

利用油包裹体荧光光谱多参数 划分油气充注幕次

——以塔里木盆地麦盖提斜坡巴什托构造带石炭系为例

斯尚华^{1,2}, 陈红汉², 袁丙龙³, 雷明珠³, 陈杨³

(1 西安石油大学地球科学与工程学院; 2 中国地质大学(武汉)资源学院; 3 中海油湛江分公司)

摘要 以塔里木盆地麦盖提斜坡巴什托构造带石炭系油气成藏规律研究为例,通过实验检测,识别出石炭系储层中发育黄色、黄绿色、蓝绿色和蓝白色等4种荧光颜色的原油包裹体,从黄色到蓝白色,代表了油包裹体中充注油的成熟度逐渐增大;利用原油包裹体的荧光光谱计算出主峰波长 λ_{\max} 、红绿熵 Q 及 Q_{F335} 等属性参数,通过分析 λ_{\max} 与 Q_{F335} 相关关系所具有的4种特征,判定石炭系油气藏在地质历史时期经历了4幕油气充注;流体包裹体的均一温度特征,也反映出4幕不同热演化程度的原油充注。推断海西晚期是巴什托构造带石炭系重要的油气成藏期。

关键词 塔里木盆地; 麦盖提斜坡; 巴什托构造带; 石炭系; 原油包裹体; 荧光光谱; 红绿熵; 油气充注幕次

中图分类号: TE122.1⁺2

文献标识码: A

麦盖提斜坡是塔里木盆地西南坳陷内的次级构造单元,整体呈北西西—南东东向展布(图1)。巴什托构造带位于麦盖提斜坡西北部,构造带内石炭系主要发育下统的巴楚组和卡拉沙依组、上统的小海子组,石炭系的其他层位基本缺失,并且已在麦10井等处的巴楚组和小海子组获得工业油气流。前人从构造演化、沉积环境、储集层和成藏特征等方面已对麦盖提斜坡做了大量研究工作^[1-5],然而对于成藏时期及成藏期次还没有一致性的认识。马红强等^[3]根据生排烃历史分析,认为麦盖提地区主要有3期成藏,即加里东晚期—海西早期、海西晚期和喜马拉雅期。其中加里东晚期—海西早期油藏多被破坏;海西晚期油藏保存有好有差,后期又有调整;喜马拉雅期为气藏形成期与古油藏调整期。郭光辉等^[1]认为麦盖提斜坡奥陶系风化壳储层具有海西晚期成油、喜马拉雅晚期调整与原油裂解气再成藏的2期充注史。以上研究都是从生排烃历史、构造圈闭形成时期等方面来揭示麦盖提斜坡油气成藏时期及期次的,针对巴什托构造带精细成藏期次的研究成果则较少。本文从原油包裹体荧光光谱特征着手,定量分析巴什托

构造带石炭系油气的成藏期次及各期次原油的相对成熟度,以期对研究区的油气勘探有所裨益。

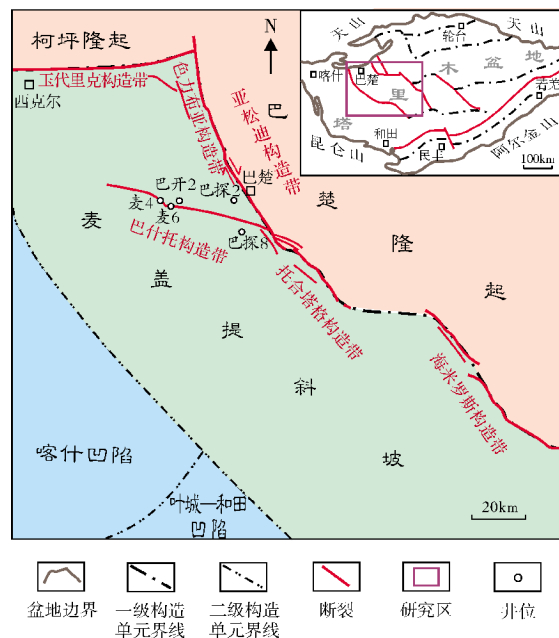


图1 研究区构造位置

收稿日期: 2017-06-07; 改回日期: 2018-01-04

本文受国家“973”项目“塔里木盆地构造差异演化与下古生界油气成藏过程”(编号:2012CB214804)和国家自然科学基金“鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩气成岩、成藏耦合机理研究”(编号:41372148)资助

斯尚华: 1981年生,博士,研究方向为油气成藏地质。通讯地址: 710065 陕西省西安市雁塔区电子二路18号石油大学; E-mail: sishanghua0724@qq.com

1 原油包裹体荧光光谱参数计算方法

流体包裹体紫外线荧光发射光谱法是一种非破坏性分析方法,发射光谱可以通过光谱仪进行定量记录,或通过肉眼定性观察荧光的颜色,后者反映了石油包裹体组分的差异。利用油包裹体荧光光谱的主峰波长 λ_{\max} 、红绿熵值 Q 和 Q_{F535} 这三个参数可以判断古油藏成熟度,以及不同油包裹体与古油藏的亲缘关系。

红绿熵(Q)的方法在国外 1980 年代已经有较为成熟的研究^[6],国内学者则更多地将其应用于有机岩石学的研究^[7]。油包裹体微束荧光光谱的红绿熵 Q 的定义为: $Q = I_{650} / I_{500}$ ^[8],公式中: I_{650} 为光谱波长 650 nm 所对应的荧光强度, I_{500} 为光谱波长 500 nm 所对应的荧光强度(图 2)。 I_{650} 值越大,反映包裹体油中含有越多的大分子组分,表明油的成熟度越低;而 I_{500} 值越大,则反映包裹体油中含有更多的小分子组分,表明油的成熟度越高。所以,红绿熵值(Q)越大,包裹体中油的成熟度越低,反之,包裹体中油的成熟度则越高。

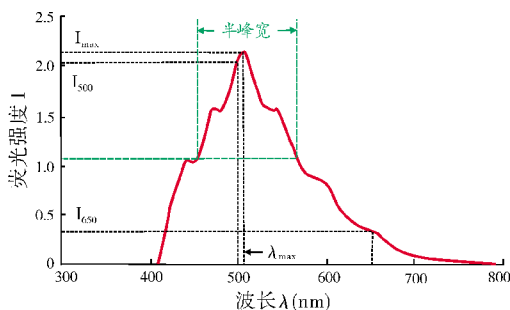


图 2 油包裹体显微荧光光谱红绿熵 Q 值和 λ_{\max} 参数定义

而 λ_{\max} 为油包裹体微束荧光光谱主峰所对应的波长(图 2)。 λ_{\max} 越大则红移,表明油的成熟度越低; λ_{\max} 越小则蓝移,表明油的成熟度越高。

Q 与 λ_{\max} 的关系能够更好地反映油包裹体成熟度,但是该关系对于相同波长则存在 Q 值不够收敛的缺点,因此我们提出一个新的荧光光谱参数 Q_{F535} ,其计算依据为: $Q_{F535} = S(\lambda_{720} \sim \lambda_{535}) / S(\lambda_{535} \sim \lambda_{420})$,即:波长 720 nm 和波长 535 nm 所限定的面积与波长 535 nm 和波长 420 nm 所限定的面积之比(图 3)。 Q_{F535} 越大,油包裹体液相密度就越大,反映包裹体油中含有越多的大分子组分,表明油的成熟度越低;而

Q_{F535} 越小,油包裹体液相密度就越小,反映包裹体油中含有更多的小分子组分,表明油的成熟度越高^[9-10]。

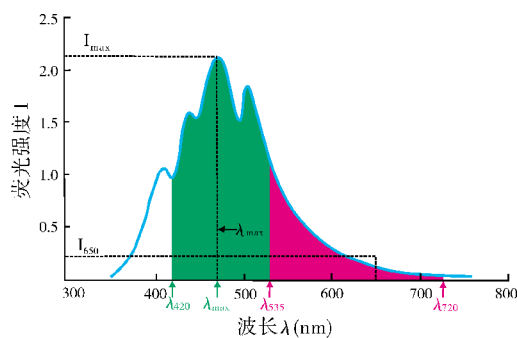


图 3 油包裹体显微荧光光谱 Q_{F535} 参数定义

笔者在巴什托构造带中选取了 5 口井 12 块石炭系的包裹体样品,利用美国 Ocean Optics 公司 SD2000 型荧光光谱测定仪,通过波长为 365 nm 的激发光,对岩样中单个油包裹体逐一进行微束荧光光谱测定,从而获得单个油包裹体典型微束荧光光谱,并计算了不同荧光颜色油包裹体 λ_{\max} 、 Q 和 Q_{F535} 值。在实验样品中检测到有 4 种不同荧光颜色的油包裹体,例如在麦 6 井灰质白云岩样品的方解石裂纹中,见到发蓝白色荧光的油包裹体(图 4a, 4b);在巴开 2 井石灰岩样品的方解石裂纹中,见到发黄绿色荧光的油包裹体(图 4c, 4d)和发蓝绿色荧光的油包裹体(图 4e, 4f);在巴探 8 井砂屑灰岩样品溶孔充填的方解石中,检测到有发黄色荧光的油包裹体(图 4g, 4h)。大量实验分析结果表明,有机质热演化程度可以用荧光颜色来表示^[11-15],即随着有机质成熟度由低到高的演化阶段,其荧光颜色由红色→黄色→黄绿色→蓝绿色→蓝色。巴什托构造带石炭系原油包裹体发 4 种不同颜色荧光,指示着不同幕次充注油气的成熟度有较大差异。

2 油气充注幕次及其相对成熟度

利用不同荧光颜色油包裹体的荧光光谱主峰波长 λ_{\max} 、红绿熵 Q 和 Q_{F535} 值(表 1),结合储集层原油包裹体荧光光谱的形态结构可以看出,巴什托构造带麦 4 井、麦 6 井、巴开 2 井等 3 口井的石炭系巴楚组主峰波长分别表现为两组不同值(表 1, 图 5a—5c),说明这些井石炭系巴楚组至少存在 2 幕不同成熟度的原油充注;巴探 8 井的石炭系主峰波长表现出 3 组不同

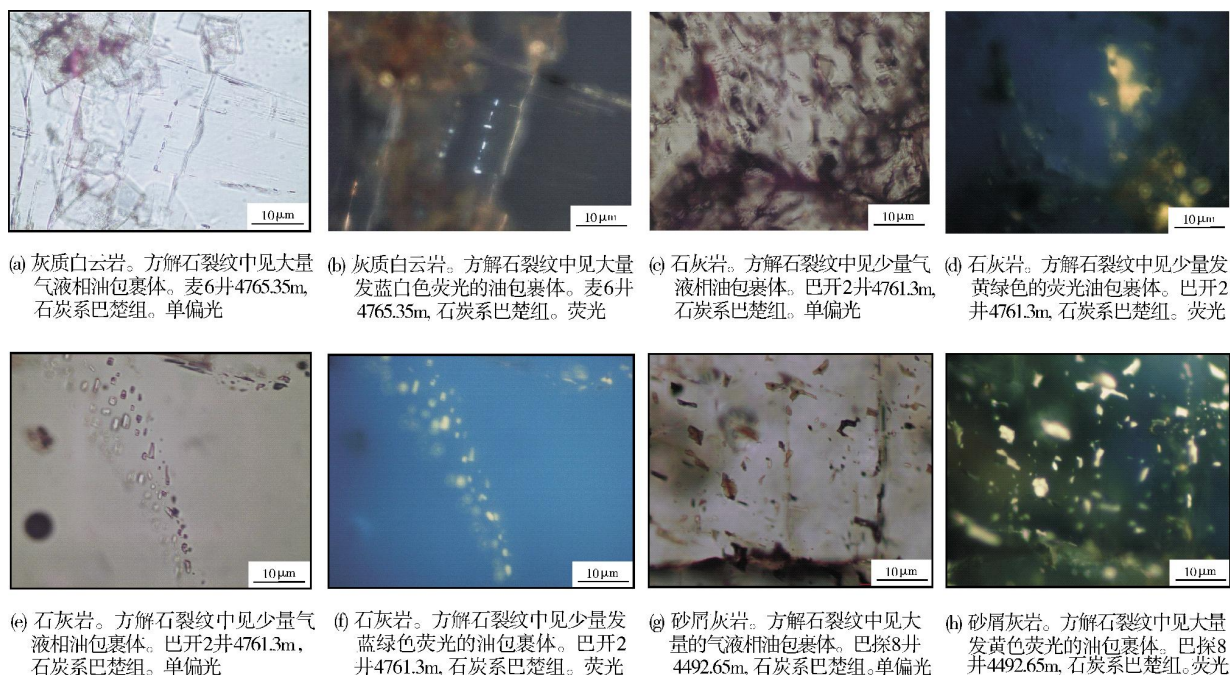


图4 巴什托构造带石炭系代表性流体包裹体产状及油包裹体荧光颜色

值(表1,图5d),说明巴探8井至少存在3幕不同成熟度的原油充注。受烃源灶影响,这4口井显微荧光光谱的波峰形态也不尽相同(图5),这表明不同颜色荧光的油可能来自于不同烃源灶。

从表1中可看出,巴什托构造带石炭系第1幕黄色荧光油包裹体 $\lambda_{\max}=581.80\sim585.84\text{ nm}$, $Q=1.00\sim1.46$, $Q_{F535}=2.28\sim3.52$,为一幕低成熟度油充注;第

2幕黄绿色荧光油包裹体 $\lambda_{\max}=529.57\sim546.30\text{ nm}$, $Q=0.31\sim0.89$, $Q_{F535}=0.96\sim2.15$,为一幕低成熟度油充注;第3幕蓝绿色荧光油包裹体 $\lambda_{\max}=488.47\sim521.48\text{ nm}$, $Q=0.13\sim0.57$, $Q_{F535}=0.57\sim1.42$,为一幕中高成熟度油充注;第4幕蓝白色荧光油包裹体 $\lambda_{\max}=459.28\sim462.01\text{ nm}$, $Q=0.24\sim0.40$, $Q_{F535}=0.76\sim1.10$,为一幕高成熟度油充注。

表1 巴什托构造带单井石炭系巴楚组原油包裹体荧光光谱参数

井号	深度(m)	油包裹体 荧光颜色	幕次	λ_{\max} (nm)	Q	Q_{F535}
麦4	4754.46~4764.50	蓝绿	第3	493.85~521.48	0.34~0.57	0.90~1.39
		蓝白	第4	459.28~461.56	0.30~0.40	0.80~1.10
麦6	4766.50~4770.33	蓝绿	第3	493.85~519.67	0.41~0.57	1.16~1.42
		蓝白	第4	460.19~462.01	0.24~0.39	0.76~1.10
巴开2	4761.3	黄绿	第2	529.57~535.94	0.31~0.50	0.96~1.31
		蓝绿	第3	488.47~495.80	0.19~0.37	0.66~1.01
巴探2	4312.5	蓝绿	第3	494.30~498.84	0.34~0.38	0.93~1.09
		黄	第1	581.80~585.84	1.00~1.46	2.28~3.52
巴探8	4483.76~4497.30	黄绿	第2	538.19~546.30	0.44~0.89	1.28~2.15
		蓝绿	第3	492.03~517.86	0.13~0.50	0.57~1.32

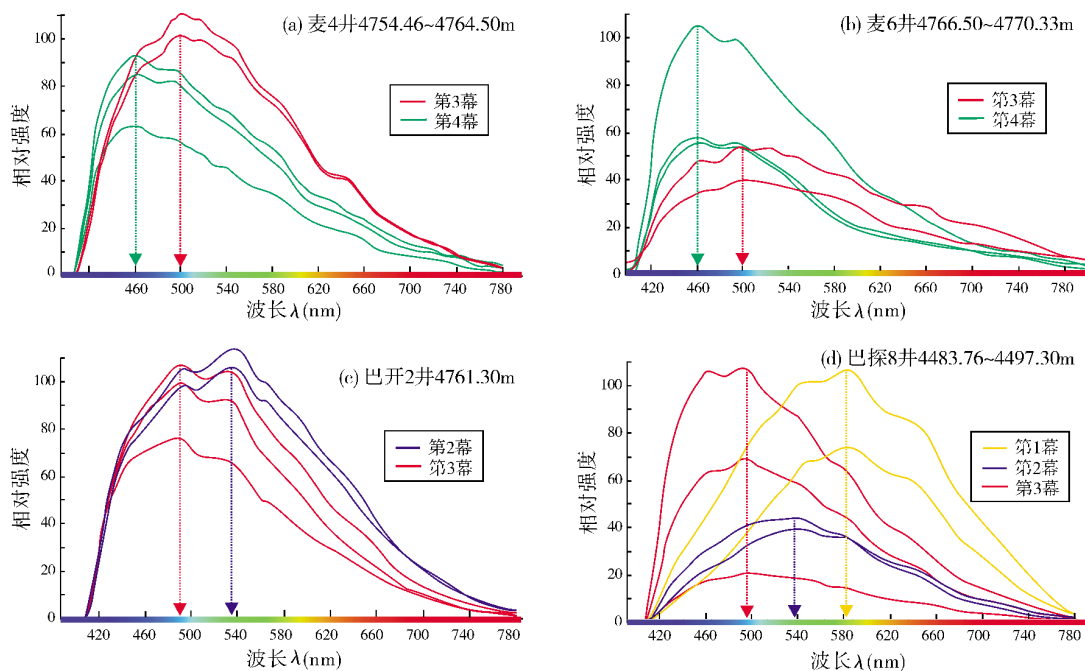
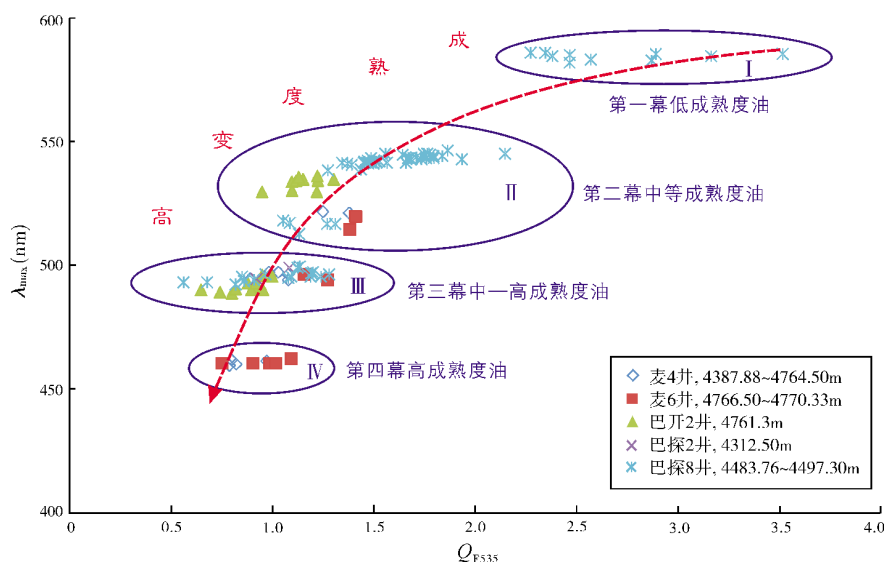


图5 巴什托构造带单井石炭系巴楚组原油包裹体典型光谱

从巴什托构造带石炭系储集层原油包裹体荧光光谱的 λ_{\max} — Q_{F535} 相关关系来看(图6),亦反映出4种类型,它们的特征分别为:(I)黄色荧光区域,其 Q_{F535} 值分布域较广,位于2.28~3.52之间, λ_{\max} 位于581.80~585.84 nm;(II)黄绿色荧光区域,其 Q_{F535} 值分布域非常广,位于0.96~2.15之间, λ_{\max} 位于529.57~546.30 nm;(III)蓝绿色荧光区域,其 Q_{F535} 值分布域较广,位于0.57~1.42之间, λ_{\max} 位于488.47~521.48 nm;

(IV) 蓝白色荧光区域,其 Q_{F535} 值分布域较窄,位于0.76~1.10之间, λ_{\max} 位于459.28~462.01 nm。从区域I→区域II→区域III→区域IV,荧光光谱 Q_{F535} 值逐渐减小,反映了油包裹体所捕获油的成熟度逐渐增高。 λ_{\max} — Q_{F535} 相关关系展现出巴什托构造带石炭系原油包裹体存在4种特征类型,可以综合判定,巴什托构造带石炭系储集层在地质历史时期经历了4幕油气充注。

图6 巴什托构造带石炭系原油包裹体成熟度 λ_{\max} — Q_{F535} 关系

3 油气成藏时期

基于流体包裹体显微测温结果,认为巴什托构造带石炭系流体活动历史比较复杂,这由均一温度检测也可以看出(图7):巴什托构造带石炭系在历史时期共发育5幕热流体活动,其中4幕伴随着油气充注过程。

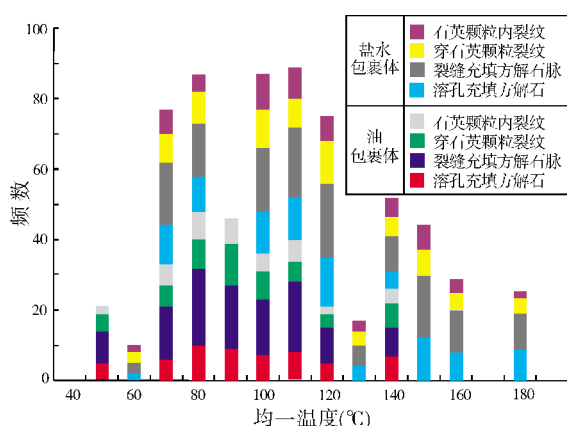


图7 巴什托构造带石炭系流体包裹体均一温度频率

这5幕热流体活动的盐水均一温度范围分别为:(1)56.7~77.7℃;(2)84.2~96.4℃;(3)100.7~125.9℃;(4)122.7~143.3℃;(5)152.4~179.5℃。相应的4幕油充注的均一温度范围为:(1)22.3~66.1℃;(2)66.6~89℃;(3)91.3~109.8℃;(4)116~146.6℃。其中,第2幕、第3幕油充注的均一温度相差很小,基本为一个连续过程,推测可能为多幕连续充注的结果。其中,巴开2井在4 761.3~4 763.1 m的油包裹体均一化温度为56.7~131.2℃,由于古地温梯度高于现今的地温梯度,因此,据现今地温梯度计算的包裹体形成深度较实际深度要深,据现今录井资料拟合出的地温梯度曲线,推算巴开2井包裹体应形成于2 500~2 625 m,若取地表温度14℃、石炭纪地温梯度3℃/100 m,则包裹体实际形成深度为1 196 m,形成于晚二叠世。同样,巴探8井4 483.76~4 497.30 m油包裹体形成深度为1 123 m,即形成于晚二叠世(海西晚期)。

海西晚期是巴什托构造带油气藏的主要形成时期,此时这个构造带的古构造不再发育在东侧,而是调整到西侧,构造圈闭与寒武系烃源岩生油高

峰期相匹配,寒武系烃源岩生成的中等成熟的油气沿巴什托断裂垂直向巴楚组储层充注,使巴什托构造带上这些早期就已经存在的层系,在这个时期含油气面积扩大,而志留系、泥盆系的储层因被火山活动伴生的碳酸盐热液改造,使得储层变差,而不再接受这个时期形成的油气储集,仅仅是在石炭系巴楚组这一储层相对较好的层系充注油气。

4 结论

(1)油包裹体是油气运聚成藏的直接证据,通过微束荧光光谱检测及量化描述,可利用光谱的属性参数特征及参数间的相关关系有效地进行油气充注期次研究,且该方法简便高效。

(2)通过流体包裹体荧光观察表明,巴什托构造带石炭系储集层中检测到发黄色、黄绿色、蓝绿色和蓝白色等4种荧光颜色的油包裹体,从黄色到蓝白色,代表油包裹体中充注油的成熟度逐渐变高。

(3)巴什托构造带石炭系原油包裹体主峰波长 λ_{\max} 与 Q_{F535} 相关关系表现出4种特征类型,表明在地质历史时期研究区共经历了4幕油气充注,其中海西晚期应该是一重要的成藏期。

参考文献

- [1] 郭光辉,李洪辉,张立平,等.塔里木盆地麦盖提斜坡奥陶系风化壳成藏条件[J].石油勘探与开发,2012,39(2):144-153.
- [2] 范明,郑冰.麦盖提斜坡地层-岩性圈闭类型[J].石油实验地质,2001,23(1):38-40.
- [3] 马红强,王恕一,蔺军.塔里木盆地巴楚—麦盖提地区油气运聚与成藏[J].石油实验地质,2006,28(3):243-248.
- [4] 张现军,王月华,玛丽克,等.塔里木盆地麦盖提斜坡西段上石炭统研究新进展[J].新疆石油地质,2006,27(1):56-58.
- [5] 刘高波,施泽进,余晓宇.巴楚—麦盖提的区域构造演化与油气分布规律[J].成都理工大学学报:自然科学版,2004,31(2):157-161.
- [6] Hagemann W H, Hollerbach A. The fluorescence behavior of crude oils with respect to their thermal maturation and degradation[J]. Organic Geochemistry, 1986, 10(1/3): 473-480.
- [7] 李荣西,金奎励,廖永胜.有机包裹体显微傅立叶红外光谱和荧光光谱测定及其意义[J].地球化学,1998,27(3):244-249.

- [8] Burruss R C. Practical aspects of fluorescence microscopy of petroleum fluid inclusions[J]. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1991, 25(1): 1-7.
- [9] 苏奥, 陈红汉, 平宏伟. 次生作用对原油和油包裹体荧光颜色及光谱参数的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(3): 668-673.
- [10] 李纯泉, 陈红汉, 刘惠民. 利用油包裹体微束荧光光谱判识油气充注期次[J]. 地球科学 中国地质大学学报, 2010, 35(4): 657-662.
- [11] 张鼎, 赵瑞华, 张帝嘉, 等. 塔中 I 号带奥陶系烃包裹体荧光特征与成藏期[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 63-68, 75.
- [12] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-8.
- [13] 斯尚华, 陈红汉, 谭先锋, 等. 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[J]. 地球科学 中国地质大学学报, 2013, 38(6): 1271-1280.
- [14] Goldstein R H, Regnolds T J. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals[J]. SEPM Short Course, 1994, 31: 69-85.
- [15] 刘德汉, 卢焕章, 肖贤明. 油气包裹体及其在石油勘探和开发中的应用[M]. 广州: 广东科技出版社, 2007: 135-150.

编辑: 黄革萍

Identification of Hydrocarbon Charging Events by Using Fluorescence Spectrum Multiparameter of Oil Inclusions: A Case Study of Carboniferous in Bashituo Structural Belt of Markit Slope of Tarim Basin

Si Shanghua, Chen Honghan, Yuan Binglong, Lei Mingzhu, Chenyang

Abstract: Take the Carboniferous hydrocarbon accumulation of Bashituo structure belt of Markit slope in Tarim Basin as an example, it is identified four kinds of oil inclusions which developed in Carboniferous reservoir with different fluorescent color, from yellow, yellow-green to blue-green and blue-white. It is shown that the grade of maturity of oil charging in the oil inclusions is gradually increased. The property parameters of main peak wavelength λ_{max} , red-green entropy Q and Q_{F535} were calculated by using the fluorescence spectra of crude oil inclusions. Based on the characteristics of four different types of correlation relationship between λ_{max} and Q_{F535} , it is concluded that the Carboniferous reservoir has experienced four stages of hydrocarbon charging in the geological history, and it also reflected the four stages of oil charging with different thermal evolution according to the homogenization temperature of fluid inclusions. It is inferred that the late Hercynian is the important hydrocarbon accumulation stage in Bashituo structure belt.

Key words: Carboniferous; Oil inclusion; Fluorescence spectra; Red-green entropy; Hydrocarbon charging event; Bashituo structural belt; Markit slope; Tarim Basin

Si Shanghua: PhD, majors in hydrocarbon accumulation geology. Add: Petroleum University, No. 18 Dianzi 2 Rd., Yanta District, Xi'an, Shaanxi 710065, China