

doi: 10.11720/wtyht.2019.0203

孙雅楠,刘星,赵志根.煤层厚度控制因素的分形奇异值分解法研究[J].物探与化探,2019,43(6):1341-1349.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0203

Sun Y N, Liu X, Zhao Z G. A study of fractal singular value decomposition method for controlling factors of coal seam thickness[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(6): 1341-1349. http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0203

煤层厚度控制因素的分形奇异值分解法研究

孙雅楠¹, 刘星², 赵志根¹

(1. 安徽理工大学 测绘学院, 安徽 淮南 232000; 2. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232000)

摘 要: 煤层的厚度分布是多种地质因素联合控制的结果, 不同地区其控煤因素有所不同, 以往的研究偏重定性的对比分析, 难以准确查明控制因素及其分布。依据煤层厚度空间分布的多重分形特征和广义自相似性原理, 将煤层厚度变换到特征空间, 进行奇异值分解, 根据能量测度和能谱密度所表现出的分形规律, 将奇异值分解图用最小二乘法拟合为多段直线, 并确定不同的拐点, 利用奇异矩阵选取前三段中的奇异值及特征子空间进行重建, 将重建后的异常与各个影响煤层厚度的变量相对比, 提取各种隐含的控煤地质因素, 实现煤层厚度控制因素的定量分析。文中对淮南潘集煤矿(外围)的 8 号主采煤层进行了实例分析, 得到了该地区煤层厚度的主要控制因素是古地形、同沉积构造以及古地理环境中的水动力条件, 并与利用对应分析得到的控煤因素进行对比, 表明了该方法在定量分析中的有效性。

关键词: 控煤因素; 定量分析; 奇异值分解; 空间重建; 异常图

中图分类号: P611 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2019)06-1341-09

0 引言

煤炭的开采掘进需要考虑很多因素, 其中煤层厚度的变化规律及其控制因素的研究与确定有助于煤炭的合理有效开采, 控煤因素的研究一直以来都是一个热点问题, 许多学者对此作了大量的研究, 其中有许多研究是对已知因素的定性分析或对某一特定的控制因素的对比分析, 即定性分析, 如文献[1-3]。20 世纪 80 年代以来, 又有许多学者对控煤因素的研究转向定量分析, 其主要运用的方法是多重分形法^[4]、趋势面分析法或者以方向梯度和滑动窗口变异系数为参数来描述煤层厚度的变化规律及变异性^[5], 一定程度上避免了定性分析的主观性。煤在形成过程中会受到很多因素的影响, 古地形、煤系基底的沉降速度与造煤物质堆积速度之间的补偿关系、古地理环境中的水动力条件以及后期构造变动

等^[4]都是煤炭形成的重要影响因素, 这些因素错综复杂, 不同程度地影响着煤层厚度的变化, 如果只是作简单的定性对比分析, 其控制因素间的相关性以及煤层厚度控制作用的大小均难以确定, 更难以挖掘出各种隐含的控煤地质因素, 因此定量分析对确定一个地区煤层厚度的控制因素组合十分必要, 而对煤层厚度异常信息的提取、分析与对比是实现一个区域主要控煤因素定量分析的重要条件^[7]。

地质学领域中常用点源数据形成的连续变化的曲面来表达场的变化, 而场是由不同形态的地质过程叠加而来, 对场数据的处理有助于分析控制场的变化的地质过程^[8]。煤的聚集是不同地质过程共同作用的结果, 其厚度的变化同样也是一种场的变化, 可通过场数据的处理进行分析。根据成秋明^[9]提出的奇异性事件(过程), 煤炭沉积过程中在相对较小的时间间隔与空间范围内产生的能量极度富集与堆积即煤层厚度表现出的极大值或极小值的异常

收稿日期: 2019-04-09; 修回日期: 2019-09-10

基金项目: 国家重点研发计划项目“面向井下钻孔机器人施工的瓦斯防治钻孔智能设计技术”(2018YFC0808002); 国家自然科学基金面上项目“薄松散层覆盖煤矿采空区高光谱遥感特征研究”(41372368)

作者简介: 孙雅楠(1994-), 女, 从事控煤地质因素的定量分析研究工作。Email: 2738063496@qq.com

通讯作者: 刘星(1974-), 男, 从事三维 GIS 与地学建模、高光谱遥感应应用研究工作。Email: 2268190319@qq.com

性可称为奇异性(过程),分析异常的分布特征与规律对确定与异常相对应的控煤地质因素具有重要的作用,并且影响煤层厚度的各个因素具有自组织临界性和自相似性等非线性特征,这些非线性特征使得奇异性过程服从分形分布^[10-11]。本文借助李庆谋的分形奇异值分解方法^[7]对煤层厚度这一场数据进行处理,在克服付氏变换不足的同时,能够有效度量场的异常变化、识别场的异常性,提取控制煤层厚度变化的地质因素。奇异值分解法是定量提取异常信息的一种常见方法,广泛应用于地球物理、力学、航天、地学等不同领域,目前研究者主要利用奇异值分解进行降噪^[12-13],嵌入、提取水印信息^[14],微弱信息^[15]或图像特征^[16]的提取,压缩图像,识别人脸图像^[17]等。笔者以安徽省淮南市潘集煤矿(外围)为例,从地质钻孔数据中提取了5个影响煤层厚度的因素作为变量,通过奇异值分解法将煤层厚度分解,利用分解后不同区间段的特征值及其对应的特征子空间重建异常,寻找异常区域与影响因素之间的对应关系,确定每一区间段对应的地质含义,从而实现区域主要控煤因素的定量分析。

1 研究区概况

研究区为潘集煤矿(外围),位于安徽省淮南市潘集区和凤台县境内淮南煤田的东北部,西部紧邻朱集东、潘四东、潘二和潘一东等生产矿井,南及东南至淮河北岸4 km附近。区内煤炭资源丰富,是淮南矿区重要的接替资源^[18]。本区域位于淮南复向斜的东段,陈桥—潘集背斜从研究区中部横穿而过,南从谢桥—古沟向斜开始,北到明龙山断层,总体呈向西北方向开口的“U”形。研究区在聚煤后期受到印支运动和燕山构造的影响,以断裂构造为主,次级褶皱不发育,区内含煤地层是晚古生代石炭—二叠系太原组至下石盒子组地层段,上石炭统形成于海进、海退比较频繁的陆表海环境,为海陆交互相沉积,煤层薄且极不稳定;中、下二叠统为海陆过渡环境,为一套三角洲沉积;上二叠统下部,形成于河流—湖泊沉积环境,为陆相沉积,中部出现一次广泛的海侵过程,为一套泻湖—海湾环境,太原组是由于陆表海环境下充足物源造成的碳酸盐沉积间断,山西组为河流入海处的水下三角洲平原沉积,下石盒子组属于浅水三角洲及下三角平原沉积环境^[19-21],其中山西组与上、下石盒子组的煤层多为厚煤层且相对稳定,其区域地质简图如图1所示。

万方数据

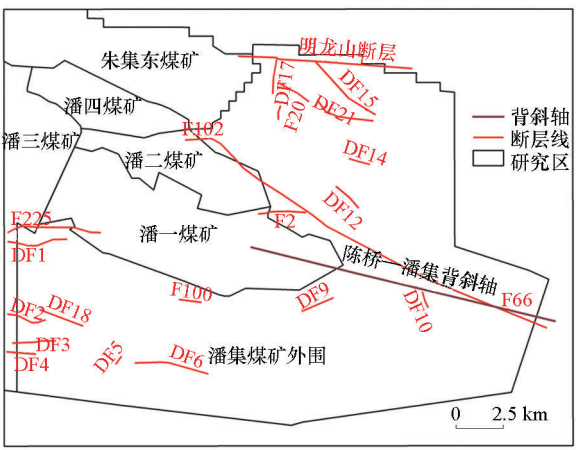


图1 潘集煤矿(外围)地质构造简图
Fig.1 Geological map of Panji coal mine (peripheral)

2 数据来源及变量提取

数据来源于淮南市潘集煤矿(外围)的71个钻孔点,如图2所示,并选取该地区的主采煤层8号煤作为研究对象。

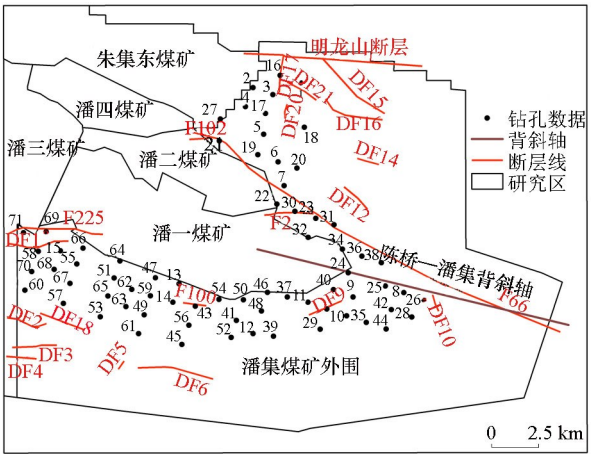


图2 71个钻孔点分布
Fig.2 Distribution map of 71 drilling points

8号煤层位于二叠系下石盒子组,平均厚度为2.28 m,煤层较为稳定,具有可开采性。由于煤层厚度的分布受多种因素影响,于是从钻孔数据中分别提取 SX_H —山西组厚度、 $M8_{DC}$ —8号煤层底面高程、 $XSHZ_H$ —下石盒子组下含煤段厚度、 $XSHZ_{VB}$ —下含煤段砂泥比以及 $M8_H$ —M8厚度共5个因素作为变量,并通过奇异值分解法作定量分析。其中山西组是太原组上发育的第一套沉积,地形低洼处容易富集各种填充物,厚度值较大,地形隆起处易受侵蚀尖灭,厚度值较小甚至缺失,因此可以近似地反映古地形,可用变量 SX_H 来表征古地形,变量 $M8_{DC}$ 可反映现在构造部位,同沉积构造为沉积时期,对沉积填充

具有各种控制作用的构造,可用变量 $XSHZ_H$ 表征,古地理环境中的水动力条件可用变量 $XSHZ_{YB}$ 表征,其水动力条件的强弱可通过砂泥比值反映, $M8_H$ 则为含煤性指标。

3 基本原理

3.1 奇异值分解

如果将常用的地质场数据看作一个 $m \times n$ 的二维矩阵 $A(m,n)$,则 $A(m,n)$ 可以分解为 $m \times m$ 阶左奇异向量矩阵、 $m \times n$ 阶对角矩阵(对角线上的元素为奇异值)和 $n \times n$ 阶右奇异向量矩阵。设 $A(m,n)$ 的秩为 r ,则 $r \leq \min(m,n)$ (如果 $r = \min(m,n)$,则 A 是满秩的), $A(m,n)$ 的奇异值分解形式为^[7]

$$A_{m \times n} = U_{m \times r} \Sigma_{r \times r}^T V_{n \times r}^T$$

其中: U 是左奇异向量矩阵, V^T 是右奇异向量的转置矩阵, $\Sigma = \text{diag}(\sqrt{\lambda_1}, \sqrt{\lambda_2}, \dots, \sqrt{\lambda_r})$ 是奇异值对角矩阵,其中 $\sqrt{\lambda_1} \geq \sqrt{\lambda_2} \geq \dots \geq \sqrt{\lambda_r}$ 。奇异值的平方是特征值,用 σ 代表奇异值, λ 代表特征值,则:

$$\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}。$$

如果将 U 和 V 写成 $U = (U_1 \cdots U_m)$ 与 $V = (V_1 \cdots V_n)$ 。 U 和 V 的直积张成子空间 ψ_k

$$\psi(\lambda_k) = U_k \otimes V_k^T。$$

所有的 $\psi(\lambda_k)$ 可以构成一个正交完备基。于是在 ψ 空间中,矩阵 A 能够被重建,可以表示为

$$A(i,j) = \sum_{k=1}^r \sigma_k \cdot \psi(\lambda_k)。$$

3.2 能量分形与奇异值分解图解

在上述对原始矩阵 A 分解的计算中,记 U 的 k 列列向量为 U_k , V^T 的 k 行行向量为 V_k ,那么 U_k 与 V_k 的矩阵乘积是一个 m 列 n 行的矩阵,记为 A_k ,则 $A_k(k=1, \dots, r)$ 是一个完备的二维正交空间,矩阵 A 在 A_k 的投影系数特征值 $\lambda_k(k=1, \dots, r)$ 构成了矩阵 A 的特征空间分解系数,也称能量密度,也就是说投影到第 k 个奇异值所对应的子空间的能量密度为奇异值的平方,也就是第 k 个特征值。其表达式为:

$$ED_k = \sigma_k^2 = \lambda_k,$$

其中: ED_k 代表矩阵 A 在第 k 个奇异值处的能量密度,其意义类似于付氏变换中的周期(频率倒数),也称能谱半径。由于特征值代表能量密度,可以定义从最小奇异值到第 k 个奇异值所对应的子空间的总能量为在尺度 λ_k 意义下的测度 $E(\sigma_k)$,表示为:

$$E(\sigma_k) = \sum_{i=1}^k \lambda_i, 1 \leq k \leq r。$$

这样,一个能谱半径对应一个能量,也可以说在一定的能谱尺度下,可以得到一个能量的测度,对秩为 r 的矩阵,可以得到长度为 r 的能量测度随能谱尺度变化的序列对。这样定义的尺度与能量测度之间可能具有分形规律,如果具有分形规律,能量测度随度量尺度变化将呈指数规律^[7,22-23]

$$E(\sigma_k) = \alpha \lambda_k^\beta,$$

如果能谱尺度与能量测度之间存在多段分形关系,则表现为多段直线。

以功能谱能量密度为横轴,能量测度为纵坐标,在双对数坐标中绘制能量测度与尺度的关系图,并用最小二乘法(LS)将这个图进行分段拟合^[24],拟合函数为指数函数,形如 $E = \alpha \lambda^\beta$,分段拟合遵循均方误差最小的原则,选取最合适的分割点,在人机交互作用下进行能量测度最优分割图解,称为分形奇异值图解,笔者奇异值分解及重建的过程全部利用 Matlab 软件编程实现。

4 奇异值分解及控煤因素的确定

场的变化通常由点源数据形成的连续变化的曲面表示,通常需要进行空间插值。考虑到插值精度的需要,插值前将钻孔数据进行了简单处理,且处理后的钻孔各变量数值不变,相同区域的插值结果和值一样,故不会影响到地质分析

笔者选用的空间插值方法为克里金插值法,而克里金插值要求数据必须符合正态分布,因此本研究首先将淮南市潘集煤矿(外围)71 个钻孔数据中的 8 号煤层厚度值在 spss 软件中进行 K-S 正态检验(表 1),并观察这些离散数据是否服从正态分布。

表 1 K-S 正态检验结果

Table 1 The result of K-S normal test							
平均值	最小值	最大值	标准差	变异系数	偏度	峰度	Sig.
2.28	0.55	6.48	0.97	42.54	1.71	4.70	0.056

检验发现 8 号煤层厚度值的变异系数为 42.54%,数据的变异性比较大,且 sig. 大于 0.01,说明该离散数据符合正态分布,能够满足克立金插值模型的二阶平稳假设要求^[4,25],不需要对其进行正态变换,然后在 surfer 软件中完成 $M8_H$ 的克里金插值与钻孔点的展布,如图 3 所示。

4.1 奇异值分解能量分形分布

将 $M8_H$ 等值线图(图 3)进行奇异值分解,分别得到 98 个非零奇异值以及 98 个对应的特征子空间。能量密度随奇异值的变化图和奇异值积分能量

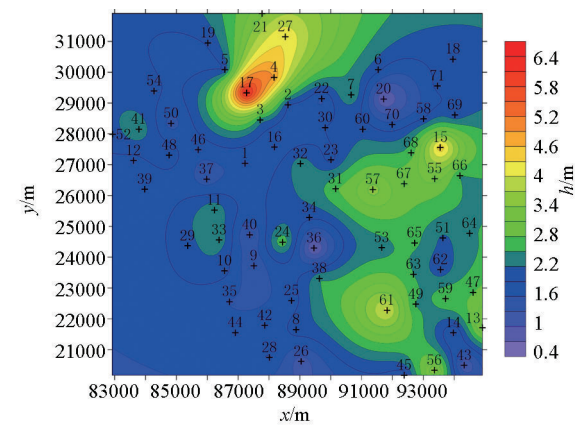


图 3 M8_H 的等值线

Fig.3 The equivalent figure of M8_H

贡献图分别如图 4 和图 5 所示,前 10 个奇异值的贡献已经大于 95%(图 5),说明能量大部分集中在大的奇异值对应的子空间中,奇异值越大,所包含的能量就越大,可以用来描述场中周期长的变化或背景变化,奇异值越小,包含的能量也就越小,所含信息就越微弱,通常用来说明信号的高频、局部变化或异常场^[7]。

M8_H 的能谱密度与能量测度分形奇异值分解如图 6 所示,该图显示了 M8_H 能谱密度与能量测度这一尺度具有多段分形关系,并且呈现以 β 为斜率的多段直线,通过奇异值分解将 M8 厚度等值线图分解为 6 段 I ~ VI。其中分割点主要选取图中较明显的能量测度拐点,利用这些拐点,可以选取相应的奇异值及对应的子空间重建信息场^[7]。

4.2 控煤因素的确定

研究旨在将奇异值分解法得到的控煤地质因素与经对应分析得到的结果作对比,以证明奇异值分解法在定量分析主要控煤因素方面的有效性,对应分析方法是地学定量分析的一种常用方法,其优势在于能够将 R 型分析结果与 Q 型分析结果有机结

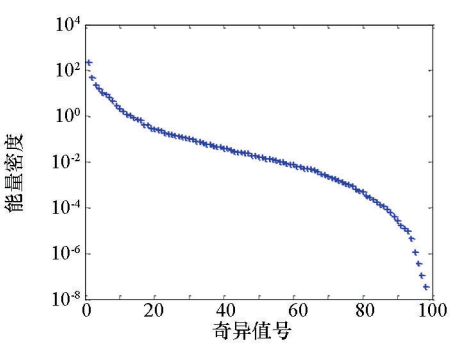


图 4 M8_H 奇异值随能量密度的变化

Fig.4 The figure of M8_H singular value with energy density

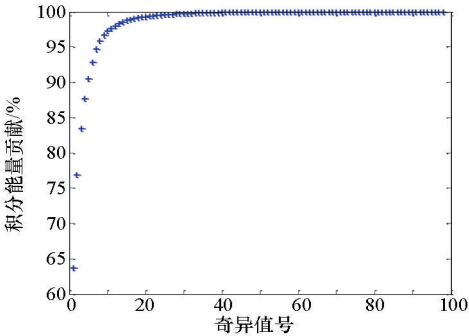


图 5 M8_H 奇异值的积分能量贡献

Fig.5 The M8_H integral energy contribution figure of singular values

合在一起,不仅能确定煤层厚度的主要控制因素,还能直观地得到各个变量与变量之间、样本与样本之间以及变量与样本之间的相互联系,经对应分析得、到前 3 个因子中载荷绝对值较大的变量是 SX_H、XSHZ_{YB}、XSHZ_H,根据各个变量表征的地质因素,得到控制 8 号煤层厚度的主要因素是古地形、古地理环境中的水动力条件以及同沉积构造。分别选取图 6 中每一段特征值及对应的子空间进行重建,重建后的异常图如图 7 所示,不同变量的等值线图分别如图 8~11 所示。重建后的异常图随着奇异值的逐

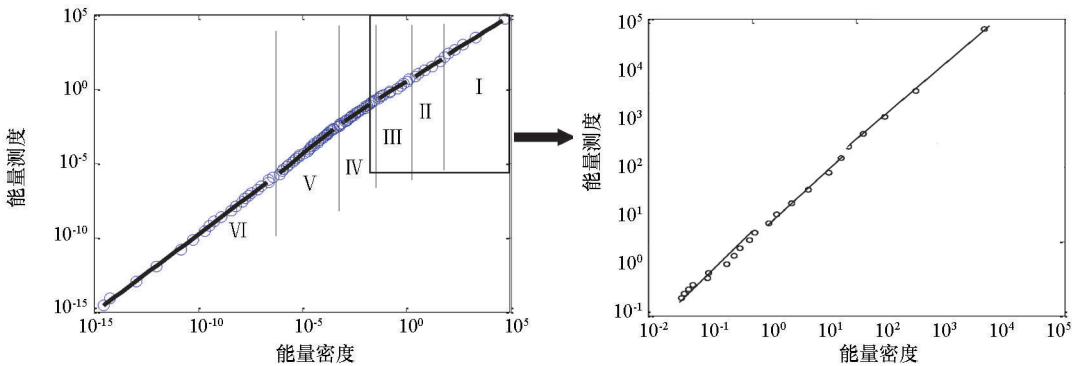


图 6 M8_H 分形奇异值分解图解

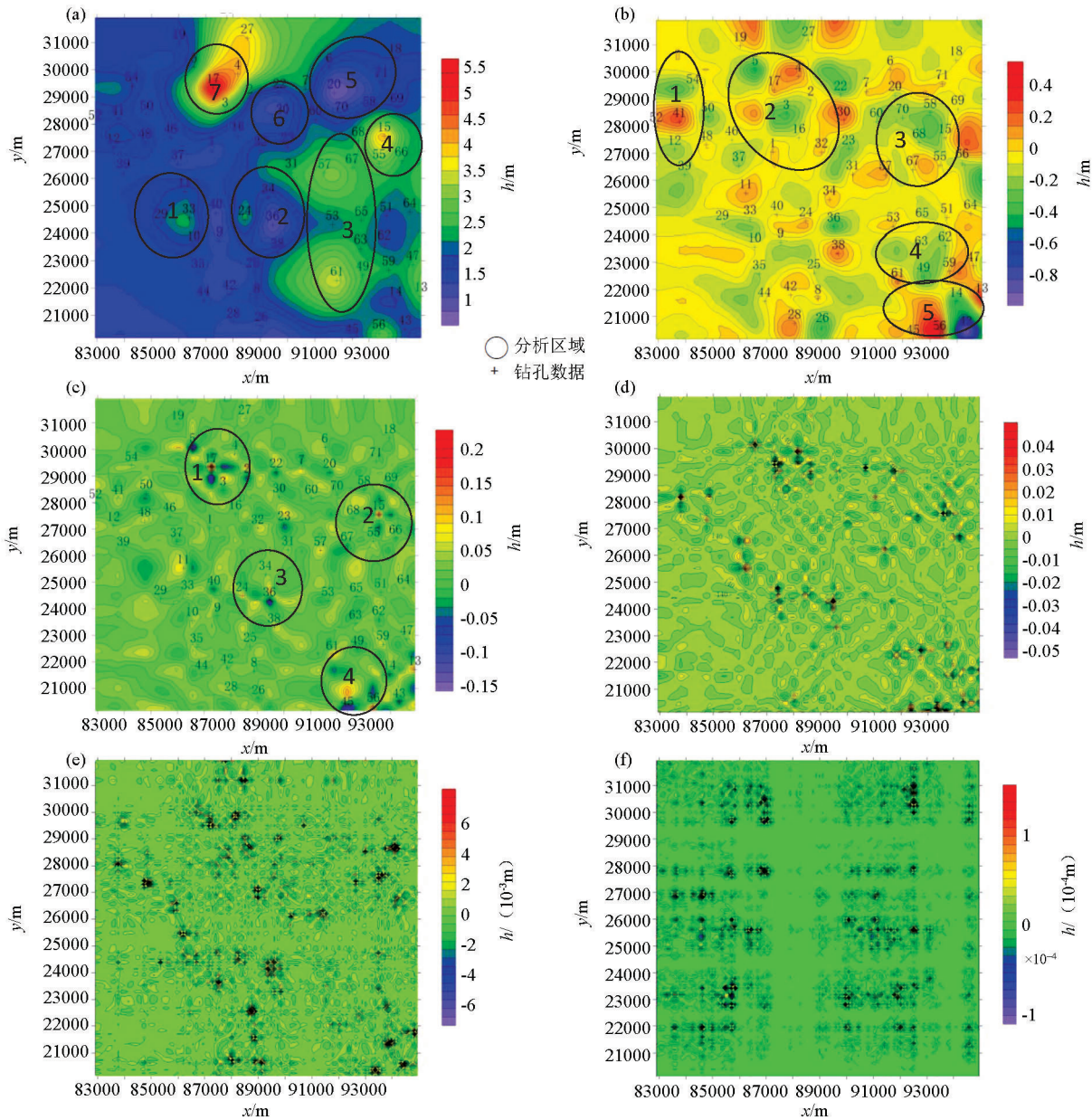
Fig.6 M8_H figure of fractal singular value decomposition

万方数据

渐减小,显示的信息越来越微弱,随机噪声越来越大,其中噪声大的可忽略不计,因此笔者只对利用前三段奇异值及其对应的特征子空间重建的异常图作解释,为便于分析对比,所分析的区域分别圈定编号,通过对比异常图与不同变量的等值线图,寻找二者对应关系,参考分析区域内的钻孔点在图2中实际位置所对应的地质条件,分别确定的每一段异常对应的地质控煤因素,并与对应分析得到的结果进

行对比。

图7a是利用图6第一段中的奇异值及其对应的特征子空间重建的异常图,可反映区域性的控煤因素,代表沉积背景。将图7a、b、c分别与图8~11的特征子空间重建的异常图,可反映区域性的控煤因素,代表沉积背景。将图7a、b、c分别与图8~11作对比,发现与图7a存在对应关系的是图9~11,即变量 SX_H 、 $XSHZ_H$ 、 $XSHZ_{YB}$ 的等值线图。具体表现



a—第一段奇异值对应子空间的异常重建;b—第二段奇异值对应子空间的异常重建;c—第三段奇异值对应子空间的异常重建;d—第四段奇异值对应子空间的异常重建;e—第五段奇异值对应子空间的异常重建;f—第六段奇异值对应子空间的异常重建

a—anomaly reconstruction of first segment singular value and corresponding subspace;b—anomaly reconstruction of second segment singular value and corresponding subspace;c—anomaly reconstruction of third segment singular value and corresponding subspace;d—anomaly reconstruction of fourth segment singular value and corresponding subspace;e—anomaly reconstruction of fifth segment singular value and corresponding subspace;f—anomaly reconstruction of sixth segment singular value and corresponding subspace

万方数据

图7 $M8_H$ 异常

Fig.7 The anomaly figure of $M8_H$

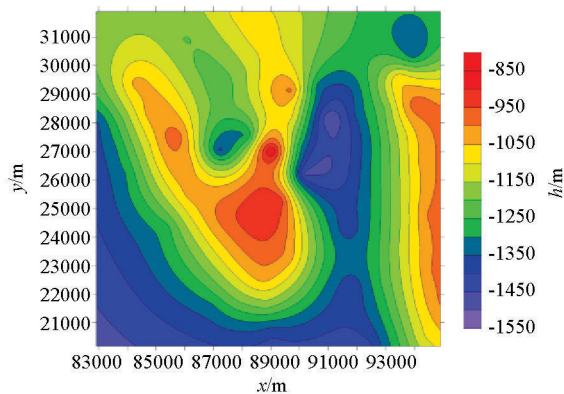


图 8 M8_{DG} 等值线

Fig.8 The equivalent figure of M8_{DG}

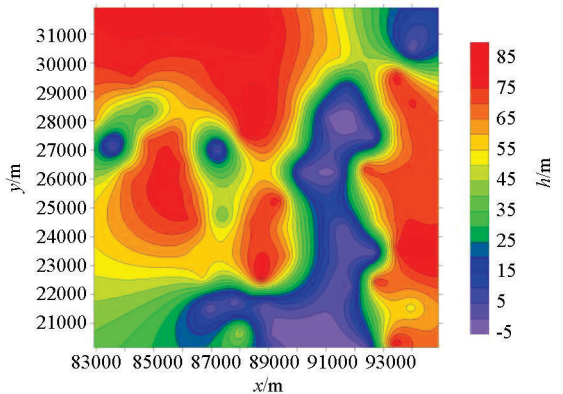


图 9 SX_H 等值线

Fig.9 The equivalent figure of SX_H

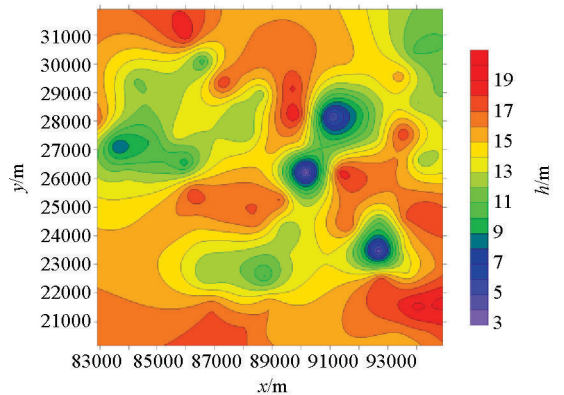


图 10 XSHZ_H 等值线

Fig.10 The equivalent figure of XSHZ_H

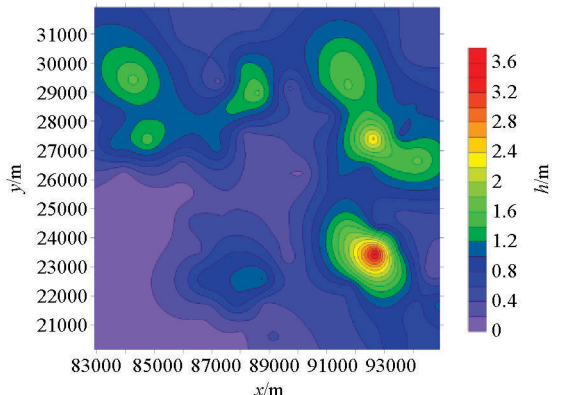


图 11 XSHZ_{YB} 等值线

Fig.11 The equivalent figure of XSHZ_{YB}

如下:① 异常图中煤层厚度值较小的地方与 SX_H 值 (图 9) 较大的地方相对应,反之则与变量 SX_H 值较小的地方相对应,如区域 1、区域 2、区域 3 和区域 6。变量 SX_H 可用来表征古地形,即古地形隆起处煤层厚度小,古地形低洼处煤层厚度较大,对比钻孔点位置与地质简图,区域 1 和区域 2 内的钻孔点分布于陈桥—潘集背斜轴部与两翼,其地形凸起处形成的煤层较薄,而区域 3 位于古地形低洼处,形成的煤较厚,区域 6 位于古地形隆起处,形成的煤较薄。对比图 8 和图 9,山西组厚度值小的区域 8 号煤层底面高程值同样较小,说明 8 号煤的沉积总体上继承了古地形,其厚度的变化与古地形有关。② 异常图中 3、4、7 所在区域 8 号煤层厚度值较大的区域, XSHZ_H 值(图 10)相对较大。其中区域 3、4 内的钻孔点位于断层 DF5 附近,区域 7 位于明龙山断层附近,正是由于这种同沉积断裂构造的存在,使得断裂带下降盘煤层较厚,上升盘煤层较薄,这说明煤层厚度的变化与同沉积构造有关;③ 异常图中区域 5 的贫煤区对应于 XSHZ_{YB} 的高值区,区域 7 的富煤区与 XSHZ_{YB} 值(图 11)较小的区域相对应,表现为煤层

厚度值从中心向外逐渐变小,对应的砂泥比值从中心向外逐渐变大。砂泥比一定程度上反映原始沉积环境与水动力条件的强弱,异常图与砂泥比等值线图的对对应关系说明厚煤层多位于原始沉积环境的分流间湾处,其水动力条件较弱,聚煤环境有利于形成厚煤层,而水动力条件强的沉积环境则不利于煤的形成。提取了奇异值分解后第一段重建的煤层厚度与各个变量作因子分析,其各变量间的相关关系与旋转后的成分矩阵见表 2 和表 3。

因子分析结果显示,成分 1 中载荷绝对值最大的两个变量是 SX_H 和 M8_{DG},可用来表示成分 1,由表 2 可知,变量 SX_H 和 M8_{DG} 的相关性为 0.635,其相关

表 2 变量间的相关关系

	SX _H	XSHZ _H	XSHZ _{YB}	M8 _{DG}	M8 _H
SX _H	1.000	0.309	-0.175	0.635	0.206
XSHZ _H	0.309	1.000	-0.298	0.238	0.233
XSHZ _{YB}	-0.175	-0.298	1.000	-0.128	0.090
M8 _{DG}	0.635	0.238	-0.128	1.000	-0.046
M8 _H	0.206	0.233	0.090	-0.046	1.000

表 3 第一段煤厚的成分矩阵

Table 3 Composition matrix of coal thickness in the first section

	成分 1	成分 2
SX _H	0.867	-0.140
XSHZ _H	0.240	-0.659
XSHZ _{YB}	-0.047	0.896
M8 _{DC}	0.921	-0.072
M8 _H	0.020	0.047

关性较大,再结合这两个变量的等值线图,进一步说明 8 号煤的沉积总体上继承了古地形,即控制煤层厚度的主要因素是古地形;成分 2 中载荷绝对值最大的两个变量是 XSHZ_{YB} 和 XSHZ_H,可用来表示成分 2,即控制煤层厚度的主要因素是岩相古地理环境中的水动力条件与同沉积构造。综上,由图 7a 与变量 SX_H、XSHZ_H、XSHZ_{YB} 的对应关系以及因子分析中成分 1 和成分 2 显示的结果可以说明第一段奇异值及对应特征子空间重建的异常图反映了古地形、同沉积构造与古地理环境中水动力条件的控制作用。

图 7b 是用图 6 第二段中的奇异值及其对应的特征子空间重建的异常图,是后期的随机事件产生的煤厚堆积,可反映局部控煤因素。煤层厚度在空间上表现为若干厚煤中心和贫煤中心相间分布,右下角区域 5 出现一个 SN 向展布的富煤带和贫煤带,北部区域 1 和 2 为两个较高值中心和两个较低值中心。将图 7b 分别与图 8~11 作对比,发现图 7b 与各个变量的对应关系已不太明显,部分区域与图 9、10、11 存在一定的对应关系,即与变量 SX_H、XSHZ_H、XSHZ_{YB} 相对应。主要表现为异常图中的区域 1 和区域 5 的富煤中心和贫煤中心分别与变量 SX_H (图 9) 的较低值与较高值对应,这与古地形的不均匀沉降有关,其他大部分区域的较高值和较低值分别与变量 XSHZ_H 的高值和低值 (图 10) 相对应 (如区域 2、3、4),而与变量 XSHZ_{YB} (图 11) 的低值与高值相对应 (如区域 1、3、4),这说明煤层厚度在空间上表现出的薄厚变化与同沉积构造和古地理环境中的水动力条件有关,水动力条件弱,其弱氧化还原环境更容易成煤,且厚煤层多分布于古地理环境的分流间湾处。提取了奇异值分解后第二段重建的煤层厚度与各个变量作因子分析,结果见表 4。

因子分析结果显示成分 1 中载荷绝对值最大的两个变量是 SX_H 和 M8_{DC},与表 3 成分 1 的结果一致,同样说明控制煤层厚度的主要因素是古地形;成分 2 中载荷绝对值最大的两个变量是 M8_H 和 XSHZ_H,变量 XSHZ_{YB} 次之,即控制煤层厚度的主要

表 4 第二段煤厚的成分矩阵

Table 4 Composition matrix of coal thickness in the second section

	成分 1	成分 2
SX _H	0.880	0.129
XSHZ _H	0.332	0.704
XSHZ _{YB}	-0.194	-0.591
M8 _{DC}	0.870	0.064
M8 _H	-0.236	0.712

因素是同沉积构造,而岩相古地理环境中的水动力条件的控制作用较小。因此由图 7b 与变量 SX_H、XSHZ_H、XSHZ_{YB} 的对应关系以及因子分析的结果可知该区域影响煤层厚度的主要控制因素是古地形与同沉积构造,古地理环境中的水动力条件对煤层厚度的影响相对较小。

图 7c 是用图 6 第三段中的奇异值及其对应的特征子空间重建的异常图,煤层厚度的分布规律已不明显,富煤带和贫煤带主要分布于异常图的北部、东部和东南部,如区域 1、2、3、4,同样反映局部控煤因素。将图 7c 分别与图 8~11 对比,发现总体上异常图中煤层厚度值较大的区域与 XSHZ_H 值较大的区域 (图 10) 相对应 (如区域 1、2 中的富煤中心),而与 XSHZ_{YB} 值小的区域 (图 11) 对应 (如区域 1、2、4 中的富煤中心);除了右下角的区域,煤层厚度值较小的区域与 SX_H 值较大的区域 (图 9) 对应 (如区域 1 和区域 3 中的贫煤中心);提取了奇异值分解后第三段重建的煤层厚度与各个变量作因子分析,其结果如表 5 所示。

表 5 第三段煤厚的成分矩阵

Table 5 Composition matrix of coal thickness in the third section

	成分 1	成分 2
SX _H	0.871	0.168
XSHZ _H	0.303	0.724
XSHZ _{YB}	-0.182	-0.560
M8 _{DC}	0.890	0.049
M8 _H	-0.152	0.673

表 5 显示的成分 1 与成分 2 上的载荷值所表现出来的主要控煤因素与表 4 一致,即图 7c 所反映的主要控煤因素与图 7b 一致,为古地形与同沉积构造,而古地理环境中的水动力条件对煤层厚度的影响较小。

综上,利用奇异值分解的方法对每一段中的奇异值及其对应的特征子空间进行了重建,并分别将图 7a、b、c 与各个变量作对比,结合因子分析法得到的成分矩阵提取了第一段对应的区域控煤地质因素与第二、三段对应的局部控煤地质因素,但总体来说

该地区的主要控煤地质因素是古地形、同沉积构造与古地理环境中的水动力条件,这与通过对应分析得到的控煤因素一致。

5 结论

本研究尝试通过分形奇异值分解的方法对淮南潘集煤矿(外围)的主要控煤因素作定量分析,并成功得出该地区煤层厚度的主要控制因素。笔者根据煤层厚度的分形特征和广义自相似性,利用奇异值分解的方法对场数据分解并重建,将重建后的异常信息分别与不同变量对比,寻找异常信息与变量之间的对应关系,并结合因子分析法得到的成分矩阵定量分析了重建后的异常图反映出的煤层厚度的区域控制因素与局部控制因素,并且与对应分析得到的煤层厚度主控因素均一致,验证了奇异值分解法在研究煤层厚度控制因素方面的有效性。

在对比重建后的异常与各个变量之间的关系时发现,异常图中各个子区域的厚度变化并不完全与某一特定的变量相对应,即各个子区域的控煤因素有所不同,本研究只做了一个地区控煤因素组合的定量分析研究,而通过奇异值分解法显然能够确定每个子区域煤层厚度的控制因素。相比对应分析而言,奇异值分解能够根据沉积背景和异常提取出对应的区域控煤地质因素和局部控煤地质因素,而且能够查明每一子区域煤层厚度的主要控制因素,在煤层厚度控制因素的定量分析以及在地学研究方面的应用更具优势。

参考文献(References):

[1] 刘程,李向东,杨守国.地质构造对煤层厚度的影响研究[J].煤矿安全,2008(5):14-16.
Liu C, Li X D, Yang S G. Study on influence of geologic structure on coal seam thickness[J]. Safe in Coal Minesty,2008,(5):14-16.

[2] 李聪聪,孙顺新,张光超,等.滇东北上二叠统可采煤层变化规律及控制因素[J].中国地质,2014,41(6):2110-2121.
Li C C, Sun S X, Zhang G C, et al. Variation regularity and control factors of the Upper Permian mineable coal seams in northeastern Yunnan Province[J]. Geology in China, 2014, 41(6): 2110-2121.

[3] 刘衡秋,刘钦甫,彭苏萍,等.淮南煤田第四含煤段砂体的演化特征及对煤层厚度的控制[J].煤田地质与勘探,2005,33(1):7-10.
Liu H Q, Liu Q F, Peng S P, et al. Evolvement characteristic of sand bodies in the fourth coal-bearing interval and its control on coal thickness, Huainan coalfield[J]. Coal Geology & Exploration, 2005,33(1):7-10.

[4] 刘星.煤炭资源空间分布分形特征和厚度变化规律分形滤波方

法研究[J].金属矿山,2017(10):81-88.

Liu X. Fractal Character of Coal Resources Distribution and the Spatial Distribution Law of Coal Thickness based on S-A method [J]. Metal Mine, 2017 (10):81-88.

[5] 曹代勇,刘钦甫,彭苏萍,等.超化井田二1煤层厚度变化规律定量研究[J].煤田地质与勘探,1998,26(5):28-32.
Cao D Y, Liu Q F, Peng S P, et al. Quantitative analysis on the thickness variation of NO.2-1 coal seam in chaohua mine field[J]. Coal Geology & Exploration,1998,26(5):28-32.

[6] 夏玉成,胡克兴.对应分析在控煤因素研究中的应用[J].西安矿业学院学报,1986,37(3):60-65.
Xia Y C, Hu K X. Application of correspondence analysis in the study of coal control factors[J]. Journal of Xi'an University of Science & Technology, 1986,37(3):60-65.

[7] 李庆谋,成秋明.分形奇异(特征)值分解方法与地球物理和地球化学异常重建[J].地球学报:中国地质大学学报,2004,29(1):109-118.
Li Q M, Cheng Q M. Fractal singular-value (egin-value) decomposition method for geophysical and geochemical anomaly reconstruction[J]. Earth Science:Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(1):109-118.

[8] 成秋明.多重分形与地质统计学方法用于勘查地球化学异常空间结构和奇异性分析[J].地球科学:中国地质大学学报,2001,26(2):161-166.
Cheng Q M. Multifractal and geostatistic methods for characterizing local structure and singularity properties of exploration geochemical anomalies[J]. Earth Science : Journal of China University of Geosciences, 2001,26(2):161-166.

[9] Zuo R G, Cheng Q M, Agterberg F P, et al. Application of singularity mapping technique to identification of loacal anomalies using stream sediment geochemical data, a case study from Gangdese, Tibet, western China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2009, 101:225-235.

[10] 成秋明.成矿过程奇异性与矿床多重分形分布[J].矿物岩石地球化学通报,2008,27(3):298-305.
Cheng Q M. Singularity of mineralization and multifractal distribution of mineral deposits[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry,2008,27(3):298-305.

[11] Cheng Q M. Singularity theory and methods for mapping geochemical anomalies caused by buried sources and for predicting undiscovered mineral deposits in covered areas[J].Journal of Geochemical Exploration, 2012, 122:55-70.

[12] 康春玉,章新华.一种基于奇异值分解的自适应降噪方法[J].声学技术,2008,27(3):455-458.
Kang C Y, Zhang X H. An adaptive noise reduction method based Oil singularity value decompose[J]. Technical Acoustics,2008,27(3):455-458.

[13] 邢琮琮,吴燕凤,赵昕,等.奇异值分解(SVD)在位场数据去噪中的应用[J].世界地质,2016,35(4):1119-1126.
Xing C C, Wu Y G, Zhao X, et al. Application of singular value decomposition (SVD) de-noising in potential field data[J]. Global Geology,2016,35(4):1119-1126.

[14] 唐步尧,李智勇,孙星明.一种基于奇异值量化的鲁棒性水印算法[J].计算机工程与应用,2006,(26):63-67.
Tang B Y, Li Z Y, Sun X M. Robust watermarking algorithm based on quantization of singlar value[J]. Computer Engineering

and Applications, 2006, (26): 63 – 67.

[15] 李志星,石博强.自适应奇异值分解的随机共振提取微弱故障特征[J].农业工程学报,2017,33(11): 60 – 67.

Li Z X, Shi B Q. Extracting weak fault characteristics with adaptive singular value decomposition and stochastic resonance [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(11): 60 – 67.

[16] 于海征.基于奇异值分解的数字图像的特征提取[J].工程数学学报,2004,21(8): 131 – 134.

Yu H Z. Feature extraction of digital Image on singular value decomposition [J]. Chinese Journal of Engineering Mathematics, 2004, 21(8): 131 – 134.

[17] 陆红艳.基于奇异值分解与稀疏表示的人脸识别方法[D].南京:南京邮电大学,2014.

Lu H Y. Face recognition based on image sparse representation and singular value decomposition [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2014.

[18] 卜军,沈书豪,谢焰.潘集深部勘查区山西组煤层发育及顶底板工程地质特征[J].中国煤炭地质, 2017, 29(8): 43 – 47.

Bu J, Shen S H, Xie Y. Shanxi formation coal seam development and roof, floor engineering geological features in Panji coalmine deep part exploration area [J]. Coal Geology of China, 2017, 29(8): 43 – 47.

[19] 郭鹏飞.淮南潘集深部 13-1 煤层孔隙结构特征分析[D].淮南:安徽理工大学,2017.

Guo P F. Study on pore structure characteristics of deep-seated coal seal No.13-1 from Panji Huainan area [D]. Huainan: Anhui University Of Science & Technology, 2017.

[20] 刘会虎,兰天贺,胡宝林,等.淮南潘集外围深部煤层气地球化学特征及成因[J].煤炭学报,2018,43(2): 498 – 506.

Liu H H, Lan T H, Hu B L, et al. Geochemical characteristics and its origins of CBM in deep-seated coal seam around Panji mining area of Huainan [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 498 – 506.

[21] 张小军,陶明信,王万春,等.淮南潘集、张集煤矿次生物气地球化学特征[J].天然气工业,2008,28(7): 34 – 38.

Zhang X J, Tao M X, Wang W C, et al. Geochemical behaviors of secondary biogas in Panji and Zhangji coal mines in Huainan coal field [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(7): 34 – 38.

[22] 李庆谋,刘少华.GIS 环境下地球物理信号的奇异值分解、多维分形特征与应用[J].地球物理学进展,2003,18(1): 97 – 102.

Li Q M, Liu S H. Geophysical signal decomposition by singular method and application in GIS [J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(1): 97 – 102.

[23] 周顶,陈永清,赵彬彬.奇异值分解技术及地球化学块体方法在南黄岗—甘珠尔庙成矿带找矿中的应用[J].中国地质,2014, 41(2): 621 – 637.

Zhou D, Chen Y Q, Zhao B B. The application of singular-Value decomposition (SVD) and geochemical blocks methods to the prospecting in southern Huanggang—Ganzhu’ermiao metallogenic belt [J]. Geology in China, 2014, 41(2): 621 – 637.

[24] 刘霞,王运锋.基于最小二乘法的自动分段多项式曲线拟合方法研究[J].科学技术与工程,2014,14(3): 55 – 58.

Liu X, Wang Y F. Research of automatically piecewise polynomial curve-fitting method based on least-square principle [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(3): 55 – 58.

[25] 李晓晖,袁峰,贾蔡,等.基于反距离加权 and 克里金插值的 S-A 多重分形滤波对比研究[J].测绘科学,2012, 37(3): 87 – 89.

Li X H, Yuan F, Jia C, et al. Contrastive study of S-A multifractal filtering method based on inverse distance weighted and Kriging interpolation [J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(3): 87 – 89.

A study of fractal singular value decomposition method for controlling factors of coal seam thickness

SUN Ya-Nan¹, LIU Xing², ZHAO Zhi-Gen¹

(1.Survey School, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232000, China; 2.Earth and Environment School, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232000, China)

Abstract: The thickness distribution of coal seams results from the combined control of various geological factors, and the control factors of coal are different in different regions. Previous studies have focused on qualitative comparative analysis, and hence it is very difficult for them to identify accurately the control factors and their distribution. In this study, according to the multi-fractal characteristics and the generalized self-similarity principle of the coal seam thickness spatial distribution, the authors transformed coal seam thickness into feature space and performed singular value decomposition. Based on the fractal law of energy measure and energy spectral density, the authors used the least squares method to fit singular value decomposition figure into multipul lines, determined different inflection points, selected the singular value and the corresponding feature subspace in the first three sections for reconstruction, compared anomalies after reconstruction with various variables that affect the thickness of coal seams, extracted various implicit geological factors for coal control, and thus realized the quantitative analysis of controlling factors of coal seam thickness. The authors analyzed the No. 8 main coal seam in Panji coal mine (peripheral) of Huainan as a study case, detected the fact that the main control factors for the thickness of coal seam in this area are ancient terrain, same sedimentary structure and hydrodynamic conditions in ancient geography, and compared the results with the control factors obtained by the corresponding analysis. The results show the effectiveness of this method in quantitative analysis.

Key words: control coal factor; quantitative analysis; singular value decomposition; space reconstruction; abnormal figure