

# 基于GIS的证据权重法在成矿预测中的应用 ——以甘肃省岷县—礼县地区的金矿预测为例

黄海峰, 姚书振, 丁振举

(中国地质大学资源学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 在深入了解甘肃省岷县—礼县地区金矿成矿特征的基础上, 以地理信息系统(GIS)为平台, 对该区进行成矿分析后认为中泥盆统李坝群、中泥盆统西汉水组和中石炭统下加岭组为成矿的有利地层组合; 金矿床(点)多出现于花岗岩体外接触带距岩体边缘0.5~5.0 km范围内的黑云母化蚀变带中; 半径为1.61 km的断层影响带为最佳的有利成矿的断层影响范围;  $Au-Ag-Sb-Pb$ 为成矿的有利地球化学元素异常组合。利用GIS的空间分析功能, 分别提取了上述各成矿有利因素, 进而建立了证据权重模型, 选择了地层、岩体、断裂、化探等11个证据因子。在此基础上, 根据该区成矿概率的分布进行了成矿远景区的预测, 共圈出了7个成矿远景区: I. 中川岩体北侧; II. 中川岩体东侧以及中川岩体与碌碁坝岩体所夹区域; III. 闫井岩体南侧; IV. 教场坝岩体南侧; V. 碌碁坝岩体西侧; VI. 教场坝岩体东侧; VII. 柏家庄岩体南侧。其中前4个远景区覆盖了几乎所有的已知金矿床(点), 而后3个远景区目前还未发现金矿床(点), 预测结果对于该区的进一步找矿具有一定的指导意义。

**关键词:** 证据权重法; GIS; 成矿预测; 金矿; 甘肃岷县—礼县地区

**中图分类号:** P618.01

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7849(2003)03-0077-06

成矿预测的基本目的是能够预测未发现矿床的位置, 并大体知道这些矿床的基本类型、规模和品位<sup>[1]</sup>。80年代发展起来的地理信息系统(GIS), 是以采集、存储、管理、分析和描述整个或部分地球表面(包括大气层在内)与空间和地理分布有关数据的空间信息系统。地理信息系统的主要作用是对空间信息进行采集、存储、管理、查询、分析、显示和制图等处理。在计算机系统的支持下, GIS对复杂的地理系统可以快速、精确、综合地进行空间定位和过程分析。地理信息系统技术以其高水平的数据管理、强大的空间分析及高质量高效率的成图技术等优点, 为信息找矿提供了一个有利的工具, 极大地提高了找矿预测的工作效率<sup>[2~5]</sup>。

## 1 证据权重法简介

证据权重法(evidence weight method)采用统计分析模式, 通过对一些与矿产形成相关的地质信息的叠加复合分析来进行矿产远景区的预测。其中的每一种地质信息都被视为成矿远景区预测的一个证据因子, 而每一个证据因子对成矿预测的贡献则

是由这个因子的权重值来确定的<sup>[3]</sup>。其基本原理如下。

假设研究区被划分成面积相等的 $T$ 个单元, 其中有 $D$ 个单元为有矿单元,  $\bar{D}$ 个单元为无矿单元,  $D$ 对于任意一个证据因子, 其权重定义为:

$$w^+ = \ln \left\{ \frac{P(B/D)}{P(B/\bar{D})} \right\} \quad (1)$$

$$w^- = \ln \left\{ \frac{P(\bar{B}/D)}{P(\bar{B}/\bar{D})} \right\} \quad (2)$$

式中:  $w^+$ 和 $w^-$ 分别为证据因子存在区和不存在区的权重值, 对于原始数据缺失区域, 其权重值为0;  $B$ 为证据因子存在区的单元数;  $\bar{B}$ 为证据因子不存在区的单元数。

证据权重法要求各证据因子之间相对于矿点分布满足条件独立。对于 $N$ 个证据因子, 若它们都满足矿点条件独立, 则研究区任一 $k$ 单元为矿点的可能性, 即后验几率以 $Q$ 表示:

$$\ln(Q) = B + \sum_{j=1}^n w_j^k \quad (j=1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

后验概率 $P$ 为:

$$P = Q / (1 + Q) \quad (4)$$

式中:  $B$ 为基值, 且 $B = \ln \left( \frac{D}{T-D} \right)$ ;  $w_j^k$ 为第 $j$ 个证据

因子的权重, 其中:

$$w_j^k = \begin{cases} w_j^+ & \text{证据因子 } j \text{ 存在} \\ w_j^- & \text{证据因子 } j \text{ 不存在} \\ 0 & \text{数据缺失} \end{cases}$$

用  $C = w^+ - w^-$  表示证据因子与矿床(点)出现的相关程度。最后, 根据后验概率值划分找矿远景区<sup>[7]</sup>。由以上分析可以看出, 证据权重法立足于数据的空间位置关系, 并要求对多源地学信息进行叠加复合分析, 因此证据权重法与 GIS 技术的结合是必然的。

## 2 数据的组织和模型的建立

### 2.1 数据的组织

以甘肃省南部岷县—礼县地区的李坝式微细浸染型金矿床的预测为例(图 1)来阐述基于 GIS 的证

据权重法在矿产预测中的应用。

前人对该区金矿床的研究始于 20 世纪 80 年代末, 相继发现了李坝、金山和马泉等大中型金矿床。随着研究程度的提高, 基本摸清了该区的成矿规律, 并建立了该区李坝式微细浸染型金矿床的矿床预测模型(包括地质模型和物化探模型)<sup>[8,9]</sup>。

对岷县—礼县地区金矿控矿因素的分析后认为<sup>[8,9]</sup>, 该地区金成矿的主要控矿因素取决于: 有利的地层组合(依找矿前景由大到小依次为中泥盆统李坝群  $D_{2lb}$ 、中泥盆统西汉水组  $D_{2x}$ 、中石炭统  $C_2$ ); 岩体的外接触带(花岗岩体外接触带距岩体边缘 0.5~5.0 km 范围内的黑云母化蚀变带中);

有利的断裂发育地段; 有利的地球化学异常(与金矿化相关的元素有 Au、As、Ag、Sb 和 Pb, 其中 Au 和 As 的关系最为密切)。

用于研究区的成矿分析、建立预测模型和预测

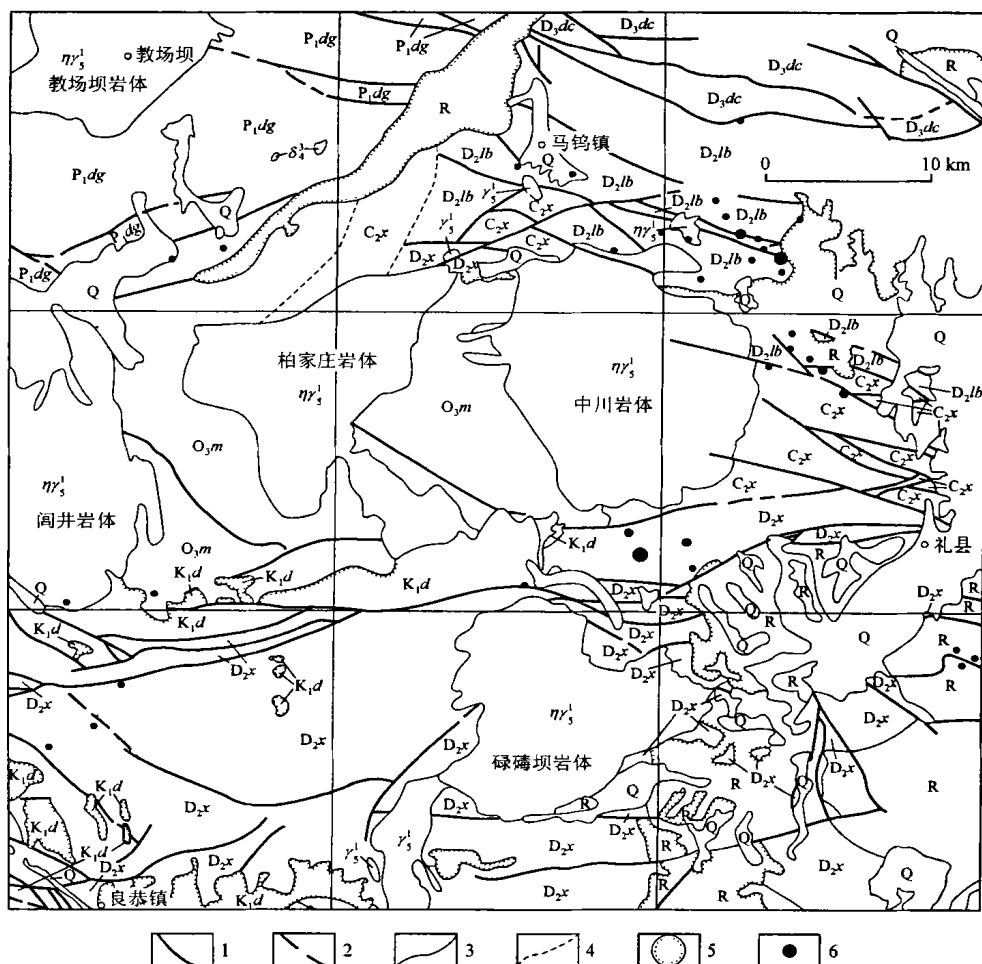


图 1 甘肃省岷县—礼县地区的地质矿产图(据甘肃省有色地质勘查局地勘院资料, 2000)

Fig. 1 Schematic geological and mineral map in Mian County and Li County region, Gansu Province

Q. 第四系; R. 第三系;  $K_{1d}$ . 下白垩统东河群;  $P_{1dg}$ . 下二叠统大关山组;  $C_{2x}$ . 中石炭统下加岭组;  $D_{3dc}$ . 上泥盆统大草滩组;  $D_{2x}$ . 中泥盆统西汉水组;  $D_{2lb}$ . 中泥盆统李坝群;  $O_{3m}$ . 上奥陶统麻川组;  $\gamma_5$ . 花岗岩;  $\eta\gamma_5$ . 二长花岗岩;  $\delta_1$ . 闪长岩。1. 断层; 2. 推测断层; 3. 地层界线; 4. 推测地层界线; 5. 不整合线; 6. 金矿床(点)

该区金矿远景区的数据包括 1:20 万地质图、1:20 万矿产图、1:20 万地球化学数据等基础图件和数据。以上图件和数据均以 GIS 为平台, 统一了坐标系统和比例尺, 并建立了各图件在分析过程中必需的属性数据库。针对以上找矿模型, 为充分利用 GIS 的空间分析功能, 需从基础图件中提取可应用于预测的各种专题图件, 具体包括以下 GIS 文件: 金矿床(点)(点文件)、地层(面文件)、岩体(面文件)和断层(线文件)。

2.2 证据因子的选择

2.2.1 有利的地层组合证据层

为确定有利的地层组合, 对金矿床(点)和地层文件作相交分析后加以统计(图 2), 并进行了含矿地层找矿有利度<sup>[10~12]</sup>的分析(表 1)。

从图 2 和表 1 中看出, 单位矿产当量以地层 D<sub>2x</sub> 和 D<sub>2lb</sub> 最为显著, C<sub>2x</sub> 也值得关注。这与该区主要含矿层位是以中泥盆统地层为主相吻合。故从地层面文件中提取出 D<sub>2x</sub>、D<sub>2lb</sub> 和 C<sub>2x</sub> 地层组合作为 GIS 预测的有利地层组合证据层(图 3), 这与前面提及的找矿模型中的有利地层组合也正好一致。

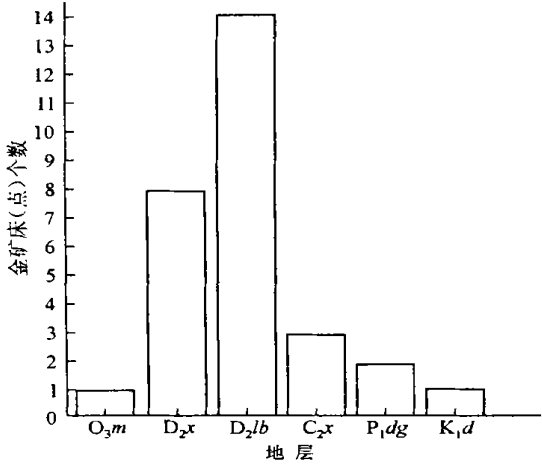


图 2 甘肃省岷县—礼县地区地层中金矿床(点)分布统计直方图  
Fig. 2 Statistical histogram of gold deposits in strata of M in County and Li County region, Gansu Province

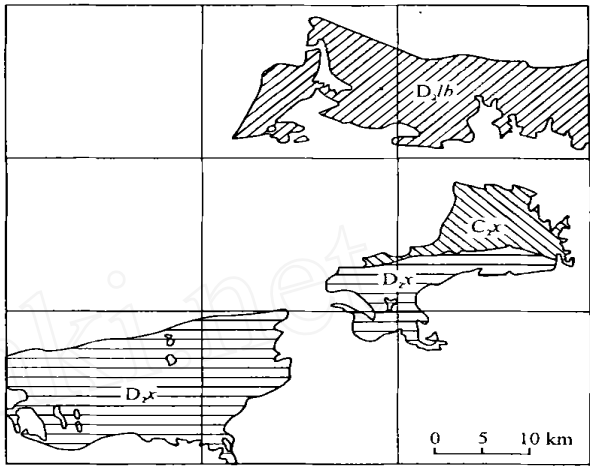


图 3 甘肃省岷县—礼县地区有利的地层组合证据层  
Fig. 3 Layer of evidence about combination of beneficial strata of M in County and Li County region, Gansu Province

2.2.2 岩体的外接触带证据层

根据以上分析, 李坝式金矿床(点)多出现于花岗岩体外接触带距岩体边缘 0.5~5.0 km 以内的黑云母化蚀变带中。故在岩体面文件中, 设岩体缓冲区的半径分别为 0.5 km 和 5.0 km, 对岩体进行缓冲区分析后得到两个区域, 再用后一个区域减去前一个区域, 得到的就是距岩体边缘 0.5~5.0 km 的区域。将此区域作为 GIS 预测的岩体外接触带证据层(图 4)。从图 4 可以看出, 所有的大、中、小型金矿床和大多数金矿(化)点均落在岩体的缓冲区中, 可见这一区域的设置还是较为合理的。

2.2.3 有利的断层影响带证据层

前人的研究表明, 该区的断裂构造对金矿床(点)的形成起着很重要的作用, 断裂密集带是形成具有一定规模矿体必不可少的条件<sup>[9]</sup>。为确定最佳的断层影响带, 将金矿床(点)和断层文件作相交分析并统计金矿床(点)到断层的距离(图 5)。由图 5 可见, 假如将断层影响带的半径确定为 2.78 km, 则包含了 97% 的金矿床(点), 但同时应注意到在每个距

表 1 甘肃省岷县—礼县地区含矿地层找矿有利度分析

Table 1 Beneficial degree of strata with gold deposits of M in County and Li County region, Gansu Province								
地层	金矿床(点)个数					地层面积/km <sup>2</sup>	矿产当量/个	单位矿产当量/(个·km <sup>-2</sup> )
	大矿	中矿	小矿	金矿点	总数			
K <sub>1d</sub>	0	0	0	1	1	135.12	1	0.0074
P <sub>1dg</sub>	0	0	0	2	2	323.70	2	0.0062
C <sub>2x</sub>	0	0	2	1	3	164.74	11	0.0668
D <sub>2lb</sub>	0	1	1	12	14	331.44	42	0.1267
D <sub>2x</sub>	1	0	2	5	8	767.34	132	0.1720
O <sub>3m</sub>	0	0	0	1	1	320.89	1	0.0031

注: 在矿产当量的计算中, 大、中、小型金矿床相应的权系数分别取 125、25 和 5

离分段中, 金矿床(点)出现频率高(4 个以上)的区域集中在距离断层 1. 61 km 以内。所以为了确定最优的断层影响带半径, 还需要分别以 2. 78 km 和 1. 61 km 为半径作断层的缓冲区, 对其进行找矿有利度的分析(表 2)。从表 2 中可以看出, 以 2. 78 km 和 1. 61 km 作为缓冲区的半径, 其面积分别为 2 849. 24 km<sup>2</sup> 和 1 967. 37 km<sup>2</sup>, 前者是后者的 1. 448 倍, 但在两范

围内产出的金矿床(点)数几乎没有差别。这充分体现在两者之间单位矿产当量( $N_0$ )的差异上, 前者的  $N_0 = 0. 071$  个/km<sup>2</sup>, 后者的  $N_0 = 0. 102$  个/km<sup>2</sup>。据此, 选择半径为 1. 61 km 的断层影响带作为 GIS 预测的证据层(图 6)。

2. 2. 4 Au、As、Ag、Sb 和 Pb 地球化学异常证据层  
对于地球化学资料, 根据前人的研究成果以及笔

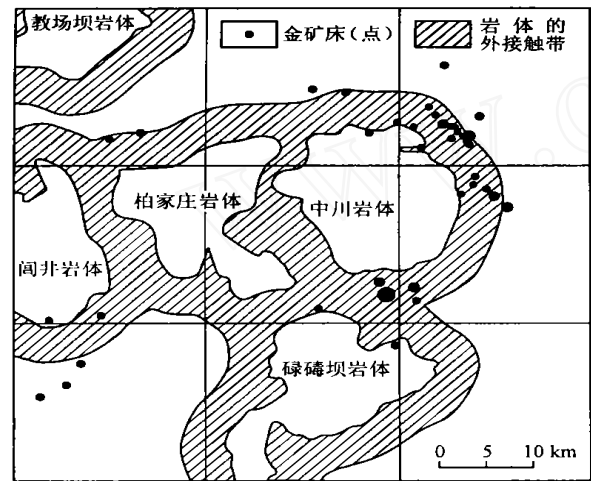


图 4 甘肃省岷县—礼县地区岩体的外接触带证据层

Fig 4 Layer of evidence about the outer adjacent belt of terrane of M in County and Li County region, Gansu Province

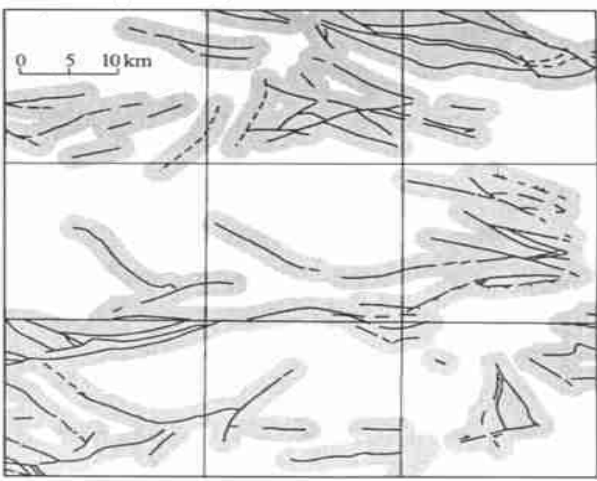


图 6 甘肃省岷县—礼县地区有利的断层影响带证据层

Fig 6 Layer of evidence about beneficial belt of fault of M in County and Li County region, Gansu Province

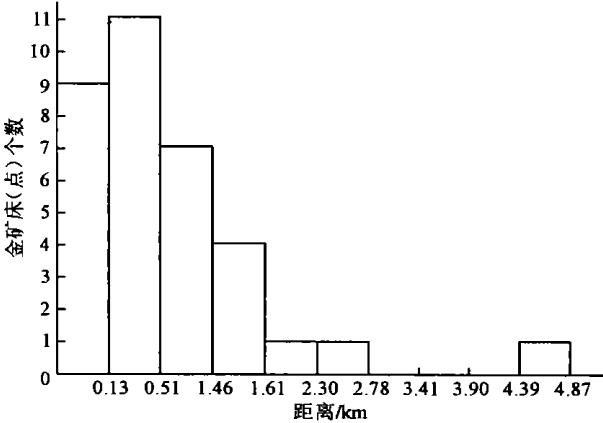


图 5 甘肃省岷县—礼县地区金矿床(点)与断层间的距离统计直方图

Fig 5 Statistical histogram of the distance from gold ore-deposits to fault of M in County and Li County region, Gansu Province

者对收集到的化探资料的统计分析, 提取了 Au、As、Ag、Sb、Pb 等 5 种元素的地球化学异常图, 分别作为 5 个地球化学异常证据层。

2. 3 模型的建立

将研究区划分为 30 × 30 = 900 个单元(每个单元为 2 km × 2 km)的网格, 在每个网格中提取证据因子, 具体方法如下。

(1) 分别对前述的证据层进行二元模式识别, 并保存为属性数据, 即存在的区域取为 1, 不存在的区域取为 0。例如对于岩体的外接触带证据层, 位于证据层中的为 1, 而不在证据层中的则为 0。

(2) 对于已经处理好的各证据层, 分别与网格文件进行相交分析, 以便将各证据因子的属性值存入到各网格中。

表 2 甘肃省岷县—礼县地区断层影响带的找矿有利度分析

Table 2 Beneficial degree of buffer zone of fault of M in County and Li County region, Gansu Province

断层影响带的半径 $r/\text{km}$	金矿床(点)个数					矿产当量/个	断层影响带总面积/ $\text{km}^2$	单位矿产当量/ (个 · $\text{km}^{-2}$ )
	大矿	中矿	小矿	金矿点	总数			
2. 78	1	1	5	27	34	202	2 849. 24	0. 071
1. 61	1	1	5	25	32	200	1 967. 37	0. 102

注: 在矿产当量计算中, 大、中、小型金矿床相应的权系数分别取 125, 25, 5

(3) 将金矿床(点)文件与网格文件作相交分析, 将网格中是否存在矿床(点)的取值(存在取1, 不存在取0)存入到网格属性中。

(4) 直接将诸如断层、地层等文件与网格文件作相交分析, 以便提取一些具有直观意义的证据因子, 如断层条数、地层组合数等。

(5) 提取完证据因子后, 就可以分别计算各证据因子与成矿的相关程度, 预测评价证据权值(表3), 并以此计算研究区内各个单元的成矿有利度。

表3 甘肃省岷县—礼县地区各证据因子权值参数表

Table 3 Weight parameters of evidence factors of M in County and Li County region, Gansu Province

证据因子编号	证据因子的地质意义	$w^+$	$w^-$	$C$
L1	有利的地层组合	0.842	-1.215	2.057
L2	有利的岩体外接触带	0.558	-1.023	1.581
L3	断层条数	0.719	-1.299	2.018
L4	断层平均方位	0.169	-0.037	0.206
L5	断层中心对称度	0.860	-0.389	1.249
L6	有利的断层影响带	0.620	-1.581	2.201
L7	Au异常	0.771	-1.532	2.303
L8	As异常	0.710	-0.901	1.611
L9	Ag异常	0.164	-0.418	0.582
L10	Sb异常	0.343	-0.129	0.472
L11	Pb异常	0.242	-0.101	0.343

以上分析结果显示, 该区各证据因子对金矿化指示的作用由大到小依次为: L7 L6 L1 L3 L8 L2 L5 L9 L10 L11 L4。对结果进行进一步分析可以得出以下几个基本认识: 断裂在该区的金成矿过程中扮演着很重要的角色; 金矿的赋矿层位多集中在中泥盆统地层中; 该区的中川、碌碡坝、柏家庄、教场坝和间井5大花岗岩体对金成矿起着显著的作用; 在Au、As、Ag、Sb和Pb5个地球化学异常证据因子中, Au和As元素异常与金矿化的关系比较密切, 其它元素异常与金成矿的相关性较小。

### 3 预测结果及评价

在建立了研究区的证据权重模型后, 就可以计算各个预测单元的成矿有利度(以成矿的后验概率值来代替)。为了圈定成矿远景区, 首先需要确定整个预测评价范围内的临界值, 后验概率值大于临界值的地区, 即为预测的找矿远景区<sup>[13]</sup>。根据该区内不同成矿单元的有利成矿后验概率值大小的不同及其分布, 结合做证据权重值的单元频数曲线求拐点的方法, 将该区成矿预测证据权的临界值确定为0.40。故后验概率值大于0.40的地区即为找矿远景区, 据此做出该区的金成矿预测图(图7)。

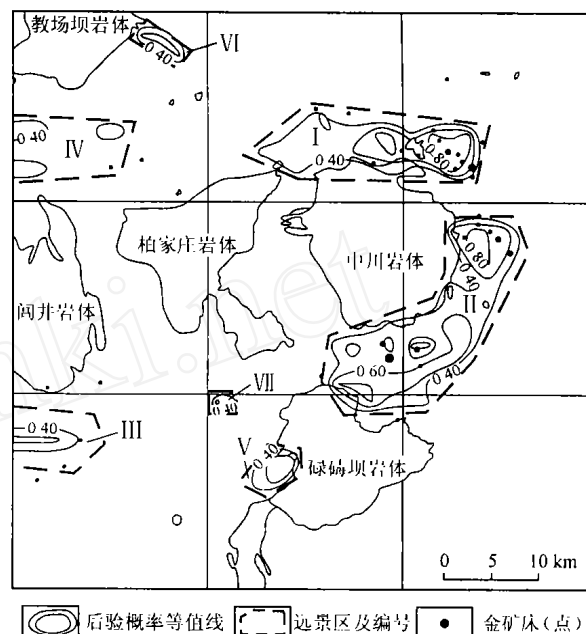


图7 甘肃省岷县—礼县地区金成矿预测图

Fig. 7 Gold prognosis map of M in County and Li County region, Gansu Province

从图7可看出, 预测结果所圈出的7个成矿远景区如下: I. 中川岩体北侧; II. 中川岩体东侧以及中川岩体与碌碡坝岩体所夹区域; III. 间井岩体南侧; IV. 教场坝岩体南侧; V. 碌碡坝岩体西侧; VI. 教场坝岩体东侧; VII. 柏家庄岩体南侧。

根据以上的预测结果认为, 预测远景区I, II, III和IV覆盖了几乎所有的已知金矿床(点), 说明预测结果对已知条件基本上未出现漏判; 在预测图7中, 远景区V, VI和VII目前还未发现金矿床(点), 对于这一点更值得关注。笔者认为将V和VI两处划为远景区, 主要是因为这两处均位于该区的Au、As、Ag等元素异常(L7、L8和L9)范围内, 同时V和VI还处于有利的岩体外接触带(L2)内。对于远景区VII, 由于其位于礼县—白云—山阳深大断裂带的南部分支礼县—洮坪—隈子坝断裂带上(L6), 并处在柏家庄和碌碡坝两大岩体外接触带的交叉重合部位(L2), 加之其有利的地层组合D<sub>2x</sub>(L1), 才将其划归为远景区。通过前面对证据因子的排序可知, L1、L2、L6、L7、L8和L9都是对金矿化起着最重要指示作用的因子, 所以上述3个区域均被划为成矿远景区。

### 4 小结

(1) 预测结果共圈出7个成矿远景区, 其中4个

远景区覆盖了几乎所有的已知金矿床(点),而另有3个远景区目前还未发现金矿床(点)。分析表明,预测是成功的,得出的结论也是可靠的,对于该区的进一步找矿具有一定的指导意义。

(2)在GIS的支持下,将证据权重法应用于成矿预测,对多来源、多尺度的不同信息可以进行快速、有效的综合处理与分析。由于GIS可以直接对图形进行各种操作,极大地提高了处理速度,并可以尽量减少人为操作的失误,使预测结果更客观。

(3)由于证据权重法的数据是基于二元模式的,使得在统计研究区成矿的先验概率时,只能考虑单元内是否存在矿床(点),而无法考虑单元内所发育矿床(点)的规模,从而削弱了大规模矿床的作用。同样,在统计单元中无论各个证据因子存在与否都无法考虑其规模,从而削弱了该证据因子的作用。

#### 参考文献:

- [1] 翟裕生,邓军,崔彬,等.成矿系统及综合地质异常[J].现代地质,1999,13(1):99-104
- [2] 朱创业.地理信息系统在矿产预测中的应用[J].成都大学学报(自然科学版),1999,18(4):36-38
- [3] Raper J F, Maguire D J. Design models and functionality in GIS[J]. *Computers & Geosciences*, 1992, 18(4): 387-394
- [4] A sadi H H, Hale M. A predictive GIS model for mapping potential gold and base metal mineralization in Takab area, Iran [J]. *Computers & Geosciences*, 2001, 27(8): 901-912
- [5] Bonham-Carter G F, Agterberg F P. Integration of geological data sets for gold exploration in Nova Scotia [J]. *Photogrammetric Engineer and Remote Sensing*, 1998, 54(1): 1585-1592
- [6] 苏红旗,葛艳,刘冬林,等.基于GIS的证据权重法矿产预测系统(EWM)[J].地质与勘探,1999,35(1):44-46
- [7] 肖克炎,张晓华,陈郑辉,等.成矿预测中证据权重法与信息量法及其比较[J].物探化探计算技术,1999,21(3):223-226
- [8] 高珍权,陈友让,王怀远.礼县李坝金矿找矿模型研究[J].甘肃地质学报,1997,6(增刊):50-54
- [9] 柳森.李坝式金矿的找矿标志及找矿方法[J].甘肃地质学报,1994,3(1):79-89
- [10] 池顺都,周顺平,吴新林. GIS 支持下的地质异常分析及金属矿产经验预测[J].地球科学——中国地质大学学报,1997,22(1):99-103
- [11] 池顺都,吴新林.云南元江地区铜矿GIS预测时的找矿有利度和空间相关性分析[J].地球科学——中国地质大学学报,1998,23(1):75-78
- [12] 池顺都,赵鹏大.应用GIS圈定找矿可行地段和有利地段[J].地球科学——中国地质大学学报,1998,23(2):125-128
- [13] 张晓军,张均,秦举礼,等.川西北金矿的证据权重模型及其预测应用[J].高校地质学报,2000,6(4):554-560

## APPLICATION OF GIS-BASED EVIDENCE WEIGHT METHOD FOR MINEROGENETIC PREDICTION: A CASE STUDY ON PREDICTION OF GOLD DEPOSIT IN MIN COUNTY AND LICO COUNTY REGION, GANSU PROVINCE

HUANG Hai-feng, YAO Shu-zhen, DING Zhen-ju

(Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** Based on the comprehensive analysis of gold mineralization in Min County and Lico County region, Gansu Province, with GIS as the platform, we have come to the following conclusions: Liba Group and Xihanshui Formation of Middle Devonian and Xiajialing Formation of Middle Carboniferous are the combination of beneficial strata, with the gold deposits mostly located in biotite zone of outer contact aureole of terranes where the distance is about 0.5~5.0 km; the radius of beneficial belt of fault is 1.61 km; Au-Ag-Sb-Pb is beneficial anomaly of chemical element combination. Using the spatial analysis of GIS, we have built the evidence weight model and chosen 11 evidence factors, including strata, terrane, fault, geochemical anomalies of Au, As, Ag, Sb, Pb and so on. Finally, we have predicted favourable areas according to the ore formation probability values. The prediction shows 7 mineralogenetic prospective areas. I. North of Zhongchuan terrane; II. East of Zhongchuan terrane and the interspace of Zhongchuan and Luzhouba terrane; III. South of Lujing terrane; IV. South of Jiaochangba terrane; V. West of Luzhouba terrane; VI. East of Jiaochangba terrane; VII. South of Baijiazhuang terrane. In these areas, I, II, III and IV areas have covered all known gold deposits and V, VI and VII have not yielded gold deposits, which should be specially emphasized. The conclusion of prediction has some indication for further ore-finding of this area.

**Key words:** evidence weight method; GIS; mineralogenetic prediction; gold deposit; Min County and Lico County region, Gansu Province