

“证据权”法在西南“三江”南段 矿产资源评价中的应用

陈永清^{1,2} 夏庆霖³ 黄静宁¹ 陈建国³ 李建国^{1,4}

(1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;
3. 中国地质大学资源学院, 湖北 武汉 430074; 4. 云南省地质调查院, 云南 昆明 650051)

摘要:证据权法本身是一种离散的多元统计方法。阐述了矿物资源潜力区的概念, 简述证据权法的基本原理。以西南“三江”南段为例, 首先在地质、地球物理、地球化学以及遥感地质等致矿信息提取的基础上, 运用证据权法定量分析各类致矿信息(控矿因素)与矿产资源空间分布的关系; 进而选择最佳控矿因素作为资源评价变量, 据其变量计算每个单元的后验成矿概率; 最终根据后验成矿概率定量圈定和评价找矿靶区。实践证明: 在 GIS 环境下, “证据权”与找矿信息结合能够有效区分矿化有利地段和不利地段, 从而达到定量快速圈定和评价找矿靶区之目的。整个过程是借助于 MOPAS3.0 评价系统实现的。

关键词:证据权法; 致矿信息提取与集成; 矿产资源评价; MOPAS3.0 软件系统

中图分类号: P624.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2007)01-0132-10

1 矿物资源潜力区的概念

R.B.Taylor 和 T.A.Steven^[1]认为, 一个地区的资源潜力评价是对该地区有价值的矿物资源(或在不久的将来能够变成有价值的矿物资源)产出的或然性(可能性)的度量。这种产出的或然性并不是测量矿物资源本身, 而是只能通过对各种成矿因素的综合分析加以判断的一种假设或推测的未发现矿物资源。其中某些因素是能被观测的, 某些几乎是难以描述或不可能被观测的; 因此, 资源潜力评价部分取决于资源评价工作者的专门经历和专业背景。在所有的评价中一个最重要的因素是一位远见卓识的经济地质学家的正确判断, 而这位经济地质学家在方法上能够高度综合迄今数值方法无法完成的所有有利于成矿的地质因素。

由于缺乏来自钻孔的直接信息, 找矿有利地段的圈定主要依靠与已知和已开采矿床的有利于成矿的地质、地球化学和地球物理环境和标志的对比。主要目标是鉴别被评价地段矿物资源产出的有利地质环境。矿床模型, 尤其是包括解释成矿过程和有利成矿环境的模型是一个地区资源评价的强有力工具。此外, 要考虑评价地段成矿过程与成矿环境的内

在联系。如果一个矿床模型的基本条件被满足, 诸如容矿围岩的成分、构造有利性等因素能被用于更精确地确定找矿有利地段及其成矿有利度。可将矿产资源潜力区定义为高、中和低 3 种类型:

(1) 高级矿物资源潜力区: 该区具有下列特征: ①存在于有利于矿物资源堆积的地质、地球化学和地球物理标志出现的地区; ②在这些地区上述标志足以支持有利于矿物资源堆积的成因模型; ③在这些地区有证据表明发生过广义的矿物浓集矿化。这类矿物资源潜力不仅包括已知的矿区, 而且包括有资料表明极有可能存在矿化岩石的地区。在资料可获取的地区, 单个矿床的规模、品位和位置对制定评价方案是非常重要的, 而资料的可利用性并不是重要前提。对于现行的矿物资源经济特征的评价, 具有高资源潜力的地区会比具有较少矿物资源潜力的地区的评价更准确。该资源潜力区大致相当于笔者后面定义的 A 级和 B 级靶区。

(2) 中级矿物资源潜力区: 有利于矿物资源堆积的地质、地球化学和地球物理标志被发现或这些标志能被合理地推测存在, 但矿化尚不清楚或迄今未被发现的地区。有价值矿床发现的可能性应该存在于被认为具有中等资源潜力的所

收稿日期: 2006-06-26; 改回日期: 2006-10-10

基金项目: 国家高技术发展计划(863 计划)探索项目(2006AA06Z113)和“十五”国家科技攻关课题(2003BA612A-02)资助。

作者简介: 陈永清, 男, 1960 年生, 博士, 教授, 主要从事矿产资源勘查评价研究工作; E-mail: Fzcyongqing@cgs.gov.cn。

有地区。在这些地区矿床成因模型尤为重要,诊断性找矿信息的外推亦是需要的。根据稀少的信息划分的这些具有中等资源潜力的区域能随资料和有用信息的更新、矿产品需求或经济条件的变化而发生变化。该资源潜力区大致相当笔者后面定义的 C 级靶区。

(3) 低级矿物资源潜力区:系指地质、地球化学和地球物理标志不利于成矿的地区,在这些地区有证据表明矿物浓集几乎是不可能的,或者不满足矿床成因模型的基本条件,譬如缺乏矿源和堆积机制。这类区域包括了具有明显非经济矿化和几乎没有任何矿化迹象显示的地区。低级矿物资源潜力区类别的使用需要满足一个确定性条件,即对于缺乏资料的地区亦不应该是模棱两可的。

对由于资料缺乏无法划分出高、中、低级矿物资源潜力的地区,将其定义为未知矿物资源潜力单元是必要的。在确定这一单元时,单元的规模和可利用信息的详细程度是必须考虑的关键因素。对这类地区的进一步研究往往能够获取新的资源远景区。矿物资源几乎形成于所有类型的地质环境,即使对单一类型的矿床其产出亦非常广泛,譬如金矿床。就其整体性而言,高级或中级矿物资源潜力区的描述应针对专门的矿种及其产出类型;用于支持结论的证据、数据(资料)和逻辑推理应清晰明了。在确定高级、中级和低级矿物资源潜力区时,必须考虑可能的矿产地的规模(吨位、品位和价值)。在大型矿床或群体矿床与小型和孤立矿床之间存在着重要差别,譬如,热液金属浓集分布序列:小型孤立的矿床→小型矿床群→被小型矿床群包围的大型矿床→孤立分布的超大型矿床。在矿化区之间和局部地段内部,矿石的禀赋(价值)亦是高度变化的。

2 “证据权”法

本次矿产资源潜力评价及靶区圈定采用了基于 GIS 的证据权法。证据权法本身是一种离散的多元统计方法,最初应用在医学诊断上。Agterberg 和 Bonham-Carter 等^[2]对此方法进行了改进和完善,并引入矿产预测领域。“证据权”与找矿信息结合能够区分矿化有利地段和不利地段,从而达到定量圈定和评价找矿靶区的目的。这种方法从数据出发研究成矿预测中的各种关系,涉及到基于测量已知矿床和图层模型或特征的相关组合关系^[3]。

使用证据权通常的思路涉及到先验和后验概率的概念。目标是在给定证据存在或缺乏的条件下估计矿床产出的后验概率。对研究区说来,首先假定先验概率是一个常数,应用 Bayes 准则产生样品单元含有一个以上矿床的后验概率。在将 Bayes 准则应用证据权之前,需要概略地叙述下列内在假设^[4]:

(1) 研究区内每个矿床(点)应归属到具有面积为 u km² 的样品单元中。

(2) 含有一个及一个以上矿床(点)的样品单元总数表示为 $N(D)$ 。

(3) 单元可以含矿床亦可以不含矿床。

(4) 研究区总面积是 t km², 则 $N(T)=t/u$ 样品单元。

(5) 研究区已知矿床(点)的平均密度是 $N(D)/N(T)$ 。该比率被作为含有矿床(点)单元的先验概率, $P(D)$ 。

(6) 在第 j 个二态赋值预测图 B_j 上,具有模型信息的单元被表示为 $N(B_j)$ 样品单元, $N(\bar{B}_j) = N(T) - N(B_j)$ 为缺乏模型信息的单元。

(7) 对一个研究区来说,一个含有矿床(点)的样品单元的先验概率假定是一个常数。

(8) 对于来自几个图层的证据,分别独立地计算每个图层的权系数,然后,计算综合权系数。这就需要条件独立假设。条件独立假设产生一个简化模型,该模型能被用于预测和指明每个证据源的相对贡献。正如所指出的, Bayes 方法允许预测一套点物体的存在。这点物体(矿床)被作为一个小样品单元内一个小面积物体的存在与否处理。在给定证据出现的情况下,根据 Bayes 规则,矿床(点)存在的有利度能被表达为矿床(点)出现的条件概率。

对给定的第 j 个二态赋值模型:

$$P(D | B_j) = P(D \cap B_j) / P(B_j) \quad (1)$$

这里 $P(D | B_j)$ 是给定第 j 个二态赋值模型出现的情况下矿床(点)的条件概率。为了获取关于矿床后验概率表达式,根据先验概率和乘积因子,在给定矿床(点)出现的情况下二态赋值图 B_j 上的条件概率被定义为:

$$P(B_j | D) = P(B_j \cap D) / P(D) \quad (2)$$

因为 $P(B_j \cap D)$ 和 $P(D \cap B_j)$ 相等,方程(1)和(2)相结合解出 $P(D | B_j)$, 满足关系:

$$P(D | B_j) = [P(B_j | D) \times P(D)] / P(B_j) \quad (3)$$

这表明在给定二态赋值模型信息出现的情况下,矿床(点)的条件(后验)概率等于矿床(点)先验概率 $P(D)$ 乘以因子 $[P(B_j | D) / P(B_j)]$ 。

同理,在给定变量缺乏的情况下,矿床(点)产出的后验概率可表达为:

$$P(D | \bar{B}_j) = [P(\bar{B}_j | D) \times P(D)] / P(\bar{B}_j) \quad (4)$$

若证据权使用概率的自然对数(称谓逻辑概率),同样的模式能以概率的形式表达。方程(4)表示为逻辑概率:

$$P(D | B_j) / P(\bar{D} | B_j) = [P(D) \times P(B_j | D)] / [P(\bar{D} | B_j) \times P(B_j)] \quad (5)$$

这里 \bar{D} 意味着矿床(点)的缺乏。根据条件概率的定义:

$$P(\bar{D} | B_j) = P(\bar{D} \cap B_j) / P(B_j) = [P(B_j | \bar{D}) \times P(\bar{D})] / P(B_j) \quad (6)$$

$$\text{故有 } P(D | B_j) / P(\bar{D} | B_j) = [P(D) / P(\bar{D})] \times [P(B_j | D)] / [P(B_j | \bar{D})] \quad (7)$$

矿床(点)的逻辑概率为 $P(D) / (1 - P(D))$ 或 $P(\bar{D}) / P(\bar{D})$ 。因此,将其代入方程(7),有:

$$O(D | B_j) = O(D) \times P(B_j | D) / P(B_j | \bar{D}) \quad (8)$$

这里 $O(D | B_j)$ 是在给定 B_j 的情况下 D 的条件(后验)逻辑概率, $O(D)$ 是 D 的先验逻辑概率, $P(B_j | D) / P(B_j | \bar{D})$

被定义为充分率或 LS 。对证据权方程(8)两侧都取自然对数, 以对数线性的形式重新标度这些方程。根据第 j 个二态赋值模型含有矿床(点)的样品单元的后验逻辑概率具有下列形式:

$$\text{后验逻辑概率}(D | B_j) = \text{先验逻辑概率}(D) + W_j^+ \quad (9)$$

$$\text{和后验逻辑概率}(D | \bar{B}_j) = \text{先验逻辑概率}(D) + W_j^- \quad (10)$$

这里正的证据权被定义为:

$$W_j^+ = \ln[P(B_j | D)] / [P(B_j | \bar{D})] \quad (11)$$

负的证据权被定义为:

$$W_j^- = \ln[P(\bar{B}_j | D)] / [P(\bar{B}_j | \bar{D})] \quad (12)$$

第 j 个图层的衬度系数(C)是对矿床(点)和二态赋值模型空间组合关系的全面度量:

$$C_j = |W_j^+ - W_j^-| \quad (13)$$

假定

$$P(D | B_j) = 1 - \bar{D}(B_j) \quad (14)$$

如果 n 层二态赋值预测图被用作证据, 后验逻辑概率能被表达为:

$$\text{后验逻辑概率}(D | B_1^{k(1)} \cap B_1^{k(2)} \dots B_1^{k(n)}) = \text{先验逻辑概率}$$

$$(D) + \sum_{j=1}^n W_j^{sk(0)} \quad (15)$$

若 $k(j)$ 为正, 表明第 j 个证据存在, 若 $k(j)$ 为负, 则表明第 j 个证据不存在。

方程(15)假定预测图关于矿床是条件独立(CI)的。如果违背了这一假定, 将会增加后验概率预测的不确定性。

对于证据权, 为了便于解释预测(证据)图通常采用二态赋值形式。应用地质判别或统计方法能够将这种形式主观地转变成其他形式以确立临界值, 其临界值能够最大限度地揭示二态赋值图成果模型与数据模型的空间组合关系。衬度系数(C)是对二态赋值模型与矿床空间组合关系的总度量。为了定量度量这种关系, 应用 Bayes 规则计算其累积距离的权重系数(方程 11 和方程 12)。对具有顺序的、间隔的或比率测量图件, 应用累积面积能够相继地计算出若干权的突变值。每一个突变值都是模型信息存在和模型信息缺乏的临界值。“证据权”技术最终结果是以权的形式或以后验概率图的形式表达的组合图。

证据权模型的建立和应用可分为以下 4 个基本步骤(图 1):

- (1) 通过区域成矿规律和典型矿床特征研究, 建立控矿因素与矿化的关系, 用于指导证据图层的选取。
- (2) 将各个证据图层转化为二值图形, 并分别计算其权重 W^+ 、 W^- , 然后根据权重 W^+ 、 W^- 筛选、优化证据图层。
- (3) 经条件独立性检验, 去除相关性过高的证据图层, 并将进一步筛选、优化后的证据图层组合起来, 计算各证据图层的权重 W^+ 、 W^- 。
- (4) 将证据权模型应用到矿产资源评价中去, 通过计算各个预测单元的后验概率, 进而生成矿产资源潜力图。

3 应用

证据权法被成功应用于西南“三江”南段有色和贵金属矿产资源评价。整个过程中各类致矿信息的提取与集成, 皆是借助于“金属矿产资源预测评价系统(MORPAS3.0)”^[4]实现的。

3.1 地质矿产概况

西南“三江”南段是中国重要的有色金属成矿带, 面积约 21.8 万 km^2 。该区地处印度板块与扬子板块结合部位, 亦是冈瓦纳古陆与古欧亚大陆的拼合地带, 以“三江、三带、两盆”构成本区的基本构造格局。在多旋回的构造岩浆活动过程中, 形成了复杂的成矿地质背景和丰富的有色金属和贵金属矿产, 譬如, 金顶巨型铅锌矿床、老王寨超大型金矿床和金宝山大型铂矿床。20 世纪 90 年代, 尤其是 1999 年开展国土资源大调查以来, 在前人勘查工作的基础上, 相继发现白秧坪、南汀河、保山核桃坪大型银铅锌多金属矿床和羊拉、普朗和雪鸡坪斑岩型铜矿床, 构成中国新的矿产资源基地。成矿地质条件和近年来的勘查成果都表明该区具有巨大的资源潜力(图 2)。

3.2 重力致矿异常信息提取与重磁构造控矿模式

重磁信息的最大优点是具有深穿透性。通过对重磁异常的分解和解释能够推断隐伏地质体和隐伏断裂的空间分布。王世称等^[9]在长期的科学实践中总结出一套在地质先验

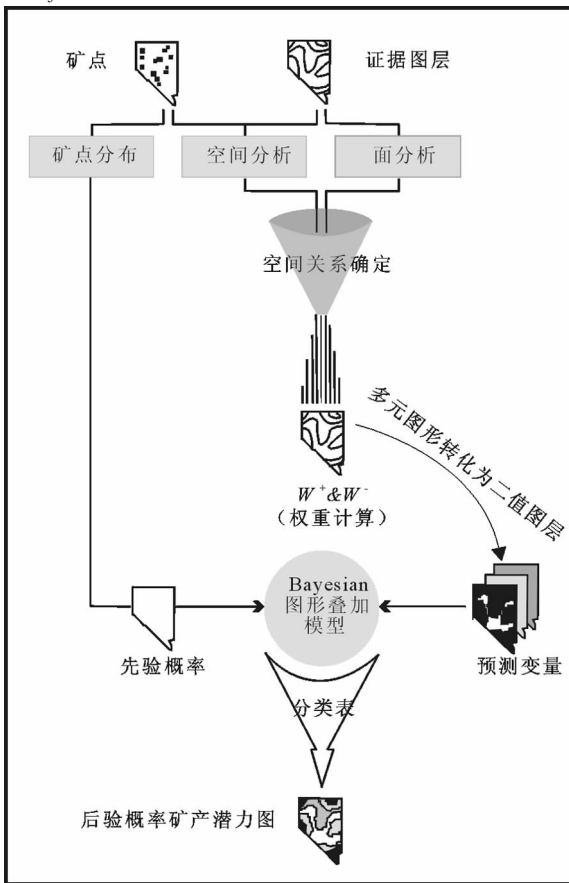


图 1 证据权模型流程

Fig.1 Flow chart of the weights-of-evidence method

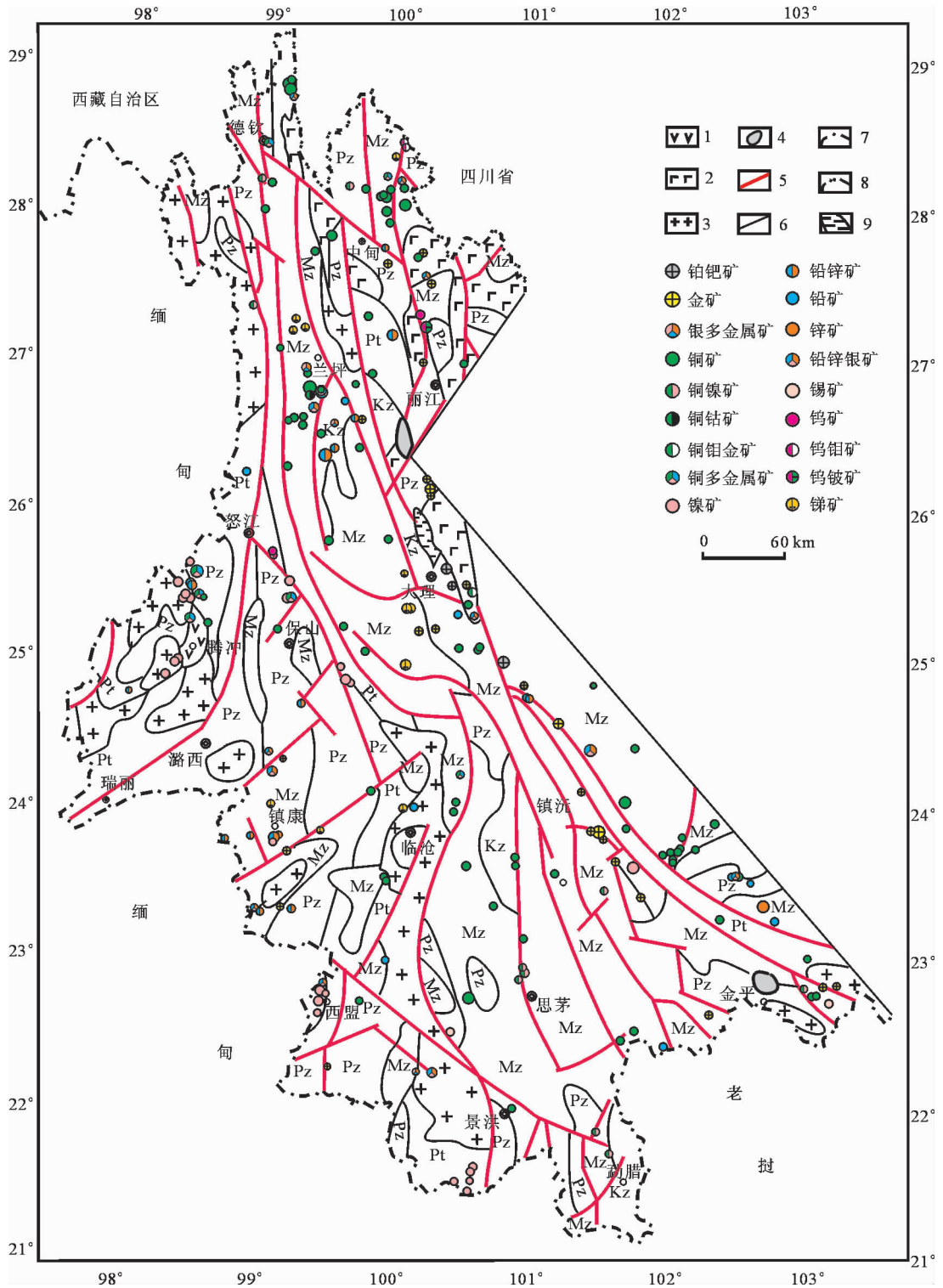


图 2 西南“三江”南段地质矿产简图 (据云南省地质调查院 1:50 万数字地质图编绘, 2003)

Kz—新生代碎屑岩,局部夹火山岩;Mz—中生代碎屑岩、碳酸盐岩,局部夹火山岩;Pz—古生代碳酸盐岩、碎屑岩夹火山岩;Pt—元古宇变质岩;
 1—新近纪—古近纪安山岩;2—二叠纪玄武岩;3—中酸性岩体;4—基性岩体;5—断层;6—地质界线;7—国界;8—省界;9—湖泊
 Fig.2 Geological sketch map showing the distribution of the known mineral deposits in the southern segment of the “Sanjiang” region, southwestern China (after the 1:500 000 digital geological map compiled by Yunnan Geological Survey, 2003)

Kz—Cenozoic clastic rocks with local volcanic rocks;Mz—Mesozoic clastic rocks and limestone with local volcanic rocks;

Pz—Paleozoic carbonate rocks and clastic rocks with volcanic rocks;Pt—Proterozoic metamorphic rocks;1—Paleogene—Neogene andesite;
 2—Permian basalt;3—Granitic rocks;4—Basic rocks;5—Fault;6—Geological boundary;7—National boundary;8—Provincial boundary;9—Lake

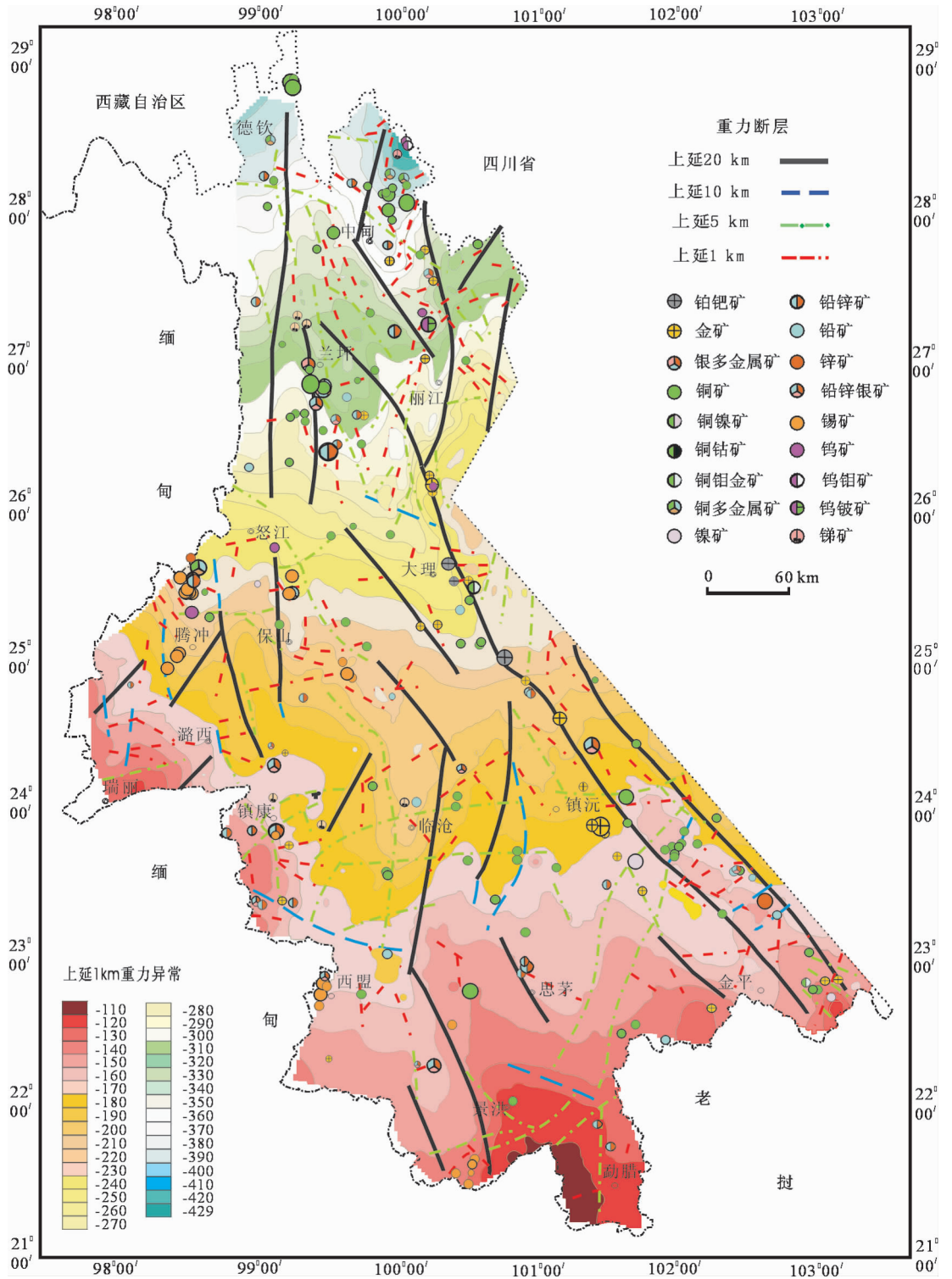


图3 西南“三江”南段重力构造模式与矿化分布

Fig.3 Gravitational tectonic pattern and mineralization distribution in the southern segment of the “Sanjiang” metallogenic zone, southwestern China

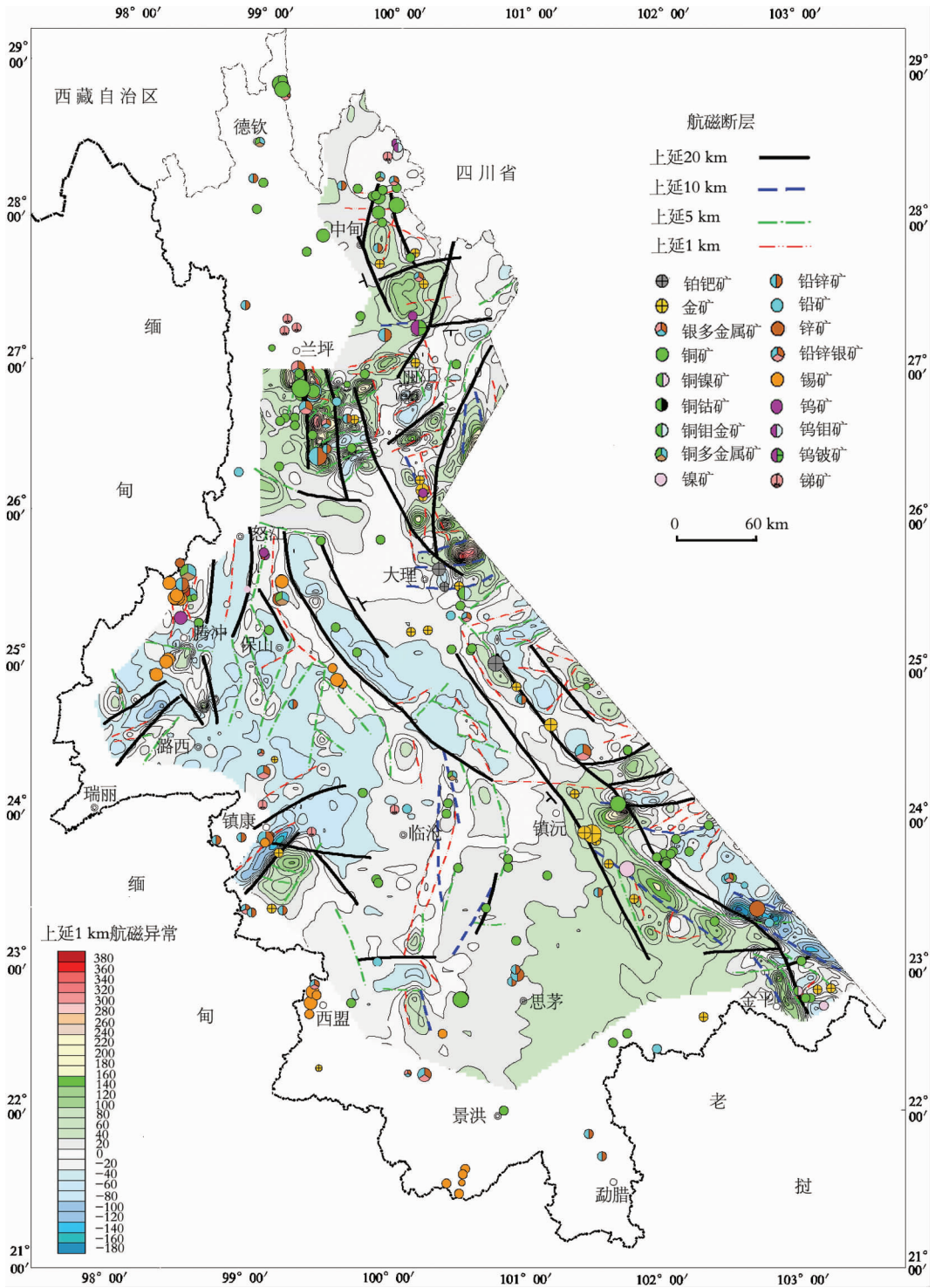


图 4 西南“三江”南段航磁构造模式与矿产分布

Fig.4 Aeromagnetic tectonic pattern and mineral resource distribution in the southern segment of the “Sanjiang” metallogenic zone, southwestern China

前提下重磁信息提取和解译的法则,并将其应用于矿产资源评价^[7-9]。

3.2.1 重力延拓图和水平一阶导数图的地质解译

将重力场上延不同的高度(本次研究,1:20万重力数据处理上延高度分别为20 km、10 km、5 km和1 km),以突出不同深度地质体的重力场特征。在此基础上对不同延拓高度重力异常分别求取4个方向(0°45°90°135°)的水平一阶导数,并绘制相应的图件。在上述图件上从上向下依次分别提取上述4个方向的水平一阶导数的极大值和极小值轴向特征线,然后分别对同一延拓高度4个方向的轴线特征线图按对应的坐标点相互叠置,提取多于2个方向的重合特征线作为推断的地质体边界。最后,将推断的不同延拓高度异常边界从高到低逐步关联,形成不同深度的重力异常界面,为方便起见,称它们为重力断裂。显然,随着延拓高度的增加,浅部重力异常将逐渐消失,深部重力异常被突出。根据重力断裂在不同延拓高度的水平漂移特征,可定性推断这些断裂的产状;并通过遥感线形影像和地质图,或通过野外地质调查加以验证。

3.2.2 垂向二阶导数图的地质解译

将不同上延高度(包括原平面)的场的垂向二阶导数零值线(用不同的图例)绘于同一张透明图上。然后,将该透明图置于同比例尺地质图上。以出露的地质体为线索,结合地球化学环形异常边界和环形遥感影像综合提取其垂向二阶导数零值线,将其作为基底、岩体或火山机构等的可能隐伏地质边界。

3.2.3 编制重力地质异常构造骨架图

将上述推断的不同深度的重力地质断裂编绘到一张图上,形成重力地质异常构造骨架图(简称重力构造模式)(图2)。该图详细反映了研究区不同方向、不同深度、不同规模的重力地质断裂的空间分布特征。

3.2.4 重力构造模式与矿产分布

重力构造模式(图3)表明:(1)靠近研究区西侧(怒江和澜沧江)的主断裂主要为NS向断裂,靠近研究区东侧(哀牢山、沅江)主断裂主要为NW-SE向断裂;重力构造模式(深部构造模式)与遥感影像模式^①(浅部构造模式)具有高度的一致性。(2)主断裂具有明显的控矿性质,譬如SN向主断裂对兰坪金顶超大型Pb-Zn矿床等矿床的控制以及NW-SE向主断裂对金宝山大型Pt-Pd矿床和老王寨超大型Au矿床的控制。(3)矿床的具体定位受主断裂和次级断裂的交汇域控制。

3.3 航磁构造模式与矿产分布

区内异常呈串珠状和长条状,主要沿北西向或南北向分布,长达几十至几百千米,具有向北收敛,向南撒开的分布特征,异常带之间为较平静的条带状磁场。矿集区、矿床通常分布于磁异常区域(譬如兰坪Pb-Zn矿集区)或磁异常区域周围(譬如大理Pt-Pd矿床、镇康芦子园Pb-Zn矿床、镇沅老王寨金矿床和金平Cu-Ni矿床等)。这表明矿化空间分布与

磁性体之间具有密切关系,这些磁性体有些是出露的岩体(如与老王寨金矿有关的基性、超基性岩体),有些可能是隐伏岩体(如芦子园Pb-Zn矿床可能与隐伏岩体有关)。应用1:20万航磁数据,经化极处理后,用类似于重力异常信息提取和编图的方法,编制研究区航磁异常构造格架与矿产分布图(图4)。该图详细地反映了不同方向、不同深度及不同规模的航磁断裂与矿产的空间分布特征。

由于国界附近和局部地区缺乏数据,研究区航磁构造格架不如重力构造格架完整;但总体上亦反映了与后者类似的以NW向为主的构造分布特征。

与重力断裂对矿点分布的控制作用类似,金属矿床也往往分布磁性断裂带上和多组磁性断裂交汇的部位,体现出不同级别的构造对矿产分级控制的特征。在研究区中部和东部不同深度、不同规模和不同方向磁性断裂互相穿插、叠加,反映了深部磁性构造的复杂性。

3.4 地球化学异常信息提取

由于“证据权”法要求参与预测的变量之间相互独立,因此,笔者对研究区Cu、Pb、Zn、Ag、Au、Co、Cr、V、Ni、As、Sb、U、W、Mo、F、Sn等16个元素进行了因子分析,得3个正交旋转因子:F₁(Co-Cr-Cu-As-V)因子,其得分高值主要在玄武岩分布区,可能代表了与玄武岩有关的Cu的高背景及其

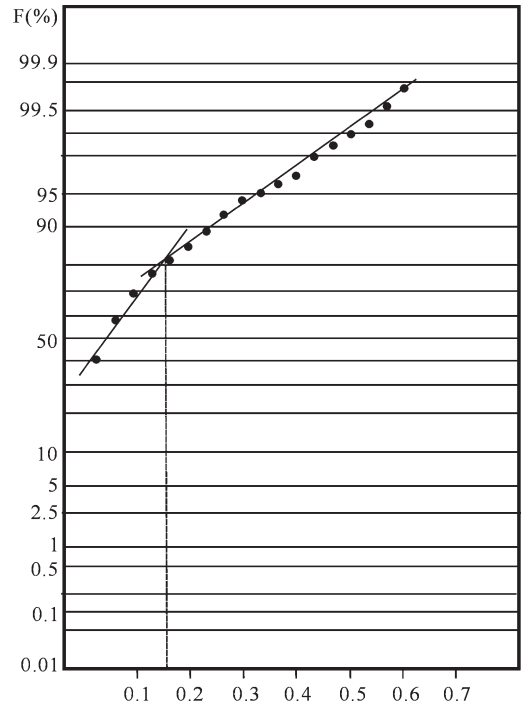


图5 “三江”南段成矿后验概率累积分布

Fig.5 Posterior cumulative probability distribution of ore formation in the southern segment of the “Sanjiang” metallogenic zone, southwestern China

①李文昌, 卢映祥, 陈永清, 等. 三江南段成矿规律与找矿方向综合研究. 云南省地质调查院, 2003.

矿化异常的分布;F₂(Pb-Zn-Ag)因子,其得分高值与铅锌很多金属矿化分布一致,代表了 Pb-Zn-Ag 多金属矿化的异常分布;F₃(Au)代表了基性、超基性岩分布区 Au 的高背景及其矿化异常的分布。

3.5 西南“三江”南段矿产资源潜力评价

3.5.1 变量选择

根据“证据权”法对上述地质、地球物理、遥感和地球化学致矿信息的分析,选择线性构造(Buffer 1.5 km),环形构造(Buffer 3 km),含矿地层组合熵,岩性多样性(岩性种类数 7~14),中酸性岩体(Buffer 3 km),基性超基性岩体(Buffer 1 km),多重分形技术提取的 Cu 异常,多重分形技术提取的 Au 异常,Pb-Zn-Ag 组合异常(化探因子 2)等 9 个控矿变量为本次矿产资源潜力评价的地质变量。由于 F₁ 和 F₃ 因子仅反映基性、超基性岩分布区 Cu、Au 的高背景含量及相应矿化的分布,而在区域上缺乏代表性。因此笔者分别选择多重分形技术提取的 Cu、Au 异常(另文阐述)代替 F₁ 和 F₃ 作为预测变量。其证据权分析结果见表 1。

3.5.2 靶区圈定与评价

以 10×10 km² 为预测评价基本单元,全区单元总数为 2484 个,其中含矿单元为 191 个。根据后验概率频度分布模式(图 5),可拟合出两条直线,以两条直线的交汇点(后验概率=0.15)作为阈值,共圈定各类找矿靶区 24 处(图 6)。

图 6 表明,靶区总体分布主要受 SN 和 NW 两组深大断裂系的控制,兰坪金顶铅锌矿集区恰分布于两个方向靶区交汇叠加的区域。根据其空间上与矿化分布的关系,将靶区划分为 3 类(表 2):

I 类(Cu-Pb-Zn-Ag 找矿靶区):共 15 处,其中 A 级 4 处、B 级 9 处、C 级 2 处。

II 类(Au-PGE 找矿靶区):共 3 处,其中 A 级 2 处、B 级 1 处。

III 类(有色金属、贵金属综合找矿靶区):共 6 处,其中 A 级 3 处、B 级 3 处。

其中靶区级别的确定根据如下原则:A 级靶区为有已知大中型矿床分布的靶区;B 级靶区为有中小型矿床分布的靶区;C 级靶区为仅有矿点、矿化点和元素组合异常分布的靶区。

4 结论与讨论

“证据权”法是通过统计计算估算诸控矿因素权(控矿因素)的相对重要性,并赋予各因素适当的权值,这些计算是基于测量已知矿床与各控矿因素(证据图层)的空间组合关系而实现的。

“证据权”法有利于实现控矿信息的横向(同类控矿信息或同一图层,譬如地球物理信息中的重磁信息)和纵向(不同类控矿信息或同不同图层,如重磁异常信息和地球化学异常信息)的有机关联和集成,最终应用高度密集的综合致矿信

表 1 “三江”南段矿产资源评价地质变量控矿权系数和衬度
Table 1 Ore-controlling weight coefficient and contrast of variables for mineral resource assessments in the southern segment of the “Sanjiang” metallogenic zone, southwestern China

序号	证据图层	W ⁺	W [*]	C
1	线性构造 Buffer 1.5km	0.123	-2.478	2.601
2	环形构造 Buffer 3km	0.236	-0.715	0.951
3	含矿地层组合熵	0.205	-0.518	0.723
4	岩性多样性(岩性种类数 7~12)	0.441	-0.297	0.738
5	中酸性岩体 Buffer 3km	0.357	-0.342	0.699
6	基性超基性岩体 Buffer 1km	0.558	-0.080	0.638
7	多重分形技术提取的 Cu 异常	0.537	-0.479	1.016
8	Pb-Zn-Ag 组合异常	0.510	-0.283	0.793
9	多重分形技术提取的 Au 异常	0.316	-0.208	0.525

表 2 西南“三江”南段有色金属与贵金属找矿靶区初步分类
Table 2 Primary classification of ore-finding target areas for base and precious metals in the southern segment of the “Sanjiang” metallogenic zone, southwestern China

类型	级别	编号	面积(km ²)	典型矿床
I 类找矿靶区	A	I-A-1	812.36	德钦羊拉铜矿
		I-A-2	1229.92	腾冲老厂坪子铜铅锌多金属矿
		I-A-3	1041.53	保山核桃坪铅锌矿
		I-A-4	523.40	思茅大坪掌铜矿
	B	I-B-1	203.21	
		I-B-2	605.45	
		I-B-3	651.00	
		I-B-4	542.27	
		I-B-5	273.60	
		I-B-6	169.69	
		I-B-7	139.24	
		I-B-8	396.91	
		I-B-9	141.28	
	C	I-C-1	131.31	
		I-C-2	604.84	
II 类靶区	A	II-A-1	96.24	金宝山铂钨矿
		II-A-2	475.90	老王寨金矿
	B	II-B-1	213.50	
III 类靶区	A	III-A-1	1843.96	中甸普朗铜矿、雪鸡坪铜矿
		III-A-2	3898.59	兰坪金顶铅锌矿、白秧坪铜矿、鹤庆北衙金矿
		III-A-3	1712.35	镇康芦子园铅锌矿、勐兴铅锌矿
	B	III-B-1	187.35	
		III-B-2	474.64	
		III-B-3	1403.87	

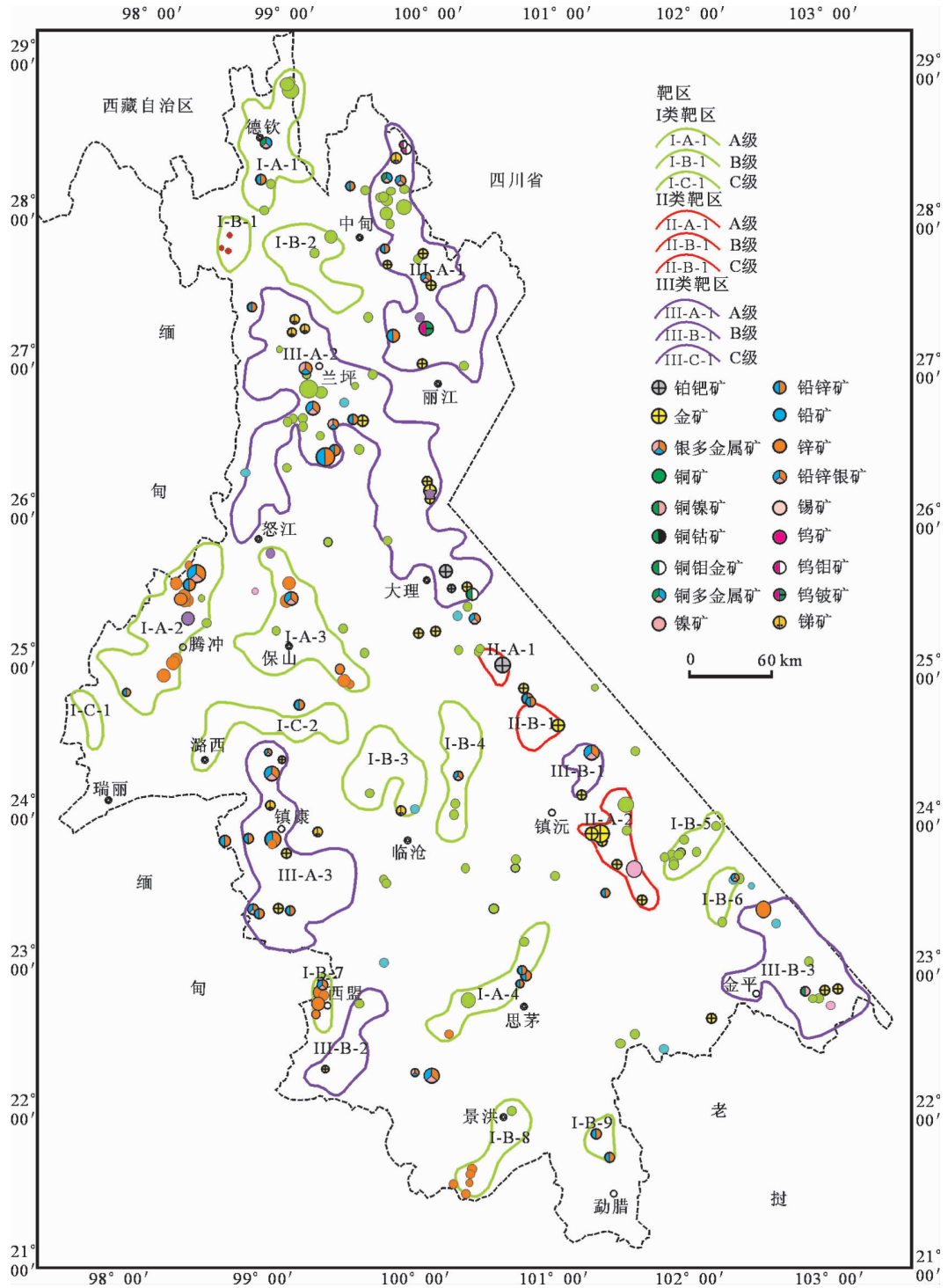


图6 西南三江南段有色金属、贵金属靶区分布

Fig.6 Distribution of the ore-finding target areas for nonferrous and precious metals in the southern segment of the "Sanjiang" metallogenic zone, southwestern China

息圈定和评价找矿靶区。

“证据权”法不同于传统(非空间)统计理论,它主要用来对空间数据进行建模,进而定量刻画控矿因素与矿床分布的

空间关系;而且证据权法是靠数据驱动的方法,要求用已知矿点来计算控矿证据层的权重。“证据权”技术的优点在于权的解释是相对直观的,并能够独立的确定,易于产生重现性。

参考文献 (References):

- [1] Taylor R B, Steven T A. Definition of mineral resource potential[J]. *Economic Geology*, 1983, 78:1268–1270.
- [2] Bonham-Carter G F, Agterberg F P, Weight D F. Weights of evidence modeling: A new approach to mapping mineral potential [C]//Agterberg F P, Bonham-Carter G F (eds.). *Statistical Applications in the Earth Science*. Geological Survey of Canada Paper 89~90.1989:171–183.
- [3] Bonham-Carter G F. Geographic Information Systems for Geoscientist: Modelling with GIS[M]. 1994:317–337.
- [4] Scott M, Dimitrakopoulos R. Quantitative analysis of mineral resources for strategic planning; implications for Australian geological surveys[J]. *Natural Resource Research*, 2001, 10 (3):159–177.
- [5] 陈永清, 陈建国, 汪新庆. 基于 GIS 的矿产资源综合定量评价[J]. *地质通报*, 2007, 26(2):141–149.
- Yongqing, Chen Jianguo, Wang Xinqing. GIS based integrated quantitative assessment of mineral resources[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(2):141–149 (in Chinese with English abstract).
- [6] 王世称, 王于天. 综合信息解译的原理与方法[M]. 长春: 吉林大学出版社, 1989:164.
- Wang Shicheng, Wang Yutian. *The Principle and Methods of Geological Integrated Interpretation with Multidiscipline Geo-information*[M]. Changchun: Jilin University Press, 1989:164.
- [7] Chen Yongqing, Zhao Pengda. The delineated methods of geological anomaly units and its application in the statistical prediction of gold deposits of large scale[M]. *Proc. 30th Int'l. Geol. Congr. (Volume 25), Mathematical Geology and Geoinformatics*. Zhao Pengda et al(eds). VSP1997:23–32.
- [8] Chen Yongqing, Liu Hongguang. Delineation of potential mineral resources region based on geonomaly [J]. *Journal of China University of Geosciences*, 2000, 11(2):158–163.
- [9] Chen Yongqing, Zhao Pengda. Application of the geo-anomaly unit concept in quantitative delineation and assessment of gold ore targets in western Shandong uplift terrain, Eastern China[J]. *Natural Resources Research*, 2001, 10(1):35–49.

Application of the weights-of-evidence method in mineral resource assessments in the southern segment of the “Sanjiang metallogenic zone”, southwestern China

CHEN Yong-qing^{1,2}, XIA Qing-lin³, HUANG Jing-ning¹, CHEN Jian-guo³, LI Jian-guo^{1,4}

(1. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 2. *D & R Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China*;

3. *China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China*;

4. *Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming 650051, Yunnan, China*)

Abstract: The weights-of-evidence method is a discrete multivariate statistical method. It elucidates the concept of mineral resource potential areas and briefly describes the basic principle of the weights-of-evidence method. Take for example the southern segment in the "Sanjiang" metallogenic zone of southwestern China, the spatial relationship between various kinds of ore-forming information (ore-controlling factors) and mineral resource distribution is quantitatively analyzed by using the weights-of-evidence method on the basis of extraction of ore-forming information from geological, geophysical, geochemical and remote sensing geological data. Then the best ore-controlling factors are chosen as the variables for mineral resource assessments, which are used for calculating the posterior ore-forming probability of each unit. Eventually, ore-finding target areas are quantitatively delineated and evaluated according to their posterior ore-forming probabilities. This case study has illustrated that under the GIS environment the favorable mineralized areas can be effectively distinguished from the unfavorable ones through the combination of the "weights-of-evidence method" with ore-finding information so that the goal of fast quantitative delineation and assessments of the ore-finding target areas may be achieved with the help of MORPAS3.0.

Key words: weights-of-evidence method; extraction and integration of ore-forming information; mineral resource assessment; MORPAS3.0 software.

About the first author: CHEN Yong-qing, male, born in 1960, Ph.D and professor, majors in mineral resource exploration and assessments; E-mail: Fzcyongqing@cgs.gov.cn.