

基于证据权重法广西金牙-明山一带金矿产定量预测

魏根强¹, 陈加杰¹, 董新柱², 郭广飞², 高泓泽¹, 李鹏¹

(1. 东华理工大学地球科学学院, 江西南昌 330013; 2. 中国地质调查局海口海洋地质调查中心, 海南海口 571126)

[摘要] 广西金牙-明山一带存在多个大中型卡林型金矿床, 具备良好的金矿找矿潜力。前人工作获得了该地区地质、矿产、物、化探等多元资料, 但缺乏对相关资料找矿信息的深度定量挖掘。本文基于证据权重法在广西金牙-明山一带开展卡林型金矿矿产定量预测。在系统分析金牙-明山一带区域地质背景与卡林型金矿成矿地质条件的基础上, 建立研究区区域找矿模型。依据此模型选择并利用MRAS软件系统提取了成矿有利地层、岩浆岩、断裂、断裂交点、围岩蚀变和Au、As、Sb、Hg元素化探异常等多个证据因子; 并基于这些证据因子计算区内各单元格(500 m × 500 m)的成矿后验概率。综合成矿后验概率和已有的资料, 在研究区圈定出19个找矿靶区。这些靶区包含了区内绝大多数矿床点所在位置, 表明该预测成果的可信度较高; 同时多处靶区范围包含重点矿区外围及空白区, 这为该区的卡林型金矿后续找矿部署提供依据。

[关键词] 卡林型金矿 证据权重法 定量预测 金牙-明山 广西

[中图分类号] P631 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2025)01-0040-14

Wei Genqiang, Chen Jiajie, Dong Xinzhu, Guo Guangfei, Gao Hongze, Li Peng. Quantitative prediction of gold deposits in the Jinya-Mingshan area of Guangxi based on evidence weighting method[J]. *Geology and Exploration*, 2025, 61(1): 0040-0053.

0 引言

成矿是多种地质过程耦合作用的结果, 这些地质过程常常会留下痕迹, 从而被地质、物探、化探或遥感等手段揭示。因此, 成矿预测需要研究者在对各种控矿因素的研究基础上, 综合分析各种反映或者记录这些过程的信息, 才能得出可信度较高的预测结果。而如何对多个不同的来源信息进行综合分析处理, 以及如何提高成矿预测过程中信息分析处理的效率, 一直是矿产资源勘查与评价工作中的重点与难点(成秋明, 2012)。

证据权重法是矿产资源勘查与评价中重要的一种方法, 因其效率较高, 且能提供量化数据支持, 使得该方法在定量成矿预测方面受到了地质学者的广泛运用(邓军等, 2021; 刘江涛等, 2021)。证

据权重法成矿预测是将各种反应成矿的信息层作为成矿预测的一个证据因子, 通过已有矿床点与证据因子的空间关系, 计算各个证据因子的先验概率, 再将所有证据层叠加, 并计算成矿后验概率, 最后根据后验概率结果结合基础资料圈定找矿靶区(吴传军等, 2014)。我国地质工作者基于MAPGIS软件所研发的矿产资源评价系统MRAS, 可以依靠计算机系统对多种地质信息进行半自动化综合分析处理, 减少处理过程中的信息损失, 提高信息分析处理的效率; 同时通过该软件中的证据权重模型, 为成矿预测提供数据支持, 简化证据权重法运用过程中的人工操作, 从而提高成矿预测的效率, 使预测结果更客观、更系统和更合理(滕菲等, 2021)。

研究区位于广西金牙-明山一带, 处于滇黔桂

[收稿日期] 2024-09-29; [改回日期] 2024-12-16; [责任编辑] 陈伟军。

[基金项目] 中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20242629)资助。

[第一作者] 魏根强(2002年-), 男, 就读于东华理工大学地质学专业, 硕士研究生, 主要从事矿床学和成矿预测研究。E-mail: yqrs_wei@163.com。

[通讯作者] 陈加杰(1989年-), 男, 2018年毕业于中国地质大学(武汉), 矿产普查与勘探专业, 博士, 讲师, 主要从事矿床学和成矿预测研究。E-mail: chenjiajie03@126.com。

卡林型金矿成矿带(郑浩和蔡明海, 2016), 已发现金牙、明山两个大型金矿床, 二者金探明储量分别为 29.5 t 与 37.2 t。前人基于大地电磁、地电化学、化探异常等信息对研究区进行了定性成矿(找矿)预测(严新砾等, 2015; 张文博, 2022; 宫研等, 2024)。但研究区内尚未开展过综合性定量的成矿(找矿)预测, 制约了预测效果。本文旨在结合前人研究成果与地学前沿成矿预测理论技术的基础上, 基于 MRAS 软件证据权重模块来对研究区进行金矿定量成矿预测。论文通过研究区控矿因素分析, 建立起金牙-明山一带的区域找矿模型, 并据此模型利用证据权重法来圈定研究区内的找矿靶区, 从而为研究区的金矿找矿提供指导意见。

1 区域地质背景

研究区在大地构造上属右江盆地(图 1)。右江盆地地处扬子克拉通、华夏地块、北越地块和印支

地块的交界带附近, 盆地东北、西南分别以紫云-亚都断裂和广南-富宁断裂为界, 东南、西北分别以凭祥-南宁断裂和弥勒-师宗断裂为限(图 1)。盆地内受多期构造热事件影响, 发育大量卡林型金矿床, 成矿条件良好(Wang et al., 2020)。

盆地内地层以泥盆系、石炭系、二叠系和三叠系为主, 岩性主要为碳酸盐岩、细碎屑岩等, 古近系、新近系与第四系地层零星分布, 缺失侏罗系与白垩系地层; 其中, 泥盆纪-三叠纪以灰岩为主, 中三叠纪以沉积细碎屑岩为主(Su et al., 2018)。岩浆岩在区域内出露较少, 盆地中部及西北部发育少量晚二叠世辉绿岩, 南部边缘发育部分二叠-三叠纪花岗岩(图 1), 此外, 明山一带可见少量石英斑岩岩脉。区域内断裂构造发育, 多为北东向和北西向, 除上文所述的右江盆地分界断裂外, 区域内还有右江断裂、广南-靖西断裂、那坡-龙州断裂等(刘寅等, 2015)。

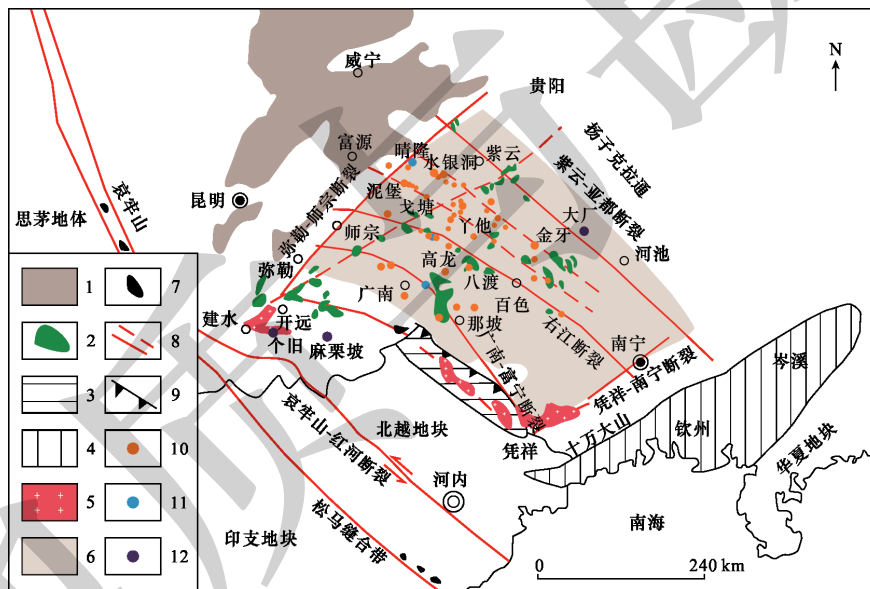


图 1 右江盆地地区大地构造图(据杨成富等, 2020 修改)

Fig. 1 Regional geotectonic map of the Youjiang Basin (modified from Yang et al., 2020)

1-晚二叠世玄武岩; 2-晚二叠世辉绿岩; 3-缝合带; 4-钦州造山带; 5-二叠-三叠纪花岗岩; 6-南盘江-右江盆地; 7-蛇绿岩; 8-区域断裂; 9-逆冲推覆构造; 10-金矿床; 11-锑矿床; 12-锡矿床

1-Late Permian basalt; 2-Late Permian diabase; 3-suture zone; 4-Qinzhou orogenic belt; 5-Permian-Triassic granite; 6-Nanpanjiang-Youjiang Basin; 7-ophiolite; 8-regional-scale fault; 9-thrust nappe structure; 10-gold deposit; 11-antimony deposit; 12-tin deposit

2 典型矿床特征及控矿因素 (区域找矿模型)

研究区具体位于广西省河池市凤山县及凌云县, 区内出露地层主要为泥盆系、石炭系、二叠系及三叠系, 以及少量的古近系和新近系地层(图 2)。地质构造在区域内较为发育, 断裂构造以北西向、北东向为

主, 且常互相交错切割; 褶皱构造有巴合背斜、塘油-逻楼向斜和凌云穹窿等。岩浆岩在区域出露较少, 仅有逻楼镇出露少量石英斑岩脉, 及研究区南部、东南部出露有辉绿岩。区内矿产资源丰富, 主要以 Au、Sb、Ag、Mn 等为主, 其产量在全国均占据重要地位。其中, 金矿作为研究区内最主要的矿产, 主要以金矿床(点)

的形式分布于断裂、褶皱构造附近,赋矿围岩主要为中三叠统百逢组与逻楼组。

本文以金牙、明山大型金矿床两个典型矿床为例,分析其地质特征,并据此总结控矿因素。

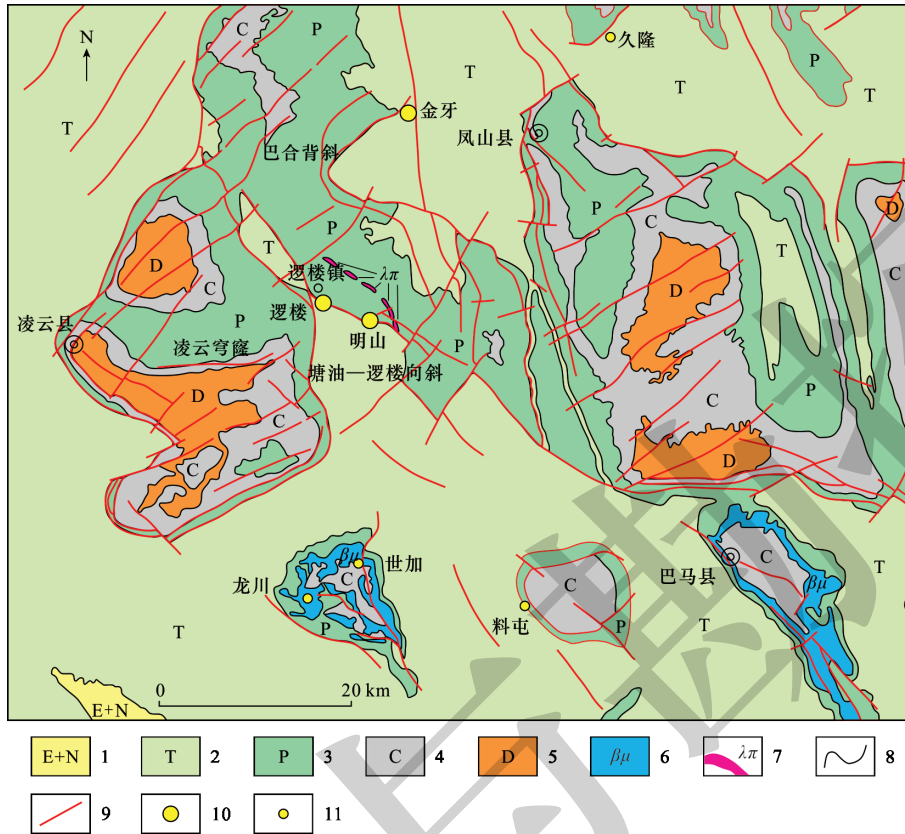


图2 广西金牙-明山一带金矿产分布图(据唐一昂等,2024修改)

Fig. 2 Distribution map of gold deposits in the Jinya-Mingshan area of Guangxi (modified from Tang et al., 2024)

1-古近系和新近系;2-三叠系;3-二叠系;4-石炭系;5-泥盆系;6-辉绿岩;7-石英斑岩脉;8-地质界线;9-断层;10-金矿床;11-金矿点
1-Paleogene and Neogene; 2-Triassic; 3-Permian; 4-Carboniferous; 5-Devonian; 6-diabase; 7-quartz porphyry dike; 8-geological boundary; 9-fault; 10-gold deposit; 11-gold occurrence

2.1 金牙金矿

金牙金矿位于广西省河池市凤山县金牙瑶族乡,可分为内郎沟、那元及林老三个矿段,其中林老矿段暂未发现具工业价值的矿体(郭腾飞,2013)。那元矿段金平均品位约为4 g/t,长约1.7 km,是金牙金矿的主矿段;内郎沟矿段金平均品位约为2~3 g/t,矿体长约0.9 km,矿化带长约3.5 km。矿石中常见金属矿物、主要载金矿物为黄铁矿和毒砂,非金属矿物为石英、方解石和白云母等,矿石中常可见石英脉、方解石脉等岩脉穿插其中。围岩中可见硅化、黄铁矿化、方解石化和毒砂化等蚀变。

矿区内出露的地层主要为中二叠统碳酸盐岩,中三叠统逻楼组(T_2l),中三叠统百逢组(T_2b)、河口组(T_2h)(吴伟,2018)。其中,中二叠统地层岩性为灰岩与白云质灰岩;中三叠统逻楼组岩性为泥质条带状灰岩、泥岩;中三叠统百逢组岩性主要为泥岩、粉砂岩、

粉砂质泥岩等,为该矿床的主要赋金层位;中三叠统河口组岩性为泥质粉砂岩、砂岩和泥岩(图3)。

矿区内构造较为发育,且矿体受构造作用控制明显。区内断裂构造主要呈近南北向分布, F_2 、 F_3 断裂为主要控矿断裂,具有延伸长、规模大的特点,矿体均分布于二者之间。褶皱主要为近南北向的那元背斜和近东西向的金牙背斜;其中,那元背斜位于那元矿段附近,对周围矿体的控制作用明显。

矿区内岩浆岩不甚发育,未见侵入岩出露,喷出岩也仅在中三叠统逻楼组中发现有少量凝灰岩夹层(郭腾飞,2013)。

2.2 明山金矿

明山金矿地跨广西省河池市凌云县与凤山县两地(图4),金平均品位3~4 g/t,最高品位可达8.95 g/t。矿石矿物主要为黄铁矿、毒砂、方铅矿和闪锌矿等,脉石矿物主要由白云母、石英、方解石等组成(彭磊,

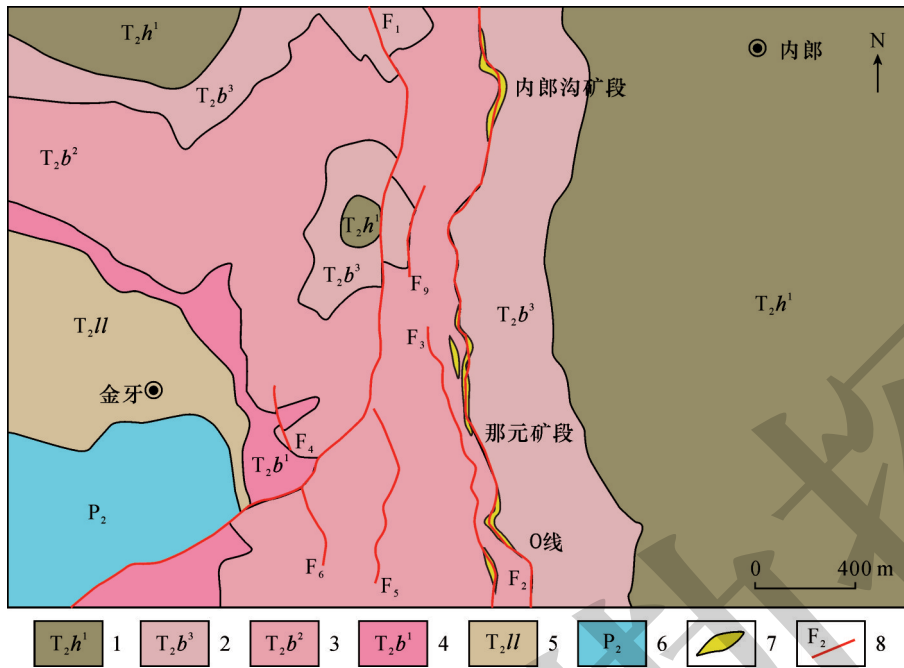


图 3 金牙金矿床地质图(据李欣航等,2023修改)

Fig. 3 Geological map of the Jinya gold deposit (modified from Li et al., 2023)

1-中三叠统河口组下段泥质粉砂岩、砂岩、泥岩;2-中三叠统百逢组上段砂岩、泥质粉砂岩、泥岩;3-中三叠统百逢组中段粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩;4-中三叠统百逢组下段粉砂岩、泥岩;5-中三叠统逻楼组泥质条带状灰岩、泥岩;6-中二叠统灰岩及白云质灰岩;7-金矿体;8-断裂
 1-muddy siltstone, sandstone, and mudstone in lower member of Middle Triassic Hekou Formation; 2-sandstone, mudstone, and siltstone in upper member of Middle Triassic Baifeng Formation; 3-siltstone, silty mudstone, and mudstone in middle member of Middle Triassic Baifeng Formation; 4-siltstone and mudstone in lower member of Middle Triassic Baifeng Formation; 5- muddy banded limestone and mudstone in Middle Triassic Luolou Formation; 6- Middle Permian limestone and dolomitic limestone; 7-gold ore body; 8-fault

2016)。矿石中常见石英、方解石脉体。常见围岩蚀变类型为硅化、黄铁矿化、毒砂化、雄黄矿化、方解石化等。

明山金矿区内出露的地层主要为石炭系地层、下二叠统栖霞组、中二叠统茅口组、中三叠统百逢组及中三叠统河口组(图4)。其中,下二叠统栖霞组的岩性为灰岩、白云岩等;中二叠统茅口组的岩性主要为灰岩、微晶灰岩;中三叠统百逢组岩性主要为砂岩、泥岩、泥质粉砂岩等,为该矿床的主要赋金层位;中三叠统河口组的岩性主要为泥岩、泥质粉砂岩等。

矿区内断裂构造较发育(图4),北西向 F_1 断裂为矿区内主要控矿、容矿断裂,且 F_1 被多条北东向断裂错断、切割,对矿体的形态、产状等也产生了较大影响。矿体多呈似层状、脉状、透镜状赋存于 F_1 断裂及其破碎带附近。褶皱构造在区域内发育较差,除北西向巴合背斜外,仅见少量小规模层间褶皱(黄永全和崔永勤,2001)。

矿区内岩浆岩出露较少,仅在矿区北部到东南部出露有石英斑岩脉,经前人研究,其年龄为80.9~

84.9 Ma,与金矿化可能有一定成因联系(王立德等,2008)。

2.3 控矿因素和找矿标志分析

综合上述矿床地质特征的分析,总结两个典型金矿床的共性特点,现将金牙金矿与明山金矿的控矿因素和找矿标志总结于表1,具体分析如下:

(1)地层-岩性对矿床的控制:前人研究发现卡林型金矿多赋存于碳酸盐岩或细碎屑岩中(陈衍景等,2004)。从整个右江盆地看,卡林型金矿床也主要产于碳酸盐岩和细碎岩中。但具体到本文的研究,可见研究区典型矿床均产于中三叠统百逢组中,部分矿点产在逻楼组中,主要赋矿层位岩性为砂、泥岩,属细碎屑岩建造。可见三叠纪细碎屑岩对成矿具有一定的控制作用,因此将其作为研究区的找矿标志之一。

(2)构造对矿床的控制:研究区内金矿床明显受到构造的控制,尤其是断裂构造。金牙金矿的主矿体主要沿近南北向断裂分布,明山金矿的主矿体主要沿北西向断裂分布。因此断裂及其破碎带附近、不同断层交汇部位、褶皱和断裂构造交汇部位

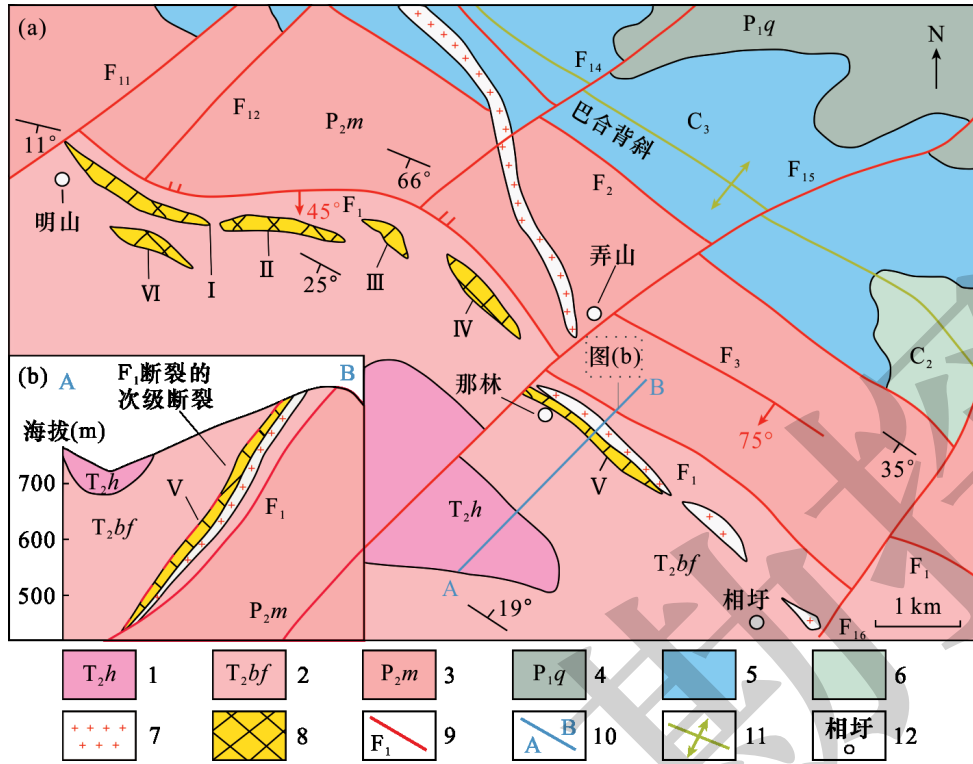


图4 明山金矿床地质图(据Ji et al., 2023修改)

Fig. 4 Geological map of the Mingshan gold deposit (modified from Ji et al., 2023)

1-中三叠统河口组;2-中三叠统百逢组;3-中二叠统茅口组;4-下二叠统栖霞组;5-上石炭统;6-中石炭统;7-石英斑岩;8-金矿体;9-断层及其编号;10-地质剖面线;11-背斜;12-城镇

1-Middle Triassic Hekou Formation; 2-Middle Triassic Baifeng Formation; 3-Middle Permian Maokou Formation; 4-Lower Permian Qixia Formation; 5-Upper Carboniferous; 6-Middle Carboniferous; 7-quartz porphyry; 8-gold ore body; 9-fault and its number; 10-geological profile; 11-anticline; 12-town

等地段是研究区内重要的构造找矿标志。

(3) 围岩蚀变标志: 卡林型金矿作为中低温热液矿床, 其蚀变矿物组合为中低温类型。研究区内矿(化)体附近的围岩蚀变以硅化、黄铁矿化、方解石化和毒砂化等中低温蚀变为主, 因此上述蚀变类型发育的地段也是发现金矿化的有利地段。

(4) 岩石矿物找矿标志: 研究区内金常以超显微颗粒形式赋存于载金矿物中, 无法直接辨别金矿化, 但研究区内的金常与毒砂、雄黄等砷矿物及辉锑矿共生, 这与前人关于滇黔桂地区卡林型金矿中

载金矿物和金赋存状态的研究认识一致(陈懋弘等, 2009), 因此富毒砂与含砷黄铁矿的岩石是研究区内间接的岩石矿物找矿标志。

(5) 地球化学标志: 研究区内 Au、As、Hg、Sb 等元素异常空间套合较好, 表明这些元素具有密切的相关性, 这与卡林型金矿中常见 Au-Hg-Sb-As-W 地球化学异常套合出现一致(毛景文等, 2005); 此外研究区内已发现金矿床(点)多与 Au-As-Hg-Sb 高异常区域套合, 因此 Au-As-Hg-Sb 元素异常套合带是较为有利的找矿地段。

表1 金牙金矿和明山金矿控矿因素/找矿标志总结表

Table 1 Summary of ore controlling factors/prospecting indicators for the Jinya and Mingshan gold deposits

控矿因素	金牙金矿	明山金矿
赋矿层位	中三叠统泥岩、粉砂岩及粉砂质泥岩等	中三叠统百逢组砂岩、泥岩等
构造影响	主要受近南北向断裂控制, 褶皱对矿体也具有一定影响	主要受北西向断裂控制
围岩蚀变	硅化、黄铁矿化、方解石化和毒砂化	硅化、黄铁矿化、毒砂化、雄黄矿化、方解石化
矿物特征	金与毒砂、雄黄等砷矿物及辉锑矿共生关系较强	金与毒砂、雄黄等砷矿物及辉锑矿共生关系较强
地球化学特征	Au、As、Hg、Sb 等元素异常值高, 且各异常带关系密切	Au、As、Hg、Sb 等元素异常值高, 且各异常带关系密切

3 证据权重法预测原理

证据权重法是由加拿大数学地质学家 Agterberg 主导研究出的一种基于数学概率论原理来进行地质资源评价的地质统计方法,该方法在矿产定量预测方面受到了广泛运用。证据权重法将各个成矿有利地质条件、地球物理特征及地球化学特征作为成矿预测的一个证据因子,并将不同证据因子按其对成矿的影响程度赋予不同权重,且所有同一证据因子组成一证据层,再将所有证据层叠加,并计算不同区域的后验概率,最后依据成矿概率高低圈定找矿远景区(胡鹏等,2009;陈冲等,2012;邓杰等,2012)。证据权重法成矿预测的适用性较为广泛,运用该方法一般需要满足如下要求:一是要求研究区有一定的工作程度,确保有足够多的基础地质与物、化探数据,且要求这些数据均可转换为数字化数据,以便计算机软件进行数据处理;二是研究区内有较多已发现的同类型矿床(点),需要足够的样本来分析研究区内该类型矿床的控矿因素,再通过相似类比理论进行成矿预测;三是所研究的矿床类型其在学术界的研究程度较高,如矿床成因、成矿模式等,确保控矿因素的分析符合实际,从而确保选择的证据因子是能够指示成矿的,以保证预测结果的可靠性与可信度。

证据权重法成矿预测结果的可信度来源于证据权重模型中的先验概率、证据因子权重及后验概率的计算,以下为计算公式:

(1) 先验概率的计算

首先将研究区按网格法划分为 T 个面积相等的网格单元(要求一个网格单元内至多包含一个矿点),可知包含矿点的网格单元数为 D 个,未包含矿点的网格单元数为 D^* 。

研究区矿点出现的先验概率为:

$$P(D)=D/T$$

则优势率为:

$$O(D)=P(D)/[1-P(D)]$$

(2) 证据因子权重的计算

某一证据因子(X_i)存在的网格单元总数为 B ,该因子不存在的网格单元总数为 B^* 。则对某一证据因子来说,其对成矿影响的正负权重分别为:

$$W^+=\ln[P(B|D)/P(B|D^*)]$$

$$W^-=\ln[P(B^*|D)/P(B^*|D^*)]$$

W^+ 和 W^- 分别为一网格单元内存在某一证据因

子与不存在该证据因子时的权重值(称为正负权重)。其中 $P(B|D)$ 为一网格单元内存在该证据因子时且包含矿点的概率, $P(B|D^*)$ 为一网格单元内存在该证据因子且不包含矿点的概率, $P(B^*|D)$ 为一网格单元内不存在该证据因子且包含矿点的概率, $P(B^*|D^*)$ 为一网格单元内为不存在该证据因子且不包含矿点的概率。

正负权重的差值 C (衬度系数; $C=W^+-W^-$) 表明该证据因子与成矿的相关程度, $C>0$ 表明该证据因子有利于成矿; $C<0$ 表明该证据因子不利于成矿。 C 值越高代表该证据因子的找矿的指示性越强。

(3) 后验概率的计算

后验概率是基于不同证据因子的影响对先验概率进行修正后的概率,其反映了各种地质条件、控矿因素对成矿的综合影响,是保证成矿预测高可信度的最重要的指标。对于 n 个证据因子,若其对成矿具有条件独立性,则对研究区内某一网格单元 k 为矿点的优势率 $O(D|X)$ 有:

$$\ln O(D|X) = \ln(O(D)) + \sum_{j=1}^n W_j^k, j = 1, 2, 3, \dots, n$$

其中 W_j^k 为第 j 个证据因子的权重,且

$$W_j^k \begin{cases} W^+, & \text{网格单元 } k \text{ 内存在该证据因子} \\ W^-, & \text{网格单元 } k \text{ 内不存在该证据因子} \\ 0, & \text{无数据} \end{cases}$$

则后验概率 $P(D|X)=O(D|X)/(1+O(D|X))$, 由该公式即可计算出某一网格单元成矿的概率。得出所有网格单元成矿的概率后,按照概率的高低即可圈出找矿远景区。

4 分析与讨论

4.1 证据层选择

研究区内金矿化不明显且无法直接辨别,但金矿化与锑关系较为密切,因此选择金牙-明山一带已知的 Au、Sb 矿床(点)作为本次证据权重法成矿预测的矿点信息图层。证据权重法定量成矿预测结果符合研究区实际情况的关键就在于证据因子(或证据层)的选择,基本标准为优先选择成矿有利度高、找矿指示性好的证据因子。在系统分析研究金牙-明山一带的各类地质条件、典型矿床特征、控矿因素等基础上,参照前人研究成果,本次证据权重法成矿预测选择了五类共 9 种证据因子,具体如下:

(1) 地层

研究区内金矿体主要赋存于中三叠统百逢组

砂泥岩中,且在中三叠统逻楼组中可见少数金锑矿床或矿点(图5),明山金矿与金牙金矿主要位于百逢组地层中,说明研究区内百逢组地层的控矿作用明显,逻楼组地层具有一定的控矿作用。因此选取中三叠统百逢组和逻楼组两组地层作为对成矿有利的地层证据因子。

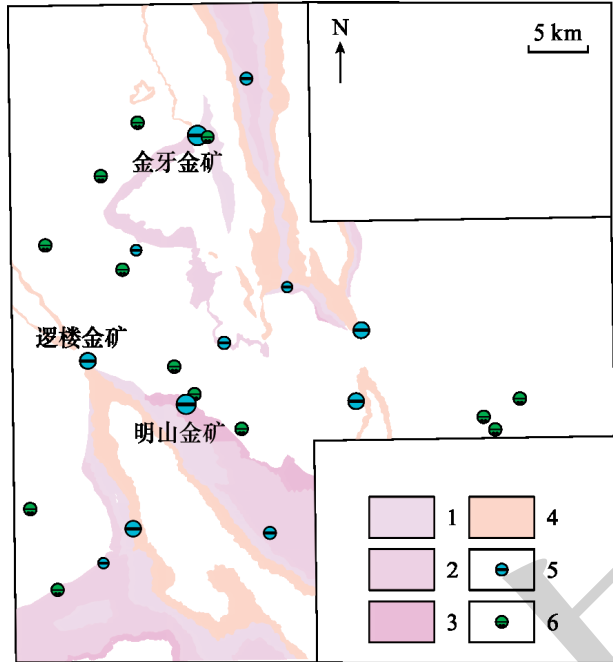


图5 广西金牙-明山一带赋矿地层分布图

Fig. 5 Distribution map of ore-bearing strata in the Jinya-Mingshan area of Guangxi

1-中三叠统百逢组上段;2-中三叠统百逢组中段;3-中三叠统百逢组中段;4-中三叠统逻楼组;5-金矿床(点);6-锑矿床(点)
1-upper member of Middle Triassic Baifeng Formation; 2-middle member of Middle Triassic Baifeng Formation; 3-lower member of Middle Triassic Baifeng Formation; 4-Middle Triassic Luolou Formation; 5-gold deposit (occurrence); 6-antimony deposit (occurrence)

(2) 岩浆岩体

虽然从目前全球卡林型金矿床看,露头上金矿附近一般不存在同时代的岩浆岩。但是最新的研究表明,卡林型金矿床的形成,岩浆热液应该起到了很重要的作用。如前人综合内华达地区卡林型金矿的年龄和同位素数据,结合矿物微区分析和实验研究认为卡林型金矿的金来源于岩浆岩(e.g., Muntean et al., 2011)。而且我国学者利用Hg同位素证实右江盆地卡林型金矿床为岩浆流体与基底物质的混合(Gao et al., 2023),利用矿石和围岩的Mg同位素研究表明成矿流体为岩浆热液(Xie et al., 2022)。综合目前最新研究成果来看,卡林型金

矿床与岩浆岩应该是具有密切成因联系的,基于此,我们考虑将岩浆岩作为一个证据因子。但研究区内未有岩体出露,仅出露有少量脉岩。为了不遗漏岩浆岩因素,本文选择通过重磁等地球物理手段推断的深部隐伏岩浆岩体,以及地表出露脉岩,综合考虑其对成矿是否有利(图6)。从图6可以看出多数矿床(点)附近均有岩浆岩的出现,金牙金矿正处于岩体之上,明山金矿则处于数条岩脉附近,可见岩浆岩的出现应该利于成矿,因此可以选择其作为一证据因子。考虑到岩浆岩影响的范围常超过岩浆岩体本身,因此对岩浆岩进行缓冲区分析(图7),发现以250 m作为岩浆岩的缓冲区半径时,得到的正负权重之差(即衬度系数C)最大,因此选择250 m的缓冲区半径对该证据因子来说最为合适。

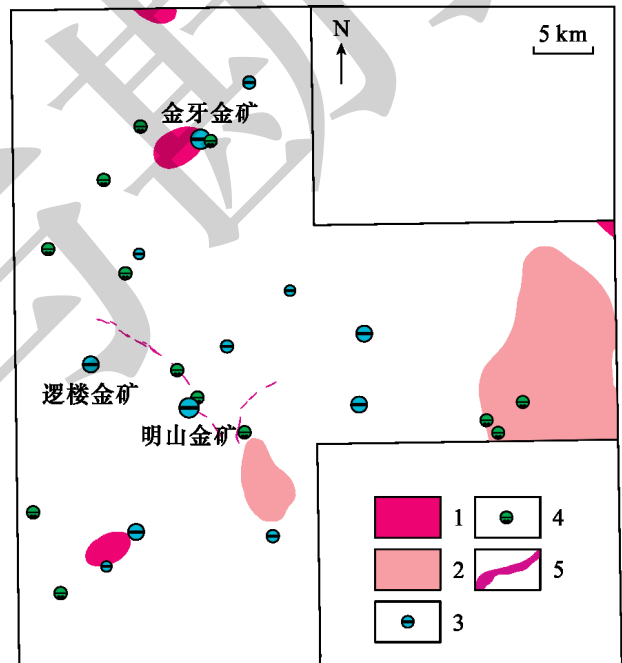


图6 广西金牙-明山一带脉岩、推断岩浆岩分布图

Fig. 6 Distribution map of dike and inferred magmatic rocks in the Jinya-Mingshan area of Guangxi

1-磁法推断岩体;2-重力推断岩体;3-金矿床(点);4-锑矿床(点);5-岩脉
1-magmatic rocks inferred from aeromagnetic data; 2-magmatic rocks inferred from gravimetric data; 3-gold deposit (occurrence); 4-antimony deposit (occurrence); 5-dike

(3) 断裂

研究区内金矿床明显受到断裂构造的控制,绝大多数金矿床(点)都位于断裂附近,金牙金矿位于多条断裂交汇部位,明山金矿则处于数条断裂夹持区之中(图8)。断裂构造不仅控制着研究区内含矿

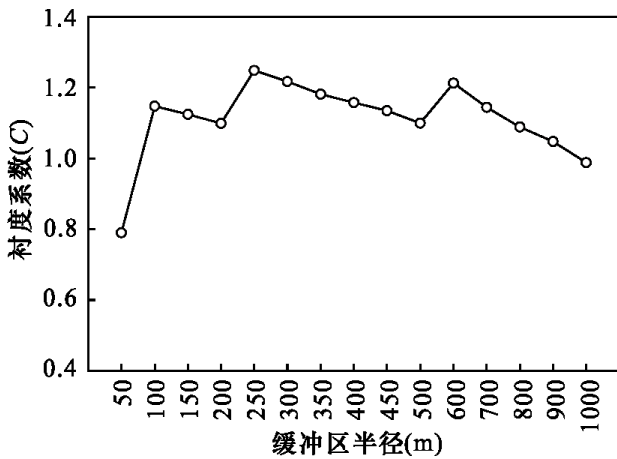


图7 岩浆岩缓冲区半径与衬度系数关系图

Fig. 7 Relationship diagram between radius of magmatic rocks buffer zone and contrast coefficient

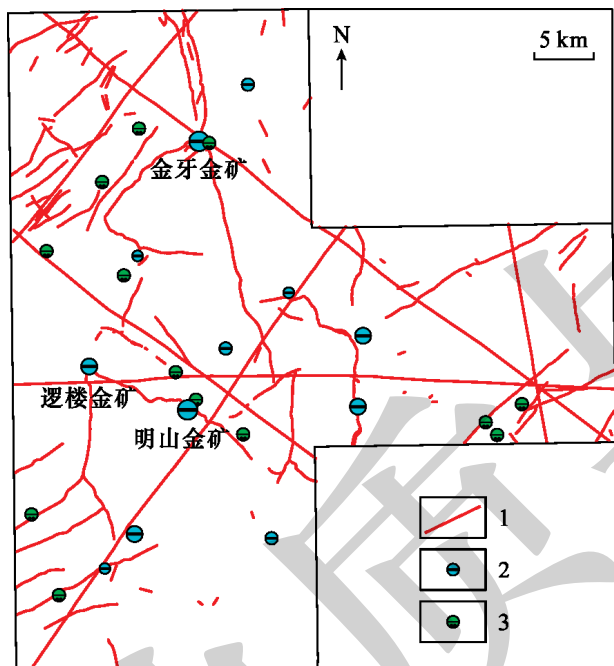


图8 广西金牙-明山一带断裂分布图

Fig. 8 Distribution map of faults in the Jinya-Mingshan area of Guangxi

1-断裂; 2-金矿床(点); 3-锑矿床(点)

1-fault; 2-gold deposit (occurrence); 3-antimony deposit (occurrence)

热液的运移,还对矿体的定位分布产生了明显影响(断裂构造的破碎带、不同断裂交汇部位);此外断裂构造对矿体的空间位置、产状、形态等也具有一定影响。研究区内对金矿化(体)等有控制作用的断裂其走向没有明显的趋向性(近南北向、北北向、北东向均有),因此选择了所有不同走向的断裂作为证据因子。考虑到高级别断裂的可能导矿、配矿作用,本文不仅选择了地质填图中实际存在的断裂

(具有导矿、容矿的作用),还选择了由遥感、重力等手段推断的区域性深大断裂(可能为深部岩浆或深部流体的通道)。此外,考虑到断裂交点处多组断裂的叠加可能更利于成矿,本文将断裂和断裂交点作为单独的证据层进行分析。考虑到断裂或断裂交点对成矿的影响通常超越了断裂本身的范围(刘斌等,2020),因此这里分别对二者进行缓冲区分析(图9、图10)。分析结果如下:对断裂来说,选择700 m的缓冲区半径最为合适;对断裂交点来说,则应选择400 m的缓冲区半径。

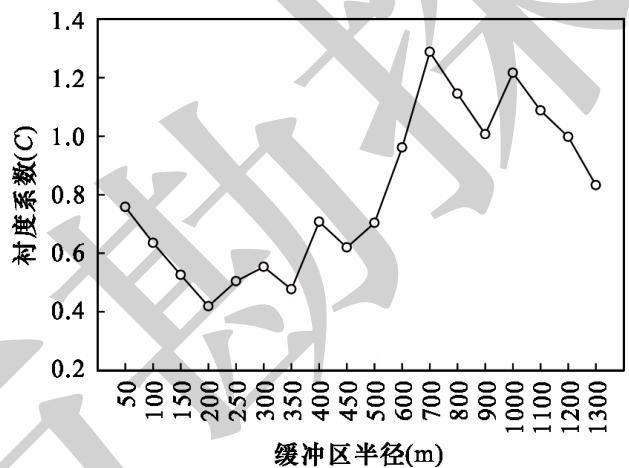


图9 断裂缓冲区半径与衬度系数关系图

Fig. 9 Relationship diagram between radius of faults buffer zone and contrast coefficient

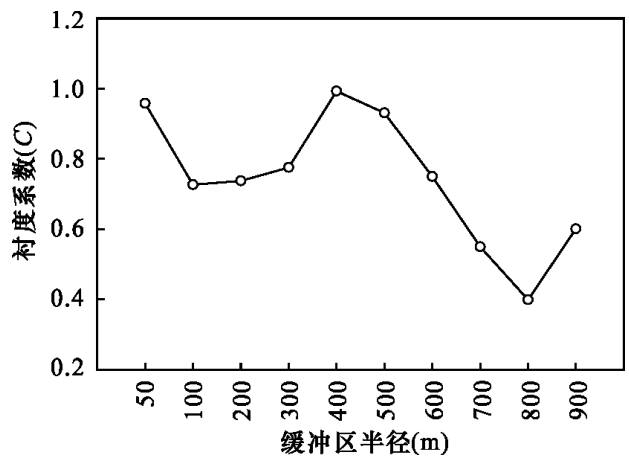


图10 断裂交点缓冲区半径与衬度系数关系图

Fig. 10 Relationship diagram between radius of fault intersections buffer zone and contrast coefficient

(4)围岩蚀变

研究区内的金矿多为卡林型金矿,其形成与热液流体密不可分,因此在金矿体附近常可见由热液流体导致的蚀变带(图11),这些蚀变带可直接指示矿化的存在。研究区内金矿体附近的蚀变带中常

见围岩蚀变类型有硅化、黄铁矿化、毒砂化、雄黄矿化、方解石化等,说明上述蚀变类型是研究区内与金矿化关系密切的热液蚀变。因此选择包含上述蚀变类型的蚀变带作为一证据因子。

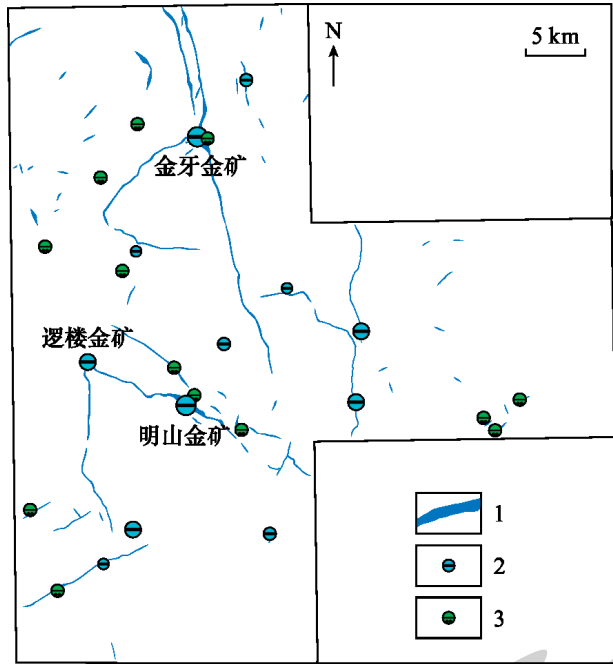


图 11 广西金牙-明山一带蚀变带分布图

Fig. 11 Distribution map of alteration zone in the Jinya-Mingshan area of Guangxi

1-蚀变带;2-金矿床(点);3-锑矿床(点)

1-alteration zone; 2-gold deposit (occurrence); 3-antimony deposit (occurrence)

(5) 元素化探异常

研究区的金矿石中常可见毒砂、雄黄或辉锑矿等矿物,金丰度值高的岩石也常具有较高含量的 As、Hg、Sb 等。因此可以认为研究区内的金矿化与 As、Hg、Sb 等元素的矿化具有较高的关联性。研究区内 Au、As、Hg、Sb 等元素异常值高,且各元素异常带关系密切,常呈互相套合关系(图 12),绝大多数矿床(点)附近均有这四种元素异常带的分布,金牙金矿与明山金矿正处于 Au-As-Hg-Sb 化探异常套合带,这也验证了研究区内这些元素的矿化具有较高的关联性这一观点。因此选择 Au、As、Hg、Sb 单元素的化探异常带作为一证据因子。

4.2 模型验证

本文选择 MRAS 软件证据权重模型来进行成矿预测,以研究区内已知的 Au、Sb 矿床(点)作为模型的矿点信息图层,选取了地层、岩浆岩体、断裂、断裂交点、围岩蚀变及 Au、As、Hg、Sb 单元素化探

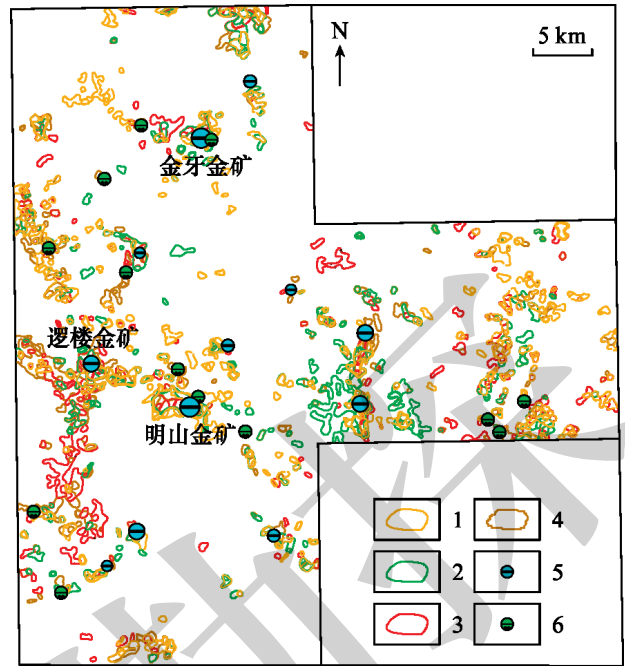


图 12 广西金牙-明山一带多元素化探异常分布图

Fig. 12 Distribution map of multi-element geochemical anomalies in the Jinya-Mingshan area of Guangxi

1-Au 化探异常带;2-As 化探异常带;3-Hg 化探异常带;4-Sb 化探异常带;5-金矿床(点);6-锑矿床(点)

1-Au geochemical anomaly zone; 2-As geochemical anomaly zone; 3-Hg geochemical anomaly zone; 4-Sb geochemical anomaly zone; 5-gold deposit (occurrence); 6-antimony deposit (occurrence)

异常 9 种证据因子,选择 500 m×500 m 的网格间距来建立证据权重模型。通过 MRAS 软件按照上述证据权重模型进行先验概率、权重值及后验概率的计算,各证据因子的先验概率计算结果见表 2,各证据因子的权重值计算结果见表 3。从计算获得的各个证据因子的衬度系数(C 值)看,各个证据因子的 C 值都比较大,表明本文选取的指标对找矿均是有利的,也表明本文选取的证据因子是合适的。从整体看,蚀变是指示找矿最有利的,虽然软件没有给出该证据因子的负权重,但实际上根据负权重的计算公式 ($W = \ln [P(B^*|D)/P(B^*|D^*)]$) 中, $P(B^*|D)$ 为一网格单元内不存在该证据因子且包含矿点的概率,对该证据因子来说此概率值为 0,该证据因子的负权重值 (W^-) 为负无穷大(软件作空值处理),也即其衬度为正无穷大,其对指示矿床最为有利。剩余证据因子中按照其衬度系数的相对大小可见它们对指示矿床的有利程度从大到小依次是 Sb、As、Au、Hg 元素异常、断裂、岩浆岩、断裂交点以及地层。

表 2 各证据因子先验概率计算结果统计表

Table 2 Statistics of prior probability calculation results for each evidence factor

证据因子	P_1	P_2	P_3	P_4
地层	0.480000	0.328346	0.520000	0.671653
岩浆岩体	0.360000	0.139017	0.160000	0.408446
断裂	0.840000	0.591553	0.160000	0.408446
断裂交点	0.240000	0.103535	0.760000	0.896464
围岩蚀变	1.000000	0.096915	0.000000	0.903084
Au 元素异常	0.600000	0.185621	0.400000	0.814378
As 元素异常	0.560000	0.152654	0.440000	0.847345
Hg 元素异常	0.440000	0.136502	0.560000	0.863497
Sb 元素异常	0.760000	0.162849	0.240000	0.837150

注：表中 P_1 为一网格单元内存在该证据因子时且包含矿点的概率； P_2 为一网格单元内存在该证据因子且不包含矿点的概率； P_3 为一网格单元内不存在该证据因子且包含矿点的概率； P_4 为一网格单元内不存在该证据因子且不包含矿点的概率。

表 3 各证据因子权重计算结果统计表

Table 3 Statistics of weight calculation results for evidence factors

证据因子	W^+	W^-	C
地层	0.379717	-0.255913	0.635630
岩浆岩体	0.951503	-0.296605	1.248108
断裂	0.350650	-0.937188	1.287838
断裂交点	0.840729	-0.165140	1.005869
围岩蚀变	2.333919	0.000000	2.333919
Au 元素异常	1.173219	-0.710960	1.884179
As 元素异常	1.299759	-0.655333	1.955092
Hg 元素异常	1.170435	-0.433054	1.603489
Sb 元素异常	1.540493	-1.249365	2.789858

注：表中 W^+ 与 W^- 为一网格单元内存在某一证据因子与不存在该证据因子时的权重值，衬度系数 C 为 W^+ 与 W^- 的差值。

4.3 靶区圈定和评价

基于上述证据权重模型，利用 MRAS 软件计算后验概率，按照后验概率的高低生成色块图，并圈定找矿靶区。本文选择 4 级色阶代表后验概率的高低，并据此生成色块图：后验概率 >0.60 的区块为一级色阶； $0.30 <$ 后验概率 <0.60 的区块为二级色阶； $0.20 <$ 后验概率 <0.30 的区块为三级色阶； $0.03 <$ 后验概率 <0.20 的区块为四级色阶（图 13）。再综合考虑高后验概率的连续分布规模、地质条件、地球物理地球化学特征等，于色块图中圈定找矿靶区，并按成矿有利程度的高低将找矿靶区分为 A、B、C 三级。本次共圈出 19 个找矿靶区，其中 A 级靶区 8 个、B 级靶区 7 个、C 级靶区 4 个。从找矿靶区与金锑矿床

（点）的分布来看：金牙（A-1）、明山（A-6）和逻楼（A-5）三个金矿床所在的区域后验概率值高值连片出现，规模大，显示极好的成矿潜力，这与已知的地质事实是高度相符的，进一步说明了靶区圈定的可靠性。需要注意的是后验概率高值区一直延伸到了这些矿床的外围，如金牙金矿的北侧和西南区域（A-2、A-3、B-1 和 B-2）、逻楼金矿的南部（B-4）、明山金矿的东南部（B-5），指示这些金矿的外围具有较好的找矿潜力。A-2 和 A-3 总体显示较高的成矿概率，且存在已发现的金矿床（点），具有较好的找矿潜力。B-1 和 B-2 总体显示中等的成矿概率，但两处还未发现金矿床（点），找矿潜力属中等。B-4 和 B-5 两处应该是明山-逻楼矿带的自然延伸，显示较高的成矿概率，具备较好的找矿潜力。A-4 存在三个已发现的金矿床（点），后验概率较高且连续分布规模大。A-7 和 A-8 存在一个或多个已发现的金锑矿床（点），总体上后验概率较高。B-3 和 B-7 存在一个或多个已发现的锑矿床（点），但后验概率总体呈中等且连续性分布规模小。B-6 存在一个已发现的金矿床，但后验概率中等且规模较小，找矿

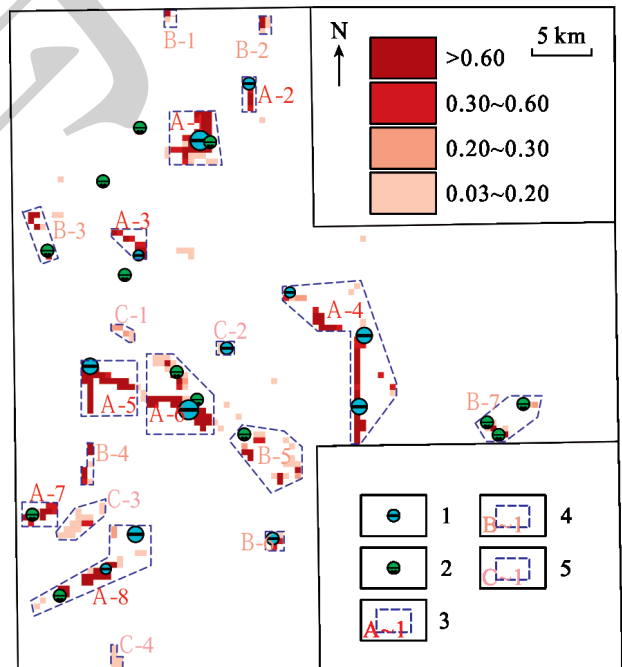


图 13 广西金牙-明山一带金矿床证据权重法后验概率图

Fig. 13 Posterior probability map of evidence weight method for gold deposits in the Jinya-Mingshan area of Guangxi

1-金矿床(点); 2-锑矿床(点); 3-A 级靶区及其编号; 4-B 级靶区及其编号; 5-C 级靶区及其编号

1-gold deposit (occurrence); 2-antimony deposit (occurrence); 3-A level target area and its number; 4-B level target area and its number; 5-C level target area and its number

潜力中等。C-1、C-2、C-3和C-4总体显示较低的后验概率,高后验概率的区块极少,也仅有C-2中存在已发现的矿床(点),说明这四个区域的找矿潜力较小。

总体来看,研究区大型-小型矿床均位于后验概率高值连片出现的区域,而已有的具有矿化信息的金矿点均位于后验概率数值较高、连片规模较大

的区域,这些均表明本文所选取的9种证据因子是较为适当的,所建立起的证据权重模型是较为正确的,其预测结果基本可靠。此外,本文而找矿靶区的圈定是基于MRAS软件综合研究区内多种卡林型金矿成矿有利信息而得出的,其在研究区内是系统性的、符合地质规律的。综上所述,本文所圈定的找矿靶区具有较高的可信度。

表4 广西金牙-明山一带靶区划分表

Table 4 Target area division in the Jinya-Mingshan area of Guangxi

靶区编号	圈定靶区理由
A-1	①后验概率连片分布规模大,强度高;②存在已经发现的大型矿床金牙金矿;③中三叠统细碎屑岩广泛分布;④位于同沉积断裂附近;⑤位于隐伏岩体附近;⑥位于蚀变带附近;⑦化探异常强度高、规模大
A-2	①后验概率连片分布,规模中等,强度高;②存在已经发现的矿床;③中三叠统细碎屑岩广泛分布;④位于蚀变带附近;⑤化探异常强度高、规模较大
A-3	①后验概率连片分布,规模中等,强度高;②存在已经发现的矿床;③中三叠统细碎屑岩分布较广;④位于同沉积断裂附近;⑤位于蚀变带附近;⑥化探异常强度高、规模大
A-4	①后验概率连片分布规模大,强度高;②存在3个已经发现的矿床(点);③中三叠统细碎屑岩广泛分布;④位于同沉积断裂附近;⑤位于蚀变带附近;⑥化探异常强度高、规模大
A-5	①后验概率连片分布规模大,强度高;②存在已经发现的小型矿床逻楼金矿;③中三叠统细碎屑岩广泛分布;④位于同沉积断裂附近;⑤位于石英斑岩脉附近;⑥化探异常强度高、规模大
A-6	①后验概率连片分布规模大,强度高;②存在已经发现的大型矿床明山金矿;③中三叠统细碎屑岩广泛分布;④位于同沉积断裂附近;⑤位于石英斑岩脉附近;⑥位于蚀变带附近;⑦化探异常强度高、规模大
A-7	①后验概率连片分布,规模中等,强度高;②存在一个已经发现的铋矿床;③位于同沉积断裂附近;④位于蚀变带附近;⑤化探异常强度较高、规模较大
A-8	①后验概率连片分布规模大,强度较高;②存在多个已经发现金铋矿床(点);③中三叠统细碎屑岩广泛分布;④位于同沉积断裂附近;⑤位于隐伏岩体附近;⑥位于蚀变带附近;⑦化探异常强度高、规模较大
B-1	①后验概率强度较高但规模小;②中三叠统细碎屑岩分布较少;③位于同沉积断裂附近;④位于隐伏岩体附近;⑤位于蚀变带附近;⑥化探异常强度中等但规模小
B-2	①后验概率强度较高但规模小;②中三叠统细碎屑岩分布广泛;③位于小型同沉积断裂附近;④位于小型蚀变带附近;⑤化探异常强度中等,规模较大
B-3	①后验概率强度较高、规模中等;②存在一个已经发现铋矿床(点);③位于同沉积断裂附近;④化探异常强度中等、规模较大
B-4	①后验概率强度较高、规模中等;②位于明山-逻楼成矿带的南部自然延伸区域;③中三叠统细碎屑岩广泛分布;④位于同沉积断裂附近;⑤存在较大规模化探异常
B-5	①后验概率强度中等、规模较大;②存在一个已经发现的铋矿床(点);③位于明山-逻楼成矿带的东南部自然延伸区域;④中三叠统细碎屑岩分布较广泛;⑤位于同沉积断裂附近;⑥位于石英斑岩脉附近;⑦位于小型蚀变带附近
B-6	①后验概率强度中等、规模小;②存在一个已经发现的矿床(点);③中三叠统细碎屑岩广泛分布;④位于隐伏岩体附近;⑤化探异常规模中等
B-7	①后验概率强度中等、规模中等;②存在三个已经发现的铋矿床(点);③位于同沉积断裂附近;④位于隐伏岩体附近;⑤化探异常规模较大
C-1	①后验概率强度小、规模小;②位于同沉积断裂附近;③位于石英斑岩脉附近;④位于蚀变带附近;⑤化探异常规模较小
C-2	①后验概率强度小、规模小;②存在一个已经发现的矿床(点);③中三叠统细碎屑岩分布较少;④化探异常规模中等
C-3	①后验概率强度较小、规模中等;②位于同沉积断裂附近;③位于小型蚀变带附近;④化探异常较小
C-4	①后验概率强度小、规模小;②中三叠统细碎屑岩分布较广泛;③位于小型同沉积断裂附近;④位于小型蚀变带附近;⑤化探异常规模中等

5 结论

本文基于MRAS软件使用证据权重法在广西金牙-明山一带开展卡林型金矿成矿研究与成矿预测,通过系统分析研究金牙-明山一带区域地质背

景、典型卡林型金矿矿床特征及控矿因素,总结了研究区内的区域找矿模型,并在此基础上选择了证据因子、建立了成矿预测模型,再通过该成矿预测模型圈定了研究区卡林型金矿找矿靶区。针对本次在金牙-明山一带成矿预测的研究,得到了如下

结论:

(1)经计算,本文所选取的9种证据因子其衬度系数 C 均大于0,代表它们是有找矿指示意义的,说明这些证据因子符合成矿预测的需要,能够确保据此建立的成矿预测模型具有较高的可行性,从而确保本次成矿预测的结果具有较高的可信度。

(2)本次预测共圈定出A级靶区8个、B级靶区7个、C级靶区4个。从找矿靶区的分布可以看出,所圈定的远景区与矿床(点)的分布具有较高的一致性,说明该预测结果的可信度较高。相对于传统定性方法,本方法所得到的预测结果更为直观、更为可靠,有利于确定不同找矿勘查区的重要性,有助于确定不同区域探矿工程的布置量。因此本次成矿预测可以为实际找矿生产提供一定指导意见。

(3)MRAS等地学计算机软件在地质信息处理方面具有信息综合性强、处理效率高、信息损失少等多种优点,其在信息综合处理方面应用前景巨大;基于计算机软件的证据权重法可为成矿预测提供定量化数据支持,其预测效率与预测结果可信度均较高,在成矿预测方面具有很好的可行性与实用性。

致谢:感谢编辑和审稿人对本文提出的宝贵意见和建议。

[References]

- Chen Chong, Tan Jun, Shi Wenjie, Li Xiangkun, Duan Xianchao, Gao Xiang, Zhai Yafeng. 2012. The application of weights of evidence in MORPAS system to medium-large scale metallogenic prediction[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 36(5): 827-833(in Chinese with English abstract).
- Chen Maohong, Mao Jingwen, Chen Zhenyu, Zhang Wei. 2009. Mineralogy of arsenian pyrites and arsenopyrites of carlin-type gold deposits in Yunnan-Guizhou-Guangxi "golden triangle" area, southwestern China[J]. *Mineral Deposits*, 28(5): 539-557(in Chinese with English abstract).
- Cheng Qiuming. 2012. Application of a newly developed boost weights of evidence model (Boost W of E) for mineral resources quantitative assessments[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(6): 1976-1984(in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing, Zhang Jing, Zhang Fuxin, Pirajno F, Li Chao. 2004. carlin and carlin-like gold deposits in western Qinling Mountains and their metallogenic time, tectonic setting and model[J]. *Geological Review*, (2): 134-152(in Chinese with English abstract).
- Deng Jie, Li Xiongwei, Huang Jianjun, Zhang Xu, Hu Jinwang, Zhou Lei, Wu Tao. 2012. Application of the weight-of-evidence method in metallogenetic prediction—A case study of prospecting of beryllium deposits in Tongcheng, Hubei Province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 28(4): 350-359(in Chinese with English abstract).
- Deng Jun, Zhan Mingguo, Zhou Weijin, Wu Songle, Huang Ning, Zhang Runqiu, Xie Shuyun. 2021. Quantitative prediction of mineral resources in typical gold deposits in Guangxi, China using a fuzzy weights of evidence method[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(3): 374-390(in Chinese with English abstract).
- Gao Wei, Hu Ruizhong, Wang Xueyun, Yin Runsheng, Bi Xianwu, Xie Zhuojun, Fu Shanling, Yan Jun. 2023. Large-scale basement mobilization endows the giant carlin-type gold mineralization in the Youjiang Basin, South China: Insights from mercury isotopes[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 135(11-12): 3163-3172.
- Gong Yan, Pang Honghai, Wei Liangxi, Zhang Hengqing, Qin Liangchao. 2024. Geochemical characteristics and exploration prediction of stream sedimentary survey in Jinya area, Guangxi[J]. *Mineral Resources and Geology*, 38(3): 492-502(in Chinese with English abstract).
- Guo Tengfei. 2013. Study on characteristics of structures and controls on mineralization of Jinya gold deposit, Guangxi [D]. Nanning: Guangxi University: 1-67(in Chinese with English abstract).
- Hu Peng, Zhang Jun, Shi Kai, Wu Xiaodi. 2009. Pb-Zn perspective prognosis based on MORPAS evidence weight method in Fengtai region [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 24(3): 205-210(in Chinese with English abstract).
- Huang Yongquan, Cui Yongqin. 2001. The relationship between magmatic rocks and gold mineralization of Mingshan gold deposit of Lingyun, Guangxi [J]. *Guangxi Geology*, (4): 22-28(in Chinese with English abstract).
- Ji Xingzhong, Chen Maohong, Yang Liqiang, Chen Gang. 2023. The relationship between carlin-type Au mineralization and magmatism in the Youjiang Basin—A case study from the Mingshan gold deposit in northwest Guangxi, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 157: 105400.
- Liu Bin, Yan Haiqing, Pu Wanfeng, Yuan Zhen, Yang Zhuang, Xu Huan. 2020. Metallogenic predictions in Maqu high ore concentration area of Gansu Province based on MRAS evidence weighting method [J]. *Gold*, 41(3): 5-11(in Chinese with English abstract).
- Liu Jiangtao, Wu Fafu, Li Fulin, Hu Peng, Wang Jianxiong, Xiang Wenshuai, Zhang Zicheng. 2021. Quantitative evaluation of Eritrea gold resources potential based on the weight of evidence model[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(4): 1292-1305(in Chinese with English abstract).
- Li Xinhang, Bai Lingan, Hu Qiaofan, Xie Lanfang, Pang Baocheng, Yue Zhiheng. 2023. Metallogenic fluid properties and mineralization mechanism of Jinya gold deposit in northwest Guangxi[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 53(3): 840-852(in Chinese with English abstract).
- Liu Yin, Hu Kai, Han Shanchu, Sun Zehang. 2015. Structural evolution of the Youjiang Basin and its controlling effects on the formation of carlin-type gold deposits [J]. *Geological Journal of China Universities*, 21(1): 1-14(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Li Xiaofeng, Li Houmin, Qu Xiaoming, Zhang

- Changqing, Xue Chunji, Wang Zhiliang, Yu Jinjie, Zhang Zuoheng, Feng Chengyou, Wang Ruiting. 2005. Types and characteristics of endogenetic metallic deposits in orogenic belts in China and their metallogenic processes [J]. *Acta Geologica Sinica*, (3): 342-372(in Chinese with English abstract).
- Muntean J L, Cline J S, Simon A C, Longo A A. 2011. Magmatic-hydrothermal origin of Nevada's Carlin-type gold deposits [J]. *Nature Geoscience*, 4(2): 122-127.
- Peng Lei. 2016. Geological characteristics and genesis analysis of the gold deposit in Nalin, Fengshan County and Mingshan, Lingyun County, Guangxi[J]. *Technological Innovation and Application*, (19): 164-165(in Chinese).
- Su Wenchao, Dong Wendou, Zhang Xingchun, Shen Nengping, Hu Ruizhong, Albert H. Hofstra, Cheng Lianzheng, Xia Yong, Yang Keyou. 2018. Carlin-type gold deposits in the Dian-Qian-Gui "Golden Triangle" of southwest China [J]. *Reviews in Economic Geology*, 20: 157-185.
- Tang Yang, Xiao Hong, Yuan Wenzhe, Yu Zhebin, Yan Changkui, Zeng Xu. 2024. Geological characteristics and prospecting direction of Mingshan-Nalin gold deposit, Guangxi [J]. *Mineral Exploration*, 15(2): 223-233(in Chinese with English abstract).
- Teng Fei, Peng Lina, Meng Qinglong, Xing Yi. 2021. Applying weight of evidence to predict Ag-Pb-Zn potentiality in Fengning region, Hebei [J]. *North China Geology*, 44(1): 21-26(in Chinese with English abstract).
- Wu Chuanjun, Xu Deru, Zhou Yingchun, Hou Maozhou, Yu Liangliang, Zhou Yueqiang. 2014. Study on metallogenic prognosis for gold polymetallic deposits in Hainan Island based on evidence weighting method [J]. *Journal of Geomechanics*, 20(1): 1-15(in Chinese with English abstract).
- Wang Lide, Yu Niansheng, Xiao Liqiang. 2008. Geological characteristics and prospecting direction of the Mingshan Au deposit in Guangxi [J]. *Mineral Resources and Geology*, 22(5): 381-386(in Chinese with English abstract).
- Wang Qingfei, Yang Lin, Xu Xiaojie, M. Santosh, Wang Yanning, Wang Tingyi, Chen Fangge, Wang Ruixue, Gao Liang, Liu Xuefei, Yang Shujuan, Zeng Yushan, Chen Jiahao, Zhang Qizuan, Deng Jun. 2020. Multi-stage tectonics and metallogeny associated with Phanerozoic evolution of the South China Block: A holistic perspective from the Youjiang Basin [J]. *Earth-Science Reviews*, 211: 103405.
- Wu Wei. 2018. Mineralization of the Jinya and Nakuang carlin-like gold deposits in Northwest Guangxi [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing): 1-68(in Chinese with English abstract).
- Xie Zhuojun, Huang Kangjun, Xia Yong, Jean Cline, Tan Qiping, Liu Jianzhong, Xiao Jingdan, Yan Bing. 2022. Heavy magnesium isotopes in carbonate indicate a magmatic-hydrothermal origin of carlin-type Au deposit [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 333: 166-183.
- Yan Xinlong, Hu Huaqing, Zhang Houyun, Wu Gang, Li Jianliang, Fang Guicong. 2016. Prospecting toward the deep subsurface of the Jinya gold deposit using CSAMT in Fengshan County, Guangxi Province [J]. *Geology and Exploration*, 51(1): 143-150(in Chinese with English abstract).
- Yang Chengfu, Liu Jianzhong, Gu Xuexiang, Wang Zepeng, Chen Faen, Wang Dafu, Xu Liangyi, Li Junhai. 2020. The relationship of tectonic evolution and Au-Sb mineralization in Nanpanjiang-Youjiang Basin [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 41(2): 280-292 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenbo. 2022. Research and prospecting prediction of geoelectric extraction to find hidden gold deposits in Jinya mining, Guangxi [D]. Guilin: Guilin University of Technology: 1-65 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Hao, Cai Minghai. 2016. Spatial distribution characteristics and geochemical significance of ore-forming elements in Jinya gold deposit, Guangxi [C]. *Proceedings of the Academic Conference on New Advances in Resource Environment and Geospatial Information Technology*: 139-143(in Chinese).
- [附中文参考文献]
- 陈冲, 谭俊, 石文杰, 李相坤, 段显超, 高翔, 翟亚锋. 2012. MORPAS系统证据权法在中大比例尺成矿预测中的应用[J]. *物探与化探*, 36(5): 827-833.
- 陈懋弘, 毛景文, 陈振宇, 章伟. 2009. 滇黔桂“金三角”卡林型金矿含砷黄铁矿和毒砂的矿物学研究[J]. *矿床地质*, 28(5): 539-557.
- 成秋明. 2012. 增强证据权(BoostWofE)新方法在矿产资源定量评价中的应用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(6): 1976-1984.
- 陈衍景, 张静, 张复新, Pirajno F, 李超. 2004. 西秦岭地区卡林-类卡林型金矿床及其成矿时间、构造背景和模式[J]. *地质论评*, (2): 134-152.
- 邓杰, 李雄伟, 黄建军, 张旭, 胡金旺, 周磊, 吴涛. 2012. 证据权法在成矿预测中的应用——以湖北通城地区铍矿的成矿预测为例[J]. *华南地质与矿产*, 28(4): 350-359.
- 邓军, 战明国, 周伟金, 伍松乐, 黄宁, 张润秋, 谢淑云. 2021. 基于模糊证据权法的广西典型金矿矿产定量预测[J]. *地质力学学报*, 27(3): 374-390.
- 宫研, 庞宏海, 韦良喜, 张珩清, 覃良朝. 2024. 广西金牙地区水系沉积物地球化学特征及找矿预测[J]. *矿产与地质*, 38(3): 492-502.
- 郭腾飞. 2013. 广西金牙金矿床构造特征及其控矿作用研究[D]. 南宁: 广西大学: 1-67.
- 胡鹏, 张均, 石凯, 武晓迪. 2009. 基于MORPAS证据权法的凤太Pb-Zn矿床远景区预测[J]. *地质找矿论丛*, 24(3): 205-210.
- 黄永全, 崔永勤. 2001. 广西凌云县明山金矿床岩浆岩与金矿化关系[J]. *广西地质*, 4: 22-28.
- 刘斌, 闫海卿, 蒲万峰, 袁臻, 杨壮, 晋欢. 2020. 甘肃省玛曲矿集区基于MRAS证据权重法找矿预测[J]. *黄金*, 41(3): 5-11.
- 刘江涛, 吴发富, 李福林, 胡鹏, 王建雄, 向文帅, 张紫程. 2021. 基于证据权模型的厄立特里亚金矿资源潜力评价[J]. *地质学报*, 95(4): 1292-1305.
- 李欣航, 白令安, 胡乔帆, 谢兰芳, 庞保成, 岳志恒. 2023. 桂西北金牙金矿床成矿流体性质与成矿机制[J]. *吉林大学学报(地球*

- 科学版), 53(3): 840-852.
- 刘寅, 胡凯, 韩善楚, 孙泽航. 2015. 右江盆地构造和演化及对卡林型金矿床的控制作用[J]. 高校地质学报, 21(1): 1-14.
- 毛景文, 李晓峰, 李厚民, 曲晓明, 张长青, 薛春纪, 王志良, 余金杰, 张作衡, 丰成友, 王瑞廷. 2005. 中国造山带内生金属矿床类型、特点和成矿过程探讨[J]. 地质学报, (3): 342-372.
- 彭磊. 2016. 广西凌云县明山-凤山县那林金矿地质特征及成因分析[J]. 科技创新与应用, 19: 164-165.
- 滕菲, 彭丽娜, 孟庆龙, 邢怡. 2021. 证据权重法在河北丰宁地区银铅锌多金属矿成矿预测中的应用[J]. 华北地质, 44(1): 21-26.
- 唐一昂, 肖红, 袁文泽, 于哲彬, 闫常魁, 曾旭. 2024. 广西明山——那林金矿床地质特征及找矿方向[J]. 矿产勘查, 15(2): 223-233.
- 吴传军, 许德如, 周迎春, 侯茂洲, 于亮亮, 周岳强. 2014. 基于证据权重法的海南岛金多金属矿成矿预测研究[J]. 地质力学学报, 20(1): 1-15.
- 王立德, 于年生, 肖利强. 2008. 广西明山金矿床地质特征及找矿方向[J]. 矿产与地质, 22(5): 381-386.
- 吴伟. 2018. 桂西北金牙和那矿类卡林型金矿成矿作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 1-68.
- 杨成富, 刘建中, 顾雪祥, 王泽鹏, 陈发恩, 王大福, 徐良易, 李俊海. 2020. 南盘江—右江盆地构造演化与金锑成矿作用[J]. 地球学报, 41(2): 280-292.
- 严新添, 胡华清, 张厚云, 吴刚, 李建良, 方贵聪. 2016. 广西凤山县金牙金矿 CSAMT 法深部找矿预测研究[J]. 地质与勘探, 51(1): 143-150.
- 郑浩, 蔡明海. 2016. 广西金牙金矿成矿元素空间分布特点及地球化学意义[C]. 资源环境与地学空间信息技术新进展学术会议论文集: 139 - 143.
- 张文博. 2022. 广西金牙矿区地电提取寻找隐伏金矿研究及找矿预测[D]. 桂林: 桂林理工大学: 1-65.

Quantitative Prediction of Gold Deposits in the Jinya-Mingshan Area of Guangxi Based on Evidence Weighting Method

WEI Genqiang¹, CHEN Jiajie¹, DONG Xinzhu², GUO Guangfei², GAO Hongze¹, Li Peng¹

(1. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013; 2. Haikou Marine Geological Survey Center of China Geological Survey, Haikou, Hainan 571126)

Abstract: There are multiple large and medium-sized carlin type gold deposits in the Jinya-Mingshan area of Guangxi, which have good potential for gold exploration. Previous work has obtained diverse data on geology, mineral resources, geophysics, and geochemical exploration in the region, but lacks in-depth quantitative exploration of relevant mineral information. This article is based on the evidence weighting method to conduct quantitative prediction of carlin type gold deposits in the Jinya-Mingshan area of Guangxi. Based on a systematic analysis of the regional geological background and carlin type gold mineralization conditions in the Jinya-Mingshan area, a regional prospecting model for the study area was established. Based on this model, multiple evidence factors were selected and extracted using the MRAS software system, including favorable mineralization strata, magmatic rocks, faults, fault intersections, surrounding rock alteration, and geochemical anomalies of Au, As, Sb, and Hg elements; And based on these evidence factors, the posterior probability of mineralization for each cell (500 m × 500 m) within the area was calculated. Based on the comprehensive posterior probability of mineralization and existing data, 19 prospecting target areas have been delineated in the study area. These target areas contain the locations of the vast majority of mineral deposits within the region, indicating a high level of reliability in the predicted results. At the same time, multiple target areas include the periphery of key mining areas and blank areas, providing a basis for the subsequent exploration and deployment of carlin type gold deposits in the area.

Key words: carlin type gold deposit, evidence weighting method, quantitative prediction, Jinya-Mingshan, Guangxi Province