

doi:10.3799/dqkx.2011.074

基于网格单元的总合式和非总合式结合的区域矿产资源潜力评价方法

浦路平¹, 赵鹏大², 胡光道², 夏庆霖²

1. 桂林理工大学现代教育中心, 广西桂林 541004

2. 中国地质大学遥感地质与数学地质所, 湖北武汉 430074

摘要: 区域矿产资源潜力有总合式评价和非总合式评价两大类方法。总合式评价方法简便易行, 可以得到一个区域的资源潜力总量的估计, 但是没有其在区域中的空间位置信息, 区域矿产资源潜力评价早期主要是用总合式评价方法。随着资料数据的积累, 特别是计算机和GIS技术的应用, 能给出空间位置信息的非总合式评价越来越多的用于区域矿产资源潜力评价。非总合式评价主要把区域划分成同形等大的单元, 在圈定成矿远景区单元基础上, 用类比方法对成矿远景区单元进行矿产资源潜力数量预测评价。总合式矿产资源潜力评价是区域矿产资源潜力评价的主要方法, 可以对区域内潜在的矿产资源量进行预测, 但是只有一个总量, 没有区域内矿产资源空间分布信息, 不能结合各局部空间具体情况进行各种环境经济社会评价, 因此需要将其预测的资源量空间定位化。非总合式矿产资源潜力评价虽然能够定位, 但因其是用控制单元的探明资源量进行类比外推, 所以无法对已知矿产资源量的单元内潜在的矿产资源量进行预测。提出了用基于网格单元的总合式和非总合式方法结合的矿产资源潜力评价方法, 解决了总合式方法单元资源量预测值的空间定位和分配问题, 并且以云南铅锌矿为例进行了计算, 既得到了总量也得到了其空间分布量, 修正了非总合式预测方法的不足, 特别适用于对矿产资源进行环境、经济、社会等评价或者联合评价。以云南铅锌矿产资源潜力评价为实例进行了应用, 得到初步结果。

关键词: 矿产资源潜力评价; 总合式; 非总合式; 数学模型; 地理信息系统。

中图分类号: P628

文章编号: 1000-2383(2011)04-0740-07

收稿日期: 2010-07-28

Joint Area Mineral Resources Potential Assessment Method of Grid-Units-Based Aggregated Form with Disaggregated Form

PU Lu-ping¹, ZHAO Peng-da², HU Guang-dao², XIA Qing-lin²

1. Modern Education Technical Center, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

2. Institute of Mathematical Geology and Remote Sensing Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: There are two types of assessment methods of area mineral resources: aggregated form assessment and disaggregated form assessment. In aggregated form assessment, it is easy to get assessment of total mineral resources quantity of an area without high level data, but it is void of the message of spatial location of mineral resources, which is necessary to some co-assessments of resources, economy, environment and society. In disaggregated form assessment, work area is firstly divided into same shape grid units and then the mineralization favorableness unit and the mineral resources of unknown units are predicted analogically with known ore bearing units data, but potential resources number of known ore bearing units can not be obtained. So the paper presents a new method assessment of area mineral resources potential combining grid-units-based aggregated form with disaggregated form, in which the disaggregated form assessment number is modified by the information of aggregated form assessment, and at same time the aggregated form assessment result resources are located with the information of disaggregated form assessment. In the paper the method is used to assess Pb-Zn mineral potential of Yunnan Province and gets satisfactory results. The new method is particularly useful to GIS-based co-assessment of resources, economy, environment and society.

Key words: mineral potential assessment; aggregated form; disaggregated form; mathematical models; geographic information system.

基金项目: 桂林理工大学博士基金资助项目(No. 002401003278).

作者简介: 浦路平(1958—), 男, 博士, 副教授, 主要从事数学地质、GIS矿产资源勘查评价研究. E-mail: plp@glute.edu.cn

区域矿产资源潜力评价有总合式估计和非总合式估计两大类方法。

总合式估计就是资源总量的估计,它不要求预测矿床的个数和空间位置。非总合式估计则要求有一定的概率范围内估计预测矿床的个数和空间位置,以及矿产资源的质量(赵鹏大等,1983;朱裕生,1984;王世称等,1990)。总合式评价主要有丰度估计法、体积估计法、德尔菲法、矿床值概率分布法、分形法、三部法及矿床模型法等。区域矿产资源潜力评价早期主要是用总合式评价方法,可以得到一个区域的资源潜力总量的估计,但是没有其在区域中的空间位置信息。随着资料数据的积累,特别是计算机和GIS技术的应用,能给出空间位置信息的非总合式评价越来越多地用于区域矿产资源潜力评价。非总合式评价主要把区域划分成同形等大的单元,在圈定成矿远景区单元基础上,用类比方法对成矿远景区单元进行矿产资源潜力数量预测评价。非总合式评价主要有回归分析方法、BP 和 RBF 等前馈型神经网络、信息量法、秩相关分析和判别分析等(赵鹏大等,1983;朱裕生,1984;王世称等,1990;李裕伟等,2007)。

总合式矿产资源潜力评价是区域矿产资源潜力评价的主要方法,可以对区域内潜在的矿产资源量进行预测,但是只有一个总量,没有区域内矿产资源空间分布信息,不能结合各局部空间具体情况进行各种环境、经济和社会评价,因此需要将其预测的资源量空间定位化。非总合式矿产资源潜力评价虽然能够定位,但因其是用控制单元的探明资源量进行类比外推,所以无法对已知矿产资源量的单元内潜在的矿产资源量进行预测。

本文提出用总合式和非总合式结合的方法,解决了总合式方法单元资源量预测值的空间定位和分配问题。

1 原理

非总合式矿产资源潜力评价主要是基于类比的原理,多是根据已知勘探程度较高的矿产地所在单元得到的成矿要素、控矿规律和找矿信息外推到区域上勘探程度较低单元,高勘探单元作为控制模型单元,其中的探明资源量决定了外推单元资源量的多寡,但是控制模型单元中可能会有部分资源量目前尚未发现,如果这部分资源量计算入内,则外推单元资源量会增加一部分。所以,如果非总合式评价方

法计算的矿产资源量多于总合式评价方法计算的矿产资源量,则这两种方法中至少有一种不准确;如果两种方法计算的资源量相同,则表明各控制模型单元所有矿产资源都已经被发现了,没有任何遗漏,这种可能性通常甚微。只有总合式计算的资源量大于非总合式计算的资源量才是较为合理的。

如果总合式计算的矿产资源潜力总量大于非总合式预测的矿产资源潜力总量,这多出来的部分是从何而来呢?非总合式预测的资源量是以已知矿产资源的单元中已经探明的储量或基本已知的资源量作为预测基础的,但这些单元中仍然可能有很大的矿产资源潜力,这部分矿产资源及由其预测出的其他单元的矿产资源潜力是非总合式方法无法估计的,这应当可以作为总合式计算的矿产资源潜力总量比非总合式预测的矿产资源潜力总量多出来的部分的一种合理的解释。因而可以用总合式方法估计出的矿产资源潜力数值去对非总合式预测的矿产资源潜力数值进行校正。

假定各单元非总合式能够预测的和不能预测而可以用总合式方法估计出来的资源量的比值,都相同且为一常数的话,则可用总合式预测的区域矿产资源潜力总量与非总合式预测的区域矿产资源潜力总量的比值,去乘以各单元的非总合式预测的矿产资源潜力数值,得到调整后的矿产资源潜力数值,其各个单元之和为总合式估计的矿产资源潜力总量。这是一种把总合式和非总合式矿产资源潜力评价预测方法结合起来的新方法,可以把不能定位总合式和非总合式矿产资源潜力总量分配到各个空间单元里,同时解决了非总合式方法无法预测自身单元潜在在矿产资源量的问题。

现有的总合式估计方法都是以矿床为基本统计单位,非总合式估计方法则以网格单元为基本统计单位,二者无法兼容,因此本文提出了基于相同网格单元的总合式和非总合式结合矿产资源潜力评价方法,即通过两种不同方法计算出来各个单元的矿产资源潜力,通过用总合式估计结果修正非总合式估计结果或者按照一定规则把总合式估计各个估计值单元归并到非总合式估计的单元,实现总合式估计方法的空间定位。

2 方法

2.1 基本步骤

基于网格单元的总合式和非总合式结合矿产资

源潜力评价方法步骤为:

- 步骤 1:划分网格单元;
- 步骤 2:进行基于此网格单元的总合式评价,得到总合式评价的区域矿产资源潜力总量;
- 步骤 3:进行基于网格单元的非总合式评价;
- 步骤 3-1:研究成矿模式和控矿找矿模型,建立找矿变量组合模型,分别统计各个单元矿产资源量、找矿变量组合各变量数值;
- 步骤 3-2:进行定位评价—圈定成矿远景区;
- a. 运用各种类比成矿预测方法,计算各网格单元成矿有利度;
- b. 确定成矿远景区单元成矿有利度阈值;
- c. 把成矿有利度大于成矿远景区单元成矿有利度阈值的单元定为成矿远景区单元;
- 步骤 3-3:预测各单元区域矿产资源潜力;
- a. 用已知矿产资源量的单元数据,应用回归分析或 BP 或 RBF 等前馈型神经网络计算单元成矿有利度与矿产资源量的函数映射关系;
- b. 用单元成矿有利度与矿产资源量的函数映射关系计算各单元矿产资源预测量;
- c. 汇总各单元矿产资源预测量得到非总合式的区域矿产资源潜力总量;
- 步骤 4:计算区域矿产资源潜力系数=总合式的区域矿产资源潜力总量/非总合式的区域矿产资源潜力总量;
- 步骤 5:计算各个单元总合式矿产资源潜力量=区域矿产资源潜力系数×各个单元非总合式矿产资源量.

2.2 基于单元的区域矿产资源潜力分形评价方法

2.2.1 分形模型区域矿产资源潜力评价方法概况

近些年来,分形理论的地学研究 and 应用成为热点,特别在矿床分布、化探元素含量分布和构造分布的分形特征、矿产资源潜力评价方面许多学者进行了深入的研究. 如孟宪国等(1996)提出地质数据中广泛存在分形结构. 分形几何学已被成功地应用于矿产资源潜力评价方面,如 Cheng *et al.* (1996)进行了分形在矿产资源潜力应用的尝试,李长江等(2002)、申维(2002)探讨了用固体金属矿床品位与储量的分形模型进行矿产资源潜力计算. Barton and Scholz (1995)应用分形模型估计潜在的石油和天然气资源量等,刘晓冬等(2000)应用截断帕雷托分布模型预测了松辽盆地北部地区未发现气田总储量,连长云和苏小四(2000)应用分形模型估计了胶东地区未发现金矿床资源总量. 李裕伟等(2007)系统介绍了资

源量的分形估计方法和理论.

2.2.2 基于网格单元分形模型区域矿产资源潜力

评价原理 Pareto 分布是一种随机分形分布,由 Pareto 于 1897 年提出,1970 年 Johson 和 Kotz 提出 2 参数的 Pareto 分布,Houghton 于 1988 年提出了位移和截尾 Pareto 分布.

在尺度不变区间里,分形关系以幂率表示:
$$N(r) \propto r^{-D}, \tag{1}$$

式中 $N(r)$ 是所研究对象的数量, r 为观测计量 N 的尺度单位, D 为分形维数.

对于特定的分形关系,有:
$$N(r) = Cr^{-D}, r > 0, C \text{ 为比例系数.} \tag{2}$$

对于与 3 维体积有关的变量 M (如资源量) 的分形关系,有:

$$N(M) = CM^{-D/3}, M > 0; \tag{3}$$

令 $A=D/3$,

$$N(M) = CM^{-A}, M > 0. \tag{4}$$

随机变量 X 的 Pareto 数量累计分布函数为:

$$N(X \geq x) = Cx^{-A}, x > 0. \tag{5}$$

设在其分形标度不变区间内,矿产资源储量大于 V 的网格单元个数为:

$$N(M) = CM^{-A}; \tag{6}$$

$$C = N(M) \times M^A = N(M_{\max}) \times M_{\max}^A. \tag{7}$$

则区域矿产资源潜力总量为:

$$\sum M = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n M_k = \int_{N(M_{\min})}^{N(M_{\max})} M dN = \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} M \frac{dN}{dM} dM = C \frac{A}{1-A} (M_{\max}^{1-A} - M_{\min}^{1-A}). \tag{8}$$

3 云南铅锌矿产资源潜力评价

3.1 评价平台、数据源和单元网格划分

本次云南铅锌矿产资源潜力联合评价主要使用的 GIS 平台为 Arcview GIS 3. 5a, 部分使用了 MAPGIS 6. 5. 应用 MORPAS 软件进行了部分物化探数据处理. 评价使用了 Matlab 7. 0 和 Excel 2003 等软件编制程序和操作, 与 Arcview 结合进行各种预测、分类等数据处理. 在 Arcview 中用 Avenue 脚本语言编制了一些程序, 完成了评价所需的各种功能. 评价的数据源为云南省地质矿产局信息中心提供的云南省 1 : 50 万数字地质图、矿产地空间数据库、分散流化探、重力和航磁空间数据库.

云南铅锌矿产资源评价空间网格单元划分方案为:

网格单元基础模板的矩形边框东西长 874.054 9 km,南北长 995.323 92 km,东西边与东西纬度线平行,西南角端点坐标为:东经 97°31′39″,北纬 21°8′32″,即其西边和南边分别与云南省行政区域境界相切。矩形模板划分为 75×75 的矩形网格单元,每个网格单元东西向边长 11.500 725 km,南北向边长 13.096 367 3 km,单元面积为 150.617 722 km²。用此网格单元模板把云南划分为 2 966 个矩形网格单元。

3.2 云南铅锌矿产资源潜力非总合式评价

3.2.1 云南铅锌矿床成矿多样性和主要成因模式

云南铅锌矿床分布广泛,类型复杂多样,许多矿床是多种成矿地质作用多期叠加而成,一些矿床成因仍有争议。按其赋存母岩及与岩浆岩的关系主要可分为沉积岩型层控铅锌矿床、火山岩型层控铅锌矿床和与侵入岩有关铅锌矿床三类,以及这三类的复合类型:多因复成矿床。

云南铅锌矿床成矿物质是多来源的,现有资料和研究(吴淦国和吴习东,1989;云南省地质矿产厅,1997)表明,云南原始地壳和地幔铅锌较为富集,在元古代及其以前的沉积和火山活动中形成了富含铅锌的大地构造基底,经风化沉积,在一定条件下形成盖层的铅锌矿源层,同时以火山喷出、岩浆侵入、海(湖)底或地下热卤水或者其他流体方式把矿源层中成矿物质或者通过断裂从深部带来的地幔或地壳重熔的铅锌物质,在合适的部位和条件下成矿或者叠加在已有矿床上成矿。

3.2.2 云南省铅锌矿床主要的成矿作用、控矿因素和找矿模型

云南铅锌矿床主要的成矿作用有:(1)沉积及沉积构造作用成矿,各种海相或陆相的沉积或喷气沉积,成岩及期后改造等;(2)火山气液及火山喷流沉积作用;(3)岩浆侵入作用(接触交代矽卡岩型、斑岩型、岩浆热液脉型),与特定时代有关或无关,与特定区域构造环境有关;(4)地下热卤水循环成矿:包括地下热卤水的各种地下流体进行地下循环运动,叠加在特定时代矿源层或含已有矿床群地层基础上,改造成新矿床;(5)岩浆侵入活动提供的热和热液、矿质等叠加改造已有各类矿床;(6)上述各种作用的叠加(罗君烈,1995;李连举等,1999;柳贺昌和林文达,1999)。

云南铅锌矿床主要控矿因素为:(1)地层控制,某些特定时代和岩性层位地层控制了成矿,如滇东北碳酸盐岩型层控铅锌矿产于震旦至二叠系白云岩和白云质灰岩中;(2)构造控制,主要是断裂构造控

制了成矿流体的运移,特别是多组断裂交汇处有利于成矿,褶皱的背斜轴部等处也是有利成矿空间;(3)侵入岩控制,接触交代矽卡岩由侵入岩和碳酸盐围岩接触带控制,侵入岩还控制了斑岩型和岩浆热液型矿床产出;(4)火山岩控制,火山有关的矿床自然受火山岩和火山沉积岩分布控制。

由此可得云南铅锌矿床主要找矿有利标志为成矿有利地层、中酸性和碱性侵入岩及其与围岩接触带、成矿有利的火山岩、断裂构造及断裂构造有关的地质异常、白云岩为主的碳酸盐岩、地层数和地质变异度等地质异常、成矿元素水系沉积物地球化学异常、重力和磁法地球物理勘查提供的各种地球物理异常。

3.2.3 数据处理

(1)地质数据处理。使用云南地矿局信息中心提供的 1:50 万数字地质图和矿产地图的 GIS 空间数据库,分别进行了地层岩性、侵入岩、火山岩、侵入岩接触带、地层时代、断裂等信息提取,以本次评价基础单元网格为单位分别统计,并计算了地质异常;统计了各个网格单元的侵入岩接触带 2 km 缓冲区,还统计了各单元东西、南北、东北、北西、北北东、北北西、北东东和北西西 8 个方向的断裂总长度以及单元断裂长度总合、断裂条数、断裂交汇点数以及单元断裂方向平均值和标准差,计算了各单元断裂熵,以及反映各单元与邻近单元地质复杂度变化的单元地质变异度。

(2)化探数据处理。使用云南地矿局信息中心提供的 10 种元素的 1:20 万水系沉积物分析数据。这 10 种元素分别为铅、锌、银、镉、砷、铜、铋、铁、钴、镍,均为 4 km×4 km 网格平均数据。以本次评价基础网格单元为单位计算平均值和方差。

本次研究进行了 R 型系统聚类,得到 2 组聚类,分别是铋、铁、钴、镍、铜和铅、银、锌、镉、砷。第二组聚类中的元素与铅锌相关性较小,所以就没有选择。

对第 1 组聚类的元素组进行了主成分变换,得到第 1 组聚类的第 1 主成分为砷,第 2 主成分为锌、镉,第 3 主成分为银、铅。银和镉是铅锌矿床的常见共生和伴生元素,砷是铅锌矿床的助矿元素和共、伴生元素,所以选择主成分 1、2、3 为化探异常代表性变量,包含了 93.721 1%的信息。

(3)物探数据处理。使用云南地矿局信息中心提供的 1:50 万重力和磁法数据,重力和磁法数据均在向上延拓 1 km 后分别进行垂向一阶导数和垂向二阶导数计算,使用了中国地质大学(武汉)数学地质和遥感地质研究所开发研制的 MORPAS 系统。

表 1 化探第 1 组聚类元素组主成分变换

Table 1 The principal components transformation of the first clustering geochemical element group

第 1 组元素	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 5
Pb	-0.191 02	-0.369 77	0.586 61	-0.474 97	-0.507 03
Zn	-0.379 13	-0.640 45	-0.251 97	-0.259 50	0.561 48
Ag	-0.222 45	-0.160 18	0.613 90	0.692 16	0.262 48
Cd	-0.117 22	-0.461 12	-0.449 68	0.476 87	-0.586 52
As	-0.869 80	0.463 47	-0.115 40	-0.023 86	-0.121 48
权值比重(%)	52.642 50	22.331 50	13.661 20	6.175 30	5.189 50

计算结果以本次评价基础单元网格为单位计算平均值和方差. 重力和磁法数据均在向上延拓 1 km 数据反映了一定深度或者进行一定低通滤波平滑后的物理场特征, 垂向二阶导数反映了一定深度局部的物理场特征. 由于隐伏中酸性岩体在高密度围岩条件下为重力负异常, 而火山岩则多见磁异常跳变, 所以选择重力和磁法向上延拓 1 km 垂向二阶导数平均值和方差为物探变量.

3.2.4 建立找矿有利度变量组合模型 根据云南铅锌矿床主要控矿因素、地质异常和找矿模型, 确定云南铅锌矿找矿有利度变量组合模型为:

- (1)成矿有利地层: 现有矿床(矿点)所在地层, 网格单元有成矿有利地层为 1, 没有为 0;
- (2)大地构造分区: 滇东南、扬子区、中甸区、兰坪—思茅区和滇西区分别为 1, 2, 3, 4, 5;
- (3)地层地质年代: 网格单元地层平均年代;
- (4)成矿元素、伴生元素铅、锌、银、镉、砷水系沉积物化探异常主成分 1, 2, 3;
- (5)地质变异度: 单元地质变异度 = $\frac{1}{8} \sum_{i=1}^1 \sum_{j=-1}^1 \sum_{k=1}^p (V_{sk} - V_{s+i,t+j,k})^2$, 式中 V 为网格单元地层数;
- (6)地层数: 网格单元地层数目;
- (7)断裂熵: 计算公式为 $HF_i = \sum_{j=1}^8 (L_{ij} / \sum_{j=1}^8 L_{ij}) \cdot \log \sum_{j=1}^8 (L_{ij} / \sum_{j=1}^8 L_{ij})$, ($i = 1, 2, \cdots, n$); 式中 L_{ij} 是第 i 网格单元第 j 个方向上的断裂长度和, 8 个方向分别为东西、南北、北东、北西、北北东、北北西、北东东和北西西 8 个方向;
- (8)断裂密度: 网格单元中断裂长度和/单元面积;
- (9)断裂交点密度: 网格单元中断裂交点数/单元面积;
- (10)中酸性和碱性侵入岩有为 1, 没有为 0;

- (11)中酸性和碱性侵入岩接触带 2 km 缓冲区;
- (12)航磁向上延拓 1 km 垂直方向二阶导数网格单元平均值和均方差;
- (13)重力向上延拓 1 km 垂直方向二阶导数网格单元平均值和均方差;
- (14)碳酸盐岩: 有为 1, 没有为 0.

3.2.5 云南铅锌矿产资源潜力非总合式 RBF 神经网络预测

(1)RBF 神经网络矿产资源预测方法. ①RBF 神经网络原理. 径向基函数(radial base function, RBF)神经网络是 Moody 和 Darken 于 20 世纪 80 年代提出的一种具有单隐层的三层前馈神经网络, 一定程度上能够克服 BP 神经网络学习缓慢、存在局部极小值点, 以及不能最佳逼近等诸多不足. ②RBF 神经网络实现. 用 Matlab 7.0 的神经网络工具箱中的神经网络建立和训练函数, 用 MATLAB 语言建立了 RBF 网络(The MathWorks Inc., 2002).

有关程序语句为: ①建立 RBF 网络, 用自变量数组 x 和目标函数值数组 y 训练网络: $net=newrb(\mathbf{P}, \mathbf{T}, goal, spread, MN, DF)$, 其中 $\mathbf{P}$ 为 n 个 r 维输入训练样本数据组成的矩阵; $\mathbf{T}$ 为 n 个 s 维输出训练样本数据组成的矩阵; $goal$ 为网络训练最大误差平均平方和, 当小于此值时训练结束, 缺省值为 0.0; $spread$ 为径向基函数的传播半径, 缺省值为 1.0; MN 为最大神经元数 c 训练样本数 n ; DF 为每次增加的神经元数目, 缺省值为 25; net 为新的径向基函数网络. ②应用所训练的网络对自变量 x 预测目标函数值 y , $y=sim(net, x)$; 为消除量纲差异影响, 所有数据先进行 0—1 规范化, 即 $x_{ij} = (x_{ij} - x_{\min,j}) / (x_{\max,j} - x_{\min,j})$, 其中 $x_{\max,j} = \max(x_{ij})$, $x_{\min,j} = \min(x_{ij})$, $i=1, 2, \cdots, N$.

(2)用云南省 99 个已知铅锌矿产资源量的单元的有关数据作为训练样本, 分别建立了铅锌成矿有利度、铅锌矿产金属资源量的 RBF 网络模型, 参数为: $Goal=0.000\ 001$, $spread=0.095$, $MN=70$,

$DF=1$.

(3)云南铅锌矿产资源成矿有利度及成矿远景区预测. ①成矿有利度计算. 以所有矿产地的单元数据为训练样本,其中输入变量组合为云南铅锌矿找矿有利度变量组合模型,成矿有利标志为有矿单元为 1 加上 0.5 乘以单元已知矿产资源量在已知矿产资源量中所占比例,这是因为有的单元矿产地的已知矿产资源数量不明. 用此对输入和输出样本集合训练 RBF 模型,用各个单元的同样输入变量组合数据进行 RBF 网络计算,得到其单元成矿有利度. ②划分成矿远景区. 因为成矿有利度的频数直方图曲线导数的最小值代表成矿有利度频数减少最急速处,因而可作为划分成矿远景区的阈值. 用此方法,求得划分成矿远景区的最佳成矿有利度最佳阈值为 1.001 2,把大于此值的单元判为成矿有利的远景区单元,共划分出 268 个成矿远景区单元.

(4)非总合式云南铅锌矿产资源量计算. 以所有矿产地的单元数据为训练样本,以云南铅锌矿找矿有利度变量组合模型为输入变量组合,输出目标分别为单元已知矿产资源金属量. 用此对输入和输出样本集合训练 RBF 模型,用成矿远景区各个单元的同样输入变量组合数据进行 RBF 网络计算,得到各单元的铅锌矿产资源量 M_i ,汇总各单元得到非总合式估计云南铅锌矿产资源量为 5 748. 776 6 万 t.

3.3 云南省铅锌矿产资源潜力分形法总合式评价

用基于网格单元的分形模型矿产资源潜力评价方法,代入云南省铅锌矿床已知资源量数据,从双对数坐标图(图 1)上得知,以 $M=10$ 为高低值分界点,以 $M \geq 10$ 的数据进行线性回归,求得直线 $\lg N = \lg C - A \times \lg M$ 的相关参数为:

斜率 $A=0.851\ 6$,分维数 $D=2.554\ 8$,最大单元资源量 $M_{\max}=1\ 500$ 万 t, $N(M_{\max})=1$,比例系数 $C=N(M_{\max}) \times M_{\max}^A=1 \times 1\ 500^{0.851\ 6}=532.499\ 8$. 分形关系式: $N(M)=532.499\ 8M^{-0.851\ 6}$.

代入公式(8)得云南铅锌矿产资源潜力为:

$$Mt = 532.499\ 8 \times 0.851\ 6 / (1 - 0.851\ 6) \times (M_{\max}^{(1-0.851\ 6)} - M_{\min}^{(1-0.851\ 6)}) = 3\ 055.773\ 8(M_{\max}^{0.148\ 4} - M_{\min}^{0.148\ 4}),$$

取最小资源量 $M_{\min}$ 为 1 t,代入上式计算得云南铅锌矿产资源潜力资源总量为 8 266. 994 4 万 t.

3.4 云南铅锌矿产资源潜力非总合式与总合式结合评价

云南铅锌矿产资源潜力总合式评价总量为 8 266. 994 4 万 t,非总合式评价总量为 5 748. 776 6

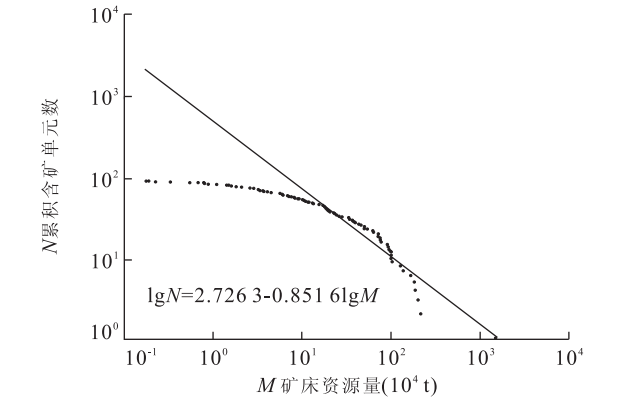


图 1 云南省铅锌矿产资源分形模型
Fig. 1 Fractal model of mineral resource of lead and zinc of Yunnan Province, China

万 t,如按 100%的矿产资源量在成矿远景区内的话,总合式评价总量与非总合式评价总量的比值 $K=8\ 266.994\ 4/5\ 748.776\ 6=1.373\ 3$.

对于各单元非总合式矿产资源量(金属量和矿石量)乘以 K ,得到各单元用总合式矿产资源潜力数量调整后的铅锌矿产资源数量. 第 i 单元总合式矿产资源量为:

$$t'_i = K \times t_i, i=1,2,\cdots,n;$$

其中 t_i 为第 i 单元非总合式矿产资源量, n 为单元数目,汇总各个单元矿产资源量得到调整后的总合

式矿产资源总量为 $T'_{\text{总合式}} = \sum_{i=1}^n t'_i$.

4 结论

本文提出了基于网格单元的总合式和非总合式估计结合的区域矿产资源潜力评价方法,提出了基于单元网格的分形矿产资源量估计方法,并以云南铅锌矿产资源潜力评价为实例进行了实验,得到初步结果.

但是单元网格大小对于评价结果的影响有待于进一步研究,非总合式与总合式结合评价方式也可以有很多种,有待于进一步研究.

致谢:承蒙云南省地矿局信息中心李定平博士帮忙(提供评价数据和许多相关资料),特此表示感谢.

References

Barton, C. C., Scholz, C. H., 1995. The fractal size and spatial distribution of hydrocarbon accumulations: implica-

- tions for resource assessment and exploration strategy. In: Barton, C. C., La Pointe, P. R., eds., *Fractals in petroleum geology and earth processes*. Plenum Press, New York, 13—34.
- Cheng, Q. M., Agterberg, F. P., Bonham-Carter, G. F., 1996. Fractal pattern integration for mineral potential estimation. *Natural Resources Research*, 5(2): 117—130. doi:10.1007/BF02257585
- Li, C. J., Ma, T. H., Zhu, X. S., et al., 2002. Fractal principle of mineral deposit size forecasting and its implication for gold resource potential evaluation in China. *Acta Geologica Sinica*, 76(3): 378—386. doi:10.1111/j.1755-6724.2002.tb00554.x
- Li, L. J., Liu, H. T., Liu, J. S., 1999. A discussion on the source bed of Pb-Zn-Ag deposits in Northeast Yunnan. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metals*, 8(6): 333—339 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. W., Zhao, J. M., Li, C. Y., 2007. The evaluation method of potential mineral resources based on GMS, DSS and GIS. Seismology Press, Beijing (in Chinese).
- Lian, C. Y., Su, X. S., 2000. Fractal estimation for resource extent of gold in Jiaodong exploration field. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 30(1): 24—27 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. C., Lin, W. D., 1999. The study of law of Pb-Zn-Ag deposits in Northeast Yunnan. Yunnan University Press, Kunming, 60—128 (in Chinese).
- Liu, X. D., Xu, J. Z., Wang, X. T., 2000. A fractal method to predict the number and size of gas fields. *Acta Petrolei Sinica*, 21(2): 3, 42—44 (in Chinese with English abstract).
- Luo, J. L., 1995. The metallogenic model of Sn, W, Pb-Zn and Ag deposits in Southeast Yunnan. *Yunnan Geology*, 14(4): 319—332 (in Chinese).
- Meng, X. G., Zhao, P. D., Li, C. W., 1996. On fractal statistics of geological phenomena. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 21(6): 601—603 (in Chinese with English abstract).
- Shen, W., 2002. Fractal chaos and mineral prediction. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- The MathWorks Inc., 2002. Neural network toolbox user's guide, Version 4.
- The Office of Geology and Mineral Resources of Yunnan Province, 1997. The records of Yunnan Province, Volume IV: the records of geology and mineral resources. Yunnan People Press, Kunming (in Chinese).
- Wang, S. C., Cheng, Q. M., Fan, J. Z., 1990. The comprehensive information evaluation methods of gold mineral resources. Jilin Science and Technology Press, Changchun (in Chinese).
- Wu, G. G., Wu, X. D., 1989. A preliminary study on the tectonic evolution and the mineralization regularity of the Jinding lead-zinc deposit, Yunnan Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 14(5): 477—486 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P. D., Hu, W. L., Li, Z. J., 1983. The statistic and forecasting of deposits. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhu, Y. S., 1984. Introduction to mineral resource evaluation methods. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

- 李长江, 麻士华, 朱兴盛, 等, 2002. 矿床储量预测的分形原理——中国金矿资源潜力评价. 地质学报(英文版), 76(3): 378—386.
- 李连举, 刘洪滔, 刘继顺, 1999. 滇东北铅、锌、银矿床矿源层问题探讨. 有色金属矿产与勘查, 8(6): 333—339.
- 李裕伟, 赵精满, 李晨阳, 2007. 基于 GMS、DSS 和 GIS 的潜在矿产资源评价方法. 北京: 地震出版社.
- 连长云, 苏小四, 2000. 胶东地区未发现金矿床资源总量的分形估计. 长春科技大学学报, 30(1): 24—27.
- 柳贺昌, 林文达, 1999. 滇东北铅锌银矿床规律研究. 昆明: 云南大学出版社, 60—128.
- 刘晓冬, 徐景祯, 王兴涛, 2000. 分形方法预测气田数量及其储量. 石油学报, 21(2): 3, 42—44.
- 罗君烈, 1995. 滇东南锡、钨、铅锌、银矿床的成矿模式. 云南地质, 14(4): 319—332.
- 孟宪国, 赵鹏大, 李才伟, 1996. 试论地质现象的分形统计学. 地球科学——中国地质大学学报, 21(6): 601—603.
- 申维, 2002. 分形混沌与矿产预测. 北京: 地质出版社.
- 王世称, 成秋明, 范继璋, 1990. 金矿资源综合信息评价方法. 长春: 吉林科学技术出版社.
- 吴淦国, 吴习东, 1989. 云南金顶铅锌矿床构造演化及矿化富集规律初探. 地球科学——中国地质大学学报, 14(5): 477—486.
- 云南省地质矿产厅, 1997. 云南省志(卷四): 地质矿产志. 昆明: 云南人民出版社.
- 赵鹏大, 胡旺亮, 李紫金, 1983. 矿床统计预测. 北京: 地质出版社.
- 朱裕生, 1984. 矿产资源评价方法导论. 北京: 地质出版社.