分形不变分布及其在山东地区金矿床中的应用

申 维[1,2]

1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083
2. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083

Shen Wei[1,2]

1. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*
2. *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing* 100083, *China*

Shen Wei. Fractal invariable distribution and its application in gold mineral deposits in Shandong Province, China. Earth Science Frontiers, **2008, 15(4): 065-070**

Abstract: The self-similarity is a common phenomenon in geology. It has been shown that geochemical element data, mineral deposit and its space distribution have fractal structures. A fractal distribution requires that the number of objects larger than a specified size has a power-law dependence on the size. This paper shows that a number of distributions, including power-function, Pareto, log-normal and Zipf, display fractal properties under certain conditions and that this may be used as the mathematical basis for developing fractal models for data exhibiting such distributions. The summation method is developed on the basis of fractal models to determine thresholds for Au data in Shandong Province, China. The anomalous area enclosed by contours which have contour values greater than or equal to threshold (200×10^{-9}) contain the known large-sized and super large-sized gold mineral deposits.

Key words: fractal modeling; fractal dimension; geological anomaly

摘 要:自相似性(标度不变性)是地学中的一个普遍现象。研究表明,地球化学元素含量、矿床储量规模及其空间分布具有分形结构。分形不变分布的特点要求大于某一尺度物体的数目与物体大小之间存在幂指数关系。论证了幂函数分布、帕累托分布、对数正态分布和齐波夫定律在一定条件下具有分形不变性质,它们是分形模型的数学基础。基于分形模型,用求和方法确定中国山东省金地球化学元素异常值范围。等值线大于或等于金地球化学元素临界值(200×10^{-9})围成的异常面积包含了已知的大型、超大型金矿床。

关键词:分形模型;分维数;地质异常值

中图分类号:P618.51;O231.4 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2321(2008)04-0065-06

分形和多重分形产生于尺度独立性过程的自相似自然结果,并且应用在孔隙分布、网络、大小分布和其他许多领域[1-2]。许多地质现象具有尺度不变性,例如岩石碎片、断层、地震、火山喷发、矿藏和油井的频度和大小之间的分布[3]。分形分布的特点要求大于某一尺度物体的数目与物体大小之间存在幂

收稿日期:2008-03-20;**修回日期**:2008-04-16
基金项目:国家重点基础研究发展计划"973"项目(2006CB701400);国家自然科学基金资助项目(40672196, 40638041)
作者简介:申 维(1957—),男,教授,博士生导师,数学地质专业,主要从事数学地质(非线性地质学)的科研和教学工作。E-mail: shenweihome@sina.com

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

指数关系。在分形概念被提出之前很长一段时间,人们从经验上就认识到幂指数型的统计关系适用于许多地质现象。

关于地质现象的统计分布,幂指数分布不是唯一,还有如正态分布和对数正态分布等其他种类。但是,幂指数分布是唯一不含特征分布长度的分布[4]。这样,幂指数分布可以应用于那些具有标度不变性的地质现象。如果一定数目的事件在统计上相互独立,那么,中心极限定理就提供了应用正态分布的基础,而标度不变性则提供了应用幂指数分形分布的基础。分形概念对连续分布的对象也适用。许多地球物理数据具有幂指数频谱,包括重力、地磁和地表地形。由于幂指数频谱由振幅和频率两个量决定,因此利用这两个量可以进行数据集的结构分析,分析结构也可以作为对资料两点间进行内插值的依据。

1 分形分布

1.1 幂函数分布(power-function distribution)函数

1.1.1 一般的幂函数分布

如果随机变量 X 的密度函数为

$$f(x) = ak^{-a}x^{a-1},\ a>0,\ 0<x\leq k \tag{1}$$

则随机变量 X 服从幂函数分布[5]。其中 k 称为尺度参数,a 称为形状参数或指数。

由式(1)可求得随机变量 X 的分布函数、数学期望和方差,即

$$F(x) = P(X\leq x) = (x/k)^{a},\ a>0,\ 0<x\leq k \tag{2}$$

$$E(X) = ak(a+1)^{-1},\ a>0 \tag{3}$$

$$V(X) = ak^{2}(a+2)^{-1}(a+1)^{-2},\ a>0 \tag{4}$$

在高端截尾条件下,$0<x\leq k'\leq k$,我们推得下列等式

$$P(X\leq x|\ X\leq k') = (x/k)^{a}(k'/k)^{-a} = (x/k')^{a}$$
$$0<x\leq k'\leq k \tag{5}$$

式(5)表明幂函数分布在高端截尾条件下(upper truncation)具有分形性质[6]。

$$P(X\leq x|\ X\leq k') = P(X\leq cx|\ X\leq ck')$$
$$0<x\leq k'\leq k \tag{6}$$

式(6)表明幂函数分布具有尺度不变的特征。其中 k 为尺度参数,c 为任意正的常数。

因此,幂函数分布是具有尺度不变的分形不变分布(在高端截尾条件下)。

1.1.2 截尾的幂函数分布

如果随机变量 X 的密度函数为

$$f(x) = ak^{-a}x^{a-1}[1-(k'/k)^{a}]^{-1}$$
$$a>0,\ 0<k'\leq x\leq k<\infty \tag{7}$$

则随机变量 X 服从截尾的幂函数分布。其中 k 与 k' 称为尺度参数,a 称为形状参数或指数。

由式(7)可求得随机变量 X 的分布函数

$$F(x) = P(X\leq x) = \frac{(x/k)^{a}-(k'/k)^{a}}{1-(k'/k)^{a}}$$
$$a>0,\ 0<k'\leq x\leq k<\infty \tag{8}$$

截尾的幂函数分布随机变量的数学期望和方差总是存在(当 $a>0$ 时)。

在高端和低端截尾条件下,$0<k'<k_1'\leq x\leq k_1<k<\infty$,我们推得下列等式

$$P(X\leq x|\ k_1'<X\leq k_1) = \frac{(x/k_1)^{a}-(k_1'/k_1)^{a}}{1-(k_1'/k_1)^{a}}$$
$$a>0,\ 0<k_1'\leq x\leq k_1<\infty \tag{9}$$

式(9)表明截尾的幂函数分布在高端和低端条件下具有分形性质。

$$P(X\leq x|\ k_1'<X\leq k_1) = P(X\leq cx|\ ck_1'<X\leq ck_1)$$
$$a>0,\ 0<k_1'\leq x\leq k_1<\infty \tag{10}$$

式(10)表明截尾的幂函数分布具有尺度不变的特征。其中 k_1 和 k 为尺度参数,c 为任意正的常数。

因此,截尾的幂函数分布是具有尺度不变的分形不变分布(在高端和低端截尾条件下)。

1.1.3 渐近的幂函数分布

如果随机变量 X 的密度函数为

$$f(x)\sim ak^{-a}x^{a-1},\ a>1,\ x\to 0 \tag{11}$$

则随机变量 X 服从渐近幂函数分布。其中 k 称为尺度参数,a 称为形状参数或指数。

渐近幂函数分布的函数为

$$F(x) = P(X\leq x)\sim (x/k)^{a},\ a>0,\ x\to 0 \tag{12}$$

由式(12)可得出,当 $x\to 0$ 时,将数据对 $\{P(X\leq x_i)\}$ 和 $\{x_i\}$ $(i=1,2,\cdots,n)$ 绘在双对数坐标纸上,它们渐近于一条直线上,直线的斜率为 a。

1.2 帕累托分布(Pareto distribution)函数

1.2.1 一般的帕累托分布

如果随机变量 X 的密度函数为

$$f(x) = ak^{a}x^{-a-1},\ a>0,\ x\geq k>0 \tag{13}$$

则随机变量 X 服从帕累托分布。其中 k 称为尺度参数,a 称为形状参数或指数。

由式(13)可求得随机变量 X 的分布函数、数学

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

期望和方差,即

$$F(x) = P(X \leq x) = 1 - (x/k)^{-a},\ a>0,\ x \geq k>0 \tag{14}$$

$$E(X) = ak(a-1)^{-1},\ a>1 \tag{15}$$

$$V(X) = ak^2(a-2)^{-1}(a-1)^{-2},\ a>2 \tag{16}$$

Mandelbrot 认为帕累托分布在低端截尾(lower truncation)条件下具有尺度不变的分形性质[7],即

$$P(X \geq x \mid X \geq k') = (x/k)^{-a}(k'/k)^{a} = (x/k')^{-a}$$
$$x \geq k' > k > 0 \tag{17}$$

式(17)表明帕累托分布在低端截尾条件下具有分形性质。

$$P(X \geq x \mid X \geq k') = P(X \geq cx \mid X \geq ck')$$
$$x \geq k' > k > 0 \tag{18}$$

式(18)表明帕累托分布具有尺度不变的特征。其中 k 为尺度参数,c 为任意正的常数。

因此,帕累托分布是具有尺度不变的分形不变分布(在低端截尾条件下)。

1.2.2 截尾的帕累托分布

如果随机变量 X 的密度函数为

$$f(x) = ak^{a}x^{-a-1}[1-(k/k')^{-a}]^{-1}$$
$$a>0,\ 0<k \leq x \leq k'<\infty \tag{19}$$

则随机变量 X 服从截尾的帕累托分布[8]。其中 k 与 k' 称为尺度参数,a 称为形状参数或指数。

由式(19)可求得随机变量 X 的分布函数

$$F(x) = P(X \leq x) = 1 - \frac{(x/k)^{-a} - (k'/k)^{-a}}{1-(k'/k)^{-a}}$$
$$a>0,\ 0<k \leq x \leq k'<\infty \tag{20}$$

截尾的帕累托随机变量的数学期望和方差总是存在(当 $a>0$ 时)。

在高端和低端截尾条件下,$0<k<k_1 \leq x \leq k_1' < k'<\infty$,我们推得下列等式

$$P(X \geq x \mid k_1 < X \leq k_1') = \frac{(x/k_1)^{-a} - (k_1'/k_1)^{-a}}{1-(k_1'/k_1)^{-a}}$$
$$a>0,\ 0<k_1 \leq x \leq k_1'<\infty \tag{21}$$

式(21)表明截尾的帕累托分布在高端和低端条件下具有分形性质。

$$P(X \geq x \mid k_1 < X \leq k_1') = P(X \geq cx \mid ck_1 < X \leq ck_1')$$
$$a>0,\ 0<k_1 \leq x \leq k_1'<\infty \tag{22}$$

式(22)表明截尾的帕累托分布具有尺度不变的特征。其中 k_1 和 k 为尺度参数,c 为任意正的常数。

因此,截尾的帕累托分布是具有尺度不变的分形不变分布(在高端和低端截尾条件下)。

1.2.3 渐近的帕累托分布

如果随机变量 X 的密度函数为

$$f(x) \sim ak^{a}x^{-a-1},\ a>0,\ x \to \infty \tag{23}$$

则随机变量 X 服从渐近帕累托分布[9]。其中 k 称为尺度参数,a 称为形状参数或指数。

渐近帕累托分布的函数为

$$F(x) = P(X \leq x) \sim 1 - (x/k)^{-a},\ a>0,\ x \to \infty \tag{24}$$

Mandelbrot 利用帕累托分布和它的渐近形式解释许多经验现象[10]。Johnson 和 Kotz[5] 讨论了帕累托分布的各种类型。

1.3 对数正态分布(Lognormal distribution)函数

Aitchison 和 Brown[11] 以及 Crow 和 Shimizu[12] 在他们的文章中详细讨论了对数正态分布。如果随机变量 $Y = \ln X$ 服从正态分布,则非负的随机变量 X 服从对数正态分布。

如果随机变量 X 的密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_X}\exp\frac{-(\ln x-\mu)^2}{2\sigma^2},\ x>0 \tag{25}$$

则随机变量 X 服从对数正态分布[13-14]。其中 μ 称为尺度参数,$\sigma>0$ 称为形状参数。

由式(25)可求得随机变量 X 的分布函数、数学期望和方差,即

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{\infty}^{x} f(t)\,\mathrm{d}t \tag{26}$$

$$E(X) = \mathrm{e}^{\mu+\sigma^2/2} \tag{27}$$

$$V(X) = \mathrm{e}^{2\mu+\sigma^2}(\mathrm{e}^{\sigma^2}-1) \tag{28}$$

令 $X' = cX$,$c>0$ 为常数,则随机变量 X 的密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_X}\exp\frac{-(\ln x-\mu-\ln c)^2}{2\sigma^2} =$$
$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_X}\exp\frac{-(\ln x-\mu')}{2\sigma^2},\ x>0 \tag{29}$$

其中 $\mu' = \mu + \ln c$

式(29)表明,随机变量 X 和 $X' = cX$ 服从同一分布函数(对数正态分布),且形状参数 σ 不变,尺度参数 μ 改变为 $\mu+\ln c$,即对数正态分布的随机变量在相乘一个正常数 $c>0$ 的条件下,分布形式不改变(形状参数 σ 不变,尺度参数 μ 改变)[9]。因此,对数正态分布在上述变换条件下具有分形性质。

1.4 齐波夫定律(Zipf law)

如果随机变量 Z 的分布律为

$$P(Z=r) = ar^{-p},\ (p>1,\ r=1,2,\cdots) \tag{30}$$

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

则随机变量 Z 服从齐波夫定律[15]。其中 $a=(\sum_{r=1}^{\infty} r^{-p})^{-1}$ 为常数,p 称为指数参数。

随机变量 Z 的分布函数,数学期望和方差分别为

$$H(z)=P(Z\leq z)=\sum_{r=1}^{z} ar^{-p},\ p>1 \tag{31}$$

$$E(Z)=(\sum_{r=1}^{\infty} r^{-p+1})/(\sum_{r=1}^{\infty} r^{-p}),\ p>1 \tag{32}$$

$$V(Z)=(\sum_{r=1}^{\infty} r^{-p+2})/(\sum_{r=1}^{\infty} r^{-p})-E^2(Z),\ p>1 \tag{33}$$

在低端截尾条件下,$r\geq k>0$。我们推得下列等式

$$P(Z=r\mid Z\geq k)=(ar^{-p})/(\sum_{r=k}^{\infty} ar^{-p}),\ r\geq k>0 \tag{34}$$

式(34)说明齐波夫定律具有分形性质。

$$P(Z=r\mid Z\geq k)=P(Z=cr\mid Z\geq ck),\ r\geq k>0 \tag{35}$$

其中 k 为尺度参数(正整数),c 为任意正的常数。式(35)说明齐波夫定律具有尺度不变性质。

因此,齐波夫定律反映的是具有尺度不变的分形不变分布(在低端截尾条件下)。

2 应用实例

2.1 分形模型

设分形模型

$$N(r)=Cr^{-D},\ r>0 \tag{36}$$

其中 r 表示特征尺度,$C>0$ 称为比例常数,$D>0$ 称为一般分维数,$N(r)=N(\geq r)$ 表示尺度大于等于 r 的数目或和数。

许多地质现象具有标度不变的特征,如岩石碎片、断层、地震、火山喷发、矿藏和油井等。这些现象的频度和大小之间的分布具有尺度不变性,可以用幂指数分布加以描述。

为了求出其分形模型(36)中分维数 D,将观测数据$(N(r_1),N(r_2),\cdots,N(r_n))$和$(r_1,r_2,\cdots,r_n)$绘在双对数坐标纸上,如果其点大致分布在一条直线上,分维数 D 可以利用直线的斜率求出,也就是说,将观测数据$(N(r_1),N(r_2),\cdots,N(r_n))$和$(r_1,r_2,\cdots,r_n)$代入式(36),然后等式两边取对数,式(36)化为一元线性回归模型

$$\lg N(r)=-D\lg r+\lg C \tag{37}$$

用最小二乘法求出斜率 D 的估计量,即为分维数;如果其点大致分布在两段直线上,可采用分段拟合,有的分界点清楚,有的则不清楚。为了提高分界点确定的客观性,在两个区间用最小二乘法回归时用最优化方法确定分界点。其基本思想是,找出合适的分界点 r_{i_0},使各区间拟合的直线与原始数据点之间的剩余平方和 $E_i(i=1,2)$ 在两个区间的总和为最小,即

$$E=E_1+E_2=\sum_{i=1}^{i_0}[N(r_i)+D_1\lg r_i-\lg C_1]^2+\sum_{i=i_0+1}^{n}[N(r_i)+D_2\lg r_i-\lg C_2]^2$$

其中 r_{i_0} 是分界点,D_1 和 D_2 分别为相应区间的斜率,即分维数。为了检验回归方程的显著性,对每个回归方程都进行了相关系数检验及方差分析检验。

2.2 用求和方法确定地球化学元素异常值范围

设地球化学元素的值$\{x_i\}$,$i=1,2,\cdots,N$。即

$$N(r)=\sum_{x_i\geq r}^{N} x_i \tag{38}$$

式(38)是对所有满足 $x_i\geq r$ 的 i 求和,$\min\limits_{1\leq i\leq N} x_i\leq r\leq \max\limits_{1\leq i\leq N} x_i$。这样得到了数据$(N(r_1),N(r_2),\cdots,N(r_n))$和$(r_1,r_2,\cdots,r_n)$。

山东省是中国著名的金矿化集中区和黄金产地。我们以金矿床的地球化学元素为例,用求和方法确定大型、超大型矿床的地球化学元素异常值范围。下面是应用求和法等式(38)对金元素 Au($N=21\ 316$)数据处理的具体结果。

应用表1的数据,在 $\lg r$-$\lg N(r)$ 坐标中投点(见图1),用最小二乘法拟合直线,得到相应的直线方程为

$$\lg N(r)=-0.242\ 938\lg r+4.687\ 48 \tag{39}$$

$$R^2=0.963\ 99,\ 1\leq r<200$$

$$\lg N(r)=-1.414\ 65\lg r+7.483\ 22 \tag{40}$$

$$R^2=0.959\ 45,\ 200\leq r<800$$

我们得到分维数 $D_1=0.242\ 938$,$D_2=1.414\ 65$,分界点 $r_{i_0}=200\times10^{-9}$。以上方程均通过显著性检验。地球化学元素金的异常值范围大于 200×10^{-9}。

图1显示 $N(r)$ 与 r 之间的关系,用最小二乘法拟合两段直线。$r_{i_0}=200\times10^{-9}$ 表示金元素异常的临界点。用求和方法和其他方法(如面积方法)算出地球化学元素金的异常范围一致,且异常范围

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 用求和法等式(38)求出 Au 元素数据的 N(r)

Table 1 $N(r)$ of Au data calculated by Eq(38)

$r/10^{-9}$	$N(r)$	$r/10^{-9}$	$N(r)$	$r/10^{-9}$	$N(r)$	$r/10^{-9}$	$N(r)$
1	60 246.63	8	28 234.95	100	16 584.65	400	6 741.90
2	42 225.09	9	27 880.11	120	15 367.54	450	5 909.46
3	33 972.22	10	27 444.68	150	14 560.91	500	5 008.28
4	31 415.72	15	26 078.95	200	13 390.70	600	3 881.49
5	30 200.14	20	24 886.23	250	11 942.70	650	3 295.76
6	29 336.08	25	23 892.90	300	11 102.98	700	2 648.25
7	28 693.53	50	20 691.04	350	8 194.82	800	1 899.00

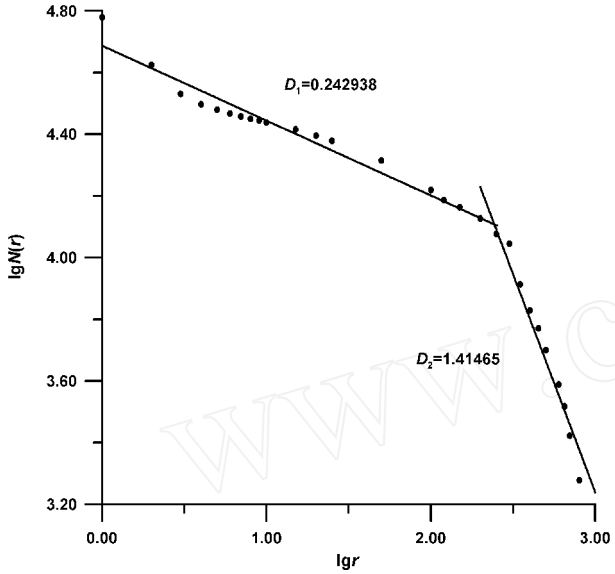


图 1 $\lg N(r)$-$\lg r$ 图

Fig. 1 $\lg N(r)$-$\lg r$ plot for Au values from 21316 samples

与大型、超大型金矿床的吻合程度很高,是寻找金矿的一种直接信息,对圈定靶区有着举足轻重的意义。引起分段分形的原因可能是大型、超大型矿床与中型、小型矿床成因不一。大型、超大型矿床是长期演化继承的地质产物。成矿系列有其有序性,它们的变量极值集合是大型、超大型矿床的控制因素。系列矿床共生和叠加成矿两重作用是大型、超大型矿床产生的必要条件。

3 结论

(1) 一般的幂函数分布在高端截尾条件下具有尺度不变的分形性质,截尾的幂函数分布在高端和低端条件下具有分形性质;一般的帕累托分布在低端截尾条件下具有尺度不变的分形性质,截尾的帕累托分布在高端和低端截尾条件下也具有分形性质;对数正态分布的随机变量在相乘一个正常数 $c>0$ 的条件下,分布形式不改变(形状参数 σ 不变,尺度参数 μ 改变);齐波夫定律在低端截尾条件下具有分形性质。这些分布是分形模型的数学基础。

(2) 用求和方法确定中国山东省金地球化学元素异常值范围。等值线大于或等于金地球化学元素临界值(200×10^{-9})围成的异常面积包含了已知的大型、超大型金矿床,其结果与实际情况一致。该方法不仅适用于金元素和金矿床,而且还适用于其他元素和矿床,具有普遍的意义。

References:

[1] Gillepsie P A, Howard C B, Walsh J J, et al. Measurement and characterization of spatial distribution of fractures[J]. Technophysics, 1993, 226(1-4): 113-141.

[2] Logdson S D. Analysis of aggregate fractal dimensions and aggregate densities back-calculated from hydraulic conductivity [J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59(5): 1216-1221.

[3] Christopher C B, Paul R L. Fractals in petroleum geology and Earth process[M]. New York: Plenum Press, 1995: 1-317.

[4] Turcotte D L. Fractals and chaos in geology and geophysics [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 1-398.

[5] Johnson N L, Kotz S. Continuous univariate distributions-I [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1970: 1-300.

[6] Shen W, Zhao P D. Multidimensional self-affine distribution with application in geochemistry[J]. Mathematical Geology, 2002, 34(2): 109-123.

[7] Mandelbrot B B. Forecasts of future prices, unbiased markets, and "martingale" models[J]. Journal of Business, University of Chicago, 1966, 39: 242-255.

[8] Goldberg G. The Pareto law and the pyramid distribution [J]. Publication 505, Shell Development, Houston, Tezas, 1967: 10-20.

[9] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature[M]. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1982: 1-460.

[10] Mandelbrot B B. The variation of some other speculative

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

prices[J]. Journal of Business , University of Chicago , 1967 , 40 : 393-413.
[11] Aitchison J , Brown J A C. The lognormal distribution[M]. Cambridge : Cambridge University Press , 1957 : 1-176.
[12] Crow E L , Shimizu K. Lognomal distributions —theory and applications[J]. York and Basel : Mareel Dekker , New Inc , 1988 : 387-399.
[13] Law A M , Kelton W D. Simulation modeling and analysis [M]. 2nd ed . New York : McGraw-Hill ,1991 : 1-759.
[14] Crovelli R A , Schmoker J W , Balay R H. Department of the interior U. S. geological survey : fractal lognormal percentage analysis of U. S. geological survery's 1995 national assessment of conventional oil and gas resources[J]. Nonrenewable Resources ,1997 , 6(1) : 43-51.
[15] John N L , Kotz S. Discrete distributions[M]. New York : John Wiley & Sons Inc , 1969 : 1-328.

《地学前缘》英文版、中文版网上查询和浏览方法

英 文 版

《地学前缘》国际版已由爱思唯尔(Elsevier)公司出版,可在其在线平台上(http : //www. sciencedirect. com/ science/ journal/ 18725791)浏览、查阅、下载。

中 文 版

方法一:
(1)登录中国地质大学(北京)网站,网址为:http :/ / www. cugb. edu. cn
(2)点击首页右侧"特色网站"栏目下方的"地大(北京)期刊中心"选项
(3)在【刊物】选项选择《地学前缘》,通过篇名、作者、作者单位、关键词、中文摘要、全文、期号 7 个字段输入检索词,最后指定查询年限后点击【检索】按钮

方法二:
(1)登录中国地质大学(北京)网站,网址为:http :/ / www. cugb. edu. cn
(2)点击首页上部【机构设置】按钮
(3)在"机构设置"中的"辅助单位"中点击"期刊中心"进入期刊中心简介页面
(4)点击【期刊查询】按钮,即可查阅摘要和全文
(5)检索同方法一的(3)步骤

方法三:
(1)登录中国地质大学(北京)网站,网址为:http :/ / www. cugb. edu. cn
(2)点击首页上侧的【数字图书】按钮
(3)在"数字资源"栏目下方的友情链接中点击"地大(北京)期刊中心"进入地大(北京)期刊中心页面
(4)检索同方法一的(3)步骤

方法四:
(1)登录中国地质图书馆网站,网址为:http :/ / www. cgl. org. cn
(2)点击首页右侧"资源导航"中的《地学前缘》
(3)在期刊浏览页面,当鼠标放在各期次上时出现该期主题名称,点击各期次可浏览 2006 - 1999 年各期目录,在目录中选择文章的 PDF 全文浏览文章全文
(4)需要检索服务,向下滚动期刊浏览页面点击 http :/ / dept. cugb. edu. cn/ Science web/ qkzhx/ display. asp 超链接查看详细信息

方法五:
(1)登录世界数据中心中国地质科学数据中心网站,网址为:http :/ / www. wdcgeo. net/
(2)点击首页右侧"常用链接"中的《地学前缘》期刊
以下两步骤同方法四的(3)、(4)步骤

方法六:
(1)登录中国地质科学数据网的"国土资源科学数据共享地质科学数据节点"网站,网址为:http :/ / www. geoscience. cn/
(2)点击首页下部"友情链接"中的《地学前缘》期刊
以下两步骤同方法四的(3)、(4)步骤

阅读全文需要安装 Acrobat Reader(PDF)软件

通信地址:北京学院路 29 号中国地质大学(北京)《地学前缘》编辑部 邮编:100083
E-mail :frontier @cugb. edu. cn 电话:010-82322973

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net