



# 本溪组砂岩致密化的三种成因类型及预测

万永平<sup>1</sup>, 宋 明<sup>2,3</sup>, 折印楠<sup>1</sup>, 蒲仁海<sup>2</sup>, 周文娟<sup>2</sup>

(1. 陕西延长石油(集团)有限责任公司气田公司, 陕西 延安 716000; 2. 西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069;  
3. 中国石油大学(华东) 深层油气全国重点实验室, 山东 青岛 266580)

**摘要** 鄂尔多斯盆地延安地区上石炭统本溪组是重要的天然气产层之一, 储层主要为障壁、潮道和浅滩微相砂岩。研究区大部分钻井砂岩产气, 但部分本溪组砂岩因致密化变为干层。查清砂岩致密成因与分布, 有效规避干层成为开发井位部署的重要问题之一。该研究将砂岩岩心、沉积微相、显微特征与测井响应等相结合, 研究砂岩致密成干层的成因和预测方法。结果表明, 研究区干层砂岩存在 3 种类型: 凝灰质基底式胶结砂岩、碳酸盐岩基底式胶结砂岩和紧密压实型砂岩。第一种干层砂岩沿古火山口集中局限在靖边南古潮道附近; 第二种干层砂岩分布在上覆太原组灰岩相对增厚区; 第三种干层砂岩分布于孤立的小型浅滩砂岩中, 可能与成藏期酸性流体和油气没有进入储层形成溶蚀孔有关。该研究对有效储层形成机理及“甜点”分布预测具有重要意义。

**关键词** 本溪组; 干层成因分类; 显微特征; 测井特征; 跨尺度识别

中图分类号: P618.11 DOI: 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2025-02-001

## Three genetic types and prediction of sandstone densification in the Benxi Formation

WAN Yongping<sup>1</sup>, SONG Ming<sup>2,3</sup>, SHE Yinnan<sup>1</sup>, PU Renhai<sup>2</sup>, ZHOU Wenjuan<sup>2</sup>

(1. Natural Gas Research Institute, Shaanxi Yanchang Petroleum [Group] Co., Ltd., Yan'an 716000, China;

2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;

3. State Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum [East China], Qingdao 266580, China)

**Abstract** The Benxi Formation of the Upper Carboniferous in the Yanchang field of the Ordos Basin is one of the important natural gas production layers, with reservoirs mainly composed of barrier, tidal channel, and shoal microfacies sandstones. Most of the drilled sandstones produce gas, but some of the drilled Benxi Formation sandstones have become dry layers due to densification. Identifying the origin and distribution of tight sandstone and effectively avoiding dry layers has become one of the important issues in the deployment of production wells. This article combines sandstone cores, sedimentary microfacies, microscopic characteristics, and logging responses to study the genesis and prediction methods of tight dry sandstone layers. The results indicate that there are three types of dry sandstone: tuffaceous basal cemented sandstone, carbonate basal cemented sandstone, and tightly compacted sandstone. The first type is concentrated and limited along the

收稿日期: 2024-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(41390451); 陕西省重点研发计划项目(2022GY-140)。

第一作者: 万永平, 男, 正高级工程师, 博士, 从事油气勘探地质研究, wanhunter@163.com。

通信作者: 蒲仁海, 男, 教授, 博士, 从事油气勘探研究, purenhai@nwu.edu.cn。

ancient volcanic crater near the ancient tidal channel of southern Jingbian; The second type is distributed in the relatively thickened area of the overlying Taiyuan Formation limestone; The third type is distributed in isolated small shoal sandstones, which may result in the lack of dissolution pores during the reservoir formation period which needs acidic fluids and oil and gas to enter the reservoir. This understanding is of great significance for the formation mechanism of effective reservoirs and the prediction of "sweet spot" distribution.

**Keywords** Benxi Formation; dry layer genesis type; microscopic features; logging feature; cross scale

砂岩的致密化过程和致密化机理一直是储层地质学前沿研究领域的重点内容之一,众多学者从多个方面对其开展了广泛而深入的探讨<sup>[1-2]</sup>,普遍认为储层致密化主要受沉积环境和成岩作用的综合控制<sup>[3-4]</sup>。张涛等认为,大量喷发岩岩屑是神木气田太原组储层发育次生孔隙的基础,凝灰质杂基对储层具有双重影响<sup>[5]</sup>。王小娟等认为,各类成岩胶结物的差异分布是导致川中地区沙溪庙组储层物性变差的首要原因<sup>[6]</sup>。林良彪等认为,造成川西上三叠统须家河组砂岩孔隙损失的主因是压实作用,但导致储层致密的关键因素是半封闭—封闭晚期成岩环境沉淀的碳酸盐胶结物<sup>[4]</sup>。前人学者研究认为,沉积环境和沉积过程控制着砂体原始孔隙度和高低渗储层的宏观分布,成岩作用控制着砂体微观孔隙特征和结构<sup>[7-10]</sup>。

近年来,鄂尔多斯盆地中部本溪组成为天然气重要产层之一<sup>[11]</sup>。储层砂岩主要为障壁沙坝、浅滩和潮道环境的石英砂岩<sup>[12-13]</sup>。前人对本溪组地层相继开展了沉积特征、储层特征、成岩作用、孔隙演化和油气成藏等方面的研究<sup>[14-18]</sup>,发现其大部分砂岩产气,但部分井的本溪组砂岩为水层或干层。有效开发井的部署不仅需要预测有效砂体的分布,而且需要规避干层和水层。根据障壁沙坝砂岩平行古海岸线分布、潮道砂体在奥陶系顶面古岩溶凹槽中加厚等规律大致可以预测砂体的分布。研究发现,在奥陶系或山西组存在气层的区域,或局部存在大断裂的位置,本溪组砂岩会含水,据此在开发井部署中可以有效规避水层<sup>[18]</sup>。目前,学者对本溪组干层的成因和分布研究甚少,如何规避干井也极为重要。为此,本研究认真观察了 34 口本溪组的岩心,统一二次处理解释了研究区的测井数据,结合试气成果识别了所有井的本溪组气、水、干层,重点分析了取心井段干层的铸体薄片、扫描电镜和测井响应等特征,提出了“沉积型”“胶结型”和“压实型”3 种成因干层砂岩的显微和测井尺度统一识别方法,并从沉

积和成岩作用的宏观尺度预测了干层的分布,为预测优质储层提供了重要的地质依据。

## 1 研究区地质概况

研究区位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡中部〔见图 1(a)〕,面积 5 800 km<sup>2</sup><sup>[19-20]</sup>,其内钻穿本溪组的探井和开发井共 1 280 口;本溪组地层厚度 10 ~ 70 m,自上而下可分为本一段和本二段,砂体主要分布在本二段。本溪组含砂岩、泥岩、煤层和铝土质泥岩等多种岩性<sup>[21-22]</sup>,顶部发育 0 ~ 10 m 煤层烃源岩<sup>[23-24]</sup>,局部夹 1 或 2 层薄于 2 m 的灰岩〔见图 1(b)〕。

本溪组砂岩类型以石英砂岩为主,少量岩屑石英砂岩,主要发育溶蚀孔和粒间孔,孔隙度 1.46% ~ 12.94%,平均 3.75%;渗透率(0.01 ~ 96.1) × 10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,平均 1.15 × 10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>。从渗透率分布范围与储层类型的关系来看<sup>[25-27]</sup>,研究区本溪组砂岩包含低渗[(10 ~ 100) × 10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>]、特低渗[(1 ~ 10) × 10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>]、超低渗[(0.1 ~ 1) × 10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>]以及致密(< 0.1 × 10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>) 4 种储层类型〔见图 1(c)〕。本溪组沉积时期受陆表海波浪、潮汐共同作用的影响,盆地中南部广泛发育障壁海岸沉积环境,障壁沙坝呈串珠状沿海岸分布<sup>[12,28]</sup>。

## 2 气、水、干层的测井识别

对研究区 1 280 口测井数据进行统一二次处理解释,结合完井试气结果,可以得出本溪组气、水、干层的电阻率、孔隙度、含气饱和度识别图版(见图 2)。由图 2 可看出,气层的孔隙度(POR) ≥ 4%,地层电阻率(RD) 55 ~ 850 Ω · m,含水饱和度(S<sub>w</sub>) < 45%;水层的 POR ≥ 4%,RD < 150 Ω · m, S<sub>w</sub> > 70%;干层的 POR < 4%,RD 为 70 ~ 210 Ω · m, S<sub>w</sub> < 40%。

研究区气、水、干层在铸体薄片上存在明显的

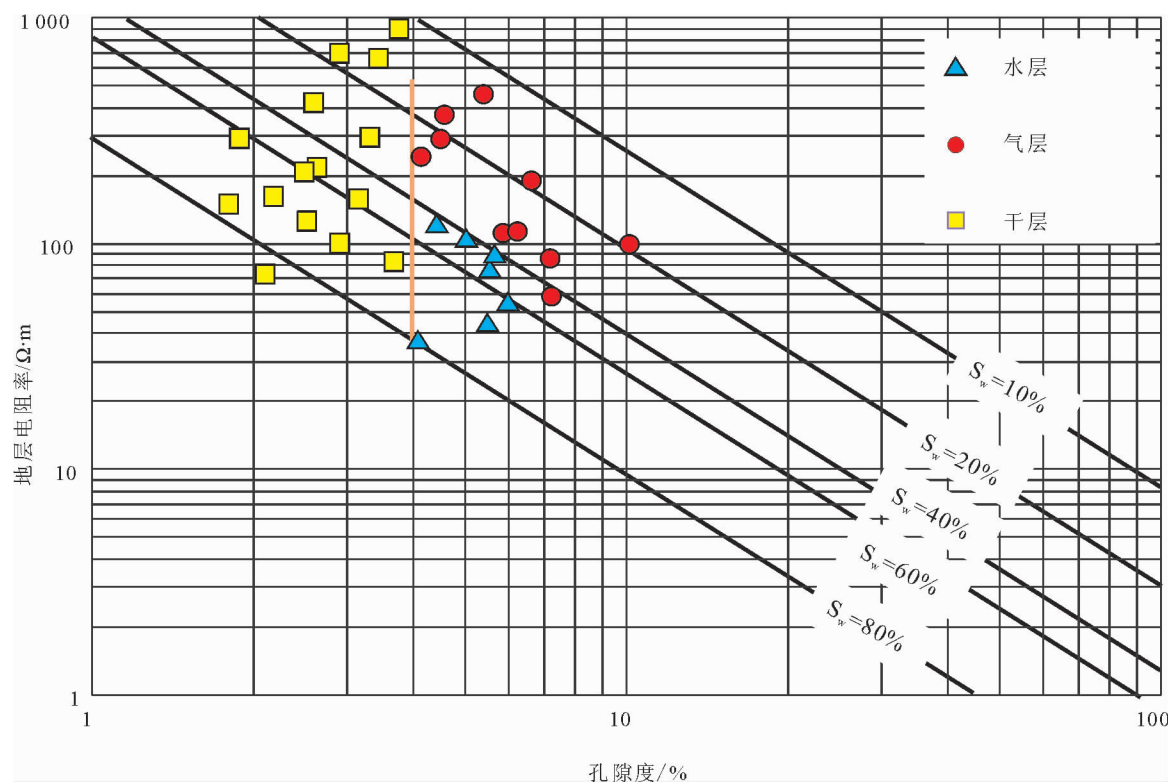


图 2 研究区本溪组气、水、干层砂岩的孔隙度、电阻率和含水饱和度交会图

Fig. 2 Cross plot of porosity, resistivity and water saturation for distinguishing between gas, aqueous and dry sandstone of Benxi Formation in the study area

3 种干层的共同特点是在铸体薄片上几乎看不到孔隙,面孔率小于 2%,对应的测井计算孔隙度小于 4%。造成孔隙不发育的原因是凝灰质杂基或碳酸盐胶结物的基底式胶结,溶蚀孔不发育或强烈压实导致的颗粒紧密接触。其微观结构图像如图 5 所示。

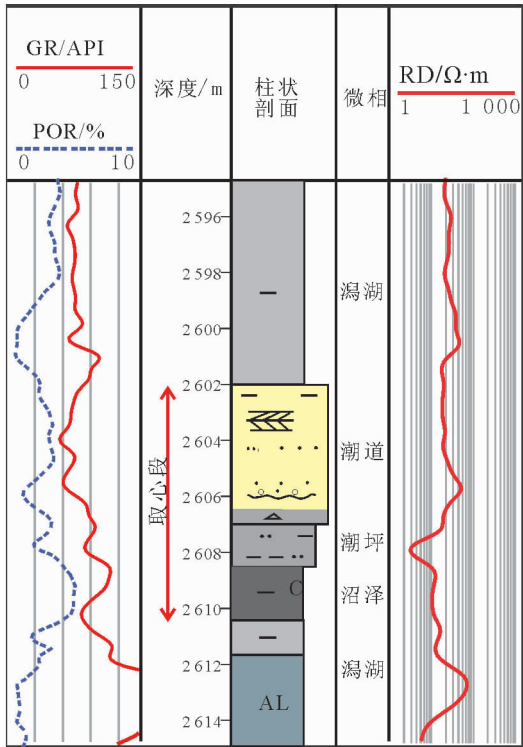
凝灰质物质是直径小于 2 mm 的火山碎屑物,在单偏光镜下为灰黑色,在正交偏光下常呈波状消光<sup>[29-30]</sup>。研究区的凝灰质杂基一般见于细砂岩中,质量分数超过 15%,基底式胶结,在成岩早期因压实作用变致密;4 个样品的岩心实测孔隙度平均 2.93%,平均渗透率为  $0.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。由于泥质杂基含量高,与有效储层砂岩相比,沉积型干层砂岩的自然伽马测井值明显偏高,一般为 45~90 API,电阻率与上下岩性无明显变化(20~50  $\Omega \cdot \text{m}$ ) [见图 3(a)]。

胶结型干层砂岩的碳酸盐矿物的质量分数大于 15%,常为充填粒间孔的微晶方解石、白云石和菱铁矿,它们局部可交代石英颗粒,溶孔不发育或极少,成岩早期发生的大量碳酸盐矿物的基底式胶结使砂岩致密化。6 个样品实测平均孔隙度为 2.74%,渗透率为  $0.34 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。与同层

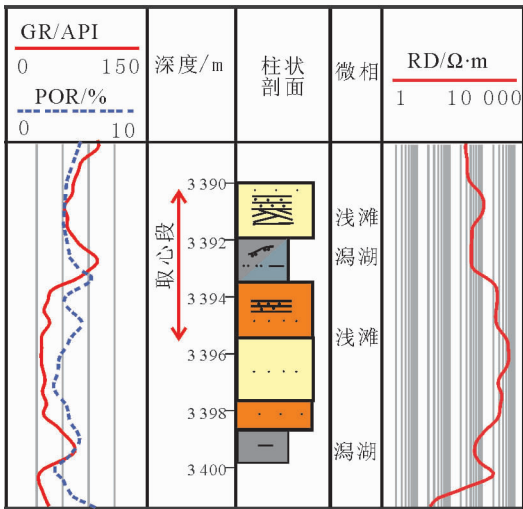
位、同沉积微相相邻的气层砂岩相比,胶结型干层的自然伽马几乎与气层一样,为 25~45 API,但却显著小于沉积型干层的自然伽马。胶结型干层的电阻率稍大于气层的电阻率,前者为 10~40  $\Omega \cdot \text{m}$ ,后者为 9~10  $\Omega \cdot \text{m}$ ,电阻率偏大可能与碳酸盐含量高有关[见图 3(b)]。

与前两类干层相比,压实型干层由于泥质含量低,自然伽马测井值也较低(20~45 API),这一特征与胶结型干层类似。但是,压实型干层的电阻率很高,达 400~5 000  $\Omega \cdot \text{m}$ ,远高于其他两类干层,其原因可能与缺乏微观孔隙和流体有关[见图 3(c)]。

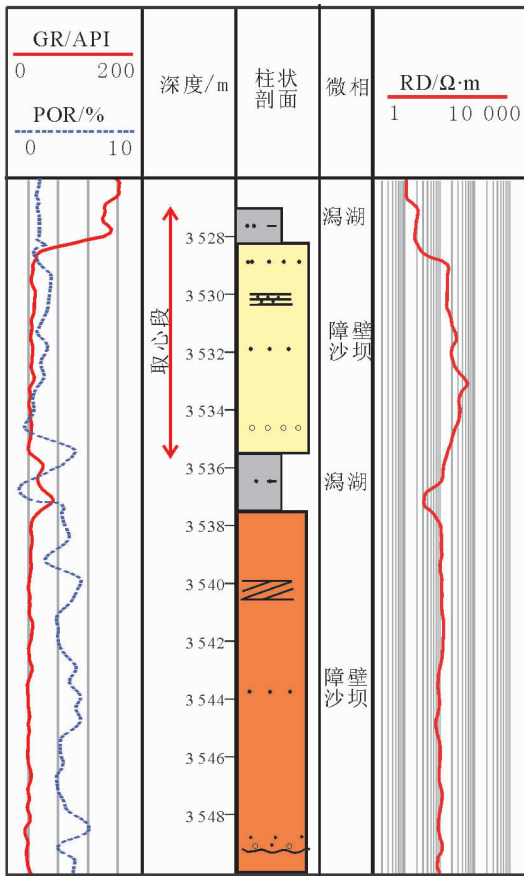
根据以上分析可知,在测井综合识别砂岩的基础上(GR 为 25~100 API,AC 为 190~240  $\mu\text{s}/\text{m}$ ),计算孔隙度小于 4%时,可以进一步利用自然伽马、电阻率两个参数区分 3 类成因的干层。当干层砂岩的自然伽马为 45~90 API 时,将其归为沉积型干层;当干层砂岩自然伽马为 25~45 API,地层电阻率小于 400  $\Omega \cdot \text{m}$  时,将其归为胶结型干层;当干层砂岩自然伽马为 25~45 API,地层电阻率大于 400  $\Omega \cdot \text{m}$  时,将其归为压实型干层。



(a) 沉积型干层综合剖面 (延377井)



(c) 压实型干层综合剖面 (延1227井)



(b) 胶结型干层综合剖面 (延1003井)

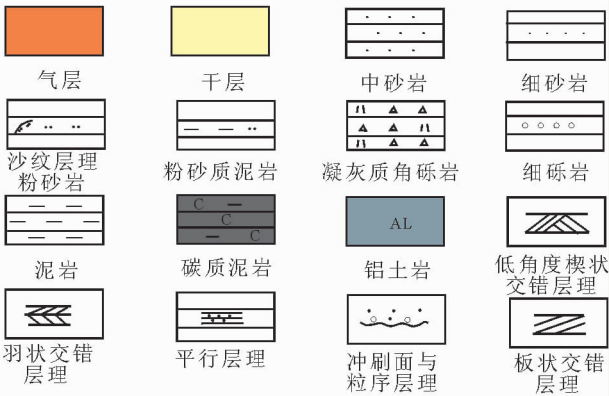


图 3 3 种干层岩心及测井剖面特征(对应砂岩的铸体薄片照片见图 4)

Fig. 3 Characteristics of three types of dry sandstone core and logging sections

4 控制因素与分布

根据以上识别 3 类成因干层、水层和气层的测井门槛值,可以识别、统计研究区 1 280 口钻井的本溪组一、二段每种干层、水层和气层的厚度,分别制作出本一、二段各类干层和气、水层的厚度图。以本二段为例,比较本溪组砂岩、气层、干层和水层厚度图可以看出,本溪组干层的分布与本

溪组砂岩微相和厚度具有一定的相关性〔见图 6 (a)、(b)〕。平面上,干层的厚度变化〔见图 6 (c)〕与气层〔见图 6(b)〕类似,均与砂岩总厚度〔见图 6(a)〕变化趋势一致,为北北东、北东和北西的定向性串珠分布特点,这与平行岸线的障壁沉积有关,但干层砂岩的总面积只有总砂岩面积的 1/3 到 1/4。干层砂岩厚度图的形态呈孤立的卵圆形,直径 2~5 km,不如气层和累计砂岩的厚度大,连通性好。而本二段水层砂岩的分布更薄、更小、更零星〔见图 6(d)〕。

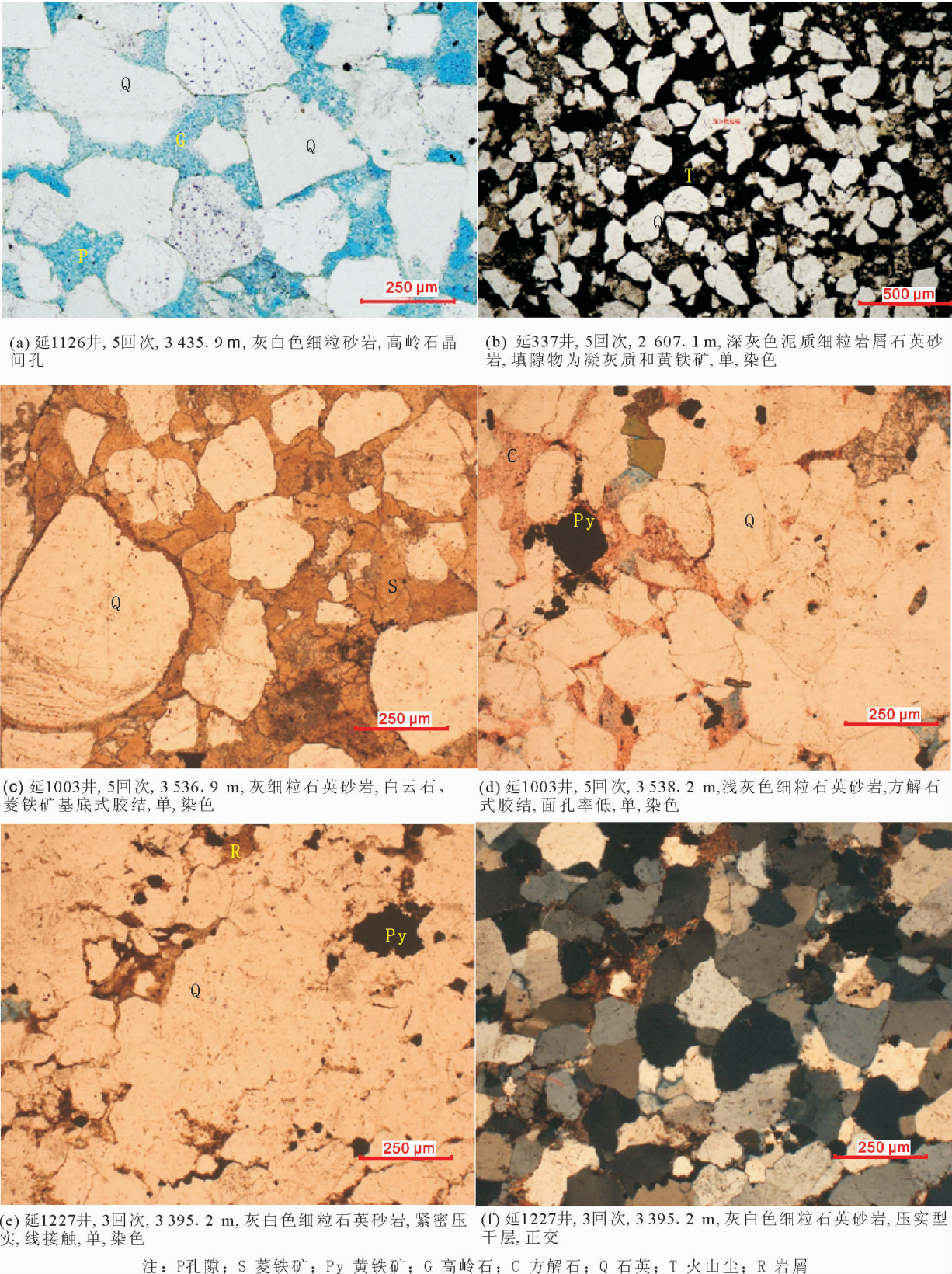


图 4 铸体薄片照片上 3 种干层砂岩的显微特征

Fig. 4 Microscopic photos of three types of dry sandstone on casting thin section

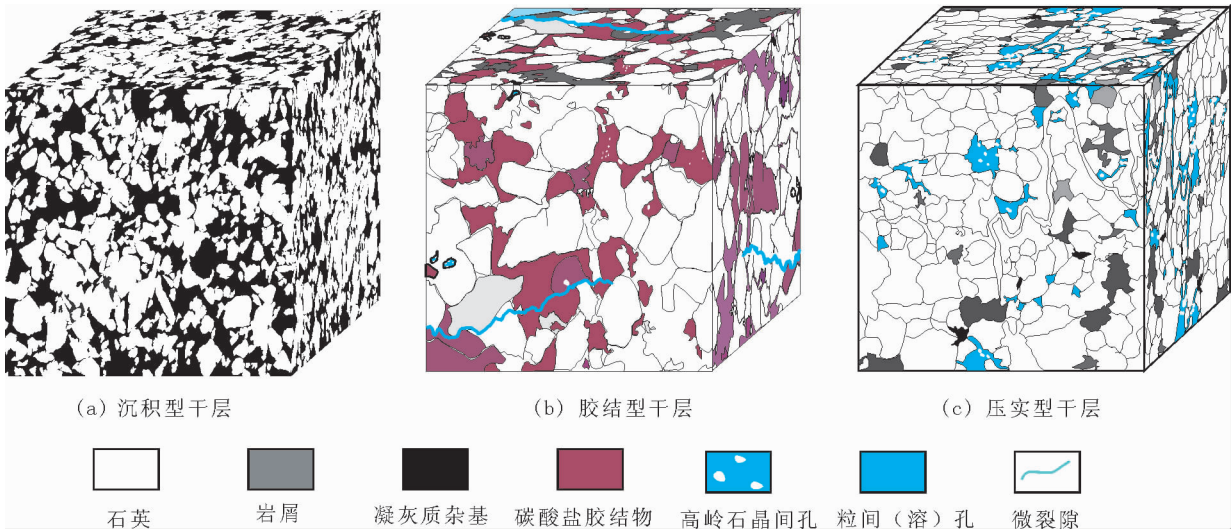


图5 3种成因干层砂岩微观结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of microstructure of three types of sandstone densifications

3类干层的分布主要受古地貌、本溪组煤层烃源岩厚度与太原组灰岩厚度的影响(见图6)。从分布面积来看,3类干层中压实型干层的占比最多,可达48%,胶结型干层居中,占27%,沉积型干层最少且分布较为局限,占25%。

本溪组厚度图(见图7(a))大致反映了奥陶系顶面岩溶古地貌的特征,后者在一定程度上控制了砂岩的微相与展布<sup>[12]</sup>。本溪组顶部广覆式煤层烃源岩分布[见图7(b)],为生烃期酸性流体与天然气充注砂岩形成溶蚀孔隙和气藏提供了保障<sup>[31-32]</sup>。

太原组灰岩厚度图[见图7(c)]与本溪组碳酸盐岩胶结型干层砂岩的厚度图[见图7(d)]上的厚度增大区具有一定的吻合性,反映了胶结型干层砂岩的成因与太原组沉积环境存在一定的关系。太原组灰岩沉积时,本溪组砂岩处于浅埋藏成岩早期阶段,成岩环境距海底只有数十米的距离,砂岩孔隙与上覆太原组沉积时的海水处于半连通、半开放状态,在有利于太原组灰岩沉积的环境下,本溪组砂岩孔隙中的碳酸盐岩胶结物也相对较易沉淀。依据它们二者之间的这种相关性,可以用太原组的厚度图大致指示或预测本溪组胶结型干层砂岩的分布区。

胶结型干层主要分布在研究区中部砂体中,其范围与上覆太原组灰岩厚度较大的区域吻合[见图7(c)、(d)]。本溪组砂岩成岩早期,来自海底的富钙离子碱性流体在砂岩粒间滞留,形成

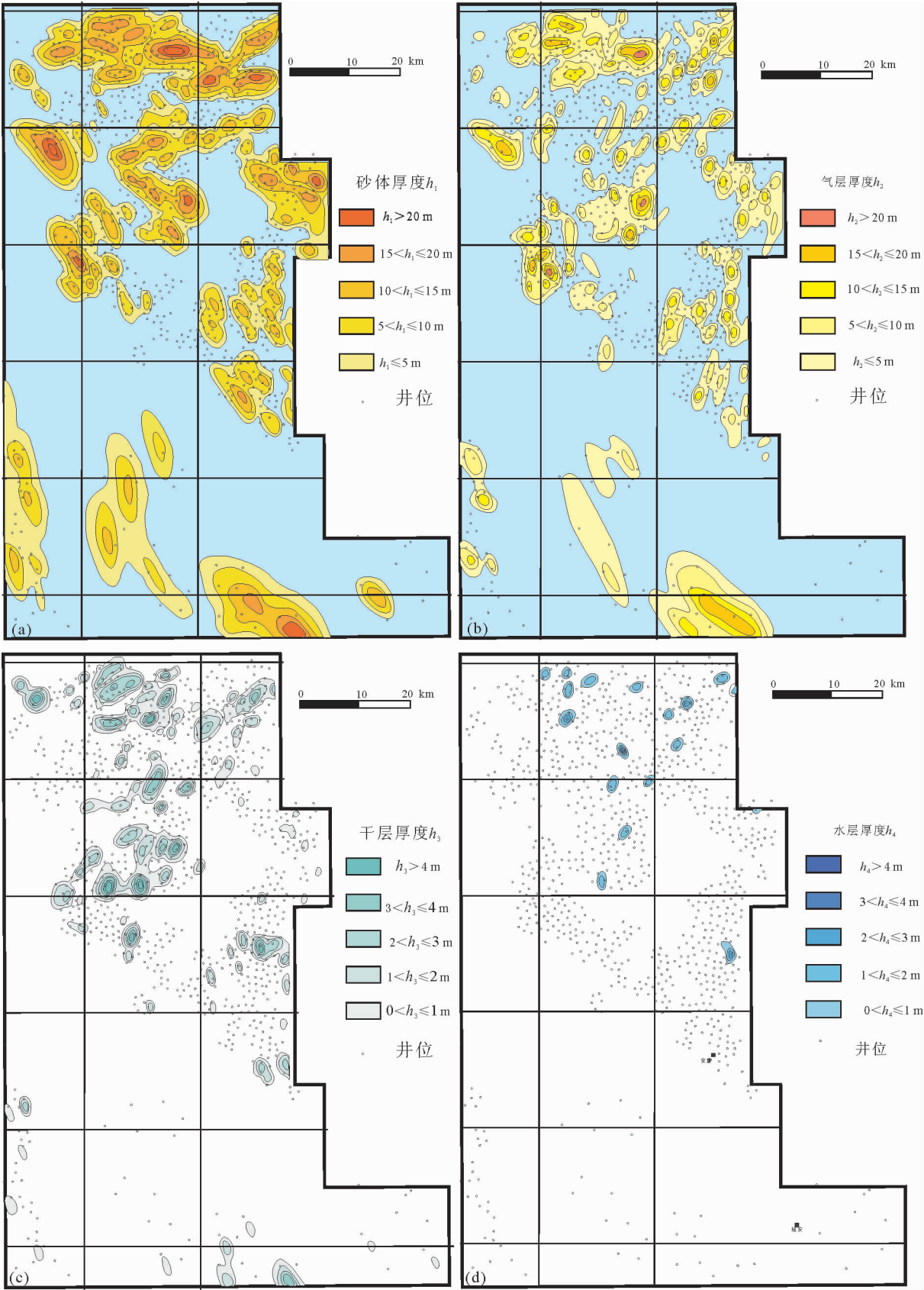
大量碳酸钙的沉淀,最后转变为碳酸盐岩矿物基底式胶结,致使砂岩变为干层。

沉积型干层主要分布在靖边南部东西向的古潮道[见图7(e)],该潮道受奥陶系顶面东西向的岩溶古凹槽控制。古凹槽内的潮道砂岩可能同时位于某古火山口附近,在砂岩中混入了较高含量的火山灰与火山尘,在成岩早期呈基底式胶结,堵塞了储层孔隙。

压实型干层分布在研究区孤立分散的浅滩砂体中[见图7(f)],其成因与单砂体小、孤立、不连通、横向流体输导性差有关。在成藏期,酸性流体和油气无法进入这些孤立的砂体发生溶蚀,后期又经历较强的压实作用,导致砂岩致密。

从气藏剖面看,干层砂体规模小,孤立,纵、横向上均介于含气砂岩之间(见图8)。研究认为,干层砂岩没有形成溶蚀孔隙可能与砂体分散、孤立导致流体输导性差,成藏期未能将有机酸流体和油气导入到砂岩中发生溶蚀有关。

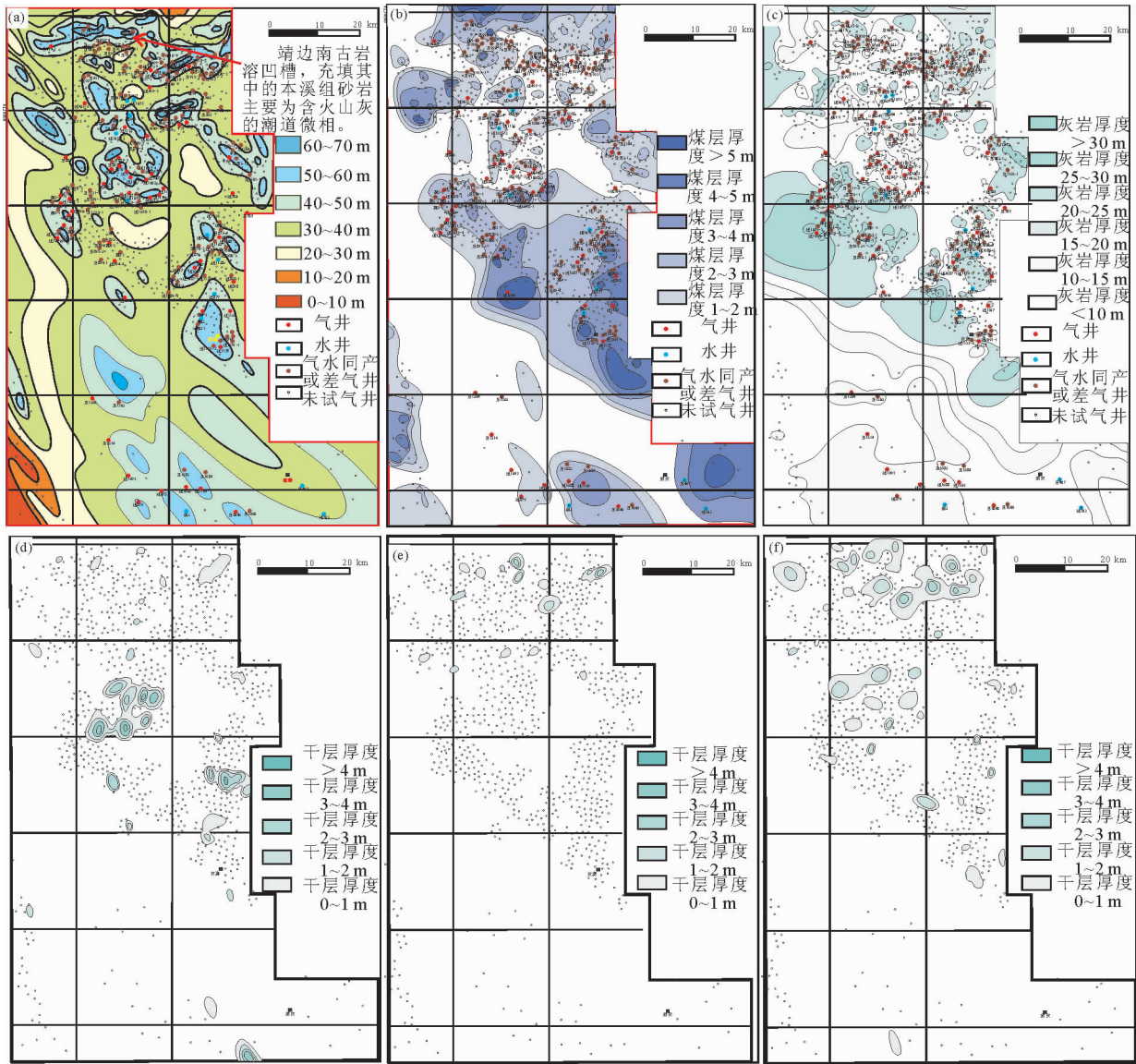
综上所述,沉积型干层与局部存在的古火山口有关,主要沿靖边南缘东西向的岩溶古凹槽分布;胶结型干层与上覆太原组灰岩加厚带有关;压实型干层与孤立、分散分布的浅滩微相砂体流体横向输导性差有关。在有效储层预测和开发井部署中,可以根据以上控制因素,在古地貌平面图、砂体微相与厚度分布图、太原组灰岩厚度图的基础上,排除干层发育的区域,提高气井钻遇率。



(a)本二段砂岩厚度图;(b)本二段气层厚度图;(c)本二段干层厚度图;(d)本二段水层厚度图。

图6 不同成因干层与其控制因素的分布关系

Fig. 6 Distribution relationships of different genetic dry layers and their controlling factors



(a) 本溪组地层厚度图; (b) 本溪组煤层厚度图; (c) 太原组灰岩厚度图; (d) 胶结型干层厚度图; (e) 沉积型干层厚度图; (f) 压实型干层厚度图。

图 7 本二段砂层、气层、干层和水层分布的比较

Fig. 7 Comparison of the distributions of sand, gas, dry and water layers in the Ben-2 section

5 结论

1) 依据岩心观察、显微薄片鉴定和孔隙结构,可将鄂尔多斯盆地中部本溪组的砂岩致密化成干层的原因归为 3 类,分别为火山灰基底式胶结的沉积成因,碳酸盐矿物基底式胶结成因和强烈压实颗粒紧密接触的压实成因。

2) 铸体薄片上微米级的孔隙类型和成因在分米级的测井曲线上具有对应的响应。应用自然伽马、声波测井计算孔隙度和电阻率等测井资料,可以识别和统计研究区本溪组不同成因干层的砂岩含量。据此制作的不同类型干层砂岩厚度图与本溪组沉积时的古地貌、砂体微相与展布和太原组灰岩厚度等之间存在一定的相关性。

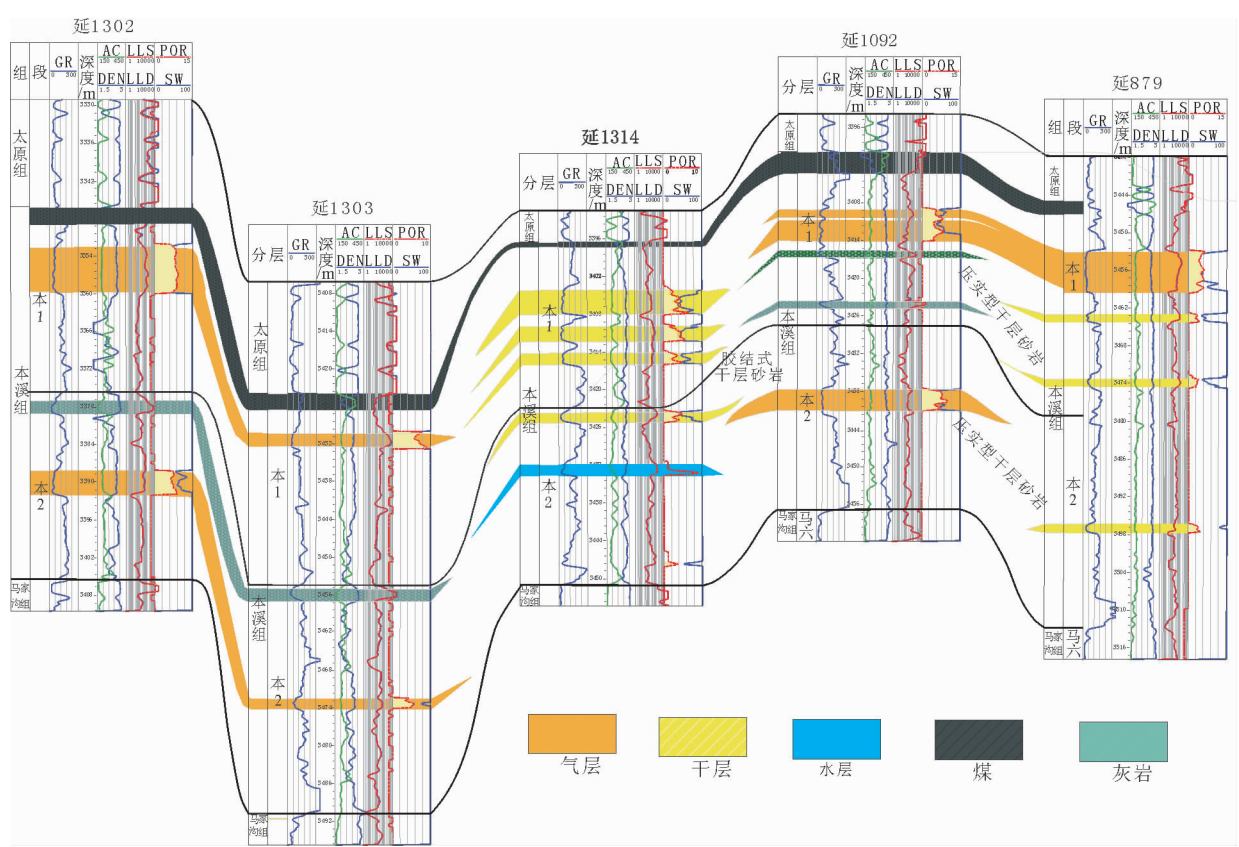


图 8 研究区钻井气藏剖面上的干层分布图

Fig. 8 Distribution of dry layers on a well-linked gas reservoir section in the study area

3) 沉积型干层主要集中在研究区北部、东西向岩溶古凹槽的潮道砂岩沉积区,附近可能存在古火山,提供了较多凝灰质杂基。碳酸盐胶结型干层主要分布于障壁砂岩中,其分布与上覆太原组灰岩加厚区吻合,是有利于碳酸盐沉淀的古海水在早成岩期渗入本溪组砂岩发生基底式胶结作用造成。压实型干层主要发生于零星的浅滩砂岩中,由于横向流体疏导性差,成藏期酸性流体未能进入砂岩发生溶蚀而形成。干层成因识别与分布规律的认识对于规避干井和提高开发效益具有重要意义。

参考文献

[1] 邹才能,杨智,张国生,等. 非常规油气地质学理论技术及实践[J]. 地球科学, 2023, 48(6): 2376-2397.

ZOU C N, YANG Z, ZHANG G S, et al. Theory, technology and practice of unconventional petroleum Geology [J]. Earth Science, 2023, 48(6): 2376-2397.

[2] 陈朝兵,付玲,陈新品,等. 致密砂岩微观非均质性定量评价方法研究——以鄂尔多斯盆地华庆地区延长组长 6 油层组为例[J]. 沉积学报, 2021, 39

(5): 1086-1099.

CHEN C B, FU L, CHEN X J, et al. Quantitative evaluation method for micro heterogeneity of tight sandstone: A case study of Chang 6 reservoir of Yanchang Formation in Huaqing Area, Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(5): 1086-1099.

[3] 米伟伟,谢小飞,曹红霞,等. 鄂尔多斯盆地东南部二叠系山 2—盒 8 段致密砂岩储层特征及主控因素[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(6): 101-117.

MI W W, XIE X F, CAO H X, et al. Characteristics and main controlling factors of tight sandstone reservoirs of Permian Shan 2 to He 8 members in southeastern Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(6): 101-117.

[4] 林良彪,余瑜,南红丽,等. 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组四段储层致密化过程及其与油气成藏的耦合关系[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 816-828.

LIN L B, YU Y, NAN H L, et al. Reservoir tightening process and its coupling relationship with hydrocarbon accumulation in the fourth member of Upper Triassic Xujiahe Formation in the Western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4): 816-828.

- [5] 张涛,巩肖可,黄朝,等. 鄂尔多斯盆地神木气田太原组低品质气藏储层微观特征及形成机理[J]. 石油实验地质,2024,46(1):1-15.
- ZHANG T, GONG X K, HUANG C, et al. Micro characteristics and formation mechanism of low-quality gas reservoirs in Taiyuan Formation of Shenmu Gas Field, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(1): 1-15.
- [6] 王小娟,陈双玲,谢继容,等. 川西南地区侏罗系沙溪庙组致密砂岩成藏特征及主控因素[J]. 岩性油气藏,2024,36(1):78-87.
- WANG X J, CHEN S L, XIE J R, et al. Accumulation characteristics and main controlling factors of tight sandstone of Jurassic Shaximiao Formation in southwestern Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(1): 78-87.
- [7] QIN X L, RONG X L, CHEN L, et al. Diagenetic facies and their controls on the quality of tight sandstone reservoirs: A case study from the Upper Paleozoic gas reservoir in the eastern Ordos Basin, North China[J]. Geofluids, 2023, 2023(1): 4445749.
- [8] WANG J, YE F W, ZHANG C, et al. Factors that control the reservoir quality of the Carboniferous-permian tight sandstones in the Shilounan Block, Ordos Basin[J]. Processes, 2023, 11(8): 2279.
- [9] 孙雅雄,张坦,丁文龙,等. 压汞法与数字图像分析技术在致密砂岩储层微观孔隙定量分析中的应用——以鄂尔多斯盆地吴起油田X区块为例[J]. 石油实验地质,2022, 44(6): 1105-1115.
- SUN Y X, ZHANG T, DING W L, et al. Application of mercury intrusion method and digital image analysis in quantitative analysis of micro-scale pores in tight sandstone reservoirs: A case study of X block in Wuqi Oil Field Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(6): 1105-1115.
- [10] 秦晓艳,林进,武富礼. 鄂尔多斯盆地东南部本溪组致密石英砂岩成岩作用与孔隙演化[J]. 西北大学学报(自然科学版),2016,46(4):579-584.
- QIN X Y, LIN J, WU F L. Diagenesis and porosity evolution of tight quartz sandstones in Benxi Formation, Southeast Ordos Basin [J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2016, 46(4): 579-584.
- [11] 牛小兵,赵伟波,史云鹤,等. 鄂尔多斯盆地本溪组天然气成藏条件及勘探潜力[J]. 石油学报,2023, 44(8):1240-1257.
- NIU X B, ZHAO W B, SHI Y H, et al. Natural gas accumulation conditions and exploration potential of Benxi Formation in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(8): 1240-1257.
- [12] 彭子霄,于兴河,李顺利,等. 鄂尔多斯盆地东南部本溪组障壁迁移样式及控制因素[J]. 古地理学报,2023,25(6):1330-1346.
- PENG Z X, YU X H, LI S L, et al. Migration patterns and controlling factors of barrier of the Benxi Formation in southeastern Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2023, 25(6): 1330-1346.
- [13] MENG X Z, PU R H, DOU T C, et al. Longshore changes in the microfacies and distribution of clastic barrier coastal sandbodies: A case from the Benxi Formation in the Ordos Basin, China[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2024, 14(5): 1129-1148.
- [14] 肖子亢,刘宝平,高小平,等. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界致密砂岩储层特征及主控因素分析[J]. 科技通报,2017,33(8):48-56.
- XIAO Z K, LIU B P, GAO X P, et al. Analyses on characteristics and main controlling factors of tight sandstone reservoir on the Upper Paleozoic in southeastern Ordos Basin [J]. Bulletin of Science and Technology, 2017, 33(8): 48-56.
- [15] 黄道军,李新虎,刘燕,等. 鄂尔多斯盆地中东部本溪组致密砂岩储层特征及有利层段优选[J]. 西安科技大学学报,2023,43(1):109-118.
- HUANG D J, LI X H, LIU Y, et al. Characteristics and favorable intervals selection of tight sandstone reservoirs in Benxi Formation, central-eastern Ordos Basin [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43(1): 109-118.
- [16] 胡芸冰. 鄂尔多斯盆地中东部晋祠组致密砂岩储层孔隙差异性演化机理[D]. 徐州:中国矿业大学,2022.
- [17] 李剑,张春林,姜福杰,等. 鄂尔多斯盆地上石炭统本溪组致密气富集主控因素[J]. 天然气工业,2021,41(4):30-40.
- LI J, ZHANG C L, JIANG F J, et al. Main factors controlling the enrichment of Upper Carboniferous Benxi Formation tight gas in the Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(4): 30-40.
- [18] SONG M, MENG X Z, PU R H. Controls on gas-reservoir formation in the Benxi Formation in the Ganquan—Fuxian Area of the Ordos Basin, China [J]. Energies, 2023, 16(19): 6866.
- [19] 付金华. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏条件及富集规律[D]. 西安:西北大学,2004.
- [20] 赵靖舟,付金华,姚泾利,等. 鄂尔多斯盆地准连续

- 型致密砂岩大气田成藏模式[J]. 石油学报, 2012, 33(S1): 37-52.
- ZHAO J Z, FU J H, YAO J L, et al. Quasi-continuous accumulation model of large tight sandstone gas field in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S1): 37-52.
- [21] 苏东旭. 鄂尔多斯盆地东南部石炭系本溪组沉积体系研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- [22] 贾浪波. 鄂尔多斯盆地中东部上石炭统本溪组物源及沉积体系研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- [23] 李浩. 鄂尔多斯盆地中部上古生界烃源岩研究[D]. 西安: 西北大学, 2015.
- [24] DAI J X, LI J, LUO X, et al. Stable carbon isotope compositions and source rock geochemistry of the giant gas accumulations in the Ordos Basin, China[J]. Organic Geochemistry, 2005, 36(12): 1617-1635.
- [25] XU X, LI X J, YANG W J, et al. Diagenesis and pore evolution model of tight sandstone gas reservoirs of Benxi Formation in the south-central Ordos Basin, China[J]. Energy Sources (Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects), 2021, 41(1): 1-18.
- [26] 于兴河, 李顺利, 杨志浩. 致密砂岩气储层的沉积-成岩成因机理探讨与热点问题[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(1): 1-13.
- YU X H, LI S L, YANG Z H. Discussion on deposition-diagenesis genetic mechanism and hot issues of tight sandstone gas reservoir [J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(1): 1-13.
- [27] 姜福杰, 贾承造, 庞雄奇, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界全油气系统成藏特征与天然气富集地质模式[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(2): 250-261.
- JIANG F J, JIA C Z, PANG X Q, et al. Upper Paleozoic total petroleum system and geological model of natural gas enrichment in Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(2): 250-261.
- [28] 尚玥. 鄂尔多斯盆地中东部上石炭统本溪组沉积相及储层特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
- [29] 宋世骏, 柳益群, 郑庆华, 等. 含凝灰质致密油层成岩作用与原油充注特点: 以鄂尔多斯盆地西北部长 4 + 5 段为例[J]. 地质科技情报, 2018, 37(5): 54-62.
- SONG S J, LIU Y Q, ZHENG Q H, et al. Diagenesis and oil filling Characteristics of tuffaceous tight reservoir: A case study of Chang 4 + 5 member in northwest of Ordos Basin [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2018, 37(5): 54-62.
- [30] 石晓敏, 位云生, 朱汉卿, 等. 致密凝灰质砂岩储层孔隙结构特征与储层分类评价——以松辽盆地南部营城组致密凝灰质砂岩为例[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(10): 1828-1841.
- SHI X M, WEI Y S, ZHU H Q, et al. Pore structure characteristics and reservoir classification and evaluation of tight tuffaceous sandstone gas reservoir: Taking the tight tuffaceous sandstone of Yingcheng Formation in southern Songliao Basin as an example [J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(10): 1828-1841.
- [31] 周进松, 王念喜, 赵谦平, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长探区上古生界天然气成藏特征[J]. 天然气工业, 2014, 34(2): 34-41.
- ZHOU J S, WANG N X, ZHAO Q P, et al. Natural gas accumulation characteristics in the Upper Paleozoic in the Yanchang exploration block of southeastern Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(2): 34-41.
- [32] 曹跃, 银晓, 赵谦平, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长探区上古生界烃源岩特征与勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(3): 13-21.
- CAO Y, YIN X, ZHAO Q P, et al. Characteristics and exploration direction of Upper Paleozoic source rock in Yanchang Block of southern Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(3): 13-21.

(编辑 雷雁林)