

doi: 10.11720/wtyht.2022.1337

魏从玲,陈建立,郭鹏.基于 MRAS 证据权重模型的河南老湾地区金矿成矿预测[J].物探与化探,2022,46(3):653-660.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1337>

Wei C L, Chen J L, Guo P. Metallogenic prediction of gold deposits in Laowan area, Henan Province using the weight of evidence model and MRAS[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(3): 653-660. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1337>

基于 MRAS 证据权重模型的河南老湾地区 金矿成矿预测

魏从玲, 陈建立, 郭鹏

(河南省地质矿产勘查开发局第一地质勘查院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 河南省老湾地区是桐柏—大别有色贵金属成矿带上重要的金成矿区。在综合分析该区成矿因素的基础上, 提取构置了地层、韧性剪切带、脆性断裂、岩浆岩、与 Au 有关的蚀变带和 Au、As、Sb、Ag 水系沉积物单元素异常等 9 个预测变量, 基于 MRAS 软件, 采用证据权重模型对该区金矿进行了成矿远景预测工作。本次采用 0.10 km×0.10 km 的网格单元进行预测, 经过各预测变量的先验概率计算、权重值统计、独立性检验和后验概率的计算等过程, 划分出 A、B、C 三个级别的成矿远景区块, 根据预测网格分布特点及该区金矿地质特征, 圈出了 I 级找矿远景区 4 处, II 级找矿远景区 4 处。综合分析认为: 已知金矿床或矿点多数落入 A 级或 B 级成矿远景区块, C 级成矿远景区块主要是在 A 级或 B 级成矿远景区块的周边, 与成矿区带从中心向边缘渐变的特征相符合; 圈出的 I 级找矿远景区内均已发现金矿床(点), 并且后验概率平均值较高, 具有较好的金矿找矿潜力。

关键词: MRAS; 证据权重模型; 金矿; 成矿预测; 河南老湾

中图分类号: P632

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2022)03-0653-08

0 引言

MRAS 是一款基于 MapGIS 平台开发的, 为 GIS 矿产资源评价提供数据管理、方法模型与成果表达的软件, 它可以解决地质、物探、化探等信息提取及多元信息综合等问题^[1], 并进行可视化多元地学信息 GIS 评价处理^[2]。MRAS 在矿产资源评价方面运用非常成熟^[3], 国内普遍用来做矿产资源成矿预测和潜力评价^[4-10]。

河南省桐柏县老湾地区是河南省一处重要的黄金产地, 处于秦岭褶皱系东段, 桐柏—大别有色贵金属成矿带上。多年来, 众多勘查、科研单位先后在此做了大量工作, 对区内金矿床地质特征、金矿物的赋存状态和成矿物质来源、成岩成矿年代、成矿因素和控矿条件、构造体系演化等做了一系列的研究, 并取

得了诸多成果^[11-25]。目前, 老湾地区已发现了 10 多处金矿床(点), 并已提交一处超大型金矿床; 对区内金矿床的地质特征以及控矿因素等也有了较为全面的认识, 构建了区内金矿找矿模型, 并基于找矿模型对区内的找矿前景进行了评价和预测。本次研究通过分析老湾地区的控矿因素, 收集老湾地区地质、化探等资料, 首次利用 MRAS 软件中的证据权重模型, 采用定量化的方法, 对老湾地区的金矿资源潜力进行远景预测和评价。

1 区域地质背景

老湾地区金成矿带位于桐柏北部地区, 处于北为松扒断裂、南为老湾断裂、西为泌阳凹陷、东为吴城盆地, 呈 NWW 向展布的一条狭长地带中(图 1)。

区内主要赋矿地层是中元古界龟山岩组, 主要

收稿日期: 2021-06-11; 修回日期: 2021-08-26

基金项目: 河南省财政地质勘查项目(2020[18]-13)

第一作者: 魏从玲(1979-), 女, 河南南阳人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质勘查及研究工作。Email: weicongling@126.com

通讯作者: 陈建立(1966-), 男, 河南长葛人, 教授级高级工程师。Email: 842186572@qq.com

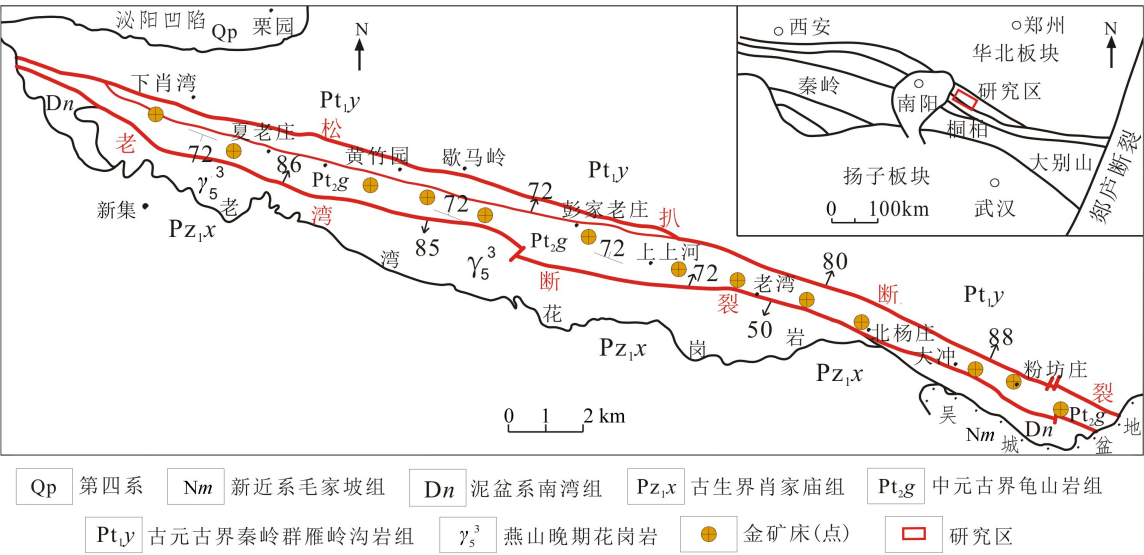


图 1 老湾地区金矿带区域地质简图^[15]

Fig.1 Region geological map of Laowan Gold Belt

岩性为二云石英片岩、斜长角闪片岩、斜长角闪岩和变质石英岩等。它是一套具有较强构造混杂作用的带状无序变质地层,呈层状、似层状或透镜状,整体呈 NWW—SEE 向平行于区域构造线展布,北侧以松扒断裂与秦岭岩群呈断层接触,南侧以老湾断裂与肖家庙岩组呈断层接触。

区内的金矿主要赋存在 NWW 向展布的韧性剪切带中,区内地层经长期的多期次变质、变形等作用,形成了许许多多的构造岩片及混杂岩带,除控制矿带南北两侧边界的老湾、松扒两个区域性断裂构造外,带内低序次的剪切、走滑构造也极为发育,岩层中的片理、劈理、糜棱构造十分发育,加上多期次的成矿作用,使区内地质构造显得十分复杂。

区内岩浆活动强烈,酸性和基性岩浆岩均较发育,尤以燕山期岩浆岩最为发育,主要有矿带南部的老湾花岗岩体和矿带北侧的花岗斑岩脉带,另发育有石英钠长斑岩脉和少数煌斑岩脉^[17-19],其中花岗斑岩与成矿关系密切。

2 控矿因素分析

控矿因素和成矿条件研究是矿产预测的重要基础。老湾地区金成矿带经历了华北板块与扬子板块分离、汇聚、俯冲和碰撞的演变过程,形成了以韧性构造变形为主,脆韧性构造变形叠加,并伴有岩浆侵入的复杂构造变形带。成矿作用伴随着构造的演化发生和发展,形成了具有韧性剪切变质热液和岩浆热液叠加的复合型矿化类型;矿化受地层、构造、岩

浆岩等多因素控制^[19]。

1) 地层:区内所有的金矿床和金矿点均产于老湾韧性剪切带所夹持的龟山岩组地层中。而龟山岩组地层金平均含量 11.17×10^{-9} ,是地壳丰度值的 3 倍多,龟山岩组既是金矿的主要赋矿围岩,也是成矿物质的主要来源,具有矿源层特点。

2) 构造:区内构造活动贯穿于整个成矿过程,是成矿和控矿的重要因素。不同层次、不同类型的韧性和脆性断裂构造控制了区内金矿脉的分布和产出特征。其中南部的老湾断裂和北侧的松扒断裂规模大、切割深,具有多期活动特点,是重要的控岩控矿构造,两条断裂构造的形态和产状控制了区内矿脉的分布范围、展布方向和形态特征。

区内断裂构造的多期次活动和走滑运动造成赋矿地层龟山岩组早期发生深层次的韧性剪切变形,伴随着变质作用促使龟山岩组地层中成矿物质活化,金成矿物质初步富集;晚期发生浅层次的脆—韧性剪切变形为含金成矿流体提供了运移通道和容矿构造空间;主断裂之间的一系列 NWW 向次级断裂为岩脉侵位和热液矿脉的就位提供了充足的空间,对金矿成矿作用控制效应更为直接和明显,控制了矿床和矿点的分布范围及产出位置。

3) 岩浆岩:区内多种迹象表明岩浆岩与矿化有关,是金矿化的重要物质来源和能量来源。老湾花岗岩体的延伸方向与区内矿脉的展布方向一致,岩体和区内的金矿体在空间上有共生(伴生)关系。老湾金矿带岩体、地层和矿石铅同位素组成和微量元素的测试分析表明,岩浆岩与矿石的化学组成、同

位素特征有相似性和同源性^[18-23],区内岩浆活动为该地区金矿化的必要条件。

4) 围岩蚀变:区内围岩蚀变主要有硅化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化,其中由硅化生成的含金属硫化物石英脉与金矿化的关系最为密切,往往形成金矿体。绢云母化由白云母蚀变而来,代表着热液改造后的结果,往往与金矿化关系密切。绿帘石化常常伴随有硅化以及绢云母化。碳酸盐化多发生在成矿晚期,标志着热液成矿作用的结束,亦是找矿的良好标志。

5) 化探异常:区内矿致异常元素组合复杂,Au-As-Sb-Ag 是区内的特征元素组合,以 Au、As、Sb、Ag 为主的多金属元素组合的化探异常往往是工业矿体存在的有利地段,有时伴生 Cu、Pb、Zn 组成的综合异常。

3 MRAS 证据权重模型

MRAS 软件的空间数据库是以矢量数据结构为主体形成的,可根据空间数据库对成矿信息进行提取分析,并对多元空间成矿信息进行资源潜力的综合评价^[2]。

证据权重模型的主要原理是以计算各种地质因素及找矿标志的权重大小为基础,利用 Bayes 先验概率与后验概率转换的相互关系,定量计算预测单元成矿后验概率的大小,从而达到快速圈定资源预测靶区的目的^[26-27]。

证据权重模型进行成矿预测有 5 个基本步骤:
1) 通过控矿因素和成矿条件的研究,确立地质

- 因素与矿化的关系,提取构置预测变量。
- 2) 计算各预测变量的先验概率,研究预测变量存在时,矿床(点)出现和不出现的条件概率,以及预测变量不存在时,矿床(点)出现和不出现的条件概率。
- 3) 对各预测变量和矿床(点)做空间分析处理,计算预测变量的权重值 W^+ 、 W^- 和 C 值,对预测变量进行优化选择。
- 4) 对优选出的预测变量进行条件独立性检验,进一步对预测变量进行优化,剔除相关性过高的预测变量。
- 5) 计算各预测单元的后验概率值,生成成矿预测远景潜力图。

4 老湾地区金矿成矿预测

4.1 预测变量的分析与提取

根据老湾金矿带的控矿因素和成矿条件的分析研究,提取以下控矿因素作为预测变量(图 2)。

- 1) 地层:区内的金矿全部分布于龟山岩组地层中,本次成矿预测将龟山岩组(1:5万)作为地层变量(图 2a)。
- 2) 断裂构造:老湾韧性剪切带(1:5万)是本区主干构造(图 2b),它控制了区内金矿脉的分布和产出。而平行于老湾断裂的 NWW 向的脆性断束则具体控制着矿带内金矿体的空间分布、形态、产状及变化,是区内金矿主要的容矿构造。脆性断束(1:5万)对成矿的影响范围是 0~50 m^[28],因此选择 50 m 作为脆性断束的缓冲半径(图 2c)。

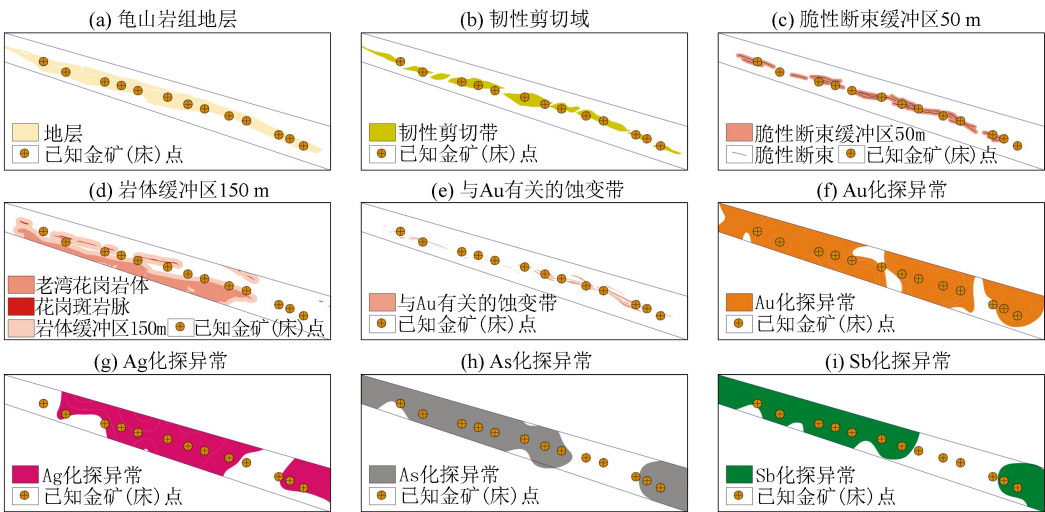


图 2 老湾地区金矿成矿预测变量示意

Fig.2 Variable map of metallogenic prediction in Laowan Gold Belt

3) 岩浆岩:区内的岩浆岩(1:5万)是金矿化的重要物质来源和能量来源,岩浆活动为该地区金矿化的必要条件。岩浆岩对成矿的影响范围是0~150 m^[28],因此选择150 m作为岩体的缓冲半径(图2d)。

4) 化探异常:As和Sb是金矿的前缘指示元素,地表有Au、As化探异常,往往指示深部有盲矿存在^[29]。而Au、As、Sb、Ag是区内的特征元素组合,本区1:5万水系沉积物中的Au、As、Sb、Ag元素组合异常好,并与金矿床套合性好,将1:5万水系沉积物中的Au、As、Sb、Ag单元异常作为本次研究的预测变量(图2f、g、h、i),异常下限分别为Au 2.3×10⁻⁹、As 9.5×10⁻⁶、Sb 0.8×10⁻⁶、Ag 85×10⁻⁶。

5) 与Au有关的蚀变带:区内的围岩蚀变伴随

整个成矿过程,蚀变带是找矿的良好标志。因此选择与Au有关的蚀变带(1:1万)作为金矿预测的变量(图2e)。

4.2 先验概率的计算统计

预测区面积108 km²,地质构造较为复杂;提取的预测变量以1:5万为主,1:1万为辅。本次预测综合各种因素和数据,提取了9种预测变量,采用1:5万比例尺图幅,经过多次实验,采用0.10 km×0.10 km单元格网度^[30-31],有效单元格共3 607个。选择区内13处已存在的金矿床(点)为模型单元,综合确定9种预测变量和已存在金矿床(点)的位置关系,统计各预测变量的先验概率。区内各预测变量先验概率统计结果见表1。

表 1 研究区各预测变量先验概率统计结果

Table 1 Prior probability statistical results of predictive variables in the area

预测变量	P1	P2	P3	P4
地层	1.000 000	0.042 279	0.000 000	0.957 720
韧性剪切域	0.857 142	0.022 780	0.142 857	0.977 219
脆性断束 50 m 缓冲区	0.571 428	0.010 408	0.428 571	0.989 591
岩浆岩 150 m 缓冲区	0.500 000	0.093 743	0.500 000	0.906 256
与 Au 有关的蚀变带	0.285 714	0.009 333	0.714 285	0.990 666
Au 异常	0.928 571	0.143 670	0.071 428	0.856 329
As 异常	0.785 714	0.214 160	0.214 285	0.785 839
Sb 异常	0.642 857	0.197 109	0.357 142	0.802 890
Ag 异常	0.785 714	0.244 137	0.214 285	0.755 862

注:P1表示金矿床(点)存在时预测变量出现的概率;P2表示金矿床(点)不存在时预测变量出现的概率;P3表示金矿床(点)存在时预测变量没有出现的概率;P4表示金矿床(点)不存在时预测变量没有出现的概率。

4.3 各预测变量的权重值

预测变量的权重计算是为后验概率做数据上的准备,计算公式如下:

$$C = W^+ - W^- ,$$

$$W^+ = \ln \left\{ \frac{P(d/j)}{1 - P(d/j)} \middle/ \frac{P_{\text{先验}}}{1 - P_{\text{先验}}} \right\} ,$$

$$W^- = \ln \left\{ \frac{P(\bar{d}/j)}{1 - P(\bar{d}/j)} \middle/ \frac{P_{\text{先验}}}{1 - P_{\text{先验}}} \right\} .$$

其中:

$$P(d/j) = \frac{N_{\text{证据层出现含矿单元格数}}}{N_{\text{单元格总数}}} ,$$

$$P(\bar{d}/j) = \frac{N_{\text{证据层不出现含矿单元格数}}}{N_{\text{单元格总数}}} ,$$

$$P_{\text{先验}} = \frac{N_{\text{含矿单元格数}}}{N_{\text{单元格总数}}} .$$

式中:W⁺表示各预测变量出现时的权重值;W⁻表示各预测变量不存在时的权重值;C表示正负权重值的差值,C值越大该预测变量越能很好地指示找矿,

C值越小表示该预测变量对找矿不能有很好的指示。C>0表明该预测变量对成矿有利,C<0表明该预测变量对成矿不利,C=0表明该预测变量对找矿缺乏指示意义。证据权重值统计结果见表2。

4.4 预测变量独立性检验

证据权重模型进行成矿预测要求参与预测的各变量都是条件独立或弱独立的,如果两个或几个预测变量具有相关性,会导致后验概率失真,因此需对参与预测的变量进行独立性检验。

本次对各预测变量做显著水平为0.05下的条件独立性检验,结果显示:参与预测的9个预测变量均相互独立,全部可以参与后验概率计算。预测变量的独立性检验结果见表3。

4.5 后验概率的计算及预测成果的表达

在完成前述工作的基础上,利用MRAS软件计算出每个网格单元成矿的后验概率。预测单元的后验几率Q计算公式如下:

表 2 研究区各预测变量证据权重值统计结果

Table 2 Weight of evidence statistical results of predictive variables in the area

预测变量	W^+	W^-	C	W^+ 方差	W^- 方差	C 值排序
地层	3.163 443	0.000 000	3.163 443	0.071 701	0.000 012	5
韧性剪切域	3.627 708	-1.922 866	5.550 574	0.083 840	0.500 011	1
脆性断束 50 m 缓冲区	4.005 541	-0.836 835	4.842 376	0.126 109	0.166 678	2
岩浆岩 150 m 缓冲区	1.674 045	-0.594 714	2.268 759	0.142 980	0.142 869	7
与 Au 有关的蚀变带	3.421 337	-0.327 094	3.748 431	0.251 237	0.100 011	4
Au 异常	1.866 123	-2.483 957	4.350 080	0.077 003	1.000 013	3
As 异常	1.299 868	-1.299 442	2.599 310	0.090 963	0.333 348	6
Sb 异常	1.182 161	-0.810 082	1.992 243	0.111 169	0.200 014	9
Ag 异常	1.168 861	-1.260 549	2.429 410	0.090 956	0.333 348	8

表 3 研究区各预测变量独立性检验结果

Table 3 Independence test results of predictive variables in the area

预测变量	地层	韧性剪 切域	脆性断束 50 m 缓冲区	岩浆岩 150 m 缓冲区	与 Au 有 关的蚀 变带	Au 异常	As 异常	Sb 异常	Ag 异常
地层	—								
韧性剪切域	-40.25 独立	—							
脆性断束 50 m 缓冲区	-34.55 独立	-30.20 独立	—						
岩浆岩 150 m 缓冲区	-15.58 独立	-20.94 独立	-12.81 独立	—					
与 Au 有关的蚀变带	-37.23 独立	-37.30 独立	-32.38 独立	-12.52 独立	—				
Au 异常	-37.11 独立	-43.73 独立	-56.12 独立	-40.98 独立	-18.59 独立	—			
As 异常	-36.82 独立	-35.25 独立	-29.49 独立	-37.91 独立	-27.72 独立	-9.16 独立	—		
Sb 异常	-43.77 独立	-53.54 独立	-49.74 独立	-34.05 独立	-29.33 独立	-18.82 独立	-19.80 独立	—	
Ag 异常	-38.82 独立	-35.34 独立	-21.08 独立	-16.02 独立	-14.72 独立	-19.54 独立	-10.75 独立	-15.30 独立	—

$$\ln(Q) = \ln \frac{N_{\text{含矿单元格数}}}{N_{\text{单元格总数}} - N_{\text{含矿单元格数}}} + \sum_{j=1}^n W_j^k,$$
$$(j = 1, 2, 3, \cdots, n)$$

其中: W_j^k 为第 j 个预测变量的权重, $W_j^k = (W_j^+, W_j^- \text{ 或 } 0)$ 。

后验概率: $P=Q/(1+Q)$ 。

本次预测计算出的后验概率最大值为0.999 997,最小值为 0。根据后验概率累积频率(图 3),区内的后验概率可分为 5 个区间,但是后验概率处于0.457~0.573之间的网格单元数量较少(图 4),且较为分散;经过对比,把该部分网格单元并入后验概率为0.573~0.871的预测网格单元,更有利于圈出合理的成矿远景区,因此,选择处于0.185~0.457、0.457~0.871和>0.871的 3 个后验概率值较大区间的预测网格单元作为预测区块。其中网格后验概率 $P>0.871$ 的为 A 级成矿远景区块,0.457< $P<0.871$ 的为 B 级成矿远景区块,0.185< $P<0.457$ 的为 C 级在矿远景区块。图 5 为用色块图表示的预测成果。

从老湾金矿带成矿预测后验概率色块(图 5)可以看出,已知金矿床或矿点多数落入 A 级或 B 级成矿远景区块,C 级成矿远景区块主要是在 A 级或 B 级成矿远景区块的周边,这与成矿区带从中心向边缘渐变的特征相吻合。

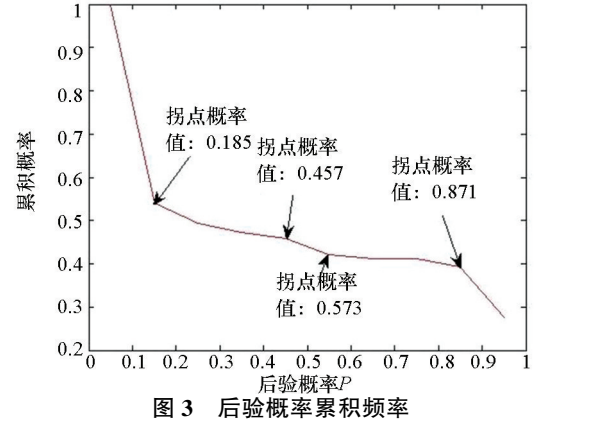


图 3 后验概率累积频率

Fig.3 Distribution of posterior probability's cumulative frequency

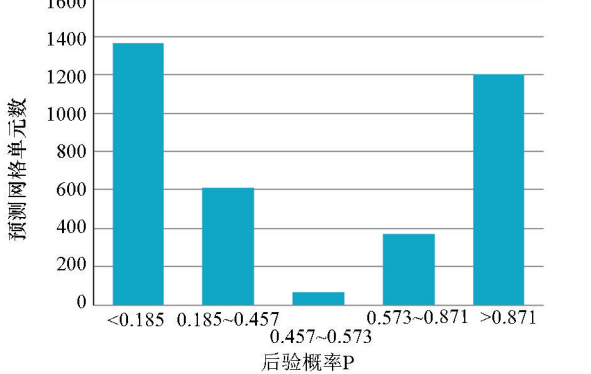


图 4 预测单元后验概率分布

Fig.4 Histogram of posterior probability distribution of prediction unit

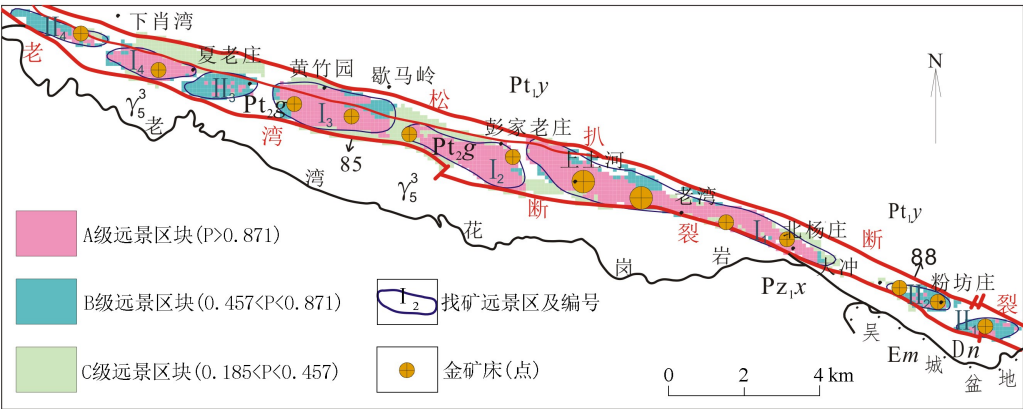


图 5 老湾地区金矿成矿预测

Fig.5 Metallogenic prognosis map of gold deposit in Laowan area

4.6 找矿远景区的圈定

根据预测网格分布区块特点及老湾地区金矿地质特征,本次预测圈出了 8 个找矿远景区(见表 4)。根据成矿远景区块后验概率平均值把找矿远景区划分成 I 级找矿远景区 4 处,Ⅱ级找矿远景区 4 处。

由图 5 和表 4 可知, I 级找矿远景区内后验概

率平均值较高,成矿地质条件较好,且 I 级找矿远景区内均已发现金矿床(点),具有较好的金矿找矿潜力,可优先安排勘查工作;Ⅱ级找矿远景区内后验概率平均值略低,成矿地质条件一般,且已发现金矿床点较少,或者无已发现现金矿床点,说明有一定找矿潜力,但是尚需更多的工作验证。

表 4 老湾地区金矿找矿远景区

Table 4 Prospecting target areas of gold in Laowan area

编号	后验概率最大值	后验概率平均值	面积/km ²	已发现矿床点数
I ₁	0.999997	0.860023	7.17	4
I ₂	0.999997	0.852098	2.79	2
I ₃	0.999997	0.876286	3.47	2
I ₄	0.999868	0.874190	1.47	1
Ⅱ ₁	0.996198	0.773105	0.80	1
Ⅱ ₂	0.99997	0.624653	0.96	2
Ⅱ ₃	0.999965	0.781311	1.24	0
Ⅱ ₄	0.997268	0.598727	1.22	1

5 结论

1) 研究分析了老湾地区金矿的控矿因素和成矿条件,确定了该区金矿化受地层、构造、岩浆岩、围岩蚀变和地球化学异常等多因素控制。

2) 提取构置了 9 个预测变量,分别为地层、韧性剪切带、脆性断束 50 m 缓冲区、岩浆岩 150 m 缓冲区、与 Au 有关的蚀变带以及 Au、As、Sb、Ag 1:5 万水系沉积物单元异常;基于证据权重模型,采用 MRAS 软件对老湾地区金矿进行了成矿预测,划分出 A、B、C 三级成矿远景区块,圈出 I 级找矿远景区 4 处,Ⅱ级找矿远景区 4 处。

3) 结合老湾地区金矿地质特征,综合分析后认为,圈出的找矿远景区中 I 级找矿远景区具有较好的金矿找矿潜力,特别是彭家老庄至北杨庄的 I₁

找矿远景区,后验概率平均值高,成矿地质条件好,面积大,已发现矿床点数多,是老湾地区今后金矿勘查的重点区域。

参考文献(References):

[1] 张璟,李守义,许山,等.基于 MRAS 证据权重法的辽西锦州——阜新金矿化带潜力评价[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(9):3565-3574.
Zhang J, Li S Y, Xu S, et al. Potential gold evaluation with weighting of evidence based on MRAS in Jinzhou-Fuxin gold metallogenic belt, western Liaoning Province, China [J]. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2012, 43(9): 3565-3574.

[2] 肖克炎,张晓华,王四龙,等.矿产资源 GIS 评价系统[M].北京:地质出版社,2000:21-30.
Xiao K Y, Zhang X H, Wang S L, et al. The system of MRAS for mineral resources integration assessment [M]. Benjing: Geological Publishing House, 2000:21-30.

[3] 姜德波,肖克炎,丁建华,等.矿产资源评价系统(MRAS)在全

国矿产资源潜力评价中的应用[J].地质通报,2010,29(11): 1677-1684.

Lou D B, Xiao K Y, Ding J H, et al. Application of MRAS in national mineral resource potential assessment [J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(11): 1677-1684.

[4] 吴传军,许德如,郭涛,等.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,2014,20(1):1-15.

Wu C J, Xu D R, Guo T, et al. Study on metallogenic prognosis for gold polymetallic deposits in Hainan island based on evidence weighting method [J]. Journal of Geomechanics, 2014, 20(1): 1-15.

[5] 孔旭,密文天,莫雄,等.基于 MRAS 证据权重法的湖南怀化地区金矿成矿预测[J].物探与化探,2016,40(3):467-474.

Kong X, Mi W T, Mo X, et al. Metallogenic prediction of gold deposits with weighting of evidence based on MRAS in Huaihua area, Hunan Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(3): 467-474.

[6] 田九玲.基于证据权模型的赤峰——呼伦贝尔成矿带找矿预测[J].金属矿山,2020(9):167-172.

Tian J L. Prospecting prediction of Chifeng-Hulunbeier metallogenic belt based on weight of evidence model [J]. Metal Mine, 2020 (9): 167-172.

[7] 姚志宏,孙鹏慧,刘长纯,等.基于 MRAS 的鞍山——本溪地区铁矿资源潜力分析[J].金属矿山,2014(1):84-87.

Yao Z H, Sun P H, Liu C C, et al. Analysis on the iron resource potential in Anshan-Benxi area based on MRAS [J]. Metal Mine, 2014(1): 84-87.

[8] 孔旭,密文天,辛杰,等.基于证据权重法的雪峰山中段金矿矿集区找矿远景预测[J].物探化探计算技术,2019,41(6):832-842.

Kong X, Mi W T, Xin J, et al. The gold metallogenic prognosis based on the weighting method of evidence in the middle Xuefeng mountain area [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 41(6): 832-842.

[9] 李晓翠,刘武生,贾立城,等.巴音戈壁盆地塔木素地区砂岩型铀矿预测及找矿方向[J].东华理工大学学报:自然科学版,2014,37(2):158-163.

Li X C, Liu W S, Jia L C, et al. Prognosis and prospecting direction of sandstone-type uranium deposit in Tamusu area, Bayingebi basin [J]. Journal of East China Institute of Technology: Nature Science, 2014, 37(2): 158-163.

[10] 李建国,肖克炎,李永顺,等.基于 GIS 和证据权重法的那仁宝力格地区铜多金属矿成矿预测[J].吉林大学学报:地球科学版,2013,43(4):1151-1158.

Li J G, Xiao K Y, Li Y S, et al. Metallogenic prognosis of copper polymetallic mineral resources in Narenbaolige area on basis of weights of evidence method and GIS [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2013, 43(4): 1151-1158.

[11] 谢巧勤,徐晓春,岳书仓.河南桐柏老湾金矿床氢氧氮同位素地球化学及成矿流体来源[J].地质科学,2001,36(1):36-42.

Xie Q Q, Xu X C, Yue S C. Isotopic geochemistry of hydrogen, oxygen and helium, and ore-forming fluid sources of Laowan gold deposit in Tongbai, Henan Province [J]. Chinese Journal of Geology, 2001, 36(1): 36-42.

[12] 张宗恒,方国松,侯海燕,等.河南桐柏老湾金矿床地质特征及成因探讨[J].黄金地质,2002,8(3):20-26.

Zhang Z H, Fang G S, Hou H Y, et al. Geological features and genesis of the Laowan gold deposit in the Tongbai region, Henan [J]. Gold Geology, 2002, 8(3): 20-26.

[13] 刘文灿,杜建国,张达,等.北淮阳构造带老湾金矿区构造与成矿作用的关系[J].现代地质,2003,17(1):8-13.

Liu W C, Du J G, Zhang D, et al. The relationship between structures and mineralization of Laowan gold minning area in Northern Huaiyang tectonic belt [J]. Geoscience, 2003, 17(1): 8-13.

[14] 陈良,戴立军,王铁军,等.河南省老湾金矿床地球化学特征及矿床成因[J].现代地质,2009,23(2):277-284.

Chen L, Dai L J, Wang T J, et al. Geochemical characteristics and genesis of the Laowan gold deposit in Henan Province [J]. Geoscience, 2009, 23(2): 277-284.

[15] 陈建立.桐柏老湾金矿带成矿构造体系演化研究及其地质意义[J].地质找矿论丛,2019,34(1):36-46.

Chen J L. The study on the evolution of metallogenic tectonic system and its significance of Laowan gold metallogenic belt in Tongbai county [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2019, 34(1): 36-46.

[16] 陈建立.老湾花岗岩体与金成矿关系新认识及其找矿意义[J].地质找矿论丛,2018,33(3):351-359.

Chen J L. New understanding of the Laowan granite body-Au mineralization relation and the significance to ore-search breakthrough [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2018, 33(3): 351-359.

[17] 杨梅珍,付晶晶,王世峰,等.桐柏山老湾金矿带右行走滑断裂控矿体系的构建及其意义[J].大地构造与成矿学,2014,38(1):94-107.

Yang M Z, Fu J J, Wang S F, et al. Establishment and significance of dextral strike-slip fault ore-controlling system of the Laowan gold belt, Tongbai mountains [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2014, 38(1): 94-107.

[18] 刘翼飞,江思宏,方东会,等.河南桐柏老湾花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J].岩石矿物学杂志,2008,27(6):519-523.

Liu Y F, Jiang S H, Fang D H, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of Laowan granite in Tongbai area, Henan Province, and its geological implications [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2008, 27(6): 519-523.

[19] 陈建立,郭鹏,魏从玲,等.桐柏地区金银多金属矿集区找矿前景预测报告[R].河南省地质矿产勘查开发局第一地质勘查院,2017.

Chen J L, Guo P, Wei C L, et al. The prediction and research report of prospecting potential in gold silver polymetallic ore concentration area, Tongbai [R]. The First Geological Exploration Institute of Henan Provincial Bureau of Geo-exploration and Mineral Development, 2017.

[20] 张宏飞,张利,高山,等.桐柏地区变质杂岩和侵入岩类 Pb 同位素组成特征及其地质意义[J].地球科学:中国地质大学学报,1999,24(3):269-273.

Zhang H F, Zhang L, Gao S, et al. Pb isotopic compositions of metamorphic rocks and intrusive rocks in Tongbai region and their geological implication [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 1999, 24(3): 269-273.

[21] 杨梅珍,陆建培,付静静,等.桐柏山老湾金矿带与燕山期岩浆作用有关的岩浆热液金多金属矿床成矿作用——来自地球化学、年代学证据及控矿构造地质约束[J].矿床地质,2014,33(3):651-666.

Yang M Z, Lu J P, Fu J J, et al. Magmatic hydrothermal gold and polymetallic metallogenesis related to Yanshanian magmatism of

- Laowan gold belt, Tongbai Mountain; Evidence from geochemistry, geochronology and ore-controlling structural geological constraints [J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33(3): 651–666.
- [22] 马成玉, 王洪恩. 老湾花岗岩及成矿物质与岩浆岩的同源性研究[J]. *现代矿业*, 2012(10): 54–55, 85.
- Ma C Y, Wang H E. The research of homology of Laowan granite, metallogenic material and magmatic rock [J]. *Morden Mining*, 2012(10): 54–55, 85.
- [23] 谢巧勤, 潘成荣, 徐晓春, 等. 河南老湾金矿床流体包裹体及稀土元素地球化学研究[J]. *合肥工业大学学报: 自然科学版*, 2003, 26(1): 47–52.
- Xie Q Q, Pan C R, Xu X C, et al. Geochemistry of fluid inclusions and rare earth elements from Lanwan gold deposit in Henan Province [J]. *Journal of Hefei University of Technology: Nature Science Edition*, 2003, 26(1): 47–52.
- [24] 滕浪, 陈建立, 陈守余. 北秦岭老湾金矿带变质岩原岩恢复及其形成过程[J]. *地质找矿论丛*, 2019, 34(3): 406–415.
- Teng L, Chen J L, Chen S Y. Restoration and formation process of metamorphic rocks in the Laowan gold ore belt, North Qinling [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2019, 34(3): 406–415.
- [25] 陈建立, 郭鹏, 陈英男, 等. 豫西南老湾金矿原生晕地球化学特征及深部成矿预测[J]. *金属矿山*, 2019(7): 124–134.
- Chen J L, Guo P, Chen Y N, et al. Geochemical characteristics of primary halo and deep metallogenic prediction of Laowan gold deposit in Southwestern Henan Province [J]. *Metal Mine*, 2019(7): 124–134.
- [26] 薛顺荣, 肖克炎, 丁建华. 基于 MRAS 的证据权重法在香格里拉地区的综合信息成矿预测[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2008, 38(5): 738–744.
- Xue S R, Xiao K Y, Ding J H. Multi-source information metallogenic prognosis with weighting of evidence based on MRAS in Shangri-La [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2008, 38(5): 738–744.
- [27] 王长兵. 基于 GIS 的呼伦贝尔白井山地区铅锌矿综合信息预测[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- Wang C B. Synthetic information prediction of lead-zinc deposit in Baijingshan area of Hulun Buir based on GIS [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [28] 陈建立, 陈金铎, 魏从玲, 等. 河南省桐柏县老湾金矿深部及外围普查报告[R]. 河南省地质矿产勘查开发局第一地质勘查院, 2020.
- Chen J L, Chen J D, Wei C L, et al. Deep and external prospecting report on the Laowan gold deposit in Tongbai County, Henan Province [R]. The First Geological Exploration Institute of Henan Provincial Bureau of Geo-exploration and Mineral Development, 2020.
- [29] 李惠, 张国义, 禹斌, 等. 构造叠加晕法是危机金矿山寻找接替资源的有效新方法[J]. *矿产与地质*, 2005, 19(6): 683–687.
- Li H, Zhang G Y, Yu B, et al. Method of structural overprinting geochemical halo, a new and effective approach to prospecting for succeeding resources in gold deposits with resources crisis [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2005, 19(6): 683–687.
- [30] 邓勇, 邱瑞山, 罗鑫. 基于证据权重法的成矿预测——以广东省钨锡矿的成矿预测为例[J]. *地质通报*, 2007, 26(9): 1228–1234.
- Deng Y, Qiu R S, Luo X. Minerogenetic prediction based on the weight-of-evidence approach: A case study of the prediction of tungsten and tin deposits in Guangdong, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(9): 1228–1234.
- [31] 李新中, 赵鹏大, 肖克炎, 等. 矿床统计预测单元划分的方法与程序[J]. *矿床地质*, 1998, 17(4): 369–375.
- Li X Z, Zhao P D, Xiao K Y, et al. The method and program for the unit partition in the statistical prediction of mineral deposits [J]. *Mineral Deposits*, 1998, 17(4): 369–375.

Metallogenic prediction of gold deposits in Laowan area, Henan Province using the weight of evidence model and MRAS

WEI Cong-Ling, CHEN Jian-Li, GUO Peng

(No. 1 Geology and Mineral Resources Survey Institute, Henan Bureau of Geology and Mineral Development, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The Laowan area in Henan Province is an important gold minerogenetic area in the Tongbai-Dabie noble nonferrous metal metallogenic belt. Based on the comprehensive analysis of the metallogenic factors of the area, the authors extracted and established nine predictive variables, i.e., strata, ductile shear zones, brittle fault zones, magmatic rocks, gold-related alteration zones, and single-element anomalies of gold, arsenic, antimony, and silver in stream sediments. Then, the authors predicted metallogenic prospect areas of gold in this area using the weight of evidence model and the MRAS software. Grid cells with a size of 0.10 km×0.10 km were used for prediction, and they were divided into classes A, B, and C in terms of prospecting prediction through the prior probability calculation, weight statistics, independence tests, and posterior probability calculation of each prediction variable. Based on the distribution characteristics of various classes of prediction grid cells and the geological characteristics of gold deposits in the study area, this study delineated four first- and four second-order prospecting target areas. According to comprehensive analysis, most of the known gold deposits or gold ore occurrences fall into the prediction blocks of classes A and B and the prediction blocks of class C lie around the prediction blocks of classes A or B. This analytical result is consistent with the gradual changes of the metallogenic belt from the center to the edges. Gold deposits or ore occurrences have been discovered in all the delineated first-order prospecting target areas, and the posterior probabilities have a high average. Therefore, first-order prospecting target areas have great gold prospecting potential.

Key words: MRAS; weight of evidence model; gold deposit; metallogenic prediction; Laowan area, Henan Province

(本文编辑: 蒋实)