

库车坳陷依南 2 气藏油气运移路径及充注特征

范俊佳^{1,2,3,4,†} 潘懋¹ 周海民² 柳少波^{2,3,4} 卓勤功^{2,3,4} 郑永平^{2,3,4}

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;
3. 中国石油集团盆地构造与油气成藏重点实验室, 北京 100083; 4. 提高石油采收率国家重点实验室,
北京 100083; †E-mail: lannyfan@163.com

摘要 在流体包裹体观测、测井曲线及依南 2 气藏综合地质资料分析的基础上, 利用定量荧光技术分析库车坳陷依南 2 气藏 26 块砂岩样品的荧光光谱特征, 揭示该气藏油气运移路径及油气充注特征。研究表明, 依南 2 气藏经历了早期原油充注、原油泄漏与晚期天然气充注过程。由储层砂岩样品的 QGF 定量荧光光谱响应与烃类包裹体分析, 推测依南 2 气藏早期油源来自深部三叠系泥岩层与侏罗系煤层, 通过垂直向上运移, 古油藏经历构造破坏, 发生泄漏, 未形成具有规模的古油藏。QGF-E 荧光光谱响应表明, 天然气运移路径亦为垂直向上运移, 依南 2 气藏储层 4750 m 以下可能为大面积含气区。TSF 荧光指纹图揭示, 依南 2 气藏具有混源特征, 气源由侏罗系煤层和三叠系湖相泥岩烃源岩共同贡献。

关键词 定量颗粒荧光; 荧光光谱; 运移路径; 充注史; 依南 2 气藏

中图分类号 P618

Hydrocarbon Migration Pathway and Charging Characterization of Yinan-2 Gas Reservoir in Kuqa Depression

FAN Junjia^{1,2,3,4,†}, PAN Mao¹, ZHOU Haimin², LIU Shaobo^{2,3,4},
ZHUO Qingong^{2,3,4}, ZHENG Yongping^{2,3,4}

1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083; 3. Key Laboratory of Basin Structure and Hydrocarbon Accumulation, CNPC, Beijing 100083; 4. State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, Beijing 100083;
† E-mail: lannyfan@163.com

Abstract In order to reveal hydrocarbon migration pathway and charging history of Yinan-2 gas reservoir in Kuqa Depression, 26 sand samples from well Yinan-2 were tested by using of Quantitative fluorescence techniques and fluid inclusions observation method based on well log curves and comprehensive geological data analysis. It is indicated that the Yinan-2 gas reservoir experienced oil charging of early stage, oil leakage and gas charging in late stage. Early oil accumulation of Yinan-2 gas reservoir may come from Jurassic coal bearing formation and Triassic lacustrine mudstone formation according to the quantitative grain fluorescence responds of sandstone samples. Current natural gas accumulation was migrated vertically from deep part, and the area below 4750 m might be an extensive and continuous gas-bearing area based on the analysis of quantitative grain fluorescence on extracts of sandstone samples. Besides, total scanning fluorescence fingerprint indicates that the current natural gas accumulation is derived from Jurassic coal seams and Triassic lacustrine mudstone formation.

Key words quantitative grain fluorescence; fluorescence spectrum; migration pathway; charging history; Yinan-2 gas reservoir

依南 2 气藏是塔里木盆地库车坳陷典型的复杂致密气藏。该气藏位于塔里木盆地库车坳陷依奇克里克构造带东段依南背斜构造高部位,为一断鼻构造。该气藏地层抬升较高,构造变形强烈,发育逆冲断层^[1]。前人对依南 2 气藏的构造特征、成藏特征、成藏类型等开展了一系列研究,认为依南 2 气藏主要形成于库车期后,属煤型气^[1-4]。油气包裹体研究表明,该区主要存在两期油气充注,具有早油晚气的特征,库车坳陷主力油源层是三叠系湖相泥岩,天然气的主力气源岩是侏罗系阳霞组和克孜努尔组,其中三叠系泥岩对天然气成藏的贡献比较小^[2-9]。也有学者通过天然气甲烷同位素分析,认为依南 2 气藏的主要气源岩应为三叠系^[10]。对于库车地区早油晚气的充注特征已基本达成共识,但关于依南 2 气藏的油气分布、运移路径等特征尚无统一认识。本文在前人工作的基础上,在依南 2 气藏侏罗系阿合组和阳霞组储层段系统取样,利用定量荧光分析技术和流体包裹体观测,对储层段进行全面分析,探讨依南 2 气藏的油气充注史、运移路径和天然气特征,旨在总结该地区油气分布规律,指导油气勘探。

1 实验方法与样品制备

1.1 实验方法

定量荧光分析技术(包括 QGF, QGF-E 和 TSF 分析)可通过样品检测储层岩石颗粒包裹体中烃类和颗粒表面的吸附烃,可应用于残留烃、古油水界面的检测及油气充注史的研究等,其分析结果客观,可信度高^[11-15]。QGF 分析主要用于确定样品中包裹烃/包裹体是否存在和确定古油水界面,分析古油藏内油气分布规律。QGF 分析的主要参数有 QGF 指数、 λ_{\max} 、 $\Delta\lambda$ 和 QGF 强度。QGF 指数是指波长在 375~475 nm 范围内平均光谱强度与波长 300 nm 处光谱强度的归一化值, λ_{\max} 是最大光谱强度对应的波长值, $\Delta\lambda$ 是 1/2 最大光谱强度的波长宽度,QGF 强度是光谱图面积与波长 300 nm 处光谱强度的比值。QGF-E 分析是 QGF 分析的拓展,其分析结果可识别油的成分,用于勘探和钻井评价过程中现今残余油层的判定,从而识别古油水界面与残留油水界面。QGF-E 分析的参数主要有 QGF-E 强度、 I_{\max} 和 λ_{\max} 。QGF-E 强度是归一化到 1 g 样品在 20 mL 二氯甲烷(DCM)溶液中的最大光谱强度。 I_{\max} 是样品的最大光谱强度, λ_{\max} 是最大光谱强度对应

的波长^[12]。TSF 分析可用于分析原油和颗粒中包裹体的油气性质,如成熟度、API 特征、烃类特征及含量等。

样品的预处理需要经过标准化处理流程^[12,16]。取少量岩芯样品研磨过筛,显微镜下观察是否为单颗粒,取 2 g 左右 60~80 目粒径的单颗粒装入烧杯,倒入 20 mL DCM,超声波振荡 10 分钟,倒出溶剂,将样品干燥;加入 40 mL 浓度为 10%的双氧水,用超声波振荡 10 分钟,静置 40 分钟,再用超声波振荡 10 分钟,用蒸馏水将样品清洗 3 次;加入 40 mL 浓度为 3.6%的盐酸,用玻璃棒搅拌 20 分钟,然后用蒸馏水洗净后在 80℃左右恒温箱中烘干;最后加入 20 mL DCM,超声波振荡 10 分钟,保存 DCM 溶液用于 QGF-E 与 TSF 分析,烘干样品做 QGF 分析。

1.2 样品制备

依南 2 气藏位于库车坳陷依奇克里克构造带(图 1)。该构造带是库车坳陷主要的逆冲构造带,近年来该地区油气勘探取得重大进展。依南 2 气藏油气显示活跃,自吉迪克组 2597 m 开始见油气显示,一直到石炭系,油气层多达 56 层。主要油气产层侏罗系阳霞组和阿合组属于低孔低渗储层,平均孔隙度为 3.6%~6.4%,平均渗透率低于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。在 4578~4783 m 井段中途测试,获得约 $10.86 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产天然气,从而揭示依南地区侏罗系具有较大的天然气资源潜力。为研究依南 2 气藏油气运移路径与充注特征,我们对依南 2 井侏罗系阳霞组和阿合组 4530~4992 m 段钻井岩芯隔 5~10 m 系统取样 26 块,样品岩性为长石岩屑砂岩。

2 实验结果

2.1 储层颗粒包裹体 QGF 指纹特征

样品的 QGF 荧光响应结果见表 1 及图 2 和 3。依南 2 井 QGF 指数范围在 1.8~22.8 之间。总体上,井深 5000~4821 m 范围内 QGF 指数较高,最高值为 22.8;而在 4821~4534 m 范围内,QGF 指数较低。其中,QGF 指数最小值位于埋深 4582 m 处,最大值位于 4821 m 处。古水层的 QGF 指数参考值为 4~5,通常认为,大于参考值的为古油层,小于参考值的是古水层,具体实例中应结合储层烃类包裹体观测具体分析。通常水层的 QGF 指数较低,荧光曲线比较平缓,基本上没有波峰。依南 2 井样品具有明显的荧光强度峰值,且显微镜下观测到大量的烃类包裹体(图 4),因而可以判断该层段有古油气层显示。

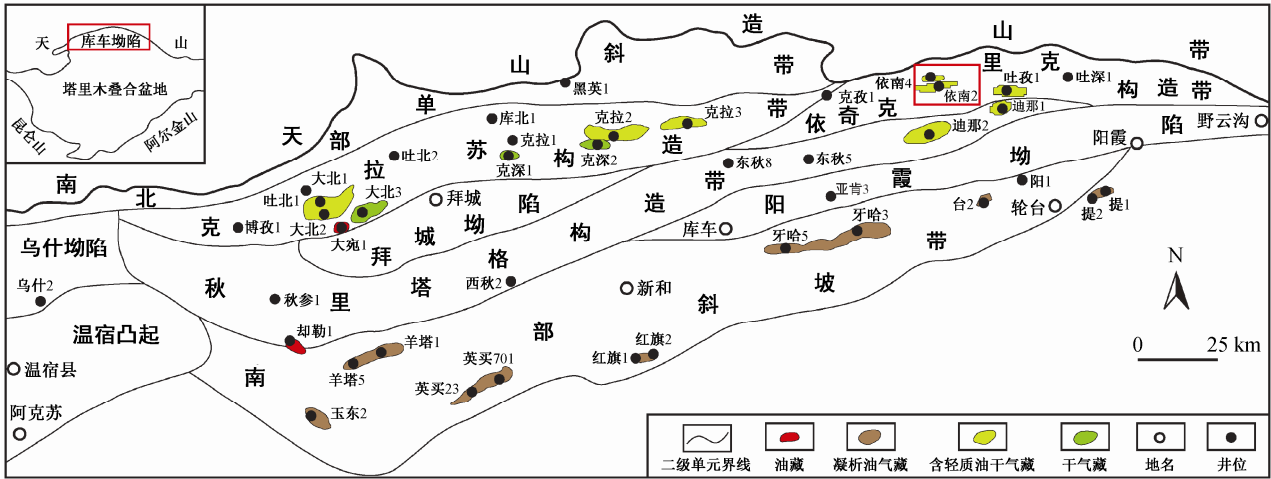


图 1 库车坳陷构造单元划分及油气藏分布

Fig. 1 Tectonic units and oil-gas reservoirs distribution in Kuqa Depression

表 1 依南 2 井砂岩样品 QGF 和 QGF-E 相关参数

Table 1 QGF and QGF-E parameters of sandstone samples in Well Yinan-2

样品号	深度/m	QGF				QGF-E		
		指数	强度	λ_{\max}/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$	I_{\max}	强度	λ_{\max}/nm
1	4534.4	3.5	5.3	400.9	189.3	853.6	142.3	372
2	4542.0	2.8	7.0	353.1	134.3	777.1	77.3	366
3	4547.2	13.3	75.2	455.1	144.2	5199.8	715.8	366
4	4550.5	3.3	8.1	371.7	144.9	215.5	79.8	370
5	4559.0	2.0	12.2	348.1	142.7	532.0	244.9	369
6	4562.7	2.9	11.2	367.7	116.2	487.6	68.6	368
7	4582.0	1.8	6.4	343.4	109.3	177.0	56.9	366
8	4609.4	3.6	4.7	392.4	200.5	413.3	120.9	363
9	4613.2	2.1	4.2	364.7	123.2	119.0	68.5	368
10	4621.0	2.8	1.1	358.9	146.8	422.8	175.0	367
11	4702.5	2.4	8.0	367.3	172.7	520.9	210.3	371
12	4738.9	3.3	10.2	381.7	132.3	279.7	76.6	367
13	4805.0	7.0	1.8	465.2	184.3	9921.8	3501.8	366
14	4821.0	22.8	5.8	450.0	133.9	38406.7	11522.0	365
15	4835.0	8.9	2.6	450.8	158.3	6703.5	2174.1	365
16	4843.0	4.4	10.7	396.4	152.9	497.7	118.2	369
17	4855.0	13.7	3.1	453.0	151.0	44082.1	16530.8	363
18	4868.0	13.7	3.1	453.0	151.0	5353.3	3568.8	364
19	4898.4	5.9	1.5	438.3	178.1	473.7	183.4	368
20	4900.0	4.5	12.2	416.4	174.3	311.1	96.9	371
21	4915.0	18.4	4.2	449.6	145.8	11556.3	3225.0	366
22	4928.0	18.8	3.5	446.5	150.1	64000.0	29538.5	364
23	4943.0	14.9	2.9	448.2	142.1	31906.1	14180.5	364
24	4965.0	2.6	2.7	368.7	151.1	207.4	42.3	372
25	4980.0	10.7	1.2	446.5	156.3	21521.4	9565.1	364
26	4992.0	11.7	1.2	455.1	148.1	11641.6	2374.5	365

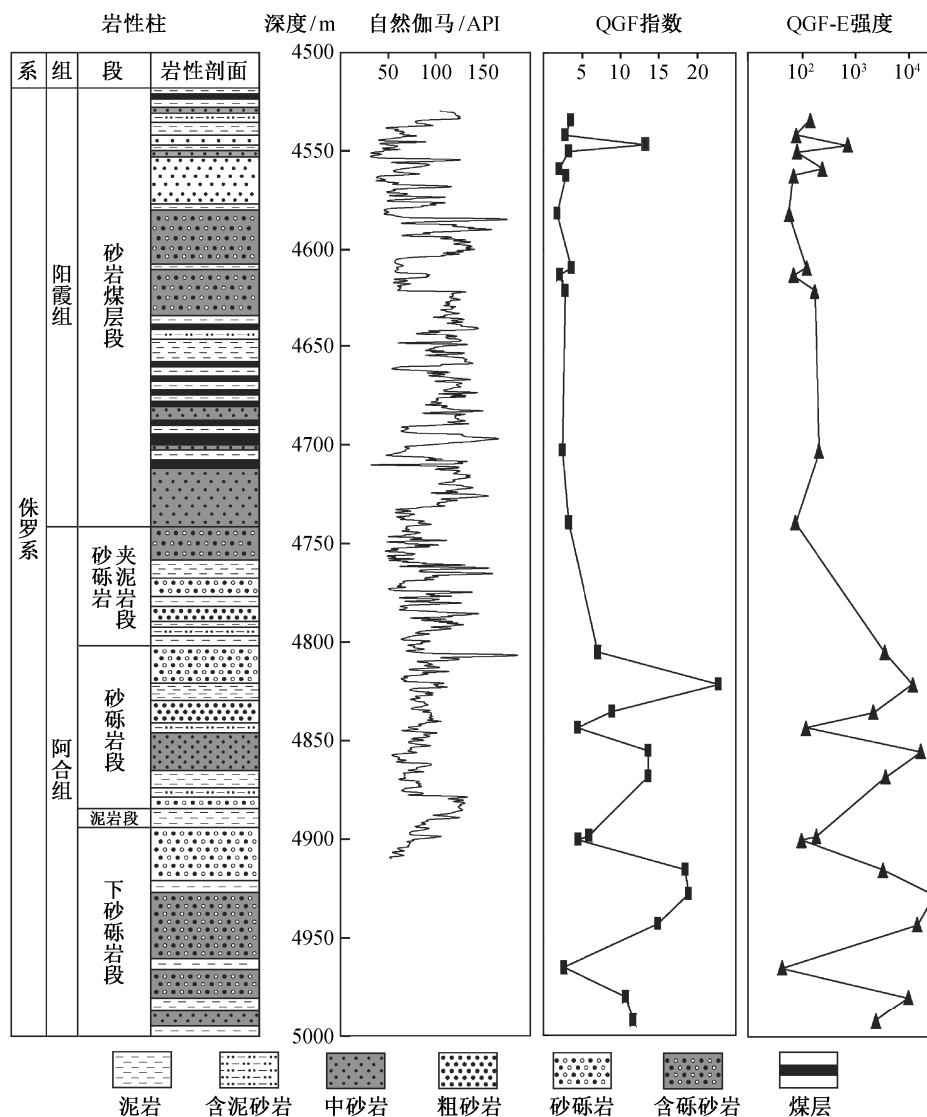


图 2 依南 2 井侏罗系储集层砂岩定量荧光综合剖面
Fig. 2 Quantitative fluorescence integrated profile of sandstone samples in Well Yinan-2

样品 QGF 光谱主峰值分别位于 350~375 nm 和 450 nm 附近(图 3), 具有凝析油和普通原油的波长指纹特征^[12]。库车拗陷具有多套烃源岩, 加之构造变形强烈, 因而油气分布及运移特征非常复杂^[5]。依南 2 井样品 QGF 荧光光谱图在一定程度上反映了不同来源烃源岩的混合^[17-18]。在 4534.4~4613.2 m 层段, 砂岩样品的荧光光谱峰值在 350 nm 左右, 表明其成分主要为凝析油, 其中在 4547 m 处有一个异常值, 其 QGF 强度较高, 达到 75。在 4621~4868 m 层段, 砂岩样品的荧光光谱峰值在 350 nm 左右和 475 nm 左右, 反映的是凝析油和重油的成分, 表明该层段烃类的来源可能存在多源性。在 4898~4992 m 层段, 荧光光谱峰值在 475 nm 左右, 表明古油藏

有机组分主要为重油或普通原油。

2.2 储层颗粒吸附烃 QGF-E 特征

储层岩石表面的有机吸附物主要通过物理和化学作用吸附在矿物表面, 以吸附能力较强的极性化合物、脂肪烃和芳烃为主。溶剂中单环芳烃(例如苯)的主峰波长为 287 nm, 二环芳烃为 320~325 nm, 三环、四环芳烃有两个发射峰, 分别位于 320 nm 和 365 nm 附近, 极性化合物波长为 370 nm^[12]。此外, 样品 QGF-E 强度的高低可以反映原油或有机化合物的浓度。

样品的 QGF-E 荧光响应结果见表 1, 图 2 和图 5。依南 2 井 QGF-E 强度位于 42.3~29583.5 之间, 样品强度总体较大, 最小值位于井深 4965 m 处, 最

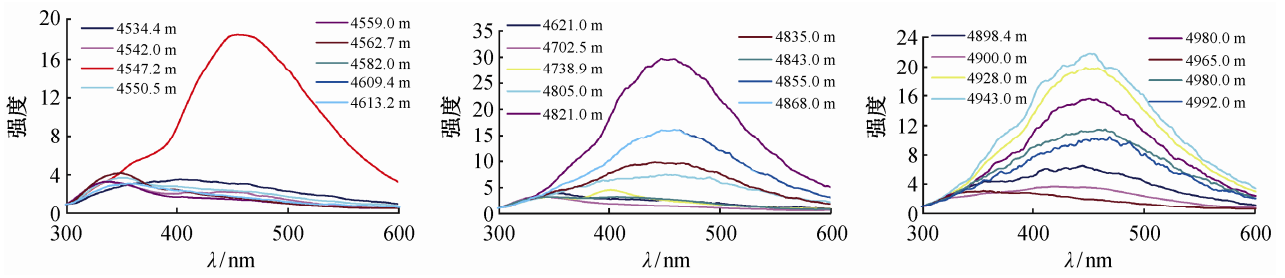
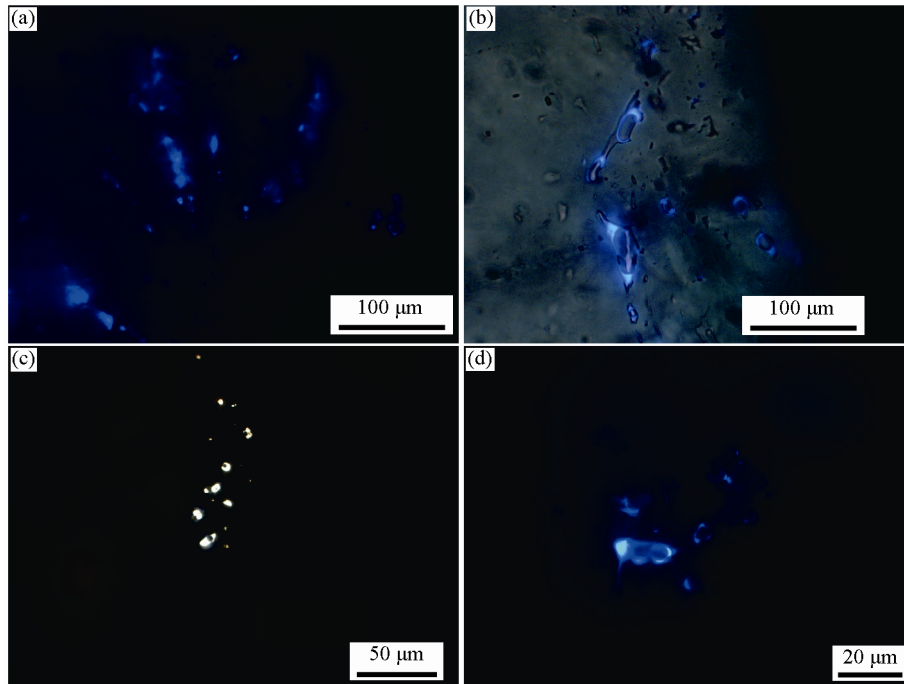


图 3 依南 2 井储层砂岩 QGF 光谱特征

Fig. 3 QGF spectrum characterization of sandstone samples in Well Yinan-2



(a) 4550.5 m, 侏罗系阳霞组灰色油迹粗砂岩, 石英裂纹中蓝白色荧光包裹体; (b) 4550.5 m, 侏罗系阳霞组灰色油迹粗砂岩, 石英颗粒中蓝色荧光包裹体; (c) 4842.9 m, 侏罗系阳霞组灰色油迹粗砂岩, 石英裂纹中黄白色荧光包裹体; (d) 4898.4 m, 侏罗系阿合组灰色荧光中砂岩, 石英颗粒中蓝色荧光包裹体

图 4 依南 2 井储层烃类包裹体荧光显微镜下照片

Fig. 4 Microscopic photos of hydrocarbon inclusions of sandstone samples in Well Yinan-2

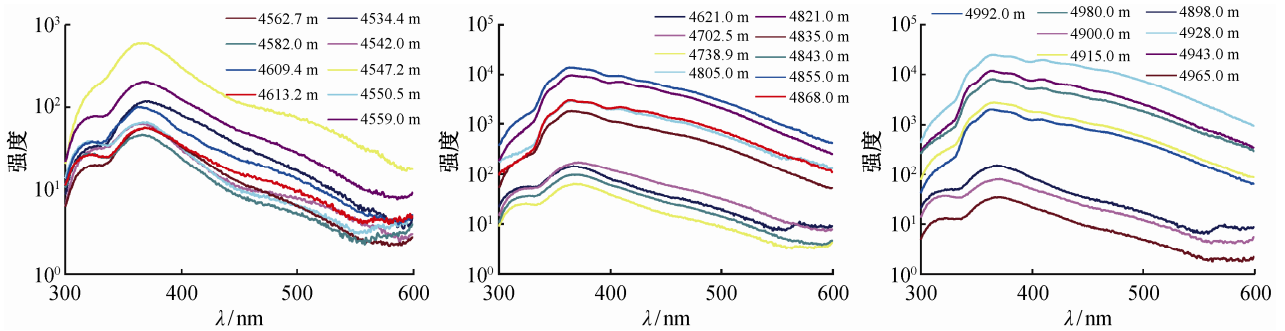


图 5 依南 2 井储层砂岩 QGF-E 光谱特征

Fig. 5 QGF-E spectrum characterization of sandstone samples in Well Yinan-2

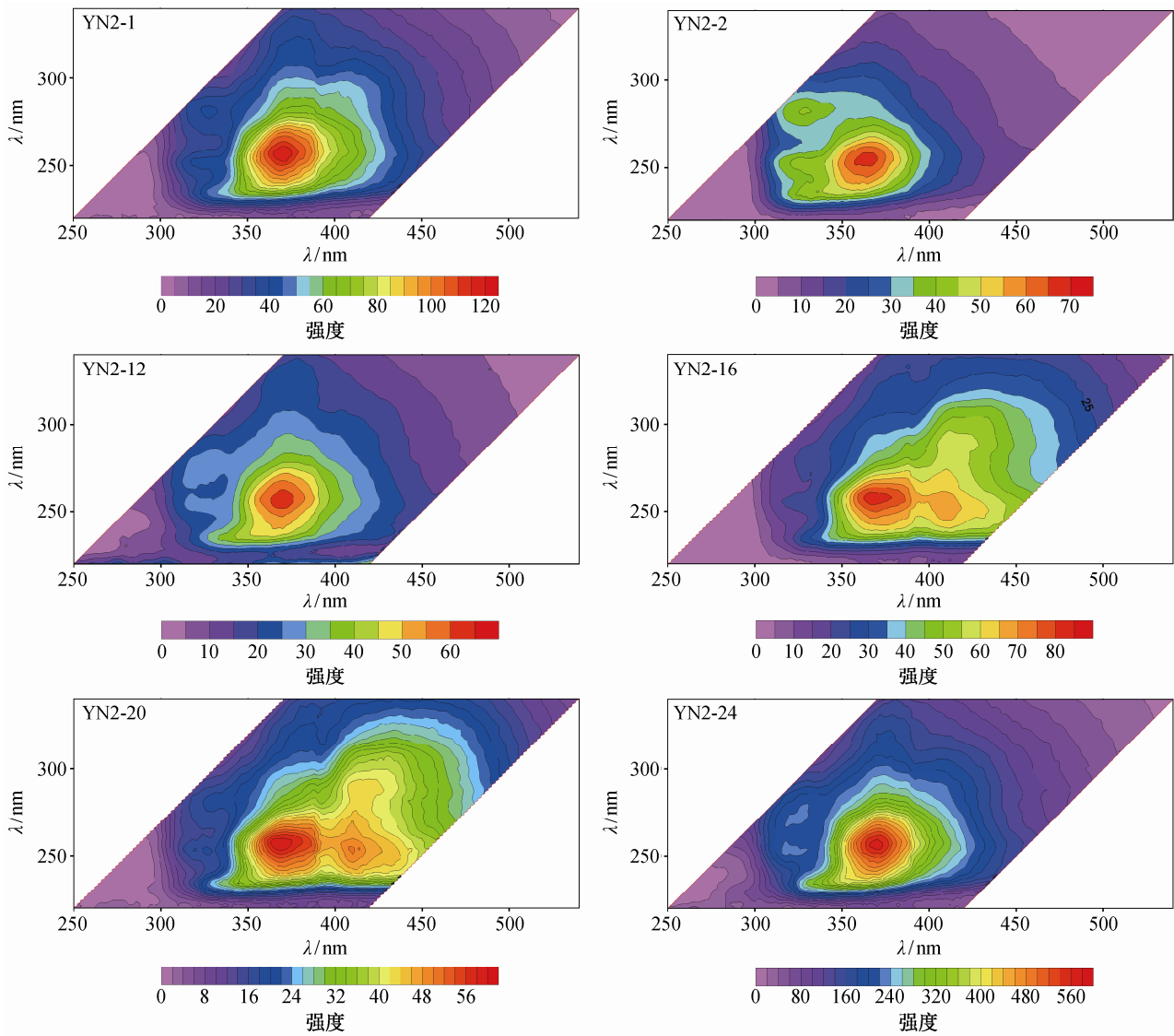


图 6 依南砂岩 2 井储层砂岩 TSF 光谱指纹特征

Fig. 6 TSF spectrum fingerprint characterization of sandstone samples in Well Yinan-2

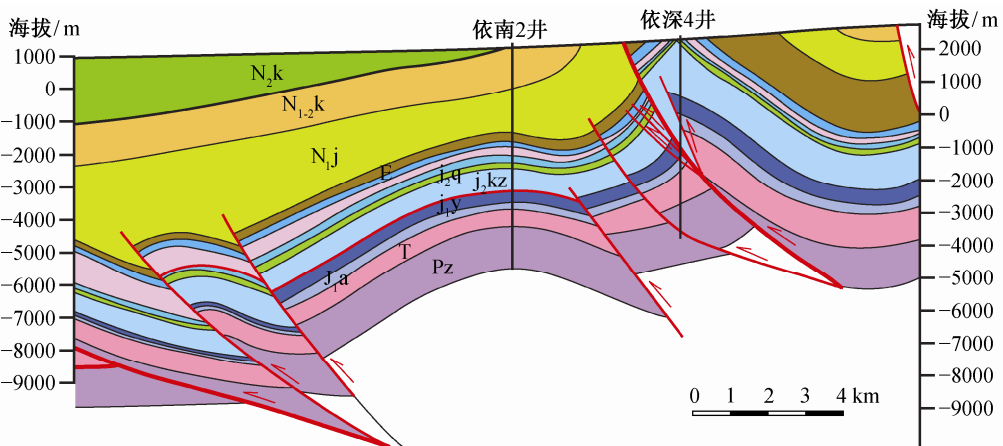


图 7 依南 2 气藏构造剖面

Fig. 7 Structural section map of Yinan-2 gas reservoir

大值位于井深4928 m处, λ_{\max} 分布在363~372 nm之间。总体上, QGF-E强度在4821 m以上层段较低, 以下层段较强, 出现3个由低到高的旋回, 指示油气的运移路径。依南2井储层砂岩样品的QGF-E荧光光谱主峰值为370 nm左右(图5), 表明天然气成熟度较高。

2.3 储层颗粒TSF三维荧光指纹特征

依南2井储层吸附烃的三维荧光指纹特征如图6所示。该井三维荧光光谱主要有两种类型: 一种表现为明显的单峰特征, 峰值在350 nm左右, 反映二环芳烃以下的轻组分特征; 另一种表现为双峰特征, 即除350 nm主峰外, 在425 nm处还存在次主峰, 反映现今气藏具有混源特征。

3 讨论

定量荧光分析可用于识别古油层、残余油层及油气水界面^[12,19-21]。依南2井气藏源储互层, 并叠加后期强烈的构造改造作用, 油气分布复杂。由储集层段砂岩样品的QGF荧光强度及荧光光谱特征分析, 结合储层特征、包裹体发育特征及伽马测井曲线资料, 推断依南2井4821~4534 m层段存在不同古油藏来源的运移通道。储层砂岩中大量发不同颜色荧光包裹体的存在也为此提供了佐证。定量荧光实验结果表明, 4821~4534 m层段砂岩样品的QGF荧光强度总体较弱, 可能是由于4680~4640 m之间发育阳霞组煤层, 煤层较低的孔隙度和渗透率限制了早期原油在储层中的运移, 这也验证了前人关于依南2井早期原油主要来源于三叠系湖相泥岩的观点^[5]。值得注意的是, 在此层段储层样品荧光光谱具有两个峰值, 表明阳霞组煤层也可能对早期原油的生成有一定的贡献。4740 m以上储层砂岩样品的QGF总体荧光响应较弱, 而油包裹体却比较发育, 表明早期原油可能受构造作用影响, 沿断层发生侧向泄漏散失(图7)。4740 m以下层段的样品QGF荧光强度较强, 反映上部煤层对油气的保护作用。值得注意的是, 4750~4992 m之间砂岩样品的QGF强度表现为由弱到强3个旋回的规律变化, 正好与依南2井岩性柱状图的砂、泥岩互层相对应, 反映泥岩对深部早期油运移过程中的阻挡作用, 同时揭示了油气运移路径的旋回特征。

依南2井砂岩样品QGF-E荧光光谱响应与QGF荧光有相似之处, 但总体上荧光强度较强, 反映依南2井现今天然气由下而上的垂直向上运移特征。

此外, QGF-E荧光强度在纵向上的波动变化与QGF强度变化一致, 与砂、泥岩互层的岩性特征对应, 揭示天然气在运移过程中受到泥岩层系的阻碍, 同时也指示油气垂直向上运移的路径。依南2井4750 m以下砂岩样品QGF-E强度总体较高, 指示该层段之下可能为大面积含气区。QGF荧光光谱峰值主要在370 nm左右, 指示天然气主要来源于侏罗系煤层。依南2井样品的TSF荧光指纹图具有两个峰值, 反映该区烃类具有不同的来源, 深部三叠系湖相泥岩也是依南2井天然气的重要来源。

4 结论

本研究综合储层包裹体观测、测井曲线及地质资料分析, 通过对依南2井气藏侏罗系储集层段26个砂岩样品的定量荧光实验分析, 揭示了依南2井气藏古油气的运移路径及油气充注特征, 取得以下认识: 1) 依南2井气藏早期油主要来自深部三叠系泥岩层, 以垂直向上运移为主, 古油藏经历了构造破坏发生泄漏, 未形成具有规模的古油藏; 2) 晚期天然气的运移路径为垂直向上运移, 储层4750 m以下可能为大面积含气区; 3) 依南2井气藏具有混源特征, 天然气来源于侏罗系煤层和三叠系湖相泥岩; 4) 推测依南2井地区深层是连续型致密气藏发育的有利区域。

致谢 感谢中石油勘探开发研究院实验中心总地质师刘可禹教授、中国石油勘探开发研究院鲁雪松博士、桂丽黎同学以及中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院李勇高级工程师、莫涛工程师、王媛高级工程师等在取样过程、样品分析讨论等方面给予的支持和帮助。

参考文献

- [1] 高岗, 黄志龙, 刚文哲. 塔里木盆地库车坳陷依南2气藏成藏期次研究. 古地学报, 2002, 4(2): 98-104
- [2] 李剑, 谢增业, 李志生, 等. 塔里木盆地库车坳陷天然气气源对比. 石油勘探与开发, 2001, 28(5): 29-35
- [3] 刘玉魁, 邬光辉, 胡剑风, 等. 塔里木盆地库车坳陷依南2气藏特征解析. 天然气工业, 2004, 24(7): 12-16
- [4] 李贤庆, 肖贤明, 唐永春, 等. 库车坳陷依南2气藏天然气生成与聚集. 科学通报, 2004, 49(增刊1): 100-106

- [5] 梁狄刚, 张水昌, 赵孟军. 库车拗陷的油气成藏期. 科学通报, 2002, 47(增刊 1): 56-63
- [6] 郭宏莉, 朱如凯. 利用有机包裹体探讨塔里木盆地依奇克里克构造带下侏罗统油气运移与油气藏的存储条件. 岩石学报, 2005, 21(5): 1467-1472
- [7] 刘中云, 王东风, 肖贤明, 等. 库车依南 2 井包裹体形成的古温度古压力. 新疆石油地质, 2004, 25(4): 369-371
- [8] 年秀清, 罗金海, 李杰林, 等. 库车拗陷东部下-中侏罗统砂岩流体包裹体特征与油气成藏期次研究. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2011, 26(4): 12-19
- [9] 秦胜飞, 贾承造, 陶士振. 塔里木盆地库车拗陷油气成藏的若干特征. 中国地质, 2002, 29(1): 103-108
- [10] 邢恩袁, 庞雄奇, 肖中尧, 等. 塔里木盆地库车拗陷依南 2 气藏类型的判别. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2011, 35(6): 21-28
- [11] Liu K, Eadington P. A new method for identifying secondary oil migration pathways. *Journal of Geochemical Exploration*, 2003, 78(3): 389-394
- [12] Liu K, Eadington P. Quantitative fluorescence techniques for detecting residual oils and reconstructing hydrocarbon charge history. *Organic geochemistry*, 2005, 36(7): 1023-1036
- [13] Liu K, Eadington P, Coghlan D. Fluorescence evidence of polar hydrocarbon interaction on mineral surfaces and implications to alteration of reservoir wettability. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2003, 39: 275-285
- [14] Liu K, Eadington P, Middleton H, et al. Applying quantitative fluorescence techniques to investigate petroleum charge history of sedimentary basins in Australia and Papuan New Guinea. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, 57: 139-151
- [15] Liu K, Pang X, Jiang Z, et al. Quantitative estimate of residual or palaeo-oil column height. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, 89: 239-242
- [16] Liu K, George C, Li S, et al. Total Scanning Fluorescence (TSF) as an effective screening tool for delineating oil families // 22nd International Meeting on Organic Geochemistry. Seville, 2005: 1128-1129
- [17] 贾承造, 顾家裕, 张光亚. 库车拗陷大中型气田形成的地质条件. 科学通报, 2009, 47(增刊 1): 49-55
- [18] 贾承造, 陈汉林, 杨树锋, 等. 库车拗陷晚白垩世隆升过程及其地质响应. 石油学报, 2003, 24(3): 2-6
- [19] 邢恩袁, 庞雄奇, 肖中尧, 等. 利用颗粒荧光定量分析技术研究塔里木盆地库车拗陷大北 1 气藏充注史. 石油实验地质, 2012, 34(4): 432-437
- [20] 李素梅, 庞雄奇, 刘可禹, 等. 一种快速检测油包裹体的新方法: 颗粒包裹烃定量荧光分析技术及其初步应用. 石油实验地质, 2006, 28(4): 386-390
- [21] Blamey N, Conliffe J, Parnell J, et al. Application of fluorescence lifetime measurements on single petroleum-bearing fluid inclusions to demonstrate multicharge history in petroleum reservoirs. *Geofluids*, 2009, 9(4): 330-337