

细粒沉积岩典型低阻油层成因及甜点分布

印森林¹, 陈旭², 杨毅³, 章彤⁴, 程皇辉⁴, 姜涛⁴, 熊亭⁵, 刘娟霞³, 何理鹏⁵, 杨小江⁵

[1. 长江大学 录井技术与工程研究院, 湖北 荆州 430023; 2. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100; 3. 中法渤海地质服务有限公司, 天津 300452; 4. 中国石油 新疆油田分公司, 新疆 克拉玛依 834000; 5. 中海石油(中国)有限公司 深圳分公司, 广东 深圳 518067]

摘要:细粒沉积岩已成为非常规油气勘探的重要目标,普遍发育了低电阻率油气层。利用测井、录井、地震和薄片电镜测试等资料,结合相控储层参数分布技术,揭示了细粒沉积岩典型低阻油层成因机制,并提出了3类基于低阻成因的甜点分布规律。研究表明:①低阻油层成因主要包括大比表面积、高含量伊/蒙混层矿物、发达的微孔隙网络及其内部束缚水、高矿化度水以及高含量导电矿物等5个方面。②识别出了3类细粒沉积岩低阻类型,包括高泥质含量致密型低阻油层(致密低阻型)、高含量导电矿物型低阻油层(导电矿物低阻型)和疏松砂岩强连通水网型低阻油层(强连通水网导电低阻型),并在此基础上进行了成因分析。③明确了低阻隐蔽油层的甜点分布特征。致密型低阻油层甜点主要发育在电阻率相对较高的储层中,导电矿物型低阻油层甜点主要发育在白云质粉砂岩基质溶蚀段与白云质泥/页岩裂缝发育段,而强连通水网导电型低阻油层甜点主要发育在具有双模态孔隙结构的极细粒岩性中。研究结果对于指导下一步细粒沉积岩储层油气勘探意义重大。

关键词:油气甜点;导电矿物;页岩;致密储层;细粒沉积岩;低阻油层;非常规油气勘探

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Origin and sweet spots of typical low-resistivity oil reservoirs of fine-grained sedimentary rocks

YIN Senlin¹, CHEN Xu², YANG Yi³, ZHANG Tong⁴, CHENG Huanghui⁴, JIANG Tao⁴, XIONG Ting⁵, LIU Juanxia³, HE Lipeng⁵, YANG Xiaojiang⁵

(1. Institute of Mud Logging Technology and Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 430023, China; 2. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 3. China-France Bohai Geoservices Co. Ltd., CNOOC, Tianjin 300452, China; 4. Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China; 5. Shenzhen Branch of CNOOC, Shenzhen, Guangdong 518067, China)

Abstract: Fine-grained sedimentary rocks, in which low-resistivity oil and gas reservoirs are well developed, have become a significant target in unconventional hydrocarbon exploration. The study serves to reveal the genetic mechanism of typical low-resistivity oil reservoirs of fine-grained sedimentary rocks in applying the data from logging, seismic and thin-section electron microscopy (EM), as well as well facies-controlled reservoir parameter distribution, while proposing three sweet-spot distribution patterns under low resistivity. The research results are shown as follows. First, the origin of low-resistivity reservoirs mainly includes the large specific surface area, high content of mixed layer illites/smectites, well-developed micropore network and high bound water content, high-salinity water and high content of conductive minerals. Second, we propose three typical types of fine-grained sedimentary rocks with low resistivity, including tight low-resistivity oil reservoir with high mud content (i. e., tight reservoir of low resistivity), low-resistivity oil reservoir with high content of conductive minerals (i. e., conductive mineral-dominant reservoir of low resistivity) and water network low-resistivity oil reservoir with well-connected loose sandstones (i. e., well-connected water network conductive reservoir of low resistivity). Meanwhile, their genetic mechanisms are analyzed built on this. Third, the sweet-spot distribution patterns in subtle low-resistivity reservoirs are clarified. The tight reservoir of low resistivity has the sweet spots mainly developed in those of relatively higher resistivity; the

收稿日期:2023-02-02;修回日期:2023-05-20。

第一作者简介:印森林(1983—),男,副教授、博士生导师,油气田开发地质。E-mail:yinxian_love@qq.com。

基金项目:长江大学地质资源与地质工程一流学科开放基金项目(2019KFJJ0818022);油气藏地质与工程国家重点实验室开放基金项目(PLN2022_19)。

conductive mineral-dominant type has the sweet spots mainly grown in the dissolved section of the dolomitic siltstone matrix and the section with well-developed dolomitic mud/shale fractures; meanwhile, the well-connected water network conductive reservoir of low resistivity has the sweet spots mainly developed in the ultra-fine-grained rocks with dual-mode pore structure. The results are of great significance to guiding the exploration of fine-grained sedimentary oil/gas reservoirs.

Key words: hydrocarbon sweet spot, conductive mineral, shale, tight reservoir, fine-grained sedimentary rock, low-resistivity oil reservoir, unconventional oil/gas exploration

引用格式:印森林,陈旭,杨毅,等. 细粒沉积岩典型低阻油层成因及甜点分布[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 946-961. DOI: 10. 11743/ogg20230412.

YIN Senlin, CHEN Xu, YANG Yi, et al. Origin and sweet spots of typical low-resistivity oil reservoirs of fine-grained sedimentary rocks[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 946-961. DOI: 10. 11743/ogg20230412.

随着非常规油气勘探开发的不断深入,细粒沉积岩成为研究热点^[1-7]。由于其具有粒度细、泥质含量高、孔隙结构差和微孔隙发育的特点^[8-10],形成了大量的低电阻率油气层,逐渐成为常见油层类型^[11-14]。然而,因此类储层电阻率低,故十分隐蔽,极易因误判为水层而被忽略^[15-16]。近年来,针对低阻油层成因与测井解释方法取得的较大进展,学者们提出了高矿化度地层水、微孔隙发育、富含分散泥质、骨架导电、砂泥岩薄互层和低幅度构造等典型低阻地质成因的6种类型^[16-20]。与之对应的低阻油气层测井解释方法也取得了较大进展,主要是开展了基于油田地质特点的多种测井曲线综合识别。与此同时,测井曲线的重叠和交会图等定量评价技术也取得了进展^[20],例如,微分法、RRSR法和改进的PICKETT法等^[16]。在含油气饱和度定量计算方面,主要进展是基于阿尔奇变换公式的饱和度计算,以及泥质砂岩电阻率模型、泥质砂岩双电层电阻率模型^[16]和高束缚水低阻饱和度模型的建立。尽管测井评价取得了较大的进展,但受不同工区细粒沉积岩低阻成因差异的影响,低阻储层形成的关键地质作用过程和地质“甜点”空间分布规律的系统研究较少,典型“甜点”油层与地球物理测井响应模式等则亟待深入研究^[9, 20-26]。本文以准噶尔盆地东部阜康断裂带中段三叠系黄山街组、准噶尔盆地东部火烧山油田平地泉组和珠江口盆地阳江凹陷珠江组等典型细粒沉积岩为例,探讨典型低阻油层的识别、成因和“甜点”空间分布规律。

1 细粒沉积岩低阻油层定义、成因及分类

1.1 细粒沉积岩低阻油层定义和成因概括

1.1.1 低阻油层的定义及研究历程

低阻油层的定义主要以电阻率增大率和含油饱和

度的大小为准。低阻油层研究主要经历了3个阶段:①早期将含油饱和度小于或接近50%、电阻增大率小于3的油层定义为低阻油层^[27];②认为油层电阻率的绝对值低就是低阻油层,把电阻率小于或与围岩电阻率相近、油层与水层的电阻率差别不大、电阻率绝对值小于 $4\ \Omega\cdot\text{m}$ 、电阻率增大率小于3的油层定义为低阻油层^[28-29],并将低阻油层归结为相对于邻近水层、电阻率值偏低并引起油水层解释困难的一类油层^[30];③认为油层电阻率低于相邻泥岩层,给出了电阻增大率小于2、甚至与水层电阻率相同的油层为低阻油层^[31]。

1.1.2 细粒沉积岩低阻油层的发育特点与主控因素

细粒沉积岩中普遍发育低阻油层。由于低阻油层形成机理因工区而异,测井响应信息对这类油层的分辨能力有限。因此,系统认识低阻油层成因,探索不同成因低阻油层的导电规律,以此提高此类油层的识别效率意义重大。

文献调研发现,低阻油层的形成主要与以下5种地质因素有关(表1)。

1) 沉积环境。在弱水动力的低能环境下容易发育细粒沉积岩,如三角洲前缘小型水下河道河口砂坝、滨浅湖滩坝、远砂坝、席状砂和半深湖-深湖沉积区等低能带,这些成因砂体的岩性以细-粉砂岩和泥质粉砂岩为主,微孔隙发育,泥质含量较高,岩石的结构成熟度和矿物稳定度较低^[32]。

2) 沉积旋回。在正旋回砂体顶部、反旋回砂体底部岩性相对变细、泥质含量相对较高或储层变薄位置也极易形成低阻油层^[20]。

3) 地质构造作用。低幅度油藏、岩性油藏、油-水过渡带区域等,也是低阻油层较为发育的场所^[20]。

4) 成岩作用。在埋藏成岩过程中,成岩阶段控制着储集岩中原生孔隙的消减程度和次生孔隙的发育状况^[20]。

表1 低阻油层成因分类及主控因素

Table 1 Genetic types of low-resistivity oil reservoirs and the main controlling factors

大类	亚类	细类	小类	控制因素
地质成因	沉积成因	岩石组构	岩性粒度细	极细砂岩、粉砂级颗粒
			黏土矿物含量	蒙脱石、伊利石含量高
			骨架含导电矿物	黄铁矿、黄铜矿、火山岩碎屑
		孔隙结构	特高孔隙度	分选好的疏松砂岩
			微孔隙结构	束缚水含量高
		岩层结构	岩性叠置组合	砂、泥薄互层
		原生水性质	地层水矿化度	高或低矿化度水
	构造成因	构造起伏	局部构造幅度	低幅度构造
	水动力成因	地层水	古油藏被地层水冲刷而破坏	淡水冲刷
	含油气性	流体性质	油气类型	轻质油气
工程因素	泥浆侵入	—	—	盐水泥浆侵入较深

注:表中“—”为未细分类。

5) 地层水矿化度。地层孔隙中的高矿化度地层水含量也可导致低阻油层^[33]。

综上,低阻油层的岩性以细粒沉积岩居多。学者们认为油层中含有较多的束缚水、黏土矿物附加导电性、油层微裂缝发育、骨架导电和油层中含有高矿化度地层水是导致低阻油层的主要因素。低阻油层的成因可以分为大类、亚类、细类与小类等4个级别(表1)。

1.2 典型细粒沉积岩低阻油层分类

1.2.1 高泥质含量致密型低阻油层(致密低阻型)

准噶尔盆地东部阜康断裂带中段发育西低东高的大型复杂断块群构造^[34]。在中三叠统黄山街组,发育一套湖泊细粒沉积体系,岩性以大段黑色、深灰色泥岩,夹薄层粉-细砂岩、灰色泥质粉砂岩和灰色粉砂质泥岩等细粒沉积岩为主,岩性显示泥质含量很高,单层厚度一般在1.0~3.5 m,最大5 m,平均约2 m。目的层厚度200~300 m,平均250 m,分布范围约120 km²,夹大量富含油气的渗透性砂质条带,属于典型致密非常规油气藏。目的层经历了复杂成岩演化过程,并遭受强烈的压实作用,导致颗粒接触类型以点-线接触和凹凸-线接触为主,胶结类型为孔隙-压嵌型胶结。储层孔隙度在12%~18%,平均14%,渗透率在 $(0.16 \sim 5.12) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $1.40 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为典型低孔、特低渗储层。电阻率呈典型低值,为4.0~5.1 $\Omega \cdot \text{m}$,自然伽马值为45~59 API,声波时差为87~100 $\mu\text{s}/\text{ft}$,密度为2.35~2.50 g/cm³(图1)。油层主要发育在深度3 165.0~3 190.0 m与3 235.0~

3 258.0 m井段。其中,台60井黄山街组深度3 235.0 m~3 240.0 m井段,压裂后2 mm内径油嘴自喷,试采日产油5.19 t,为致密型低阻储层(表2),展示了良好的勘探评价潜力。

1.2.2 高含量导电矿物型低阻油层(导电矿物低阻型)

准噶尔盆地东部火烧山油田位于克拉美丽山南麓,二叠系平地泉组为其主力油藏,内部发育H1—H5段共计5套层系。火烧山油田主力开发区构造形态为轴向近南北走向的短轴背斜,背斜东、西两翼不对称,东翼陡,西翼缓,各个层顶面构造形态基本一致。受不同时期和不同方向地应力影响,主要发育近南北走向西倾断裂和北西-南东走向具有走滑性质的逆断裂^[35]。目的层平地泉组H5段为咸化半深湖-深湖相沉积,发育了碳酸岩盐和碎屑岩混合细粒岩沉积,岩性以深灰-灰黑色白云质泥岩、深灰色白云质粉砂岩和粉砂质泥岩以及灰绿色泥岩,其内部发育大量不同产状的黄铁矿。目的层厚度在100~160 m,平均120 m,分布范围约400 km²,为大段烃源岩层夹富含油气的渗透性白云质粉砂岩储层及页岩储层,属于典型源-储一体的页岩油藏。烃源岩总有机碳含量(TOC)为3.74%,氯仿沥青“A”含量为0.416 1%,为Ⅱ₁型有机质,镜质体反射率(R_o)为0.54%~1.21%,属于成熟-高成熟阶段优质烃源岩。储层内部基质孔隙、层理面(缝合线)、裂缝及溶蚀孔发育^[36]。储层孔隙度小于10%,平均渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。电阻率为2.0~300.0 $\Omega \cdot \text{m}$,自然伽马值为45~59 API,声波时差为55~80 $\mu\text{s}/\text{ft}$,密度为2.45~2.55 g/cm³。岩心显示含油段电阻率为2.0~10.0 $\Omega \cdot \text{m}$ (图2),属碳酸盐岩特高阻背景下的低阻储层

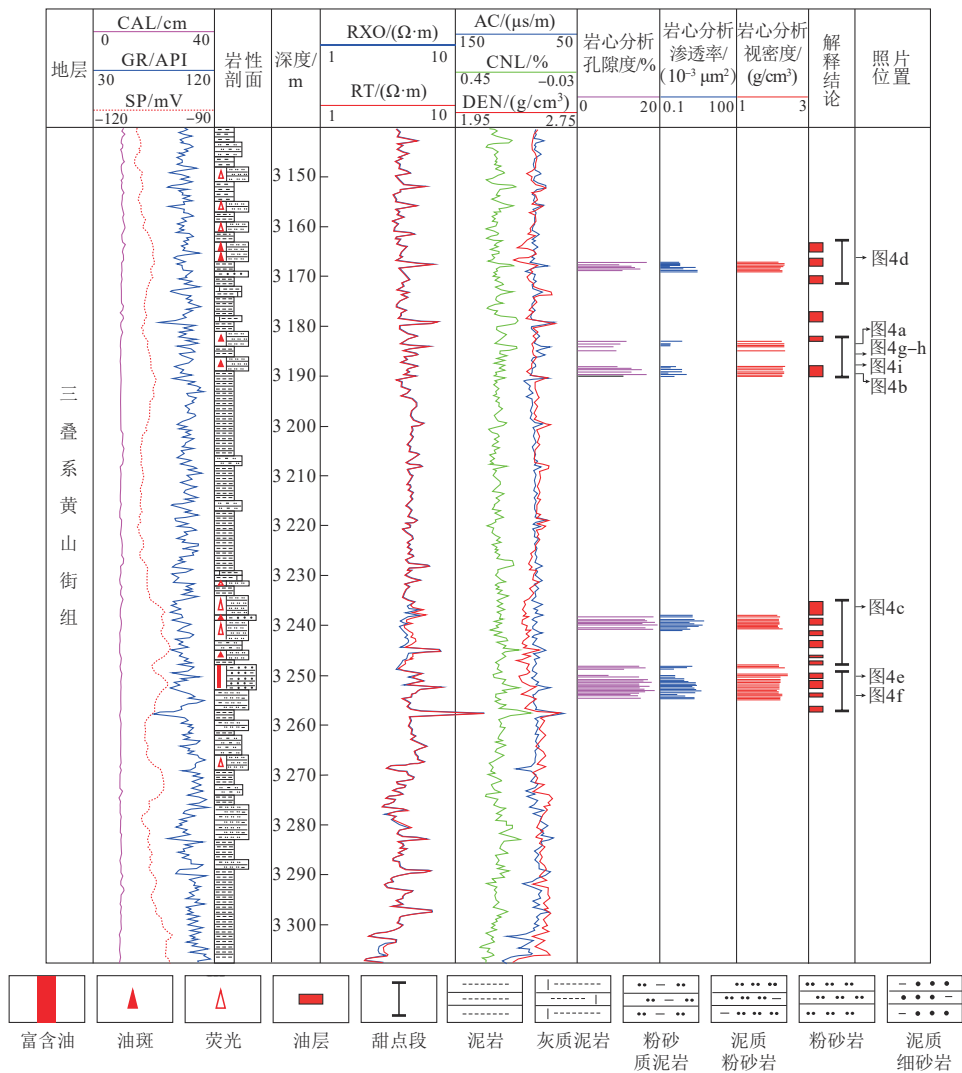


图 1 准噶尔盆地东部阜康断裂带中段三叠系黄山街组综合柱状图

Fig. 1 Composite stratigraphic column of the Triassic Huangshanjie Formation in the middle of the Fukang fault zone , eastern Junggar Basin

表 2 细粒沉积岩典型低阻油层分类及基本特征

油层类型	储层岩性	层位	电阻率值/ (Ω·m)	孔隙度/%	含油 饱和度/%	孔隙结构特征	沉积微相
致密低阻型	粉砂岩、泥质粉砂岩、 粉砂质泥岩	三叠系 黄山街组	3.0 ~ 6.0	8 ~ 14	55 ~ 85	基质型单模态	浅湖滩坝
导电矿物低阻型	白云质粉砂岩、白云质泥岩	二叠系 平地泉组	2.0 ~ 100.0	6 ~ 15	65 ~ 95	基质型、溶蚀型、 裂缝型多模态	浅湖滩坝、 半深湖-深湖
强连通水网低阻型	极细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、 粉砂质泥岩	新近系韩江组 和珠江组	1.6 ~ 4.0	10 ~ 25	55 ~ 80	基质型双模态	三角洲外前缘远砂坝、 席状砂

(表2)。成像测井动态图像与地层倾角测井施密特图显示,多个层段裂缝发育程度较高。H5段上部以发育溶蚀型甜点储层为主,而下部以发育裂缝性甜点储层为主(图2)。岩心多层段有油气显示,暂未开发动用,勘探评价潜力巨大。

1. 2. 3 疏松砂岩强连通水网型低阻油层(强连通水网导电低阻型)

珠江口盆地阳江凹陷恩平 A 油田位于南海东北部,其所在海域水深约 87 m。阳江凹陷总体为 NEE 走

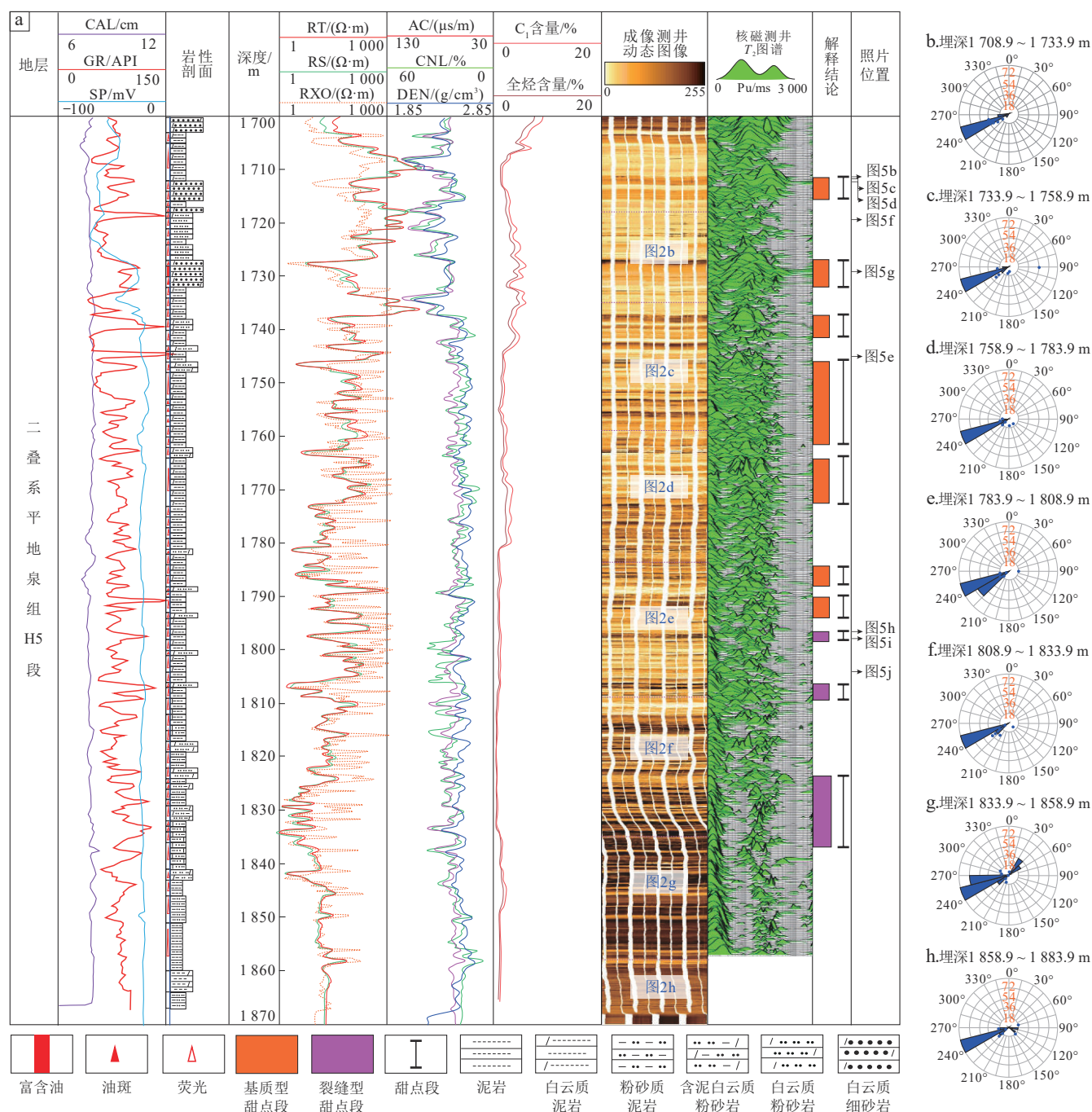


图2 准噶尔盆地东部火烧山油田二叠系平地泉组H5段综合柱状图

Fig. 2 Composite stratigraphic column of the H5 interval of the Permian Pingdiqian Formation in Huoshaoshan oilfield, eastern Junggar Basin

a. 地层综合柱状图; b—h. 地层倾向施密特图

向,呈复杂狭长型断陷展布特征,自西向东构成了“五洼一隆”的基本构造格局。新近系中新统韩江组下部和中统珠江组上部为主要含油层段,油层埋深较浅,在1 182.0~2 084.0 m,属中浅-中深油层;恩平A油田构造受两条断层控制,属于背斜构造,地层倾向由深至浅逐渐变缓,构造走向整体为北西-南东向。主要为三角洲前缘沉积,沉积微相包括水下分流河道、河口坝和远砂坝等;珠江组储层以岩屑长石砂岩、长石石英砂岩为主;储层以

孔隙型胶结为主,分选中等,储集空间以原生粒间孔为主^[37-38]。岩心分析结果显示,孔隙度在16.1%~31.8% (中值22.3%),空气渗透率在 $1.97 \times 10^{-3} \sim 4\,273.00 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (中值 $171.00 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),为中孔、中渗储集层;孔隙较发育,储层面孔率一般大于15%,孔隙连通性较好,主要孔隙类型为原生粒间孔,偶见粒内溶孔。岩心显示含油段电阻率在 $1.4 \sim 20.0 \Omega \cdot \text{m}$,其中细粒沉积岩油层电阻率值普遍约为 $1.8 \Omega \cdot \text{m}$,当岩石粒度增加时,

水层电阻率约为 $0.4 \Omega \cdot \text{m}$, 油层电阻率则在 $4.0 \sim 10.0 \Omega \cdot \text{m}$ (图3)。属于中-高孔、渗背景下特低阻油层^[39] (表2)。

2 细粒沉积岩低阻油层成因

2.1 致密低阻型

致密低阻型是较早认识的一类隐蔽油层。在常规

储层的储量逐渐动用后,在大套厚油层中间,或者大套泥岩中夹含的薄储层(渗透性夹层型页岩油储层)和差储层中往往会发现新的油层。这类油层十分隐蔽,以阜康断裂带中段中三叠统黄山街组为例,其属于湖泊相沉积,储集层主要为泥岩夹含薄层滩坝粉砂,具有岩性粒度细、泥质含量较高的特点,主要发育灰绿色泥质粉砂岩、粉砂质泥岩和黑色泥岩等细粒沉积岩(图4a—c)。主要矿物成分为石英、长石、岩屑、伊利石(12%)、高岭石(25%)、绿泥石(8%),伊利石与蒙脱石混层比平

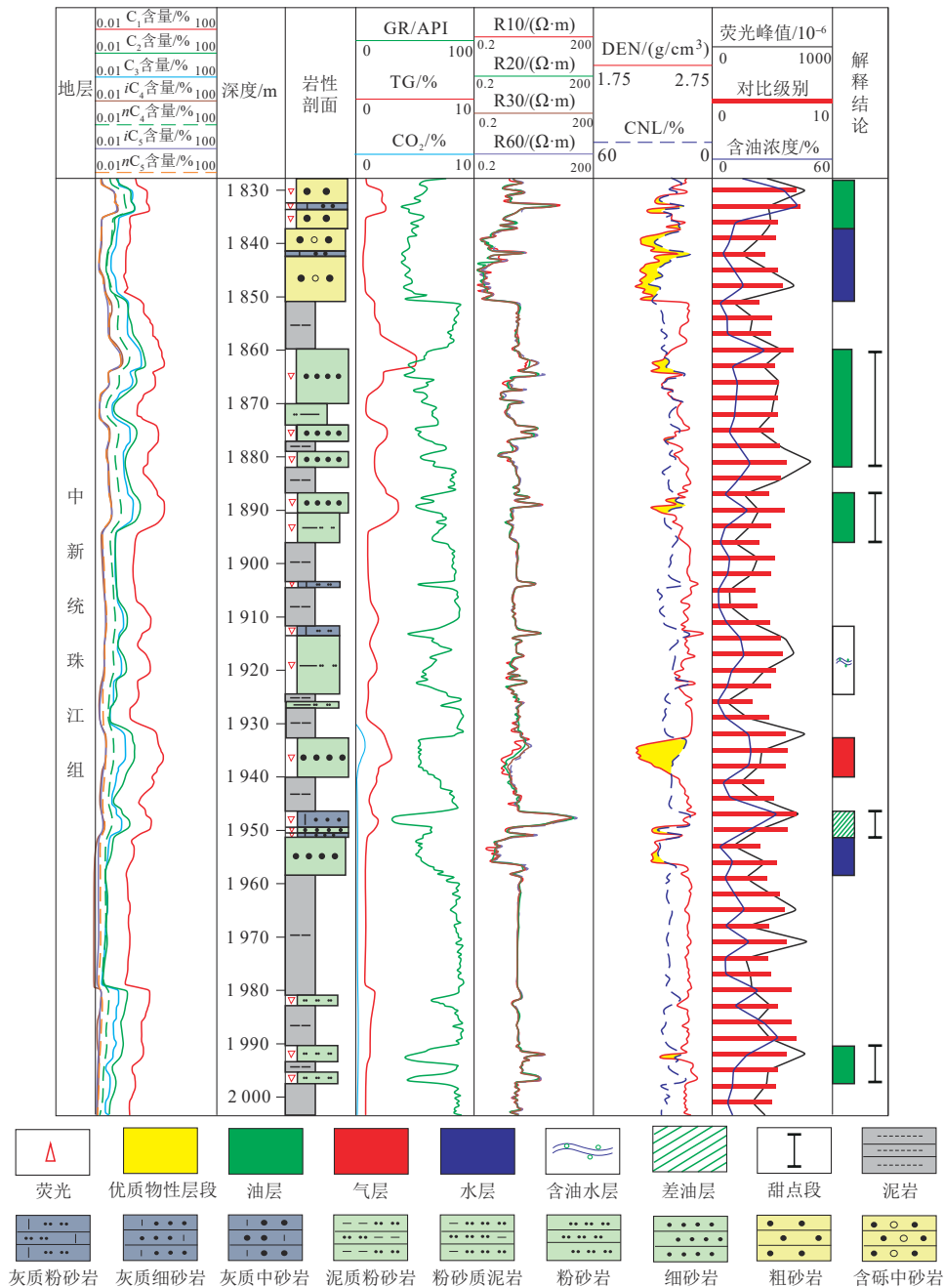


图3 珠江口盆地阳江凹陷中新统珠江组上部综合柱状图

Fig. 3 Composite stratigraphic column of the upper interval of the Miocene Zhujiang Formation in the Yangjiang Sag, PRMB

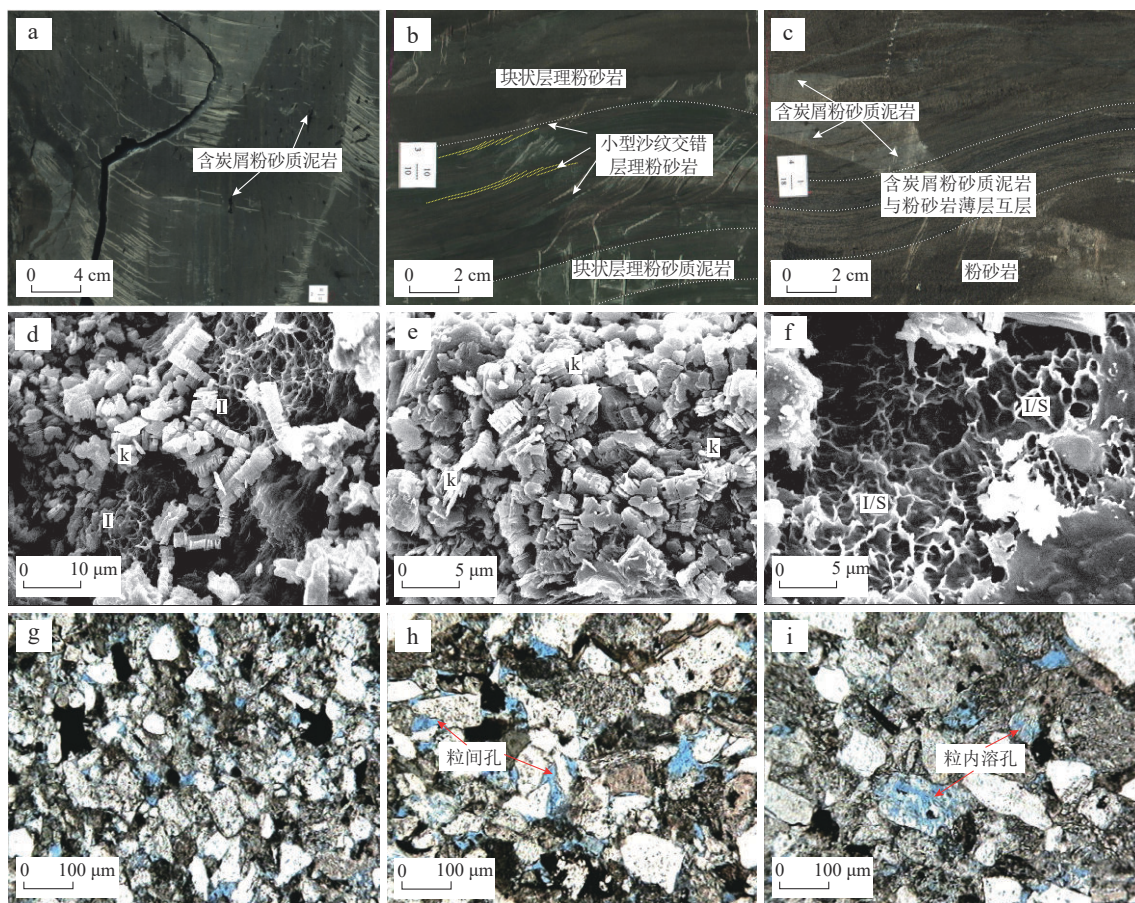


图4 准噶尔盆地台60井三叠系黄山街组致密低阻型岩心与薄片显微照片

Fig. 4 Images showing the cores and thin sections of the tight reservoir of low resistivity in the Triassic Huangshanjie Formation in Well Tai60, Junggar Basin

a. 含炭屑粉砂质泥岩,岩心,埋深3 182.86 m;b. 小型沙纹交错层理粉砂岩和块状粉砂质泥岩互层,岩心,埋深3 189.46 m;c. 含炭屑粉砂质泥岩与粉砂岩薄层互层,岩心,埋深3 236.86 m;d. 高岭石与伊利石发育,扫描电镜,埋深3 166.25 m;e. 高岭石大量发育,扫描电镜,埋深3 250.05 m;f. 伊蒙混层,扫描电镜,埋深3 252.17 m;g. 粒间孔不发育,铸体薄片,埋深3 186.23 m;h. 少量粒间孔发育,铸体薄片,埋深3 186.23 m;i. 粒内溶蚀孔发育,铸体薄片,埋深3 188.00 m
K. 高岭石;I. 伊利石;I/S. 伊/蒙混层

均为62%。因泥质含量较高,导致黏土矿物(伊/蒙混层、伊利石和高岭石等)附加导电能力增强(图4d—f)。同时,泥质含量高也引起孔隙结构十分复杂,微孔隙发育,束缚水饱和度相对较高(图4g—i),高泥质含量和高束缚水综合导致了测井响应显示为低阻油气层(图1)。油气充注成藏后,油层电阻率绝对值低至 $3\ \Omega\cdot\text{m}$,形成了低阻致密油藏类型。此类型是低阻油层,广泛发育于中国陆相含油气盆地各层系。

2.2 导电矿物低阻型

导电矿物低阻型是一类比较特殊的低阻油层,是岩石矿物骨架中含有导电矿物引起的,导电矿物一般为黄铁矿、磁铁矿和黄铜矿等。例如,黄铁矿靠电子传导电流,其电阻率为 $10^{-6}\sim 10^{-1}\ \Omega\cdot\text{m}$,而仪器探测半径

范围内的流体和各类矿物的电阻率贡献之和为电阻率测井测量值,具有高导电能力的黄铁矿形成导电回路后,势必引起电阻率大幅度降低。细粒沉积岩储层大部分形成于半深湖/海相—深湖/海相还原环境,对黄铁矿的发育极为有利,成岩过程中形成的团块状、浸染状、网络状、结核状和同沉积分散状的黄铁矿广泛存在。

以陆相页岩油工区准噶尔盆地东部火烧山油田平地泉组和吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油气为例,其储集的储集空间类型主要为裂缝型和基质型。一方面,受构造和沉积作用影响,会产生一些由高角度斜交裂缝和纹层的层理面裂缝构成的裂缝网络系统(图5a);另一方面,伴随着内碎屑碳酸盐岩沉积过程,泥页岩层系中相对粗粒的白云质粉砂岩内会

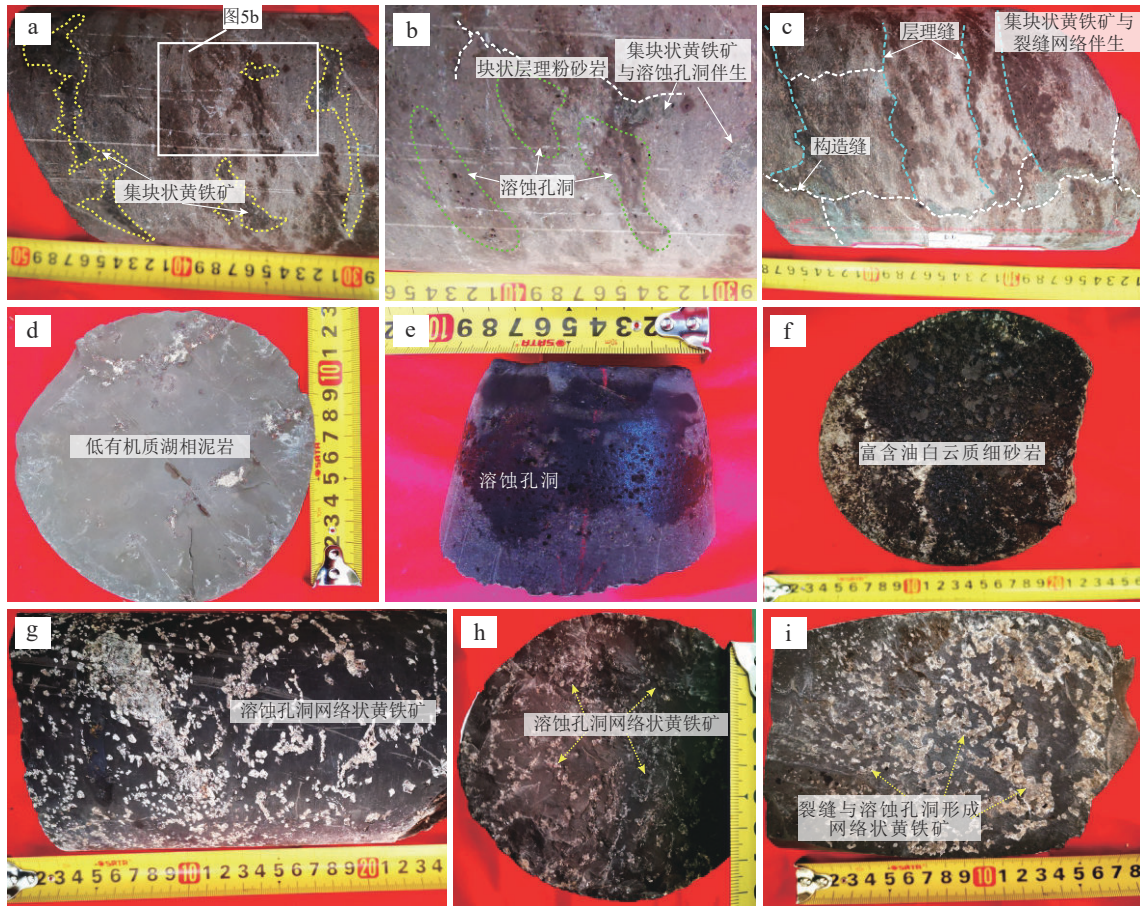


图5 准噶尔盆地东部火烧山油田二叠系平地泉组H2947井H5段导电矿物低阻型岩心照片

Fig. 5 Images showing the cores of conductive mineral-dominant reservoir of low resistivity in the H5 interval of the Permian Pingdiquan

Formation in well H2947 in Huoshaoshan oilfield, eastern Junggar Basin

- a. 白云质粉砂岩,大量发育黄铁矿,呈裂缝充填集块状与溶蚀孔分散状,埋深1 712.22 m; b. 白云质粉砂岩,溶蚀孔洞发育与集块状黄铁矿伴生,埋深1 712.22 m; c. 层理缝与高角度裂缝构成裂缝网络体系,埋深1 712.22 m; d. 低有机质灰绿色泥岩,埋深1 748.68 m; e. 含泥白云质粉砂岩,溶蚀孔洞发育,埋深1 721.47 m; f. 白云质细砂岩,层面缝合线富含油,埋深1 730.56 m; g. 溶蚀孔洞网络状黄铁矿,埋深1 797.61 m; h. 溶蚀孔洞网络状黄铁矿层面,埋深1 797.91 m; i. 裂缝与溶蚀孔洞形成网络状黄铁矿,埋深1 807.32 m

发生大量溶蚀作用(图5b),形成溶蚀基质型孔隙储集空间。在裂缝网络中,黄铁矿以充填或交代颗粒的方式存在,形成网络状连通。而在白云质粉砂岩内,大量发育的溶蚀孔洞经常被黄铁矿填充,形成团块状(图5b)、浸染状和结核状充填(图5g—i),还有少量以砂岩胶结物充填形式存在,也构成了较好的导电网络。由广泛的裂缝充填状和大面积的集块充填状黄铁矿构成的导电网络会形成导电通路,直接导致低阻、甚至特低阻储层的测井响应(图5c),同沉积分散状黄铁矿(图5d)则对电阻率影响不大。此类型是目前页岩油藏研究的重点对象,其沉积环境较为复杂,是一种特殊类型。

2.3 强连通水网导电低阻型

阳江凹陷珠江组发育了以细砂岩为主体的岩性

类型,其孔隙度和渗透率高,孔隙结构好,属于常规储层类型(图6)。同时,也大量发育由泥质细砂岩、极细砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩等细粒沉积岩类型构成的低阻油层具典型双模态的孔隙结构特征。极低阻特征明显,此类低阻油层GR曲线类似泥岩层,电阻率比标准水层还低,油、水层识别难度很大。其低阻储层成因主要有:①宏观上,此类储集层主要以远砂坝和席状砂沉积为主,属于三角洲前缘弱水动力条件下的沉积地层(图6a—d);岩性粒度细,为泥质细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩(图6e),细骨架颗粒比表面积增大,颗粒表面吸附更多地层水,降低油层电阻率。②泥质含量和黏土矿物含量一般均大于10%,泥质杂基以伊/蒙混层和伊利石为主,主要为贴附颗粒表面生长形成黏土包膜网络,扩大导电网面积,降低电阻率。③储集孔隙类型以原生孔隙为主,

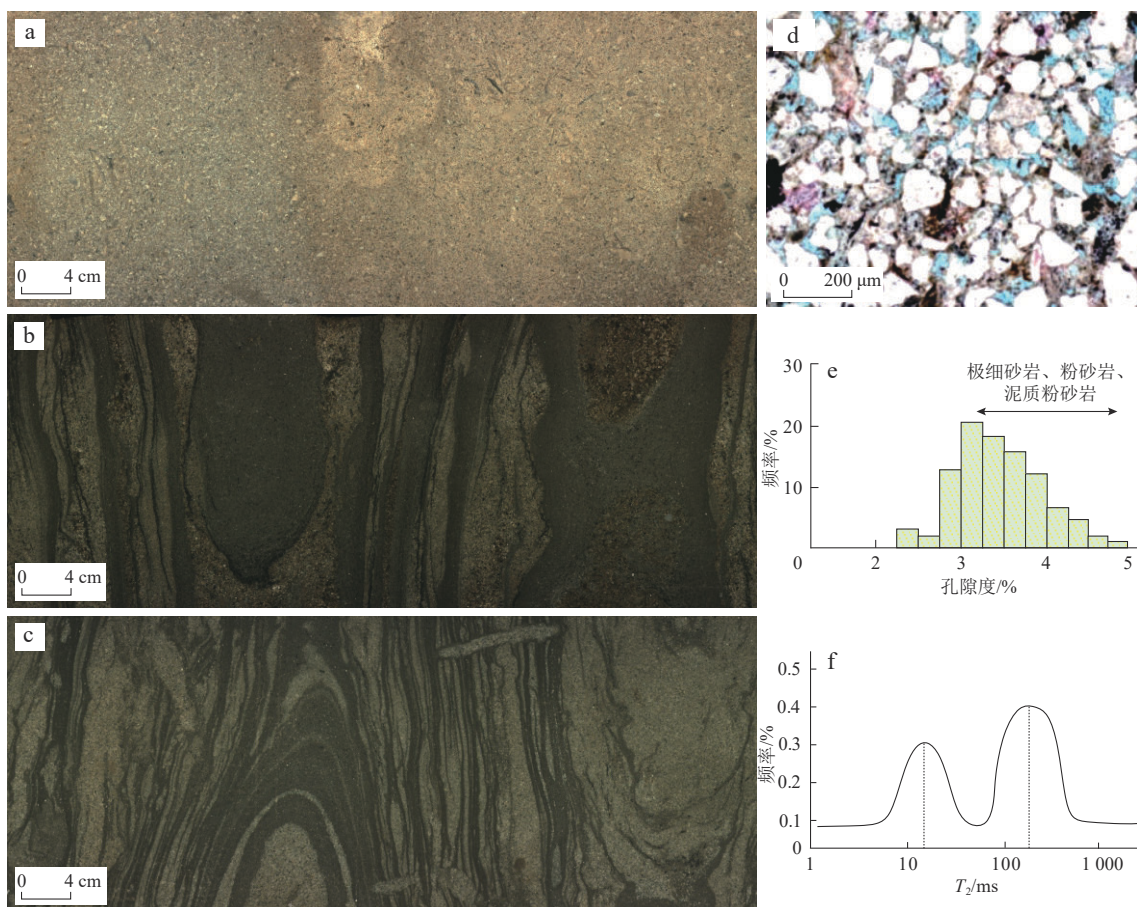


图6 珠江口盆地阳江凹陷中新统强连通水网导电低阻型岩心解释

Fig. 6 Core interpretation of the well-connected water network conductive reservoir of low resistivity in the Miocene, Yangjiang Sag, PRMB
a. 极细砂岩, A1井, 珠江组, 埋深1 809.7 m, 岩心照片; b. 泥岩与粉砂岩互层, A1井, 珠江组, 埋深1 861.0 m, 岩心照片; c. 粉砂岩夹泥质粉砂岩, A2井, 珠江组, 埋深2 258.6 m, 岩心照片; d. 极细砂岩, A3井, 韩江组, 埋深1 707.0 m, 铸体薄片显微照片; e. 井壁取心粒度分析结果, A2井, 珠江组, 埋深2 145.0 m; f. 核磁共振孔隙结构模态, A2井, 珠江组, 埋深2 145.0 m

含少量次生孔隙的组合型,以粒间孔为主,其孔隙结构具有双模态特征(图6f),大孔隙细喉与小孔隙微喉发育程度相当^[36];呈现出双束缚水的特征,大孔隙和小孔隙表面均有束缚水,以微喉为主的喉道使自由水无法流动,形成束缚水导电网络,从而产生低阻油层^[29]。

3 细粒沉积岩低阻油层甜点特征与分布

3.1 致密低阻型甜点

陆相浅湖-半深湖相中发育的大套泥岩夹含的薄层砂岩,与烃源岩距离近,成藏条件好,富含油气。由于其厚度薄、空间分布范围不易确定,需对其低阻油层开展精细单井解释与识别,才能准确刻画其分

布特征。对准噶尔盆地东部阜康断裂带三叠系黄山街组大套泥岩中夹含的薄层砂岩进行单井精细识别后,结合沉积微相平面分布(图7a),认为黄山街组以三角洲前缘沉积及浅湖滩坝为主;随后,开展相控储层孔隙度和含油饱和度参数分布研究(图7b,c),采用成因砂体和相控储层参数分布叠合储层参数图,确定其甜点空间分布(图7)。黄山街组一段沉积物微相平面分布以三角洲外前缘远砂坝、席状砂为主,按照其控制的储层参数分布可以预测甜点的空间分布;叠合区为远砂坝和席状砂的储层参数高值区,属于在普遍差储层中识别出的相对较好的“甜点”储层分布区(图7)。

3.2 导电矿物低阻型甜点

与细粒沉积岩相关的导电性矿物比较常见的就是黄铁矿。除同沉积分散状黄铁矿外,沉积成岩后期

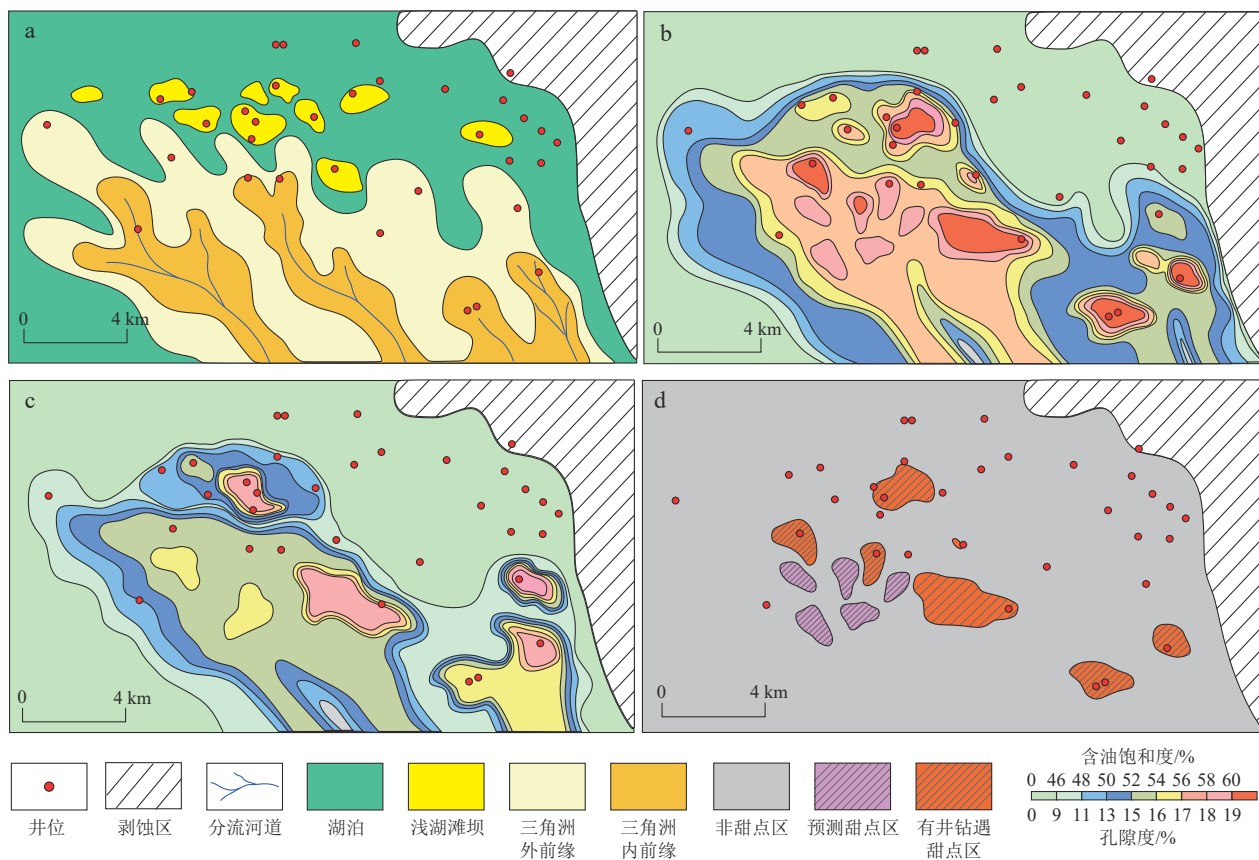


图7 准噶尔盆地东部阜康断裂带中段三叠系黄山街组致密低阻型储层甜点分布特征

Fig. 7 Sweet spot distribution maps for the tight reservoir in the Triassic Huangshanjie Formation in the middle of the Fukang fault zone, eastern Junggar Basin

a. 沉积微相分布; b. 孔隙度等值线图; c. 含油饱和度等值线图; d. 优质储层分布

形成的团块状、浸染状和结核状充填黄铁矿可以很好地指示裂缝和孔隙发育特征,因此也代表了优质储层发育段。在二叠系平地泉组混积细粒页岩油储层中,黄铁矿发育位置指示裂缝型和基质型(孔隙溶蚀型)甜点分布(图8)。从平面上来看,裂缝型甜点主要分布在纯页岩中,受构造作用影响,裂缝大量发育,后期被黄铁矿充填,是重要的油气赋存通道和空间。与海相页岩气开发特征十分类似,这种类型页岩油甜点储层的分布与区域断层活动密切相关,工区裂缝主要沿火10断层分布,为下步勘探开发重点区域(图8a)。H5段下部单井显示其裂缝在1 806.0~1 808.0 m(图2,图5i)与1 826.0 m~1 842.0 m深度段发育程度较高(图2),电阻率为极低值 $2.0 \sim 4.0 \Omega \cdot \text{m}$;裂缝主应力方向受火10断层控制呈北东-南西向(图8a)。而孔隙溶蚀型甜点主要分布在相对粗粒的白云质粉砂岩中,作为储集层,其具有孔隙发育程度高和含油气级别高的特征,是具备效益开采的一种页岩油类型(与吉木萨尔凹陷芦苇沟组相似),其分布与混积岩云坪、混合坪和浅湖沙坝沉积微相关系密切(图8b)。

3.3 强连通水网导电低阻型甜点

当粉砂岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩等与细砂岩构成双模态孔隙结构从而导致普遍呈现低阻时,油层特征不宜识别。此时,其低阻油层甜点分布与常规认识有较大的差异,需要在大范围分布的三角洲前缘河口坝砂体周缘识别远砂坝、席状砂以及厚层湖相泥岩夹含的薄层滩坝砂沉积体,属于在较好的储层中识别孔隙结构相对较差的储层,因此,此类储层与常规认识不同,需要从思想上转变,其甜点主要发育在具有双模态孔隙结构的储层中(图9)。通过井-震结合表征均方根地震属性发现(图9a),远离物源区发育的远砂坝、席状砂和浅海滩坝等物性相对较差的区域是甜点发育区(图9b)。

3.4 细粒沉积岩甜点分布

一般来说,常规油气勘探中的“甜点”通常是常规储层中的高孔、高渗相带,即“好中选优”。例如曲流河储层的点坝微相,平面砂体粒度以中-粗砂岩为主,形

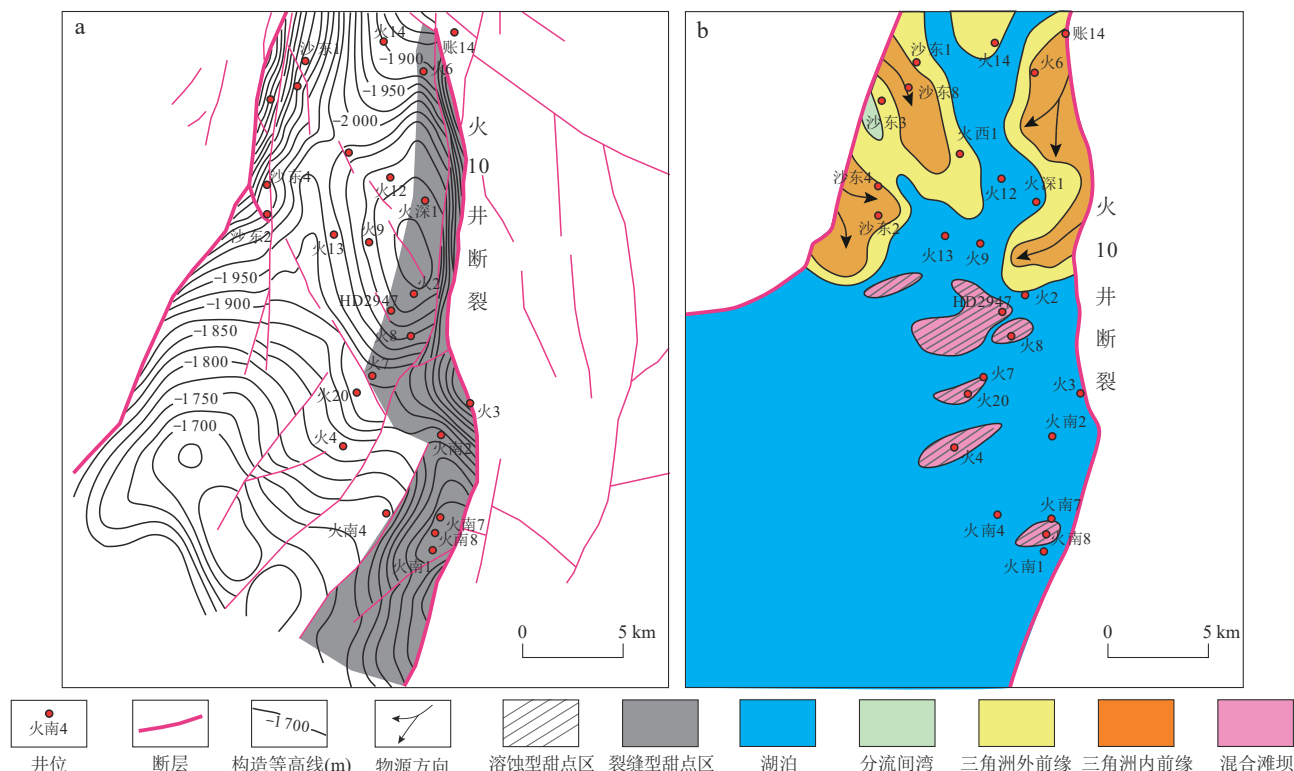


图8 准噶尔盆地东部火烧山油田二叠系平地泉组裂缝型与基质溶蚀型甜点分布

Fig. 8 Sweet spot distribution maps for the fractured and matrix dissolved reservoirs of the Permian Pingdiqian Formation in Huoshaoshan oilfield, eastern Junggar Basin

a. 裂缝型优质储层分布; b. 基质溶蚀型优质储层分布

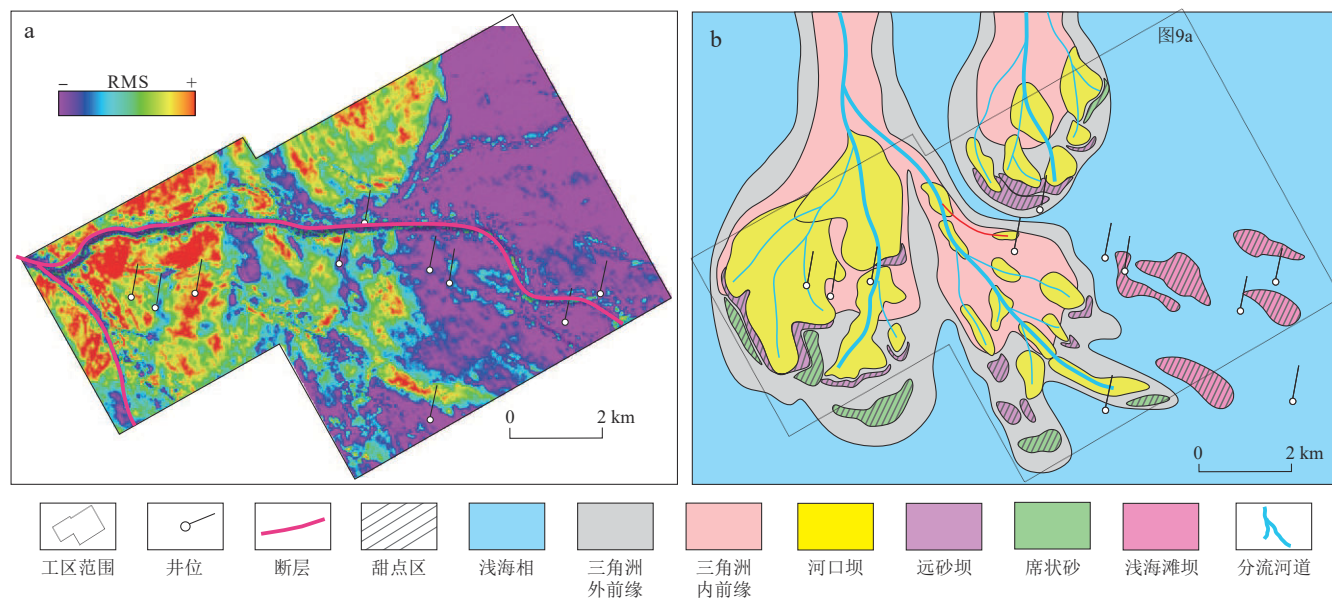


图9 珠江口盆地阳江凹陷中新统珠江组强连通电型储层甜点分布

Fig. 9 Sweet spot distribution maps for the conductive reservoirs with well-connected water network in the Miocene Zhujiang Formation, Yangjiang Sag, PRMB

a. 地震均方根振幅属性; b. 沉积微相及甜点平面分布

态呈断续弯月状,垂向上属高孔、高渗带。而细粒沉积岩典型低阻油层“甜点”则属于普遍低孔、低渗中的相

对高孔、高渗带,即“差中选好”。例如浅湖亚相中的滩坝微相,平面砂体粒度以细-粉砂岩为主,形态呈断续

状平行岸线分布,垂向上呈薄层状且属相对高孔、高渗带。一方面,中国含油气盆地广泛发育细粒沉积岩储层,测井响应显示的低阻具有普遍性(表3)。例如渤海湾盆地东营凹陷、沾化凹陷、束鹿凹陷和沧东凹陷的沙河街组三段和孔店组二段等,油气潜力巨大,并已经在勘探实践中取得了进展^[1-3,9-10];松辽盆地古龙凹陷上白垩统青山口组古页8HC井钻遇泥岩和泥岩夹含薄层砂岩,作为非常规油气储层,其在沉积特征、孔渗特征、油气富集机制等方面与常规储层有着显著的不同^[13]。虽然非常规油气甜点以TOC指标为关键,但在考虑其商业化开发时,储层的工程参数可压裂性、裂缝发育区、基质孔隙发育区和脆性矿物发育等也是重要影响因素。另一方面,随着细粒沉积岩中凝灰岩和白云岩含量增加,电阻率整体高值特征明显(表3),但其中的相对低阻油层依然是最有效益

的油气储层单元。例如,准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦苇沟组甜点主要为发育白云质粉砂岩和长英质粉砂岩(整体电阻率在 $2 \sim 2\,000\ \Omega \cdot \text{m}$)的相对低阻($2 \sim 10\ \Omega \cdot \text{m}$)油层段^[14,25]。因此,从电阻率低值的角度审视非常规油气藏将会成为识别勘探开发甜点的重要手段。

归根结底,低阻油层主要为岩石骨架及其内部流体形成的强导电回路所致,内因主要为高束缚水饱和度、导电矿物含量和黏土附加导电性,而外因主要为盐水和淡水泥浆侵入、高地层水矿化度和砂泥间互沉积等。认识其成因后,可以对其甜点空间分布进行预测。其低阻微观特征与成因模式如下:①致密低阻型与中-高成熟度页岩中夹含的渗透性砂质储层甜点类似,皆为黏土矿物束缚水导电以及黏土矿物的附加导电所致(图10a)。导电矿物低阻

表3 中国主要盆地细粒沉积岩储层低电阻率特征(据文献[1-3,8-9]修改)

Table 3 Low-resistivity characteristics of fine-grained sedimentary rocks in major basins of China (modified from references [1-3, 8-9])

盆地	凹陷	地层	典型井	岩性类型	微相类型	电阻率/ ($\Omega \cdot \text{m}$)	甜点电阻率/ ($\Omega \cdot \text{m}$)	低阻 类型
渤海湾盆地	东营凹陷	始新统沙三下亚段、 沙四上亚段	牛页1井	灰质泥岩、灰质页岩	浅湖-半深湖	90 ~ 110	100	相对 低阻
	沾化凹陷	始新统沙三下亚段	罗69井	灰质泥岩、泥灰岩、 藻灰岩、重结晶灰岩	咸水湖泊	30 ~ 240	30或90	相对 低阻
	束鹿凹陷	始新统沙三下亚段	ST1H井	灰质泥岩、粉砂岩	咸水湖泊	10 ~ 200	20 ~ 100	相对 低阻
	沧东凹陷	始新统孔二段	官东14井	长英质页岩、混合质页岩、 白云质页岩	半深湖-深湖	3 ~ 10	5 ~ 8	绝对 低阻
松辽盆地	古龙凹陷	上白垩统青山口组	古页8HC井	泥页岩,夹含薄层砂岩	深湖	6 ~ 18	8 ~ 10	绝对 低阻
鄂尔多斯盆地	—	上三叠统延长组7段	Ch89井	页岩、泥岩,夹粉-细砂岩、 凝灰岩	半深湖-深湖	10 ~ 100	10 ~ 40	相对 低阻
南襄盆地	泌阳凹陷	渐新统核桃园组三段	HF1井	页岩、泥质粉砂岩、灰质页岩、 白云质页岩、泥质云岩	半深湖-深湖	50 ~ 5 000	50 ~ 500	相对 低阻
滦平盆地	—	下白垩统西瓜园组	滦探1井	泥页岩、白云岩、碳酸盐岩混合 细粒岩、长英质混合细粒岩	半深湖-深湖	50 ~ 1 000	150	相对 低阻
江汉盆地	潜江凹陷	始新统潜江组三段	W99井	泥岩、膏质泥岩、盐岩, 夹含粉砂岩	咸水湖泊	0.8 ~ 2 000	1.8 ~ 6	相对 低阻
准噶尔盆地	玛湖凹陷	中二叠统风城组	风南1井	白云质泥岩、白云质粉砂岩、 泥质白云岩、泥质粉砂岩	咸水湖泊	10 ~ 1 000	100 ~ 200	相对 低阻
	吉木萨尔 凹陷	中二叠统芦苇沟组	J10024井	白云质泥岩、白云质粉砂岩、 泥质白云岩、泥质粉砂岩	咸水湖泊	2 ~ 2 000	2 ~ 10	相对 低阻
	沙湾凸起	中二叠统平地泉组	HD2947井	白云质泥岩、白云质粉砂岩、 泥质白云岩、泥质粉砂岩	咸水湖泊	1 ~ 1 000	1 ~ 8	相对 低阻
	阜康凹陷	中三叠统黄山街组	台60井	泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、 粉砂岩	浅湖-半深湖、 浅湖沙坝	3 ~ 15	4 ~ 7	绝对 低阻
珠江口盆地	阳江凹陷	新近系韩江组、 珠江组	A1井	极细砂岩、粉砂岩、泥质 粉砂岩、粉砂质泥岩	三角洲外前缘	0.8 ~ 6	1 ~ 3	绝对 低阻

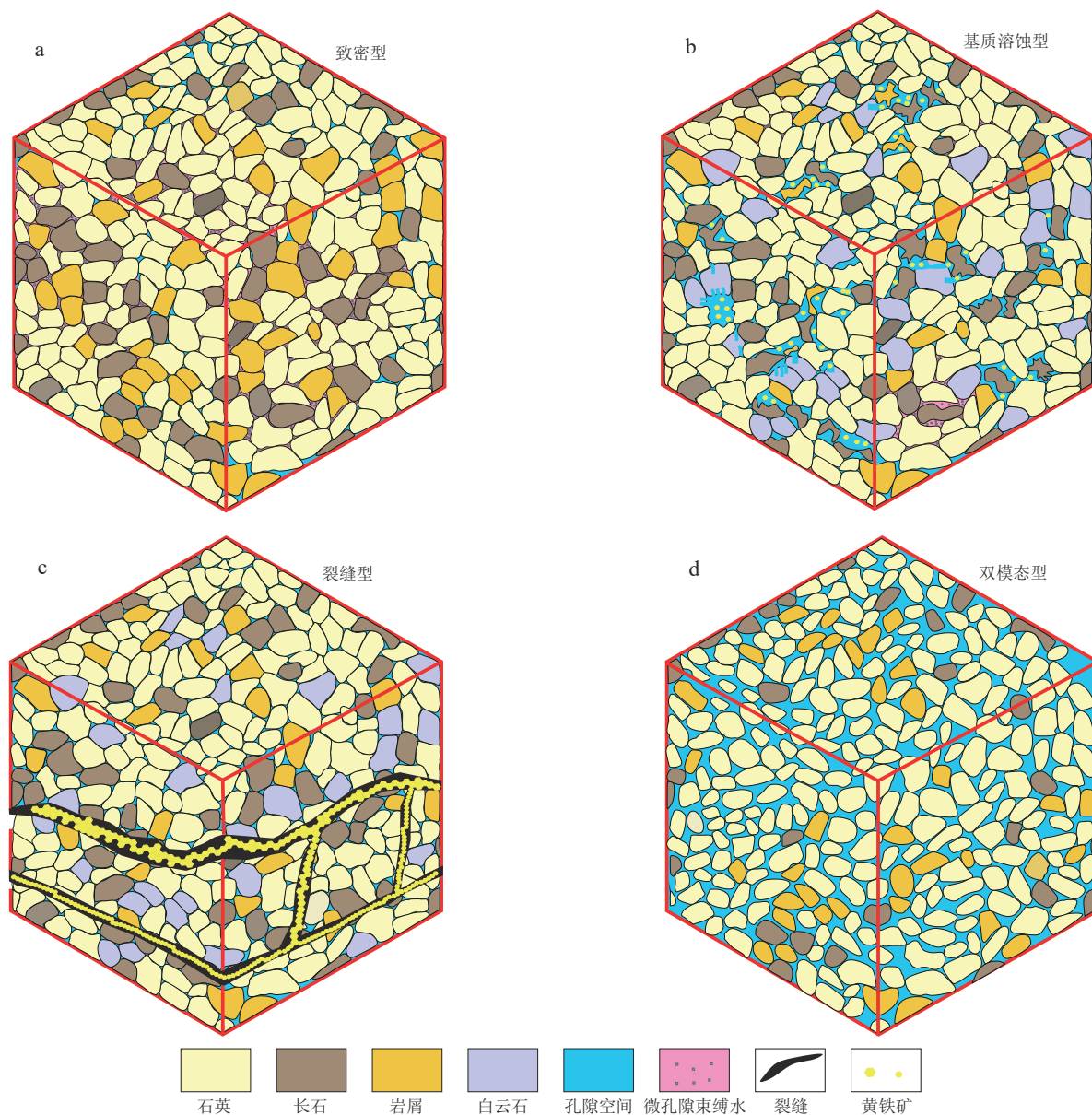


图10 低阻储层微观特征与成因模式分布

Fig. 10 Microscopic characteristics of each genetic types of the low-resistivity oil reservoirs

a. 致密型孔隙结构; b. 基质溶蚀型孔隙结构; c. 裂缝型孔隙结构; d. 双模态型孔隙结构

型则与纯页岩型和白云质粉砂岩混积型储层中甜点相似。②基质溶蚀型因其溶蚀作用导致孔隙结构连通性变好,流体流动性增强,同时,溶蚀孔隙中局部含少量集块状和分散状黄铁矿,其导电能力增强,容易形成基质溶蚀型低阻导电模式(图10b);另外,因其发育裂缝后,形成良好的孔隙结构空间,裂缝容易被方解石或者黄铁矿等矿物充填,导致其形成裂缝充填型导电模式(图10c)。③强连通水网导电低阻型则是在被地下大量水破坏的古油藏中,发育了相对细粒沉积岩类型,其常常具有双模态孔隙结构特征^[40],双模态中的细孔隙喉道中大量束缚水形成导

电回路(图10d)。以上3类基本代表了目前细粒沉积岩勘探开发储层类型,可为当前非常规细粒岩储层甜点勘探与开发提供地质依据。

4 结论

1) 细粒沉积岩低阻油层成因主要包括高含量束缚水、黏土矿物附加导电性、微裂缝充填导电矿物、骨架矿物导电和含高矿化度地层水。

2) 识别了细粒沉积岩3种典型低阻储层类型并分析了其成因。致密型低阻储层成因主要为高泥质含量

导致微孔隙发育,束缚水饱和度相对较高,同时黏土矿物附加导电能力增强。导电矿物型低阻储层成因主要有两种,其一为裂缝充填的黄铁矿网络状连通导电;其二为白云质粉砂岩大量发育的溶蚀孔洞被黄铁矿填充和流体导电形成的相对低阻。强连通水网导电型低阻储层成因主要为疏松砂岩细骨架颗粒比表面积增大和黏土包膜网络,双模态孔隙结构中大孔和小孔表面均有束缚水,以微喉为主的喉道形成束缚水导电网络。

3) 明确了低阻油层的油气富集甜点类型。致密型低阻甜点主要发育在相对高阻储层中,导电矿物型低阻甜点主要发育在白云质粉砂岩基质溶蚀段与白云质泥/页岩裂缝大量发育段,而强连通水网导电低阻型甜点主要发育在岩性相对细粒、具有双模态孔隙结构的储层段。

参 考 文 献

- [1] 姜在兴,梁超,吴靖,等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1031-1039.
JIANG Zaixing, LIANG Chao, WU Jing, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1031-1039.
- [2] 姜在兴,孔祥鑫,杨叶芃,等. 陆相碳酸盐质细粒沉积岩及油气甜点多源成因[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 26-37.
JIANG Zaixing, KONG Xiangxin, YANG Yepeng, et al. Multi-source genesis of continental carbonate-rich fine-grained sedimentary rocks and hydrocarbon sweet spots [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 26-37.
- [3] 袁晓冬,姜在兴,张元福,等. 滦平盆地白垩系陆相页岩油储层特征[J]. 石油学报, 2020, 41(10): 1197-1208.
YUAN Xiaodong, JIANG Zaixing, ZHANG Yuanfu, et al. Characteristics of the Cretaceous continental shale oil reservoirs in Luanping Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(10): 1197-1208.
- [4] 吴靖,姜在兴,梁超. 东营凹陷沙河街组四段上亚段细粒沉积岩岩相特征及与沉积环境的关系[J]. 石油学报, 2017, 38(10): 1110-1122.
WU Jing, JIANG Zaixing, LIANG Chao. Lithofacies characteristics of fine-grained sedimentary rocks in the Upper submember of member 4 of Shahejie Formation, Dongying Sag and their relationship with sedimentary environment [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(10): 1110-1122.
- [5] 杜学斌,刘晓峰,陆永潮,等. 陆相细粒混合沉积分类、特征及发育模式——以东营凹陷为例[J]. 石油学报, 2020, 41(11): 1324-1333.
DU Xuebin, LIU Xiaofeng, LU Yongchao, et al. Classification, characteristics and development models of continental fine-grained mixed sedimentation: A case study of Dongying Sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(11): 1324-1333.
- [6] 周立宏,蒲秀刚,陈长伟,等. 陆相湖盆细粒岩油气的概念、特征及勘探意义: 以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段为例[J]. 地球科学, 2018, 43(10): 3625-3639.
ZHOU Lihong, PU Xiugang, CHEN Changwei, et al. Concept, characteristics and prospecting significance of fine-grained sedimentary oil gas in terrestrial lake basin: A case from the second member of Paleogene Kongdian Formation of Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Earth Science, 2018, 43(10): 3625-3639.
- [7] 朱如凯,李梦莹,杨静儒,等. 细粒沉积学研究进展与发展方向[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 251-264.
ZHU Rukai, LI Mengying, YANG Jingru, et al. Advances and trends of fine-grained sedimentology [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 251-264.
- [8] 张建国,姜在兴,刘鹏,等. 陆相超细粒页岩油储层沉积机制与地质评价[J]. 石油学报, 2022, 43(2): 234-249.
ZHANG Jianguo, JIANG Zaixing, LIU Peng, et al. Deposition mechanism and geological assessment of continental ultrafine-grained shale oil reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(2): 234-249.
- [9] 姜在兴,王运增,王力,等. 陆相细粒沉积岩物质来源、搬运-沉积机制及多源油气甜点[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1039-1048.
JIANG Zaixing, WANG Yunzeng, WANG Li, et al. Review on provenance, transport-sedimentation dynamics and multi-source hydrocarbon sweet spots of continental fine-grained sedimentary rocks[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1039-1048.
- [10] 付金华,李士祥,牛小兵,等. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油地质特征与勘探实践[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 870-883.
FU Jinhua, LI Shixiang, NIU Xiaobing, et al. Geological characteristics and exploration of shale oil in Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 870-883.
- [11] 胡素云,赵文智,侯连华,等. 中国陆相页岩油发展潜力与技术对策[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(4): 819-828.
HU Suyun, ZHAO Wenzhi, HOU Lianhua, et al. Development potential and technical strategy of continental shale oil in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(4): 819-828.
- [12] 蒯克来,李克,操应长,等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7₃亚段富有机质页岩纹层组合与页岩油富集模式[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1244-1255.
XI Kelai, LI Ke, CAO Yingchang, et al. Laminae combination and shale oil enrichment patterns of Chang 7₃ sub-member organic-rich shales in the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1244-1255.

- [13] 柳波, 孙嘉慧, 张永清, 等. 松辽盆地长岭凹陷白垩系青山口组一段页岩油储集空间类型与富集模式[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 521-535.
- LIU Bo, SUN Jiahui, ZHANG Yongqing, et al. Reservoir space and enrichment model of shale oil in the first member of Cretaceous Qingshankou Formation in the Changling Sag, southern Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 521-535.
- [14] 印森林, 谢建勇, 程乐利, 等. 陆相页岩油研究进展及开发地质面临的问题[J]. 沉积学报, 2022, 40(4): 979-995.
- YIN Senlin, XIE Jianyong, CHENG Leli, et al. Advances in continental shale oil research and problems of reservoir geology [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(4): 979-995.
- [15] 管耀, 冯进, 刘君毅, 等. 低对比度砂岩油层岩石组分核磁与常规测井联合反演方法[J]. 中国海上油气, 2020, 32(4): 71-77.
- GUAN Yao, FENG Jin, LIU Junyi, et al. Joint inversion method of nuclear magnetic resonance and conventional logging for the rock components of low-contrast sandstone reservoirs [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(4): 71-77.
- [16] 程相志. 低阻油气层识别评价技术及分布规律研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2008.
- CHENG Xiangzhi. Study of recognition technology and distribution law on low-resistivity oil reservoir [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2008.
- [17] 白泽, 谭茂金, 王玉江, 等. 致密砂岩低阻油层成因与测井流体识别方法研究——以陇东西部地区长8组为例[J]. 石油物探, 2022, 61(4): 750-760.
- BAI Ze, TAN Maojin, SHI Yujiang, et al. Genesis of low-resistivity oil pays and a fluid identification method for tight sandstone reservoirs: A case study of the Chang 8 Formation in the Longdong west area, Ordos Basin [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 61(4): 750-760.
- [18] 李早红, 程小岛, 姜虹, 等. 尼日尔 Termit 盆地低阻油层成因机理及综合识别技术[J]. 地学前缘, 2018, 25(2): 99-111.
- LI Zaohong, CHENG Xiaodao, JIANG Hong, et al. Genetic mechanism of low-resistivity oil zones and comprehensive identification technology for well logging in the Termit Basin, Niger [J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(2): 99-111.
- [19] 甘军, 张迎朝, 邓广君, 等. 琼海凸起新近系低幅-低阻油藏形成条件及成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(3): 311-316, 349.
- GAN Jun, ZHANG Yingzhao, DENG Guangjun, et al. Forming conditions and hydrocarbon accumulation patterns of the Neogene low resistivity reservoirs in low-amplitude structure of Qionghai salient [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(3): 311-316, 349.
- [20] 李建云. 大庆油田东部葡萄花低阻油层成因机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- LI Jianyun. Research on the genetic mechanism of Putaohua low resistance reservoir in the East of Daqing Oilfield [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [21] 韩如冰, 田昌炳, 马思, 等. 苏丹穆格拉德盆地福拉凹陷 AG1 层低阻油层形成机制及其控制因素[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(3): 31-40.
- HAN Rubing, TIAN Changbing, MA Si, et al. Formation mechanisms and controlling factors of low resistivity pays of AG1 layer in Fula Sag, Muglad Basin, Sudan [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(3): 31-40.
- [22] 陆云龙, 崔云江, 张建升, 等. 渤海新近系高束缚水低阻油层饱和度计算方法[J]. 石油地质与工程, 2022, 36(1): 72-77.
- LU Yunlong, CUI Yunjiang, ZHANG Jiansheng, et al. Calculation method of saturation of Neogene reservoirs with high irreducible water and low resistivity in Bohai Sea [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2022, 36(1): 72-77.
- [23] 赵贤正, 蒲秀刚, 韩文中, 等. 细粒沉积岩性识别新方法 with 储集层甜点分析——以渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(4): 492-502.
- ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, HAN Wenzhong, et al. A new method for lithology identification of fine grained deposits and reservoir sweet spot analysis: A case study of Kong 2 Member in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(4): 492-502.
- [24] 邹才能, 潘松圻, 荆振华, 等. 页岩油气革命及影响[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 1-12.
- ZOU Caineng, PAN Songqi, JING Zhenhua, et al. Shale oil and gas revolution and its impact [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 1-12.
- [25] 印森林, 陈恭洋, 许长福, 等. 陆相混积细粒储集岩岩相构型及其对甜点的控制作用——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1180-1193.
- YIN Senlin, CHEN Gongyang, XU Changfu, et al. Lithofacies architecture of lacustrine fine-grained mixed reservoirs and its control over sweet spot: A case study of Permian Lucaogou Formation shale oil reservoir in the Jimsar Sag, Juggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1180-1193.
- [26] GALVIS H, BECERRA D, SLATT R. Lithofacies and stratigraphy of a complete Woodford Shale outcrop section in South Central Oklahoma: Geologic considerations for the evaluation of unconventional shale reservoirs [J]. Interpretation, 2018, 6(1): SC15-SC27.
- [27] ZEMANEK J. Low-resistivity hydrocarbon-bearing sand reservoirs [J]. SPE Formation Evaluation, 1989, 4(4): 515-521.
- [28] 曾文冲. 油气藏储集层测井评价技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.
- ZENG Wenchong. Logging evaluation technology for oil and gas reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991.
- [29] 赵文杰, 白全胜, 金秀珍, 等. 低电阻率油气层的测井解释[J]. 测井技术, 1998, 22(S1): 33-36.

- ZHAO Wenjie, BAI Quansheng, JIN Xiuzhen, et al. Log interpretation of low resistivity pay zone [J]. Well Logging Technology, 1998, 22(S1): 33-36.
- [30] 孙建孟, 陈钢花, 杨玉征, 等. 低阻油气层评价方法[J]. 石油学报, 1998, 19(3): 83-88.
- SUN Jianmeng, CHEN Ganghua, YANG Yuzheng, et al. Low contrast resistivity reservoir evaluation method [J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(3): 83-88.
- [31] 赵发展. 准噶尔盆地低阻油藏实验研究及储层评价方法[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2005.
- ZHAO Fazhan. Experimental study and reservoir evaluation methods for Dzungar Basin low resistivity reservoirs [D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, 2005.
- [32] 王飞腾, 侯东梅, 李彦来, 等. 渤海海域C油田孔隙结构特征及其对油层电阻率的影响[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2022, 37(6): 32-37.
- WANG Feiteng, HOU Dongmei, LI Yanlai, et al. Pore structure characteristics of C oilfield in Bohai Sea and its influence on reservoir resistivity [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2022, 37(6): 32-37.
- [33] 尤丽, 李才, 刘景环, 等. 琼海凸起珠江组一段低电阻率油层的微观成因机理分析[J]. 世界地质, 2011, 30(1): 65-70.
- YOU Li, LI Cai, LIU Jinghuan, et al. Analysis on micro-geological causes of low-resistivity oil layers from Member 1 of Zhujiang Formation in Qionghai uplift [J]. Global Geology, 2011, 30(1): 65-70.
- [34] 吴俊军, 游利萍, 杨和山. 准噶尔盆地阜康断裂带构造演化与油气成藏[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(1): 36-40.
- WU Junjun, YOU Liping, YANG Heshan. Structural evolution and hydrocarbon accumulation of Fukang fault zone in Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(1): 36-40.
- [35] 张丽霞, 柳益群, 向辉, 等. 凝灰岩型含油层系特征与成因分析——以准噶尔盆地火烧山油田二叠系平地泉组为例[J]. 沉积学报, 2018, 36(4): 768-776.
- ZHANG Lixia, LIU Yiqun, XIANG Hui, et al. Characteristics and origin of tuffaceous tight oil: Based on a reference of tight oil in Permian Pingdiquan Formation in Huoshaoshan oil field, Junggar Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(4): 768-776.
- [36] 涂彬, 丁祖鹏, 刘月田. 火烧山油田H₃层裂缝发育特征与剩余油分布关系[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(2): 229-235.
- TU Bin, DING Zupeng, LIU Yuetian. Correlation of remaining oil distribution and fracture development in H₃ reservoir of Huoshaoshan Oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(2): 229-235.
- [37] 文鑫, 朱义东, 王华, 等. 恩平凹陷D区块韩江组沉积亚相特征分析[J]. 矿产勘查, 2021, 12(12): 2325-2331.
- WEN Xin, ZHU Yidong, WANG Hua, et al. Characteristics of sedimentary subfacies of Hanjiang Formation in Block D of Enping Depression [J]. Mineral Exploration, 2021, 12(12): 2325-2331.
- [38] 杜文波, 孙桂华, 舒誉. 珠江口盆地恩平凹陷古近系恩平组地震沉积学研究[J]. 地质科技情报, 2015, 34(3): 220-229.
- DU Wenbo, SUN Guihua, SHU Yu. Seismic sedimentology of Paleogene Enping Formation in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(3): 220-229.
- [39] 梁卫, 闫正和, 杨勇, 等. 南海东部西江油田低阻油层识别及主控因素研究[J]. 特种油气藏, 2022, 29(1): 10-14.
- LIANG Wei, YAN Zhenghe, YANG Yong, et al. Study on identification and main controlling factors of low-resistivity oil reservoirs in Xijiang Oilfield, eastern South China Sea [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(1): 10-14.
- [40] 印森林, 陈恭洋, 陈玉琨, 等. 砂砾岩储层孔隙结构模态控制下的剩余油分布——以克拉玛依油田七东1区克下组为例[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(5): 91-102.
- YIN Senlin, CHEN Gongyang, CHEN Yukun, et al. Control effect of pore structure modality on remaining oil in glutenite reservoir: A case from Lower Karamay Formation in Block Qidong 1 of Karamay Oilfield [J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(5): 91-102.

(编辑 张玉银)