

米仓-大巴山海相地层古流体地球化学特征与油气保存

李飞¹, 尚长健², 楼章华³, 朱振宏³, 李梅³, 周孝鑫⁴

(1. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027; 2. 核工业部北京地质研究院, 北京 100029; 3. 浙江大学海洋地质与资源研究所, 浙江 杭州 310058; 4. 浙江大学水文与水资源研究所, 浙江 杭州 310058;)

摘要:米仓-大巴山前带及周缘海相地层形成时间早、变形期次多、油气保存条件差,是油气勘探的主要制约因素。通过研究构造裂隙充填方解石脉碳、氧同位素及流体包裹体特征,分析古流体成因来源、活动期次及大气水混入情况,评价该区海相地层的油气保存条件。研究表明:从盆地内经山前带至盆地边缘,大气水下渗作用逐渐增强,山前带古大气水下渗深度普遍在1 200~3 000 m;根据方解石脉包裹体均一温度和盐度特征,推测该区存在两期古流体活动,分别对应燕山期和喜马拉雅期构造运动。其中,燕山期大气水下渗影响较弱,海相地层封闭性相对较好,有利于烃类的保存;喜马拉雅山期海相地层遭受强烈的抬升剥蚀,大气水下渗作用强烈,保存条件变差。

关键词:稳定同位素;流体包裹体;古大气水下渗;油气保存条件;海相地层;米仓-大巴山

中图分类号:TE122.1 **文献标识码:**A

Geochemical characteristics of paleofluid and hydrocarbon preservation in marine strata of Micang-Daba piedmont and its adjacent areas

Li Fei¹, Shang Changjian², Lou Zhanghua³, Zhu Zhenhong³, Li Mei³, Zhou Xiaoxing⁴

(1. China Harbour Engineering Company Ltd., Beijing 100027, China; 2. CNNC Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 3. Institute of Ocean Resources, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China; 4. Institute of Hydrology and Water Resources, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: Exploration for oil and gas in the marine strata of the Micang-Daba piedmont and its adjacent area turned out to be not so encouraging due to poor preservation conditions caused by multiple tectonic deformations. By characterizing carbon and oxygen isotopes and fluid inclusions in calcite veins in tectoclases, we tried to evaluate conditions for hydrocarbon preservation in these strata based on analyses of paleo-fluid, including origin, phases of activity and mixing of meteoric water. Results show that meteoric water infiltration increased progressively from the center to the edge of the basin and the infiltrating depth of the water was mostly between 1 200 and 3 000 meters in the piedmont. The homogenization temperature and salinity measurements of fluid inclusions indicate two phases of paleofluid activity corresponding respectively to the Yanshanian and Himalayan tectonic movements. During the Yanshanian movement, the meteoric water infiltration was weak and the marine strata in the study area had favorable preservation conditions for hydrocarbons. While during the Himalayan movement, the meteoric water infiltration was intensive. Together with a strong tectonic uplift and erosion, the infiltration made preservation conditions for hydrocarbon worse.

Key words: stable isotope, fluid inclusion, ancient meteoric water infiltration, hydrocarbon preservation condition, marine strata, Micang-Daba piedmont zone

1 地质背景

米仓-大巴山前带位于上扬子板块向北突出带边缘,属于上扬子地台的一部分,周边有秦岭造山带、松潘-甘孜造山带和龙门山推覆构造带等一系列大型构造

带。研究区主体构造为米仓山构造带南缘褶皱基底和盖层、北西向大巴山弧形构造带及其前缘带的接触带。

米仓-大巴山前带经历了印支期的初始隆升、燕山期的强烈隆升和喜马拉雅期的最终定型3个阶段^[1-4]。研究区构造沉积史可以划分为晚震旦世—中三叠世海相台地—台地边缘组合和晚三叠世—古近纪陆相沉积

收稿日期:2013-03-22;修订日期:2014-01-09。

第一作者简介:李飞(1990—),男,硕士,油气资源评价与开发。E-mail:lifei102030@gmail.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05002-006-003HZ,2011ZX05005-003-008HZ);油气藏地质及开发工程国家重点实验室资助项目(PLC201105,PLC201002);国家自然科学基金联合化工重点项目(40839902)。

组合两大阶段,对应发育三个大的含油气系统。下部海相含油气系统:烃源岩为志留系和寒武系暗色泥页岩,储层为志留系和震旦系砂岩,盖层为志留系泥页岩;中部海相含油气系统:烃源岩为二叠系暗色泥页岩、煤层及深灰色灰岩^[5],储层为二叠系栖霞组灰岩、长兴组生物礁滩、飞仙关组鲕粒滩和嘉陵江组二段砂屑滩,盖层主要是雷口坡组—嘉陵江组塑性膏盐岩;上部陆相地层含油气系统:烃源岩为须家河组、自流井组和千佛崖组暗色泥岩,储层为须家河组、千佛崖组砂岩和自流井组大安寨段介屑灰岩,盖层为须家河组和侏罗系泥页岩。

2 样品采集和分析方法

本次研究采集了研究区内寒武系、奥陶系、志留系、二叠系和三叠系等不同层系分布的方解石脉及其碳酸盐岩围岩样品。稳定同位素分析在北京国土资源部同位素实验室完成。分析方法采用 100%磷酸法和激光法。所用质谱计型号为 MAT 251EM。碳、氧同位素测试数据采用的国际标准:δ¹³C 以 PDB 为标准;δ¹⁸O 分别以 PDB 和 SMOW 两种标准;分析精密度为 ±0.2‰。测试分析成果见表 1。流体包裹体分析在核工业地质分析测试研究中心完成,所采用的分析测试仪器为 LINKAM THMS600 型冷热台,分析测试环境温度和湿度分别为 20℃和 30%。本次研究采集的样品分布较广,覆盖了研究区的大部分区域,可以满足分析研究的需要。测试样品以二叠系和三叠系方解石脉样品和碳酸盐岩围岩样品居多,代表性最好,故选作具体分析描述,其他层系样品均表现出相似特征(表 1)。

3 稳定同位素地球化学与古流体史分析

3.1 方解石脉碳、氧同位素特征与流体成因分析

断裂带形成与演化过程中,断裂通道带中的流体

往往十分活跃,在破碎岩石的裂缝中形成石英脉和方解石脉。断裂带中的流体来源有以下几个方面:①下渗的地表大气水;②断裂带两侧的地层流体;③断裂带下方的深部壳源流体;④幔源流体。不同成因的地下流体具有不同的地球化学性质和同位素组成。因此,断裂带中的流体成因决定了石英脉和方解石脉的稳定同位素组成。通过对比分析碳酸盐岩围岩背景值和方解石脉的碳、氧同位素组成,可以判断其形成时的地球化学环境特征和物质来源^[6]。通常,沉积碳酸盐岩的碳同位素组成比较稳定,基本上不受成岩孔隙水的影响,可以反映其成岩环境^[7]。但方解石脉中碳同位素会因深部流体混入而偏重,因大气水下渗影响而偏轻。

研究区各层系方解石脉碳、氧同位素值分布相对其对应的围岩背景值较分散(图 1)。如三叠系碳酸盐岩围岩的 δ¹³C 值分布范围为 -2.2‰~5.0‰,均值为 0.8‰,在正常海相碳酸盐岩的范围内。而三叠系方解石脉 δ¹³C 值变化范围较大,为 -7.7‰~6.1‰(图 1),表明构造裂隙充填方解石胶结物形成时二氧化碳来源较复杂,不完全来源于海相碳酸盐岩^[7-8]。其他层位的 δ¹³C 值相对分布变化规律与三叠系类似。因此,可以认为米仓—大巴山前带及周缘地区存在不同程度的大气水下渗作用和深部流体通过深大断裂沟通上涌混合的现象。

相对于碳同位素,氧同位素(δ¹⁸O)值的影响因素较多,既有“成岩效应”又有“年代趋势”。地层越老,相应的 δ¹⁸O 值就越小^[9]。随着时间的拉长,地层与大气淡水发生同位素交换的机会增多,也会使碳酸盐岩 δ¹⁸O 值变小。温度对 δ¹⁸O 值的影响也十分明显,随着埋深增加,温度递增,氧同位素分馏作用增强,δ¹⁸O 值减小^[10-11]。研究区三叠系方解石脉 δ¹⁸O(PDB)值的变化范围为 -16.3‰~-2.6‰,平均值为 -8.3‰,其相应层系碳酸盐岩围岩氧同位素值的变化范围为 -9.1‰~-2.1‰,均值为 -6.2‰。构造裂隙充填方解石脉的 δ¹⁸O 值相对负偏,反映其形成于温度较高

表 1 米仓—大巴山地区构造裂隙充填方解石及其碳酸盐岩围岩的碳、氧同位素组成
Table 1 Carbon and oxygen isotope composition of calcite veins filled in tectoclases and their carbonate host rocks in Micang-Daba area

层位	方解石脉 样品数量/个	围岩样品 数量/个	δ ¹³ C(PDB)/‰		δ ¹⁸ O(PDB)/‰		δ ¹⁸ O(SMOW)/‰	
			方解石脉	围岩背景值	方解石脉	围岩背景值	方解石脉	围岩背景值
T	66	20	-7.7~6.1/ -0.5	-2.2~5.0/ 0.8	-16.3~-2.6/ -8.3	-9.1~-2.1/ -6.2	14.1~28.2/ 22.3	21.5~28.7/ 24.4
P	73	20	-18.0~6.0/ 0.1	-3.4~5.8/ 2.9	-16.3~0.8/ -8.5	-10.8~-3.7/ -6.4	14.1~31.7/ 22.1	19.7~27.0/ 24.2
S	13	3	-5.0~4.6/ 0.5	0.5~2.3/ 1.2	-17.7~-5.1/ -9.9	-11.0~-5.7/ -7.8	12.6~25.6/ 20.6	19.5~25.0/ 22.8
O	50	11	-4.4~-0.2/ -1.9	-2.0~3.6/ 0.5	-21.7~-6.0/ -11.8	-12.5~-5.1/ -8.2	8.5~24.7/ 18.7	18.0~25.6/ 22.4
Є	15	3	-10.9~-2.0/ -4.9	-2.2~-0.9/ -1.7	-15.6~-8.4/ -12.1	-11.7~-6.2/ -8.5	14.8~22.2/ 18.2	18.8~24.0/ 22.1

注:表中数据为最小值~最大值/平均值。

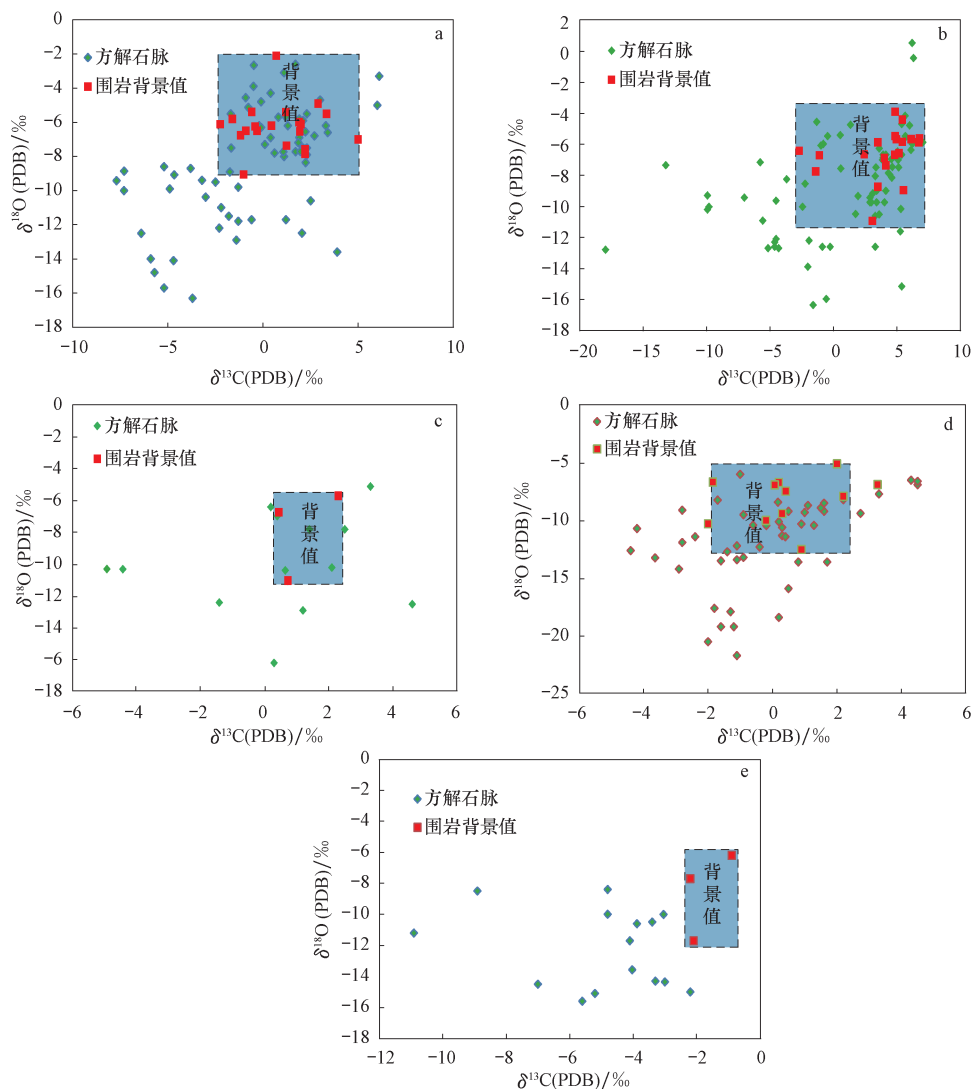


图1 米仓-大巴山地区构造裂隙充填方解石及其碳、酸盐岩围岩背景值的碳氧同位素相关图

Fig. 1 Carbon and oxygen isotope correlograms of calcite veins filled in tectoclases and their carbonate host rock background values in Micang-Daba area

a. 三叠系; b. 二叠系; c. 志留系; d. 奥陶系; e. 寒武系

的热液流体中,但不排除成岩流体与大气淡水发生同位素交换导致方解石脉中 $\delta^{18}\text{O}$ 值负向偏移的可能性。

从米仓-大巴山前带及周缘地区二叠系-三叠系碳同位素的平面分布情况可知,碳同位素值从盆地内经过山前带往盆地外逐渐减小(图2)。盆地内方解石脉碳同位素值普遍在 $-2\text{‰} \sim 2\text{‰}$,反映了海相地层流体特征。山前带及盆地外,方解石脉碳同位素分布比较复杂,同位素值普遍小于 -2‰ ,推测燕山期后的强烈褶皱及抬升剥蚀作用使得海相地层直接裸露于地表,大气水下渗影响较普遍;局部深大断裂发育地区方解石脉碳同位素值大于 2‰ ,表明该区存在深部流体上涌现象^[12-13]。

3.2 古水温和古大气水下渗深度计算

碳酸盐成岩时水体介质的温度是控制碳酸盐稳定

同位素组成的重要因素之一。当碳酸盐与水介质处于平衡状态时, $\delta^{18}\text{O}$ 值随温度的升高而下降^[14]。水介质温度对 $\delta^{18}\text{O}$ 值的影响远远超过盐度对它的影响;而 $\delta^{13}\text{C}$ 值随温度变化很小。因此,当盐度不变时, $\delta^{18}\text{O}$ 值可用来作为测定古温度的可靠标志。

用 $\delta^{18}\text{O}$ 值测定古大洋水温度的方法是由美国学者H. C. Urey提出的,并且由Epstein(1953)等加以具体化。Shackleton(1974)又进一步修改得出最终经验公式:

$$T = 16.9 - 4.38(\delta\text{C} - \delta\text{W}) + 0.10(\delta\text{C} - \delta\text{W})^2 \quad (1)$$

$$\text{其中: } \delta\text{C} = 10.25 + 1.01025 \times \delta\text{CaCO}_3 \quad (2)$$

$$\delta\text{W} = 41.2 \text{ (设 } \delta\text{H}_2\text{O} = 0) \quad (3)$$

上各式中: δCaCO_3 是指 CaCO_3 样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值; δC 指 CaCO_3 样品测试时,反应产生 CO_2 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值; δW 和 $\delta\text{H}_2\text{O}$ 则指样品形成时与海水平衡状态下 CO_2 和 H_2O 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值^[14-17]。

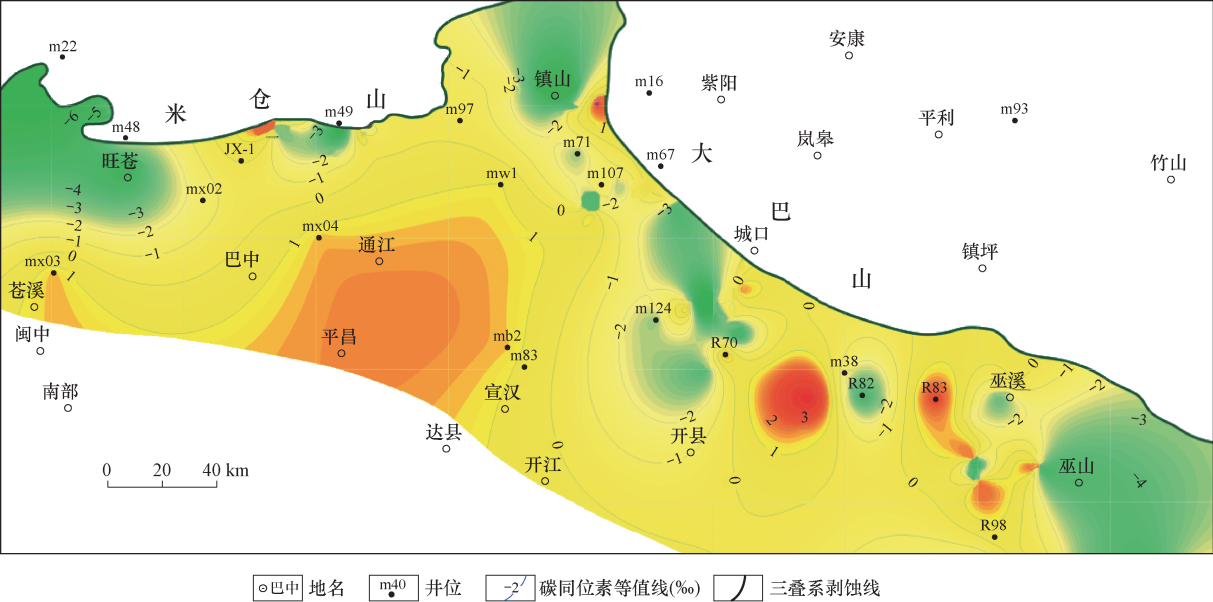


图 2 米仓-大巴山地区二叠系-三叠系方解石脉碳同位素平面分布

Fig. 2 Plane distribution of the carbon isotope values of the Permian and Triassic calcite veins in the study area

$\delta^{18}\text{O}$ 与成岩强度之间的定性关系:成岩强度越大, $\delta^{18}\text{O}$ 值越低。依据米仓-大巴山前带及周缘地区各时代地层构造裂隙方解石充填物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值,利用上述公式可以求得方解石充填物形成时期的流体介质温度。米仓-大巴山前带及周缘地区构造裂隙方解石充填物的形成温度变化范围较大,为 25~130℃,且由盆地内部向山前带逐渐增高,不同构造单元也有一定差异。由此表明,在往山前带方向的多期构造抬升剥蚀过程中,构造断裂带中的流体较活跃,持续时间长,导致形成深度和温度变化较大。

利用方解石脉的稳定同位素组成,可以获取形成温度等地球化学参数,并且在分析方解石脉成因的基础上,计算古大气水的下渗深度(表 2)。因此,获得古大气水下渗深度的步骤如下:①测定方解石脉的碳、氧稳定同位素组成,判断方解石脉形成时的流体是否有大气水的参与;②计算方解石脉的形成温度;③结合古地温梯度计算方解石脉形成深度,这个深度就是古大气水的下渗深度。

由研究区方解石脉的碳、氧同位素测试结果可知,

米仓-大巴山前带及周缘地区各层系裂隙方解石充填物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值普遍较围岩背景值低,受下渗大气水的影响。其中,四川盆地内古大气水下渗深度最小,为 600~2 000 m;向山前带及盆地外侧逐渐增大,普遍在 1 200~3 000 m(图 3)。

4 包裹体特征与油气保存

米仓-大巴山前带及周缘地区断裂带重填的方解石脉流体包裹体均一温度有 70~90℃和 130~170℃两个主峰(图 4),表明研究区存在两期古流体活动。结合沉积埋藏史分析,可以确定该两期分别对应燕山期和喜马拉雅期构造运动^[18]。

在构造演化作用过程中,古流体主要沿断裂带及构造裂缝活动,并形成相关的脉体而保存。古流体的盐度低,反映了大气水参与对卤水的稀释,是保存条件不好的一种表现;古流体的盐度高,则反映古大气水下渗作用弱或没有受到影响,保存条件较好-好。一般

表 2 米仓-大巴山地区古大气水下渗深度估算

Table 2 Infiltration depth of ancient meteoric water in Micang-Daba area

层位	样品数量/个	$\delta^{13}\text{C(PDB)}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O(PDB)}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O(SMOW)}/\text{‰}$	古温度/℃	古大气水下渗深度/m
T	28	-11.4~-1.3/ -4.3	-16.3~-3.9/ -10.6	14.1~26.8/ 20.0	35.1~118.3/ 76.5	629.8~4 096.4/ 2 352.8
P	35	-18.0~1.1/ -3.6	-16.3~-4.4/ -9.5	14.1~26.4/ 21.0	37.7~118.3/ 69.7	738.0~4 096.4/ 2 071.3
S	6	-5.0~4.6/ -1.7	-17.7~-6.4/ -11.7	12.6~24.3/ 18.8	49.2~129.8/ 85.3	853.7~4 574.8/ 2 104.5
O	25	-4.4~-0.2/ -1.9	-21.7~-6.0/ -13.2	8.5~24.7/ 17.2	46.9~164.9/ 96.5	1 121.0~6 039.4/ 3 287.5
Є	13	-10.9~-2.2/ -5.1	-15.6~-8.4/ -12.1	14.8~22.2/ 18.4	61.5~112.7/ 87.2	1 728.8~3 863.8/ 2 799.5

注:表中数据为最小值~最大值/平均值。

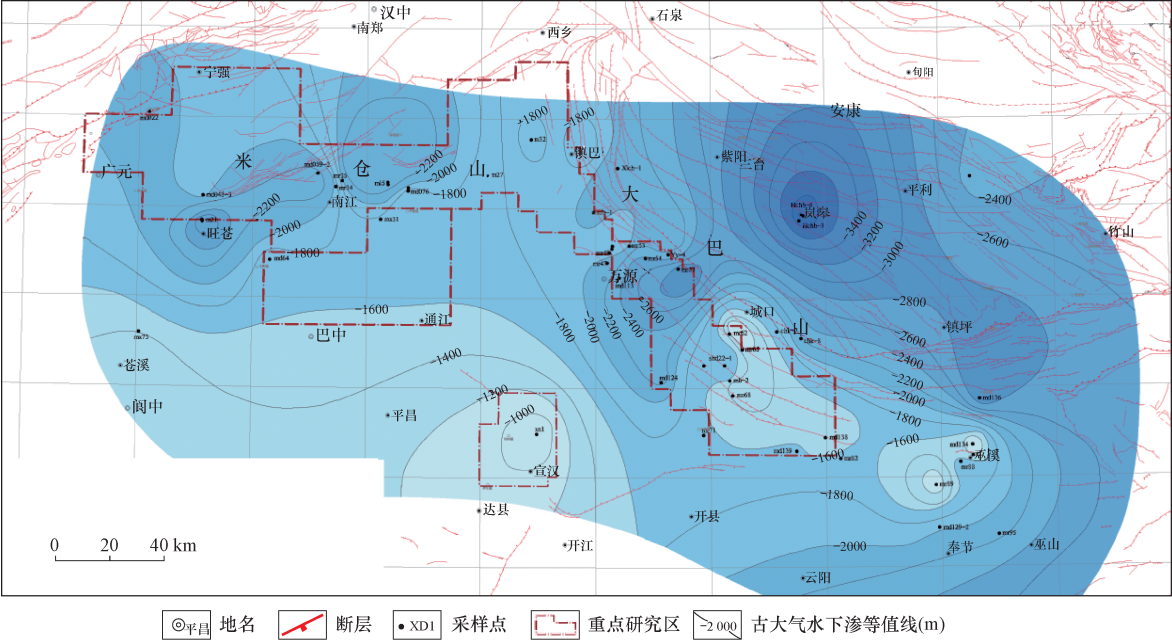


图3 米仓-大巴山地区古大气水下渗深度平面分布

Fig.3 Contour of depth of ancient meteoric water infiltration in the study area

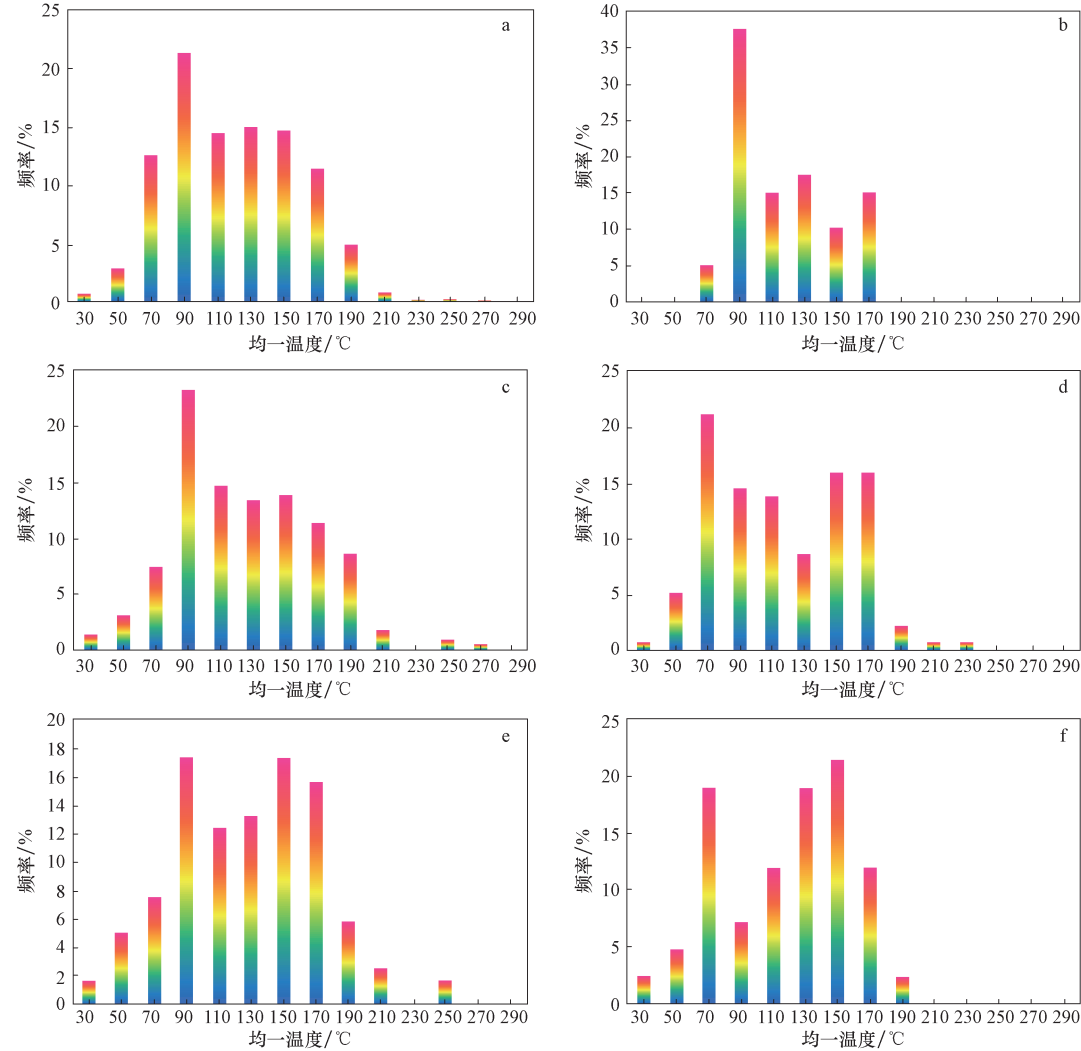


图4 米仓-大巴山前带及周缘方解石脉包裹体均一温度分布特征

Fig.4 Homogenization temperature distribution of calcite vein inclusions in Micang-Daba piedmont and its adjacent area

a. 全部海相地层; b. 全区下古生界; c. 全区二叠系; d. 全区三叠系; e. 大巴山前带二叠系; f. 大巴山前带三叠系

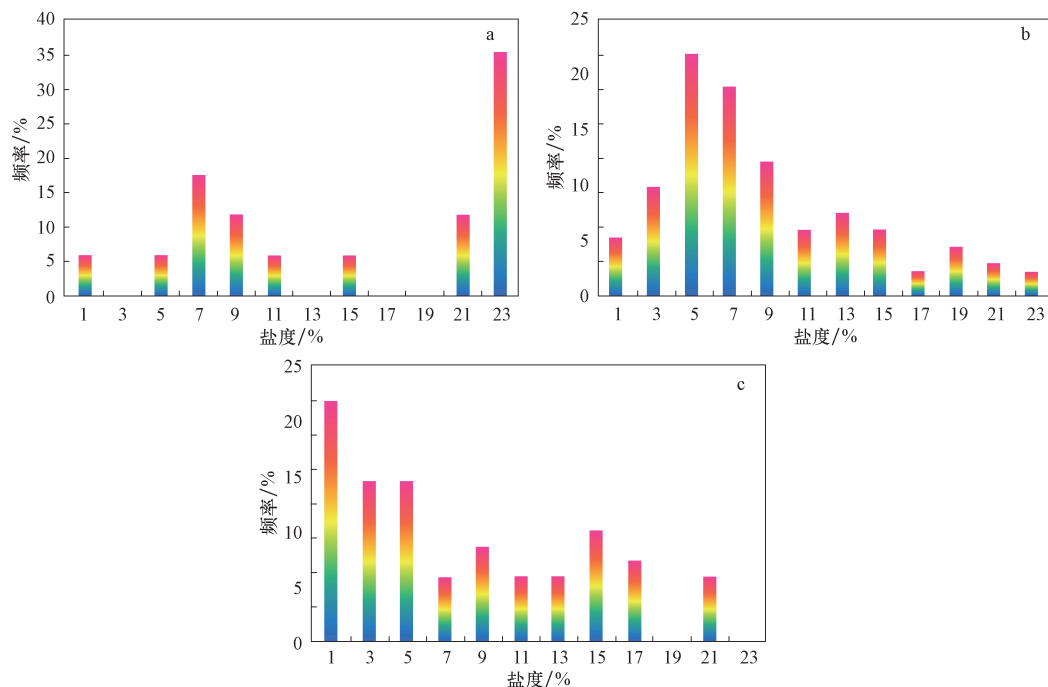


图5 米仓-大巴山前带及周缘各地层流体包裹体盐度分布特征

Fig. 5 Salinity distribution of fluid inclusions in each layer in Micang-Daba piedmont and its adjacent area

a. 下古生界; b. 二叠系; c. 三叠系

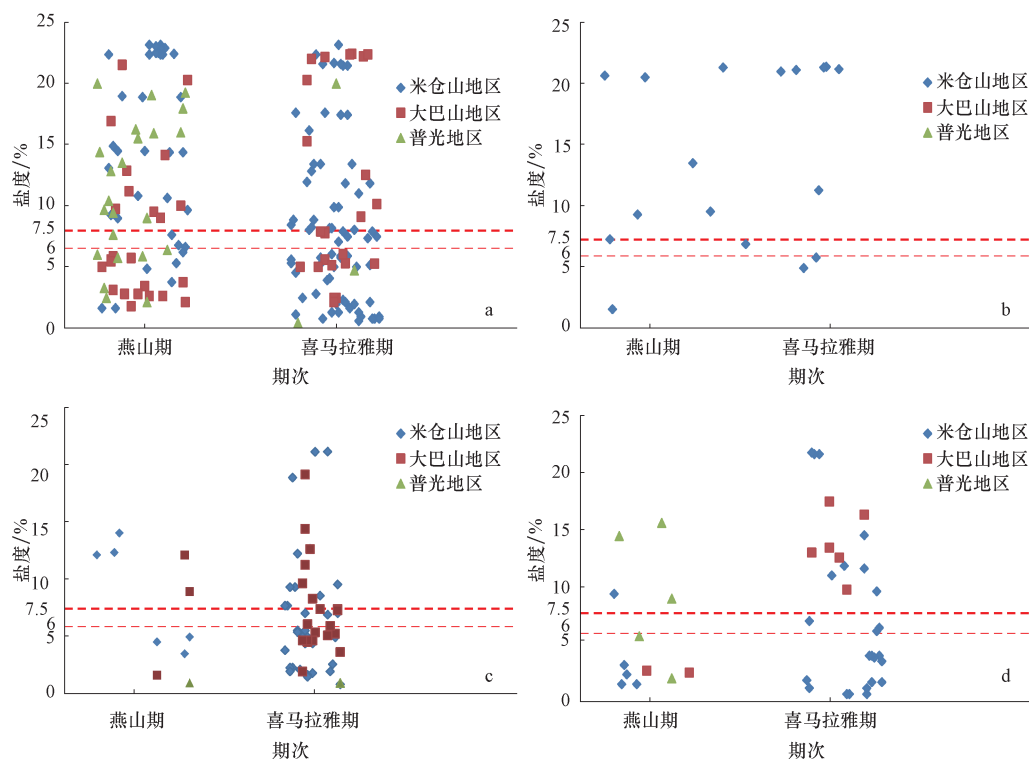


图6 米仓-大巴山前带及周缘地区流体包裹体盐度分布特征

Fig. 6 Salinity distribution of fluid inclusions in calcite veins of the Micang-Daba piedmont zone and its adjacent area

a. 全部海相地层; b. 下古生界; c. 二叠系; d. 三叠系

来说,低盐度区(小于6%)烃类保存条件不好,中等盐度区(6%~8%)烃类保存条件一般,高盐度区(>8%)保存条件较好。

从图5可看出,下古生界包裹体盐度频率分布主峰在21%~23%,二叠系为5%~9%,三叠系为1%~5%,

随着地层从老到新,盐度频率分布主峰向左漂移,体现出保存条件变差的趋势。各海相地层燕山期断裂古流体盐度(NaCl含量)大于7.5%的样品占65%~82%,反映了海相地层盖层条件在晚燕山运动期间没有被完全破坏,总体上封闭性较好,大气水下渗程度较弱,有利于烃类的

保存(图6);但喜马拉雅期断裂流体盐度相对较低,表明喜马拉雅期盆地冲断褶皱和抬升剥蚀过程中,大气水下渗作用加强,下渗深度增大,保存条件变差^[19]。

5 结论

1) 通过研究该区构造裂隙充填方解石脉碳、氧同位素特征,分析其成岩环境、物质来源和大气水混入情况。变化趋势表明,从盆地经山前带到盆地外,大气水下渗作用增强,山前带古大气水下渗深度普遍在1 200 ~ 3 000 m。

2) 利用方解石脉包裹体均一温度和盐度值频率分布情况,推断出研究区存在两期古流体运动,对应燕山期和喜马拉雅期构造运动。

3) 米仓-大巴山前带及其周缘(尤其是强变形带)地层古流体活动活跃,油气保存条件的破坏应在晚燕山-喜马拉雅运动。裂缝发育的碳酸盐岩地层中自生矿物充填物丰富,包裹体测试结果表明参与形成喜马拉雅期自生矿物的古流体盐度较低,表明受到的大气水下渗混合作用的影响较大,油气保存条件变差。

参 考 文 献

- [1] 王国芝,刘树根.海相碳酸盐岩区油气保存条件的古流体地球化学评价——以四川盆地中部下组合为例[J].成都理工大学学报(自然科学版),2009,36(6):631-644.
Wang Guozhi, Liu Shugen. Paleo-fluid geochemical evaluation of hydrocarbon preservation in marine carbonate rock areas: taking lower association central Sichuan Basin as example[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2009, 36(6): 631-644.
- [2] 楼章华,金爱民,付孝悦.海相地层水文地球化学与油气保存条件评价[J].浙江大学学报(工学版),2006,40(3):501-505.
Lou Zhanghua, Jin Aimin, Fu Xiaoyue. Study on hydro-geochemistry and evaluation technology of petroleum preservation conditions for marine strata[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2006, 40(3): 501-505.
- [3] 楼章华,李梅,金爱民,等.中国海相地层水文地质地球化学与油气保存条件研究[J].地质学报,2008,82(3):387-396.
Lou Zhanghua, Li Mei, Jin Aimin, et al. Hydrogeological and hydro-geochemical characteristics and hydrocarbon preservation conditions for marine strata in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(3): 387-396.
- [4] 吴世祥,汤良杰,郭彤楼,等.米仓山与大巴山交汇区构造分区与油气分布[J].石油与天然气地质,2005,26(3):361-365,390.
Wu Shixiang, Tang Liangjie, Guo Tonglou, et al. Structural zonation and oil/gas distribution in intersection area of Micang and Daba Mountains[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(3): 361-365, 390.
- [5] 王顺玉,戴鸿鸣,王海清,等.大巴山、米仓山南缘烃源岩特征研究[J].天然气地球科学,2000,11(4):4-16.
Wang Shunyu, Dai Hongming, Wang Haiqing, et al. Source rock feature of the south of the Dabashan and Micangshan[J]. Natural Gas Geoscience, 2000, 11(4): 4-16.
- [6] 王琪,嵇喜准,陈国俊,等.延长组砂岩中碳酸盐胶结物氧碳同位素组成特征[J].天然气工业,2007,27(10):28-32.
Wang Qi, Zhuo Xizhun, Chen Guojun, et al. Characteristics of carbon and oxygen isotopic compositions of carbonate cements in Triassic Yanchang sandstone in Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(10): 28-32.
- [7] 陈道公.地球化学[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1992:199-201.
Chen Daogong. Geochemistry[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 1992: 199-201.
- [8] 李梅.黔南桂中坳陷水文地质地球化学与油气保存条件研究[D].杭州:浙江大学,2011.
Li Mei. Hydrogeology-geochemistry characteristics and the conditions of hydrocarbon preservation in Qiannan-Guizhong Depression[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [9] 张理刚.稳定同位素在地质科学中的应用[M].西安:陕西科学技术出版社,1985:267.
Zhang Ligang. The application of isotopic in geoscience[M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1985: 267.
- [10] 王大锐.塔里木盆地中、上奥陶统烃源岩的碳同位素宏观证据[J].地质论评,2000,46(3):328-334.
Wang Darui. Macro-evidence of carbon isotopic for the Middle-Upper Ordovician source rocks in the Tarim Basin[J]. Geological Review, 2000, 46(3): 328-334.
- [11] Keith M L, Weber J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1964, 28(10): 1787-1816.
- [12] Jin Aimin, Lou Zhanghua, Zhu Rong, et al. Origin and distribution of groundwater chemical fields of the oilfield in the Songliao Basin, NE China[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(5): 688-696.
- [13] 金爱民,尚长健,朱蓉,等.桂中坳陷及周缘地下水化学-动力学特征与油气保存[J].中国矿业大学学报,2011,40(5):758-765.
Jin Aimin, Shang Changjian, Zhu Rong, et al. Ground hydro-chemical & hydrodynamic characters and hydrocarbon preservation in Guizhong Depression and its margin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(5): 758-765.
- [14] 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 Xiulian. 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.
- [15] Urey H C. Oxygen isotopes in nature and in the laboratory[J]. Science, 1948, 108(10): 489-496.
- [16] Epstein S, Buchsbaum R, Lowenstam H A, et al. Revised carbonate-water isotopic temperature scale[J]. Geological Society of America Bulletin, 1953, 64(11): 1315-1326.
- [17] Shackleton N J. Attainment of isotopic equilibrium between ocean water and the benthonic foraminifera genus *Uvigerina*: Isotopic changes in the ocean during the last glacial[J]. Colloques International du Centre National du Recherche Scientifique, 1974, 219: 203-210.
- [18] 刘昭茜,梅廉夫,郭彤楼,等.川东北地区海相碳酸盐岩油气成藏作用及其差异性——以普光、毛坝气藏为例[J].石油勘探与开发,2009,36(5):552-561.
Liu Zhaoqian, Mei Lianfu, Guo Tonglou, et al. Characteristics and differences of hydrocarbon accumulations in marine carbonate rocks, northeast Sichuan Basin: a case study from Puguang and Maoba gas fields[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(5): 552-561.
- [19] 楼章华,尚长健,姚根顺,等.桂中坳陷及周缘海相地层油气保存条件[J].石油学报,2011,32(3):432-441.
Lou Zhanghua, Shang Changjian, Yao Genshun, et al. Hydrocarbon preservation conditions in marine strata of the Guizhong Depression and its margin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 432-441.

(编辑 张玉银)