https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.056



走滑断裂对原油性质的控制作用:以鄂尔多斯盆地南 部泾河油田为例

苏鹏1,胡守志1*,李水福1,梁承春2,尹超2,邓杰2,杨宇航1,唐大卿1

中国地质大学资源学院,湖北武汉430074
 中国石化华北油气分公司,河南郑州450006

摘 要:鄂尔多斯盆地南部地区走滑断裂发育,形成极具特色的断缝体式致密油藏,油藏中发现成因不明的稠油.为厘清研究 区原油稠变的成因和分布关系,进一步认识走滑断裂带内断缝体式油藏的控藏机制.对研究区原油开展了气相色谱质谱检测, 对其地球化学特征进行了详细的研究,进而开展了稠油与正常原油的地化特征对比,结合测井资料统计了研究区裂缝密度,分 析了原油的稠变因素及其与走滑断裂带之间的联系.结果表明,泾河油田长6-长8段原油主要来自同一套烃源岩,其特征是 沉积于还原性较强的淡水湖盆,有机质来源为藻类和高等植物混源输入;泾河油田的稠油与正常原油在母岩的沉积环境、有机 质来源和成熟度上没有明显差别,但生物降解程度上存在明显差异,属于3~4级生物降解;泾河油田稠油主要分布在小型裂 缝极为发育的走滑断裂叠接带.走滑断裂对原油的调整和保存具有明显的控制作用,泾河油田稠油的形成与走滑断裂的发育 有着密切关系,即与相关裂缝内发生的轻烃组分散失和生物降解有关.

关键词:走滑断裂;原油性质;稠化作用;泾河油田;鄂尔多斯盆地;石油地质. **中图分类号:** P618 **文章编号:** 1000-2383(2023)06-2310-14

收稿日期:2022-08-29

Control of Strike-Slip Faults on Crude Oil Properties:Exemplified by Jinghe Oilfield in South Ordos Basin

Su Peng¹, Hu Shouzhi^{1*}, Li Shuifu¹, Liang Chengchun², Yin Chao², Deng Jie², Yang Yuhang¹, Tang Daqing¹

School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
 North China Oil and Gas Branch, SINOPEC, Zhengzhou 450006, China

Abstract: Strike-slip fault area unit developed within the southern part of Ordos basin, forming a novel fracture-type tight reservoir, and heavy oil with unknown origin is found within the reservoir. In order to clarify the origin and distribution of heavy oil within the study space and further understand the reservoir - controlling mechanism of fracture-type tight reservoir in strike - slip fault zone, in this paper, the crude oil in the study area was detected by gas chromatography mass spectrometry, and the geochemical characteristics of the crude oil were studied in detail. Then the geochemical characteristics of heavy oil and normal crude oil were compared, and the fracture density in the study area was calculated based on logging data. The relationship between

* 通讯作者:胡守志, ORCID:0000-0002-4535-8669. E-mail:hushzh@cug.edu.cn

基金项目:湖北省自然科学基金创新群体项目(No. 2021CFA031);国家自然科学基金面上项目(Nos. 42073067,41572109);中国石油化工股份 有限公司科技项目(No.P21026).

作者简介:苏鹏(1996-),男,博士研究生,主要从事油气地球化学方面研究.ORCID:0000-0002-5809-384X.E-mail:superb@cug.edu.cn

引用格式:苏鹏,胡守志,李水福,梁承春,尹超,邓杰,杨宇航,唐大卿,2023.走滑断裂对原油性质的控制作用:以鄂尔多斯盆地南部泾河油田 为例.地球科学,48(6):2310-2323.

Citation: Su Peng, Hu Shouzhi, Li Shuifu, Liang Chengchun, Yin Chao, Deng Jie, Yang Yuhang, Tang Daqing, 2023. Control of Strike-Slip Faults on Crude Oil Properties: Exemplified by Jinghe Oilfield in South Ordos Basin. *Earth Science*, 48(6): 2310–2323.

the thickening factors of crude oil and the strike-slip fault zone was analyzed. The results show that the crude oil of Chang 6- Chang 8 member in Jinghe oilfield primarily comes from identical set of source rocks, that is characterised by depositing within the fresh water lake basin with sturdy reducibility, and also the organic matter source is that the mixed input of alga and better plants. There's no obvious distinction between the heavy oil and traditional crude oil within the sedimentary environment, organic matter source and maturity, however there are obvious variations within the degree of biodegradation, heavy oil happiness to grade 3-4 biodegradation. The heavy oil in Jinghe field is principally distributed within splicing tape of the strike-slip fault belt with terribly concentrated little cracks. The strike-slip fault belt has a clear control on the adjustment and preservation of fossil oil, and incorporates a shut relationship with the formation of hevay oil in Jinghe oilfield, that is, it's associated with the dispersion loss of light hydrocarbon and biodegradation compound within the relevant fractures and cracks.

Key words: strike-slip fault; crude oil property; oil thickening; Jinghe oilfield; Ordos basin; petroleum geology.

0 前言

近年来,鄂尔多斯盆地以庆城油田为代表的湖 盆中部地区已形成较成熟的页岩油开发与生产,而 湖盆边缘等区域仍需进一步探索其开发潜力(付锁 堂等,2020;付金华等,2022).湖盆边缘的致密油等 短距离运移的油气资源同样被认为是鄂尔多斯盆 地非常规油气勘探的重要领域(Yang et al., 2005; Zou et al., 2013; 周舟, 2015; 周翔等, 2016; 陈义国 等,2021).鄂南地区受邻区断裂活动影响,构造十分 复杂,并广泛发育断面角度大,多期活动的板内走 滑断层(屈雪峰等,2020;张园园等,2020),形成断 层、断层破碎带和天然小尺度裂缝组成的复杂断裂 系统(屈雪峰等,2020),鄂南地区镇原、彬长等探区 的上百口探井开发实践表明钻遇走滑断层及两侧 伴生的破碎带是富集高产区(王旭,2021;何发岐 等,2022),进而一些学者引入了"断缝体"的概念 (王威和凡睿,2019;刘忠群等,2020)去描述并指导 鄂南地区的致密油藏的勘探(何发岐等,2020).

目前,在泾河油田相关构造区域已发现了部分 高产井或井区,如JH2、JH17和JH55井区,但在其 生产过程中发现原油的物性存在明显差异.针对这 类物性较差的稠油,前人根据其空间分布认为其成 因与断裂位置有关(刘伟华,2014;毕钰,2017),但 并未确定其稠变机制.由于物性较差的稠油存在开 采难度大、生产成本高等一系列问题,但发现于鄂 尔多斯盆地南部的稠油成因还不明确,这制约了鄂 南地区非常规油气资源下一步的勘探和开发部署 工作.

本文将从原油的物理性质和稠油的空间分布 出发,利用原油的有机地球化学参数,分析研究区 原油的地球化学特征,讨论稠油与正常原油地球化 学特征上的差异,分析原油发生稠变的主控因素, 明确稠油的形成与走滑断裂之间的联系,进而讨论 走滑断裂在鄂南地区对原油性质的控制作用,探索 断缝体式油藏的稠油成因,从而为生产勘探部署提 供决策依据.

1 区域地质背景

泾河油田位于鄂尔多斯西南部,横跨陕西省彬 县、长武和甘肃省宁县、灵台等地区,面积 3 013.7 km³. 泾河油田构造上位于伊陕斜坡与渭北 隆起的交汇处,整体由北西向南东抬升,局部发育 鼻状隆起(图1),研究区内发育北东-南西向大型 走滑断裂,由北至南包括太昌断裂带、早胜断裂带、 永正断裂带、榆林子断裂带、南宫和断裂带和永和 断裂带等几条大型走滑带(图2).鄂尔多斯盆地演 化过程中主要的构造应力活动有4期:加里东期、印 支期、燕山期、喜马拉雅期.其中燕山期和喜马拉雅 期是断裂、裂缝形成的主要时期,燕山期构造地应 力水平挤压作用造成中生界区域性断缝广泛发育, 研究区现今构造格局主要形成于燕山期,燕山期盆 地西南缘最大主压应力方向为NE-SW向,盆地东 南缘最大主压应力方向为NW-SE向;喜马拉雅期 构造运动对燕山期形成的断裂、裂缝进行改造,喜 马拉雅期受挤压的方向为NNE-SSW向,被拉张的 方向为NWW-SEE向,最大主应力方向为NNE-SSW向,全区分布比较稳定.多期构造运动形成了 鄂尔多斯盆地南部 NE 和 NW 两组区域性断裂(王 旭,2021).中生界三叠系延长组按沉积旋回可划分 为长1-长10等10个层位(图1).

前人研究表明,鄂尔多斯盆地主要发育长7和 长9两套优质烃源岩,长7段烃源岩的沉积环境为 还原较强的淡水沉积,具有低等水生生物和高等植 物混合输入的有机质来源,长9段烃源岩的沉积环





Fig.1Structural division of Ordos basin and location of Jinghe oilfield (a), stratigraphic table of Yanchang Formation (b)红色方框代表主要烃源岩;据付金华等(2020)修改



Fig.2 The strike-slip fault profile, heavy oil location and high angle fracture density in Jinghe oilfield

境为亚氧化环境的淡水沉积,有机质来源中高等植物的占比更高,两套烃源岩在湖盆中心有着较好的 生烃表现(周翔等,2016;李程善等,2021),而泾河油 田位于湖盆边缘地区,据高波等(2022)的研究表明 彬长地区长7段烃源岩成熟度为0.6%~0.8%,而长 9段基本尚未进入生烃门限,因此长7段是研究区最 重要的烃源岩发育层位(图1).勘探实践表明,泾河 油田的主要产油层为长81段,走滑断裂附近伴生裂 缝及次生断层的发育改善了储层储集空间和连通 性,构成了主要的渗流通道,为致密砂岩有效储层的 形成和改造创造了条件.泾河油田主要发育构造裂 缝和水平层理裂缝两种类型,油气主要沿断裂带走 向和断层两侧运移.断裂带上油气富集部位受断层 活动性质、砂体有效匹配、构造位置以及断缝体内部 上下盘岩性组合样式等因素控制,不同岩性对接关 系和局部构造控制了单井累产(王旭,2021).

2 样品与实验

用于本次研究的29个原油样品来自泾河油田 的3个井区(图2),样品基本信息见表1,对原油样 品开展气相色谱和气相色谱一质谱分析,采用行业 标准GB/T18606-2001开展实验,实验步骤见徐建 永等(2019),分析仪器为Agilent7890气相色谱一 质谱仪(GC-MS).裂缝识别主要通过大量岩心观察 及测井、录井资料开展识别,根据裂缝倾角可以将 其划分为水平缝、斜交缝(与井轴夹角15°~75°)和

表1	样品信息统计与基本物理性质参数	

		1		1		
井区	样品编号	开采层位	密度	凝固点	运动黏度(v50℃)	平样深度(m)
			(g/cm ³)	(°C)	(mPa•s)	215 11 215/2 (m)
泾河 17 井区	JH17P11	长 81	0.82	17.0	16.1	$1475.464{\sim}1475.449$
	JH17P-13	长 81	0.83	8.0	9.1	—
	JH17P-16	长 81	0.86	37.0	13.5	—
	JH17P-17	长 81	0.83	7.5	8.9	_
	JH17P18-2	长 81	0.86	21.0	13.0	$1\ 412.402{\sim}1\ 419.591$
	JH17P-23	长 81	0.79	6.8	8.4	$1\ 412.402{\sim}1\ 419.591$
	JH17P-25	长 81	0.89	18.0	21.0	_
	JH17P-27	长 81	0.82	5.4	8.8	$1\ 496.780{\sim}1\ 507.222$
	JH17P-30	长 63	0.81	16.0	8.3	1 320.115~1 353.171
	JH17P-32	长 81	0.86	8.0	10.5	$1\ 318.940{\sim}1\ 399.751$
	JH17P-33	长 81	0.86	20.5	14.5	$1\ 486.746{\sim}1\ 529.244$
	JH17P-34	长 81	0.73	3.0	7.5	1 518.373~1 522.866
	JH17P-35	长 81	0.86	8.5	9.5	_
	JH17P-3	长 81	0.81	4.5	8.3	$1\ 458.812{\sim}1\ 461.506$
	JH17P-7	长 81	0.83	7.6	8.3	_
	JH17P-8	长 81	0.81	8.2	8.7	$1\ 546.914{\sim}1\ 558.406$
	JH22P-1	长 81	0.91	7.6	93.3	_
泾河2井区	JH2-1	长81+长73	0.80	7.0	8.0	1 454.628~1 489.070
	JH2P-1	长 81	0.83	8.3	5.5	$1\ 394.858{\sim}1\ 410.980$
	JH2P-16	长 81	0.91	7.6	104.3	$1\ 379.657{\sim}1\ 391.066$
	JH2P-17	长 81	0.92	16.0	97.4	1 373.900~1 386.211
	JH2P-2	长 81	0.91	21.0	113.5	1 394.858~1 410.98
	JH2P23-1	长 81	0.85	7.1	9.3	1 409.370~1 412.497
	JH2P-32	长 81	0.83	9.0	10.5	_
	JH2P-4-1	长 81	0.83	11.0	13.5	_
	JH2P-6	长 81	0.91	8.0	98.7	1 334.866~1 352.418
	JH2P-8	长 81	0.92	7.5	92.8	_
泾河 55井区	JH55	长73	0.81	5.0	3.4	_
	JH55P-1	长 81	0.84	11.0	5.5	_

 Table 1
 Sample information and physical property parameters

垂直缝(与井轴夹角<15°).统计范围包括有照片的 取心井56口、核磁井15口,有裂缝取心井37口和成 像井14口.另一方面,本文还通过测井资料识别了 典型井的泥页岩厚度,其中JH55井区揭示的长7段 泥页岩总厚度达30~50m,泾河2井区揭示的长7 段泥页岩总厚度为15~20m,泾河17井区测井资料 揭示的长7段泥页岩总厚度达20~45m.

3 结果

3.1 原油的物理性质

密度和黏度是原油物性最主要的参数,它们即 是油气运移、聚集、保存状态乃至油气散失、破坏的 综合反映,又是原油的化学性质和化学组成的直观 反映.泾河地区长8段原油样品出现了部分密度大 于0.9 g/cm³、运动黏度(v50 ℃)大于90 mPa•s的稠 油(表1),值得注意的是,生产实践表明,研究区大 量油井在开采早期产出稠油,而在开采一段时间后 油质已经变轻,产出正常原油,本次研究样品以新 鲜油样为主,主要为正常原油样品,仅有少量样品 保留稠油特征(表1).

3.2 原油的地球化学特征

研究区不同层位和井区的原油的正构烷烃分 布比较相似,其中碳数分布主要表现为以 nC₂₁或 nC₁₅为主的单峰或双峰型分布,大多样品均有较高 含量的 nC₁₅至 nC₂₁等中低分子量的正构烷烃(图 3). 此外,在本批次样品的测试结果中我们也发现了例如 JH2P17和 JH2P6等正构烷烃分布比较异常的样品(图3),其表现为正构烷烃的存在一定缺失,nC₁₇与姥鲛烷Pr和nC₁₈与植烷Ph的比值偏高,有"基线鼓包",即UCM,不可分辨的复杂混合物(unresolved complex mixtures)(图3),推测存在轻微一中等程度的生物降解现象(Gouch *et al.*,1992).Pr/nC₁₇和Ph/nC₁₈通常认为与生物降解程度或成熟度有关(Peters *et al.*,2005),泾河地区原油的Pr/nC₁₇和Ph/nC₁₈的值分别分布在0.5~1.72和0.54~2.79之间,显然,不同样品间Pr/nC₁₇和Ph/nC₁₈存在较大差异. 此外,本次测试在多个样品中发现于nC₃₀和nC₃₁两个化合物之间显示两个较高丰度的未知化合物(图3,三角形标注),经质谱鉴定是C₂₉降藿烷和C₃₀藿烷,这可能与多期原油充注有关.

泾河油田原油样品中萜烷系列丰度较高、分布 完整,主要由三环萜烷、藿烷类和伽马蜡烷组成,整 体呈现出藿烷系列含量高,三环萜烷系列峰型较 低,伽马蜡烷值低的特征,所采样品中,三环萜烷与 五环三萜烷丰度的比值在0.09~0.13.整体而言,藿 烷类比较突出的峰型是C30藿烷和C20降藿烷,其次 是C31升藿烷以及C27三降藿烷Tm和Ts,泾河油田 各层位、各井区的原油样品的峰型分布特征比较类 似(图4),推测研究区长6、长7和长8段的原油很可 能来自一套主力烃源岩.



Fig.3 TIC of saturated hydrocarbon in crude oil of Jinghe oilfield





甾烷类化合物一般用于生油母质类型的判别、 母质沉积环境的识别及成熟度的判断,一般情况下 规则甾烷中, C_{27} 甾烷通常来源于低等水生生物和藻 类; C_{29} 甾烷主体以陆生高等植物来源为主(Volkman *et al.*,1999;Kodner *et al.*,2008).研究区长 63、 长 73 和长 81 段原油分布特征明显,表现为同类原 油,除规则甾烷外,重排甾烷丰度最高,其次为孕甾 烷,升孕甾烷丰度较低.规则甾烷构型均主要呈 "V"或反"L"字形分布(图4).从规则甾烷的相对含 量 来看,研究区原油 C_{29} 规则甾烷很高,可达到 49.28%~53.54%,而 C_{27} 规则甾烷偏低,仅达到 19.38%~22.47%.

芳烃化合物作为原油和烃源岩中重要的生物 标志物一部分,已被广大学者用作判别成油环境、 生源及成熟度的良好指标.除饱和烃以外,芳烃中 也有很多能够反映原油成熟度的指标,如烷基萘、 烷基菲和烷基二苯并噻吩等.本次研究也将从二甲 基萘比值 MDR(4-MDBT/1-MDBT),三甲基萘指 数 TNR(TNR=(2,3,6-+1,3,7-TMN)/(1,4, 6-+1,3,5-TMN)),甲基菲指数 MPI(1.5×(2-+3-MP)/(P+9-MP+1-MP))等参数及其等效计算的 Rc值来判断其成熟度.研究区原油的 MDR值介于 1.68~3.66,平均值为2.66,TNR值介于0.48~0.64, 平均值为0.52,MPI值介于0.55~0.66,平均值为 0.6,上述平均值换算成相应的 Rc值分别是0.70, 0.71和0.76.Rc相关计算公式见Liet al.(2021).

4 讨论

4.1 沉积环境、母质来源与成熟度

前文述及,研究区原油具有较低的姥植比 (0.57~0.82,平均值为0.69;图5a),较低伽马蜡烷 指数(主要分布在0.02~0.04之间),较低的孕甾烷/ 规则甾烷的比值(小于0.05),较低的单芳甾烷/三芳 甾烷值(平均值0.36,代表咸水环境的比值往往大于 0.45),上述参数可以比较好的说明原油生油母质的 沉积环境为淡水环境沉积,且沉积水体的还原性较 强(Sachsenhofer et al., 2017). 尽管 Pr/nC₁₇-Ph/nC₁₈ 交汇图(图 5a), 泾河油田原油在图 5 中的投点主要 集中在混合有机质过渡环境一藻类有机质的区间 之中,但水体的还原性会使投点向藻类有机质的区 块偏移,综合前文的相关分析,泾河油田原油的正 构烷烃峰型主要以中峰型为主,C27-30规则甾烷相对 三角图中同样具有混合型物源的投点特征(图 5b), 泾河油田原油还具有较低的C24四环萜烷/(C24四环 萜烷+C₂₆三环萜烷)与C₂₅三环萜烷/C₂₄四环萜烷 比值(平均值分别是0.44和0.61)以及较高的1,2, 5-/1,3,6-TMN比值(均值0.72)都一定程度上指 示了陆源高等植物来源的输入.

综合考虑认为泾河地区原油的生油母质沉积 于还原性较强的陆相淡水湖泊,并且存在相当比例 的高等植物来源的输入,具有明显混源特征,符合 长7段烃源岩的特征.

甾烷的异构化程度($\alpha\alpha\alpha C_{29}20S/(20S+20R)$ 和 C₂₉ $\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$)及甲基菲指数 MPI,烷基萘比值





Fig.5 Identification of depositional environment and source material of crude oil in Jinghe oilfield

TNR, 烷基菲比值 MPR 和烷基二苯并噻吩比值 MDR等生标参数常常用以指示烃源岩和原油的成 熟度(Radke et al., 1982; Zhang and Li, 2018). 泾河 油田原油的 αααC₂₉20S/(20S+20R)值介于 0.47~ $0.54, C_{20}\beta\beta/(\beta\beta + \alpha\alpha)$ 值介于 $0.44 \sim 0.53;$ 利用不同 芳烃参数可转化计算等效镜质体反射率%Rc,前文 描及,研究区的原油样品的%Rc值主要介于0.7~ 0.8.αααC₂₉20S/(20S+20R)达到成熟阶段的平衡值 是 0.52~0.55, $C_{29}\beta\beta/(\beta\beta + \alpha\alpha)$ 参数的平衡值是 0.67~0.71,从甾烷的异构化程度来看,参数计算结 果都达到或接近其平衡值,是成熟度较高的表现 (图 5a).但从指示范围更广的芳烃参数来看,烷基 萘,烷基菲和烷基二苯并噻吩比值的等效 Rc 值均介 于0.7%~0.8%,也说明其成熟度并不高.通过不同 的成熟度参数发现结果并不统一(图6),这很可能 是研究区存在两期或两期以上成熟度具有明显差 异的原油充注混合导致的,在我国塔里木盆地的混 原油中也发现了类似现象,曾有学者研究发现当两 期成熟度不同的原油混合时,不同成熟度参数变化 的敏感程度不同,容易导致通过不同参数计算结果 不统一的现象(马安来等,2017;Li et al.,2018;周晨 曦,2021).综合上述参数的计算结果以及原油的总 离子流图(奇偶优势特征)来看,初步判断原油达到 成熟阶段,Ro介于0.7%~0.8%,符合高波等(2022) 检测泾河油田本地长7段油页岩的成熟度,与湖盆 中心的成熟度存在明显差异.综合本文原油的沉积 环境、有机质来源和成熟度特征,结合前人的检测 和分析,基本可认为泾河油田本轮检测原油样品的 来源基本一致,主要来自本地长7段烃源岩的贡献.

4.2 稠油与正常原油地化特征的对比

为了更好地开展泾河油田稠油和正常原油的

有机地球化学特征对比,笔者利用了化学计量学的 方法进一步分析泾河地区原油的差异,本次研究采 用了多元统计学的思路使用 SPSS 软件开展了原油 生物标志物参数的聚类分析(杨帆等,2020;王元杰 等,2021).本次研究中参与聚类分析的参数包括: $Ph/nC_{18}, Pr/Ph, Pr/nC_{17}, (Ph+Pr)/(nC_{18}+nC_{17}), \Sigma$ 三环萜/ Σ 五环三萜, C₂₄四环萜/(C₂₄四环+C₂₆三 环),三降藿烷比值(Ts/Tm),伽马蜡烷/Cal升藿烷 (Ga/C₃₁H), C₃₁升 藿烷 异构 化程度(C₃₁S/S+R), C_{27} - C_{29} 规则甾烷相对含量, Σ 重排甾烷/ Σ 规则甾烷, 孕甾烷/规则甾烷,甲基菲指数MPI,烷基三甲基萘 指数 TNR,9-甲基菲/1-甲基菲,∑二甲基菲/∑菲, 9-MP/∑甲基菲等.上述参数包括了判识沉积环境, 指示母质物源,揭示成熟度,分析原油运移和指示 生物降解程度等各方面的生标参数. 谱系图表明原 油被分成了两大类原油, 谱系图下方的6个样品被 划为一类,其余样品被划为另一类(图7),这6个原 油样品很好对应了前文物性分析中表现异常的6个 稠油样品,证实了原油分类可信的.

稠油样品的饱和烃分子特征图谱表明,部分样品的正构烷烃存在比较明显的破坏,例如样品JH2P9和样品JH2P17,Pr和Ph特征峰分别高于 nC₁₇和nC₁₈的特征峰(图3),同时我们注意到,上述两个稠油样品的中甾烷和藿烷等化合物几乎没有破坏(图4),据Peters and Moldowan (1993)提出十级生物降解方案,泾河油田稠油的生物降解程度应处于 3~4级,属于轻微一中等程度的生物降解.通常在此降解等级下,芳烃中甲基菲已出现一定程度的破坏(王飞龙等,2016).在此基础上,笔者选择了(Pr+Ph)/(nC₁₇+nC₁₈)和在 3~4级生物降解中消耗适中的生标参数 9-甲基菲/总甲基菲等参数做了









交汇图,可以较好区分泾河油田中的生物降解油和 正常原油(图8),分类结果与前文聚类分析的结果 一致.总而言之,泾河油田的稠油和正常原油仅在 表达生物降解的参数上存在差异.其分类结果与前 文聚类分析的结果吻合.

4.3 走滑断裂对稠油发育的控制

4.3.1 原油稠化因素讨论 原油稠化的因素分为 原生因素和次生因素(胡守志等,2009).前文述及, 泾河油田原油的成熟度差别不大,并基本达到成熟 阶段,基本可以排除原生因素导致的原油稠化.研





究区原油主要存在于断裂缝体油气藏,储集空间主要为裂缝一孔洞结构内,这有别于传统的底水型油藏,断裂缝体油气藏的结果很难与地层水大面积长时间的接触,其水洗作用并不明显.泾河油田正常原油相关井中油田水矿化度最低17.15g/L,最高49.53g/L,产出稠油井的油田水矿化度最小32.07g/L,最大50.82g/L,二者水型均为氯化钙型,可见水洗作用和氧化作用并不明显(戚家振等,2022).

原油生物降解条件研究表明:20~60 ℃ 为生物 强烈降解带,60~88 ℃ 生物降解减弱,超过 88 ℃ 基 本不存在生物降解(戚家振等,2022).根据测井资料 计算, 泾河油田各井平均地温梯度为3.08 ℃/ 100 m,本次研究17井区长81段原油主要采样深度 在1400~1500 m,2井区长81段原油主要采样深度 在1300~1420 m,根据泾河油田各井实测油藏温 度,相关地层的原油温度基本处于48~56 ℃之间, 均处于生物强烈降解带,其中2井区原油埋藏更浅, 生物降解程度相对更加强烈.前文述及,本次研究 中研究区的稠油有比较明显的生物降解现象,通过 生物标志物聚类分析(图7)以及表征原油生物降解 的生标参数分析(图8)等方法也能较好将稠油与正 常原油区分开.综上认为,泾河油田原油的稠化与 生物降解作用有着密切联系.

4.3.2 封堵能力讨论 研究区长81是主要产层,对本研究区而言,封堵能力包括:上覆长7泥页岩对长81砂岩储集体的封盖作用,断裂岩性配置关系和相关断层及天然裂缝的封闭性对油藏的影响.

长7段发育的半深湖一深湖相暗色泥岩,为厚 度较大、有机质丰度高及成熟度适中的烃源岩,既 能为下伏长8油层组提供油气资源,也可以作为区 域盖层对下伏长8油层组起到封盖作用.测井解释 表明,长7泥页岩厚度从几米到几十米不等,厚度存 在非均质性,通常认为,在烃源岩发育较好、厚度较 大的地方其封堵原油轻质组分的运移能力越强,对 原油油品质起到的保护作用越大,反之较差.例如 在JH55井区烃源岩厚度较大可达30m以上(图9),



图 9 泾河油田长7段泥页岩厚度 Fig.9 Thickness of shale in Chang 7 Formation of Jinghe oilfield

JH55井区原油得到了较好的保护,仅在早期开发时期中发现少量稠油,而在位于JH2井区JH36井测井 资料显示其长7段泥页岩厚度不足20m(图9),JH2 井区的部分原油品质遭到破坏,泾河17井区上覆泥 页的厚度跨度较大为20~45m(图9),因此部分原 油发生稠化,JH2井区和17井区在近两年的开发中 仍有稠油产出,可见上覆烃源岩作为的封盖能力与 其厚度有一定关系,某种程度上也控制了断缝体内 部存在的岩性配置关系,对原油品质造成了一定 影响.

由于断裂发育,断层上下盘岩性配置关系复杂, 根据水平井在断缝体内钻遇情况分析认为断缝体内 部存在4种岩性配置关系:砂一砂拼接、砂一泥拼接、 砂一油页岩拼接、泥一泥拼接.砂一砂接触断层两盘 砂体是连通的,属于同一个油藏,高部位富集成藏; 砂一泥接触,断层表现为岩性封闭,断层两盘为不连 通的两个油藏,两侧均被泥岩遮挡,形成良好的成藏 条件;砂一油页岩接触,断层封闭性较差.

从稠油的空间分布来看,目前泾河油田稠油主 要集中在泾河2井区和17井区(刘伟华,2014;毕 钰,2017),构造上分别位于早胜一榆林子断裂和永 正一榆林子断裂的叠接带(图2).泾河油田在上古 生界主要发育张扭/扭张性正断层为主,主要应力 特征为右行走滑为主,强度上逐渐减弱,经过三叠 系延长组等地层的稳定沉降后,燕山期发生强烈构 造反转,应力特征转化为左行左滑,并伴随抬升活 动,地层开始受到挤压应力影响,特别在走滑断裂 间的过渡区域应力集中释放(即叠接带),一系列走 向以近 E-W和NE-SW为主的斜交缝大量形成,喜 山期进一步发生左行走滑活动和抬升活动,逐渐形 成走向以NE-SW为主的垂直缝(刘志远,2022).

据前人研究,延长组烃源岩通常在侏罗纪晚期 开始生经,侏罗纪晚期一白垩纪是重要的排烃运移 时期(Jia et al., 2018). 而在早侏罗纪时期, 泾河油田 的走滑断裂叠接待的小型断裂大量发育.此外,前 人盆地模拟显示(Li et al., 2012; Wang et al., 2020),白垩纪晚期的抬升运动曾致使延长组地层 不断抬升,位于构造反转期过渡带的泾河2井区小 型断裂大量发育,部分断裂易断至地表或接近地 表,这对生成的原油的保存十分不利. 泾河油田各 井裂缝发育数量统计结果表明(表2,图2),在垂 直缝和斜交缝数量较多的井区,岩性配置关系较 差,上覆泥页岩厚度较薄的区域稠油大量发育,反 之则主要发育正常原油,这些大角度的小型裂缝数 量与稠油的发育有着明显的耦合关系,例如,泾河 55井区的JH55井水平缝和斜交缝不发育,垂直缝 密度为0.0052条/m,位于泾河2井区的JH36井垂 直缝和斜交缝均大量发育,其垂直缝和斜交缝的裂 缝密度分别为0.252条/m和0.063条/m(图10),显 然泾河2井区的高角度裂缝的裂缝密度远大于泾河 55井区,可见高角度裂缝的密度对稠油的发育具有 一定的控制作用.结合前文有关原油物理化学性质 的研究,本次研究总结了泾河油田走滑断裂带发育 特征与稠油发育机制之间的联系(图11).不难发





图 11 泾河油田走滑断裂带发育特征与原油稠化因素分析 Fig.11 The characteristic of strike-slip fault and the analysis of oil thickening factors in Jinghe oilfield

现,走滑断裂带控制着断缝体油藏的发育,而在走 滑断裂叠接带小型裂缝大量发育和岩性配置关系, 可能导致上覆部分盖层失效,也更容易发生地表水 下渗等现象,从而破坏油藏压力系统,造成轻烃组 分的散失,致使原油稠化,同时下渗的地表水还会 带入微生物及其所需的氧气及矿物,促进微生物繁 衍,加剧微生物对原油的降解作用.

总的来说, 泾河油田稠油的主要表现特征是轻 烃组分散失和生物降解, 走滑断裂控制了油藏内裂 缝密度和岩性配置关系, 同上覆泥页岩厚度一起控 制了油藏的封堵能力, 走滑断裂对断缝体油藏中原 油的调整和保存具有明显的控制作用.

5 结论

(1) 泾河地区长6、长7和长8段原油来自同一 套烃源岩,主要特征是沉积于一套还原性较强的淡水湖盆,有机质来源以藻类和高等植物来源并存, 原油存在两期或两期以上成熟度具有明显差异的 原油充注混合的特征,初步判断原油的整体成熟度 达到成熟阶段,其特征符合研究区长7段烃源岩的 地球化学特征.

(2)原油分子地球化学分析和聚类分析结果表明,泾河油田的稠油与正常原油是同源油,但二者 在生物降解程度上存在一定差别,即泾河油田稠油 普遍存在3~4级的生物降解,属于轻微一中等程度 的生物降解.

(3) 泾河油田稠油主要发育在走滑过渡带中小型断裂极为发育的区域,其分布与地层垂直缝和斜交缝有很好的耦合关系,稠油的形成与断缝体内较差的封堵能力有关,其表现特征是轻烃组分散失和 生物降解.总而言之,走滑断裂对原油的调整和保存具有明显的控制作用.

Reference

- Bi, Y., 2017. Research on Production Characteristics and Development Stratedy of Chang 8 reservoir, Jinghe Oil -Filed, Ordos Basin (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Chen, Y.G., He, Y.H., Wang, C., et al., 2021.Genesis and Accumulation Patterns of Unconventional Oil Reservoir in Member 8 of Triassic Yanchang Formation: A Case Study of the Western Ganquan Area, Southeastern Ordos Basin. Acta Petrolei Sinica, 42(10): 1270-1286(in Chinese with English abstract).
- Fu, J.H., Li, S.X., Guo, Q.H., et al., 2022. Enrichment Conditions and Favorable Area Optimization of Continental Shale Oil in Ordos Basin. Acta Petrolei Sinica, 43(12): 1702-1716(in Chinese with English abstract).
- Fu, J.H., Li, S.X., Niu, X.B., et al., 2020.Geological Characteristics and Exploration of Shale Oil in Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW

- Fu, S.T., Yao, J.L., Li, S.X., et al., 2020. Enrichment Characteristics and Resource Potential of Continental Shale Oil in Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 42(5):698-710(in Chinese with English abstract).
- Gao, B., Wu, X.L., Zhang, Y., et al., 2022. Hydrocarbon Generation Evolution Characteristics of Triasic Zhangjiatan Oil Shale in Southern Ordos Basin. *Petroleum Geology* & *Experiment*, 44(1):24-32 (in Chinese with English abstract).
- Gouch, M.A., Rhead, M.M., Rowland, S.J., 1992.Biodegradation Studies of Unresolved Complex Mixtures of Hydrocarbons: Model UCM Hydrocarbons and the Aliphatic UCM. Organic Geochemistry, 18(1):17-22.https://doi. org/10.1016/0146-6380(92)90139-0
- He, F.Q., Liang, C.C., Lu, C., et al., 2020. Identification and Description of Fault-Fracture Bodies in Tight and Low Permeability Reservoirs in Transitional Zone at the South Margin of Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 41(4): 710-718(in Chinese with English abstract).
- He, F. Q., Qi, R., Yuan, C. Y., et al., 2022. Further Understanding of the Relationship between Fault Characteristic and Hydrocarbon Accumulation in Binchang Area, Ordos Basin. *Earth Science*(in press) (in Chinese with English abstract).
- Hu, S.Z., Zhang, D.M., Tang, J., et al., 2009. Review of the Genesis of Heavy Oil. *Geological Science and Technolo*gy Information, 28(2): 94-97(in Chinese with English abstract).
- Jia, J.K., Yin, W., Qiu, N.S., et al., 2018. Migration and Accumulation of Crude Oil in Upper Triassic Tight Sand Reservoirs on the Southwest Margin of Ordos Basin, Central China: A Case Study of the Honghe Oilfield. *Geological Journal*, 53(5): 2280-2300. https://doi. org/10.1002/ gj.3065
- Kodner, R.B., Pearson, A., Summons, R.E., et al., 2008. Sterols in Red and Green Algae: Quantification, Phylogeny, and Relevance for the Interpretation of Geologic Steranes. *Geobiology*, 6(4): 411-420. https://doi. org/ 10.1111/j.1472-4669.2008.00167.x
- Li, C. S., Zhang, W. X., Lei, Y., et al., 2021. Characteristics and Controlling Factors of Oil Accumulation in Chang 9 Member in Longdong Area, Ordos Basin. *Earth Science*, 46(10):3560-3574(in Chinese with English abstract).
- Li, X.B., Liu, X.Y., Zhou, S.X., et al., 2012. Hydrocarbon Origin and Reservoir Forming Model of the Lower

Yanchang Formation, Ordos Basin. Petroleum Exploration and Development, 39(2):184-193.https://doi.org/ 10.1016/s1876-3804(12)60031-7

- Li, Y., Xiong, Y.Q., Liang, Q.Y., et al., 2018. The Application of Diamondoid Indices in the Tarim Oils. AAPG Bulletin, 102(2): 267-291. https://doi. org/10.1306/ 0424171518217073
- Liu, W.H., 2014. Crude Oil Viscosity Distribution Characteristics and Its Geological Origins of Jinghe Well Region 17. *Journal of Jianghan Petroleum University of Staff and Workers*, 27(4): 44-46, 49(in Chinese with English abstract).
- Liu, Z.Q., Xu, S.L., Liu, J.L., et al., 2020. Enrichment Laws of Deep Tight Sandstone Gas Reservoirs in the Western Sichuan Depression, Sichuan Basin. Natural Gas Industry, 40(2):31-40(in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. Y., 2022. Identification and Distribution of Regional Fractures Zone in Craton Basin: Take the Chang 8 Member in Yanchang Formation in Zhen-Jing Area, Southern Ordos Basin as an Example. Unconventional Oil & Gas, 9(3):11-20(in Chinese with English abstract).
- Ma, A. L., Jin, Z. J., Zhu, C. S., 2017. Maturity and Oil-Cracking of the Ordovician Oils from Tahe Oilfield, Tarim Basin, NW China. *Natural Gas Geoscience*, 28(2): 313-323(in Chinese with English abstract).
- Peters, K. E., Moldowan, J. M., 1993. The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments. *Choice Reviews Online*, 30(5): 2690-2690. https://doi.org/10.5860/choice.30-2690
- Peters, K.E., Walters, C.C., Moldowan, J.M., 2005. The Biomarker Guide. Biomarkers and Isotopes in the Environment and Human History. Cambridge University Press, New York.
- Qi, J.Z., Huang, J.J., Yang, P.C., et al., 2022. Genesis and Resource Potential Analysis of Neogene Heavy Oil in D Sub-Sag, Weixinan Sag, Beibuwan Basin. Offshore Oil, 42(1):13-18(in Chinese with English abstract).
- Qu, X.F., Zhao, Z.P., Lei, Q.H., et al., 2020. Fracture Development Characteristics and Controlling Factors of Yanchang Formation in Heshui Area, Ordos Basin. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 44(2):262-270 (in Chinese with English abstract).
- Radke, M., Welte, D. H., Willsch, H., 1982. Geochemical Study on a Well in the Western Canada Basin: Relation of the Aromatic Distribution Pattern to Maturity of Organic Matter. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46(1): 1-10.https://doi.org/10.1016/0016-7037(82)90285-x

Sachsenhofer, R.F., Popov, S.V., Akhmetiev, M.A., et al.,

2017. The Type Section of the Maikop Group (Oligocene-Lower Miocene) at the Belaya River (North Caucasus): Depositional Environment and Hydrocarbon Potential. *AAPG Bulletin*, 101(3): 289-319. https://doi.org/10.1306/08051616027

- Volkman, J. K., Barrett, S. M., Blackburn, S. I., 1999. Eustigmatophyte Microalgae are Potential Sources of C₂₉ Sterols, C₂₂-C₂₈ n-Alcohols and C₂₈-C₃₂ n-Alkyl Diols in Freshwater Environments. Organic Geochemistry, 30(5): 307-318. https://doi. org/10.1016/s0146 - 6380(99) 00009-1
- Wang, F.L., Xu, C.G., Zhang, M., et al., 2016. Application of Biomarker Quantitative Superposition Parameter Recovery Method for Oil-Source Correlation of Heavy Oil in Bohai Oilfields. *China Offshore Oil and Gas*, 28(3):70– 77(in Chinese with English abstract).
- Wang, W., Fan, R., 2019. Characteristics of Xujiahe Formation Fault-Fracture Reservoirs in the Northern Sichuan Basin and Its Exploration Significance. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 46(5): 541-548(in Chinese with English abstract).
- Wang, X., 2021. Characteristics of Strike-Slip Faults in Jinghe Chang 8 Reservoir and Their Influence on Hydrocarbon Accumulation. *Petrochemical Industry Application*, 40 (6):101-105(in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Chang, X.C., Sun, Y.Z., et al., 2020. Investigation of Fluid Inclusion and Oil Geochemistry to Delineate the Charging History of Upper Triassic Chang 6, Chang 8, and Chang 9 Tight Oil Reservoirs, Southeastern Ordos Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 113: 104115. https://doi. org/10.1016/j. marpetgeo.2019.104115
- Wang, Y.J., Cai, C., Xiao, Y., et al., 2021.Geochemical Characteristics and Oil-Source Correlation of Crude Oils of Buried Hills in Shulu Sag, Jizhong Depression.*Earth Sci*ence, 46(10): 3629-3644(in Chinese with English abstract).
- Xu, J.Y., Zhu, X.F., Song, Y., et al., 2019.Geochemical Characteristics and Oil - Source Correlation of Paleogene Source Rocks in the South Yellow Sea Basin.*Earth Sci*ence, 44(3):848-858(in Chinese with English abstract).
- Yang, F., Wang, Q., Hao, F., et al., 2020. Biomarker Characteristics of Source Rock and Oil-Correlation in Raoyang Depression, Jizhong Sub - Basin. *Earth Science*, 45(1): 263-275(in Chinese with English abstract).
- Yang, Y.T., Li, W., Ma, L., 2005. Tectonic and Stratigraphic Controls of Hydrocarbon Systems in the Ordos Basin: A

Multicycle Cratonic Basin in Central China. *AAPG Bulletin*, 89(2): 255-269. https://doi. org/10.1306/ 10070404027

- Zhang, M. M., Li, Z., 2018. Thermal Maturity of the Permian Lucaogou Formation Organic-Rich Shale at the Northern Foot of Bogda Mountains, Junggar Basin (NW China): Effective Assessments from Organic Geochemistry. *Fuel*, 211: 278-290. https://doi. org/10.1016/j. fuel.2017.09.069
- Zhang, Y.Y., Ren, Z.L., He, F.Q., et al., 2020.Meso-Cenozoic Structural Characteristics and Their Reservoir Controls of Structural Transition Area in China Craton: A Case Study of Yanchang Formation in Zhenjing Area of Southwestern Ordos Basin. Acta Petrologica Sinica, 36 (11):3537-3549(in Chinese with English abstract).
- Zhou, C.X., 2021.Study on Oil Source, Maturity and Charge Episodes of Marine Crude Oil in Cratonic Region of Tarim Basin (Dissertation). Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X., He, S., Chen, Z.Y., et al., 2016. Characteristics and Controlling Factors of Source Rocks in Yanchang Formation Sequence Framework, Ordos Basin. *Earth Science*, 41(6): 1055-1066(in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z., 2015. Changqing Xin 'anbian Discovered China's First 100 Million - Ton Large Tight Oil Field. Natural Gas and Oil, 33(3):38(in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Yang, Z., Tao, S.Z., et al., 2013. Continuous Hydrocarbon Accumulation over a Large Area as a Distinguishing Characteristic of Unconventional Petroleum: The Ordos Basin, North-Central China. *Earth-Science Reviews*, 126: 358-369. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.08.006

附中文参考文献

- 毕钰,2017.鄂尔多斯盆地泾河油田长8油藏生产特征及开 发对策研究(博士学位论文).成都:成都理工大学.
- 陈义国,贺永红,王超,等,2021.鄂尔多斯盆地三叠系延长组 8段非常规油藏成因与成藏模式——以盆地东南部甘 泉西区为例.石油学报,42(10):1270-1286.
- 付金华,李士祥,郭芪恒,等,2022.鄂尔多斯盆地陆相页岩油 富集条件及有利区优选.石油学报,43(12):1702-1716.
- 付金华,李士祥,牛小兵,等,2020.鄂尔多斯盆地三叠系长7 段页岩油地质特征与勘探实践.石油勘探与开发,47 (5):870-883.
- 付锁堂,姚泾利,李士祥,等,2020.鄂尔多斯盆地中生界延长 组陆相页岩油富集特征与资源潜力.石油实验地质,42

(5):698 - 710.

- 高波,武晓玲,张英等,2022.鄂尔多斯盆地南部张家滩油页 岩生烃演化特征.石油实验地质,44(1):24-32.
- 何发岐,梁承春,陆骋,等,2020.鄂尔多斯盆地南缘过渡带致 密一低渗油藏断缝体的识别与描述.石油与天然气地 质,41(4):710-718.
- 何发岐,齐荣,袁春艳,等,2022.鄂尔多斯盆地南部地区断裂 构造与油气成藏关系再认识——以彬长地区为例.地 球科学(待刊).
- 胡守志,张冬梅,唐静,等,2009.稠油成因研究综述.地质科 技情报,28(2):94-97.
- 李程善,张文选,雷宇,等,2021.鄂尔多斯盆地陇东地区长9 油层组砂体成因与油气差异分布.地球科学,46(10): 3560-3574.
- 刘伟华,2014. 泾河油田 17 井区原油粘度分布及成因分析. 江汉石油职工大学学报,27(4):44-46,49.
- 刘志远,2022.克拉通盆地区域裂缝带的识别与分布研究—— 以鄂尔多斯盆地南部镇泾地区延长组长8段为例.非常 规油气,9(3):11-20.
- 刘忠群,徐士林,刘君龙,等,2020.四川盆地川西坳陷深层致 密砂岩气藏富集规律.天然气工业,40(2):31-40.
- 马安来,金之钧,朱翠山,2017.塔里木盆地塔河油田奥陶系 原油成熟度及裂解程度研究.天然气地球科学,28(2): 313-323.
- 戚家振,黄建军,杨鹏程,等,2022.北部湾盆地涠西南凹陷D 洼新近系稠油成因及资源潜力分析.海洋石油,42(1): 13-18.
- 屈雪峰,赵中平,雷启鸿,等,2020.鄂尔多斯盆地合水地区延

长组裂缝发育特征及控制因素.物探与化探,44(2): 262-270.

- 王飞龙,徐长贵,张敏,等,2016.生物标志物定量叠加参数恢 复法在渤海油田稠油油源对比中的应用.中国海上油 气,28(3):70-77.
- 王威,凡睿,2019.四川盆地北部须家河组"断缝体"气藏特征 及勘探意义.成都理工大学学报(自然科学版),46(5): 541-548.
- 王旭,2021. 泾河长8走滑断裂特征及其对油气富集的影响. 石油化工应用,40(6):101-105.
- 王元杰,蔡川,肖阳,等,2021.冀中坳陷束鹿凹陷潜山原油地 球化学特征与油源对比.地球科学,46(10):3629-3644.
- 徐建永,朱祥峰,宋宇,等,2019.南黄海盆地古近系烃源岩地 球化学特征及油源对比.地球科学,44(3):848-858.
- 杨帆, 王权, 郝芳, 等, 2020. 冀中坳陷饶阳凹陷北部烃源岩生物标志物特征与油源对比. 地球科学, 45(1):263-275.
- 张园园,任战利,何发岐,等,2020.克拉通盆地构造转折区 中-新生界构造特征及其控藏意义——以鄂尔多斯盆 地西南部镇泾地区延长组为例.岩石学报,36(11): 3537-3549.
- 周晨曦,2021.塔里木盆地台盆区海相原油油源、成熟度与充 注期次研究(博士学位论文).广州:中国科学院大学(中 国科学院广州地球化学研究所).
- 周翔,何生,陈召佑,等,2016.鄂尔多斯盆地南部延长组层序 地层格架中烃源岩特征及控制因素.地球科学,41(6): 1055-1066.
- 周舟,2015.长庆新安边发现我国首个亿吨级大型致密油田. 天然气与石油,33(3):38.