

德尔菲法在全国铁铝资源潜力评价中的应用

邹 伟¹, 阴江宁¹, 陈兴华², 肖克炎¹, 娄德波¹

ZOU Wei¹, YIN Jiang-ning¹, CHEN Xing-hua², XIAO Ke-yan¹, LOU De-bo¹

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

2. 国土资源部中央地质勘查基金管理中心, 北京 100045

1. *Institute of Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

2. *Central Geological Exploration Fund Manager Center, Beijing 100045, China*

摘要:探讨了德尔菲法 2 种赋值方法的优缺点, 分析了德尔菲法的原理和流程。全国矿产资源潜力评价项目在已经完成铁铝两个矿种预测的基础上, 以省(自治区和直辖市)为单位, 组织专家运用德尔菲法对全国铁铝矿产的资源量进行了评估, 这是德尔菲法第一次在全国范围内进行预测。本次德尔菲预测中给定 3 个累计概率值: 90%、50%、10%, 由专家来填写资源量, 借助于矿产资源评价的相关软件, 在对数据进行一系列检验、调整、再检验的过程后, 对 3 个预测深度 500m 以浅、1000m 以浅和 2000m 以浅(铝土矿不包含此深度)进行了资源量预测, 各省区市预测结果经过汇总整理后, 经专家研究论证, 认为此次德尔菲法预测铁铝资源量合理有效, 全国铁铝资源前景较为乐观。

关键词:铁和铝; 德尔菲法; 定量预测; 潜力评价

中图分类号: P618.31; P618.45; P612

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2010)10-1539-08

Zou W, Yin J N, Chen X H, Xiao K Y, Lou D B. Application of Delphi method in national iron and aluminum resources assessment in China. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(10): 1539-1546

Abstract: The authors discusses the merits and shortcomings of two means of Delphi value-assigning, and analyzed the principles and procedures of Delphi. In the national mineral resources potential assessment project, experts are invited to assess overall iron and aluminum resource in China province by province. This is the first time that Delphi method was applied in mineral assessment around China. During the execution, three probability values was given: 90%, 50%, 10%, and the experts gave their opinion, then by means of relative software, data will be verified, adjusted, reverified. Resources within three depth range can thus be obtained: within 500 meters, within 1000 meters, and within 2000 meters (not for bauxite). The result of the assessment is regarded to be reasonable and effective, the future of China minerals iron and aluminum is good.

Key words: iron and aluminum; Delphi method; quantity assessment; potential assessment

在矿产资源评价中, 矿产资源定量预测是在一定研究区域内, 在资源靶区预测研究的基础上, 研究预测区内矿产资源潜力与多元地学信息之间的关系, 建立矿产资源潜力估算的统计模型, 并对预测区内的矿产资源潜力进行统计评估^[1]。

资源量预测有 2 种方式, 一种是总和式资源总

量预测, 另一种方式是非总和式资源总量预测, 不同的资源总量预测方式可以使用不同的统计方法来实现。总和式资源总量预测可以选择使用德尔菲法、金属量法、丰度法、蒙特卡洛法和区域价值法; 非总和式资源总量预测可以选择使用数量化理论 I、逻辑信息法和品位-吨位法。

收稿日期: 2010-05-31; 修订日期: 2010-08-02

地调项目: 中国地质调查局《全国矿产定量预测》项目(编号: N0605)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(编号: K0810)资助

作者简介: 邹伟(1981-), 男, 博士, 从事矿产资源评价研究。E-mail: visio@163.com

目前的资源量估算研究中,绝大多数都是用客观评价模型,例如丰度估计法、体积估计法、蒙特卡洛法等。德尔菲法是一种资源量估算的主观评价模型,该方法是根据不同专家的意见进行综合,最后得出一致性的结论的统计方法。

全国矿产资源潜力评价项目在已经完成的铁铝预测的基础上,组织专家统一运用德尔菲法对全国 31 个省(区、市)的铁铝 2 个矿种进行了资源量预测,取得了较为合理的结果,这是德尔菲法第一次在全国范围内进行定量预测。

1 德尔菲法介绍

德尔菲(Delphi)一词源于古希腊,含有预测和评价之意。德尔菲法是一种客观综合多数地质学家经验和判断的方法。通过分别地、不断地向一组地质专家提出一系列矿产资源问题,然后将他们的回答加以综合,直到取得一致的意见形成最后的结论^[1]。

德尔菲法主要基于地质专家的经验和主观认识进行资源评价,不直接使用地质变量。但它并非脱离地质工作而独立存在,对地质专家的要求实际上等于间接地使用了地质资料。参与资源评价的地质专家必须具备这样的条件:有丰富的理论知识和找矿经验;对研究区的地质矿产情况有较详细的了解;对资源评价工作有正确的认识和态度,同时通晓德尔菲方法的原理和应用;具备概率统计方面的知识;对资源评价有实事求是的态度。

在德尔菲法预测中,要分别对专家的权值进行划分,以区分专家由于对预测区地质情况了解的程度不同而对结果的影响程度。专家权值可以设置在 10~100 之间,专家的权值之和可以大于 100,最后在数据处理中对权值进行归一化处理。该方法的优点是:简便易行,资料不受限制,工作周期短,适用性强,在地质工作程度高、低的地区均可使用,尤其适于大区域的战略性和前瞻性估计。借助于资源评价软件,它能够比较方便快捷地对预测区的资源潜力进行评估。德尔菲方法的预测结果可以随着普查勘探工作和研究程度的提高而达到较高的精度^[2]。

2 德尔菲法的工作流程

德尔菲法的工作流程包括问题定义、专家组组成、专家培训、专家赋值和专家组长综合 5 个主要环节。首先要确定资源量估计区的面积、估计资源量的

矿种、矿床类型、资源量估计的参数(矿床数、单个矿床吨位、单个矿床品位)、资源量估计的比例尺、估计区已知矿床资源量、向专家提供的地质和物化遥资料的清单等,同时需要设计一张针对以上问题的专家答卷表,对答卷表的参数和累计概率进行设计。

此次德尔菲法铁铝资源量预测在全国以省(自治区和直辖市)为单位来进行,在各省区市已经圈好的预测区范围内,由专家对预测区进行资源量的综合评估。全国范围内的资源量预测,涉及地域和人数都比较广,所以在项目进行时要设计好详细的实施方案和制定清晰的专家意见征询表。同时由于专家对德尔菲法了解的程度不一,对专家进行培训是必须的。德尔菲法的实施步骤如下:确定矿种和预测区→聘请专家→指定专家组组长→提供地质资料→制定意见征询表→培训专家→填写征询表→数据处理校验→专家估值修正→结果汇总整理。

3 德尔菲法意见征询表

专家的见解通过意见征询表反映出来,最终结果的形成也依据表的内容。德尔菲法的意见征询表有 2 种:一种是按概率回答资源值,另一种是按资源值回答概率。

3.1 按给定的概率回答资源量

即给定概率值,一般是累计概率,它其实反映的是概率区间,然后由专家按概率填写资源量,见表 1。表 1 中的概率值是事先给定的,每个概率对应的是资源量的估计值。这里采用描述性语言解释表中数据的含义,第一格意义为:资源量不会低于 $0.3\times 10^4\text{t}$;第 2 格意义为:资源量大于 $0.5\times 10^4\text{t}$ 的概率不超过 75%;最后一格意义为:资源量不会超过 $1.6\times 10^4\text{t}$ 。

3.2 按给定的资源值回答概率

给出一定的资源量区间,然后由专家填写诸资源量区间内的概率。在表 2 中,资源量区间是事先给定的,要求专家按此填写概率。表 2 中的概率仍为累积概率,各格代表的意义与前例相似。例如可以读

表 1 资源量意见征询表
Table 1 Resource quantity consultant form

概 率	1	0.75	0.5	0.25	0
资源量/ 10^4t	0.3	0.5	1.0	1.2	1.6

表 2 资源量意见征询表

Table 2 Resource quantity consultant form

资源量/10 ⁴ t	≥0	≥1	≥2	≥3	≥4	≥5	≥6	≥7	≥8	≥9
概 率	1	1	1	1	0.99	0.9	0.8	0.65	0.4	0

出：预测区内资源量大于 5×10⁴t 的概率不超过 90%，预测区内资源量大于 6×10⁴t 以上的概率不超过 80%。根据专家给出的累积概率，我们还能读出矿床取各种值的概率。例如：预测区内资源量为 5×10⁴t 的可能性为 10%，预测区内资源量为 6×10⁴t 的可能性为 15%。容易得出，概率值是由相邻 2 个累计概率相减得到的。

这种方式赋值的优点是其统计意义明确，符合人们考虑问题的习惯，后期结果汇总和整理比较容易处理。缺点是，累计概率对地质工作者不是很直观，最大的概率不代表最有可能的事件，它与事件概率对应起来也比较困难，而且容易出错^[3]。

3.3 意见征询表的确定

各个省区市预测区资源量范围差别较大，不易划分固定的区间，同时地质专家对资源量的把握相对于概率应更为准确，资源量赋值比概率赋值相对容易一些。所以此次选择给定概率区间由专家填写资源量的方式。

基于以上考虑，并且减轻专家赋值的复杂度和难度，只给出了 3 个累计概率值，分别是 90%、50% 和 10%。这 3 个概率值分别表示资源量的最低值、最可能值和最大值，其意义分别为资源量“不低于”“最有可能”“不超过”3 个含义。其中，累计概率为 10% 的资源量大于累计概率为 50% 的资源量，累计概率为 50% 的资源量大于累计概率为 90% 的资源量。在这 3 个概率下，分别对 3 个深度的资源量进行预测，即 500m 以浅、1000m 以浅和 2000m 以浅。作为沉积型矿产，铝土矿勘探深度一般不超过 2000m，所以进行铝土矿预测时只预测到 500m 和 1000m。资源量单位为 10⁴t，资源量赋值不包括已查明的资源量。设计好的意见征询表见表 3。

4 德尔菲法原始数据的合理性评估

德尔菲法是一种概率统计方法，在填表的过程中要避免一些概率的概念错误。

例如，概率之和不等于 1，估计的众数值落在最大值、最小值之外等。特别是一些表现在分布形式上的问题往往不被注意，所以要进行数据的分布检验。估值数据如果出现以下几种情况，说明专家估值不合理或者异常，需要专家重新估值，对数据重新进行调整。

4.1 多峰

表 1 中的估计值概率分布在表中似乎没有什么问题，但是从作出它的分布图(图 1 左图)中立即就可以看出这是一个双峰分布，这类分布反映了数据混乱：对一个问题的估计既可能这样也可能那样。在这个估计中，认为资源量取在 (3~5)×10⁴t 之间和 (1~1.2)×10⁴t 之间最有可能，取其他值的可能性都很小。显然这种模棱两可的估计是难以做出合理解释的。

4.2 偏奇

表 2 中的估计值用概率图(图 1 右图)表示，这是一个偏奇分布。由峰值可看出，预测区内资源量在 (1.3~1.5)×10⁴t 之间可能性最大，但接着的结论却是预测区内资源量大于 1.5×10⁴t 可能性最小。于是出现了这样的情况：最可能发生的事情紧跟着最不可能发生的事情，这是不符合人们估计问题的习惯的。

4.3 近似均匀分布

有的专家出于某种考虑，将估计结果区间给得很大，而每个区间概率又很小，造成如图 2 所示的结果。在这里，专家给出的各种可能性都差不多，反映

表 3 德尔菲法资源量意见征询表

Table 3 Consultant form of Delphi resource quantity

	概率 90 % (可靠程度最高 最谨慎的估计)	概率 50 % (有一定可靠程 度的一般估计)	概率 10 % (最乐观 的估计)
预测深度			
500m 以浅			
1000m 以浅			
2000m 以浅			

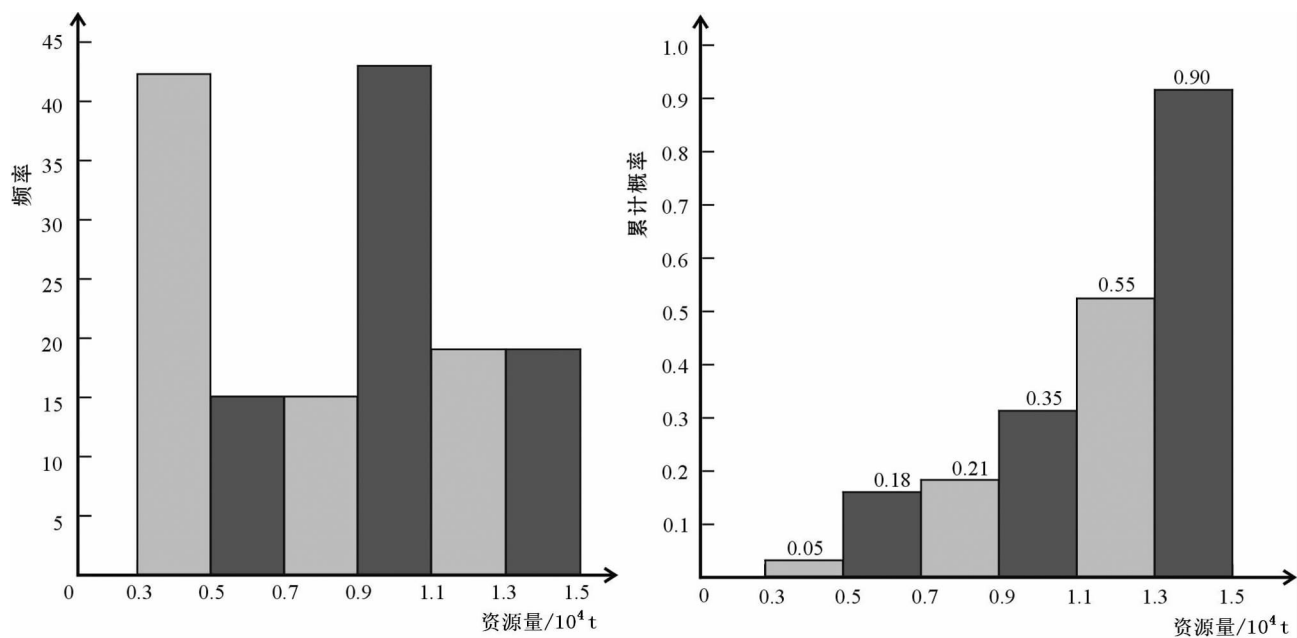


图1 估值统计直方图

Fig. 1 Histogram of estimation value

专家为求保险而不肯表示倾向性意见,其可信程度随方差的增大而减小。

4.4 检验标准

此次德尔菲法预测的原始数据进行检验的时候可以参照2个标准。

(1)做出专家众数值的概率分布,若这个分布的众数值相应的概率已达到0.5以上,即有一半以上的人持同一种看法,反复提问就可以终止。

(2)同一个预测深度、同一累计概率下的资源量值应该近似地服从正态分布或对数正态分布(图3)。如果不服从,应当对异常值进行调整,否则会影响结果的准确性,导致正常值偏大或偏小。

德尔菲法预测中要特别注意几个关键值:众数值、平均值、最大值和最小值。它们的重要性不同。通常在专家的个人估计结果中,众数值是比较可靠的,在填表时专家首先确定这个值,它反映了专家对资源量的主导看法;对全体专家来说,众数值反映了多数人的意见,因此有较大的可信性。人们寄予期望值较多的平均值,却不是专家有意识给出来的,特别是特高或特低的估计值对平均值有较大的影响,因此在使用时需加以注意。至于最大值和最小值,它们是

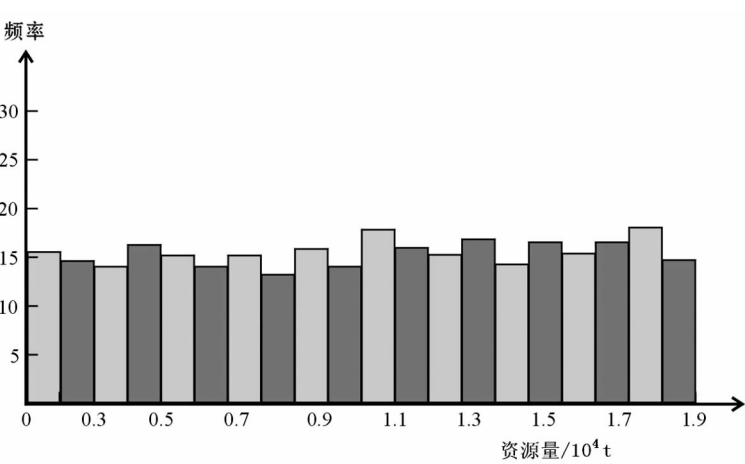


图2 区间给得过大时形成的概率分布

Fig. 2 Probability distribution when the range is overset

资源量取值的上、下限,可信度较低,一般不对它们作解释^[4]。

5 德尔菲法算法原理

专家咨询表的填写只是完成了德尔菲法预测的第一步,专家填写的数值作为原始数据进行合理性校验之后,还要做相应的分组和统计学处理,才能得出合理有效的结果。为此这些数据的最后处理必须以相应的算法来实现。

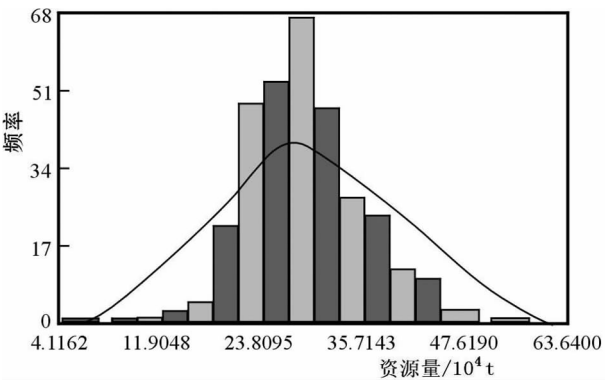


图 3 估值的正态分布直方图和正态曲线
Fig. 3 Histogram and curve of normal distribution of the estimation result

第一步:在德尔菲法预测中,系统对专家输入资源量数值从小到大进行分组,默认的是分为 10 组,也可以由用户自己设置。

第二步:累计概率是资源量概率累计之和,反映的是资源量逐步累加的趋势,所以必须将累计概率转化为事件概率,以反映事件本身的独立可能性。

第三步:根据第一步分出的资源量区间,统计落在每个资源量区间的概率值。

第四步:将第三步的概率值与专家权值进行运

算,得出每个区间的加权概率值。

第五步:将每个概率区间的概率值与其区间资源量的下限值相乘,并求其总和,即为所有专家的预测各个概率下的最有可能的资源量。

第六步:对上面得到的资源量进行检验,若其置信概率在 0.683(正态分布的数值落在均值加减 1 倍方差的概率)以上,则认为这个资源量是合理的。

现举例说明如下。

某一轮上专家对资源量的估计结果见表 4,各位专家估计的众数值在表中用黑体字表示,在表的下数第二行给出了这些众数值落在各组上的频率。可以直接看出专家估值的众数值落在第四组,即资源量取在 $(30\sim40)\times10^4\text{t}$ 之间最多,达到 $7/12=0.583$ 。故可以认为意见已基本一致,反复提问过程不再进行。

专家的概率估计值的算术平均值($\bar{\rho}$)列在表 4 的最末一行中。现在考虑专家估计值的综合分布,为此求得资源量的均值

$$\bar{x}=\sum_{i=1}^{\infty}\bar{p}_ix_i=35.54$$

和方差

$$S^2=\sum_{i=1}^{\infty}\bar{p}_i(x_i-\bar{x})^2=170.35$$

其中 $\bar{x}$ 为资源量均值, $\bar{p}_i$ 为累计概率, x_i 为各个区间

表 4 资源量概率估计综合表
Table 4 Probability estimation of quantity estimation

分组	1	2	3	4	5	6	7	8	9
资源量/ 10^4t	≤ 10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80	>80
专家 1	0	0.05	0.20	0.35	0.25	0.15	0.05	0	0
专家 2	0.05	0.15	0.45	0.25	0.10	0	0	0	0
专家 3	0	0.10	0.20	0.50	0.15	0.05	0	0	0
专家 4	0	0.10	0.30	0.40	0.20	0	0	0	0
专家 5	0	0	0.10	0.25	0.40	0.15	0.10	0	0
专家 6	0.15	0.35	0.25	0.15	0.10	0	0	0	0
专家 7	0	0.05	0.25	0.45	0.20	0.05	0	0	0
专家 8	0.05	0.10	0.15	0.30	0.20	0.15	0.05	0	0
专家 9	0	0	0.35	0.40	0.25	0	0	0	0
专家 10	0	0	0	0.15	0.35	0.30	0.15	0.05	0
专家 11	0	0	0.20	0.40	0.20	0.10	0.10	0	0
专家 12	0	0.15	0.35	0.30	0.15	0.05	0	0	0
众数频数	0	1	2	7	2	0	0	0	0
频 率	0	0.083	0.167	0.583	0.167	0	0	0	0
$\bar{p}$	0.02	0.088	0.229	0.329	0.213	0.083	0.038	0.04	0

的资源量, S 为资源量方差。算得标准差 $\delta=13.05$,取区间 $(\bar{x}-\delta=22.5,\bar{x}+\delta=48.6)$,资源量落在这个区间内的概率为

$$p=0.229\times\frac{30-22.5}{10}+0.329+0.213\times\frac{48.6-40}{10}=0.683$$

这个值已达到指标,故提问过程结束。

上述准则是在专家经少数几次提问、意见能够集中的条件下给出的。当意见特别分散,多次提问仍不能达到统一时,不能使用前面介绍的方法。此时可根据综合分布的稳定情况确定最终结果。一般来说,前后 2 次填表差别不大时,说明专家对自己的意见已经没有什么需要修改的了,提问即可终止。不论使用哪种方法,反复的次数都不宜过多,因为多次提问会给专家造成追求一致的心理压力,这样的意见统一也是不可信的。

6 德尔菲法估值结果的输出

德尔菲法最后的预测结果,仍然是给出 90%、50%和 10%三个累计概率下的资源量,它是所有专家加权分析的结果;同时输出一个资源量加权的均值,是综合各个累计概率下、不同权重的综合分析的

结果,是该地区德尔菲法预测最有可能的资源量;最后输出 3 个深度下资源量的累计概率曲线(如图 4 所示)。

7 全国铁铝德尔菲法预测资源量的评估

全国铁矿按 31 个省(自治区和直辖市)共划分出铁矿预测工作区 388 个。运用德尔菲法,不分预测类型,预测全国铁矿资源量为(不含已查明的铁矿资源量):500m 以浅 $538.9\times10^8\text{t}$ 、1000m 以浅为 $1257.6\times10^8\text{t}$ 、2000m 以浅 $1692.3\times10^8\text{t}$ 。按省统计,铁矿预测资源量最多的省份是辽宁,500m 以浅 $138.4\times10^8\text{t}$ 、1000m 以浅 $529.6\times10^8\text{t}$ 、2000m 以浅为 $650.8\times10^8\text{t}$,分别占全国 3 个深度预测总资源量的 25.67%、42.11%、38.45%。其次是四川省,3 个预测深度资源量分别为: $97.7\times10^8\text{t}$ 、 $181.1\times10^8\text{t}$ 、 $189\times10^8\text{t}$;再次是新疆,3 个预测深度资源量分别为: $57.2\times10^8\text{t}$ 、 $92.5\times10^8\text{t}$ 、 $174\times10^8\text{t}$;第四是湖南省,3 个预测深度资源量分别为: $44.3\times10^8\text{t}$ 、 $66.3\times10^8\text{t}$ 、 $93\times10^8\text{t}$ (图 5~图 7)。铁矿按预测类型统计,沉积变质型铁矿预测资源量最多,3 个预测深度资源量分别为: $229.3\times10^8\text{t}$ 、 $685.8\times10^8\text{t}$ 、 $940.9\times10^8\text{t}$,分别占 3 个深度资源总量的 42.5%、

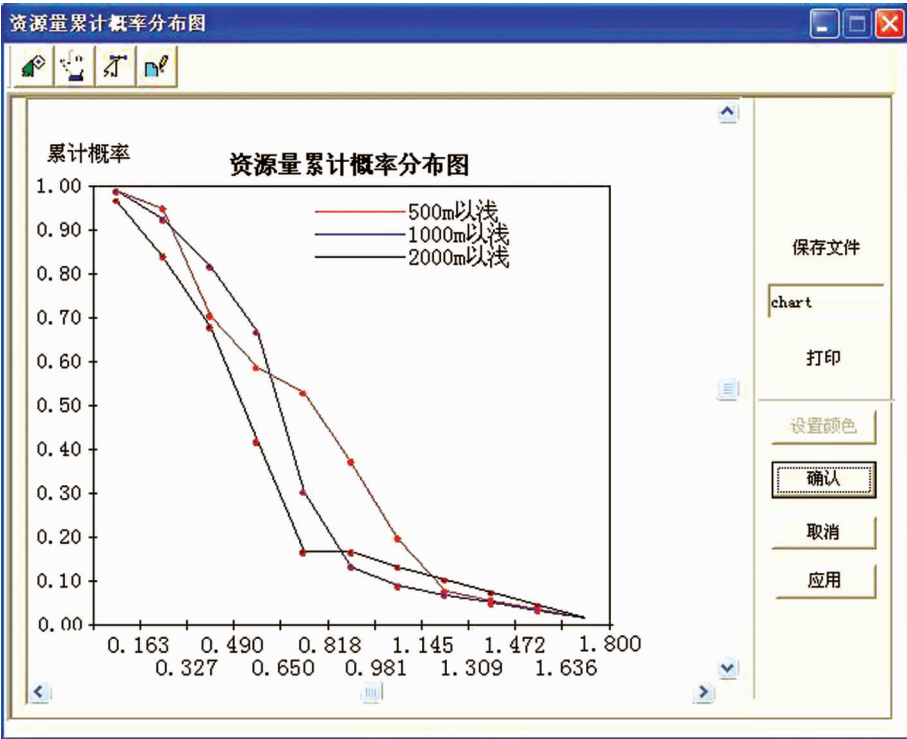


图 4 不同预测深度资源量的累计概率曲线
Fig. 4 Accumulative curve of different prediction depth

54.5%、55.5%；其次是沉积型铁矿:3 个预测深度资源量分别为 $103.9\times10^8\text{t}$ 、 $197.1\times10^8\text{t}$ 、 $269.5\times10^8\text{t}$ ；再次是岩浆岩型铁矿,3 个预测深度资源量分别为： $88.7\times10^8\text{t}$ 、 $170.2\times10^8\text{t}$ 、 $177.8\times10^8\text{t}$ 。

从铁矿预测的结果分析，辽宁鞍山—本溪地区不少磁异常仍极具潜力，辽宁仅探明的铁矿储量就有 $124.4\times10^8\text{t}$ ，伴随近期辽宁本溪桥头近百亿吨(远景资源量)铁矿的发现,使得辽宁省铁矿资源量预测时底气很足，辽宁鞍山地区今后仍将是最大的铁矿原料基地, $650\times10^8\text{t}$ 的资源量属合理范围。另一铁矿资源预测量大省四川省，已探明铁矿储量为 $98.3\times10^8\text{t}$ ，攀西地区经矿产资源潜力评价典型示范，新发现一批铁矿产地和找矿靶区,共优选 51 个预测区,未来潜在的资源量巨大。鲁西地区根据磁异常

也验证了一部分铁矿，山东省 3 个预测深度铁矿资源量分别为： $7.3\times10^8\text{t}$ 、 $24.0\times10^8\text{t}$ 、 $83.6\times10^8\text{t}$ 。近期长江中下游地区找矿有了很大的突破，安徽省发现了大型隐伏铁矿——泥河铁矿，安徽省 3 个深度铁矿预测资源量分别为： $2.6\times10^8\text{t}$ 、 $10.1\times10^8\text{t}$ 、 $31.7\times10^8\text{t}$ 。相比而言,此次铁矿资源大省河北省,对比已探明的铁矿储量 $73.9\times10^8\text{t}$,此次预测的资源量偏少,3 个预测深度分别为： $9.5\times10^8\text{t}$ 、 $32.5\times10^8\text{t}$ 、 $79.5\times10^8\text{t}$ 。虽然近期新发现的冀东铁矿探明资源量超过 $10\times10^8\text{t}$,但是河北省铁矿由于长期的开采,500m 以浅预测资源量少也属正常,估值也趋于保守。对各省数据的分析表明,500m 以浅预测资源量普遍偏少。这也符合国内现实的矿床勘查状况，中国绝大部分铁矿勘探深度都在 500m 以浅，而到了 1000m 以浅预测资源量

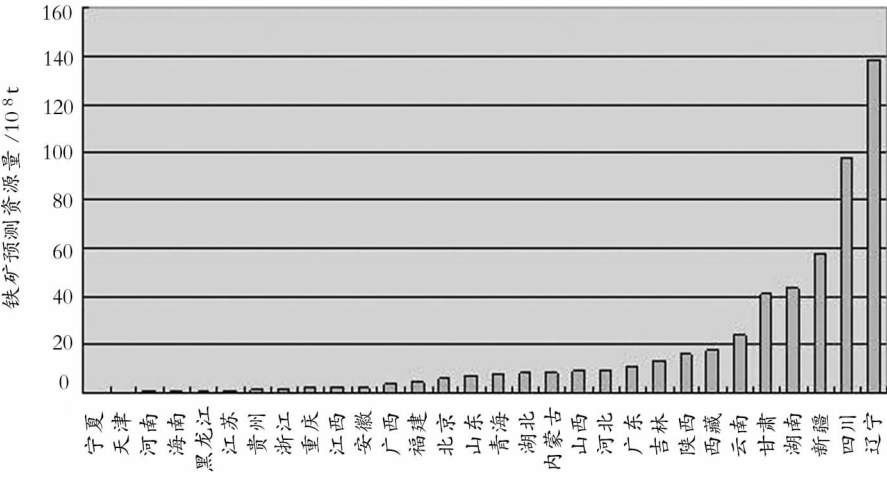


图 5 全国铁矿 500m 以浅预测资源量

Fig. 5 Estimated resource of iron in China within 500 meters

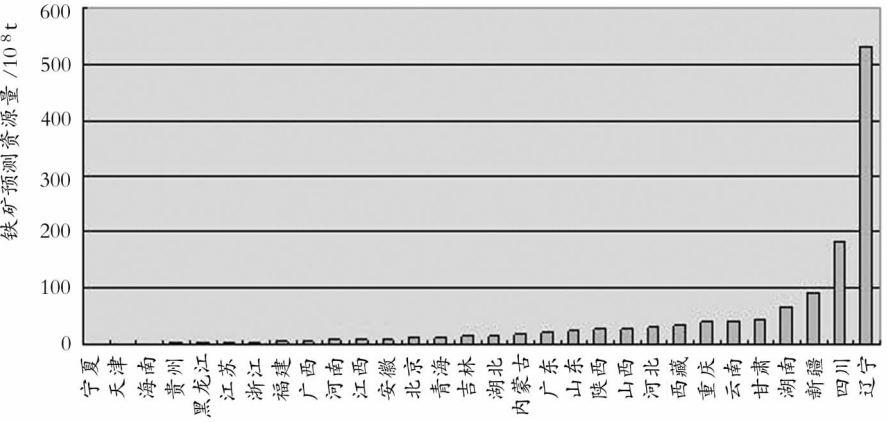


图 6 全国铁矿 1000m 以浅预测资源量

Fig. 6 Estimated resource of iron in China within 1000 meters

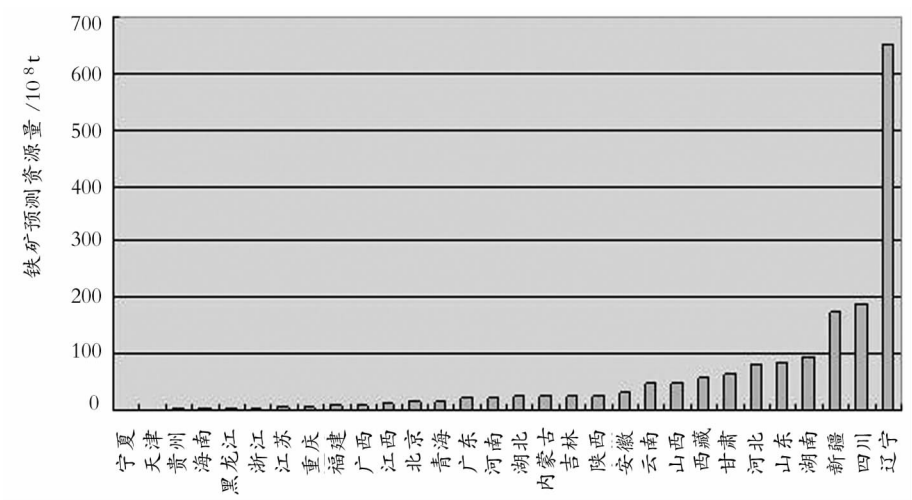


图 7 全国铁矿 2000m 以浅预测资源量

Fig. 7 Estimated resource of iron in China within 2000 meters

增长了甚至一个数量级,反映铁矿资源在深部还具有巨大的找矿空间和潜力。从铁矿预测类型看,沉积变质型铁矿是中国铁矿的主要成矿类型,今后仍是寻找大型铁矿的最有利的类型。综合以上数据分析,中国铁矿无论是东部还是西部,都有很大的找矿空间和资源潜力。

全国铝土矿主要分布在 15 个省区,共划分铝土矿预测区 83 个,预测全国铝土矿资源总量(不含已查明的资源量):500m 以浅 116×10^8t ,1000m 以浅 179.7×10^8t 。铝土矿按省区统计,预测资源量最多的是山西省,500m 以浅 68.3×10^8t ,1000m 以浅 116.7×10^8t ,分别占全国 2 个预测深度资源总量的 58.87%、64.9%。其次是河南省,500m 以浅 16×10^8t ,1000m 以浅 24.8×10^8t 。再次是广西,铝土矿主要在 500m 以浅,预测资源量 17.7×10^8t 。从 15 个省区铝土矿资源量预测结果看,中国铝土矿资源非常丰富,山西、河南和广西都是全国铝土矿大省区,近期都有大型铝土矿发现,通过进一步勘查和研究,可进一步扩大远景储量^[6]。

德尔菲法预测的铁铝资源量数据经各省区市和

各大区研究所汇总整理后,在北京组织专家对各省区市铁铝预测结果进行了分析、研究和论证,认为此次全国铁铝德尔菲法预测资源量总体是合理的,资源量预测数据可为国家铁铝资源远景提供重要的参考价值,中国铁铝 2 个矿种在未来具有很大的资源潜力,可为国家经济建设提供充足的资源保障。

致谢:感谢中国地质调查局发展研究中心李景朝研究员、北京信息科技大学理学院杨毅恒教授对本文提出的中肯建议。

参考文献

[1]王世称,范继璋,杨永华.矿产资源评价[M].吉林:吉林科学技术出版社,1990:70-81.

[2]王世称,王於天,成秋明.综合信息矿产资源定量评价[M].吉林:吉林科学技术出版社,1987:60-80.

[3]李裕伟,赵精满,李晨阳.基于 GMS、DSS 和 GIS 的潜在矿产资源评价方法[M].北京:地震出版社,2007:418-422.

[4]朱裕生.矿产资源评价方法学导论[M].北京:地质出版社,1984:327-349.

[5]高慧璇.统计计算[M].北京:北京大学出版社,2005:15-28.

[6]龙宝林,叶锦华.新一轮铁矿勘查若干思考[J].中国矿业,2009,18(7):58-61.