



·鄂尔多斯盆地研究·

鄂尔多斯盆地东南部上古生界煤层分布特征

吴疆¹,关蕴文²,蒲仁海²,高小平³

(1. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083;2. 西北大学 地质学系/大陆动力学国家重点实验室,陕西 西安,710069;3. 延长石油集团油气勘探公司,陕西 延安,716000)

摘要 根据岩心、测井、地震资料综合分析鄂尔多斯盆地东南部煤层识别方法、厚度变化及其与古地貌和沉积相关关系。研究发现,该区在山西组下段和本溪-太原组发育两套较厚煤层,它们具有低自然伽马、低密度、高电阻率和高时差测井特征,在地震剖面上形成半个周期的上谷下峰特强振幅反射。两套煤层累计厚度1~10 m,平均累厚2.4 m,单层煤最厚5.5 m。单层厚度大于2 m的煤层面积约2 500 km²,煤层埋深一般2 500~3 000 m。研究认为,本溪-太原组厚煤层主要分布在近源的、具有下切成因的奥陶系古岩溶凹地,而无下切的、远源的奥陶系古岩溶凹地为同时代或近时代的灰岩沉积;上古生界的煤层与分流河道砂岩在平面上的分布具互补关系。

关键词 煤层分布;测井与地震响应;古地貌;沉积相

中图分类号:P618.13 **DOI:**10.16152/j.cnki.xdxbzr.2023-05-015

Geophysical identification and distribution of Upper Paleozoic coals in southeastern Ordos Basin

WU Jiang¹, GUAN Yunwen², PU Renhai², GAO Xiaoping³

(1. Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China;

2. Department of Geology/State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China;

3. Yanchang Petroleum Group Exploration Company, Yan'an 716000, China)

Abstract Based on core, logging, and seismic data, a comprehensive analysis was conducted on the identification methods of coal seams, thickness changes, and their relationship with paleogeomorphology and sedimentary facies in the southeastern part of the Ordos Basin. The lower part of Shanxi Fm and the upper part of Taiyuan Fm in the southeastern part of the basin characterize low natural gamma ray, low density, high resistivity and high sonic logging values. As the coal velocity is very low and alternates with high-velocity Taiyuan Fm and Ordovician limestones, the two sets of coals below and above Taiyuan limestones form an extremely strong amplitude reflection on the seismic profile. The two sets of coals are 1~10 m thick cumulatively, average 2.4 m, with 4 m as the maximum individual thickness. The coal seam with an individual layer thicker than 2 m covers an area of about 2 500 km², and the buried depth of the coal seam range from 2 500 to 3 000 m. Research has shown that the thick coal seams of Taiyuan Fm are mainly distributed proximally in the Ordovician paleokarst depression with incised origin, while the Ordovician paleokarst depression without incised ori-

收稿日期:2023-04-06

基金项目:国家自然科学基金重大项目(41390151)

第一作者:吴疆,男,高级工程师,从事油气地质勘探研究,wujiang_syky@sinopec.com。

gin was deposited by distal coeval limestone rocks. There is a complementary relationship between the coal seams and the thickening zone of distributary channel sandstone for the Shanxi Fm.

Keywords coal distribution; coal logging and seismic response; palaeotopography; sedimentary facies

鄂尔多斯盆地是一个大型聚煤盆地,全盆主要发育两套含煤岩系,分别是上古生界石炭—二叠系与中生界侏罗系^[1-2],煤炭资源量巨大。盆地内赋存的煤炭资源总量(小于2 000 m)约4 万亿吨,1 000 m 以内的埋藏资源量约1 万亿吨^[3],是中国重要的煤炭生产基地。盆地内煤系地层的共生、伴生矿产资源十分丰富,除煤层气、煤系砂岩储层气之外,还伴有锆、铀、高岭土等多种金属或非金属矿产^[4-5]。因此,对研究区煤炭资源的勘探研究至关重要。

对鄂尔多斯盆地南部上古生界煤层的测试显示,山西组煤岩的有机碳质量分数为40.37%~77.11%,平均值为54.94%;氯仿沥青“A”质量分数为0.026 3%~0.359%,平均值为0.161 4%;总烃含量平均为 $1\,140.64\times10^{-6}$ 。太原组煤岩的有机碳质量分数为41.1%~91.32%,平均为66.96%,氯仿沥青“A”质量分数为0.019 3%~0.108 0%,平均值为0.063 6%^[6-7]。若将煤层作为烃源岩来评价^[8-9],鄂尔多斯上古生界南部煤系有机质丰度整体处于较高水平,且大部分达到了干气阶段, R_o 值1.72%~2.28%,属于瘦煤—贫煤—无烟煤^[10-11],演化程度较高,生气潜力大。

前人对鄂尔多斯盆地南部山西组和本溪—太原组的煤层研究多着重于煤层的地球化学特征,由于资料有限,因而对其纵横向分布规律并不十分清楚。近年来,随着致密气的勘探,钻穿上古生界的井显著增多,本研究收集了富县以南、旬邑县以东的鄂尔多斯盆地东南部101口探井资料和4 km×4 km 二维及一块三维地震资料,开展了煤层的地球物理识别、厚度、埋深、沉积相、古地貌等分析,为该區煤层发育规律的研究和勘探评价提供参考。

研究区面积约14 610 km²,共有101口钻入下古生界的探井,井距一般3~20 km,主要来自延长集团、中石化和中石油集团公司,包含常规综合录井、测井和部分取心资料(见图1)。它们均钻遇了奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系地层(见图2)。另外,应用了中石化约4 km×4 km 测网的二维地震和一块约300 km² 的三维叠后偏移地震资料,其地震垂向采样间隔为2 ms,主频

25 Hz,记录长度0~5 s,目的层主频约25 Hz,黑波峰代表正反射系数。三维地震区内存在4口钻井,分别为XY1、XY2、Yan626、Jian1。

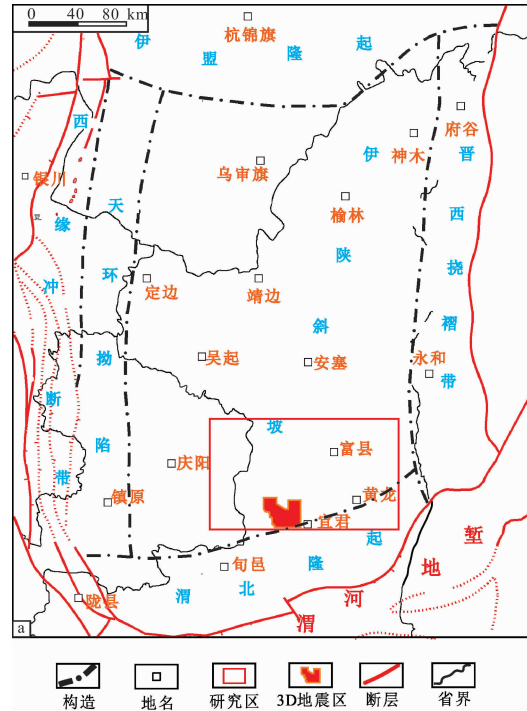


图1 区域构造图和研究区位置图
Fig. 1 Regional structural units and location of study area

为了研究煤层分布及其与沉积相和古地貌之间的关系,在测井标准化基础上进行了不同岩性的测井交会图分析,得出砂岩、灰岩、煤层等不同岩性的测井识别阈值,用于砂岩、煤层、灰岩厚度统计、含量计算和沉积相分析。通过印模法统计奥陶系灰岩顶面和太原组灰岩顶面两个标志层之间的厚度制作古地貌图^[12],以此分析古地貌对沉积相和煤层的控制。通过制作合成记录和地震层位标定,分析煤层的地震响应特征,应用一维正演模型和三维地震属性、波阻抗和孔隙度反演等分析煤层、砂岩与地震振幅和波阻抗的变化关系,绘制三维地震区煤层厚度图和沉积相图。最后,综合以上煤层厚度、沉积相、古地貌信息分析煤层发育的控制因素和有利区展布。

露头 and 浅层煤矿研究表明,鄂尔多斯盆地上古生界煤系的发育受控于稳定的克拉通盆地陆表海陆过渡相沉积背景^[12-15]。本溪—太原组、山西

组共发育 10 层煤,从上到下编号依次为 1#~10 #,其中 1#~5#煤层位于山西组,6#~10#煤位于本溪-太原组。5#煤层和 8#煤层相较其他煤层横

向上分布最为稳定,且厚度较大,是盆地的两大主要产煤层(见图 2)。其余煤层单层厚度普遍小于 2 m,且分布极不稳定,只在局部发育^[11,16]。

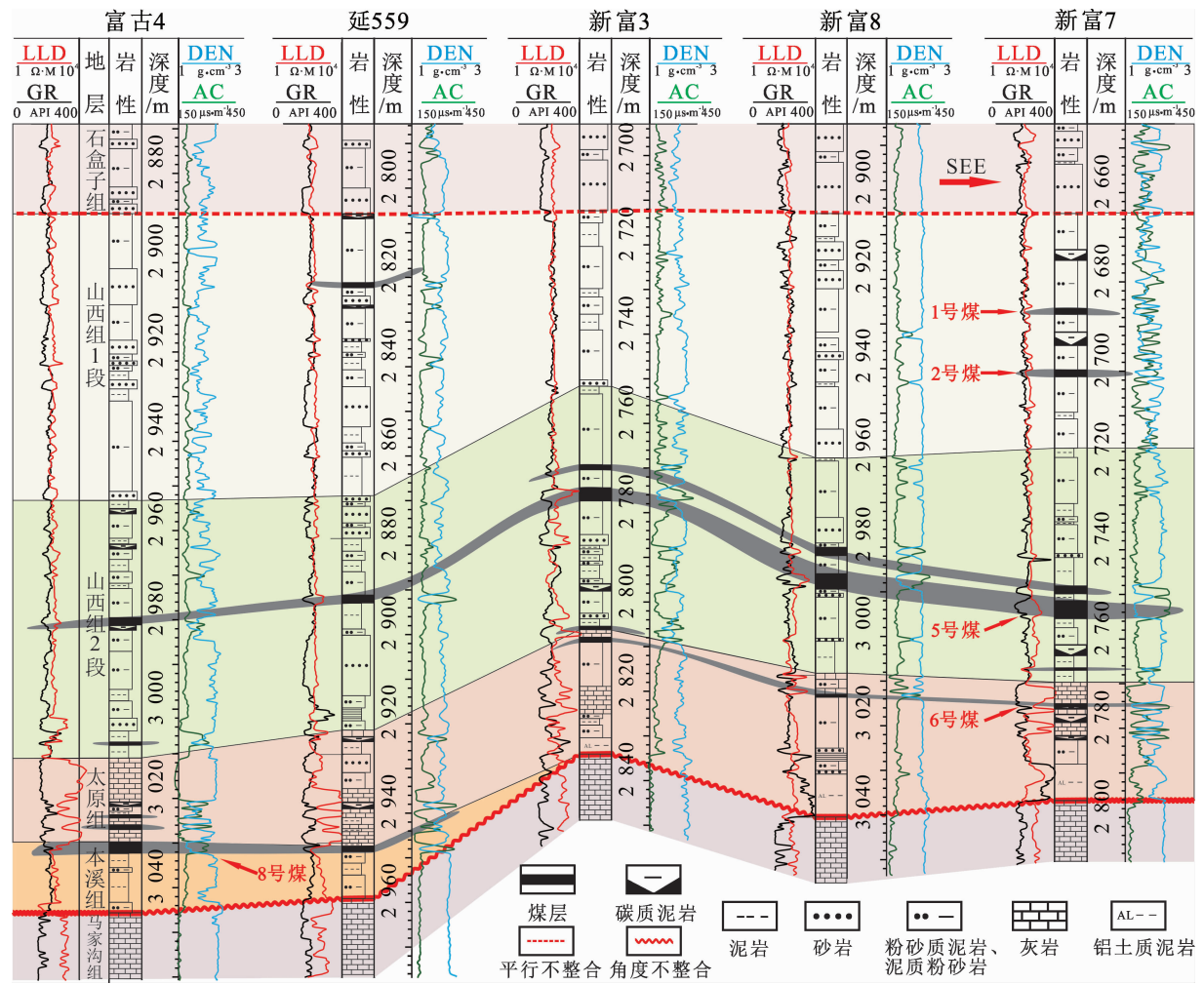


图 2 工区南部钻井剖面图

Fig.2 Profile of wells in the north of the study area

1 煤层的识别方法

煤层在测井曲线上容易识别。根据取心、岩屑录井和测井综合柱状图,统计研究区目的层不同岩性与测井的响应关系,制作山西组和本溪-太原组不同岩性的声波时差值 AC 与自然伽马 GR 交会图[见图 3(a)],密度和电阻率交会图[见图 3(b)]。从交会图上可以看出,碳质泥岩和煤层的 AC 值范围为 280~420 $\mu\text{s}/\text{m}$,二者自然伽马 GR 值差异显著。当 $\text{AC} > 280 \mu\text{s}/\text{m}$, $\text{GR} < 90 \text{ API}$ 时为煤层,GR 介于 90~120API 时为碳质泥

岩。若 GR 值 $> 110 \text{ API}$, $\text{AC} < 248 \mu\text{s}/\text{m}$ 则属于速度相对偏高的含粉砂或含钙质泥岩。

研究区煤层的密度测井和深感应电阻率测井响应与其他岩性也有较明显的差异。研究区煤层的密度一般小于 $2.0 \text{ g}/\text{cm}^3$,电阻率介于 $10 \sim 2\,000 \Omega/\text{m}$ [见图 3(b)]。由于富含有机质,煤层一般具有低波阻抗特征。根据煤层的声波时差 $280 \mu\text{s}/\text{m}$ 和密度值 $2 \text{ g}/\text{cm}^3$ 识别界线,可以计算出研究区上古生界煤层的波阻抗上限为 $7\,143 (\text{m}/\text{s}) \cdot (\text{g}/\text{cm}^3)$,据此可在无岩心段根据测井定量统计煤层。需要注意的是,当煤层厚度小于 0.5 m 时,测井响应特征包含了薄煤层上下围岩岩性的贡献,使煤层测井异常与上下围岩岩性之

间的界线变得模糊,因此测井识别薄煤层的能力有限^[17-18]。根据以上不同岩性测井识别阈值,可

用 Eexplorer 软件统计出研究区不同层位煤层、碳质泥岩和其他各种岩性的厚度。

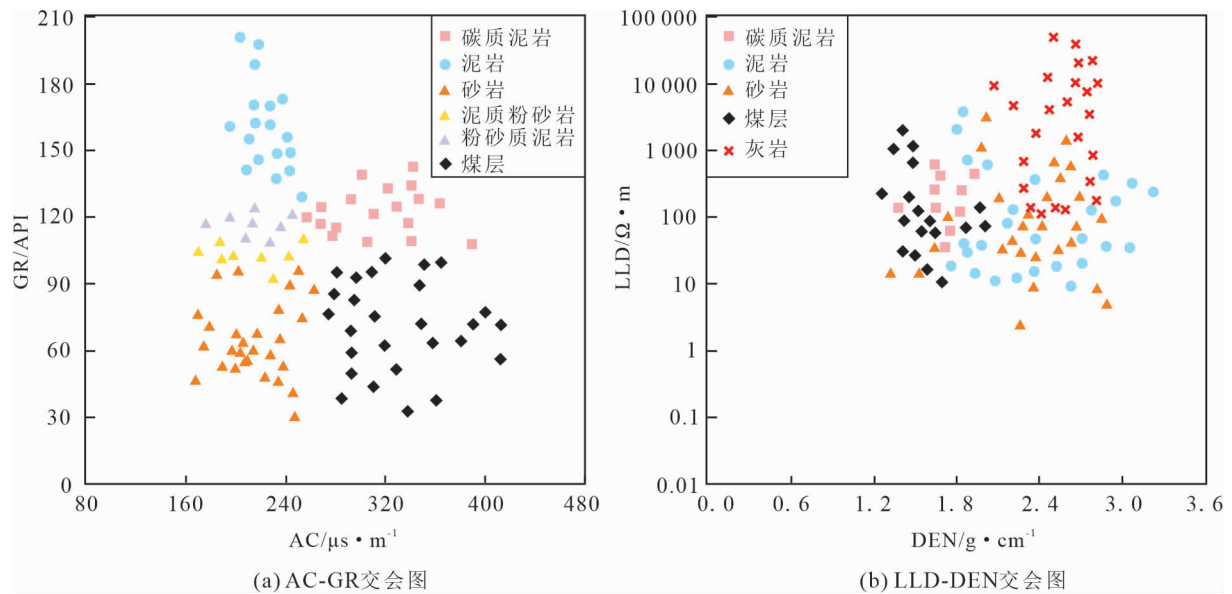


图 3 山西组-太原组测井交会图

Fig. 3 Crossplot of different lithology of Taiyuan to Shanxi Formation

截止 2022 年,中石化在鄂东南地区主要完成了 4 km × 4 km 测网密度的二维地震勘探,并在旬宜地区完成了约 300 km² 的三维地震。由于三维地震具有很高的横向分辨率,可以获得每 25 m 变化的岩性和岩相信息,可表征煤层和砂体的平面形态、面积等直观信息,所以,本研究关于地震资料上煤层的识别,重点解剖了旬宜三维地震。从三维区所钻的旬宜 1 井、旬宜 2 井及建 1 井合成地震记录可以看出,山西组-太原组的煤系大致标定在一套上峰下谷、极强振幅半周期反射中,太原组顶底面分别在极强振幅的波谷和波峰上。这种上谷下峰、极强振幅的形成是由于极低速的煤层与极高速的太原组灰岩和奥陶系灰岩之间存在的大波阻抗差异及干涉所造成,而奥陶系灰岩的顶面距上煤层顶面的厚度 50 ~ 80 m (见图 2),大致对应地震半个周期。所以,煤层地震反射是一个连续性极好的半周期强振幅标志层,可在盆地大区域内进行对比和追踪 (见图 4)。

通过一维正演分析,发现煤层厚度与振幅呈正比关系,煤层厚度越大,振幅越强,煤层厚度变薄或者尖灭,则振幅相对减弱。太原组灰岩和砂岩厚度与地震振幅也呈正相关关系,砂岩或灰岩越厚,振幅也越强。但是,从波阻抗角度来看,煤层对强振幅的贡献为低波阻抗引起,砂岩和灰岩对强振幅的贡献是由高波阻抗所引起,通过波阻

抗反演可以将这两类岩性区分开。

图 5 为三维区煤层地震岩性和厚度图。图 5 显示,较强振幅的区域呈“V”型从南向北分叉延伸,对应于煤层和砂岩相对较厚的区域。通过测井约束的三维地震波阻抗和孔隙度反演,可以识别太原组的低波阻抗煤层和高孔隙砂岩的平面分布。根据图 4 计算的煤层波阻抗为 7 143 (m/s) · (g/cm³),提取太原组波阻抗小于这一阈值的时间厚度,经时深转换即可得到太原组煤层厚度 [见图 5(b)]。同理,太原组砂岩有效孔隙度 6% ~ 11%,提取太原组反演孔隙度大于 6% 的时间厚度则可得砂岩储层厚度 [见图 5(c)]。

将三维区太原组煤层厚度和砂岩含量等值线叠合,可以做出本溪-太原组沉积相平面图 [见图 5(d)]。图 5(d)表明,三维区整体以泻湖沼泽沉积为主,砂岩质量分数较低,小于 5%。“V”字型强振幅区的煤层稍厚,一般 5 ~ 8 m,其以北的弱振幅区煤层减薄为 2 ~ 3 m。

2 煤层分布特征

从钻井山西-太原组剖面对比图可以看出 (见图 2),山西组上段仅偶含 1 ~ 2 层薄煤,平均厚度约 1 m,横向分布极不稳定。山西组下段发育 3#、4#、5#煤层,其中 5#煤层横向分布最稳定,

单煤层最大的延伸距离可达 31.7 km, 平均厚度约 2 m, 3#、4#煤层在本区几乎不发育。本溪-太原组 8#煤层较 6#、7#、9#、10#煤层平面分布广泛, 横向延伸较远, 厚度平均大于 2 m, 是该区的主力煤层之一。

在钻井统计的煤层层数及厚度基础上, 利用双狐软件绘制了山西组、本溪-太原组煤层厚度图(见图 6, 7)。由图 6, 7 可知, 本溪-太原组累积煤层最厚 7 m(见图 6), 南厚北薄, 主要在旬邑、富

县和黄龙之间形成 5 个单层厚度超过 2 m、累计厚度超过 6 m 的聚煤卵圆形小凹陷, 每个凹陷的面积 200 ~ 300 km², 凹陷较孤立, 沿一个直角三角形形的两个直角边排列。单层煤厚大于 2 m 的区域面积约 2 610 km², 分布在研究区东部和西南部 9 个部位, 其中 5 个部位与累计煤厚较大区域重合, 4 个则位于累厚煤较薄区。本溪-太原组煤层整体西北薄、东南厚。

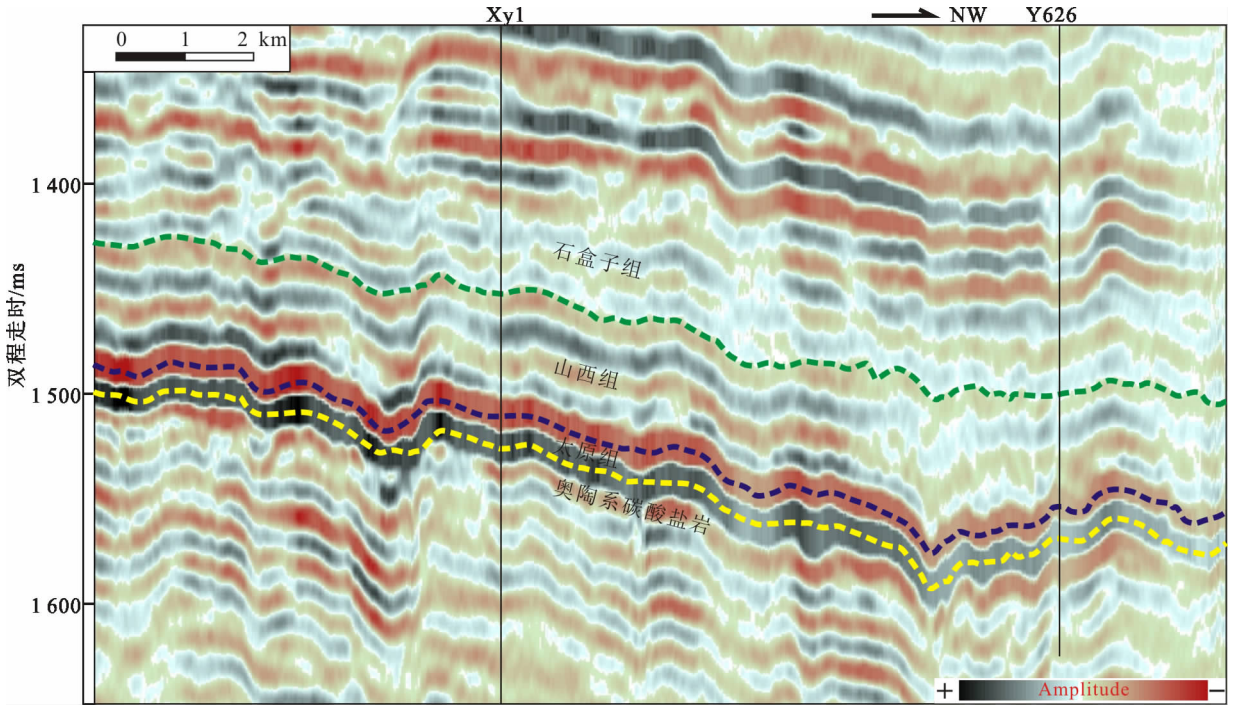


图 4 过旬宜 1 井和延 626 井地震剖面

Fig. 4 Seismic section across wells XY1 and Y626 in NW direction

山西组煤层在研究区广泛分布, 累积厚度最大 8 m, 3 m 以上的区域在平面上大致呈北东凸出的半圆弧展布, 具东厚西薄特征(见图 7)。单层煤厚大于 2 m 的区域分布在 9 个位置, 与累厚较大区分布基本一致, 总面积约 2 460 km²。西部煤层最大累计厚度小于 4 m。聚煤凹陷略呈北东和北西延伸的花生形, 单个凹陷面积比太原组变大, 300 ~ 500 km², 鄂东南地区共约 10 个山西组的小型聚煤凹陷, 煤层最厚的两个凹陷位于富县至黄龙西附近。

比较本溪-太原组和山西组的煤层厚度图可以看出, 由于对奥陶系顶面不整合填平补齐, 山西组的单个聚煤小凹陷的面积稍大于太原组, 凹陷形态从近卵圆形朝椭圆形变化(见图 6, 7); 从本溪-太原组到山西组, 较厚煤层向北和北西方向有所迁移, 最大累计厚度, 山西组比本溪-太原组只大了 1 m。

3 煤层分布与古地貌的关系

为了研究不整合面古岩溶地貌对沉积相和煤层发育的控制, 分别制作了研究区前上古生界的古地质图(见图 8)和本溪-太原组厚度图(见图 9)。图 9 也可以大致看成是用“印模法”制作的充填奥陶系顶面岩溶凹地的古地貌图^[19]。

由图 8 可知, 研究区不整合面下伏地层自北东朝南西逐渐变老, 不整合向下剥蚀强度逐渐变大, 整体呈北东倾的岩溶斜坡或阶地^[20]; 在研究区西南形成两个剥蚀量较大的局部古岩溶凹地, 在古岩溶凹地出露的最老地层为上寒武统三山子组, 两个岩溶凹地分别从正宁县朝北北东和北东东延伸了约 30 和 50 km。研究区北东缘出露的最新地层为下奥陶统马家沟组马六段(O₁m6)。

马六段分布在研究区东北角、北缘中间和西缘中间 3 个位置,相当于 3 个不整合对下伏地层剥蚀

量较小的地区,其中,东北向的岩溶凹地局部还残留中奥陶统平凉组。

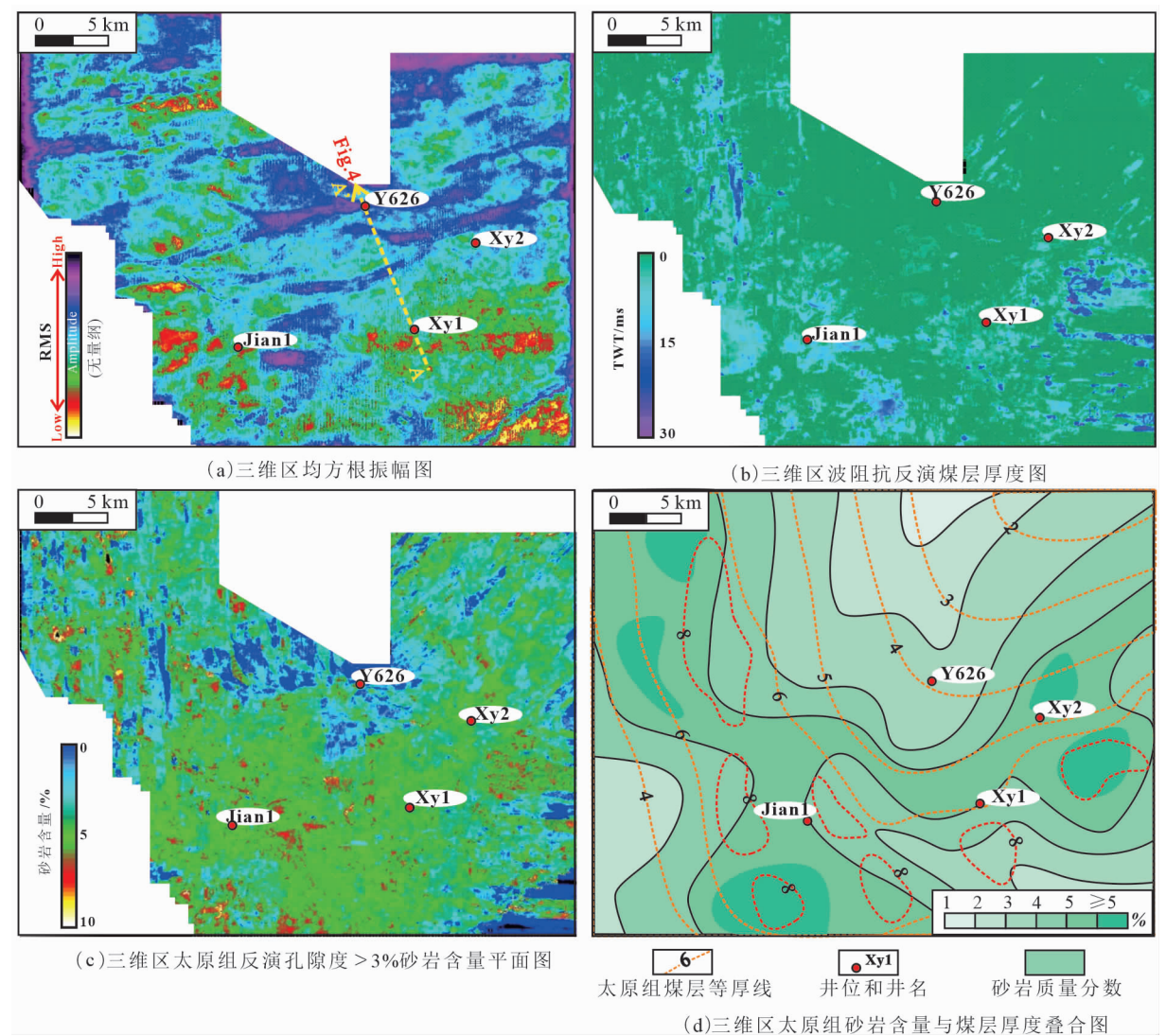


Fig. 5 Seismic attribute map and thickness map of coal seams in three-dimensional area

本溪-太原组厚度图也显示,该期地层沉积时,研究区整体呈东北倾斜坡背景(见图 9),其上叠加了两个岩溶高地和 4 个岩溶凹地。两个岩溶高地位于研究区西南和西北角,东北延伸,本溪-太原组厚度较薄,5 ~ 20 m。4 个形态不规则的岩溶凹地,厚度 40 ~ 60 m,其中两个位于工区东北角和北缘中部,两个分别位于研究区南缘中部和西缘中部,呈东北和北西延伸的椭圆形态。

比较图 8 和图 9 可以看出,研究区存在两种类型的岩溶凹地,它们的共同特点是,本溪-太原组厚度加大,不同点则是分布位置、不整合下切强

度和下伏地层时代不同:一种是下切型古岩溶凹地,位于上游的研究区西南部,奥陶纪沉积未发生了较强烈的侵蚀下切,不整合面下伏较老的地层(寒武系马二段),如研究区西缘中部和南缘中部的两个东北向和近东西向的本溪-太原组加厚带;另一种是充填型古岩溶凹地,其位于下游的研究区东北部,不整合面侵蚀下切较弱,下伏较新地层马六段,如研究区东北角和北缘中部本溪-太原组较厚带(40 ~ 65 m)。

研究区本溪-太原组煤层的加厚带与上游的下切型岩溶凹地位置存在一定的吻合关系,如旬

宜 1 井区的凹地本溪-太原组的煤层较厚(见图 6,9);下游的充填型岩溶凹地煤层也具有增厚趋势(见图 6,8,9)。

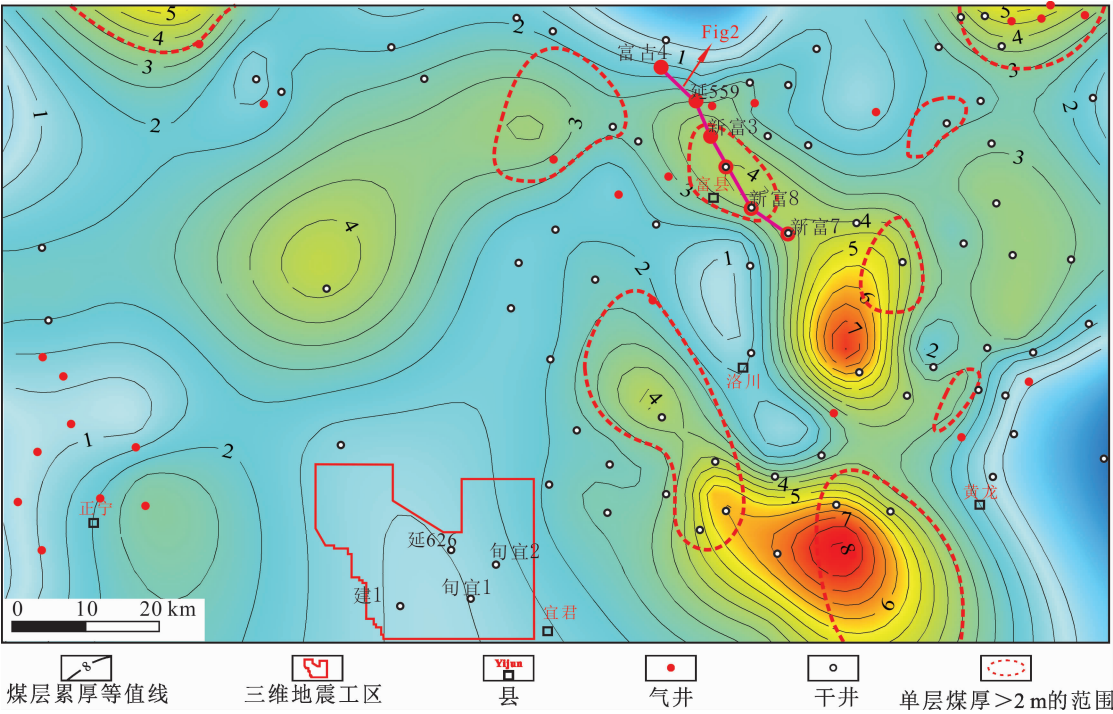


图 6 鄂尔多斯盆地东南部本溪-太原组煤层累厚图

Fig. 6 Coal seam isopach map of Taiyuan Formation and Benxi Formation in the southeast margin of Ordos Basin

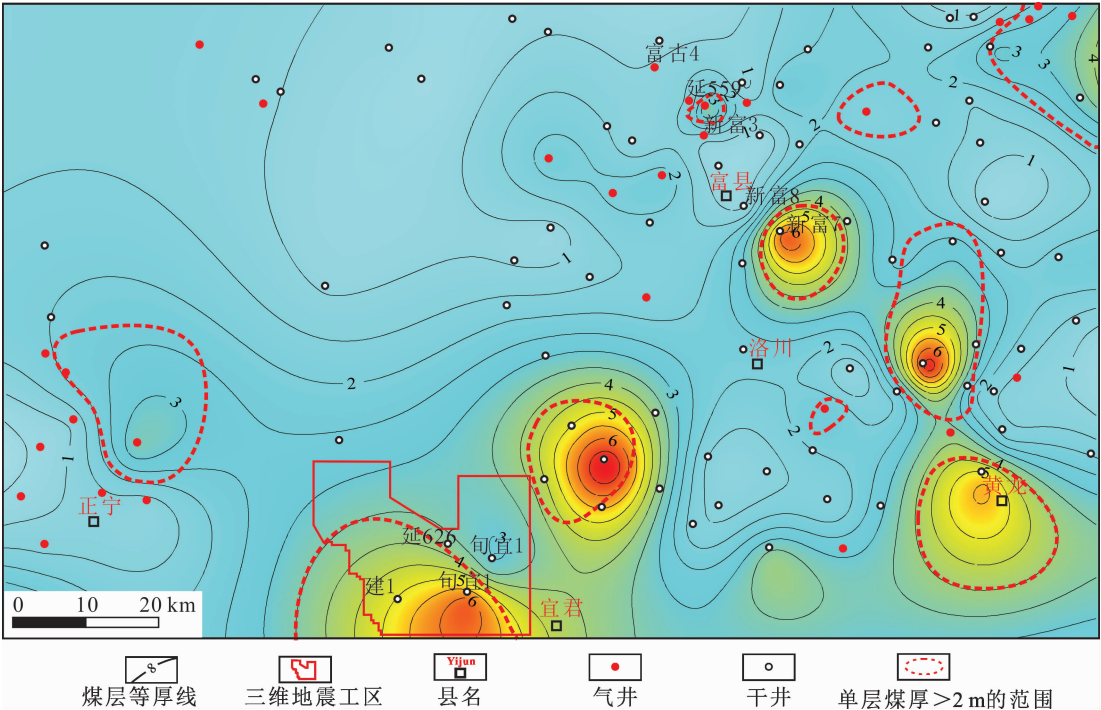


图 7 鄂尔多斯盆地东南部山西组煤层累厚图

Fig. 7 Coal seam isopach map of Shannxi Formation in the southeast margin of Ordos Basin

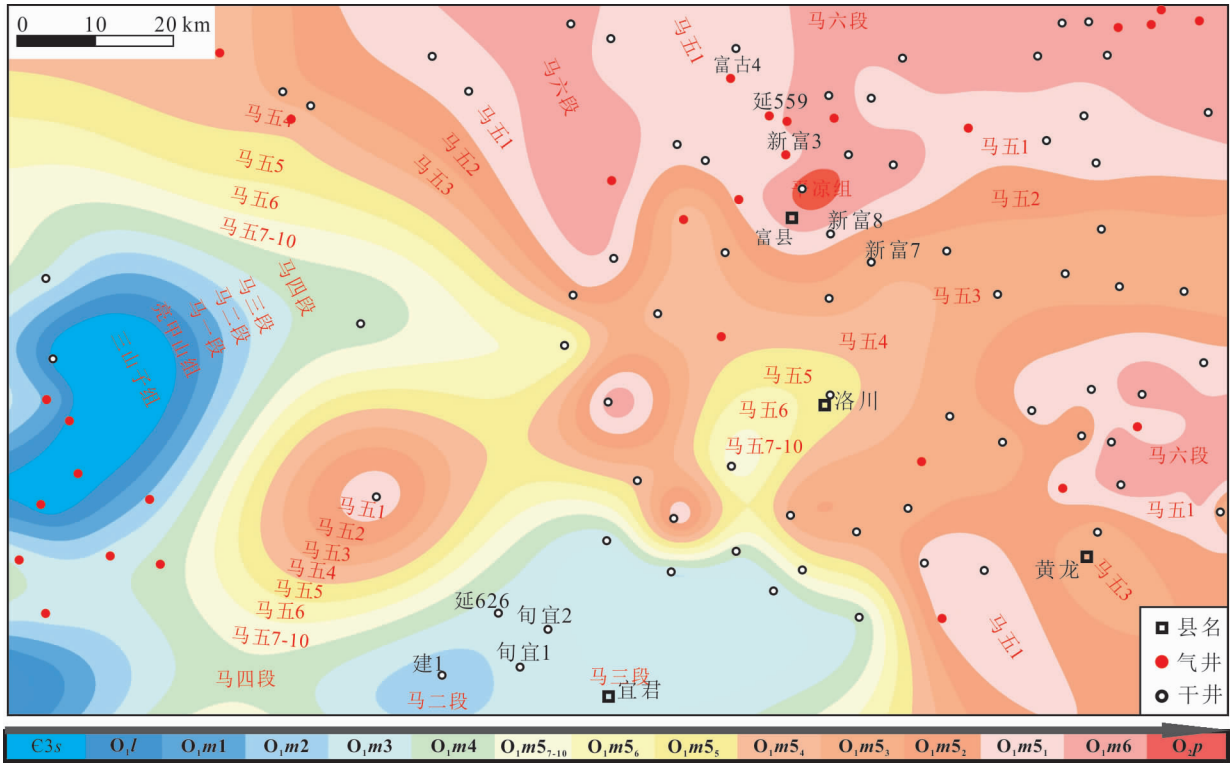


图8 鄂尔多斯盆地东南部前石炭系古地质图

Fig. 8 Pre-Carboniferous palaeogeological map of southeastern Ordos Basin

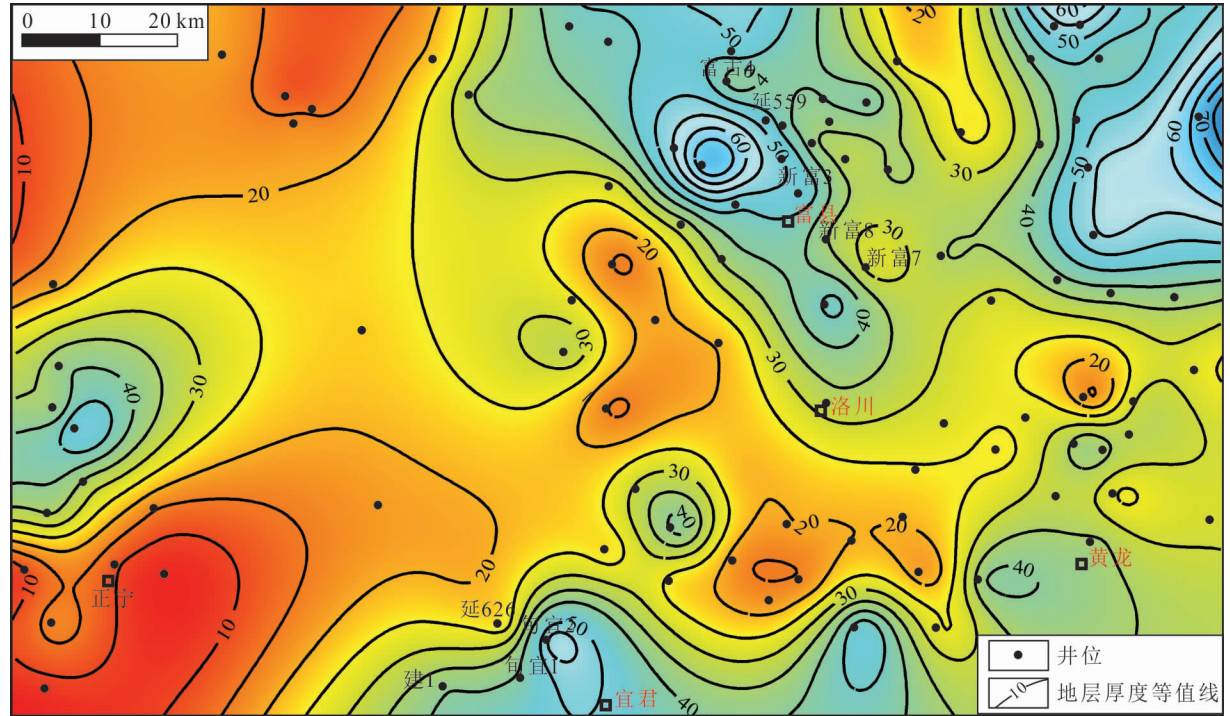


图9 鄂尔多斯盆地东南部本溪-太原组厚度图

Fig. 9 Stratigraphic isopach map of Taiyuan Formation and Benxi Formation in southeast Ordos Basin

太原组上部普遍含1~3层、数米厚的开阔台地泥晶灰岩、生物碎屑灰岩。纵向上其煤层常与灰岩层紧邻,二者沉积时均具有准平原化古地形特点。但是,在平面上它们之间存在什么关系并

不清楚。为了分析二者与古地貌的关系,制作了研究区太原组灰岩厚度图(见图10)。由图10可以看出,灰岩主要分布在研究区东北部,相对远源的岩溶凹地区,属于无三角洲影响的、远源的清水

型沉积。比较太原组的灰岩与煤层厚度图可以看出,煤层和灰岩均在岩溶凹地区加厚,但煤层主要在上、下游岩溶凹地均加厚,而灰岩则主要在远源的清水型非下切型岩溶凹地加厚。

所以,古岩溶凹地对同时代的煤层和灰岩厚度具一定的控制作用。煤层在近源和远源的岩溶凹地均加厚,而灰岩只在远源的凹地加厚。

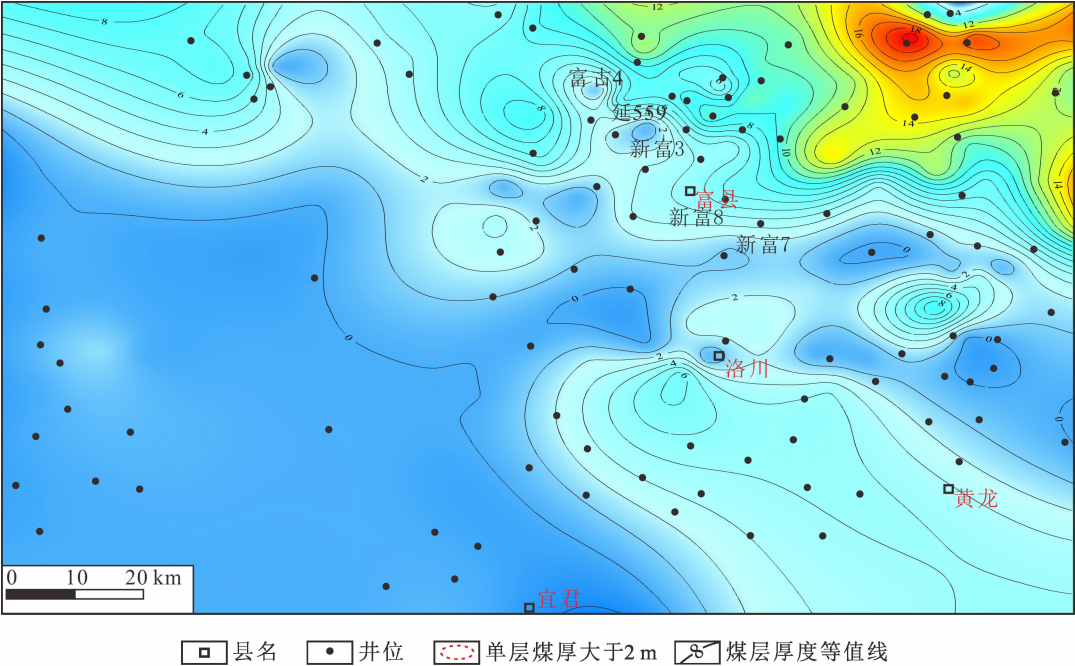


图 10 鄂尔多斯盆地东南部太原组灰岩厚度图

Fig. 10 Limestone isopach map of Taiyuan Formation in southeastern Ordos Basin

与太原组不同的是,山西组沉积时奥陶系岩溶凹地已经被填平,煤层发育不再受古地貌控制,煤层厚度与岩溶古地貌之间没有明显关系(见图 7),完全受河道间沼泽控制。

4 煤层与沉积相的关系

根据本溪-太原组和山西组砂岩含量、测井相和地震属性等绘制了鄂东南地区含煤的本溪-太原组、山西组的沉积相平面图(见图 11,12)。由图 11,12 可以看出,本溪-太原组为浅水三角洲泻湖沼泽沉积,4 个分流河道自南西流向北东,沼泽煤层发育在三角洲平原分流河道之间。碳酸盐岩分布在三角洲前方的远源清水泻湖环境。

山西组下段为交织型河道沉积,多支河道同时发育,相互合并分叉,砂厚体积分数大于 20%。河道边部砂岩质量分数 20% ~ 10%。泥炭沼泽和漫滩区砂岩质量分数小于 10 % (见图 12),碎屑物质来自南部隆起。厚煤层与河道带的平面分布具互补关系,即砂岩含量高的地区,煤层薄,砂岩含量少的地区煤层厚。

5 讨论

5.1 煤层对气藏的控制

煤层是鄂尔多斯盆地上古生界气藏重要的烃源岩^[21-22],但盆地南部的上古生界气藏的发育条件总体不如中北部^[23]。除南部砂岩储层分布局限和物性差外(如陇东地区仅发现了山一段薄砂岩气藏和铝土岩气层^[24-25],鄂东南地区也只有岩溶凹槽内寒武系发现天然气),煤层厚度总体不大也是重要原因之一。根据山西组、本溪-太原组煤层累计厚度图与产气井的关系来看,盆地东南部出现工业气井的煤层累厚最小为 2 m (见图 13),累厚超过 2 m 的煤层分布较广,累厚 4 ~ 8 m 的煤层面积占总面积约 40%,加厚带呈“U”字型展布。累厚 2 ~ 4 m 的煤层面积约占总面积的 40%,小于 2 m 的煤层面积约占总面积的 20%,所以,从生烃条件来看,鄂东南地区总体仍具有较好的天然气成藏的煤源岩条件。

5.2 关于单层厚度大于 2 m 的煤层分布

尽管煤层无论单层厚度大小,对烃源的贡献

取决于累计厚度的大小,但单层厚度大于 2 m 的煤层意义更为特殊,在技术条件成熟时可成为开采煤层气和煤资源的对象。所以,本研究对单层厚度大于 2 m 的煤层进行了单独统计。

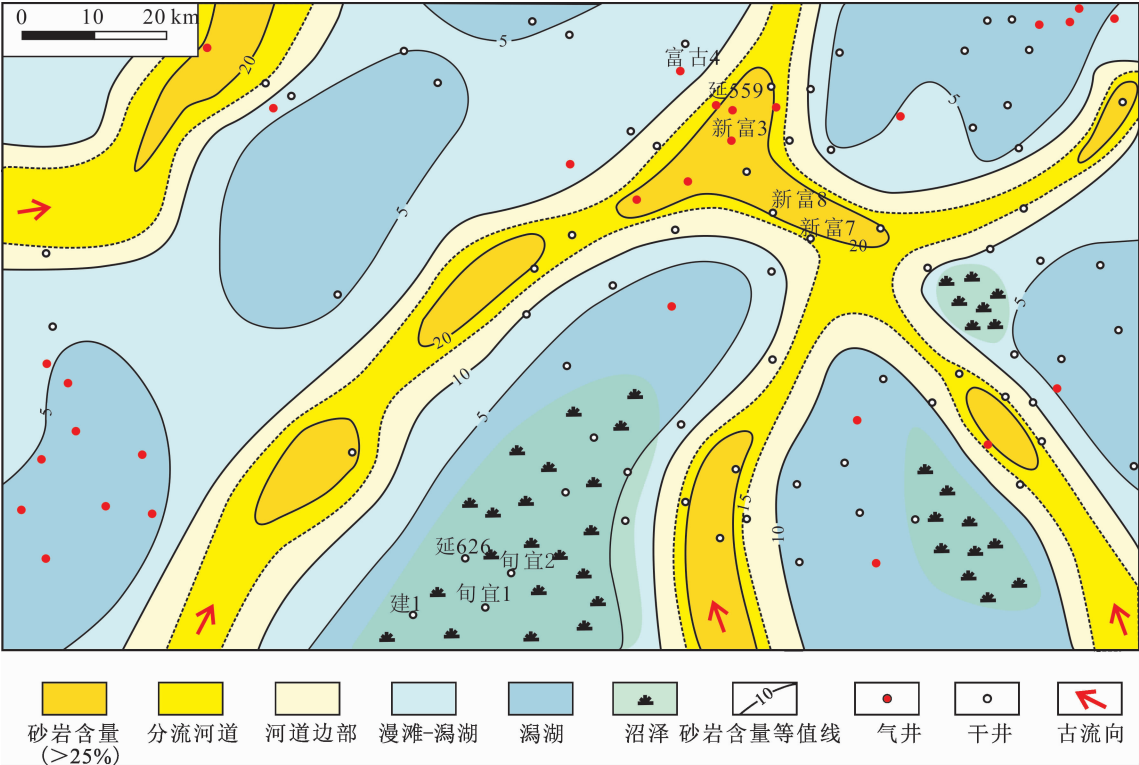


图 11 鄂尔多斯盆地东南部本溪-太原组沉积相平面图

Fig. 11 Sedimentary facies map of Benxi Formation and Taiyuan Formation in southeastern Ordos Basin

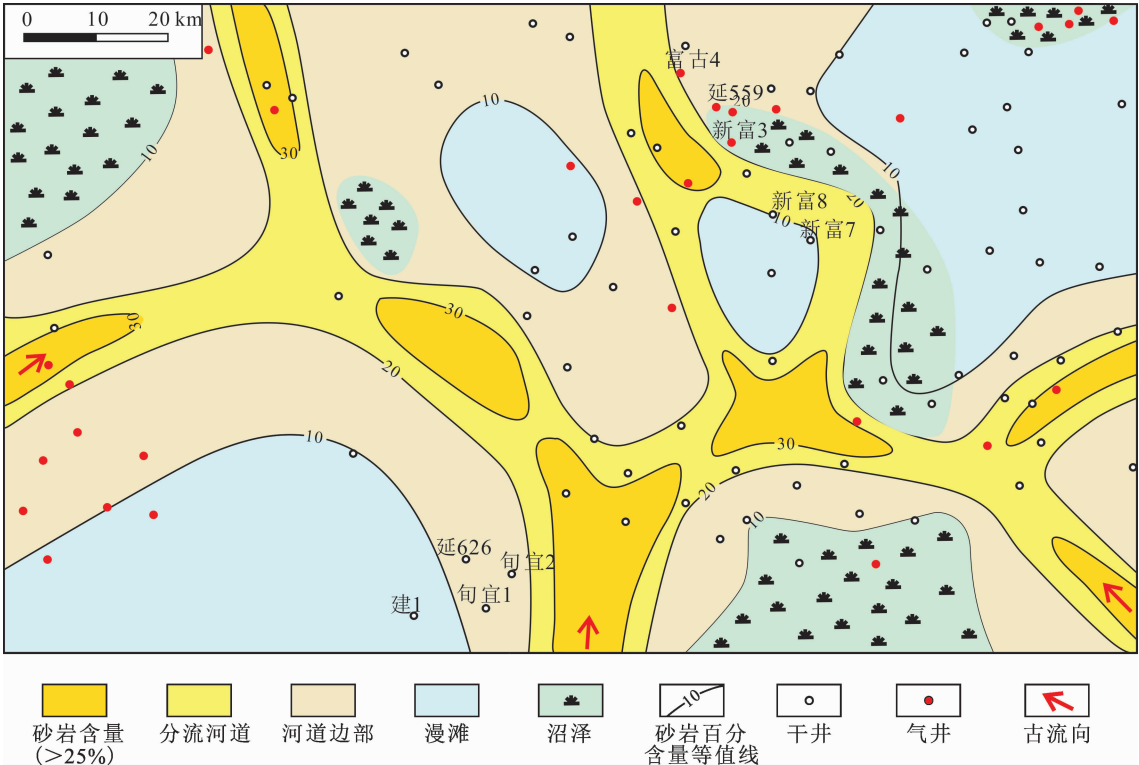


图 12 鄂尔多斯盆地东南部山西组下段沉积相平面

Fig. 12 Sedimentary facies diagram of Shanxi Formation in southeastern Ordos Basin

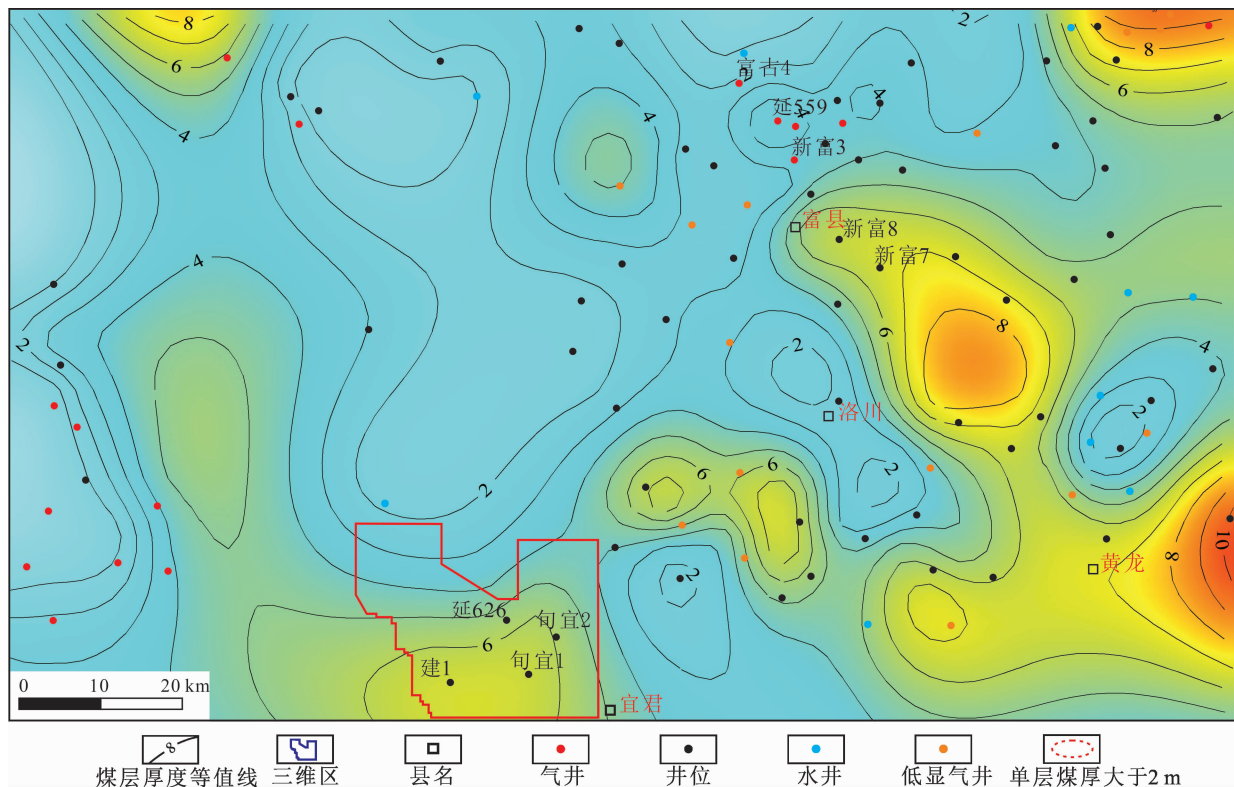


图13 鄂东南地区本溪-山西组煤层累计厚度图

Fig. 13 Total isopach map of coal seams of from Benxi-Shanxi in the southeast of Ordos Basin

首先,研究区本溪-太原组和山西组均发育单层厚度大于2 m的煤层,且均在9个区域发育;这9个区域互不重叠,其中8个均位于鄂东南的旬邑县以东的东部地区,西部只有一个区域。单层厚度大于2 m的煤层单个面积100~300 km²,山西组和本溪-太原组的面积无明显差异。

其次,从最大单层厚度来看,本溪-太原组的最大单煤层厚度为5.5 m(延730井),山西组的则为5.2 m(延561井)。

再次,从大于2 m的单煤层分布的面积大小来看,山西组的最大面积为402 km²,太原-本溪组的最大面积326 km²,前者略大于后者。

最后,从鄂东南地区单层厚度大于2 m的煤层总分布面积占总区域面积的比例来看,山西组和本溪-太原组差异不大,前者约13%,后者约15%。

总体上讲,单层厚度大于2 m的煤层在鄂东南地区占有相当的比例。

5.3 关于海相煤与陆相煤的识别问题

鄂尔多斯盆地本溪-太原组以海相沉积为主,山西组以陆相沉积为主,二者总体上为海陆过渡相,所以,夹在这两套地层中的煤虽然均为沼泽环境沉积,但也存在海岸沉积和湖泊沼泽沉积的区

分。从露头上观察,二者的颜色和所含特殊矿物成分也有所差异。本溪-太原组的煤含一定数量的黄铁矿,露头上风化为硫磺,在黑色煤层中表现为显眼的零散的黄褐色斑块或斑点。但山西组的煤一般不含黄铁矿和硫磺,不具备这一特征。

在井下,虽然山西组和本溪-太原组的煤层未经过风化,但含铁元素差异导致了电阻率测井值的明显不同。本溪-太原组的煤层含铁元素高,电阻率一般10~100 Ω/m;山西组煤含铁元素低,或不含铁,电阻率明显高出近一个数量级,达100~1 000 Ω/m(见图2,3)。所以,井下依据电阻率差异可以区分海相和陆相环境有关的煤层。

6 结论

1) 鄂尔多斯盆地东南部上古生界发育两套煤层,分别位于本溪-太原组和山西组下段,本溪-太原组煤层厚0.5~7 m,平均厚度约3 m,山西组纯煤总厚度0.7~8.2 m,平均厚度约2.73 m。上古生界煤层累厚4~8 m的地区呈“U”字形分布,约占总面积的40%。

2) 研究区上古生界煤层的声波时差AC值小于280~420 μs/m,密度小于2 g/cm³,自然伽马

GR < 90 API。在地震剖面上具有强振幅和低反演波阻抗特征,根据测井和三维地震反演可以识别研究区煤层厚度和含量变化。

3) 鄂尔多斯盆地东南部存在两种类型的古岩溶凹地,一种为研究区西南的近源下切型古岩溶凹地,另一类是研究区北东远源的充填型岩溶凹地,本溪-太原组煤层在两类洼地内均加厚,但山西组下段煤层厚度变化与该岩溶古地貌无明显相关性。太原组沉积了与煤层同时代或近时代的一定厚度的灰岩,虽然灰岩与煤层的沉积环境均具有准平原化的平坦古地貌特点,但灰岩只在下源远源的充填型古岩溶洼地加厚,而在上游近源的下切型岩溶凹地没有增厚。上古生界煤层均分布在三角洲平原沼泽环境,煤层和分流河道砂岩的加厚带呈互补关系。

参考文献

- [1] 邹才能,杨智,黄土鹏,等. 煤系天然气的资源类型、形成分布与发展前景[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3): 433-442.
ZOU C N, YANG Z, HUANG S P, et al. Resource types, formation, distribution and prospects of coal-measure gas [J]. Oil Exploration and Development, 2019, 46(3): 433-442.
- [2] 晋香兰,张泓. 鄂尔多斯盆地侏罗系成煤系统[J]. 煤炭学报, 2014, 39(增刊): 191-197.
JIN X L, ZHANG H. Jurassic coal system in the Ordos Basin [J]. Journal of Coal, 2014, 39(S1): 191-197.
- [3] 王双明. 鄂尔多斯盆地构造演化和构造控煤作用[J]. 地质通报, 2011, 30(4): 544-552.
WANG S M. Ordos Basin tectonic evolution and structural control of coal[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(4): 544-552.
- [4] 曹代勇,秦国红,张岩,等. 含煤岩系矿产资源类型划分及组合关系探讨[J]. 煤炭学报, 2016, 41(9): 2150-2155.
CAO D Y, QIN G H, ZHANG Y, et al. Classification and combination relationship of mineral resources in coal measures [J]. Journal of Coal, 2016, 41(9): 2150-2155.
- [5] 李增学,余继峰,李江涛,等. 鄂尔多斯盆地多种能源共存富集的组合形式及上古生界沉积控制机制分析[J]. 地球学报, 2007, 28(1): 32-38.
LI Z X, YU J F, LI J T, et al. Combination types of coexistent multiple energy resources in the Ordos Basin and an analysis of the Upper Paleozoic sedimentation control mechanism[J]. Journal of the Earth, 2007, 28(1): 32-38.
- [6] 胡维强,赵靖舟,李军,等. 鄂尔多斯盆地西南部上古生界烃源岩特征及其对天然气藏形成与分布的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(6): 1068-1075.
HU W Q, ZHAO J Z, LI J, et al. Characteristics of source rocks and its control on the formation and distribution of gas from Upper Paleozoic in Southwest Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(6): 1068-1075.
- [7] 毛得雷,康永尚,韩军,等. 韩城煤层气田水文地质旋回对煤层气的影响[J]. 煤炭学报, 2012, 37(增刊): 390-394.
MAO D L, KANG Y S, HAN J, et al. Influence of hydrogeological cycles on CBM in Hancheng CBM field, Central China [J]. Journal of Coal, 2012, 37(S2): 390-394.
- [8] 卢双舫,马延伶,曹瑞成,等. 优质烃源岩评价标准及其应用:以海拉尔盆地乌尔逊凹陷为例[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2012, 37(3): 535-544.
LU S F, MA Y L, CAO R C, et al. Evaluation criteria of high-quality source and its application: Taking the Wuerxun Sag in Hailaer Basin as an example[J]. Earth Science (Journal of China University of Geoscience), 2012, 37(3): 535-544.
- [9] 李友川,邓运华,张功成. 中国近海天然气富集带及气源岩形成的主要控制因素[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(9): 1309-1319.
LI Y C, DENG Y H, ZHANG G C. Gas-rich zone and main controlling factors of gas source rock in offshore China [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(9): 1309-1319.
- [10] 伊伟,熊先钺,庞斌,等. 鄂尔多斯盆地东南缘上古生界煤储层非均质性及其意义[J]. 高校地质学报, 2016, 22(2): 378-384.
YI W, XIONG X Y, PANG B, et al. Heterogeneity and significance of coal reservoir of Upper Paleozoic in southeast margin of Ordos Basin [J]. Journal of Geology of Colleges and Universities, 2016, 22(2): 378-384.
- [11] 许婷,李宁,姚征,等. 陕北榆神矿区富油煤分布规律及形成控制因素[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(3): 161-168.
XU T, LI N, YAO Z, et al. Distribution and geological controls of tar-rich coals in Yushen Mining Area of Northern Shaanxi [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(3): 161-168.

- [12] 姚泾利, 王兰萍, 张庆, 等. 鄂尔多斯盆地南部奥陶系古岩溶发育控制因素及展布[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(1): 56-65.
YAO J L, WANG L P, ZHANG Q, et al. Controlling factors and distribution of Paleo-karst development or-dovician of southern Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(1): 56-65.
- [13] 刘景平, 谢仕英, 柳克琪, 等. 鄂尔多斯盆地的演化叠加与含油气性: 中国大陆板块内部一个大型盆地原型分析[J]. 石油与天然气地质, 1986(4): 356-367.
LIU J P, XIE S Y, LIU K Q, et al. Evolution stacking and hydrocarbon potential of the Ordos Basin: Proto-typel analysis of a huge basin in Chinese continental plate[J]. Oil and Gas Geology, 1986(4): 356-367.
- [14] LIU C, ZHAO H, SUN Y. Tectonic background of Or-dos Basin and its controlling role for basin evolution and energy mineral deposits[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2009, 27(1): 15-27.
- [15] WEI G Q, ZHU Q, YANG W, et al. Cambrian faults and their control on the sedimentation and reservoirs in the Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Explora-tion and Development, 2019, 46(5): 38-50.
- [16] LI Y, YANG J, PAN Z, et al. Unconventional natural gas accumulations in stacked deposits: A discussion of Upper Paleozoic coal-bearing strata in the east margin of the Ordos Basin, China[J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 2019, 93(1): 111-129.
- [17] ROSLIN A, ESTERLE J S. Electrofacies analysis us-ing high-resolution wireline geophysical data as a proxy for inertinite-rich coal distribution in Late Permi-an Coal Seams, Bowen Basin[J]. International Jour-nal of Coal Geology, 2015, 152: 10-18.
- [18] KNIGHT J L, SHEVLIN B J, EDGAR D C, et al. Coal thickness distributions on the UK continental shelf [J]. Geological Society, 1996, 109(1): 43-57.
- [19] JIANG Z, XU J, WANG G. The discovery and signifi-cance of a sedimentary hiatus within the Carboniferous Taiyuan Formation, northeastern Ordos Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(7): 1173-1195.
- [20] 夏明军, 戴金星, 邹才能, 等. 鄂尔多斯盆地南部加里东期岩溶古地貌与天然气成藏条件分析[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(3): 291-300.
XIA M J, DAI J X, ZOU C N, et al. Caledonian karst palaeogeomorphology and the forming condition of gas pool southern Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(3): 291-300.
- [21] 杨华, 付金华, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界致密气成藏条件与勘探开发[J]. 石油勘探与开-发, 2012, 39(3): 295-303.
YANG H, FU J H, LIU X S, et al. Accumulation conditions and exploration and development of tight gas in the Upper Paleozoic Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 295-303.
- [22] 聂万才, 白玉奇, 冯敏, 等. 鄂尔多斯盆地东南部气田上古生界致密砂岩气藏气源对比[J]. 沉积与特提斯地质, 2021, 41(1): 82-87.
NIE W C, BAI Y Q, FENG M, et al. Sources of tight sandstone gas and its migration in the Upper Paleozoic, Yan'an Gasfield[J]. Sedimentary and Tethyan Geol-ogy, 2021, 41(1): 82-87.
- [23] 刘鹏, 王伟锋, 孟蕾, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界煤层气与致密气联合优选区评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(3): 692-701.
LIU P, WANG W F, MENG L, et al. Joint optimiza-tion of coal-bed methane and tight gas in the Upper Pa-leozoic of the Ordos Basin[J]. Journal of Jilin Univer-sity(Earth Science Edition), 2016, 46(3): 692-701.
- [24] 蒙晓灵, 兰义飞, 张宏波, 等. 鄂尔多斯盆地南部深层致密砂岩气藏成藏特点及产能主控因素[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2020, 35(5): 9-13.
MENG X L, LAN Y F, ZHANG H B, et al. Hydro-carbon accumulation characteristics and main produc-tivity control factors of deep tight sandstone in the south of Ordos Basin [J]. Journal of Xi'an Petroleum University(Natural Science Edition), 2020, 35(5): 9-13.
- [25] 付金华, 李明瑞, 张雷, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区铝土岩天然气勘探突破与油气地质意义探索[J]. 天然气工业, 2021, 41(11): 1-11.
FU J H, LI M R, ZHANG L, et al. Breakthrough in the exploration of bauxite gas reservoir in Longdong ar-ea of the Ordos Basin and its petroleum geological im-plications[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(11): 1-11.

(编辑 雷雁林)