498 (in Chinese with English abstract).
- Lv, X. X., Yang, H. J., Bai, Z. K., 2010. Hydrocarbon Exploration Prospects in the East Section of the Maigaiti Slope in the Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 32(6): 521–526 (in Chinese with English abstract).
- Lv, H. T., Zhang, Z. P., Shao, Z. B., et al., 2010. Structural Evolution and Exploration Significance of the Early Paleozoic Palaeouplifts in Bachu-Maigaiti Area, the Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 31(1): 76–83 (in Chinese with English abstract).
- Ma, H. Q., Wang, S. Y., Lin, J., 2006. Hydrocarbon Migration and Accumulation Characteristics in the Bachu - Maigaiti Area of the Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 28(3):243–248 (in Chinese with English abstract).
- Moore, C. H., Wade, W. J., 2013. Carbonate Reservoirs: Porosity and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework. Elsevier.
- Munz, I. A., Wangen, M., Girard, J. P., et al., 2004. Pressure-Temperature-Time-Composition (P-T-t-X) Constraints of Multiple Petroleum Charges in the Hild Field, Norwegian North Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 21(8): 1043–1060. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2004.05.006>
- Ni, B., Tang, L. J., Guo, Y., et al., 2017. Analysis of Burial History and Thermal History in Yubei Area, Tarim Basin. *Geoscience*, 31(2): 357–366 (in Chinese with English abstract).
- Ping, H. W., Chen, H. H., Song, G. Q., et al., 2013. Individual Oil Inclusion Composition Prediction and Its Application in Oil and Gas Accumulation Studies. *Earth Science*, 37(4): 815–824 (in Chinese with English abstract).
- Ping, H. W., Chen, H. H., Thiéry, R., 2013. Improvement on Paleopressure Prediction Using Petroleum Inclusions Thermodynamic Modeling: Saturation Pressure Prediction and Volume Calibration. *Earth Science*, 38(1): 143–155 (in Chinese with English abstract).
- Ping, H. W., Chen, H. H., 2014. Prediction Model of Petroleum Inclusion Trapping Pressure Constrained by Methane Mole Content. *Earth Science*, 39(1): 79–90 (in Chinese with English abstract).
- Pironon, J., 2004. Fluid Inclusions in Petroleum Environments: Analytical Procedure for PTX Reconstruction. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1333–1342.

- Qian, Y. X., Yu, T. X., Zhou, L. F., et al., 2014. Lithofacies, Diagenesis Zone and Reservoir Origin of the Ordovician in Eastern Tectonic Belt of the Maigaiti Slope. *Oil & Gas Geology*, 35(6): 870–882 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, H. B., Tan, G. H., Cao, Z. C., et al., 2013. Tectonic Evolution and Its Relation to Hydrocarbon Accumulation in Yubei Area, Tarim Basin. *Xinjiang Geology*, 31 (S1): 28–33 (in Chinese with English abstract).
- Salim, A., Sausse, J., Pironon, J., et al., 2008. 3D Confocal Scanning Laser Microscopy to Quantify Contact Angles in Natural Oil-Water Mixtures. *Oil & Gas Science and Technology-Revue de l'IFP*, 63(5): 645–655. <https://doi.org/10.2516/ogst:2008011>
- Si, S. H., Chen, H. H., Tan, X. F., et al., 2013. Hydrocarbon Accumulation Period and Its Carrier Systems in Ordovician Reservoir of Yubei Area, Markit Slope Tarim Basin. *Earth Science*, 38 (6): 1271–1280 (in Chinese with English abstract).
- Thiery, R., Pironon, J., Walgenwitz, F., et al., 2002. Individual Characterization of Petroleum Fluid Inclusions (Composition and P-T Trapping Conditions) by Microthermometry and Confocal Laser Scanning Microscopy: Inferences from Applied Thermodynamics of Oils. *Marine and Petroleum Geology*, 19(7): 847–859. [https://doi.org/10.1016/s0264-8172\(02\)00110-1](https://doi.org/10.1016/s0264-8172(02)00110-1)
- Wang, C. W., Zhou, H. Y., Jiang, L. N., et al., 2008. The Method Study on the Determination of Gas and Liquid Ratio of Fluid Inclusion Using Laser Confocal Scanning Microscope. *Modern Scientific Instruments*, 1: 20–22 (in Chinese with English abstract).
- Yin, G., Ni, S. J., 2009. Isotope Geochemistry. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- You, S. G., 2013. Controlling Effect of Paleotectonic Evolution on Ordovician Karst Reservoir in Yubei Area of Tarim Basin (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. P., Liu, S. L., Yang, Z. Y., et al., 2011. Tectonic Evolution and Its Petroleum Geological Significances of the Maigaiti Slope, Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 32 (6): 909–918 (in Chinese with English abstract).
- 陈红汉, 董伟良, 张树林, 等, 2002. 流体包裹体在古压力模拟研究中的应用. *石油与天然气地质*, 23(3): 207–211.
- 陈红汉, 2014. 单个油包裹体显微荧光特征与热成熟度评价. *石油学报*, 35(3): 584–590.
- 丁文龙, 漆立新, 云露, 等, 2012. 塔里木盆地巴楚—麦盖提地区古构造演化及其对奥陶系储层发育的控制作用. *岩石学报*, 28(8): 2542–2556.
- 杜永明, 余腾孝, 郝建龙, 邱华标, 2013. 塔里木盆地玉北地区断裂特征及控制作用. *断块油气田*, 20(0):170–174.
- 郭春涛, 高剑, 李忠, 等, 2017. 塔里木盆地巴楚地区上泥盆统—下石炭统沉积—物源记录及其构造演化. *地球科学*, 42(3):421–434.
- 李培军, 陈红汉, 唐大卿, 等, 2017. 塔里木盆地顺南地区中—下奥陶统 NE 向走滑断裂及其与深成岩溶作用的耦合关系. *地球科学*, 42(1):93–104.
- 刘斌, 沈昆, 1999. 流体包裹体热力学. 北京: 地质出版社.
- 刘德汉, 卢焕章, 肖贤明, 2007. 油气包裹体及其在石油勘探和开发中的应用. 广州: 广东科技出版社.
- 刘忠宝, 吴仕强, 刘士林, 等, 2013. 塔里木盆地玉北地区奥陶系储层类型及主控因素. *石油学报*, 34(4): 638–646.
- 鲁子野, 陈红汉, 云露, 等, 2016. 塔中顺南缓坡奥陶系热流体活动与天然气成藏的耦合关系. *地球科学*, 41(3): 487–498.
- 吕海涛, 张仲培, 邵志兵, 等, 2010. 塔里木盆地巴楚—麦盖提地区早古生代古隆起的演化及其勘探意义. *石油与天然气地质*, 31(1): 76–83.
- 吕修祥, 杨海军, 白忠凯, 等, 2010. 塔里木盆地麦盖提斜坡东段油气勘探前景. *石油实验地质*, 32(6): 521–526.
- 马红强, 王恕一, 蔺军, 2006. 塔里木盆地巴楚—麦盖提地区油气运聚与成藏. *石油实验地质*, 28(3): 243–248.
- 倪斌, 汤良杰, 郭颖, 等, 2017. 塔里木盆地玉北地区埋藏史及热史分析. *现代地质*, 31(2): 357–366.
- 平宏伟, 陈红汉, Thiery, R., 2013a. 石油包裹体热力学模拟古压力改进: 饱和压力预测和体积校正. *地球科学*, 38(1): 143–155.
- 平宏伟, 陈红汉, 宋国奇, 等, 2013b. 单个油包裹体组分预测及其在油气成藏研究中的应用. *地球科学*, 37(4): 815–824.
- 平宏伟, 陈红汉, 2014. 甲烷摩尔含量约束的石油包裹体捕获压力预测模型. *地球科学*, 39(1): 79–90.
- 钱一雄, 余腾孝, 周凌方, 等, 2014. 麦盖提斜坡东部构造带奥陶系岩相、成岩作用带与储层成因. *石油与天然气地质*, 35(6): 870–882.
- 邱华标, 谭广辉, 曹自成, 等, 2013. 塔里木盆地玉北地区构造演化与油气聚集关系. *新疆地质*, 31(S1): 28–33.
- 斯尚华, 陈红汉, 谭先锋, 等, 2013. 塔里木盆地麦盖提斜坡玉北地区奥陶系油气输导体系与成藏期. *地球科学*, 38 (6): 1271–1280.
- 王存武, 邹华耀, 姜丽娜, 等, 2008. 激光扫描共聚焦显微镜精确测量有机包裹体气液比方法研究. *现代科学仪器*, 1: 20–22.
- 尹观, 倪师军, 2009. 同位素地球化学. 北京: 地质出版社.
- 游声刚, 2013. 塔里木盆地玉北地区古构造演化对奥陶系岩溶储层的控制作用(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学(北京).
- 张仲培, 刘士林, 杨子玉, 等, 2011. 塔里木盆地麦盖提斜坡构造演化及油气地质意义. *石油与天然气地质*, 32(6): 909–918.

#### 附中文参考文献