

文章编号 1258-7106 (2008) 06-0782-09

中国铁矿床品位-吨位模型^{*}

阴江宁, 肖克炎, 邹 伟, 丁建华, 娄德波

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要 文章以 2005 年国家有关部门公布的铁矿储量数据为依据, 在拥有翔实和权威的铁矿数据材料的基础上, 经过分析整理和统计计算, 以铁矿的 6 种矿床类型 (沉积变质型、沉积型、矽卡岩型、岩浆岩型、火山岩型和风化型) 为划分依据, 建立了中国铁矿及其伴生矿种的品位和吨位模型, 并对其品位-吨位联合分布的模型进行了研究。通过研究得出结论, 中国铁矿的资源量不服从正态分布, 经过对数变换后服从正态分布, 品位除了矽卡岩之外都直接服从正态分布。由于铁矿的品位和吨位之间相关性较差, 因而不具备分形特征。最后通过建立吨位和品位的直方图来构造正态分布函数, 从而实现累计概率曲线的拟合。在取得了远景区的矿床类型、矿床数分布以及矿床的品位和吨位的累计概率曲线后, 可以使用计算机通过蒙特卡洛模拟的方法来实现远景区资源量的预测和模拟。

关键词 地质学 铁矿 品位 吨位 正态分布 概率

中图分类号 : P618.32 ; P628

文献标志码 : A

The grade and tonnage model for China's iron deposits

YIN JiangNing, XIAO KeYan, ZOU Wei, DING JianHua and LOU DeBo
(Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

The grade and tonnage of a deposit constitute the basis and important reference criteria in the assessment of mineral resources, and hence make up the leading research orientation in this aspect. If researchers want to establish a grade and tonnage model for a certain metal, they must possess as many precise data as possible, otherwise the statistical significance will be lost. The standard grade and tonnage model can be established on the basis of careful researches on the distribution and type features. Once the grade and tonnage model is established, it can be used to predict the potential quantity and quality of the main and associated ores in the ore district. This paper is based on the data of iron resource provided by the national related department in 2005, which can ensure that the resource data are full and accurate. Through a careful statistic analysis based on experts' idea that iron deposits can be classified into six types (metamorphosed sedimentary deposits, sedimentary deposits, skarn deposits, magmatic deposits, volcanic deposits and weathering deposits), a grade and tonnage model for iron deposits was established and the features of their distribution were studied. It is concluded that the iron quantity of different deposit types does not accord with the normal distribution but is in accord with the log-normal distribution. The grade of the iron deposit directly accords with the normal distribution except for that of the skarn deposit. As the relationship between the tonnage and the grade of iron is indistinct, the ton and grade of an iron deposit do not have fractal features. The accumulated probabilities distribution curve of iron tonnage and grade can be acquired through constructing the function of normal distribution by means of histogram. When

^{*} 本文得到中国地质调查局项目“全国重要矿产总量预测”(编号: 1212010733806)的资助

第一作者简介 阴江宁, 男, 1975 年生, 博士, 矿产资源评价专业。E-mail: mark-johnson@163.com

收稿日期 2008-02-25 ; 改回日期 2008-08-18。李 岩编辑。

the type and the amount of a deposit as well as the accumulated probabilities distribution curve of iron tonnage and grade are obtained, the computer can be used to estimate the potential quantity of the ore district by means of Monte Carlo simulation.

Key words: geology, iron deposit, grade, tonnage, normal distribution, probabilities

在矿产资源评价和预测中,成矿远景区矿床数和资源量的估计是一项重要任务,而矿床的品位和吨位是评价的要素和重要参考指标。建立矿床的品位和吨位模型是为了对成矿远景区内未发现矿床的品位和资源量进行潜力预测和评价(Singer et al., 1988),它是美国地调局提出的“三步式(Three-Part)”矿产资源评价方法中的第二步,其原理基础是同种矿床类型的模型类比。矿床模型不仅在成矿地质环境、控矿因素和找矿标志等方面可以进行相似类比,在矿床品位和吨位方面同样也可以进行相似类比。未发现矿床的矿石吨位和金属的品位被认为与已发现的相同类型矿床具有相似的分布。标准的品位-吨位模型可以用来模拟未知地区的资源量。

矿床的品位和吨位是近年来国际矿床学界研究的热点,美国地质调查局和加拿大地质调查局一些专家对此展开了详细的研究,并对品位和吨位模型的建立不断提出一些新的观点。辛格(Singer)等建立了全世界90个矿床的标准品位吨位分布模型(考克斯等,1990),近年来又提出在建立品位和吨位模型中加入空间要素,即2 km规则,以利于未发现矿产资源评价的稳定性(Singer et al., 2007),本文采用了这一规则。

在中国,对一些主要矿产资源,例如金矿(魏民等,2001;王庆飞,2007)、铜矿(肖克炎等,2004)、锡矿(夏庆霖等,2007)^①的品位和吨位等都进行了较为详细的研究,但是对于铁矿品位-吨位模型的研究,由于资料来源和数据完备性问题,研究相对比较少,仅针对中国个别省、市、地区的铁矿进行过研究。

本文以2005年公布的中国2 800多个铁矿区的上万数据为统计依据,资源储量类别按累积查明资源量,经过分类整理、统计分析,建立了中国铁矿及其伴生矿种的品位-吨位模型、品位-吨位联合模型。由于铁矿的数据量较大,在分析中较多地使用了数据库操作方法等计算机技术。在数据处理中,使用了SPSS统计软件,最终结果导入基于GIS的矿产资

源评价系统(MRAS)的MARK3模块。

1 中国铁矿资源概况

1.1 中国不同类型铁矿储量概况

在上述中国铁矿床的数据库的基础上,经过统计整理得出中国已探明铁矿床1 318个(不包括台湾省),其中沉积型342个、沉积变质型297个、火山岩型68个、风化型148个、岩浆岩型49个、矽卡岩型414个(见图1)。其中超大型矿床(>10亿吨)共计11个,沉积变质型占6个,矽卡岩型1个,火山岩型1个,岩浆岩型3个。铁矿累积查明资源量:653.6亿吨,其中沉积变质型:312.8亿吨,占48%;沉积型:53.29亿吨,占8%;矽卡岩型:81.11亿吨,占12%;火山岩型:52.51亿吨,占8%;岩浆岩型:99.75亿吨,占15%;风化型:4.65亿吨,占1%;其他类型(包括成因不明):49.5亿吨,占8%。由此看出,无论是超大型矿床个数还是铁矿资源储量,沉积变质型铁矿都占绝对多数。

1.2 中国铁矿分布

中国铁矿储量主要分布于辽宁、河北、四川、山西、安徽、湖北、云南、山东、内蒙古、河南和北京等省、市、自治区(图2)。按产地集中程度可划分出10大成矿区,它们是:①鞍山—本溪成矿区;②冀东—北京密云成矿区;③攀枝花—西昌成矿区;④五台—吕梁成矿区;⑤宁芜—庐枞成矿区;⑥包头—白云鄂博成矿区;⑦鲁中成矿区;⑧邯鄹—邢台成矿区;⑨鄂东成矿区;⑩海南成矿区。

2 中国铁矿床品位-吨位模型

按照中国铁矿床的预测类型划分方案^②,中国铁矿床成矿类型可以分为沉积变质型、沉积型、矽卡岩型(接触交代)、岩浆岩型、火山岩型和风化型等6种类型(表1)。

① 夏庆霖,等. 2007. 矿产定量预测方法与技术. 中国地质大学(武汉)资源学院.

② 中国地质科学院矿产资源研究所. 2008. 全国铁矿预测类型划分方案.

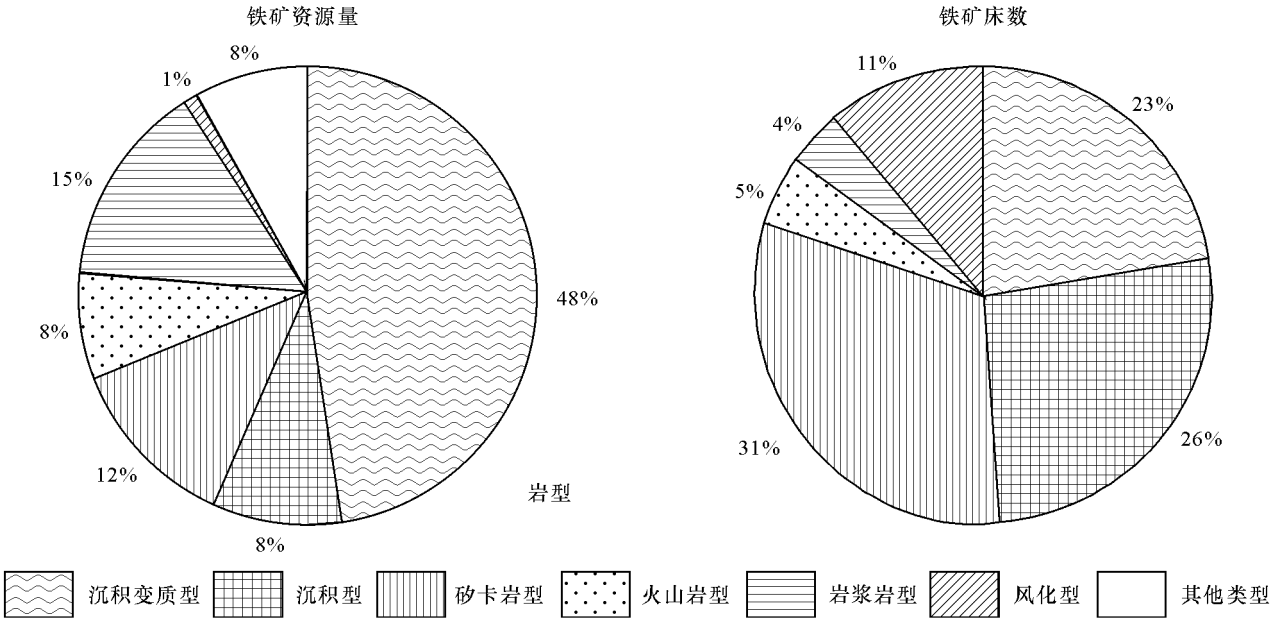


图 1 中国主要铁矿类型资源量和矿床数统计分布图

Fig. 1 Statistics of the quantity of China's iron resources and distribution of deposit numbers

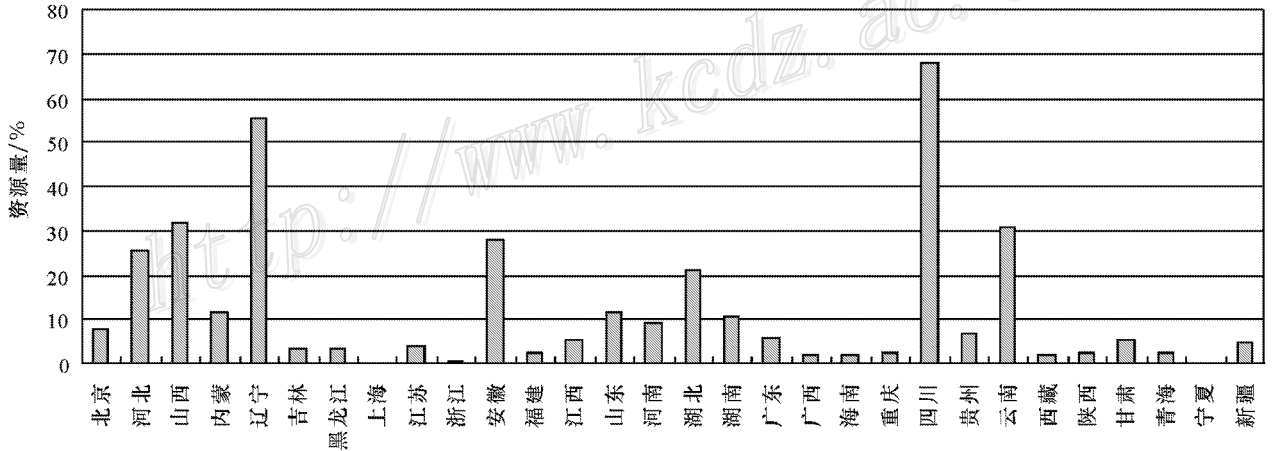


图 2 全国各省铁矿资源量直方图

Fig. 2 Histogram of iron resources in different provinces of China

表 1 不同类型铁矿床数

Table 1 The contrast between different deposit types

矿床规模	沉积变质型/个	沉积型/个	矽卡岩型/个	火山岩型/个	岩浆岩型/个	风化型/个
小型	162	249	309	38	27	139
中型	81	84	90	24	13	8
大型	54	9	15	6	9	0

本文采用上述铁矿类型划分方案。在铁矿的品位-吨位研究和建模中,主要依据赵鹏大等(1990)及美国地质调查局(Singer et al.,1986)的观点。

用以建立品位和吨位模型的矿床需要满足以下条件:

(1) 参与建模的矿床(点)具有代表性且勘探程

度较高,需要达到一定数量。

(2) 对资源量影响较大的大、中型矿床在统计中不能遗漏。

(3) 矿床类型不清楚的不能参与建模。

同时应该去除低吨位和低品位的矿点和矿化点,这些低边界吨位、品位的矿床会影响整体分布,从而影响预测的准确性。

本文对铁矿品位-吨位分布特征检验采用了 3 种方法：

(1) 利用 SPSS 软件中的直方图及 Q-Q(正态概率纸)检验,如果直方图拟合曲线为正态曲线或者 Q-Q 图为一直线,则认为其分布为正态分布,本文主要利用这种方法进行检验。SPSS 软件中的 Q-Q 图

检验比较直观、使用简便；

(2) 正态分布的偏度和峰度检验,利用 SPSS 软件得出分布的偏度和峰度参数,导入公式进行偏度和峰度检验,确定是否为正态分布。当样本符合正态分布时,偏度为 0,峰度为 3。偏度峰度检验法是大样本检验法,要求样本容量大于 30；

(3) 在基于 GIS 的矿产资源评价软件(MRAS)中进行交叉验证。

下面以沉积变质型铁矿矿石量分布特征为例进行说明(图 3)。

从图 3 铁矿的矿石量直方图可以看出其对称性差,Q-Q 图为弯曲的曲线,说明不服从已知分布,在对矿石量取对数后,得到图4,其直方图拟合出正态曲

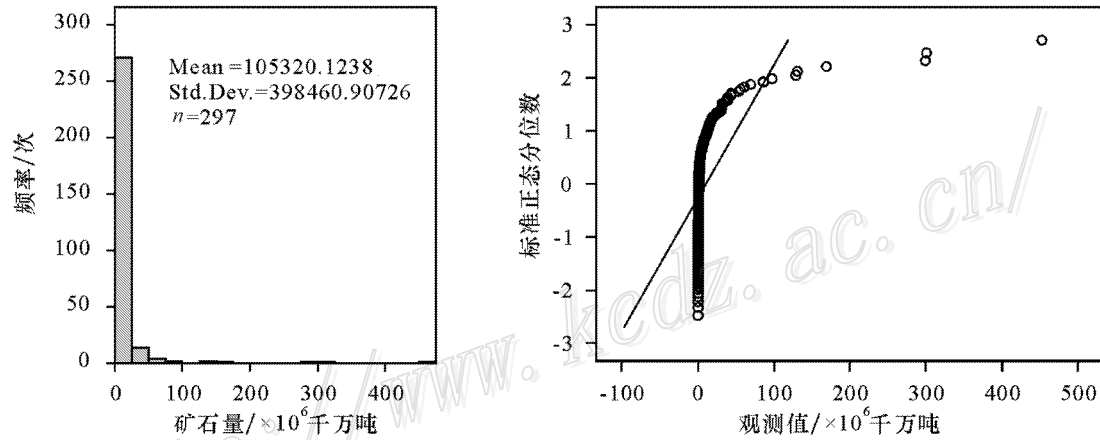


图 3 沉积变质型铁矿资源量统计直方图(左)和矿石量的标准 Q-Q 图(右)

Fig. 3 Histogram(left) and Q-Q diagram(right) for resources of the meta-sedimentary type iron deposits

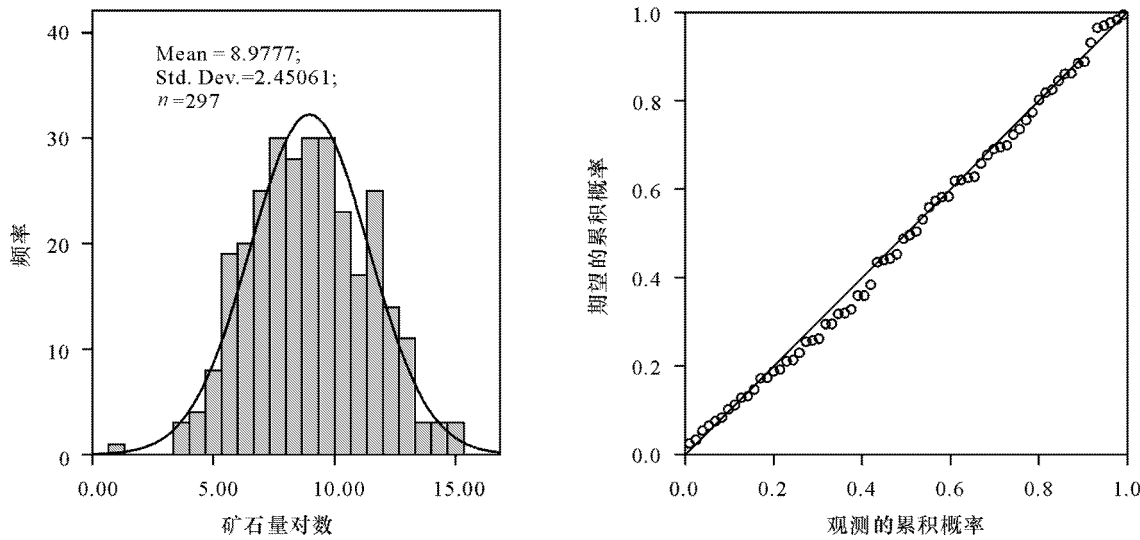


图 4 沉积变质型铁矿资源量统计直方图(左)和矿石量对数的正态 P-P 图(右)

Fig. 4 Histogram(left) and P-P diagram(right) for resources of meta-sedimentary type iron deposits

线,P-P 图近似为一直线,说明沉积变质型铁矿服从对数正态分布。

对于矿产资源的品位-吨位分布规律,比较一致的观点是认为矿床的资源量符合对数正态分布,品位符合正态分布,储量和品位之间存在某种分形关系。从上述分布检验后的结果可以看出,6 种矿床类型资源量不符合正态分布,但是将吨位数据进行对数变换以消除偏度后,铁矿 6 种矿床类型储量都服从正态分布。除矽卡岩型矿床的品位只服从对数正态分布外,其他几种矿床类型的品位均直接服从正态分布,同时也服从对数正态分布(见表 2)。对比中国铜矿床的品位和吨位模型(肖克炎等,2004),一般由一次地质成矿作用形成的矿床,如岩浆岩型铜矿,直接服从正态分布,而中国铁矿的岩浆岩型矿床资源量却不服从正态分布。从统计的铁矿数据库可以发现中国铁矿的各个矿床类型中,小型矿床(< 1 000 万吨)数量多,占绝对优势,中型矿床(1 000 万

吨~1 亿吨)少,大型(1~10 亿吨)的更少,分布不集中,这也反映了中国铁矿的分布现状。

3 铁矿床品位-吨位联合分布研究

矿床品位-吨位联合分布是将某一矿床类型的品位和吨位放在同一个坐标系内研究其相关性。图 5 为 6 种铁矿类型的品位-吨位联合分布图。

从图 5 中可以看出,铁矿床的品位大多集中在 30%~40% 之间,50%~60% 及以上所占比例偏小,反映出中国铁矿品位较低,贫矿多,富矿少。从图中添加的趋势线可以看出,伴随着矿床资源量的加大,其品位出现逐渐降低的趋势,符合 Lasky 定律(Lasky, 1948)。

以沉积变质型铁矿的品位 Y 和吨位 X 为 2 个自变量,采用全部入选法建立一元线性回归方程,得出其相关系数为 -0.009,取双对数后相关系数为

表 2 中国各种铁矿类型的吨位、品位统计特征								
Table 2 Statistical features of grade and tonnage of different iron deposit types in China								
矿床类型	矿石量统计特征				品位统计特征			
	最大值/千吨	最小值/千吨	平均值/千吨	分布特点	最大值/%	最小值/%	平均值/%	分布特点
沉积变质型	4524199	2000	105320	分布极不对称,具有长尾偏对称的特点,不符合已知分布。取对数后服从正态分布,在 Q-Q 图上近似为直线	48.66	21.8	31.47	偏度峰度检验直接服从正态分布,在 Q-Q 图上近似为一直线。同时服从对数正态分布
沉积型	556896	1800	15583	原始数据不符合已知分布。取对数后服从正态分布,在 Q-Q 图上近似为一直线	63.64	20.29	36.1	偏度峰度检验以及 Q-Q 检验不服从已知分布,取对数后服从正态分布。同时服从对数正态分布
矽卡岩型	1628423	2000	19593	符合对数正态检验和 Q-Q 检验,服从对数正态分布	67.1	20	40.32	偏度峰度检验以及 Q-Q 检验不服从已知分布,取对数后服从正态分布
岩浆岩型	3910575	2300	203568	Q-Q 检验近似为一直线,服从对数正态分布	68.24	14.46	32.5	Q-Q 检验近似服从正态分布,同时服从对数正态分布
火山岩型	1993969	1900	77223	Q-Q 检验近似为一直线,服从对数正态分布	58.29	22.35	37	直接服从正态分布,同时服从对数正态分布
风化型	89323	1600	3142	Q-Q 检验近似为一直线,服从对数正态分布	69.18	27	43.9	服从正态分布,同时服从对数正态分布

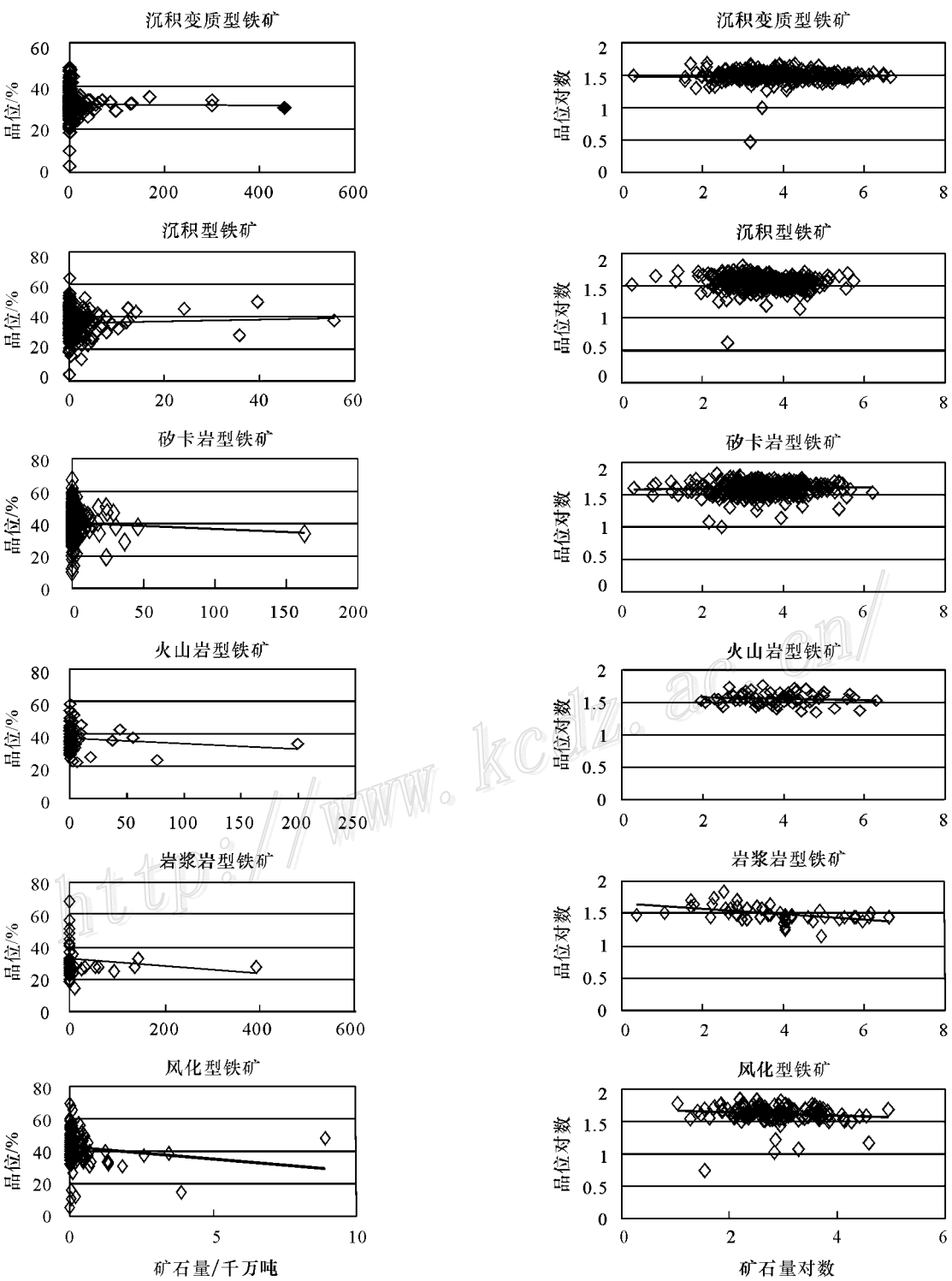


图 5 不同铁矿类型的品位-吨位联合分布图(左列为品位-吨位联合分布图,右列为双对数联合分布图)

Fig. 5 United distribution diagram of both grade and tonnage of different iron deposit types

0.02。同时用回归法得出其他几种铁矿类型的相关系数(前者是品位-吨位原始数据,后者为其双对数)沉积型铁矿 0.036, -0.07 矽卡岩型: -0.043, 0.049 岩浆岩型: -0.152, -0.487 火山岩型: -0.113, -0.113 风化型: -0.136, -0.136。从这些数据可以看出,除岩浆岩型铁矿品位和吨位存在一定的相关性外,其他几种铁矿类型相关性较差,不具备分形特征。

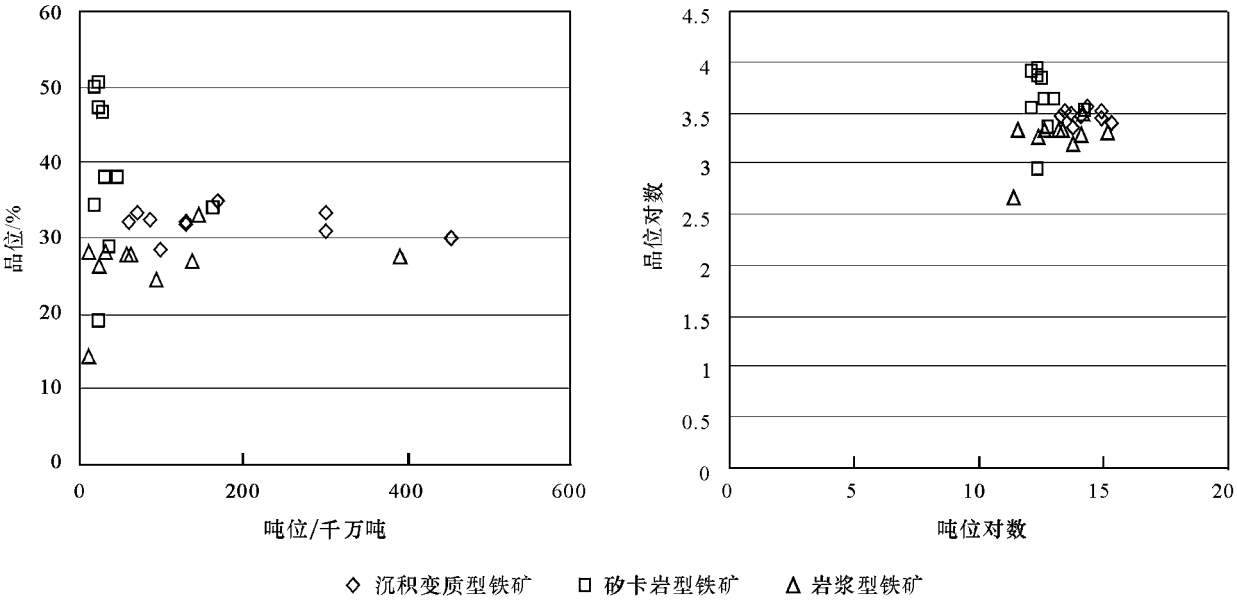


图 6 3 种铁矿类型吨位-品位叠加分析

Fig. 6 Overlay analysis of three different types of iron deposits

为了进一步研究不同铁矿床类型的吨位与品位的关系,特将沉积变质型铁矿、矽卡岩型铁矿和岩浆岩型铁矿分别按品位-吨位、品位-吨位取对数后投到坐标系中(图 6)。从图 6 中可以看出,这 3 种铁矿类型的分布点重叠较多,具有一定的相似性。

4 铁矿的品位和吨位累计概率曲线

研究铁矿各个矿床类型的品位、吨位特点,是为了获得各个矿床类型的品位和吨位模型,通过建立模

型区的特定矿床类型的资源量和品位的累计概率曲线以及蒙特卡洛模拟,可以对预测区进行潜在资源量的模拟。下面以沉积变质型铁矿的吨位和品位累计概率曲线为例进行分析说明。

沉积变质型铁矿的矿石量不符合正态分布,不能直接用累计概率曲线来模拟,但其符合对数正态分布,可以将沉积变质型铁矿矿石量取对数逼近直方图来模拟其累计概率曲线。

图 7 为沉积变质型铁矿吨位对数的累计概率曲线。

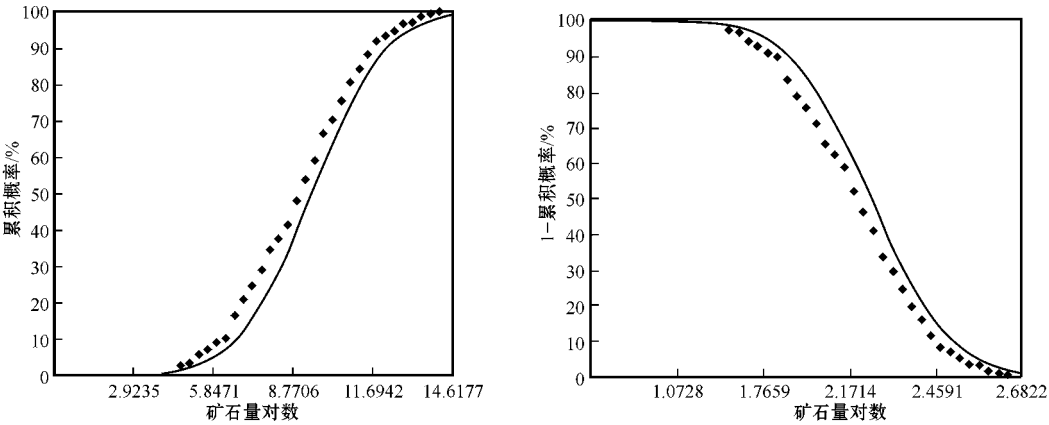


图 7 沉积变质型铁矿吨位对数累计概率曲线(左为分布函数 $F(M)$ 曲线,右为 $1-F(M)$ 曲线)

Fig. 7 Accumulated probabilities distribution curve of tonnage logarithm of the meta-sedimentary iron deposit [Left-Curve of $F(M)$; Right-Curve of $1-F(M)$]

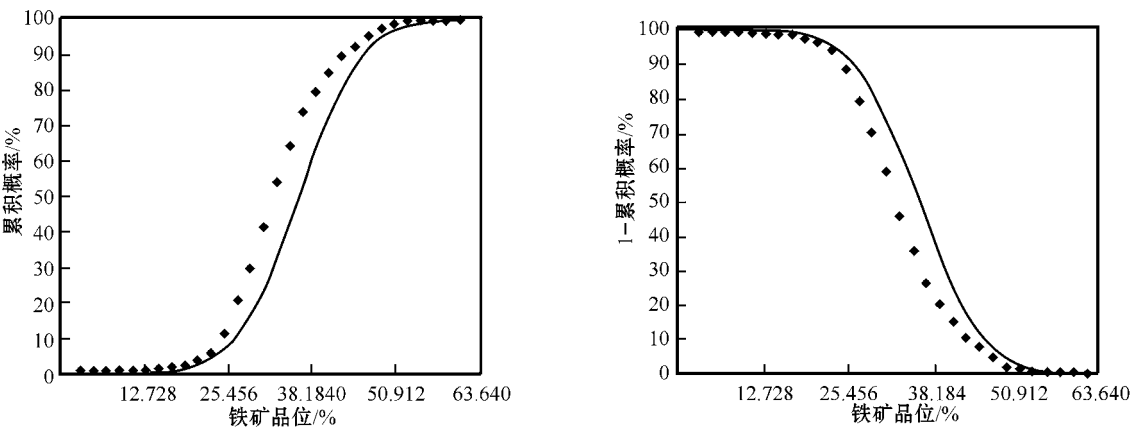


图 8 沉积变质铁矿品位累计概率曲线(左为分布函数 $F(M)$ 曲线,右为 $1-F(M)$ 的分布曲线)

Fig. 8 Accumulated probabilities distribution curve of grade logarithm of meta-sedimentary iron deposits (Left-Curve of $F(M)$; Right-Curve of $1-F(M)$)

沉积变质型铁矿的品位直接符合正态分布,所以可以直接获得其累计概率曲线,图 8 为其沉积变质型铁矿品位的累计概率曲线。

图 7 和图 8 中的曲线代表标准的正态分布函数曲线,点为样本点,它们之间越接近,表明拟合得越好。拟合的程度与样本点的多少有关,样本越多,越接近标准正态曲线。

要想得到累积概率曲线,首先必须构造分布函数 $F(x)$ 。用数学方法构造概率直方图 $F(x)$,是在建立参数频率的直方图基础上进行的。具体做法是:寻找合适的函数 $F(x)$,用它来拟合频率直方图,由于吨位对数和品位都符合正态分布,所以可以直接用正态分布函数 $F(x)$ 来拟合。这里的 x 代表资源量或者是品位等,正态分布 $F(x)$ 曲线实际上就是累积概率曲线。为便于解释,可将它变换为:

$$\overline{F}(x)=1-F(x)=1-P(\zeta < X)=P(\zeta > X)$$

$\overline{F}(x)$ 是定义在 $(0, \infty)$ 上的单调减函数,见图 7 和图 8 的右图。根据这条曲线,就可以估计出任何概率下的资源量。例如,图 8 中横坐标代表品位,纵坐标代表累积概率 $\overline{F}(x)$,则查得纵坐标上概率为 y_0 时对应曲线上的横坐标为 x_0 ,表示的含义为:该类型品位大于 x_0 的可能性不超过 y_0 。

累计概率曲线的计算机表达已经在 MRAS 软件中进行了实现,可以很方便地使用。分布曲线 $F(x)$ 直观地表现了变量的取值规律,使用的概率模型不同,其代表的意义也不相同,它既可以是矿床数,

也可以是矿田或矿带的资源量或者是品位等。

5 品位-吨位模型估计法在资源量模拟中的应用

矿床模型在定量资源潜力评价中的重要性体现在以下 2 点:①大多数矿床类型的品位吨位是不一样的;②出现在不同地质建造中的矿床类型可以在地质图上圈定。每种类型中勘探程度高的品位-吨位模型被用来作为同样地质环境同样类型的未发现矿床的品位-吨位模型,品位-吨位模型与未发现矿床数(Singer et al., 1988)的综合是将地质学家的估计成果转换为经济学家可用数据的过程。

在基于品位-吨位分布的矿产资源定量评价方法中,矿床的品位、吨位分布特征是资源量模拟的基础。如果建立了某个地区(预测区)的品位-吨位模型,则可以估计出该区满足某一吨位数(或平均品位数)的概率。在“三步式”矿产资源潜力评价中,可以用蒙特卡洛法模拟基于一定概率意义下的估算。根据变量的随机分布,再现它的取值规律。蒙特卡洛方法对资源量的预测主要是利用已知数据,即品位和吨位模型,同时利用地质专家的主观概率法预测矿床数目,从而得到预测资源量 $\sum$ (矿点数 $\times$ 矿石量 $\times$ 品位)。在利用吨位和品位模型对预测区进行资源量估计时,要注意的一个问题是:预测区的品位和吨位应具有独立性,并来自整体的分布,否则将不能进行预测,所以要对预测区矿产资源的分布进行检验。

6 结 论

(1) 中国铁矿床中沉积变质型铁矿无论是矿床数还是资源量都占绝对多数,是中国的主要铁矿类型。

(2) 6 种矿床类型的吨位均服从对数正态分布;除矽卡岩型矿床的品位只服从对数正态分布外,其他矿床类型的品位都服从正态分布,同时也服从对数正态分布。

(3) 除岩浆岩型铁矿品位和吨位存在一定的相关性外,其他几种铁矿类型相关性较差,不具备分形特征。

(4) 通过在特定预测区建立特定铁矿类型的品位和吨位的累计概率分布曲线,可实现对远景区的资源量模拟。

References

- Cox D P and Singer D A. 1990. Deposit model [M]. Translated into Chinese by Song B Q, Li W X and Zhu Y S, et al. Beijing: Geol. Pub. House. 9-86 (in Chinese).
- Lasky S G. 1948. Trends in technology and outlook for improvement in mineral position: Search for new mineral supplies [M]. Washington D. C.: Public Affairs Press. 1-10.
- Singer D A and Cox D P. 1988. Applications of mineral deposit models to resource assessments [J]. Geological Survey Yearbook, 55-57.
- Singer D A and Vladimir B. 2007. Mineral resource assessment methodo-

logies deposit models and their application in mineral resource assessments [J]. Geological Survey Circular, 1294: 143.

- Wang Q F, Wan L and Liu X F. 2007. Mathematical modeling and estimation of reserves of typical structural altered rock type gold deposit [J]. Mineral Deposits, 26(3): 341-345 (in Chinese with English abstract).
- Wei M, Zhao P D, Liu H G, Wang X P, Zhao J M and Yang L P. 2001. Research on grade and tonnage of China rock gold [J]. Earth Science, 26(24): 3-50 (in Chinese with English abstract).
- Xiao K Y, Li J C, Chen Z H, He K T and Yan G S. 2004. The modal of China's copper grade-tonnage and the resource appraisal technique [J]. Geol. Rev., 50(1): 50-56 (in Chinese with English abstract).
- Zhao P D, Hu W L and Li Z J. 1983. Deposit statistics and assessments [M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).
- Zhao P D, Wei M and Jin Y Y. 1990. Statistics and analyses geology exploration [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. 50-100 (in Chinese).

附中文参考文献

- 考克斯 D P, 辛格 D A. 1990. 矿床模式 [M]. 宋伯庆, 李文祥, 朱裕生, 等译. 北京: 地质出版社. 9-86.
- 王庆飞, 万丽, 刘学飞. 2007. 典型构造蚀变岩型金矿远景资源量数学模型与预测 [J]. 矿床地质, 26(3): 341-345.
- 魏民, 赵鹏大, 刘红光, 王学平, 赵精满, 杨丽沛. 2001. 中国岩金矿床品位吨位模型研究 [J]. 地球科学, 26(2): 43-50.
- 肖克炎, 李景朝, 陈郑辉, 何凯涛, 严光生. 2004. 中国铜矿床品位吨位模型 [J]. 地质论评, 50(1): 50-56.
- 赵鹏大, 胡旺亮, 李紫金. 1983. 矿床统计预测 [M]. 北京: 地质出版社.
- 赵鹏大, 魏民, 金友渔. 1990. 地质勘探中的统计分析 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 50-100.