

基于地震沉积学的含煤岩系沉积相及其演化分析

曹路通¹, 常锁亮^{1,2}, 刘东娜^{1,2}, 陈 强^{1,2}, 潘永学³, 刘 晶¹

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 煤与煤系气地质山西省重点实验室, 山西 太原 030024;

3. 山西山地物探技术有限公司, 山西 晋中 030600)

摘 要:为了探究含煤岩系聚煤前后沉积相及其演化特征,运用地震沉积学解释技术,通过基于最小等时单元地层切片的地震属性优选法及单井层序地层的岩性与微相划分标定法,建立了敏感属性与岩性、沉积相的对应关系,对沁水盆地中裕地区山西组2号煤层聚煤前后沉积相及其演化进行了研究。研究结果表明:中期旋回作为该区的最小等时研究单元,以短期旋回作为控制进行切片可以研究四-五级序界面内的沉积现象;均方根振幅属性可以作为沉积相平面展布特征预测的敏感属性;山西组2号煤层聚煤前为下三角洲沉积环境,聚煤后为上三角洲沉积环境,并识别出了分流河道、天然堤、泛滥盆地和泥炭沼泽等沉积微相及其空间分布。

关键词:地震沉积学;含煤岩系;最小等时单元;地层切片;沉积相

中图分类号:P641.461

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2017)06-0176-07

Analysis on sedimentary facies and its evolution based on seismic sedimentology

Cao Lutong¹, Chang Suoliang^{1,2}, Liu Dongna^{1,2}, Chen Qiang^{1,2}, Pan Yongxue³, Liu Jing¹

(1. Institute of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Coal and

Coal Measure Gas Geology, Taiyuan 030024, China; 3. Shanxi Shandi Geophysical Prospecting Technology Co., Ltd., Jinzhong 030600, China)

Abstract: In order to explore the sedimentary facies and its evolutionary characteristics of coal-bearing formation before and after coal accumulation, the seismic attribute optimization based on the minimum isochronal stratigraphic and the lithology and microfacies division of single well sequence stratigraphy were carried out by using seismic sedimentology interpretation technique, and the relationship between the sensitive attribute and the lithology and sedimentary facies was established. These methods and techniques were applied to the study on the sedimentary facies before and after No.2 coal seam accumulation in Shanxi Formation of Zhongyu area in Qinshui Basin. The study results showed that the medium cycle as the minimum isochronal strata unit in this region, and the short-cycle can be used as a control to study the deposition phenomenon in the four-fifth order interface. The root mean square amplitude attribute can be used as a sensitive attribute for predicting the sedimentary facies distribution characteristics. The sedimentary environment before accumulation of the No.2 coal seam in Shanxi Formation was the lower delta sedimentary environment, and after accumulation of the No.2 coal seam in Shanxi Formation was the upper delta sedimentary environment. The sedimentary microfacies and their spatial distribution of the diversion channel, natural embankment, flood basin and peat swamp were identified.

Key words: seismic sedimentology; coal-bearing rock series; minimum isochronous unit; strata slicing; sedimentary facies

0 引 言

聚煤盆地范围内的大型充填样式—含煤沉积体系是由一系列具有成因联系的沉积相构成,这些沉积相的发育特征和时空组合形式示踪了盆地形成与

沉积过程中的海陆变迁、构造转换及其与周边环境相互作用的历史过程,成为研究聚煤盆地成因机制和演化历史的核心内容^[1-3]。通过对沉积相的研究在了解区域古地理和盆地发展史的基础上还可探索油气形成的条件和分布规律,明确储层物性及其砂

收稿日期:2016-12-28;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.est.2017.06.029

基金项目:山西省煤基重点科技攻关资助项目(MQ2014-01)

作者简介:曹路通(1990—),男,河南平顶山人,硕士研究生。通讯作者:常锁亮,博士,研究员, Tel:15735161293, E-mail: lt.cao@sxswt.com.cn

引用格式:曹路通,常锁亮,刘东娜,等.基于地震沉积学的含煤岩系沉积相及其演化分析[J].煤炭科学技术,2017,45(6):176-182,213.

Cao Lutong, Chang Suoliang, Liu Dongna, et al. Analysis on sedimentary facies and its evolution based on seismic sedimentology[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(6): 176-182, 213.

体空间展布^[4]。晚古生代沁水盆地,其陆表海的古地理背景下,地形平缓,广阔的滨岸平原,构造活动非常微弱,沉积环境成为影响聚煤特征的主导因素。而聚煤期沉积环境又影响着煤层乃至煤层形成前后岩性及其孔渗特征的变化^[5],因此针对含煤岩系沉积相研究具有重要意义。传统的沉积相分析方法主要根据地质沉积和测井曲线特征,逐井逐段识别和划分,分析过程中研究人员的工作经验占很重要的部分,这种沉积相分析方法速度慢,效率低,且基于单井划分的沉积相带在空间分辨率上来说尚难以满足煤炭及煤层气勘探开发的需求^[6-8]。随后在沉积相的预测中引入了地震资料,利用其较高的横向分辨率,结合钻、测井资料使得预测效果有了明显的提升,但在钻井资料较少地区,沉积相分析主要靠手工解释地震相,进而转化为沉积相,这种研究方式基本上限于“三级层序”或“体系域”级别,对勘探开发来说,尺度相对较粗,且含煤岩系其薄互层现象明显,横向相变快,基于常规的预测方法不能解决高频层序的岩层组沉积相及有利相带内的岩性特征预测等问题^[9-12],这就对含煤岩系沉积相的精准预测提出了较大的挑战。

由 Zeng Hongliu 等^[13-15]提出的地震沉积学是一门主要利用地震信息和技术研究有关沉积岩及其形成过程的学科,它侧重于研究地震岩石学、地震地貌学、沉积结构、沉积史以及沉积体系和沉积相平面展布。基于高品质三维地震资料和地质资料的地震沉积学能够为含油气盆地精细勘探开发提供高分辨率层序地层格架、沉积体系类型以及沉积砂体的空间叠置情况。地震沉积学是对传统的地震地层学和层序地层学的继承和发展,其更为重要的是利用三维地震资料通过属性处理和沉积体形态解释,对薄层沉积砂体进行有效识别,这有望解决 4~5 级层序的沉积相预测问题。鉴于地震沉积学在沉积相带展布及储层砂体刻画方面的独特优势,其相关理论和关键技术近年来已广泛应用于陆相盆地、海域盆地的油气勘探研究中,在滨岸平原、海岸三角洲、障壁砂坝、陆坡扇、深水重力流水道和浊积岩体等精细刻画方面取得明显效果^[16-18],但就含煤岩系沉积相方面的研究相对有限。

基于此,笔者以沁水盆地中裕地区山西组含煤岩系为例,基于地震沉积学的方法理论,采用地震分频数据体结合高分辨率层序地层学建立等时地层格

架,求取最小等时单元,以 90°相位转换数据体作为地震切片研究的基础数据体,以井控地层切片进行地震属性优选,并分析地震属性与地质特征的相关性,以井点沉积微相及岩性信息作为控制,建立地震属性与岩性和沉积相的定性或定量关系,赋予其地质沉积意义,结合区域古地理背景开展山西组不同时期沉积相展布预测和沉积演化分析。

1 区域地质概况

研究区位于山西省沁水盆地中西部地区,沁水盆地为一大型复式向斜型盆地,作为华北地台的一部分,在晚古生代主要是海陆交互相背景下的河控三角洲沉积体系。山西组作为此次研究的主要目的层段,总体为一倾向东南的单斜构造,地层倾角在 4°~7°,断层较少,在其沉积时期,研究区范围地形较缓,物源远距离运移,沉积粒度较细,砂泥岩薄互层发育,主要沉积了 1 号和 2 号 2 层煤。作为煤层气勘探的重点区域,传统的解释技术和方法分析成果对勘探的指导作用已难以满足需求。而研究区的地震资料经过去噪和提高分辨率处理后主频达 35~50 Hz,区域沉积现象丰富,构造较为简单,这为利用地震沉积学方法进行沉积相研究提供了良好条件。因此以地震沉积学、高分辨率层序地层学、现代沉积学等相关原理和技术为指导,对研究区山西组开展地震沉积学的应用研究。

2 地震沉积学解释技术的应用分析

2.1 等时地层格架的建立

为了保证地层切片尽可能接近等时沉积界面,精细等时地层格架的建立是首要条件^[19]。而常规的层序划分方法往往不能客观反映出地层的等时关系,高分辨率层序地层学研究,根据基准面旋回原理识别层序界面,成为建立等时地层格架的主要方法^[20]。因此先利用测井/钻孔岩心数据,对山西组层序界面进行识别,然后以井为单位对山西组进行了高分辨率层序划分,认为研究区山西组可以划分为 2 个中期基准面旋回和 4 个短期基准面旋回,2 个中期基准面旋回分别对应山西组一段 S₁ 和山西组二段 S₂, 4 个短期基准面旋回从下往上依次为 S₁₁、S₁₂ 和 S₂₁、S₂₂,并对每口井进行了测井沉积微相的解释,为后期工作奠定基础(图 1)。

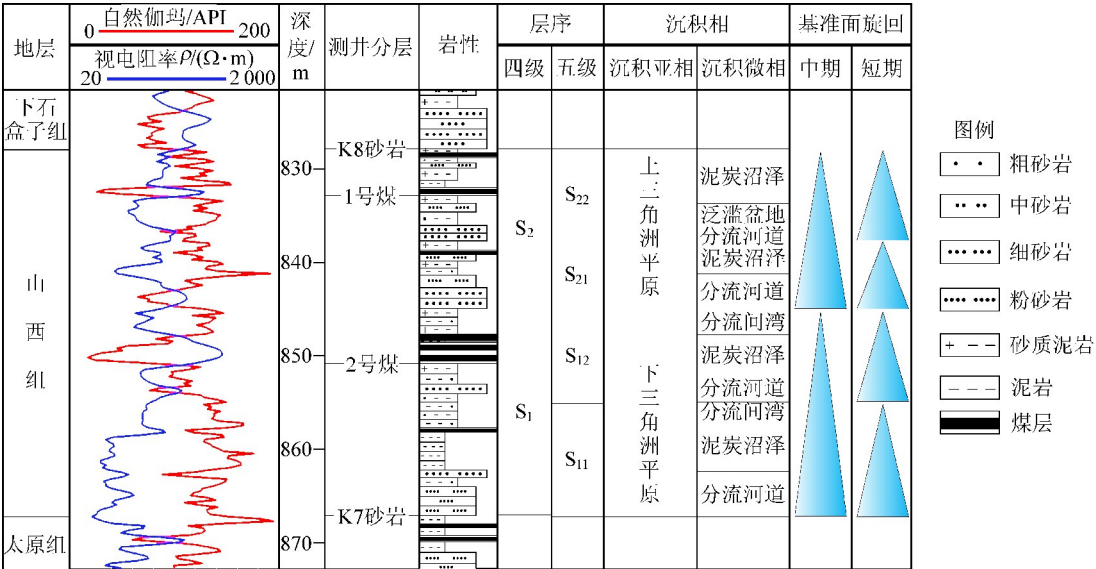


图1 11-2井沉积微相解释

Fig. 1 Sedimentary microfacies interpretation of Well 11-2

含煤岩系沉积等时界面的确定并不是一件容易的事情,受地震资料分辨率限制,地震剖面同相轴经常发生分叉合并现象,因而往往使得确定等时面受穿层影响。而在地震沉积学理论里,采用的是一种参考等时面的概念^[12]。通常先利用分频技术对地震数据体进行处理,寻找那些反射位置相符、产状一致,与频率变化无关的地震同相轴,认为其是一个平行于沉积等时面的参考同相轴,从而进行旋回界面的识别与对比追踪,

以保证地震解释层位具有沉积等时性。研究区山西组顶底界面 P_{1s} 和 P_{1s} 以山西组顶部的骆驼脖子砂岩 K_8 和底部的北岔沟砂岩 K_7 为标志,2套砂岩均为河道下切谷侵蚀面,可作为标志性层序界面,具有时间地层意义,且在地震剖面表现为中低频强振幅,全区稳定可追踪,产状不随地震频率变化而变化。为了达到井震研究尺度的统一,结合地震分频剖面 and 基于钻测井的研究区山西组层序地层划分情况(图2)。

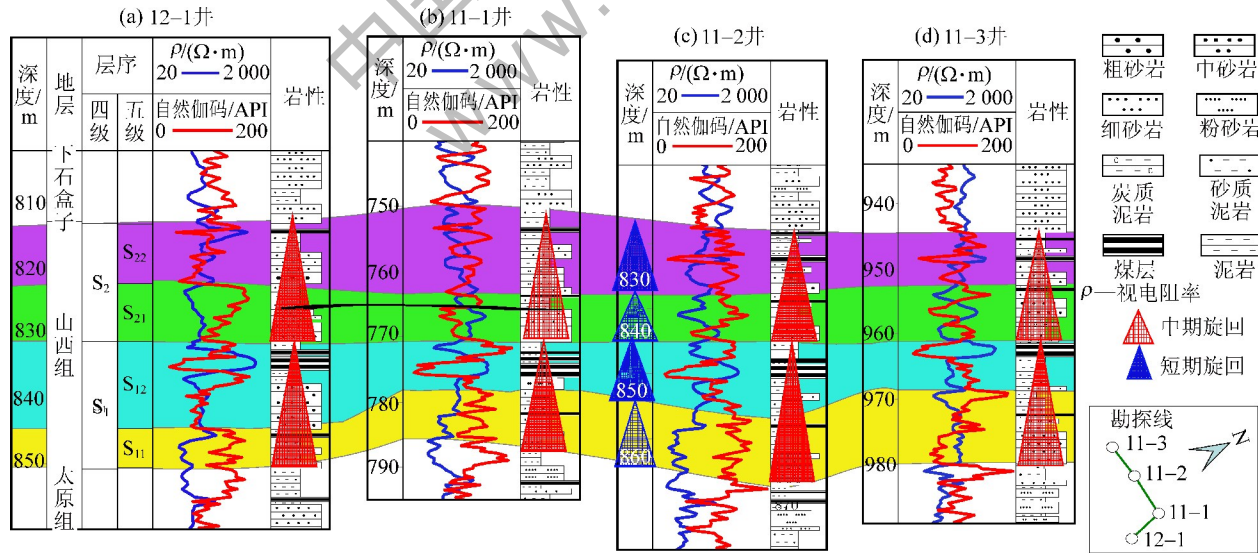


图2 山西组层序地层格架对比剖面

Fig. 2 Correlation graph of sequence stratigraphic framework of Shanxi Formation

构建研究区以准层序组和与之对应的中期旋回为单元的等时层序地层格架(图3)。

2.2 最小等时单元的确定

最小等时研究单元是“三相”结合时关于井震

统一尺度的定义,该概念对地震反射分析时窗、层序级别、测井旋回和地质分层的对应关系进行了定义。用测井资料可以划分到准层序乃至更小的级别,而地震资料上一个完整波形所代表的是准层序组的级

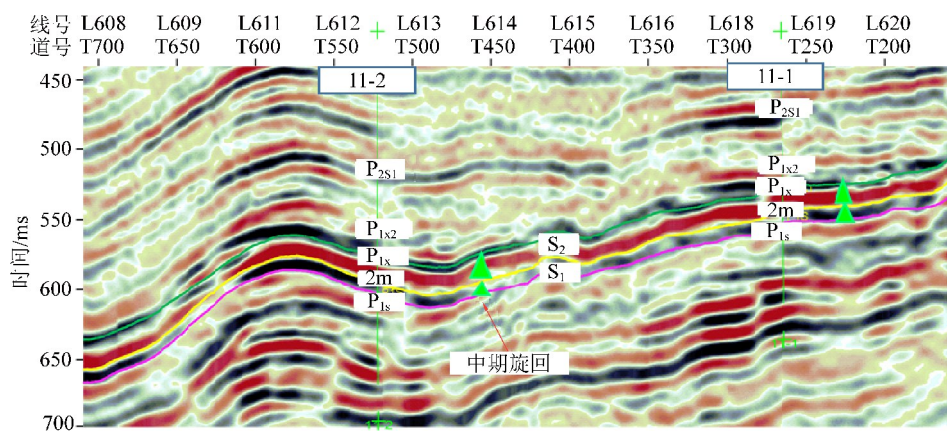


图3 等时层序地层格架的建立

Fig.3 Establishment of isochronous stratigraphic framework

别,为了使2种资料的研究尺度达到统一,就需要确定一个井震统一的最小等时研究单元^[21]。经井震分频标定(图4)发现地震资料受分辨率限制,短期旋回界面(图4以粉色线划分)在地震剖面上无法精确追踪,只有中期旋回界面(图3以黄色线划分)在地震剖面上可以稳定追踪。而中期基准面旋回界面具有等时意义,因此将中期基准面旋回作为属性地层切片的最小等时研究单元,认为最小等时单元

内地层沉积速率相等。由于中期旋回往往由旋回结构、砂体发育特征和时空展布规律相同的短期旋回叠加组成,两者具有相同的地层旋回过程和沉积动力学条件^[22],因此该区以中期基准面旋回作为地震沉积学研究的最小等时单元,以短期旋回作为约束,对最小等时单元做地层切片,然后挑选出最能代表相应短期旋回沉积时期的切片进行属性提取分析,从而保证地层切片的等时性和实际意义。

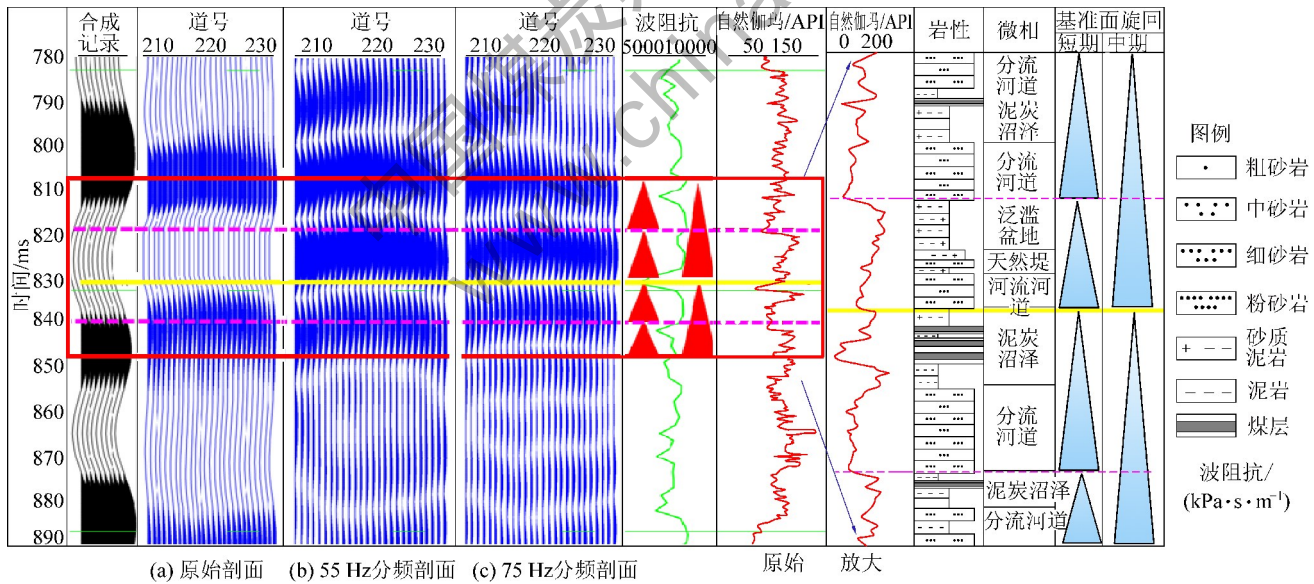


图4 井12-1山西组分频地震标定

Fig.4 Seismic calibration map of frequency-division in Well 12-1 of Shanxi Formation

2.3 地层切片数据体的选择

进行地震沉积学研究需要具有岩性地层意义的数据库^[23]。地震岩性学和地震地貌学是地震沉积学的2个核心组成部分^[24]。利用地震岩性学方法可将一个三维地震数据体转化成为一个地层岩性数据库,对这种地层岩性数据库进行地震地貌学分析,

可以将物理意义上的地震属性参数转换为含有岩性标记的高分辨沉积相平面图^[25]。目前技术条件下,实现常规地震资料岩性标定最经济、最有效的方法是地震道90°相位化^[26-27]。90°相位子波将地震反射波最大振幅移至薄层中心,地震反射的主要同相轴便于地质上的薄层中心对应,这时主要地震同相

轴也就有了岩性地层意义。鉴于沉积环境对区域岩性及其空间叠置关系的控制作用,要实现沉积相带的精准预测就需要尽可能详尽的岩性分布信息,因此将具有岩性地层意义的 90° 相位转换数据体作为地震沉积学研究的基础数据体,进行沉积相研究。多信息相互印证,综合分析,降低多解性,以获得不同沉积时期的精细沉积相。

2.4 基于地层切片方法的地震属性优选及分析

地层切片是在最小等时单元内部等比例插入一定时间间隔的虚拟面,由于等时面内插的切片并非是沉积上等时的^[28],因此,等比例切片时应以测井短期旋回及井分层做控制,使地层切片更具等时性和实际意义。一般来说地震属性都是固定时窗内的地震反射参数,提取地震属性必须要有一定的提取时窗。而地层切片本质上是一种变时窗的属性分析技术^[29],适用于顶底时间难确定的薄层。这里,基于地层切片进行地震属性的提取,并结合井点信息建立地震属性与岩性和沉积相的定性定量关系,将地震属性转化为地质信息,最终在沉积学理论的指导下预测沉积相的展布。

该区基于井控地层切片技术,首先使用等比例切片将最小等时地层单元切分为多个与井上分层对应的等时体提取地震属性,而后在分析井点相应层序内砂地比与地震属性的相关关系基础上优选地震属性。通过地震属性间互相关分析,选择相关系数较高,且平面形态更符合沉积相展布的地震属性作为各个短期旋回的最优属性。最后优选出均方根振幅 $\bar{\sigma}$ 的属性作为各个短期旋回的最优属性(图5)。

均方根振幅 $\bar{\sigma}$ 的属性对振幅变化比较敏感,适用于砂泥岩百分比含量分析,也用于地层岩性相分析,可根据振幅变化识别沉积造成的异常及沉积体外形展布特征。图5a是对应于 S_{11} 旋回沉积时期的均方根振幅属性图,经过井点沉积相标定后,发现红色、黄色区域代表水下分流河道砂质沉积;青色、白色区域代表天然堤或河道间沉积;蓝色、绿色区域代表分流间湾或沼泽微相。图5b是对应于 S_{12} 短期旋回的均方根振幅属性图,结合井点岩性及沉积相标定认为图中红黄色部分代表高含砂量的分流河道和决口扇体微相,蓝色部分代表高泥质含量的间湾、泥炭沼泽等沉积微相。图5c是对应于 S_{21} 短期旋回的均方根振幅属性图,结合井点信息标定认为橙黄色区域代表高含砂量的河道沉积微相,蓝色、青色等冷

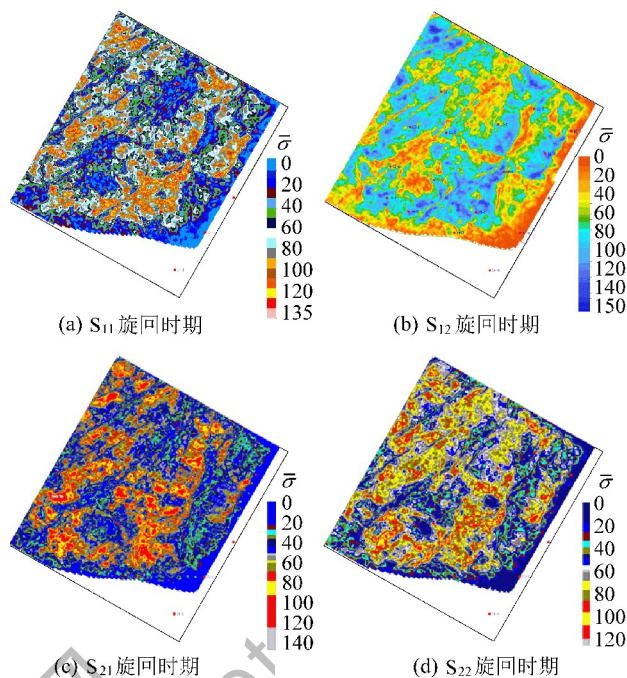


图5 研究区对应于山西组各旋回时期均方根振幅属性

Fig. 5 RMS attribute maps of Shanxi Formation in study area

色低值区代表含砂量低的泥质沉积体。图5d是对应于 S_{22} 短期旋回的均方根振幅属性图,结合研究区砂泥岩薄互层沉积特征,经井点岩性及微相划分标定认为黄色和红色高值区为河道砂体沉积,灰色代表天然堤沉积,蓝色、青色代表泛滥盆地、泥炭沼泽等泥质沉积,研究区物源方向为北东-西南向。

3 不同时期沉积相带划分及其演化分析

在上述属性分析中,建立了最优地震属性与沉积相之间的对应关系。因此在区域古地理背景、沉积模式、物源、单井相和地震资料研究的基础上,以短期基准面旋回为最小研究单元,在地震沉积学和现代沉积模式的指导下,基于最优地震属性反映沉积相的形态,分析其形态特征,定性的确定砂体范围、物源、河道展布特征及趋势,进而对不同沉积微相平面展布有一个直观表示,最终分别获得山西组4个短期旋回时期的沉积微相平面图(图6)。

沁水盆地作为华北地台的一部分,在晚古生代主要是海陆过渡相的古地理背景,山西组沉积期,地形平坦开阔,在近海环境中形成了河控三角洲沉积体系。研究区在山西组一段早期 S_{11} 旋回(图6a)沉积时期,主要发育灰-深灰色的泥岩、粉砂岩和砂质泥岩,局部为细砂岩薄层,波状层理含植物化石碎片,为下三角洲平原沉积环境,分流河道从北东方向

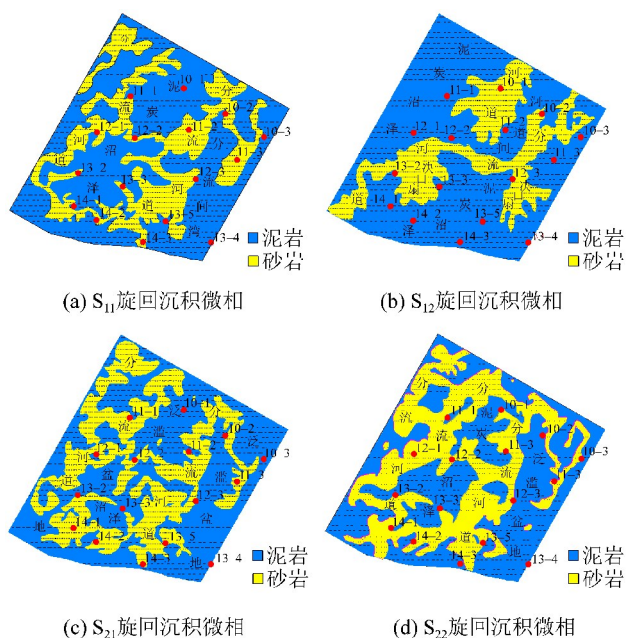


图6 研究区山西组不同时期沉积微相平面图

Fig. 6 Sedimentary microfacies plot of Shanxi Formation in different periods

进入该区,在区内西部和中东部较为发育,但是河道较窄,均为细粒沉积,到了南部河道分叉严重呈树枝状,东部分流间湾发育,中部覆水沉积沼泽大面积发育使得该时期短暂沉积了薄而不稳定的3号煤层;到了山西组一段后期 S_{12} 旋回(图6b)沉积期,该区主要发育深灰色的泥岩、粉砂岩及薄或中厚层的细粒砂岩为主,含丰富的植物化石碎片,局部大型交错层理,为从下三角洲到上三角洲转换的过渡沉积环境,伴随着水体从西北往东南的退却,研究区从北东到西南全区发育一条河道,河道局部地区发育两个规模较小的决口扇,研究区北部延伸了一个规模较大的河道,西部和中南部及东部地区发育沼泽微相,覆水较浅,是一个周期性被水淹没的低洼地区,沼泽中植被繁茂,为滞留的还原弱还原环境,区内泥炭大量发育,为2号煤的形成创造了良好的条件,在2号煤沉积后经历了一次短暂的水进过程,因此在2号煤上部广泛发育一套泥岩盖层,为2号煤的保存起到了至关重要的作用;山西组二段早期 S_{21} (图6c)伴随着整体的持续水退背景,该区主要发育灰-深灰色的砂质泥岩、粉砂岩和中、细粒砂岩,间夹1-2层薄煤层,具大型板状交错层理,系为上三角洲平原上的分流河道、泛滥盆地沉积,分流河道从北东到南西在研究区内大量发育,河道纵横交织,中等粒度,河道南部靠近水体部位近东西向分布,方向发生变化

且南部河道间局部发育沼泽微相,河道外部泛滥盆地分布在整个研究区内;到了山二段晚期 S_{22} (图6d)即山西组沉积末期,分流河道规模持续加大,全区遍布,河道加宽,中粗粒沉积,东部及中部地区发育泛滥盆地及沼泽微相,盆地及沼泽内部低洼地区受河道影响小,比较有利于泥炭的聚集,于是形成了山西组1号煤层,但是煤厚稍薄。至此山西组沉积结束,随后进入下石盒子组沉积时期。

4 结 论

1) 在地震沉积学研究过程中,最小等时单元的确定对地层切片至关重要,应用分频解释技术寻找频率不变的低级序等时界面,建立等时地层格架,在井震统一尺度的基础上,确定地层切片的最小等时单元,进而保证地层切片具有地震的沉积等时意义。

2) 以 90° 相位转换数据体作为地震沉积学研究的基础数据体,基于井控地层切片控制下的多属性优选与分析开展不同旋回时期沉积微相平面展布预测,基于等比例地层切片提取地震属性时以旋回进行控制,以钻井分层进行标定,使地层切片更具有等时性和地质意义。

3) 采用地震沉积学研究方法,明确了研究区山西组聚煤前后由下三角洲沉积过渡到上三角洲沉积,河道为北东-西南方向延伸,山西组沉积从早期到后期河道分布范围逐渐加大,并且对不同旋回时期的岩性边界及其空间叠置关系有了较清晰的认识,这为煤炭及煤层气勘探开发地质条件研究提供了沉积学依据。

参考文献 (References):

- [1] 李思田.聚煤盆地的动力学分析[J].地学前缘,1995,2(3):1-8.
Li Sitian. Dynamic analysis of coal-accumulating basins[J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(3): 1-8.
- [2] 何登发,李德生.沉积盆地动力学研究的新进展[J].地学前缘,1995,2(3):53-58.
He Dengfa, Li Desheng. Advances in studies of the dynamics of sedimentary basins[J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(3): 53-58.
- [3] Blundell D J. Some observation on basin evolution and dynamics [J]. Journal of the Geological Society, 1991, 148: 789-800.
- [4] 魏 莲.测井沉积相分析方法研究[D].成都:成都理工大学,2001:1-2.
- [5] 常锁亮,陈 强,刘东娜,等.煤层气封存单元及其地震-地质综合识别方法初探[J].煤炭学报,2016,41(1):57-66.

- Chang Suoliang, Chen Qiang, Liu Dongna, *et al.* Preliminary discussion on coal bed methane storage unit and its seismic geology comprehensive identification method [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 57-66.
- [6] 王仁铎, 胡光道. 线性地质统计学[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 85-132.
- [7] 王香文, 刘红, 滕彬彬, 等. 地质统计学反演技术在薄储层预测中的应用[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(5): 730-735.
- Wang Xiangwen, Liu Hong, Teng Binbin, *et al.* Application of geostatistical inversion to thin reservoir prediction [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(5): 730-735.
- [8] Vernengo L, Czepelowodzki R, Trinchero E, *et al.* Improvement of the reservoir characterization of fluvial sandstones with geostatistical inversion in Golfo San Jorge Basin, Argentina [J]. *The Leading Edge*, 2014, 33(5): 508-518.
- [9] 黄峰, 李志荣, 廖玲, 等. 利用地震资料进行沉积相分析[J]. *物探化探计算技术*, 2003, 25(3): 179-200.
- Huang Feng, Li Zhirong, Liao Ling, *et al.* Sedimentary facies analysis using seismic data [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2003, 25(3): 179-200.
- [10] 徐安娜, 郑红菊, 董月霞, 等. 南堡凹陷东营组层序地层格架及沉积相预测[J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33(4): 437-443.
- Xu Anna, Zheng Hongju, Dong Yuexia, *et al.* Sequence stratigraphic framework and sedimentary facies prediction in Dongying Formation of Nanpu Sag [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(4): 437-443.
- [11] 陈宇航, 刘震, 姚根顺, 等. 一个深水区长层沉积相早期预测方法: 以南海北部深水区长层沉积相为例[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(11): 2122-2130.
- Chen Yuhang, Liu Zhen, Yao Genshun, *et al.* Early sedimentary facies prediction of deep layers in deep water area: an example of Oligocene of D Sag in the deep water area of northern South China Sea [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(11): 2122-2130.
- [12] 杨帅, 陈洪德, 侯明才, 等. 基于地震沉积学方法的沉积相研究: 以涪西南凹陷涪洲组三段为例[J]. *沉积学报*, 2014, 32(3): 568-575.
- Yang Shuai, Chen Hongde, Hou Mingcai, *et al.* The research of sedimentary facies based on seismic sedimentology method: a case study of the three-section of Weizhou Formation in Weixi'nan depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(3): 568-575.
- [13] Zeng Hongliu, Henry S C, Riola J P. Stratal slicing part II: Real 3-D seismic data [J]. *Geophysics*, 1998, 63(2): 514-522.
- [14] Zeng Hongliu, Ambrose W A. Seismic sedimentology and regional depositional systems in Miocene Norte, Lake Maracaibo, Venezuela [J]. *The Leading Edge*, 2001, 20(11): 1260-1269.
- [15] Zeng Hongliu, Loucks R G, Brown L F. Mapping sediment-dispersal patterns and associated systems tracts in fourth- and fifth-order sequences using seismic sedimentology: Example from Corpus Christi Bay, Texas [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(7): 981-1003.
- [16] 董春梅, 张宪国, 林承焰. 有关地震沉积学若干问题的探讨[J]. *石油地球物理勘探*, 2006, 41(4): 405-409.
- Dong Chunmei, Zhang Xiangguo, Lin Chengyan. Discussion on several issues about seismic sedimentology [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2006, 41(4): 405-409.
- [17] 朱筱敏, 刘长利, 张义娜, 等. 地震沉积学在陆相湖盆三角洲砂体预测中的应用[J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 915-921.
- Zhu Xiaomin, Liu Changli, Zhang Yina, *et al.* On seismic sedimentology of lacustrine deltaic depositional systems [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 915-921.
- [18] 刘化清, 洪忠, 张晶, 等. 断陷湖盆重力流水道地震沉积学研究: 以歧南地区沙一段为例[J]. *石油地球物理勘探*, 2014, 49(4): 784-794.
- Liu Huaqing, Hong Zhong, Zhang Jing, *et al.* Seismic sedimentology research on fault-depressed lacustrine basin gravity flow channels of Oligocene Es₁ in Qi'nan area, Qikou Sag [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2014, 49(4): 784-794.
- [19] 刘化清, 卫平生, 李相博, 等. 对地震沉积学理论创新的认识[J]. *岩性油气藏*, 2012, 24(1): 7-12, 19.
- Liu Huaqing, Wei Pingsheng, Li Xiangbo, *et al.* Discussion on theoretical innovation of seismic sedimentology [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2012, 24(1): 7-12, 19.
- [20] 刘波. 基准面旋回与沉积旋回的对比方法探讨[J]. *沉积学报*, 2002, 20(1): 112-117.
- Liu Bo. Discussion on the correlation methods of base-level cycle and sedimentary cycle [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(1): 112-117.
- [21] 刘保国, 刘立辉. 实用地震沉积学在沉积相分析中的应用[J]. *石油物探*, 2008, 47(3): 266-271.
- Liu Baoguo, Liu Lihui. Application of applied seismic sedimentology in sedimentary facies analysis [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2008, 47(3): 266-271.
- [22] 张明禄, 郑荣才, 达世攀, 等. 砂体等时对比的高分辨率层序分析技术[J]. *矿物岩石*, 2004, 24(1): 113-120.
- Zhang Minglu, Zheng Rongcai, Da Shipan, *et al.* Isochronic correlation of sandybodies by high-resolution sequence technique [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2004, 24(1): 113-120.
- [23] 赵海华, 吴明荣. 关于地震沉积学几个问题的讨论[J]. *油气地球物理*, 2009, 7(3): 9-13.
- Zhao Haihua, Wu Mingrong. Discussion on several issues about seismic sedimentary [J]. *Petroleum Geophysics*, 2009, 7(3): 9-13.
- [24] Zeng Hongliu, Tucker FHentz. High frequency sequence stratigraphy from seismic sedimentology Applied to Miocene, Vermilion Block 50, Tiger Shoal area, offshore Louisiana [J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(2): 153-174.
- [25] 曾洪流, 朱筱敏, 朱如凯, 等. 陆相拗陷型盆地地震沉积学研究规范[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(3): 275-284.
- Zeng Hongliu, Zhu Xiaomin, Zhu Rukai, *et al.* Guidelines for seismic sedimentologic study in non-marine postrift basins [J]. *Petr-*

- Chen Zhong, Wang Fuchen, Zhu Qingrui, *et al.* Impact on the production aystem of NH_3 fenerated suring coal slurry gasification [J]. Coal Chemical Industry, 2009, 37(2): 43–45, 51.
- [2] Zhong C, Shuai Y, Liang Q, *et al.* Distribution of HCN, NH_3 , NO and N_2 , in an entrained flow gasifier [J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 148(2/3): 312–318.
- [3] 赵训志, 隋芝宇, 李 佳, 等. 碱性氮化物对油品的危害及脱除研究进展 [J]. 工业催化, 2009, 17(S): 60–62.
- Zhao Xunzhi, Sun Zhiyu, Li Jia, *et al.* Basic nitrogen harm on oils and removing research progress [J]. Industrial Catalysis, 2009, 17(S): 60–62.
- [4] Zhang S, Asadullah M, Dong L, *et al.* An advanced biomass gasification technology with integrated catalytic hot gas cleaning. Part II: tar reforming using char as a catalyst or as a catalyst support [J]. Fuel, 2013, 112(3): 646–653.
- [5] Li C Z. Some recent advances in the understanding of the pyrolysis and gasification behaviour of Victorian brown coal [J]. Fuel, 2007, 86(12/13): 1664–1683.
- [6] Min Z, Yimsiri P, Asadullah M, *et al.* Catalytic reforming of tar during gasification. Part II. char as a catalyst or as a catalyst support for tar reforming [J]. Fuel, 2011, 90(7): 2545–2552.
- [7] 陈宗定, 张 书, 王芳杰. 活化前后半焦原味催化重整褐煤热解焦油研究 [J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(11): 105–110.
- Chen Zongding, Zhang Shu, Wang Fangjie, *et al.* Study on in-situ catalytic reforming of coal tar pyrolysis of brown coal by activated and inactivated char [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(11): 105–110.
- [8] Ju Shanguan, Li Chunhu, Li Yanxu, *et al.* Study on removal of sulfur dioxide in flue gas using activated semi-coke [C]. 4th Korea–China Joint Workshop On Clean Enengy Technology Proceeding, Korea, 2002: 192–194.
- [9] 常丽萍, 谢克昌, 李春柱. 煤热解过程中 NH_3 和 HCN 的释放 [C]// 第九届全国化学工艺学术年会, 重质油国家重点实验室, 北京, 2005.
- [10] Zhang S, Min Z, Tay H L, *et al.* Effects of volatile-char interactions on the evolution of char structure during the gasification of Victorian brown coal in steam [J]. Fuel, 2011, 90(4): 1529–1535.
- [11] Garcia B, Takarada T. Caion-exchanged coal char as H_2S sorbent [J]. Fuel, 1999, 78(5): 573–581.
- [12] 李 强, 车得福, 刘银河, 等. 煤焦油二次热解过程中 HCN 及 NH_3 释放特性研究 [J]. 燃料化学学报, 2005, 33(2): 161–165.
- Li Qiang, Che Defu, Liu Yinhe, *et al.* Investigation on HCN and NH_3 formation during secondary pyrolysis of coal tars [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2005, 33(2): 161–165.
- [13] Dogru M, Howarth C R, Akay G, *et al.* Gasification of hazelnut shells in a downdraft gasifier [J]. Energy, 2002, 27(5): 415–427.
- [14] Tan L L, Li C Z. Formation of NO_x and SO_x precursors during the pyrolysis of coal and biomass. Part I. effects of reactor configuration on the determined yields of HCN and NH_3 during pyrolysis [J]. Fuel, 2000, 79(15): 1883–1889.
- [15] Kambara S, Takarada T, Yamamoto Y, *et al.* Relation between functional forms of coal nitrogen and formation of NO_x precursors during rapid pyrolysis [J]. Energy & Fuel, 1996, 10: 1022–1027.
- [16] Li C Z, Li L T. Formation of NO_x and SO_x precursors during the pyrolysis of coal and biomass. Part III. further discussion on the formation of HCN and NH_3 during pyrolysis [J]. Fuel, 2000, 79: 1899–1906.
- [17] Li C Z, Nelson P F. Interactions of quartz, zircon sand and stainless steel with ammonia: implications for the measurement of ammonia at high temperatures [J]. Fuel & Energy Abstracts, 1996, 75: 525–526.
- [18] 谢克昌, 李文英. 氧化钙在煤岩显微组分气化中的作用研究 [J]. 太原理工大学学报, 1993, 24(S1): 51–57.
- Xie Kechang, Li Wenying. The effect of CaO on CO_2 - or $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ gasification of coal macerals [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1993, 24(S1): 51–57.
- [19] 李 娜, 李 阳, 班延鹏, 等. 胜利褐煤焦钙催化水蒸气气化反应中活性微结构分析 [J]. 燃料化学学报, 2016, 44(11): 1297–1303.
- Li Na, Li Yang, Ban Yanpeng, *et al.* Analysis of active microstructure during steam gasification of Shengli char catalyzed by calcium component [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2016, 44(11): 1297–1303.
- [20] Chang C S. Thermal reactions of freshly generated coal tar over calcium oxide [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 1986.
- [21] Kapteigin F, Mouligin J A, Matzner S, *et al.* The development of nitrogen functionality in model chars during gasification in CO_2 and O_2 [J]. Carbon, 1999, 37(7): 1143–1150.

(上接第 182 页)

- oleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 275–284.
- [26] Zeng Hongliu, Backus M M. Interpretive advantages of 90° phase wavelets: Part 1: modeling [J]. Geophysics, 2005, 70(3): 5–7.
- [27] Zeng Hongliu, Backus M M. Interpretive advantages of 90° phase wavelets: Part 2: seismic applications [J]. Geophysics, 2005, 70(3): 14–17.
- [28] 钱荣钧. 对地震切片解释中一些问题的分析 [J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(4): 482–487.
- Qian Rongjun. Analysis of some issues in interpretation of seismic slices [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(4): 482–487.
- [29] 张军华, 周振晓, 谭明友, 等. 地震切片解释中的几个理论问题 [J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(3): 348–352, 361.
- Zhang Junhua, Zhou Zhenxiao, Tan Mingyou, *et al.* Several theoretical issues about interpretation of seismic slices [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(3): 348–352, 361.