

准噶尔盆地中部深层—超深层中/上二叠统 不整合发育特征与油气分布

李威^{1,2}, 乔锦琪^{*1,2}, 曲彦胜^{1,3}, 刘德志³, 王贵⁴, 闫方超⁵

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;
3. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257015; 4. 核工业 216 大队, 新疆乌鲁木齐 830011;
5. 中核地质勘查集团有限公司, 北京 100013)

摘要: 随着油气资源需求量的不断提高, 深层—超深层油气藏逐渐成为当前和未来重要的勘探领域之一。准噶尔盆地二叠系发育多套优质烃源岩和储层, 在玛湖凹陷、沙湾凹陷、阜康凹陷等均发现与不整合关系密切的油气藏。然而, 准噶尔盆地中部以往油气勘探多集中于中浅层领域, 深层—超深层不整合的发育特征、规模及其对油气藏的控制作用尚不明确。为此, 在目的层层位较深、研究资料相对匮乏的情况下, 通过分析 40 口井的测井数据和 5 口井的实测元素数据及区域地震剖面等资料, 对深层—超深层中/上二叠统(P_2/P_3)不整合的发育特征、规模、成藏作用等方面进行了细致的研究。研究表明: 准噶尔盆地中部中/上二叠统不整合在深层—超深层广泛发育, 有利于油气藏的形成。研究区不整合类型有平行—平行型、平行—削截型、超覆—平行型、超覆—削截型、平行—褶皱型等 5 种, 在深层—超深层均有发育; 不整合结构中岩性组合有砂—泥—砂型、砂—泥—泥型、砂—泥型、砂—砂型、泥—砂型、泥—泥型等 6 种, 其中前 3 种主要位于深层—超深层。据此, 中/上二叠统共划分出 14 种不整合结构类型, 有 11 种主要位于深层—超深层。最终优选出 A、B 两类有利于油气聚集的区带, 其中有利区 A 类的不整合的成藏能力更优。该研究成果对深层—超深层油气资源勘探具有指导意义。

关键词: 准噶尔盆地中部, 深层—超深层油气, 中/上二叠统, 不整合类型, 不整合结构, 油气分布

中图分类号: P631 文献标识码: A DOI: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.20240373

Development characteristics of deep and ultra-deep Middle/Upper Permian unconformities and hydrocarbon distribution in central Junggar Basin

LI Wei^{1,2}, QIAO Jinqi^{*1,2}, QU Yansheng^{1,3}, LIU Dezhi³, WANG Gui⁴, YAN Fangchao⁵

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Research Institute of Exploration & Development, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257015, China; 4. Geologic Party No. 216, CNNC, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 5. CNNC Geological Exploration Group Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: The increasing demand for hydrocarbon resources makes deep and ultra-deep hydrocarbon reservoirs one of the important exploration fields. In the Junggar Basin, many sets of high-quality source rocks and reservoirs have developed in Permian. Notably, hydrocarbon reservoirs closely related to unconformity have been discovered in the Mahu Sag, Shawan Sag, Fukang Sag, and other areas in the basin. However, previous hydrocarbon exploration in Junggar Basin primarily concentrates on the medium and shallow layers, and there remains a lack of clarity regarding the development characteristics and scale of the deep and ultra-deep unconformities in central Junggar Basin and their effect on controlling hydrocarbon accumulation. Therefore, under the current exploration situation of deep target layers and relatively scarce research data, a detailed study is conducted to analyze the development characteristics, scale, and accumulation effect of the deep and ultra-deep Middle/Upper Permian (P_2/P_3) unconformity in central Junggar Basin by analyzing the logging data of 40 wells, mea-

* 北京市昌平区府学路 18 号中国石油大学(北京)地球科学学院, 102249。Email: jinqi.qiao@cup.edu.cn

本文于 2024 年 10 月 8 日收到, 最终修改稿于 2025 年 6 月 26 日收到。

本研究受天然铀产业技术创新联合体“揭榜挂帅”项目“北方沉积盆地红色建造铀成矿关键要素与成矿机理”(202301)、油气资源与工程全国重点实验室自主研究课题(PRE/indep-2401)和中国石化胜利油田分公司科研项目“准噶尔盆地 P_2/P_3 不整合形成机制及发育特征”(HX20230523)联合资助。

sured element data, and regional seismic profiles. The results indicate that the Middle/Upper Permian unconformities in the central Junggar Basin are widely developed in the deep and ultra-deep layers, thus supporting the accumulation of hydrocarbon reservoirs. There are five types of unconformity developed in the study area, including the parallel-parallel type, parallel-truncation type, overlap-parallel type, overlap-truncation type, and parallel-fold type, all of which are developed in both deep and ultra-deep layers. Additionally, there are six lithological combinations of unconformity structures, including the sand-mud-sand, sand-mud-mud, sand-mud, sand-sand, mud-sand, and mud-mud types, among which the first three types are primarily distributed in the deep and ultra-deep layers. Based on these findings, a total of 14 structural types in the unconformity of the Middle/Upper Permian are identified, with 11 types mainly distributed in the deep and ultra-deep layers. Finally, two zones (Types A and B) favorable for hydrocarbon accumulation are selected, with the favorable zone Type A exhibiting superior hydrocarbon accumulation capacity within their unconformities. This study holds guiding significance for deep and ultra-deep hydrocarbon explorations.

Keywords: central Junggar Basin, deep and ultra-deep hydrocarbon, Middle/Upper Permian, unconformity type, unconformity structure, hydrocarbon distribution

李威, 乔锦琪, 曲彦胜, 等. 准噶尔盆地中部深层—超深层中/上二叠统不整合发育特征与油气分布[J]. 石油地球物理勘探, 2025, 60(4): 1007-1019.

LI Wei, QIAO Jinqi, QU Yansheng, et al. Development characteristics of deep and ultra-deep Middle/Upper Permian unconformities and hydrocarbon distribution in central Junggar Basin [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2025, 60(4): 1007-1019.

0 引言

一般认为,埋深在 4500~6000 m 的油气藏为深层油气藏,埋深在 6000 m 及以上的油气藏为超深层油气藏^[1-2]。随着油气资源需求量的不断提高,深层—超深层油气藏逐渐成为当前和未来重要的勘探领域之一^[1-2]。目前,在中国油气资源总量中,埋深>4500 m 的油气资源约占 40%,但探明程度<15%,因此中国深层—超深层油气资源勘探潜力巨大^[2-3]。

准噶尔盆地为含油气叠合盆地^[4]。目前,已发现的油气资源多集中于中浅层^[4-5]。勘探成果揭示:在玛湖、沙湾、阜康等凹陷不整合对油气分布有着重要影响^[6-8]。关于不整合方面的研究多集中于准东、准西和淮北地区^[9-17],而准中地区涉及较少。在深层、超深层地层中,不整合发育规模、类型及其对油气分布的影响尚不明确。

前人研究认为,传统意义上的“不整合面”是上、下岩层的一个接触界面(即物理面),但在研究工作的描述中具有“空间结构”属性,本质上包含了“层”或“体”的涵义^[18]。目前,地下不整合识别的研究以岩心、测井资料、地震资料为主,分析测试资料(主要是矿物学特征、元素地球化学资料)为次。此外,如剥蚀厚度恢复、沉积速度恢复等也可以间接识别不整合^[19]。

在不整合结构的研究中,利用测井资料分析其结构特征更为常见。本文将元素资料作为结构定量

识别的重要补充。对于隐蔽型不整合(即缺乏明显的物理或地层学标志而不易识别的一类不整合),本文综合利用地震、测井、元素资料等,这对于不整合的识别起到了很大的作用。

准噶尔盆地中部中/上二叠统为区域性不整合,其上为上乌尔禾组(P_3w)或梧桐沟组(P_3wt),其下以下乌尔禾组(P_2w)、平地泉组(P_2p)为主,局部地区为芦草沟组(P_2l)^[9,11,20]。中/上二叠统界面整体处于深层—超深层(>4500 m),地震资料分辨率较低。以往钻穿深层—超深层中二叠统、上二叠统的井位极少,本研究重点关注新钻穿超深层(>6000 m)中/上二叠统界面的井共 6 口(A1~A6 井),其他可用于辅助研究的井共 34 口(B1~B34 井)。

本文通过分析 40 口井(A1~A6、B1~B34 井)的测井数据和 5 口井(A1、A3~A6 井)的实测元素数据(即实际测试岩石样品所获得的主量、微量和稀土元素数据)及区域地震剖面等资料,明确准噶尔盆地中部深层—超深层中/上二叠统不整合结构、类型及岩性配置关系等,探讨不整合对油气聚集、分布的控制作用,从而寻找有利于油气聚集的圈闭或区带,以对“深层—超深层”油气藏勘探提供指导。

1 不整合类型

1.1 类型划分

多年来,国内外学者们以地震资料反映的地层层序规律为基础,提出了多种不整合类型划分方

案^[21],这在一定程度上满足了不整合成因、结构与控藏等方面的研究需求。不整合类型的划分具有明确的地质意义,需遵循一定的原则,不仅要突出上下地层的结构特征及相互关系,还要考虑不整合的成因、输导类型、遮挡条件与控藏作用。

本文在对不整合类型充分调研的基础上,以高

长海等^[22]的分类方案为思路,利用大量地震资料开展系统研究,以地震反射、不整合的剖面形态为主要划分依据,将准噶尔盆地中部中/上二叠统不整合类型划分为 5 种:平行—削截型、超覆—平行型、超覆—削截型、平行—褶皱型、平行—平行型。各种不整合类型发育特征、样式见图 1 所示。

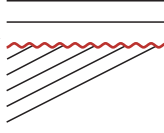
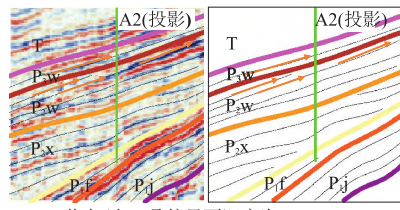
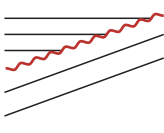
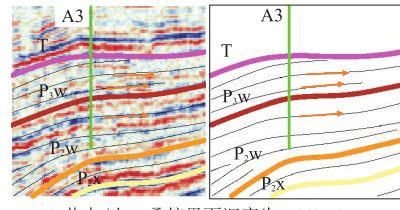
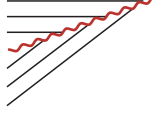
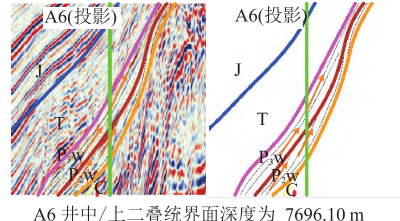
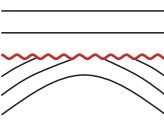
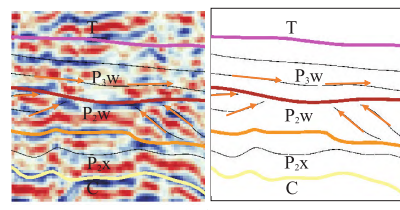
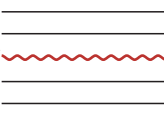
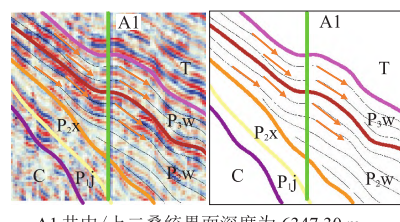
不整合类型	发育特征	不整合样式	地震剖面实例
平行—削截	不整合界面之下地震反射同相轴以较大角度终止于该界面处,不整合界面上地震反射同相轴与该界面呈平行趋势。多发育于隆起区、斜坡区及盆缘。		 A2 井中/上二叠统界面深度为 6648.00 m
超覆—平行	不整合界面上地震反射同相轴渐进式呈较大角度终止于该界面,不整合界面之下地震反射同相轴与该界面呈平行趋势。多发育于斜坡区下端。		 A3 井中/上二叠统界面深度为 7668.50 m
超覆—削截	不整合界面上地震反射同相轴渐进式呈较大角度终止于该界面,不整合界面之下地震反射同相轴以较大角度终止于该界面处。多发育于斜坡区或者盆缘。		 A6 井中/上二叠统界面深度为 7696.10 m
平行—褶皱	不整合界面上地震反射同相轴与该界面呈平行趋势,不整合界面之下地震反射同相轴具明显对称削截分布的褶皱形态。多发育于斜坡区、隆起区及山前断阶带。		 位于莫索湾凸起
平行—平行	不整合界面上、下地震反射同相轴与不整合面呈平行趋势,无交点。多发育于凹陷或凸起构造平缓区。		 A1 井中/上二叠统界面深度为 6347.30 m

图 1 准噶尔盆地中部二叠系中/上二叠统不整合类型及发育特征

C 为石炭系, P_{1j} 为二叠系佳木河组, P_{2x} 为二叠系夏子街组, T 为三叠系, J 为侏罗系。

1.2 平面分布特征

不同类型不整合具有不同的特征,体现了区域

构造运动与相对海平面的升降或沉积环境的变动等方面的影响^[23]。不整合在空间展布上具有规律性,

其展布特征与上覆地层沉积之前盆地基底形态密切相关,并对油气破坏、运聚与封堵提供了地质条件^[24]。

准噶尔盆地中部中/上二叠统不整合的空间展布具有明显的区域分布特点(图 2):平行—平行不整合在中部地区均有分布,主要集中发育于凹陷;超覆—平行不整合多分布于西部和东北部,环绕分布于平行—平行不整合的外围;平行—削截不整合多分布于中东部,西部局部可见,凹陷、凸起或斜坡均有发育;超覆—削截不整合多分布于南部,多与超覆

—平行不整合、平行—削截不整合区相接,在凹陷、凸起或斜坡均有发育;平行—褶皱不整合分布较少,仅中南部可见,多与超覆—平行不整合及超覆—削截不整合区相接,多发育于凸起或斜坡。

总体来说,凹陷多发育平行—平行不整合,局部发育平行—削截不整合;凹陷与凸起转换区(斜坡区)主要发育超覆—平行不整合、超覆—削截不整合、平行—削截不整合等;凸起不整合类型发育复杂,平行—褶皱不整合、平行—削截不整合、平行—平行不整合等均有一定规模的分布。

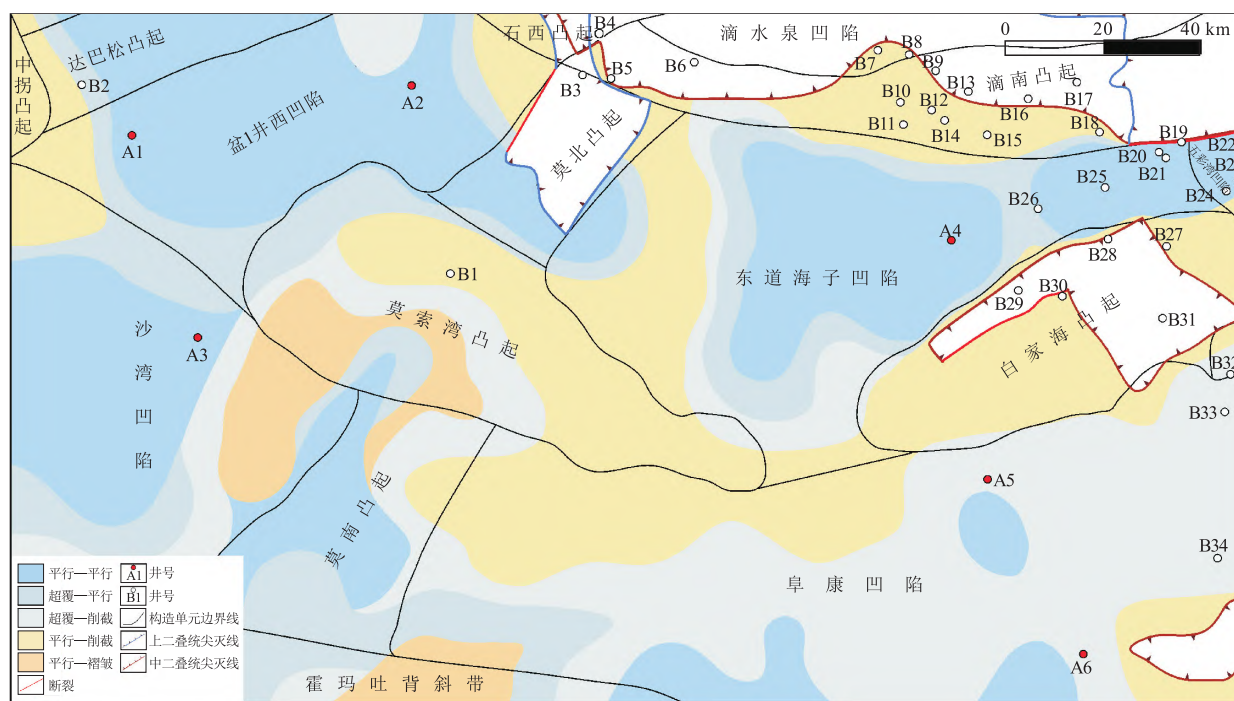


图2 准噶尔盆地中部中/上二叠统不同类型不整合平面分布特征

2 不整合纵向结构识别及特征

2.1 纵向结构识别

不整合在纵向上具有明显的规律性。一般来说,具有 3 层结构,即由底砾岩层、半风化岩层(或风化淋滤带)及二者之间相互接触的风化黏土层组成。其中,底砾岩层通常为底砾岩或水进砂体,位于不整合面之上;半风化岩层(或风化淋滤带)通常为经过淋滤、溶蚀等作用形成的各类岩层^[25],位于不整合面之下;风化黏土层通常为风化壳最上部的古土壤层,即不整合面^[18,26]。值得注意的是,当中间层的风化黏土层不发育时,不整合表现为两层结构特征,即由底

砾岩层和半风化岩层组成^[27]。此外,不整合纵向结构厚度较薄,尤其是风化黏土层一般为数米至几十米,以往报道的最大厚度仅为 30 m^[24,27]。

不整合纵向结构识别较为困难,特别是当风化黏土层缺失时,目前尚未见利用地震资料解决不整合纵向结构识别的方法^[28]。研究区不整合面埋藏较深,测井资料和元素资料的垂向分辨率、灵敏度较高,可在不整合结构识别中起重要作用。若涉及不整合结构的定量划分,测井资料和元素资料均具有各自不可替代的优势。

2.1.1 测井资料识别

剥蚀风化、淋滤、溶蚀等作用影响不整合结构中岩性的差异,导致测井曲线出现较为明显的“突

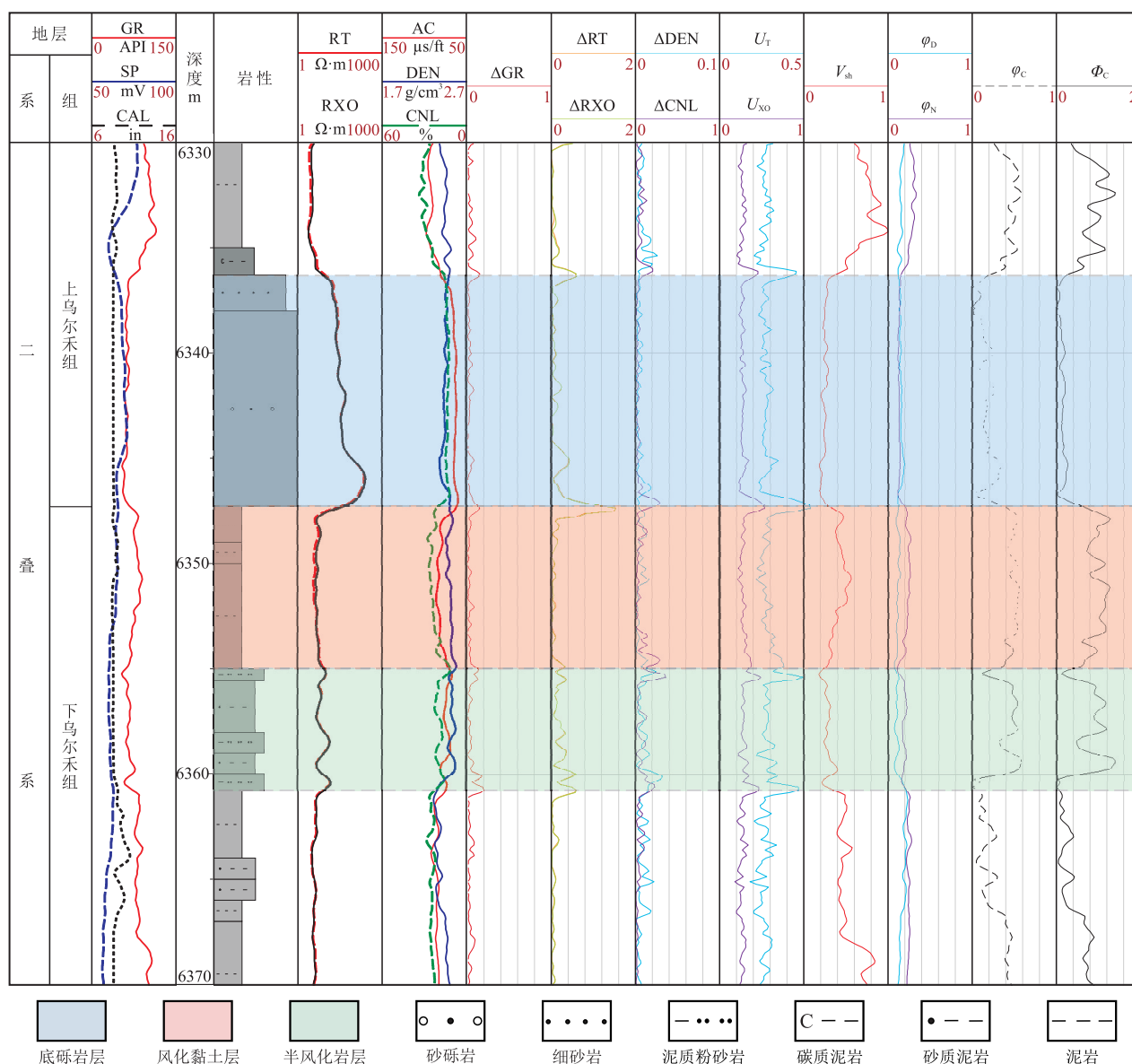
变”^[29]。因此,可以利用测井资料研究不整合结构。

一般情况下,底砾岩层的测井响应特征主要为低自然伽马(GR)、低声波时差(AC)、高电阻率(RT或RXO)、高密度(DEN),GR和RT(或RXO)呈箱状;风化黏土层的测井响应特征与底砾岩层正好相反;半风化岩层测井响应特征要比底砾岩层更复杂,介于底砾岩层与风化黏土层之间,其厚度与风化黏土层厚度密切相关,往往具有较好的负相关性,但具体厚度较难准确界定,这与其岩性差异、构造活动强弱等导致风化淋滤作用程度的不同有诸多

联系^[13,18,30]。

以 A1 井(图 3)为例,直接通过测井曲线响应特征的“突变”识别不整合结构并不十分准确,GR、AC、DEN 和井径(CAL)等曲线在风化黏土层和半风化岩层的界限因微小的变化幅度而不够明显,尤其是在半风化岩层中泥岩较发育时^[9],通过各测井曲线的“突变”来识别完整的不整合结构较为困难。

为了定量识别不整合结构,本文选择对岩性、孔隙度、渗透率等敏感的测井曲线进行处理,放大测井曲线“突变”响应^[9,21],具体流程如图 4 所示。



CNL 为补偿中子; ΔGR 、 ΔRT 、 ΔRXO 、 ΔDEN 、 ΔCNL 分别为相应曲线的幅度变化率; V_{sh} 为泥质含量; U_T 、 U_{XO} 为构建的不整合孔隙综合判别参数; ϕ_D 、 ϕ_N 分别为密度测井标准孔隙度、补偿中子测井标准孔隙度; ϕ_c 为以中子孔隙度为基准计算的孔隙度变化幅度差比; ϕ_e 为以密度孔隙度为基准计算的孔隙度变化幅度差比。

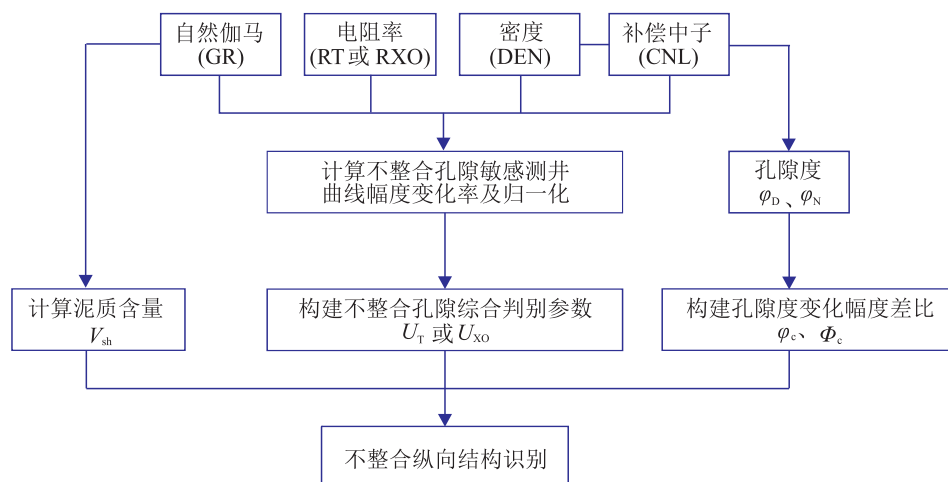


图4 测井曲线定量识别不整合纵向结构流程(据文献[9]、文献[21]修改)

(1) 计算不整合孔隙敏感测井曲线幅度变化率及其归一化。曲线幅度变化率为

$$\Delta Y_i = \frac{|Y_{i-1} - Y_i| + |Y_{i+1} - Y_i|}{Y_i} \quad (1)$$

式中: Y 为选取的某种测井曲线; i 为曲线当前深度点; Y_i 为当前某深度点的曲线值; Y_{i-1} 和 Y_{i+1} 为邻近当前深度点的曲线值; ΔY_i 为曲线当前深度点的幅度变化率值。

曲线幅度变化率值归一化处理公式为

$$Z_i = \frac{\Delta Y_i - \Delta Y_{\min}}{\Delta Y_{\max} - \Delta Y_{\min}} \quad (2)$$

$$Z_i = 1 - \frac{\Delta Y_i - \Delta Y_{\min}}{\Delta Y_{\max} - \Delta Y_{\min}} \quad (3)$$

式中: ΔY_{\min} 、 ΔY_{\max} 分别为最小、最大曲线幅度变化率值; Z_i 为曲线当前深度点幅度变化率归一化后的数值。其中, GR、RT (或 RXO)、CNL 等曲线采用式 (2) 计算, DEN 曲线采用式 (3) 计算, 这是因为密度与不整合孔隙度呈负相关^[9]。

(2) 构建不整合孔隙综合判别参数

$$U = \sum_{k=1}^n Z_{k,i} \quad (4)$$

式中: n 为选取的测井曲线种类总数, 本文 $n=4$; k 为选取的曲线参与计算的次序; $Z_{k,i}$ 为当前深度点第 k 种曲线幅度变化率的归一化值。当选取的电阻率曲线为 RT 或 RXO 时, 不整合孔隙综合判别参数为 U_T 或 U_{XO} , 一般 RT、RXO 曲线不同时参与计算, 因为二者之间具有高度相似性。

(3) 构建孔隙度变化幅度差比。首先, 计算

DEN 曲线孔隙度

$$\varphi_D = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (5)$$

式中: ρ_b 为密度值; ρ_f 为孔隙中流体的密度值; ρ_{ma} 为岩石骨架密度值。

然后计算 CNL 曲线孔隙度

$$\varphi_N = \frac{\varphi_b - \varphi_{Nma}}{\varphi_{Nf} - \varphi_{Nma}} \quad (6)$$

式中: φ_b 为补偿中子值; φ_{Nma} 为岩石骨架中子值; φ_{Nf} 为孔隙中流体的中子值。

最后分别计算密度孔隙度与中子孔隙度变化幅度差比

$$\varphi_c = \frac{|\varphi_D - \varphi_N|}{\varphi_N} \quad (7)$$

$$\Phi_c = \frac{|\varphi_N - \varphi_D|}{\varphi_D} \quad (8)$$

其中, 式 (8) 是本文根据式 (7) 新定义的关系式, 二者具有相似的运算逻辑。但由于岩性、储层性质等影响, φ_N 、 φ_D 偏离真实孔隙度的程度不同且具有不同程度的数值差异^[31], 使孔隙度变化幅度差变化与 φ_c 、 Φ_c 在反映纵向上孔隙度的变化方面具有不同的能力。

(4) 计算泥质含量。首先计算岩层泥质体积含量相对值^[21,31]

$$I_{GR} = \frac{GR - GR_{\min}}{GR_{\max} - GR_{\min}} \quad (9)$$

式中: I_{GR} 为目的层的自然伽马相对值, 也称泥质含量指数; GR_{\max} 、 GR_{\min} 分别为自然伽马曲线的最大、最小测量值。

然后计算泥质含量^[21,31]

$$V_{sh} = \frac{2^{GCUR \times I_{GR}} - 1}{2^{GCUR} - 1} \quad (10)$$

式中 GCUR 为希尔奇指数,它是与地层地质年代有关的经验参数,可根据实验室取心分析资料确定,一般老地层取 2.0,新地层取 3.7^[31]。

经过上述处理,测井曲线能更为直观地识别出不整合纵向结构(图 3):在风化黏土层上下界面处,GR、RT(或 RXO)等的幅度变化率曲线(ΔGR 、 ΔRT 或 ΔRXO 等)和不整合孔隙综合判别参数(U_T 或 U_{XO})出现明显的高值;风化黏土层 V_{sh} 表现为“箱状”高值,在风化黏土层界面之上表现为“箱状”低值,在风化黏土层界面之下其值介于二者之间;孔隙度变化幅度差比(φ_c 或 Φ_c)也表现出相似的特征,但 Φ_c 在底砾岩层、风化黏土层和半风化岩层表现出更为明显的差异,“放大”孔隙度变化值,更能反映不整合上下地层孔隙度变化,因而具有更好的识别不整合纵向结构的能力。

2.1.2 元素资料识别

在不整合形成过程中,不整合界面之下的地层经历裸露、剥蚀、风化。岩层中不同矿物由于抵抗风化能力不同,强烈的风化作用导致可溶性矿物的溶解和化学反应性元素的消耗,使不整合的上、下地层之间的矿物成分及元素含量出现有规律性变化^[26,32]。因此,利用地球化学资料可以有效识别不

整合面,定量研究各层次结构。

一般来说,在风化壳形成过程中,Ti、Zr 几乎不会流失^[33-34],Na、K、Ca 等元素会随岩层风化作用的发生而逐渐流失,Si、Al、Fe 等黏土组分不断富集^[26]。因此,在不整合面附近,化学风化程度相对较高,TiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、Zr 和其他不易失元素相对富集,在风化黏土层中含量较高,而 Na₂O 和其他易失元素相对贫乏,含量较低。

本文选取对风化敏感的元素含量变化及相应参数对单井不整合进行识别并划分不整合纵向结构(以 A1 井为例,图 5)。

在风化黏土层附近,CIA(即化学蚀变指数)^[35]值高,为 70.09~70.49,高于不整合面上下地层,并且从下至上具有增大趋势,这表明地层经历了温暖潮湿环境的中等的化学风化^[36]。同时,K₂O/Al₂O₃ 值偏高,这与 K 相对富集有关,而 K 相对富集表明 K 可能发生了交代作用,导致 CIA 值偏低^[36-37]。

纵向上,风化黏土层 TiO₂、Fe₂O₃ 含量从下往上呈增大趋势。相较于半风化岩层及底砾岩层,风化黏土层的 CaO、SiO₂ 含量较低,Al₂O₃、Zr 含量较高, τNa 指数(即钠消耗指数)^[38]、ICV 指数(即成分变异指数)^[39]相对较低。这表明了 P_{3w} 前地层处于温暖潮湿的环境,遭受了一定的化学风化作用,Na、Ca、Si 不断消耗,Al、Ti、Fe、K、Zr 相对富集并形成相应

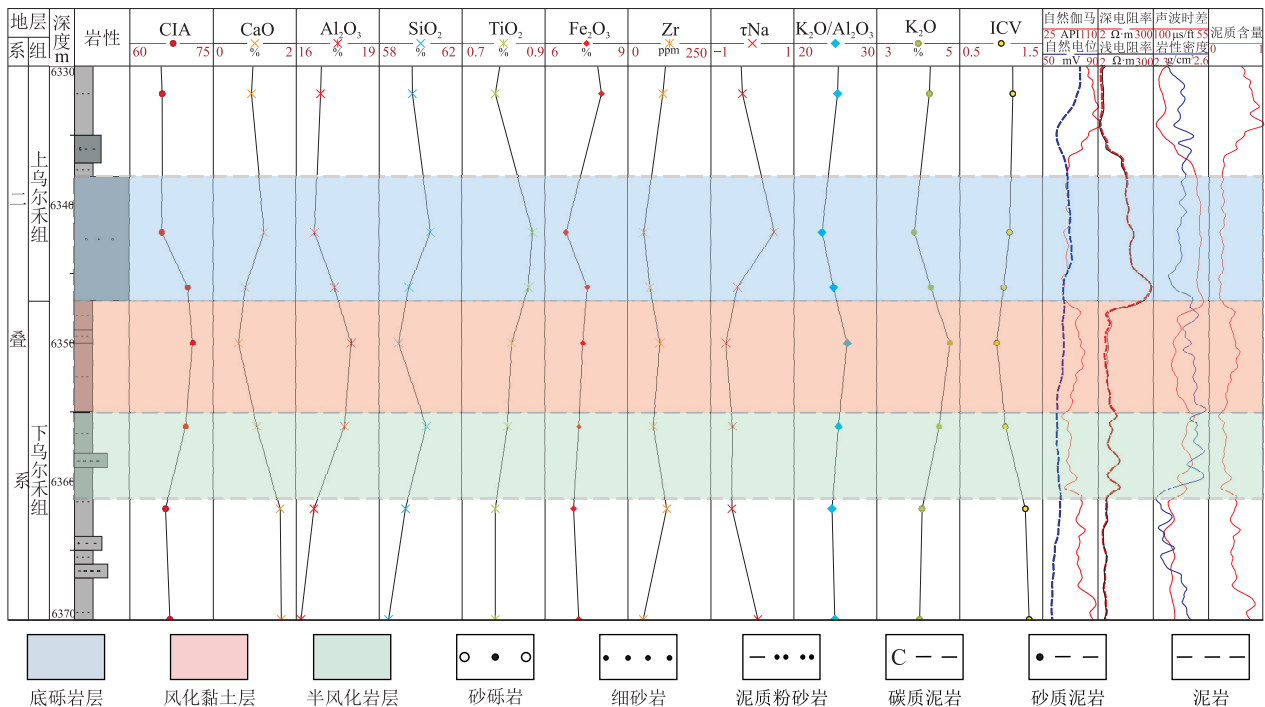


图 5 准噶尔盆地中部 A1 井中/上二叠统不整合纵向结构元素特征

的氧化物,之后堆积形成成分成熟的风化黏土层(古土壤层)并保存下来,其深度范围与前述相差不大(图 5)。

然而,相较于测井资料(图 3),元素含量的变化对不整合结构的特征更为敏感,通过元素资料判识不整合纵向结构更为准确(图 5)。这要求在不整合的上、下地层之间具备较高密度的样品采集和元素测试。而且,由于元素数据往往和区域构造变动、气候变化、沉积环境等方面的变化密切相关^[36-40],因此基于实测的元素数据也可用于推断深层—超深层隐蔽型不整合的存在。

A1 井测井资料和实测元素资料均表明中/上二叠统存在不整合,且发育风化黏土层,底砾岩层深度为 6336.30~6347.30 m,风化黏土层深度为 6347.30~6355.00 m,半风化岩层深度为 6355.00~6360.80 m(图 3、图 5)。结合地震资料,A1 井中/上二叠统不整合类型应为平行—平行不整合(图 1、图 2)。

2.2 纵向结构岩性特征

不整合面与其上、下地层之间的岩性组合对流体具有控制作用,这一方面与风化黏土层的发育有关,另一方面也与底砾岩层、半风化岩层的岩石类型有关^[13,18,27]。一般来说,当发育风化黏土层时,纵向上连通性较差,流体在各个地层之内运移;当缺失风

化黏土层时,纵向上连通性较好,流体倾向于由下至上运移。此外,当底砾岩层为泥岩时,往往对油气运移具有封堵作用;当底砾岩层为砂岩、砾岩时,对油气运移具有输导或圈闭作用;当半风化岩层为泥岩时,对油气运移具有封堵作用;当半风化岩层为砂岩、砾岩、碳酸盐岩、火山岩及变质岩中的任何一种,对油气运移具有输导或圈闭作用。

以 A1 井为例,中/上二叠统不整合发育风化黏土层,底砾岩层以砂砾岩为主,半风化岩层以含泥砂岩为主,因此其为砂—泥—砂型不整合结构岩性组合(图 3、图 5),不整合面上、下地层可以为输导体或形成圈闭,油气等流体难以垂向迁移。

研究区深层—超深层不整合结构岩性组合以砂—泥型、砂—泥—泥型、砂—泥—砂型为主,分布较广,具有分区分布规律(图 6):砂—泥型不整合岩性组合不发育风化黏土层,半风化岩层以泥岩为主,多位于构造低部位的深洼区,这与其远离物源区、构造作用小有关系;砂—泥—泥型不整合岩性组合发育风化黏土层,半风化岩层以泥岩为主,多分布于凹陷或斜坡,并与砂—泥型不整合岩性组合发育区相接;砂—泥—砂型发育风化黏土层,半风化岩层以砂岩、砾岩为主,但多夹杂泥岩、页岩等,这是由于构造运动与水体升降导致的半风化岩层岩性复杂,其分布最广,多发育于隆起或斜坡;砂—砂型不整合岩性组

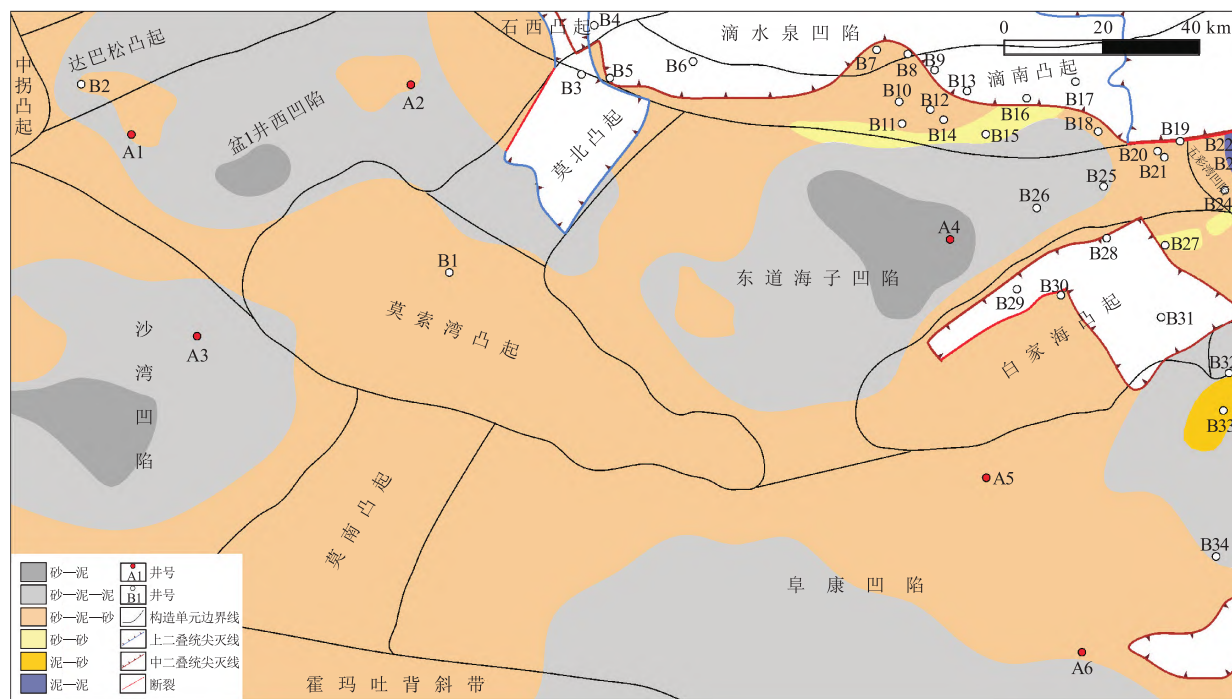


图6 准噶尔盆地中部中/上二叠统不整合结构岩性组合类型分布

合不发育风化黏土层,半风化岩层以砂岩、砾岩为主,仅在白家海凸起、滴南凸起小范围分布,靠近 P_2w (P_{2p}) 尖灭线,这可能与构造运动导致地层发生抬升剥蚀、风化有关;泥—砂型和泥—泥型不整合岩性组合的底砾岩层以泥岩为主,对流体具有封堵作用,因此不考虑风化黏土层是否发育,半风化岩层以砂岩、砾岩为主形成泥—砂型不整合结构,半风化岩层以泥岩为主形成泥—泥型不整合结构,它们仅在东部有小范围分布,对流体运移的控制作用不大。

3 不整合与油气分布关系

3.1 不整合对油气聚集的控制作用

不整合结构类型对油气运移和聚集有着重要的控制作用,由于构造部位、沉积作用、成岩作用、气候及后期改造的差异性,不整合结构与类型在空间分布上存在变化,不整合面与其上、下地层岩性存在多种配置关系,通过有规律的组合可以形成不同的结构类型^[18]。本文结合 5 种不整合类型及 6 种不整合结构岩性组合,划分出 30 种不整合结构类型(图 7),

其中,在前人研究基础上提出平行—褶皱型不整合结构类型,即在不整合面之上以形成输导体为主,在不整合面之下形成褶皱圈闭(图 7)。

风化黏土层的发育程度影响不整合上、下地层中流体的连通性。当风化黏土层发育时,上、下地层连通性差,“封堵性”较强,不整合结构以形成圈闭为主;当风化黏土层不发育时,上下地层直接连通,连通性主要取决于上、下地层的岩性配置关系、断层发育程度等。若风化黏土层发育,不整合面之上出现超覆或不整合面之下出现削截、褶皱时,以形成圈闭为主;仅当半风化岩层为泥岩层系且为平行—削截、平行—褶皱时,才形成输导体(图 7),如准噶尔盆地阜康凹陷康探 1 井区^[8-9]。若风化黏土层不发育,当不整合面之上或不整合面之下地层为非泥岩层系时,不整合结构类型以“输导”为主;仅当底砾岩层和半风化岩层的主导岩性不同,其一为非泥岩层系且出现超覆、削截或褶皱等时,才可以形成圈闭(图 7)。若断层发育时,由于其对油气运移有通道性、封闭性的双重属性,断层的垂向或侧向封闭性影响油气的运移、保存^[41],不整合结构类型以“输导”或“圈闭”为

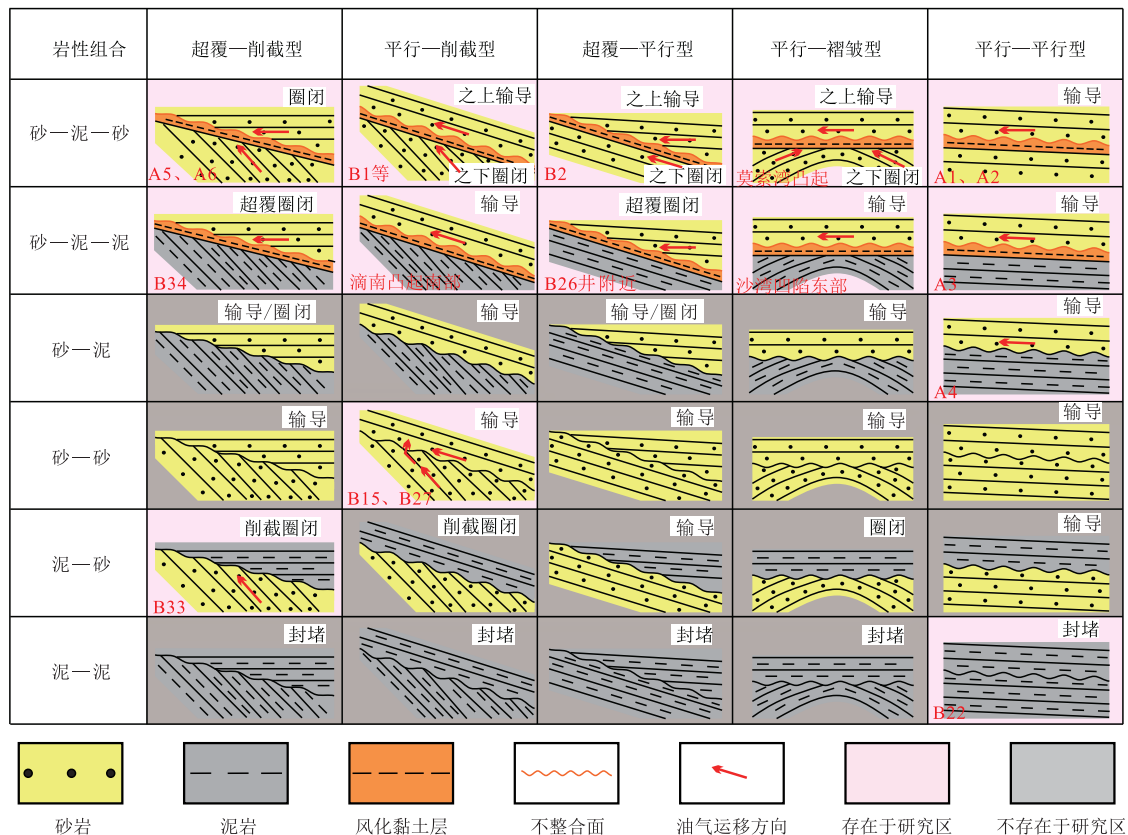


图 7 不整合结构类型(据文献[18]修改)

主,如阜康凹陷康探 1 井区^[8-9]、征沙地区征 10 井区^[42];仅当泥—泥接触时可能会形成封堵,这取决于断层活动性、断距及断层面两盘的断接岩性^[43-44]。

3.2 有利区带或圈闭优选

中/上二叠统不整合作为准噶尔盆地区域性不整合,对油气藏的形成有着重要的控制作用^[9]。本文对不整合类型平面分布与不整合结构岩性组合进行叠合(图 8)。由图可见:超覆—削截不整合的岩性组合为砂—泥—砂型、砂—泥—泥型、泥—砂型;平行—削截不整合的岩性组合为砂—泥—砂型、砂—泥—泥型、砂—砂型;超覆—平行不整合的岩性组合为砂—泥—砂型、砂—泥—泥型;平行—平行不整合的岩性组合为砂—泥—砂型、砂—泥—泥型、砂—泥型、泥—泥型;平行—褶皱不整合的岩性组合为砂—泥—砂型和砂—泥—泥型,即最终划分出 14 种不整合结构类型。同时,由于研究区深层—超深层不整合结构岩性组合以砂—泥型、砂—泥—泥型、砂—

泥—砂型为主,故准噶尔盆地中部深层—超深层不整合结构类型主要为 11 种(其他 3 种主要发育于中浅层)。

本文从成藏的角度对准噶尔盆地中部凹陷及其周缘深层—超深层不整合进行评价并优选出有利区 A 类、B 类(图 8),即有利区 A 类为在不整合面之上或之下有利于较大范围的油气稳定聚集的分类区域;有利区 B 类为以不整合面之上为主的有利于较小范围的油气不稳定聚集的分类区域。有利区 A 类成藏能力优于 B 类。

有利区 A 类以超覆—削截型、平行—削截型、平行—褶皱型等不整合类型为主,岩性组合主要为砂—泥—砂型。在不整合之上可以形成超覆地层圈闭,或在不整合面之下形成削截地层圈闭、背斜构造圈闭。它们主要分布于凸起和周缘,遍及阜康凹陷北部、东道海子凹陷西部、沙湾凹陷东部及莫索湾凸起周缘、霍玛吐背斜带周缘。

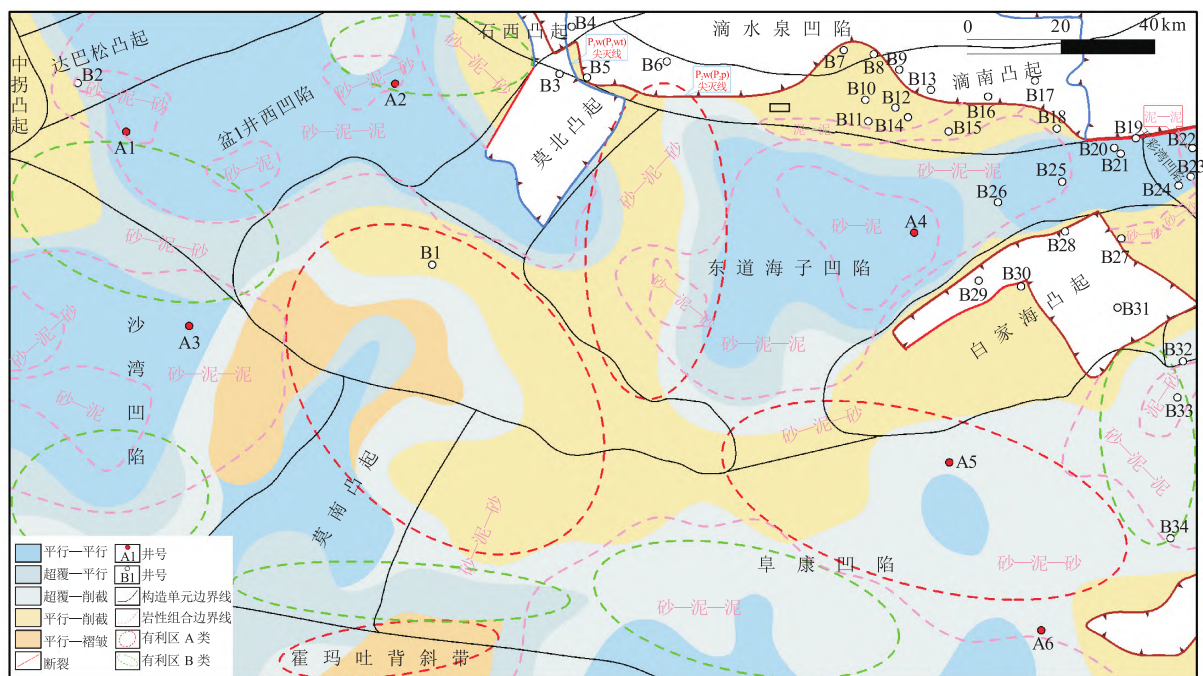


图 8 准噶尔盆地中部深层—超深层不整合地层圈闭有利区带分布

有利区 B 类以超覆—平行型、平行—削截型、超覆—削截型等不整合类型为主,岩性组合主要为砂—泥—泥型和砂—泥—砂型,以形成单一型圈闭为主。在不整合面之上形成超覆地层圈闭为主,或在不整合面之下形成削截地层圈闭。它们主要分布于凹陷边缘,零散分布于阜康凹陷西部及东部、盆 1 井西凹陷的北部及南部、沙湾凹陷的北部及南部、莫

南凸起的南部及周缘。

从不整合成藏类型来看,有利区 A 类一方面有利于圈闭形成,另一方面又因有风化黏土层可以有效“封堵”油气的向上溢散而有利于油气聚集成藏。有利区 B 类形成圈闭往往需要上覆层为致密盖层才能使圈闭中的油气得以有效保存。因此,准噶尔盆地中部二叠系地层圈闭众多,存在油气聚集的可

能性,有望寻找到与不整合相关的深层—超深层油气藏。

4 结论

(1)准噶尔盆地中部中/上二叠统发育平行—平行型、平行—削截型、超覆—平行型、超覆—削截型、平行—褶皱型共 5 种不整合类型,且在深层—超深层均有发育,具有区域性分布特征。

(2)测井资料、实测元素数据等表明,不整合纵向结构中各层界限在测井曲线和元素含量上均具有“突变性”响应,这与各层岩性、孔隙度、风化程度等因素有关。经过处理的测井曲线可以有效用于定量识别不整合结构,而本研究应用的参数 Φ_c 相较于前人应用的参数 φ_c 更能反映不整合上、下地层孔隙度变化,具有更好地识别深层—超深层不整合纵向结构的能力。此外,相较于测井资料,通过元素资料中元素含量的变化判识不整合纵向结构更为准确,它可用于识别深层—超深层隐蔽型不整合。

(3)研究区不整合结构岩性组合为砂—泥—砂型、砂—泥—泥型、砂—泥型、砂—砂型、泥—砂型、泥—泥型等 6 种类型,其中,砂—泥—砂型、砂—泥—泥型、砂—泥型等 3 种主要位于深层—超深层,具有分区分布的规律。

(4)根据不整合类型和岩性组合的配置关系,总结出地层砂/泥配置关系的平行—褶皱型不整合结构类型。根据不整合类型平面分布与不整合结构岩性组合叠合情况来看,发育中/上二叠统不整合结构类型 14 种,其中 11 种主要位于深层—超深层。

(5)通过对不整合的发育特征和成藏作用等方面的综合研究,最终优选出有利区 A 类、B 类两种油气聚集区带,其中, A 类的不整合成藏能力更优,展现出“深层—超深层”油气藏良好的油气勘探前景。

参考文献

- [1] 贾承造, 庞雄奇. 深层油气地质理论研究进展与主要发展方向[J]. 石油学报, 2015, 36(12): 1457-1469.
JIA Chengzao, PANG Xiongqi. Research processes and main development directions of deep hydrocarbon geological theories[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(12): 1457-1469.
- [2] 贾承造. 含油气盆地深层—超深层油气勘探开发的科学技术问题[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(5): 1-12.

- JIA Chengzao. Key scientific and technological problems of petroleum exploration and development in deep and ultra-deep formation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(5): 1-12.
- [3] 张东东, 刘文汇, 王晓锋, 等. 深层油气藏成因类型及其特征[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1169-1180.
ZHANG Dongdong, LIU Wenhui, WANG Xiaofeng, et al. Genetic types and characteristics of deep oil and gas plays[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1169-1180.
- [4] 庞雄奇, 汪文洋, 汪英勋, 等. 含油气盆地深层与中浅层油气成藏条件和特征差异性比较[J]. 石油学报, 2015, 36(10): 1167-1187.
PANG Xiongqi, WANG Wenyang, WANG Yingxun, et al. Comparison of otherness on hydrocarbon accumulation conditions and characteristics between deep and middle-shallow in petroliferous basins[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(10): 1167-1187.
- [5] 贾承造. 中国石油工业上游前景与未来理论技术五大挑战[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 1-14.
JIA Chengzao. Prospects and five future theoretical and technical challenges of the upstream petroleum industry in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 1-14.
- [6] 唐勇, 郭文建, 王霞田, 等. 玛湖凹陷砾岩大油区勘探新突破及启示[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(2): 127-137.
TANG Yong, GUO Wenjian, WANG Xiatian, et al. A new breakthrough in exploration of large conglomerate oil province in Mahu Sag and its implications[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(2): 127-137.
- [7] 杜金虎, 支东明, 唐勇, 等. 准噶尔盆地上二叠统风险领域分析与沙湾凹陷战略发现[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(1): 24-35.
DU Jinhu, ZHI Dongming, TANG Yong, et al. Prospects in Upper Permian and strategic discovery in Shawan Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(1): 24-35.
- [8] 何海清, 支东明, 唐勇, 等. 准噶尔盆地阜康凹陷康探 1 井重大突破及意义[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(2): 1-11.
HE Haiqing, ZHI Dongming, TANG Yong, et al. A great discovery of Well Kangtan 1 in the Fukang Sag in the Junggar Basin and its significance[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(2): 1-11.
- [9] 唐勇, 纪杰, 郭文建, 等. 准噶尔盆地阜康凹陷东部中/上二叠统不整合结构特征及控藏作用[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(5): 1138-1147.
TANG Yong, JI Jie, GUO Wenjian, et al. Characteristics and reservoir-control effect of Upper/Middle Permian unconformity structures in the east of Fukang Sag, Junggar Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(5): 1138-1147.
- [10] 孟祥超, 齐洪岩, 陈扬, 等. “T/C-P 不整合双地层结构”的压实—离心流渗滤作用与油气富集——以准噶尔盆地玛东斜坡区三叠系百口泉组为例[J]. 石油地球物理勘探, 2023, 58(4): 970-982.

- MENG Xiangchao, QI Hongyan, CHEN Yang, et al. Compaction-centrifugal flow percolation and hydrocarbon enrichment of T/C-P unconformable double stratigraphic structure: A case study of Triassic T₁b Formation in Madong slope area, Junggar Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2023, 58(4): 970-982.
- [11] 官伟. 准噶尔盆地陆梁隆起带二叠系—三叠系不整合体结构特征研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- GUAN Wei, Structural features of Permian-Triassic unconformities in Luliang Uplift, Junggar Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2019.
- [12] 官伟, 徐怀民, 李涵, 等. 不整合体结构特征研究: 以永1井区侏罗系—白垩系不整合为例[J]. 现代地质, 2019, 33(2): 401-411.
- GUAN Wei, XU Huaimin, LI Han, et al. Structural features of unconformities: A case study of the Jurassic-Cretaceous unconformity in well Yong 1 area, Junggar Basin[J]. Geoscience, 2019, 33(2): 401-411.
- [13] WANG Y, LIU L F, JI H C, et al. Structure of a pre-Triassic unconformity and its hydrocarbon transporting characteristics, Wuerhe-Fengnan area, Junggar Basin, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 173: 820-834.
- [14] TANG Y, WEI X S, YAN D T, et al. Astronomical timescale across the Middle Permian - Early Triassic unconformities in the northwestern Junggar Basin: Implications for the origin of the unconformities[J]. Marine and Petroleum Geology, 2024, 170: 107098.
- [15] LI Y Y, WU K Y, LIU Y, et al. Influencing factors on weathered clay layer formation in unconformity structures: A case study of the Junggar Basin[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2024, 243: 213344.
- [16] 曹剑, 胡文瑄, 张义杰, 等. 准噶尔盆地油气沿不整合运移的主控因素分析[J]. 沉积学报, 2006, 24(3): 399-406.
- CAO Jian, HU Wenxuan, ZHANG Yijie, et al. The main factor controlling petroleum migration along unconformity in the Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(3): 399-406.
- [17] ZOU C N, HOU L H, TAO S Z, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism and structure of large-scale volcanic weathering crust of the Carboniferous in northern Xinjiang, China[J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(2): 221-235.
- [18] 何登发. 不整合面的结构与油气聚集[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(2): 142-149, 201.
- HE Dengfa. Structure of unconformity and its control on hydrocarbon accumulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(2): 142-149, 201.
- [19] 李伟. 恢复地层剥蚀厚度方法综述[J]. 中国海上油气地质, 1996, 10(3): 167-171.
- LI Wei. Summary of reconstruction of strata denudation thickness[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1996, 10(3): 167-171.
- [20] 乔锦琪, 刘洛夫, 尚晓庆, 等. 油气运移示踪应用及有效性分析——以准噶尔盆地白家海凸起侏罗系八道湾组油气为例[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2023, 42(1): 107-121.
- QIAO Jinqi, LIU Luofu, SHANG Xiaoqing, et al. Application and effectiveness analysis of the hydrocarbon-migration tracing: a case study of hydrocarbons from the Jurassic Badaowan Formation in the Baijiahai High in the Junggar Basin, China[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2023, 42(1): 107-121.
- [21] 吴孔友, 李彦颖, 范彩伟, 等. 北部湾盆地乌石凹陷断拗转换期不整合结构特征及其成藏作用[J]. 大地构造与成矿学, 2022, 46(2): 272-281.
- WU Kongyou, LI Yanying, FAN Caiwei, et al. Characteristics of unconformity structure and its implication for petroleum accumulation during fault-depression transition period in the Wushi Sag, Beibuwan Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2022, 46(2): 272-281.
- [22] 高长海, 彭浦, 李本琼. 不整合类型及其控油特征[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(6): 1-7.
- GAO Changhai, PENG Pu, LI Benqiong. Unconformity types and their constraints on hydrocarbon behavior[J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(6): 1-7.
- [23] GAO Z Q, FAN T L. Unconformities and their influence on Lower Paleozoic petroleum reservoir development in the Tarim Basin[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015, 133: 335-351.
- [24] 吴孔友, 查明, 柳广弟. 准噶尔盆地二叠系不整合面及其油气运聚特征[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 53-57.
- WU Kongyou, ZHA Ming, LIU Guangdi. The unconformity surface in the Permian of Junggar basin and the characters of oil-gas migration and accumulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(2): 53-57.
- [25] 吴孔友, 邹才能, 查明, 等. 不整合结构对地层油气藏形成的控制作用研究[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(4): 518-524.
- WU Kongyou, ZOU Caineng, ZHA Ming, et al. Controls of unconformity on the formation of stratigraphic reservoirs[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2012, 36(4): 518-524.
- [26] 邹才能, 侯连华, 杨帆, 等. 碎屑岩风化壳结构及油气地质意义[J]. 中国科学:地球科学, 2014, 57(12): 2652-2664.
- ZOU Caineng, HOU Lianhua, YANG Fan, et al. Structure of weathered clastic crust and its petroleum potential[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 57(12): 3015-3026.
- [27] 高长海, 查明. 不整合运移通道类型及输导油气特征[J]. 地质学报, 2008, 82(8): 1113-1120.
- GAO Changhai, ZHA Ming. The types of unconformity migration passages and characteristics of hydrocarbon transport[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(8): 1113-1120.
- [28] 李素华, 卢齐军, 许国明, 等. 川西XC地区雷口坡组顶不整合面储层预测方法[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(5): 793-798.
- LI Suhua, LU Qijun, XU Guoming, et al. Reservoir

- prediction in the top Leikoupo unconformity surface in the area XC, Sichuan[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(5): 793-798.
- [29] 吴孔友, 查明, 洪梅. 准噶尔盆地不整合结构的地球物理响应及油气成藏意义[J]. 石油实验地质, 2003, 25(4): 328-332.
- WU Kongyou, ZHA Ming, HONG Mei. Relationship of reservoir formation with unconformities and their geophysical response in the Junggar basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(4): 328-332.
- [30] 吴孔友, 查明, 洪梅. 准噶尔盆地不整合结构模式及半风化石的再成岩作用[J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27(3): 270-276.
- WU Kongyou, ZHA Ming, HONG Mei. Structural models of unconformity and recurrent diagenesis of semi-weathering rock in Junggar basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2003, 27(3): 270-276.
- [31] 刘卫国, 宋先生, 郭长林, 等. 利用自然伽马测井数据计算地层泥质含量[J]. 铀矿地质, 2017, 33(1): 45-48, 54.
- LIU Weiguo, SONG Xiansheng, GUO Changlin, et al. Content index calculation of argillaceous rock in strata with natural Gamma logging data[J]. Uranium Geology, 2017, 33(1): 45-48, 54.
- [32] 宋国奇, 陈涛, 蒋有录, 等. 济阳拗陷第三系不整合结构矿物学与元素地球化学特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008, 32(5): 7-11, 17.
- SONG Guoqi, CHEN Tao, JIANG Youlu, et al. Mineralogical and element geochemical characteristics of unconformity structures of Tertiary in Jiyang Depression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(5): 7-11, 17.
- [33] VIERS J, DUPRÉ B, POLVÉ M, et al. Chemical weathering in the drainage basin of a tropical watershed (Nsimi-Zoetele site, Cameroon): Comparison between organic-poor and organic-rich waters[J]. Chemical Geology, 1997, 140(3): 181-206.
- [34] HODSON M E. Experimental evidence for mobility of Zr and other trace elements in soils[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2002, 66(5): 819-828.
- [35] NESBITT H W, YOUNG G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982, 299(5885): 715-717.
- [36] QIAO J Q, LUO Q Y, ZHANG K H, et al. Geochemistry and organic petrography of the Middle Permian Lucaogou alkaline lacustrine oil shale in the southern Junggar Basin, China: Implications for formation conditions and organic matter accumulation[J]. International Journal of Coal Geology, 2023, 268: 104198.
- [37] FEDO C M, WAYNE NESBITT H, YOUNG G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. Geology, 1995, 23(10): 921-924.
- [38] RASMUSSEN C, BRANTLEY S, RICHTER D DeB, et al. Strong climate and tectonic control on plagioclase weathering in granitic terrain[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2011, 301(3): 521-530.
- [39] COX RÓNADH, LOWE D R., CULLERS R. L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(14): 2919-2940.
- [40] LIU D D, ZHANG C, YAO E D, et al. What generated the Late Permian to Triassic unconformities in the southern Junggar Basin and western Turpan Basin; tectonic uplift, or increasing aridity? [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2017, 468: 1-17.
- [41] 陈永波, 程晓敢, 张寒, 等. 玛湖凹陷斜坡区中浅层断裂特征及其控藏作用[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(6): 985-994.
- CHEN Yongbo, CHENG Xiaogan, ZHANG Han, et al. Fault characteristics and control on hydrocarbon accumulation of middle-shallow layers in the slope zone of Mahu Sag, Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(6): 985-994.
- [42] 刘惠民, 张关龙, 范婕, 等. 准噶尔盆地腹部征沙村地区征10井的勘探发现与启示[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(5): 1118-1128.
- LIU Huimin, ZHANG Guanlong, FAN Jie, et al. Exploration discoveries and implications of well Zheng 10 in the Zhengshacun area of the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1118-1128.
- [43] WELCH M J, KNIPE R J, SOUQUE C, et al. A quadrshear kinematic model for folding and clay smear development in fault zones[J]. Tectonophysics, 2009, 471(3): 186-202.
- [44] 侯隰鹏, 王伟锋, 焦健. 断裂对泥岩盖层破坏程度综合定量研究方法及其应用[J]. 地质论评, 2015, 61(4): 961-967.
- HOU Jianpeng, WANG Weifeng, JIAO Jian. A comprehensive quantitative research method of destroy degree of faults to mudstone caprock and its application [J]. Geological Review, 2015, 61(4): 961-967.

(本文编辑:谢结来)

作者简介



李威 硕士研究生, 1998年生; 2022年获长安大学资源勘查工程学士学位; 现在中国石油大学(北京)攻读地质资源与地质工程专业硕士学位, 主要从事油气成藏机理、地球化学、石油地质学等方面的学习和研究。