

引用格式:张英慧,王伟,高星,等.2000-2014年中国重特大煤矿事故时空分布分形特征[J].地球信息科学学报,2016,18(9):1191-1198. [Zhang Y H, Wang W, Gao X, *et al.* 2016. The fractal characteristics of the temporal-spatial distribution of coal mine accidents in China from 2000 to 2014. *Journal of Geo-information Science*, 18(9):1191-1198. ] DOI:10.3724/SP.J.1047.2016.01191

# 2000-2014年中国重特大煤矿事故时空分布分形特征

张英慧<sup>1,2</sup>, 王伟<sup>1</sup>, 高星<sup>1</sup>, 伍宇明<sup>1,2\*</sup>

1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049

## The Fractal Characteristics of the Temporal-Spatial Distribution of Coal Mine Accidents in China from 2000 to 2014

ZHANG Yinghui<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, GAO Xing<sup>1</sup> and WU Yuming<sup>1,2\*</sup>

1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The frequent occurrence of coal mine accidents has brought great losses to people's lives and threatened the safety of our country and residents. The fractal theory is a newly developed subject in recent years, and it has been turned into a powerful tool to describe the nonlinear problems. In this paper, analyses and discussions on the fractal characteristics of the temporal-spatial distribution and relativity as well as the regularity of the temporal distribution of the national catastrophic coal mine accidents from 2000 to 2014 in China have been calculated using the relevant methods of fractal theory. Firstly, based on previous studies, this paper summarized the coal mine accidents occurred between 2000 and 2014 in China and obtained the time of occurrence, latitude and longitude for each coal mine accident. Secondly, the grid method is used to measure the number of accidents in grids which cover the area of the coal mine accidents at different grid scale levels, including scales for the national wide region, the three dominating physical geographical regions and the arid and humid regions. We firstly numerate the accidents in every grid and calculate the information content for different grid scales. Then, a linear fit for the logarithms of the information content and grid scale is calculated, and as a result the absolute value of the line slope is taken as the fractal dimension. Finally, the Hurst exponent of the time series of the coal mine accidents is obtained by adopting the method of resealed range analysis (R/S Analysis). Results show that the fractal characteristics of the spatial distribution of China's coal mine accidents are objectively existent. But the fractal dimension values of the spatial distribution of the coal mine accidents in different regions are significantly different. Between 2000 and 2014, the number of total accidents and deaths peaked at 2005, and then it decreased gradually indicating that the safety situation of China's coal mine production keeps improving. The Hurst exponent of the time series obtained from the R/S analysis indicates that the fractal characteristics of the time series objectively exist and the decreasing trend is enhanced. Some opinions regarding the applications of fractal theory in coal mine accidents are put forward in the end.

**Key words:** coal mine accident; temporal-spatial distribution; fractal theory; fractal dimension; Hurst exponent

\*Corresponding author: WU Yuming, E-mail: wymc817@163.com

收稿日期 2015-10-30;修回日期:2016-03-07.

基金项目 国家自然科学基金项目(41374061,41574036,41130419)。

作者简介 张英慧(1992-),男,山东临沂人,硕士生,研究方向为煤矿事故分析与数据挖掘。E-mail: zyh1992@139.com

\*通讯作者:伍宇明(1989-),男,北京人,博士生,研究方向为灾害GIS。E-mail: wymc817@163.com

**摘要** 本文汇总整理了2000–2014年中国发生的472起重特大煤矿事故,获得其空间分布状况;基于分形理论,利用网格法统计不同网格尺度下覆盖重特大煤矿事故的非空网格中的事故数量,计算煤矿事故的全国、三大自然地理区以及干湿分区的分维值,分析其空间分布分形特征;利用R/S方法研究15年来重特大煤矿事故发生的时间分形特征。研究表明,从全国范围来看,重特大煤矿事故具有较好的空间分形特性,但不同区域的重特大煤矿事故的分形特性却具有很大差别。15年来发生重特大事故数量及事故死亡人数逐年下降,由R/S分析得到的Hurst指数表明事故时间序列的分形特征客观存在,并且年发生事故数量及事故死亡人数减少趋势。

**关键词** 重特大煤矿事故;时空分布;分形;分维值;Hurst指数

## 1 前言

目前煤炭资源是中国主要的消耗能源,2014年煤炭能源消费占能源消费总量的66%,保证煤炭产量事关国民经济的健康发展。但是由于中国地质地形以及气候条件复杂,煤矿自然灾害严重,水、火、瓦斯、煤、尘、地压、地热等多种灾害聚集,而且中国的煤矿绝大部分是井工开采,开采平均深度深,其中一半的矿井是高瓦斯矿井<sup>[1]</sup>。中国煤矿安全生产形势却不容乐观,2014年百万吨死亡率为0.25,是先进产煤国家的10倍,煤矿工人的生命安全得不到保障,一系列煤矿事故的发生给国家和人民带来巨大的生命财产损失,影响社会稳定和经济发展。改善煤矿安全生产现状是中国煤炭资源供应稳定、保障经济发展的关键,更是促进社会稳定、保障人们生命安全的必然要求。重特大煤矿事故导致死亡人数多、经济损失大,对社会生活影响程度深。由于重特大事故发生的偶然性低,事故信息保存完整,有利于对事故发生规律的全面把握,针对重特大煤矿事故的研究一直是该领域的研究热点。

煤矿事故是一个复杂的非线性系统,多种不确定因素综合作用导致事故的发生。对这些因素很难利用现有科学体系进行量化,同时煤矿事故发生的演化过程也是由各子系统的内部因子和外部环境共同作用下完成<sup>[2]</sup>。目前对煤矿安全事故时空分布规律的研究大都停留在传统的统计学领域。然而,由于煤炭生产系统的非线性耦合特征及其众多的影响因素,对煤矿事故常规的统计分析并不能对其规律的把握取得很好的效果。近年来,随着分形理论的快速发展,在各领域取得了广泛的应用,分形理论已经成为解决煤炭安全生产系统等各类非线性复杂系统问题的重要工具<sup>[3]</sup>。王修才<sup>[4]</sup>研究了煤矿透水事故的分形特征,认为煤矿透水事故空间分布分形特征客观存在。肖素丽<sup>[5]</sup>以容量维为衡量值研究了2001–2010年中国重特大煤矿事故的时空

分布分形特征,结果表明煤矿事故的分布在全国范围内具有明显的分形特征。郝仲熙、李润求、王汉斌、刘明举<sup>[5–8]</sup>等做了煤与瓦斯突出的分形预测研究,对煤与瓦斯突出的影响因素做出一些有利的判断。施式亮<sup>[9]</sup>等对1958–2003年的瓦斯爆炸事故时间序列进行R/S分析,结果表明分形维数可以从整体上描述煤矿瓦斯爆炸事故的动态变化特征。这些研究多注重利用分形理论研究某一事故因子,对于空间分形特征的研究忽略了煤矿事故在自然区划中分形特征的差异,且分形特征描述局限于采用容量维。

本文利用发生在中国2000–2014年重特大煤矿事故的发生时间和经纬度等数据,将煤矿事故看作点状地理事物,利用网格法计算全国及不同地理分区的重特大煤矿事故空间分布信息维数,分析其分形特征,并基于R/S时间序列分析方法研究重大煤矿事故发生的时间分形特征,及其相关规律。

## 2 研究方法

Mandelbrot于20世纪70年代创立了分形理论,首次阐明了分形思想,提出了分形理论的2个重要概念—自相似性(Self-Similarity)和分维数(Fractal Dimension)<sup>[10]</sup>,并于1982年提出了分形的数学定义:如果一个集合在欧式空间中的豪斯多夫维数 $D_H$ (Hausdorff Dimension)严格大于其拓扑维数 $D_T$ ,则该集合为分形集,简称为分形<sup>[11]</sup>。分形理论的诞生为人类认识世界提供了一种新的方法和理论。

### 2.1 重特大煤矿事故空间分布分形信息维数计算

重特大煤矿事故作为典型的时空序列点状地理事物,其分形特征和分维值的分析与计算方法主要包括可以拟合无标度区间的变维分形方法<sup>[12]</sup>,以及能够分类统计每个度量客体内的研究对象个数的信息维方法<sup>[13]</sup>。其中,信息维更有利于表达研究

对象的分形特征。本文从研究对象的实际情况特点出发,采用分形研究中最常用的分维计算方法——网格法,对中国重特大煤矿事故的空间分布的分形信息维进行计算。

网格法计算分形信息维的基本思路是用不同尺度的正方形网格(网格边长 $r$ )去覆盖研究对象(图1),进一步计数每个非空格子中拥有的个体数目 $N(i)$ 。若样方内总个体数目为 $N$ ,那么单一格子中的概率为 $P(i)=N(i)/N$ ,信息量为 $I(i)=-P(i)\ln P(i)$ ,则该网格边长时总的信息量为 $I(r)=\sum I(i)$ 。将信息量 $I(r)$ 与之相应的网格边长 $r$ 在双对数坐标下利用最小二乘法进行线性拟合,得线性回归方程(式(1)),所得拟合直线斜率的绝对值即为分形信息维数估计值。

$$\ln I(r) = -D \ln r + A \quad (1)$$

式中: $r$ 为覆盖有煤矿事故发生点的正方形网格边长; $I(r)$ 为 $r$ 尺度下总信息量; $A$ 为常数; $D$ 为研究对象的分维值,其值等于式(1)斜率的绝对值<sup>[14]</sup>。

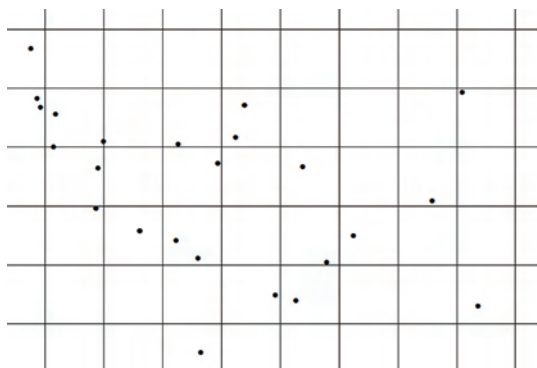


图1 网格法计算分形维数图示

Fig.1 Calculation of fractional dimension using the grid method

## 2.2 重特大煤矿事故发生时序变化分形维数计算

重特大煤矿事故的发生不仅具有空间属性,而且表现为时间轴上的一系列事件,因此研究其在时间轴上的分布特征往往对于认识现象发生本质及预报其发生具有重要意义。本文采用R/S(rescaled-range)分析法对于中国重特大煤矿事故的时间序列变化分形特征进行量化。该方法是分形理论中分析时间序列分形特征最常用的方法之一,其主要原理简述如下:

假设有一已知时间序列为 $\{\xi_i\}_{i=1}^N$ ,用 $\tau$ 个时间数据的标准差 $S(\tau)$ 去除极差 $R(\tau)$ ,得到 $R(\tau)/S(\tau)$ ,根

据计算得到的 $[R(\tau)/S(\tau)](\tau=2,3,\dots,N)$ 值,对双对数坐标 $\{\ln \tau, \ln[R(\tau)/S(\tau)]\}$ 进行拟合,得线性回归方程(式(2))。

$$\ln[R(\tau)/S(\tau)] = H \ln(\tau) + A \quad (2)$$

式中: $\tau$ 为时间序列( $\tau=2,3,\dots,N$ ); $S(\tau)$ 是时间序列数据的标准差; $R(\tau)$ 是时间序列累计离差的极差; $A$ 为常数; $H$ 为时间序列的Hurst指数,即直线斜率。根据Hurst指数 $H$ 定性分析该时间序列的发展趋势。 $H$ 以0.5为界代表不同的意义:

(1)  $H=0.5$ 时,时间序列为普通Brown运动,要素之间相互独立,表现为无规则性,无法预测未来的发展趋势;

(2)  $0 \leq H < 0.5$ 时,时间序列表现为反持久性,该时间序列增长或减少的趋势会反转,即由增加趋势改变为减少趋势,而减少趋势则改变为增加趋势, $H$ 越接近于0反持久性越强;

(3)  $0.5 < H \leq 1$ 时,时间序列表现为持久性,该时间序列增长或减少的趋势保持不变, $H$ 越接近1持久性越强<sup>[15-16]</sup>。

## 3 数据来源及预处理

本文根据《煤矿生产安全事故报告和调查处理规定》确定的煤矿事故等级,将造成10人以上30人以下死亡,或者50人以上100人以下重伤,或者5000万元以上1亿元以下直接经济损失的事故定为重大事故;造成30人以上死亡,或者100人以上重伤(包括急性工业中毒,下同),或者1亿元以上直接经济损失的事故确定为特别重大事故<sup>[17]</sup>。此类事故的相关数据信息一般保存非常完好。

按照上述重特大煤矿事故划分标准和完整性、准确性原则要求,从国家安全生产监督管理总局、各地方安全监察局、安全生产网、煤炭安全网,以及前人研究整理加工的数据中,选取中国2000–2014年所有煤矿重特大煤矿事故数据信息,包括事故发生时间、地点、经度、纬度、事故类型、死亡人数6个维度。利用ArcGIS生成中国2000–2014年煤矿重特大煤矿事故点状分布图,作为网格法计算中国2000–2014年煤矿重特大事故空间分布分形信息维数的基础图件;同时,统计不同年份的事故数量,生成时间序列 $\{\xi_i\}_{i=1}^N$ ,并利用R/S分析方法计算Hurst指数,分析事故发生时间变化的分形特征。

## 4 中国重特大煤矿事故时空分布分形特征

### 4.1 中国重特大煤矿事故空间分布分形特征

2000–2014年中国共发生重特大煤矿事故472件,造成10 783人死亡,分布在全国32个省、自治区、直辖市(图2)。由图2可看出,15年的重特大煤矿事故主要分布在中国中东部的山西省、河北省、河南省等地,以及西南部的贵州省、四川省及重庆市等地。统计全国各省区重特大煤矿事故发生的数量(图3)可看出,山西省、贵州省以及湖南省等地事故数量较多,且各省区差异较大。有研究表明由

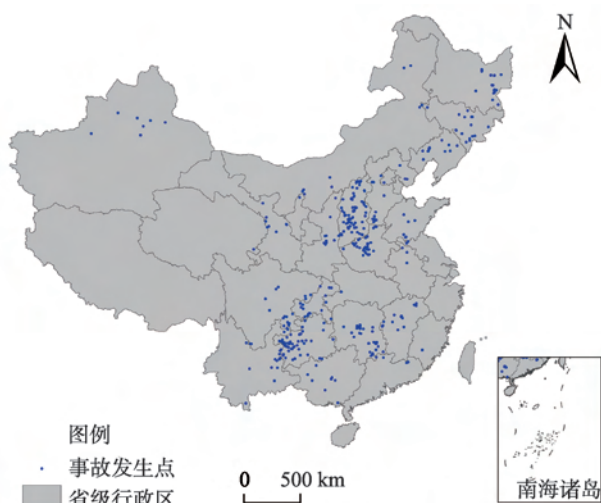


图2 2000–2014年中国重特大煤矿事故分布图

Fig.2 Spatial distribution of the national catastrophic coal mine accidents from 2000 to 2014

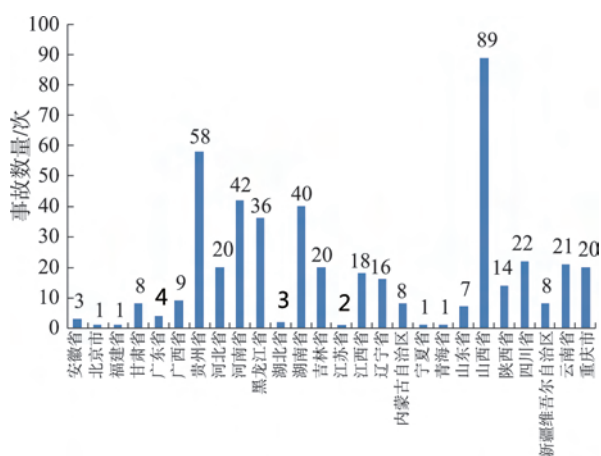


图3 2000–2014年中国重特大煤矿事故各省(市、自治区)分布统计图

Fig.3 Statistics of the national catastrophic coal mine accidents distributed in each province from 2000 to 2014

于地质、水文等原因,煤矿事故会沿着事故矿井周边向其他矿井“扩散”<sup>[18]</sup>,这种扩散表明煤矿事故分布具有明显的聚集性和空间相关性。因此,为探索中国重特大煤矿事故空间分布的规律性,寻求事故多发区域的共性,以加强多发地区的安全管理并降低事故的发生率。本文将从全国、三大自然地理区和四大干湿分区3个层面对中国重特大煤矿事故在空间分布的分形特征进行分析。

#### 4.1.1 中国重特大煤矿事故空间分形特征

利用网格法,对中国重特大煤矿事故空间分布的分形信息维数进行计算。首先分别生成网格大小分别为20、40、…、200 km的网格面;然后,将网格面与煤矿事故发生点进行Intersect(相交)操作,导出生成结果,计数每个非空格子中拥有的煤矿事故数目,计算获得各网格尺度下的信息量;最后,在双对数坐标下进行直线拟合,得到线性回归拟合的方程式(3)。

$$\ln I = -0.8226 \ln r + 8.2953 \quad (R^2 = 0.9637) \quad (3)$$

式中: $r$ 为正方形网格边长; $I$ 为 $r$ 尺度下信息量, $R$ 为相关系数。

根据显著性水平 $\alpha = 0.01$ ,当 $n = 10$ 时,相关系数的临界值 $R_{0.01} = 0.7645$ , $|R| > R_{0.01}$ 。这说明上述方程有效且2000–2014年全国范围的重特大煤矿事故空间分布具有显著的分形特征,其分形信息维数为式(3)斜率的绝对值,即0.8226。

#### 4.1.2 中国三大自然地理区重特大煤矿事故空间分形特征

研究表明,重特大煤矿事故的发生受地形、降水等因素的影响<sup>[19–20]</sup>。中国地域辽阔,受海拔、经纬度以及海洋季风等因素综合作用形成了特点各异的三大自然地理区,即东部季风区、西北干旱区和青藏高原区。东部季风区夏季受海洋季风影响显著,普遍高温多雨,冬季寒冷干燥。风向、降水、气温等随季节变化而有明显的更替,海拔较低,有许多广阔的平原和低山丘陵,煤矿开发利用率高,且因降水较多影响地质构造,易发生煤矿事故。西北干旱区海拔较高,气候干燥,气温年较差、日较差大,多大风天气,煤田分布较为集中,事故多发。青藏高原区海拔高、空气稀薄,冰川冻土发达,利用率低,煤矿生产较少。

由中国重特大煤矿事故在三大自然地理区的空间分布图(图4)可看出,重特大煤矿事故主要分布在东部季风区,共有451次事故发生在东部季风

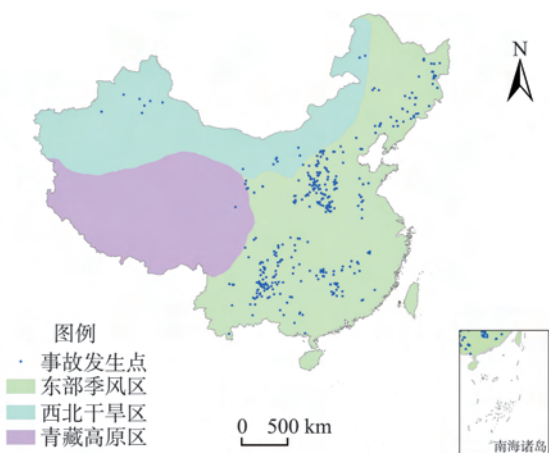


图4 2000–2014年中国重特大煤矿事故三大自然地理区分布图

Fig.4 Spatial distribution of the national catastrophic coal mine accidents in the three dominating physical geographical regions from 2000 to 2014

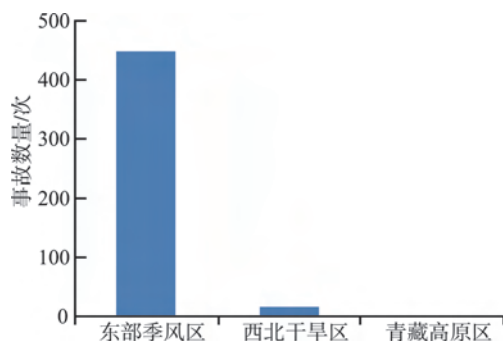


图5 2000–2014年中国重特大煤矿事故三大自然地理区统计图

Fig.5 Statistics of the national catastrophic coal mine accidents in the three dominating physical geographical regions from 2000 to 2014

区,西北干旱区及青藏高原区则分布较少(图5)。利用前文所述的网格法进一步分析其在不同自然地理分区中的分形特征,计算出中国三大自然地理区重特大煤矿事故空间分布的分形信息维数结果,如表1所示。

结果表明,东部季风区重特大事故数量多,在区域内呈现均匀分布,空间分布分形信息维数为0.8491,空间分形特征明显;西北干旱区重特大事故较少,分形信息维数为0.1817,空间分形特征不明显;青藏高原区海拔高,煤矿生产不发达,重特大煤矿事故较少,线性回归结果不能通过显著性检验,不具有空间分形特征。

#### 4.1.3 中国干湿分区重特大煤矿事故空间分形特征

地区降水量的不同对煤层发育、人为活动等产

表1 三大自然地理区重特大煤矿事故空间分布分维值  
Tab.1 Fractal dimension values for the space distribution of the catastrophic coal mine accidents in the three dominating physical geographical regions

	线性回归方程	R	是否通过显著性检验	D
东部季风区	$\ln I = -0.8491 \ln r + 8.3172$	0.9821	是	0.8491
西北干旱区	$\ln I = -0.1817 \ln r + 3.2823$	0.8854	是	0.1817
青藏高原区	$\ln I = -0.2226 \ln r + 1.9167$	0.6837	否	-

生影响,进而影响煤矿安全生产活动,进一步研究不同干湿条件煤矿事故的分形特征,根据中国降雨量大小与蒸发量和降水量关系,划分为半干旱区、半湿润区、干旱区、湿润区4大干湿分区,表征中国干湿状况的空间分布。中国重特大煤矿事故在干湿分区中的空间分布如图6所示。

从图6可看出,全国重特大煤矿事故主要分布在湿润区与半湿润区,具有较为明显的集聚性质,其中湿润区共发生261次事故,半湿润区共发生162次事故(图7)。分析各分区煤矿事故空间分布的分形特征,利用上的网格法计算出中国三大自然地理区重特大煤矿事故空间分布的分形信息维数,结果如表2所示。

从表2可看出,网格法得到的线性回归方程全部通过显著性检验,这说明全国重特大煤矿事故在4个干湿分区中都表现出分形特征,但各分区的分形特征差异较为明显,其中半湿润区及湿润区重特大煤矿事故较多,分布均匀,分形信息维数超过

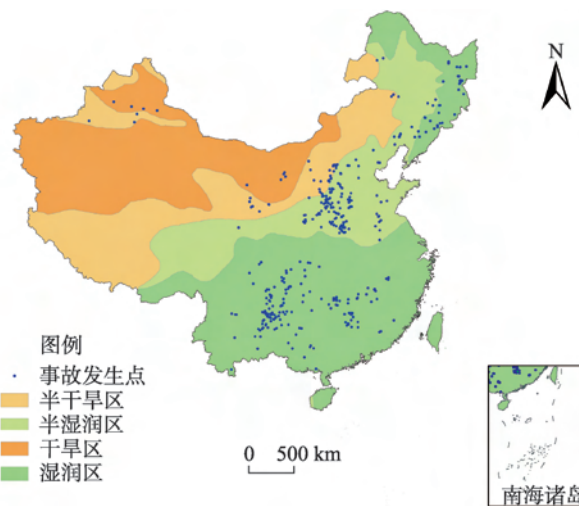


图6 2000–2014年中国重特大煤矿事故干湿分区分布图

Fig.6 Spatial distribution of the national catastrophic coal mine accidents in the arid and humid regions from 2000 to 2014

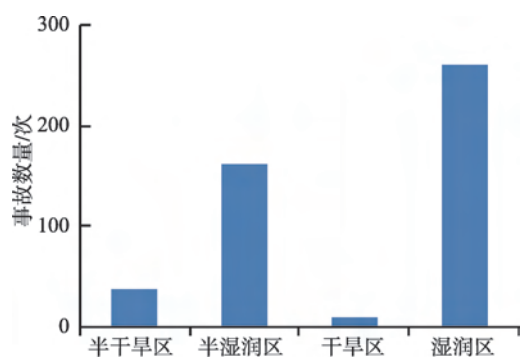


图7 2000–2014年中国重特大煤矿事故干湿分区统计图  
Fig.7 Statistics of the national catastrophic coal mine accidents in the arid and humid regions from 2000 to 2014

表2 干湿分区重特大煤矿事故空间分布分维值  
Tab.2 Fractal dimension values for the space distribution of the national catastrophic coal mine accidents in the arid and humid regions

	线性回归方程	R	是否通过 显著性检验	D
半干旱区	$\ln I = -0.5121 \ln r + 4.9568$	0.9699	是	0.5121
半湿润区	$\ln I = -0.7782 \ln r + 7.4979$	0.9810	是	0.7782
干旱区	$\ln I = -0.1604 \ln r + 2.5473$	0.8547	是	0.1604
湿润区	$\ln I = -0.7766 \ln r + 7.4893$	0.9811	是	0.7766

0.7,分形特征较为明显;干旱区事故空间分布分形信息维数仅为0.1604,分形特征不明显。

4.2 中国重特大煤矿事故时间分形特征

统计2000–2014年每年发生的重特大煤矿事故数量及造成的死亡人数,如表3所示。

从表3可发现,中国重特大煤矿事故及死亡人数,经历2000–2005年的高位状态在2005年达到峰值后开始呈明显的下降趋势,15年间事故数量下降了91%,死亡人数下降了92%,重特大事故的平均死亡人数也由2005年的30.6人/次降低到2014年的16.8人/次,表明了中国煤矿安全形势的好转。但为进一步说明15年间重特大煤矿事故数量及死亡人数变化幅度大小及变化趋势,本研究利用R/S分析方法进行分形研究。

对表4数据做散点图并利用最小二乘法对散点进行直线拟合,如图8、9所示。

根据图可知,相关系数 $R_{\text{事故次数}}=0.9430$ 、 $R_{\text{死亡人数}}=0.9642$ ,对线性回归结果进行大于0.01水平上的显著性检验( $n=14, R_{0.01}=0.661$ ),煤矿事故数据的 $\ln(\tau)$ 与 $\ln(R(\tau)/S(\tau))$ 具有很好的线性关系,表明煤矿事故

表3 2000–2014年中国重特大煤矿事故总体情况  
Tab.3 Number and deaths of the coal mine accidents from 2000 to 2014

年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
数量	59	44	49	46	36	56	35	31	28	22	14	22	12	13	5
死亡人数	1188	1006	1157	1211	934	1716	732	617	518	509	328	342	216	225	84

表4 2000–2014年中国重特大煤矿事故Hurst指数计算参数表  
Tab.4 Calculation procedure table of Hurst exponent for the coal mine accidents from 2000 to 2014

时间序列	年份	R <sub>事故次数</sub>	S <sub>事故次数</sub>	R <sub>死亡人数</sub>	S <sub>死亡人数</sub>	ln(R/S) <sub>事故次数</sub>	ln(R/S) <sub>死亡人数</sub>
1	2000	—	—	—	—	—	—
2	2001	7.50	7.50	91	91	0	0
3	2002	8.33	6.24	111	79.50	0.2899	0.3337
4	2003	9.50	5.77	134.5	79.98	0.4993	0.5198
5	2004	12.20	7.47	169.6	109.27	0.4909	0.4396
6	2005	18.33	7.63	514.0	250.58	0.8766	0.7185
7	2006	12.71	8.47	581.1	284.37	0.4067	0.7147
8	2007	23.00	9.42	791.3	316.37	0.8926	0.9167
9	2008	34.00	10.28	1159.3	345.08	1.1957	1.2118
10	2009	46.40	11.56	1459.2	360.07	1.3897	1.3993
11	2010	60.90	13.42	1803.3	388.26	1.5130	1.5357
12	2011	69.00	13.60	2083.0	402.61	1.6240	1.6436
13	2012	80.54	14.65	2377.8	422.62	1.7045	1.7275
14	2013	91.50	15.20	2626.7	433.84	1.7949	1.8008
15	2014	104.73	16.30	2911.9	452.17	1.8602	1.8625

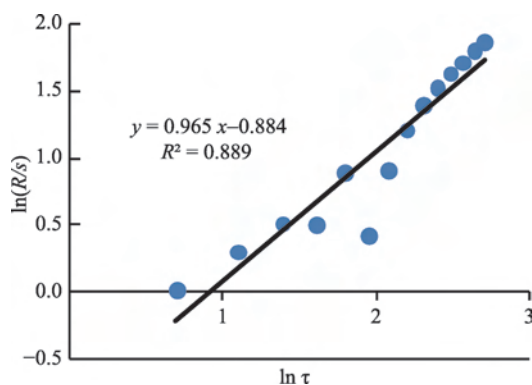


图8 事故次数时间序列曲线拟合图

Fig.8 Result of the R/S analysis of accident numbers

时间序列的分形特征客观存在。由图中直线方程可知, Hurst 指数  $H$  为直线斜率的绝对值, 即  $H_{\text{事故次数}}=0.965$ 、 $H_{\text{死亡人数}}=0.9715$ ,  $H>0.5$  且比较接近 1, 这说明中国煤矿事故时间序列表现为较强的持久性。统计分析可知, 中国煤矿安全事故发生的趋势明显下降, 故可初步预计在未来的一段时期内中国煤矿安全事故仍然会处于下降的趋势。

## 5 结论与讨论

本文运用分形理论和相关方法, 对中国煤矿 2000–2014 年的重特大煤矿事故数据进行时空分布分形特征进行研究, 得出以下结论:

(1) 中国不同区域重特大煤矿事故空间分布具有较明显的分形特征。全国范围内重特大煤矿事故空间分布的分形信息维数  $D_{\text{全国}}=0.6379$ , 分形特征明显; 自然地理分区中东部季风区和西北干旱区内具有明显的分形特征, 分维值为  $D_{\text{东部季风区}}=0.68$ 、 $D_{\text{西北干旱区}}=0.1577$ , 青藏高原区则不具有分形特征; 干湿分区中半干旱区、半湿润区、干旱区、湿润区都具有明显的分形特征, 分维值分别为  $D_{\text{半干旱区}}=0.424$ 、 $D_{\text{半湿润区}}=0.6814$ 、 $D_{\text{干旱区}}=0.1297$ 、 $D_{\text{湿润区}}=0.6312$ , 这说明中国煤矿安全事故空间分布分形特征客观存在; 但不同地区的分形特征具有较大的差异。

(2) 统计近 15 年中国重特大煤矿事故发生的次数及造成的死亡人数, 结果表明中国重特大煤矿事故发生的次数及造成的死亡人数总体上呈逐年下降的趋势; 运用分形理论计算煤矿事故数据时间序列的 Hurst 指数, 得到 Hurst 指数  $H_{\text{事故次数}}=0.965$ 、 $H_{\text{死亡人数}}=0.9715$ , 其值均处于 0.5~1 之间, 且接近 1。这说明中国煤矿安全事故时间序列表现为较强的持久性, 中国煤矿事故数量及造成的死亡人数在未

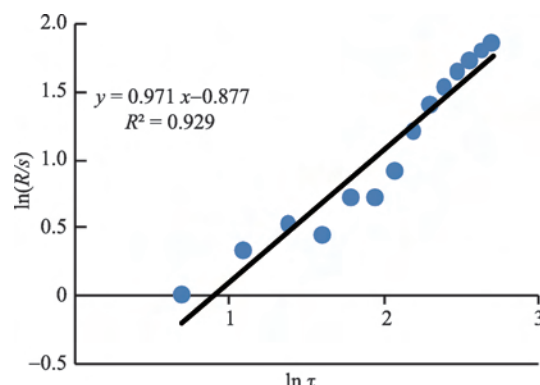


图9 死亡人数时间序列曲线拟合图

Fig.9 Result of the R/S analysis of accident deaths

来的发展过程将继续呈现下降的趋势, 煤矿安全生产形势不断好转。

(3) 重特大煤矿事故具有复杂的非线性特征, 中国不同空间范围的重特大煤矿事故空间分布分形信息维数揭示了该类事故空间集聚的差异性, 即分形维数越大, 说明事故空间分布越均匀, 反之事故空间分布就越不均匀; 分形特征越明显, 表明空间内的某一特殊普遍因子对事故的影响越大。如何通过分析重特大煤矿事故的分形特征去认识其发生和分布规律是今后研究的重要内容。

### 参考文献(References):

- [1] 苏苗罕. 美国联邦政府的煤矿安全生产监管制度研究[J]. 南京大学法律评论, 2014(1): 315-330. [ Su M H. On the federal coal mine safety regulation in the United States [J]. Nanjing University Law Review, 2014, 1: 315-330. ]
- [2] 薛振华. 煤矿安全事故致因因素研究[D]. 西安: 西北大学, 2010. [ Xue Z H. Study on causation factors of coal mine accidents[D]. Xi'an: Northwest University, 2010. ]
- [3] 肖素丽. 分形理论在煤矿安全事故分析中的应用[D]. 衡阳: 南华大学, 2011. [ Xiao X L. Application of fractal theory of analysis on accident of coal mine[D]. Hengyang: University of South China, 2011. ]
- [4] 王修才, 谢焱石, 邓文辉, 等. 基于分形理论的煤矿透水事故空间分布规律研究[J]. 煤炭与化工, 2014, 37(1): 20-23. [ Wang X C, Xie Y S, Deng W H, et al. Study on spatial distribution regularities flooding accident of coal mines based on fractal theory[J]. Coal and Chemical Industry, 2014, 37(1): 20-23. ]
- [5] 郝仲熙. 基于分形理论的煤矿瓦斯涌出规律预测研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2006. [ Hao Z X. Study about gas emission law based on fractal theory[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2006. ]

- [6] 李润求,施式亮,伍爱友,等.煤矿瓦斯灾害事故的分形特性[J].中国安全生产科学技术,2014,10(9):25-29. [ Li R Q, Shi S L, Wu A Y, *et al.* Research on fractal characteristics of gas accident in coal mine[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014,10(9):25-29. ]
- [7] 王汉斌.煤与瓦斯突出的分形预测理论及应用[D].太原:太原理工大学矿业工程学院,2009. [ Wang H B. Fractal forecast theory and its application of coal and gas outburst [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2009. ]
- [8] 刘明举,刘希亮.煤与瓦斯突出分形预测研究[J].煤炭学报,1998,23(6):616-619. [ Liu M J, Liu X L. Fractal prediction research of coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 1998,23(6):616-619. ]
- [9] 施式亮,李润求,何利文,等.基于分形学的瓦斯爆炸事故时序数据分析模型及应用[J].中国安全科学学报,2011,21(10):10-15. [ Shi S L, Li R Q, He L W, *et al.* Time series analysis model for gas explosion accidents based on fractal theory and its application[J]. China Safety Science Journal, 2011,21(10):10-15. ]
- [10] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain? statistical self-similarity and fractional dimension[J]. Science, 1967,165:636-638.
- [11] 朱华,姬翠翠.分形理论及其应用[M].北京:科学出版社,2011. [ Zhu H, Ji C C. Fractal theory and its applications [M]. Beijing: Science Press, 2011. ]
- [12] 谢嘉琼,易顺明.滑坡活动空间分布的多重分形特征及其预测意义[J].四川大学学报(工程科学版),2000,32(64):4-6. [ Xie J Q, Yi S M. Study on the multifractal of the spatial distribution of landslides activities and its significances[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2000,32(64):4-6. ]
- [13] 王忠志.基于GIS的重庆市地质灾害空间分布的分形分维研究[D].重庆:西南大学,2014. [ Wang Z Z. Study on the fractal dimension of spatial distribution of geological disasters in Chongqing based on GIS[D]. Chongqing: Southwest University, 2014. ]
- [14] 马克明,祖元刚.兴安落叶松种群格局的分形特征信息维数[J].生态学报,2000,20(2):187-192. [ Ma K M, Zu Y G. Fractal properties of the spatial pattern of *Larix gmelini* population--Information dimension[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000,20(2):187-192. ]
- [15] Rasheed B Q K, Qian B. Hurst exponent and financial market predictability[C]. IASTED Conference on Financial Engineering and Applications (FEA 2004), 2004:203-209.
- [16] Yang Y G, Yuan J F, Chen S Z. R/S analysis and its application in the forecast of mine inflows[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2006,16(4):425-428.
- [17] 国家安全生产监督管理总局.煤矿生产安全事故报告和调查处理规定[Z].2008-12-11. [ State Administration of Work Safety. Coal mine production safety accident report and the investigation and handling [Z]. 2008-12-11. ]
- [18] 陈波.煤矿灾害时空序列特征分析[J].地学前缘,2009,16(5):273-280. [ Chen B. Analysis on time-space characteristics of coalmine accidents[J]. Earth Science Frontiers, 2009,16(5):273-280. ]
- [19] 汪恩满,胡社荣,赵光杰,等.煤矿井下类泥石流灾害形成机理研究[J].煤炭科学技术,2014,42(9):130-133. [ Wang E G, Hu S R, Zhao G J, *et al.* Study on mechanism of similar debris flow disasters underground coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2014,42(9):130-133. ]
- [20] 王永红,沈文.中国煤矿水害预防及治理[M].北京:煤炭工业出版社:1996,24-28. [ Wang Y H, Shen W. Prevention and control of coal mine water disaster in China[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1996:24-28. ]