



袁峰, 马丽, 许德才, 等. 2017. 序贯指示模拟方法在煤层顶板岩性预测中的应用. 地球物理学进展, 32(5):2126-2131, doi:10.6038/pg20170537.  
YUAN Feng, MA Li, XU De-cai, et al. 2017. Sequential indicator simulation method in the application of the coal seam roof lithology prediction. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 32(5):2126-2131, doi:10.6038/pg20170537.

# 序贯指示模拟方法在煤层顶板岩性预测中的应用

## Sequential indicator simulation method in the application of the coal seam roof lithology prediction

袁峰<sup>1,2</sup>, 马丽<sup>1</sup>, 许德才<sup>1,2</sup>, 汶小刚<sup>1,2</sup>, 刘亚洲<sup>3</sup>  
YUAN Feng<sup>1,2</sup>, MA Li<sup>1</sup>, XU De-cai<sup>1,2</sup>, WENG Xiao-gang<sup>1,2</sup>, Liu Ya-zhou<sup>3</sup>

1. 国土资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室, 西安 710026

2. 陕西省煤田物探测绘有限公司, 西安 710005

3. 长江大学工程技术学院, 荆州 434020

1. Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Land and Resources, Xi'an 710026, China

2. Shaanxi Provincial Coal Geophysical Prospecting, Surveying and Mapping Co. Ltd., Xi'an 710005, China

3. Yangtze university college of engineering technology, Jinzhou 434020, China

**摘要** 渭北石炭二叠纪煤田煤层顶板横向非均质性强, 依靠钻探所得煤层顶板岩性误差较大. 地震资料具有较高的纵向、横向分辨率, 利用地震资料可以提高煤层顶板岩性预测精度. 本文采用序贯指示模拟方法进行煤层顶板岩性预测. 通过分析煤层顶板岩性资料, 利用数据空间变异性特征和相应的地震属性求取变差函数, 将井点资料作为硬数据, 地震数据作为软约束进行煤层顶板岩性预测. 综合运用地质资料、地震资料, 为煤层顶板岩性预测提供了一种有效的方法.

**关键词** 序贯指示模拟; 煤层顶板岩性预测; 地质统计学; 地震属性

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10.6038/pg20170537

**Abstract** Aiming at the characteristics of lateral inhomogeneity strong of coal seam roof in Weibei Carboniferous Permian coal field, the sequential indication simulation method is used to predict. This method is a stochastic simulation way, which by analyzing the lithological data of coal seam roof, and the variability function is obtained by using the spatial variability of data and the corresponding seismic attribute. The well data are used as hard data and seismic data as soft constraints to lithology prediction. In the practical application, this method integrates the geological data and combines the seismic data with lateral resolution strong, which provides an effective method for the prediction of coal seam roof lithology.

**Keywords** sequential indication simulation; coal seam roof lithology prediction; geostatistics; seismic attribute

## 0 引言

渭北石炭二叠纪煤田煤层顶板岩性横向非均质性强, 厚度较小. 不同的煤层顶板岩性在煤矿开采过程中具有不同的稳定性, 在地质结构不稳定处, 发生冒顶事故的可能性也很大. 因此, 煤层顶板岩性的预测具有重要意义.

煤层顶板岩性预测一般是通过对已知钻孔数据进行拟合或回归分析得到的经验公式或回归公式来计算. 在实际预测中钻孔数据量有限, 得到的结果在孔间与外推区域有较大的误差.

地震反演技术具有较高的纵向、横向分辨率, 利用地震

反演技术进行煤层顶板岩性预测是一种有效的方法. 主要是通过统计不同岩性与波阻抗之间关系, 利用波阻抗数据沿煤层顶板切片进行顶板岩性预测(张玺, 2012; 李巧灵等, 2013; 朱红娟, 2015). 这种方法的关键是找出煤层顶板波阻抗和岩性的转换关系, 从而进行岩性划分. 但在实际应用中不同岩性的波阻抗多有叠置, 预测效果不佳. 相对于波阻抗数据, 自然伽马等数据可以较好的区分顶板岩性, 通过多参数岩性反演、神经网络反演等方法得到的自然伽马等数据可以解决阻抗叠置问题(彭刘亚等, 2013; 刘文明等, 2016).

反演技术在预测煤层顶板岩性中取得了很好的效果, 但也存在如下问题:

(1) 反演需要有高质量的测井数据,并建立精确的地质模型和高精度的合成记录,在反演过程中不确定性因数很多,多解性强(撒利明等,2015;贾凌霄等,2016)。

(2) 对于已经开采或已有巷道的煤矿,可能测井资料较少但有大量的开采数据,反演由于需要测井的原因很难结合这些开采数据进行精细预测。

(3) 地震属性在物性预测中应用广泛,通过分析井点位置地震属性与煤层顶板岩性相关性,优选出多个地震属性,利用神经网络方法对煤层顶板进行预测(郭彦省等,2006;孟召平等,2009)。该方法对地震资料的质量要求较高,计算过程中容易发生网络不收敛或收敛很慢,导致拟合误差较大(孟召平等,2006)。

针对上述问题,本文提出利用序贯指示模拟方法进行煤层顶板岩性预测,通过分析顶板岩性资料,利用已有的地质认识和相应的地震属性求取变差函数,将井点资料作为硬数据,地震数据作为第二变量进行煤层顶板岩性预测。

## 1 序贯指示模拟原理

序贯指示模拟是基于象元的随机模拟方法,可用于离散化的连续变量的随机模拟,也可以用于离散型变量的随机模拟。该方法无须假设原始样本服从正态分布,而是通过给定出一系列的阈值,估计某一类型变量或离散化连续变量低于某一阈值的概率,以此确定随机变量的分布。序贯指示模拟的基础为指示克里金,其不同点在于序贯指示模拟方法是随机访问每未知节点,在未知点处建立条件累计概率分布(ccdf),并随机抽样获得每个节点模拟结果值。每个节点的ccdf的求取,需要应用指示克里金方法。序贯指示模拟方法包括一般的序贯指示模拟、具有局部趋势的序贯指示模拟、同位协同指示模拟等。

## 2 主要难点和预测思路

研究区位于陕西渭北石炭二叠纪煤田。3号煤层直接顶板沉积期处于浅海环境,岩性类型多样。整体可分为四类:第一类为泥岩顶板,薄层状,厚度0~2 m;第二类为粉砂岩顶板,厚度0.3~4 m;第三类顶板为海湾波浪带相的中粗砂岩顶板,中厚层~厚层状,厚度0.70~4 m;第四类顶板为泻湖海湾相的灰岩顶板,厚度0.60~1 m,研究区煤层顶板厚度分布,如图1所示。

利用已知钻孔揭露的岩性及岩性的厚度可得到3号煤层顶板分布(见图2)。图中数字2、3、4、5为不同的岩性编号,分别对应泥岩、粉砂岩、中粗砂岩和灰岩,黑点为井点数据位置。图中红色箭头为地震勘探结束后巷道进入研究区的位置,巷道揭露岩性为中粒砂岩。

在钻孔插值中地质人员虽然结合了一定的地质规律(如顶板岩层厚度、不同岩性的接触关系等),但从巷道揭露资料来看实际岩性为中粒砂岩,预测结果为灰岩,预测结果与实际揭露不符。

研究区地震资料品质较高,地震主频达45 Hz。从人工合成记录、过井剖面、岩性柱状来看(图3),无论3号煤层顶板是砂岩还是泥岩,煤层与其顶板均形成了复合波,地震剖面上无法识别顶板反射波。煤层顶板岩性预测属于薄层预测范

畴(柏冠军等,2006)。

目前有两种较好的方法可以对薄层进行预测。一种是通过反演技术提高其分辨率,从直方图中(图4)来看,波阻抗对顶板岩性有一定的区分度,叠后反演能够区分出顶板岩性,但是本区属于老矿井,能收集到的测井资料有限。

另一种方法是利用地震属性进行平面预测,通过地震属性与预测物性之间的相关性进行计算。从人工合成记录可以看出顶板层位在T3波(图中绿线)上方25 ms左右,在T3波上方25 ms处提取均方根振幅属性切片,从均方根振幅与岩性散点图可以看出均方根振幅与岩性有一定的相关性(图5),因此能够使用地震属性进行顶板岩性预测。但不同于煤层厚度、孔隙度等连续数据预测,煤层顶板岩性属于离散数据,不同岩性之间的过度是有一定地质规律的。从钻探资料来看,研究区煤层顶板为灰岩的区域与顶板为中粗砂岩的区域相邻,而顶板为泥岩的区域与顶板为粉砂岩的区域相邻。

序贯指示模拟法是一种地质统计学方法,其不但能满足已有离散数据空间规律性,还能将地震数据作为约束进行模拟,本文引入序贯指示模拟法对煤层顶板岩性进行预测。

主要步骤有:1)将钻孔煤层顶板岩性数据数字化,2、3、4、5为不同的岩性编号,分别对应泥岩、粉砂岩、中粗砂岩和灰岩;2)输入钻孔数据值,并进行检查;3)地震属性筛选、优化,输入与煤层顶板岩性相关程度最大的地震属性值;4)通过提取钻孔的煤层顶板岩性数据与钻孔附近的属性值构建变差函数;5)利用序贯指示模拟进行预测。预测流程如图6所示。

## 3 序贯指示模拟煤层顶板岩性预测

### 3.1 属性提取

地震属性有很多种,不同的地震属性反应了不同的地层信号。准确提取地震数据中的属性,分析其对应的地层岩性信息是一个难点。虽然无法找到地震属性与岩性之间直接的对应关系,但通过统计分析表明,井点处的岩性、物性等参数与地震属性之间有着线性或非线性统计相关性(李丙喜等,2014;王延君等,2016)。本文提取20种地震属性,经过主成分分析法(印兴耀等,2008;井西利和王明利,2013)对地震属性进行降维处理,得到综合属性,统计其与煤层顶板岩性的相关系数(表1),可以看出经主成分分析后,综合属性与顶板岩性相关性达0.88,可以作为序贯指示模拟软数据进行约束。

表1 地震属性相关系数

Table 1 Correlation coefficient of seismic attributes

主成分分析	相关系数				
	总体岩性	中粗砂岩	灰岩	泥岩	粉砂岩
PC1	0.57	0.52	0.69	0.11	0.21
PC2	0.38	0.62	0.06	0.34	0.33
PC3	0.17	0.25	0.11	0.10	0.13
PC4	0.15	0.22	0.08	0.14	0.01
PC5	0.19	0.06	0.26	0.05	0.23
PC6	0.37	0.36	0.22	0.24	0.60
total	0.88	0.96	0.91	0.57	0.81

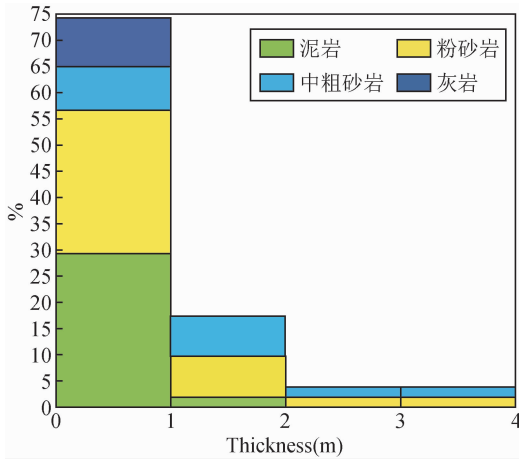


图1 研究区煤层顶板厚度分布图

Fig.1 Coal seam thickness distribution in the study area

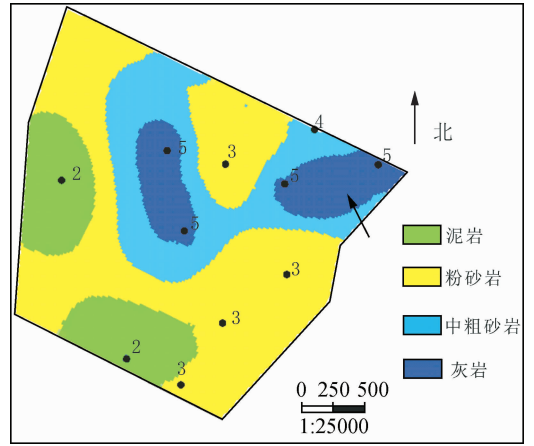


图2 钻孔插值方法煤层顶板岩性预测

Fig.2 Borehole interpolation method for prediction of coal seam roof lithology

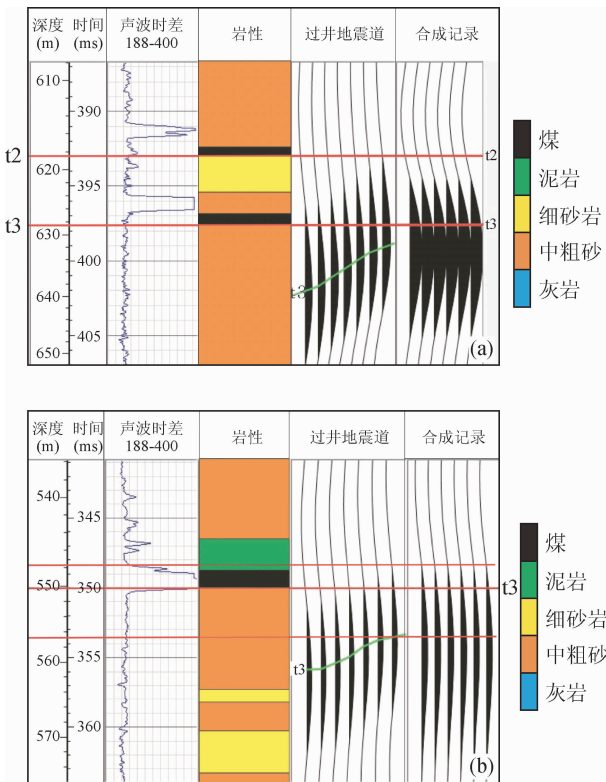


图3 过孔人工合成记录、过井剖面、岩性柱状 (a)371;(b)373.

Fig.3 Through hole synthetic record, through well section, lithologic column (a)371;(b)373.

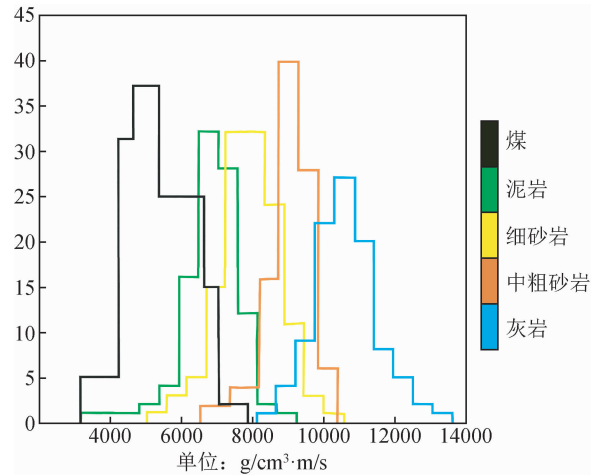


图4 波阻抗与岩性直方图

Fig.4 Wave impedance and lithologic histogram

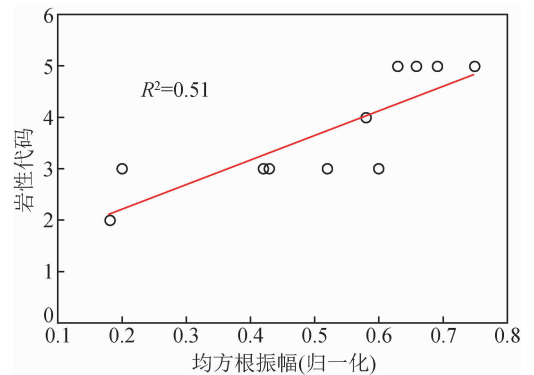


图5 均方根振幅与岩性散点图

Fig.5 Root mean square amplitude and lithologic scatter diagram

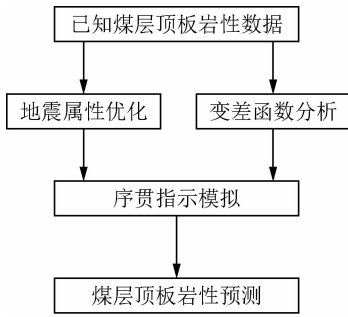


图6 煤层顶板岩性预测流程

Fig.6 Coal seam roof lithology prediction flow

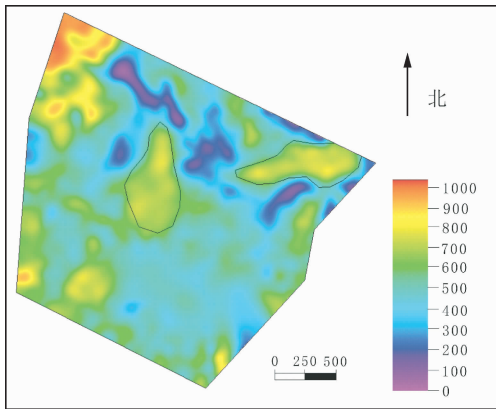


图7 综合地震属性

Fig.7 Synthetic seismic attributes

图7为经主成分分析得到的综合属性图.从图中可以看出在研究区中部、东北部黑圈范围内呈异常,数值在700~900,结合钻孔分析认为其为煤层顶板灰岩的反映.

3.2 变差函数求取

变差函数是一个描述空间数据变化的函数,它描述不同位置变量之间的相似性.变差函数的空间变异性特征包括区域化变量在空间上的连续性、空间各向异性的程度以及影响区域的大小.

研究区煤层直接顶板沉积期处于浅海环境,岩性类型多样.仅用单一变差函数无法精确表征煤层顶板岩性的发育方向和规模,须采用不同的变差函数.根据不同岩性发育的规模及方向的变化,分不同岩性进行变差函数拟合,通过调整试验变差函数的带宽、步长容限、搜索半径等参数,最终得到变差函数模型(表2).

表2 研究区变差函数参数表

Table 2 Parameters of variogram in the study area

顶板岩性	泥岩	粉砂岩	中粗砂岩	灰岩
变差函数类型	球状	球状	球状	球状
基台值	0.6	0.8	0.8	0.6
块金值	0	0	0	0
长变程/m	500	600	600	300
短变程/m	300	500	400	300
垂变程/m	1.5	1.8	1.8	1
主方位角	150°	180°	160°	50°

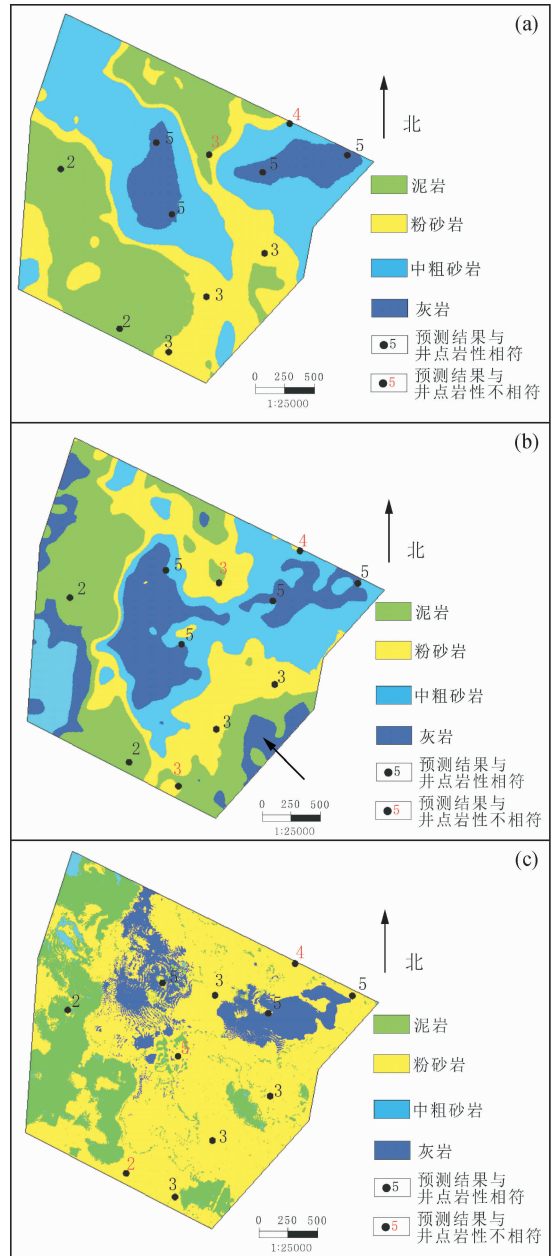


图8 (a)序贯指示模拟预测结果;(b)神经网络方法预测结果;(c)地质统计学反演预测结果

Fig.8 (a)Sequential indicator simulation prediction results;(b)Neural network prediction results;(c)Prediction of geostatistics

3.3 序贯指示模拟法煤层顶板预测

将钻孔资料作为硬数据,地震数据作为软数据,进行序贯指示模拟,所得多个结果进行平均,并加以适当滤波,预测结果如图8a所示.从图中可以看出预测结果横向变化趋势与地震属性有较好的相似性(图7中灰岩位置),没有出现失真现象.预测结果说明序贯指示模拟技术可以很好地将地震属性和井点数据进行综合,预测结果能够在忠实于井点数据的基础上同时忠实于地震属性的平面展布规律.预测结果也符合该区的地质特征,从实际巷道揭露来看模拟结果与揭露

较为一致。

为了更好的说明序贯指示模拟方法的有效性,将序贯指示模拟预测结果同BP神经网络和地质统计学反演预测结果进行对比。

神经网络法是通过自学习功能找出已知井点数据与井旁道地震属性参数之间的内在联系(郭彦省等,2006),这种方法仅仅通过神经网络进行计算,并不能考虑到数据空间的变异性,预测结果如图8b所示。从图中可以看出虽然神经网络预测结果与巷道揭露一致,但其预测结果有的地方明显与研究区矿井地质规律不符,如西南部红色箭头所示位置,灰岩直接与泥岩接触,这与本区煤层顶板为灰岩的区域与顶板为中粗砂岩的区域相邻这一规律相矛盾。

神经网络预测结果地质规律性不强,灰岩、泥岩、砂岩分布较为混乱,预测结果相对破碎。与神经网络方法相比,序贯指示模拟法虽然也结合了钻孔和地震数据,但其采用的地质统计学思想所得结果的地质规律性更强。

地质统计学反演采用了马尔科夫链·蒙特卡罗算法,通过分析井资料和地质信息获得概率分布函数和变差函数,结合地震振幅数据、波阻抗数据进行岩性反演(王雅春和王璐,2013;王朋岩等,2015)。研究区测井资料稀缺,仅收集到西北部4口井的测井资料。采用地质统计学反演得到岩性极大自然概率体并提取煤层顶板岩性切片进行岩性预测,如图8c所示。从图中可以看出由于测井资料分布不均造成反演误差较大(图8c所示红色数字标注)。

同地质统计学反演相比,序贯指示模拟法可以利用已有的钻探、巷道资料,在预测过程中不需要建立精确的地质模型,收集高质量的测井数据。仅收集煤层顶板岩性数据即可,预测方便快捷。不同方法预测精度统计见表3所示。

表3 不同方法预测精度统计表

Table 3 Different methods to predict the accuracy of statistical tables

岩性	序贯高斯模拟预测结果		神经网络方法预测结果		地质统计学反演预测结果		备注
	符合情况	不符合情况	符合情况	不符合情况	符合情况	不符合情况	
4	3	不符合	3	不符合	3	不符合	无测井曲线
5	5	符合	5	符合	5	符合	
5	5	符合	5	符合	5	符合	无测井曲线
3	2	不符合	2	不符合	3	符合	
5	5	符合	5	符合	5	符合	无测井曲线
2	2	符合	2	符合	2	符合	
5	5	符合	5	符合	3	不符合	无测井曲线
3	3	符合	3	符合	3	符合	
3	3	符合	3	符合	3	符合	无测井曲线
2	2	符合	2	符合	3	不符合	
3	3	符合	2	不符合	3	符合	无测井曲线
符合率	81.8%		72.7%		72.7%		

目前序贯指示模拟煤层顶板也存在一些问题。首先是煤

层顶板层位的识别,提取不同层段地震属性约束所得的结果是不同的,这就需要精细的标定。另外,地震资料为时间域信息,而所用的岩性资料为深度域,因此加强速度场研究,提高时—深转换精度是精细预测的关键。

## 4 结论

4.1 序贯指示模拟方法是一种随机模拟方法。通过分析顶板岩性资料,利用已有的地质认识和相应的地震属性资料求取变差函数,将井点资料作为硬数据,地震数据作为第二变量进行煤层顶板岩性预测,为煤层顶板预测研究提供了一种有效的方法。

4.2 序贯指示模拟预测煤层顶板岩性和神经网络法相比除了结合钻孔和地震资料,也考虑到数据空间变异性特征,预测结果符合地质趋势。相对于反演来说序贯指示模拟预测方便快捷,可以利用已揭露的数据进行预测。

4.3 目前序贯指示模拟等地质统计学方法在煤田地震勘探中应用相对较少,通过本文有一定推广意义。

致谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

## References

- Bai G J, Wu H N, Zhao X G, *et al.* 2006. Research on prediction of thin bed thickness using seismic data and its application [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 21(2): 554-558, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2006.02.034.
- Guo Y S, Meng Z P, Cui L Z. 2006. Interpretation coal roof lithologic character of 13-1 in Xieqiao survey using seismic attributes [J]. *Journal of Beijing Vocational & Technical Institute of Industry (in Chinese)*, 5(1): 15-20.
- Jia L X, Wang Y C, Jian X F, *et al.* 2016. Problems and progress in post-stack seismic inversion [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 31(5): 2108-2115, doi: 10.6038/pg20160530.
- Jing X L, Wang M L. 2013. Reservoir prediction based on correlation principal component analysis with seismic attributes [J]. *Journal of Yanshan University (in Chinese)*, 37(3): 250-253, 277.
- Li B X, Li S H, Wang Y H, *et al.* 2014. Processing and Applications of standardization of 2-D seismic attributes——Chang 8<sub>1</sub> formation of Liumaoyuan area of Ordos basin as a example [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 29(4): 1672-1677, doi: 10.6038/pg20140424.
- Li Q L, Peng S P, Hao X X, *et al.* 2013. Using horizon-oriented impedance attribute to predict coal seam roof lithology [J]. *Safety in Coal Mine (in Chinese)*, 44(11): 37-40.
- Liu W M, Liu W J, Pei G D. 2016. Seismic multi-attributes inversion using neural network and its application in predicting lithology of coal seam's roof [J]. *Coal Geology & Exploration (in Chinese)*, 44(1): 103-106, 111.
- Meng Z P, Guo Y S, Ma H. 2009. Prediction of mudstone percentage content for coal roof using seismic attributions [J]. *Journal of China University of Mining & Technology (in Chinese)*, 38(2): 274-279.
- Meng Z P, Guo Y S, Wang Y, *et al.* 2006. Prediction models of coal thickness based on seismic attributions and their applications [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 49(2): 512-517, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2006.02.025.
- Peng L Y, Cui R F, Ren C. 2013. Application of multi-parameter lithological seismic inversion in identifying sandstone of coalbed roof

- in Xinjing coal mine as an example[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 28(4): 2033-2039, doi: 10.6038/pg20130447.
- Sa L M, Yang W Y, Yao F C, *et al.* 2015. Past, present, and future of geophysical inversion [J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 50(1): 184-202.
- Wang P Y, Li Y H, Zhao R. 2015. Algorithm research of post-stack MCMC lithology inversion method[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 30(4): 1918-1925, doi: 10.6038/pg20150453.
- Wang Y C, Wang L. 2013. Application of geostatistical inversion to reservoir prediction in the western Slope of the northern Xingshugang oil field[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 28(5): 2554-2560, 10.6038/pg20130534.
- Wang Y J, Bai B L, Zhou Y B. 2016. Application of multi-attribute analyzing and optimizing method in greater unity oilfield of South Sudan[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing (in Chinese), 35(1): 145-149.
- Yin X Y, Kong G Y, Zhang G Z. 2008. Seismic attributes optimization based on kernel principal component analysis (KPCA) and application[J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 43(2): 179-183.
- Zhang X. 2012. Application of wave impedance inversion in prediction of seismic lithology of coal mine-take Pulongwan coal mine of ShanXi coal international energy group co., ltd for example[J]. Journal of Suzhou University (in Chinese), 27(5): 62-64.
- Zhu H J. 2015. Application of model inversion method in coal seam roof lithology prediction[J]. Coal Technology (in Chinese), 34(1): 102-103.
- 井西利, 王明利. 2013. 基于地震属性相关主成分分析的储层预测[J]. 燕山大学学报, 37(3): 250-253, 277.
- 李丙喜, 李书恒, 王永红, 等. 2014. 二维地震属性标准化处理及应用——以鄂尔多斯盆地刘崮塬地区长<sub>8</sub>段为例[J]. 地球物理学进展, 29(4): 1672-1677, doi: 10.6038/pg20140424.
- 李巧灵, 彭苏萍, 郝晓霞, 等. 2013. 利用沿层波阻抗属性预测煤层顶板岩性[J]. 煤矿安全, 44(11): 37-40.
- 刘文明, 刘万金, 裴跟弟. 2016. 多属性神经网络反演预测煤层顶板岩性[J]. 煤田地质与勘探, 44(1): 103-106, 111.
- 孟召平, 郭彦省, 马辉. 2009. 应用地震属性预测煤层顶板泥岩百分比含量分布[J]. 中国矿业大学学报, 38(2): 274-279.
- 孟召平, 郭彦省, 王赞, 等. 2006. 基于地震属性的煤层厚度预测模型及其应用[J]. 地球物理学报, 49(2): 512-517, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2006.02.025.
- 彭刘亚, 崔若飞, 任川. 2013. 多参数岩性地震反演在识别煤层顶板砂岩中的应用——以新景煤矿为例[J]. 地球物理学进展, 28(4): 2033-2039, doi: 10.6038/pg20130447.
- 撒利明, 杨午阳, 姚逢昌, 等. 2015. 地震反演技术回顾与展望[J]. 石油地球物理勘探, 50(1): 184-202.
- 王朋岩, 李耀华, 赵荣. 2015. 叠后 MCMC 法岩性反演算法研究[J]. 地球物理学进展, 30(4): 1918-1925, doi: 10.6038/pg20150453.
- 王雅春, 王璐. 2013. 地质统计学反演在杏北西斜坡区储层预测中的应用[J]. 地球物理学进展, 28(5): 2554-2560, doi: 10.6038/pg20130534.
- 王延君, 白宝玲, 周永炳. 2016. 多属性分析优化方法在南苏丹 Greater Unity 油田的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 35(1): 145-149.
- 印兴耀, 孔国英, 张广智. 2008. 基于核主成分分析的地震属性优化方法及应用[J]. 石油地球物理勘探, 43(2): 179-183.
- 张玺. 2012. 波阻抗反演在煤矿地震岩性预测中的应用——以山煤国际铺龙湾煤矿为例[J]. 宿州学院学报, 27(5): 62-64.
- 朱红娟. 2015. 模型反演方法在煤层顶板岩性预测中的应用[J]. 煤炭技术, 34(1): 102-103.

## 附中文参考文献

- 柏冠军, 吴汉宁, 赵希刚, 等. 2006. 地震资料预测薄层厚度方法研究与应用[J]. 地球物理学进展, 21(2): 554-558, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2006.02.034.
- 郭彦省, 孟召平, 崔立竹. 2006. 谢桥 13-1 煤层顶板岩性的地震属性解译[J]. 北京工业职业技术学院学报, 5(1): 15-20.
- 贾凌霄, 王彦春, 菅笑飞, 等. 2016. 叠后地震反演面临的问题与进展[J]. 地球物理学进展, 31(5): 2108-2115, doi: 10.6038/pg20160530.