

文章编号: 1009-3850(2007)02-0106-07

基于 GIS 的证据权法在三江北段铜多金属 成矿预测中的应用

张启明¹, 陈建平², 齐先茂¹

(1. 成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082; 2. 中国地质大学, 北京 100083)

摘要: 在建立三江北段地质矿产空间数据库的基础上, 运用 GIS 技术, 分析提取矿产地质、地球物理、地球化学等综合信息中的成矿异常信息, 运用多学科信息综合研究地质异常与成矿之间的相互关系, 运用证据权重法建立该区的证据权重成矿预测模型, 圈定出 7 个找矿远景区。

关键词: 三江北段; GIS; 证据权重; 铜多金属矿; 青海

中图分类号: P628 **文献标识码:** A

西南三江北段处于欧亚大陆南缘、扬子古陆西缘, 东坝-澜沧江缝合带北侧的古特提斯构造域, 构造位置独特, 是我国最重要的有色金属成矿带之一。前人在该区进行了地质、矿产、物探、化探、遥感等各项地质工作, 已积累了丰富的地质资料。在新技术、新理论层出不穷的今天, 地质学研究也向系统化、信息化、智能化发展^[1]。在前人工作的基础上, 本研究在建立完整的三江北段地质矿产空间数据库的基础上, 结合定量地学研究方法^[2], 运用 GIS 技术, 综合分析已有的地质、物探、化探、矿产等地质资料, 在 GIS 平台上对该区进行矿产资源预测评价研究, 为三江北段区域矿产资源的进一步勘查和开发提供科学的依据。

1 区域地质概况

研究区大地构造位置处于欧亚大陆南缘、扬子古陆西缘, 东坝-澜沧江缝合带北侧的古特提斯构造域。从北向南有可可西里-巴颜喀拉晚印支造山带(Ⅱ₂³)、西金乌兰-玉树晚华力西-一晚印支复合造山带(Ⅱ₃)、羌塘-唐古拉-昌都陆块(Ⅱ₄)、唐古拉山南坡华力西造山带(Ⅱ₅) 4 个二级构造单元。其中以

羌塘-唐古拉-昌都陆块为主体, 又可以进一步分为 3 个三级构造单元, 即乌兰乌拉-下拉秀三叠纪陆缘带(Ⅱ₄¹)、沱沱河-杂多晚古生代断褶带(Ⅱ₄²) 和雁石坪中一晚侏罗世陆缘带(Ⅱ₄³) (图 1)。

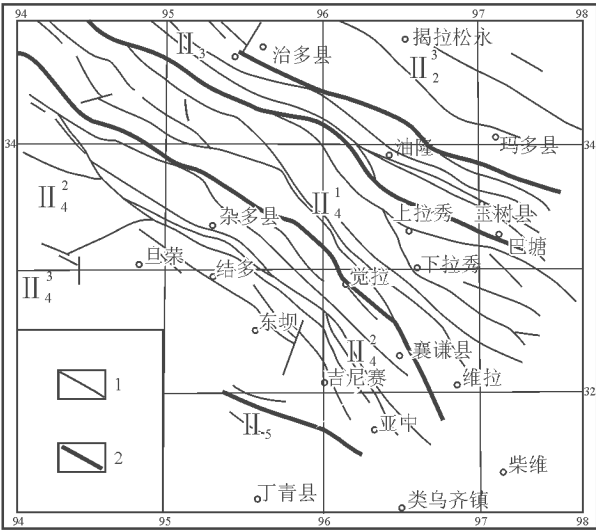


图 1 研究区构造示意图

1. 断层; 2. 构造分区界线

Fig. 1 Simplified tectonic map of the study area

1=fault; 2= tectonic boundary

区内地层主要为下石炭统杂多群,上石炭统加麦弄群,下二叠统开心岭群,上二叠统乌丽群,上三叠统巴颜喀拉山群、巴塘群、结扎群,中侏罗统雁石坪群,上侏罗统吉日群,下白垩统风火山群以及分布较为局限的新生代地层。其中对成矿有利的地层主要是下二叠统开心岭群。区域地层及构造线展布方向为北西-南东向,次级构造发育。区内岩浆活动主要以喜马拉雅期中酸性侵入岩为主,次有少量燕山期中酸性火山岩。喜马拉雅期的花岗斑岩体是该区铜钼(多金属)矿的主要含矿母岩。

II₂³ 可可西里-巴颜喀拉晚印支造山带; II₃ 西金乌兰-玉树晚华力西-晚印支复合造山带; II₄¹ 乌兰乌拉-下拉秀三叠纪陆缘带; II₄² 沱沱河-杂多晚古生代断褶带; II₄³ 雁石坪中-晚侏罗世陆缘带; II₅ 唐古拉山南坡华力西造山带。

2 资源预测评价中的GIS应用

地理信息系统——GIS,作为对地球空间数据进行采集、存储、检索、建模、分析和表示的计算机系统,不仅可以管理以数字、文字为主的属性信息,而且可以管理以图形图像为主的空间信息。它通过各种空间分析方法对各种不同的空间信息进行综合分析解释,确认空间实体之间的相互关系,分析在一定区域内发生的各种现象和过程^[3]。在矿产资源评价领域,不管是进行区域成矿规律的研究,还是确定找床的有利靶区,GIS不仅提供了在计算机辅助下对上述多源地学信息进行集成管理的能力、灵活的查询检索能力,而且可在经验与模型的指导下,通过各种空间分析方法对与成矿有关的各种空间信息进行综合分析解释,确定成矿的有利地区。20世纪70年代末、80年代初,地质学家开始尝试在矿产资源评价中应用GIS技术。经过20年的努力,在用于矿产资源评价的空间数据库的建立、工作程度不同地区的基于GIS的矿产资源评价方法的研究与应用、对多种成矿信息的综合分析方法的研究与应用、基于GIS的矿产资源评价专用软件的开发,以及如何合理地组织人力资源适应新技术的应用要求等方面取得了长足的进步。实践证明,GIS技术的应用形成了新一代的矿产资源评价方法^[4]。基于GIS的矿产资源预测即远景区的预测方法很多,包括秩相关分析、证据权重、信息量、判别分析、聚类分析等方法^[5],无论哪种方法其基本操作流程如图2所示。

3 研究区成矿条件概述

3.1 地层条件

根据矿产地数据库原始资料的统计分析,研究区的Cu、Pb、Zn、Au、Ag在上古生界、中生界、新生界中均有产出,但主要赋存在中生界中。区内矿床和矿化点大部分产于下石炭统、下二叠统和上三叠统。

3.2 构造条件

三江断裂带自古生代起,在中生代、新生代期间,长期多次活动,形成了该区的基本构造格架,控制了中酸性侵入体的分布。北西西向次级断裂及北东向与北西西断裂的交切复合部位为岩浆、矿质提供了有利的赋存空间。北西-南东向区域大断裂旁侧的北西向、北东向断裂与近南北向次级断裂控制着热液矿床的产出。岩浆矿床、火山矿床受北西-南东向区域大断裂旁侧的北西向次级断裂控制。

3.3 岩浆条件

印支期、燕山期中酸性岩体(花岗岩、二长花岗岩、花岗斑岩、花岗闪长岩)以中生代规模较大,新生代规模较小,二者与热液矿床成矿关系密切,岩体周围有热液矿床产出。三叠纪末分超基性岩沿板块结合带和断裂带侵入,与部分铜钼镍矿成矿关系密切;海西期以来的中酸性复式岩带(三叠纪花岗闪长岩、侏罗纪二长花岗岩)与岩浆矿床成矿关系最密切的是燕山-喜马拉雅期花岗岩。火山成因矿床受控于三叠纪安山岩、火山岩和次火山岩,以及海西-印支期的石英闪长岩和花岗斑岩。

3.4 物、化探成矿信息

研究区内元素的地球化学异常与矿床基本上是吻合的,有矿床产出的地方,地球化学异常相应较高。重力异常沿着构造线分布,而岩体亦是沿着构造线侵位,重力异常与岩体相符。热液矿床、岩浆矿床、火山矿床大部分都落在重力异常圈内或其附近。已有矿床、矿点多集中于航磁梯度带,而这些梯度带大多是区域深大断裂的反映,从而间接地证明了矿产与区域构造的密切关系。

4 证据权重模型

4.1 证据权重法原理

证据权重法是加拿大数学地质学家Agterberg提出的一种地学统计方法^[6~9],最初是基于二值图像,它通过对矿产资源相关的地学信息的叠加分析进行预测,其中每一种地学信息都作为预测的一个证据因子,而每一个证据因子对矿产资源预测的贡献由其权重值确定。设研究区划分成等面积的 T 个单元,其中 D 个单元为含矿单元。对任意一个证

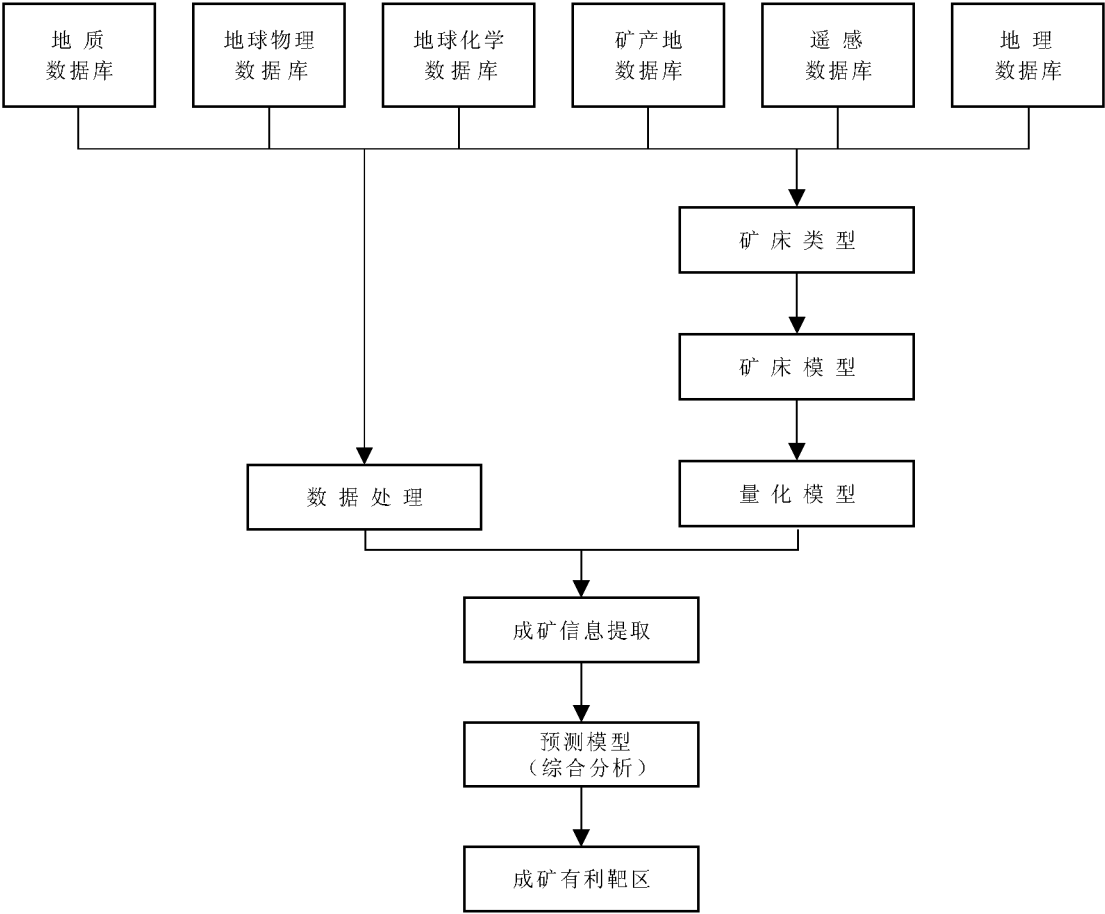


图2 基于GIS的矿产资源预测评价流程

Fig. 2 GIS-based simulation workflow illustrating the proposed method of the evaluation of mineral resources

据因子, 其权重

$$W^+ = \ln \left\{ \frac{P(B|D)}{P(B|\bar{D})} \right\}$$
$$W^- = \ln \left\{ \frac{P(B|\bar{D})}{P(B|D)} \right\}$$

式中, W^+ 、 W^- 分别为证据因子存在区和不存在区的权重值, 原始数据缺失区权重值为 0, B 为因子存在区的单元数, $\bar{B}$ 为因子不存在区的单元数; $B = T - \bar{B}$; D 为不含矿单元数; 条件概率

$$P(D|B) = B/D, P(D|\bar{B}) = \bar{B}/D, P(D|B) = B/D, P(D|\bar{B}) = \bar{B}/D$$

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, 若它们都关于矿点条件独立, 则研究区任一单元 k 为矿点的可能性, 即后验几率 $O_{\text{后验}}$, 表示为

$$O_{\text{后验}} = \exp \left\{ \ln \left(\frac{D}{1-D} \right) + \sum_{j=1}^n W_j^k \right\}$$

式中, W_j^k 为第 j 个因子的权重

$$W_j^k = \begin{cases} W^+ & \text{证据因子存在} \\ W^- & \text{证据因子不存在} \\ 0 & \text{数据缺失} \end{cases}$$

而后验概率为, 根据后验概率提出矿产资源预测远景区。

4.2 证据权重模型的建立

1. 数据组织

利用已经建立的三江北段空间数据库作为研究区成矿预测的数据基础。数据库包括重力数据库、航磁数据库、遥感构造解译数据库、化探数据库、地质图空间数据库、矿产地数据库、地理底图数据库。对上述各个数据库的建立都转换为 1:50 万的比例尺存储在 MapGIS 地图库中, 并通过投影变换统一使用高斯坐标系。

2. 证据因子选择

通过对三江北段地区各控矿因素的分析认为: Cu、Pb、Zn、Au、Ag 矿的主要控矿因素取决于以下几个: 有利地层岩性组合发育、中基—中酸性岩浆岩脉

群发育、线性构造带发育、有利地球化学异常、有利地球物理异常。

根据该区主要控矿因素分析,同时结合地质异常分析,提取了地层、岩体、控矿构造及化学元素异常等22种异常因子作为成矿有利信息,分别从数据库中提取相应的证据层。用设置缓冲区的方法,将线状控矿标志转化为面状标志,北西向控矿构造的缓冲半径为1.5km。

4.3 模型应用

在进行证据权计算前,先对研究区进行规则单元网格单元划分,这里按2km×2km单元网格将研究区划分为167×149=24883个单元网格。

证据权法的预测评价结果是一个成矿后验概率图,其值在0~1之间,后验概率值的大小对应着成矿概率的大小^[19]。在确定整个预测评价范围内的临界值之后,图中后验概率大于临界值的地区即为预测的找矿远景区。证据权法应用的一个前提就是具备一定量的基础图件,并能够在成熟的成矿地质模型的指导下,从这些基础图件中优选编制可应用于预测的各种辅助性图件。如前所述,三江北段地区各种地质、矿产、物探、化探及遥感数据库的建立为证据权法的应用提供了必备的数据基础,对各种有利证据层的分析为证据权法的应用提供了各种辅

助性的数据。在此基础上,根据前面所建立的有利证据层的专题图件,分别计算各证据层与成矿的相关程度和预测评价证据权值(表1),并以此对研究区内各个单元进行成矿概率有利度的计算。

根据表1分析结果显示,各致矿证据层变量对矿化指示作用的大小依次为:L7、L11、L8、L6、L9、L10、L21、L16、L2、L17、L22、L1、L20、L3、L18、L14、L12、L19、L15、L13、L5、L4。

进一步对计算结果进行分析可以得出以下几个基本认识:

- (1) 下石炭统、下二叠统、上三叠统与成矿关系密切,其相关值分别为1.075867、1.578001、1.220911。
- (2) 岩浆岩在该区虽然所占面积大,其与成矿的关系一般,但作为反映岩体蚀变的Na₂O异常与成矿关系密切,也就是说岩体接触带与成矿关系密切,相关值为0.724433;反映中基性侵入体的K₂O异常与成矿关系密切,亦即中基性侵入体与成矿关系密切。
- (3) 断裂构造缓冲相关值较低,为0.59229,但断裂构造的统计变量的相关值较高,除断裂密度外均大于1,说明断裂构造与成矿关系密切。
- (4) Cu、Pb、Zn、Au、Ag、Mo、Sn、Th地球化学

表1 三江北段各证据因子权值参数表

Table 1 Weight parameters of evidence factors for the northern part of the Nuijiang-Lancangjiang-Jinshajiang area, Qinghai						
序号	证据因子	W^+	W^-	C	W^+ 方差	W^- 方差
L1	上三叠统	0.678566	-0.542345	1.220911	0.052765	0.07698
L2	下二叠统	1.325424	-0.252577	1.578001	0.111649	0.043521
L3	下石炭统	0.845275	-0.230592	1.075867	0.100299	0.045501
L4	基一中酸性岩体	0.074741	-0.007422	0.082163	0.333795	0.034526
L5	北西、北东向断裂	0.245134	-0.347156	0.59229	0.047697	0.090991
L6	Cu 异常	1.421139	-0.463729	1.884868	0.071809	0.0556
L7	Pb 异常	1.512864	-0.523538	2.036402	0.067056	0.058868
L8	Zn 异常	1.52883	-0.475715	2.004545	0.071852	0.0556
L9	Ag 异常	1.433211	-0.376294	1.809505	0.083783	0.050044
L10	Au 异常	1.360699	-0.328917	1.689616	0.091365	0.047663
L11	Mo 异常	1.458148	-0.569472	2.02762	0.062845	0.062545
L12	Sn 异常	0.754238	-0.13828	0.892518	0.143248	0.040044
L13	Na ₂ O 异常	0.586492	-0.137941	0.724433	0.125289	0.041713
L14	K ₂ O 异常	0.813307	-0.197049	1.010356	0.111433	0.043524
L15	Th 异常	0.663453	-0.12732	0.790773	0.143214	0.040045
L16	航磁异常	1.006139	-0.596428	1.602567	0.055751	0.071479
L17	重力异常	0.639777	-0.882846	1.522623	0.041768	0.125066
L18	地层组合熵	0.20377	-0.828749	1.032519	0.03577	0.025014
L19	断裂等密度	0.348642	-0.445935	0.794577	0.047705	0.090984
L20	断裂频数	0.311558	-0.894271	1.205829	0.037102	0.200105
L21	断裂优益度	0.404597	-1.202757	1.607354	0.035783	0.250096
L22	地质构造复杂度	0.429826	-0.921863	1.351689	0.038537	0.166752

异常证据层中, Zn、Pb 和 Mo 异常与成矿的关系最为密切, 其相关值分别为 2.036402、2.004545 和 2.02762, 其次是 Cu、Ag 和 Au 异常, 相关值分别为 1.884868、1.809505 和 1.689616; Sn 和 Th 异常相对较小, 相关值分别为 0.892518、0.790773。

(5) 航磁异常、重力异常与成矿关系密切, 相关值分别为 1.602567 及 1.522623。对于 22 个证据层进行条件独立性检验, 在显著性水平为 0.05 下, 上述 22 个因素基本上满足条件独立性。

4.4 预测结果及评价

以所建立的三江北段地区证据权模型, 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表, 图 3)。在成矿后验概率成矿预测的基础上, 结合成矿地质背景与条件、已有矿产、物化探及遥感等各类找矿信息, 对研究区进行找矿远景区的划分。

找矿远景区圈定原则: (1) 成矿后验概率相对较高的地区; (2) 已知矿化信息丰富、具有显著成矿事实的地区; (3) 区域对比, 具有相同或相似的成、控矿条件, 有一定矿化信息, 具一定找矿潜力的地区; (4) 成矿地质条件良好, 物化探异常明显的区段。

根据以上原则, 在该区共划分 7 个远景区(图 4):

(1) 尕龙格玛铜银找矿远景区: 夹持在西金乌兰湖-歇武断裂带和苟鲁山克错-玉树断裂带之间, 并受其控制, 走向断裂系统十分发育, 主元素异常为 Pb、Zn(Ag)、Cu, 火山喷气成因的“黑矿型”铅、锌、银矿是本区特色矿种, 可与云南呷村类比, 如尕龙格玛矿床等。

(2) 赵卡龙铁铅锌银找矿远景区: 与龙格玛铜银找矿远景区属同一构造带, 位于尕龙格玛-赵卡龙 Pb、Zn(Ag)-Cu 多金属异常带东段, 玉树-义敦晚三叠世古岛弧系德格-乡城火山弧带西延的火山盆地中, 已知赵卡隆、多彩矿床成因类型为火山喷流沉积型矿床, 具有形成大型矿床的条件。

(3) 白马海铜金钼多金属找矿远景区: 处于乌兰乌拉-下拉秀三叠纪陆缘带, 化探异常 Cu、Pb、Zn、Ag、W、Sn、As、Sb、Hg 为主, 铅、锌、铜、钨、锡是主要矿产。

(4) 纳日贡玛-东莫扎抓铜钼铅锌找矿远景区: 地处羌塘-唐古拉-昌都陆块的次级构造单元, 处于北西、北东、东西三组构造带的交汇部位, 构造十分

复杂, 这种构造环境为岩浆侵入、矿质的运移与沉淀提供了有利的空间。区内已知的矿床及矿点基本沿北西向断裂的两侧分布, 化探 Cu、Mo、Ag 等异常组合元素多, 规模大、强度高、浓度分带全, 重显性好。

(5) 吉龙-多纳昂铜铅锌银多金属找矿远景区: 位于沱沱河-杂多晚古生代断褶带南部, 与大而香-吉龙-多那昂 Cu、Zn、Mo、W、Pb、Ag 异常带重合。

(6) 旦荣铜多金属找矿远景区: 位于雁石坪中、晚侏罗世陆缘带西段, 铜多金属矿(化)点分布较多, 1:20 万重砂异常密集, 并有航磁异常产出, 铜多金属矿化普遍, 北西向断裂构造较为发育。

(7) 解嘎银多金属找矿远景区: 处于雁石坪中、晚侏罗世陆缘带与沱沱河-杂多晚古生代断褶带的过渡部位, 矿化以 Ag、Cu、Pb、Zn 等为主, 局部地段可形成矿体。其中, 以纳日贡玛-东莫扎抓铜钼铅锌找矿远景区后验概率值高, 成矿远景最大, 其次为解嘎银多金属找矿远景区。

5 讨论

本次研究在建立完整的三江北段地质矿产空间数据库后, 采用各种空间分析方法对研究区控矿因素进行综合分析, 进而建立研究区证据权重成矿预测模型, 得到了如下结论和认识:

(1) 通过海量地质信息综合分析处理, 划分出 7 个主要找矿远景区, 以纳日贡玛-东莫扎抓铜钼铅锌找矿远景区找矿潜力最大。

(2) 将 GIS 技术应用于矿产资源评价不仅拓展了 GIS 的应用领域, 而且改变了传统的矿产资源评价方法, 为矿产资源评价提供了新的思路 and 手段。GIS 可以有效的对多来源、多尺度的不同信息进行快速、有效的优化综合, 并把预测结果以定量的方式表示出来, 有效促进了矿产预测从定性向定量发展。

(3) 基于 GIS 的成矿预测研究中, 完整的 GIS 数据库是进行分析的基础, 其数据质量、数据组织方式直接影响了最终结果的好坏, 数据标准则决定了数据的共享与发布。

(4) 在 GIS 平台上, 选用适当的数学模型, 可以提取出 GIS 数据库中隐含的信息, 并能提高矿产资源评价的精度和自动化、可视化程度, 具重大的实用价值。

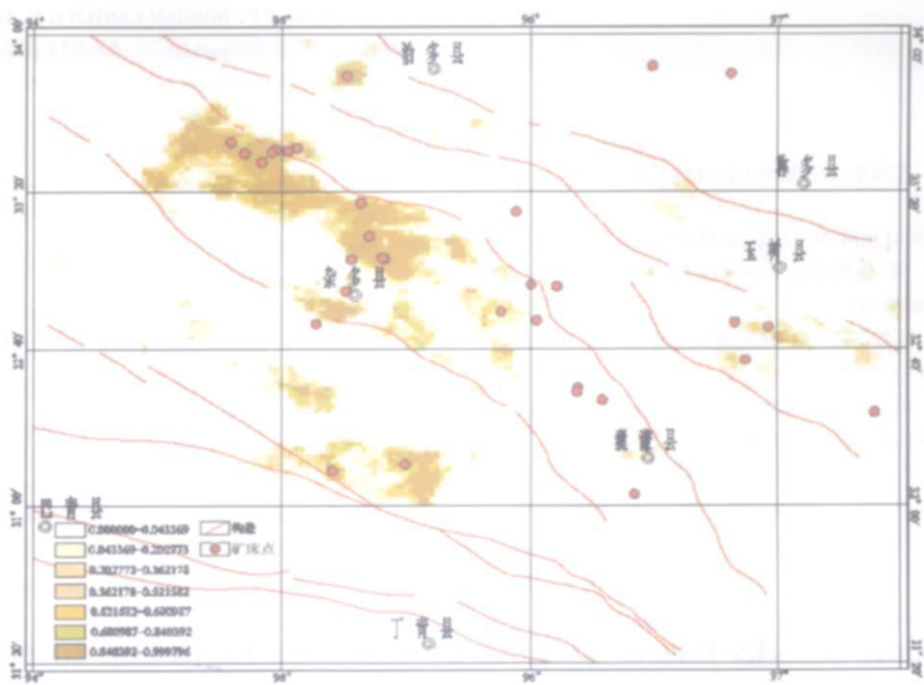


图 3 青海三江北段成矿后验概率色块图

Fig. 2 Color block graph of ore-forming posterior probability for the northern part of the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang area, Qinghai

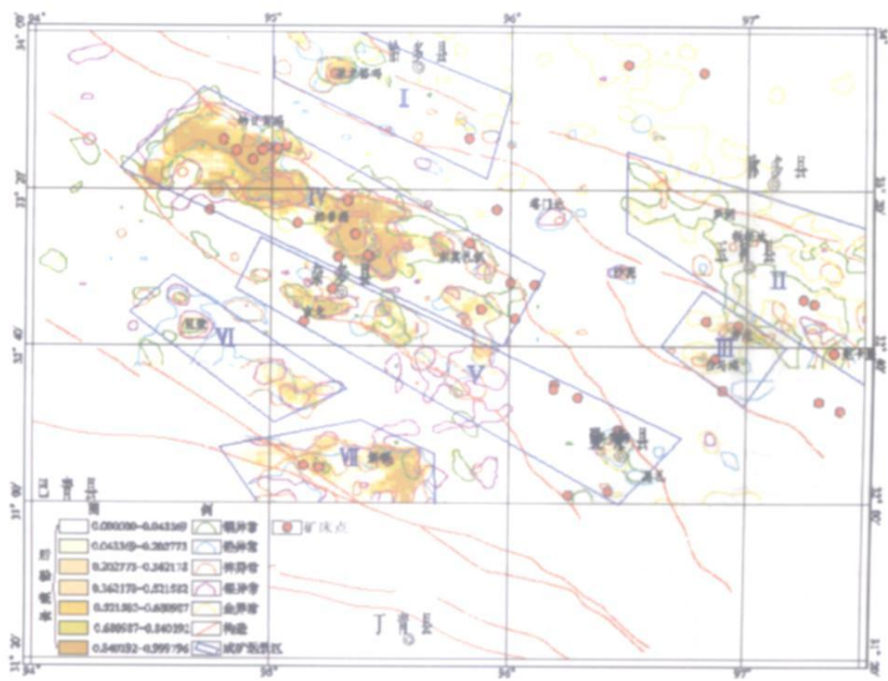


图 4 三江北段成矿预测图

I . 尕龙格玛铜银找矿远景区; II. 赵卡龙铁铅锌银找矿远景区; III. 白马海铜金钼多金属找矿远景区; IV. 纳日贡玛—东莫扎抓铜铅钨锌找矿远景区; V. 吉龙—多纳昂铜铅锌银多金属找矿远景区; VI. 旦荣铜多金属找矿远景区; VII. 解嘎银多金属找矿远景区

Fig. 4 Map of metallogenic prognosis in the northern part of the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang area, Qinghai
I = Galonggema copper-silver prospect; II = Zhaokalong iron-lead-zinc-silver prospect; III = Baimahai copper-gold-molybdenum prospect; IV = Naigongna-Dongmozhaazhua copper-molybdenum-lead-zinc prospect; V = Jilong-Duona'ang copper-lead-zinc-silver prospect; VI = Danrong copper polymetallic prospect; VII = Jiegar silver polymetallic prospect

参考文献:

[1] 肖克炎, 张晓华, 王四龙. 矿产资源 GIS 评价系统[M] . 北京: 地质出版社, 2000.

[2] 赵膨大等. 矿床统计预测[M] . 北京: 地质出版社, 1994.

[3] 张正栋, 邱国锋, 等. 地理信息系统原理、应用与工程[M] . 武汉: 武汉大学出版社, 2005.

[4] 薛顺荣, 胡光道, 丁俊. 成矿预测研究现状及发展趋势[J] . 云南地质, 2001, 20(4): 411—416.

[5] 肖克炎, 张晓华, 陈郑辉. 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.

[6] ACTERBERG F P. Combining indicator patterns in weights of evidence modeling for resource evaluation [J] . Nonrenewable Resources, 1992, 1(1): 35—50.

[7] ACTERBERG F P, BONHAM-CARTER G F. Logistic regression and weights of evidence modeling in mineral exploration [A] . Computer Applications in the Mineral Industries[C] . Proc. 28th Intern. Symp. (Golden, Colorado), 1999. 483—490.

[8] ACTERBERG F P, BONHAM-CARTER G F, WRIGHT D F. Statistical pattern integration for mineral exploration [A] . Computer Applications in Resource Estimation [C] . Oxford: Pergamon Press, 1990. 1—21.

[9] ACTERBERG F P, BONHAM-CARTER G F, CHENG Q M, WRIGHT D F. Weights of evidence modeling and weighted logistic regression for mineral potential mapping [A] . Davis J C, Herzfeld U C. Computers in Geology - 25 Years of Progress [C] . New York: Oxford University Press. 1993. 13—32.

[10] ACTERBERG F P, BONHAM-CARTER G F. Weights of Evidence Modeling. A new approach to mapping mineral potential statistical application in the Earth science [J] . Geolgy Survey of Canada, 1990, 89(9): 171—183.

An application of GIS-based weights of evidence modeling to the forecast prospects of the copper polymetallic ore deposits in the northern part of the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang area, Qinghai

ZHANG Qi-ming¹, CHEN Jian-ping², QI Xian-mao¹

(1. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, Sichuan, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The present paper gives a detailed description of the application of GIS-based weights of evidence method to the evaluation of the copper polymetallic ore deposits in the northern part of the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang area, Qinghai. Seven forecast prospects have been delineated by using GIS techniques on the basis of the geological data including geophysics, geochemistry and mineral resources database, and then the GIS-based weights of evidence modeling has been constructed. The results of research will provide a scientific basis for the further exploration and development of the mineral resources in the study area.

Key words: the northern part of the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang area; GIS; weights of evidence; copper polymetallic ore deposit; Qinghai