

基于知识驱动模型的遥感找矿预测方法研究

陈 江¹ 王安建² 冯雨林¹ 曹殿华² 杨利军¹ 宋丽华¹ 杨 泽¹

(1. 沈阳地质矿产研究所, 辽宁 沈阳 110032; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 本文根据 ASTER 遥感数据提供的蚀变矿物信息, 结合典型矿床的找矿模型, 在四川盐源地区进行了基于知识驱动模型的遥感找矿预测方法研究。利用地理信息系统的多种逻辑模型, 对 ASTER 遥感数据解译出的蚀变矿物丰度及氧化物含量运用布尔逻辑、索引叠加和模糊逻辑等进行了 GIS 分析, 最终确定出由 ASTER 遥感数据产生的找矿靶区, 并在找矿靶区内得到了很好的野外验证效果。

关键词: 遥感; 知识驱动模型; ASTER; 蚀变; 斑岩铜矿

中图分类号: P623.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2009)01-0238-08

近年来, 遥感技术在地质矿产勘查领域得到了广泛的应用。把遥感技术与地质异常结合起来, 能够取得较好的成矿预测效果^[1]。而具有搜集、存取、集成、处理、分析和显示定位地球空间数据功能的地理信息系统(GIS), 能充分的整合多种地学信息, 为区域地质填图及地质环境评价等提供重要的技术支撑^[2]。

基于 GIS 的矿床预测模型分为数据驱动模型和知识驱动模型两种。其中知识驱动模型主要强调了专家在建立模型中的作用^[4-7], 其在矿产勘查领域得到了高度的重视。遥感影像数据是栅格数据, 通过处理可以得到各种专题图件, 进一步可以利用相关的软件进行 GIS 处理。笔者利用 ASTER 多光谱数据, 按照高光谱遥感数据的处理方法得到与矿化蚀变有关的蚀变矿物的丰度数值, 对各种蚀变矿物丰度的数值利用知识驱动模型进行模糊逻辑等方法进行处理, 最终划分出预测区, 达到找矿预测目的。

1 研究区概况与数据准备

研究区位于三江中段四川盐源地区, 大地构造位置为盐源—丽江台褶带。研究区内规模较大的矿床为西范坪斑岩铜矿, 其他矿床类型包括与玄武岩有关的铜矿和砂岩型铜矿。

笔者采用的遥感数据为 ASTER 数据。ASTER 传感器包括 3 个独立的子系统, 分别处于可见光/近红外、短波红外、热红外波段。ASTER 影像的第一至第三波段位于可见光/近红外部分, 空间分辨率为 15 m; 第四至第九波段位于短波红外部分, 空间分辨率为 30 m; 第十至第十四波段位于热红外部分, 空间分辨率为 90 m。

在进行蚀变矿物信息提取之前对 ASTER 遥感数据做了云、阴影与植被的干扰信息预处理。采用直方图统计, 阈值分割进而掩膜的处理方法, 消除水和云的干扰; 利用 ASTER 热红外数据与可见光、近-中红外波长范围内的数据相关性, 采用线性波段预测方法, 为阴影区重新赋值, 进而消除阴影; 利用线性波谱分离等技术方法从植被、基岩或土壤混合信息中区分出多类别植被, 从像元光谱中减去各植被类型所占的像元光谱强度, 进而求出土壤光谱强度及其所占的份额, 有效剥离出岩石和土壤信息^[8]。

由于 ASTER 遥感数据在短波红外范围内具有 6 个波段, 为多种蚀变矿物的鉴定提供了可能。在研究区内没有可利用的岩石和蚀变矿物波谱的情况下, 按照如下流程进行数据处理: 根据波谱库中的矿物波谱在 ASTER 影像中优选出可以代表蚀变矿物

吸收特征的波段比值;根据波段比值的大小确定蚀变强度,在蚀变强度较高的地区进行线性波谱分离;寻找端元矿物波谱;对端元波谱进行波谱匹配;确定丰度较高的矿物类型;选择波谱库中的纯矿物波谱进行蚀变矿物填图。按照此种方法从数据中“提纯”主要蚀变矿物及蚀变矿物的相对丰度。

ASTER 多光谱热红外数据可以确定出发射率光谱与化学成分的数值关系^[9]。本次研究分别对 MgO、Al₂O₃、CaO、Na₂O、K₂O 进行了数值分析。ASTER 热红外数据中提供的 SiO₂ 含量,不仅是确定岩石成分的一个极其重要的指标,另外还是硅化蚀变的重要信息。在一个像元范围内的硅化程度越高,则 SiO₂ 含量也越高。

2 找矿模型

研究区内主要的矿床类型为斑岩型铜矿。形成斑岩型铜矿的两个条件为岩性为斑岩并且存在斑岩蚀变。根据该区典型矿床的资料,斑岩型矿产预测的总体思路是首先在研究区范围内寻找到石英二长斑岩,在预测得到成矿母岩的基础上,再叠加斑岩蚀变矿物的相关信息,则可以进行斑岩成矿的预测。研究区内斑岩铜矿中典型的矿化蚀变,从斑岩系统中心向外过渡,为两期叠加,即早期的钾化-青磐岩化,被晚期的石英绢云母化-青磐岩化叠加,形成由斑岩体向围岩方向的蚀变分带模式,钾化-石英绢云母化-青磐岩化。

3 知识驱动模型应用

知识驱动模型常用的为布尔逻辑模型,索引叠加模型,模糊逻辑等^[10]。在布尔逻辑中,一个系列的端元成分被定义为“是”与“非”。在模糊系列中,端元是一个从“0”到“1”的序列(“0”为非端元成分,“1”为绝对端元成分)。模糊值“0”用于绝对的没有此种现象发生,而“1”则是绝对会发生此种现象。在数据处理过程中不能只使用一种数据模型而尽量使用多种模型的组合。本次研究充分利用多种模型及其组合,并结合了斑岩成矿的蚀变分带等地质成矿理论知识。图 1 是利用 GIS 知识驱动模型生成遥感异常的工作流程。此流程图充分考虑了形成斑岩型铜矿的岩石与蚀变特征。

3.1 利用 GIS 模型方法进行斑岩及高硅岩石的定位

研究区已知斑岩型矿床与石英二长斑岩的关系

密切。利用 ASTER 遥感数据进行石英二长斑岩岩体的定位主要是根据岩石学划分的方法来进行,即按照酸度的划分、全碱总量、酸碱度的划分归类出中性岩中的钙碱性-碱性岩系列。

酸度划分:利用 ASTER 发射率波段比值确定 SiO₂ 的百分含量^[9]。对于 SiO₂ 含量满足 53%~66% 的数值运用波段运算定义为“1”,其他不符合此条件的数值定义为“0”,这样到得的是满足钙碱性-碱性系列中性岩的酸度图层。

K₂O 与 Na₂O 的重量百分数之和,称为全碱含量(ALK)。而确定岩浆岩碱性程度的方法中最方便且常用的是里特曼的组合指数(δ),又叫系列指数或里特曼指数。其中 $\delta = (K_2O + Na_2O) / (SiO_2 - 43)$ 。对于石英二长斑岩的里特曼指数为 3.3~9,因此运用波段运算得出石英二长斑岩的碱度图。分别根据公式^[9]来计算 K₂O 和 Na₂O 的百分含量^[9],然后再根据公式: $\delta = (K_2O + Na_2O) / (SiO_2 - 43)$,计算出里特曼组合指数。把里特曼指数限于 3.3~9 的数值确定为“1”,其他数值确定为“0”。

运用逻辑“与”模型可以把酸度图层与碱度图层进行综合,找出既满足其酸度条件的岩石,又满足其碱度条件的岩石。这样就把钙碱性-碱性中性岩的范围确定出来。

由于石英二长岩和石英正长岩的 SiO₂ 含量较高,大于 60% 以上,而且是研究区内石英含量最高的岩石类型,因此仅根据 SiO₂ 含量就可以确定石英二长岩或石英正长岩。把 SiO₂ 含量图限定于 60%~66%,则可以得到石英二长岩或石英正长岩。

由于钙碱性岩与斑岩铜矿成矿密切,利用逻辑“或”把符合两者条件的岩体都确定为矿源岩。符合条件的定义为“1”,不符合条件的定义为“0”。经统计分析,所划分出来的“斑岩源岩”的像元数量占全部像元数量的 4.8431%(图 2)。

除此之外,根据西范坪铜矿的成矿规律,在主岩体含矿母岩中,不一定产生强烈的围岩蚀变,而在成矿母岩的周围,则有较强的青磐岩化产生。因此要充分考虑到这种蚀变的空间关系,就要对解译出来的斑岩进行“缓冲带”(buffer zone)处理,对于处于缓冲带的空间也要赋以一定量的数值。

在缓冲带图中,共有 0, 1, 1.4118, 2, 2.4118, 3, 3.4118, 4.8235, 5 这 14 个数值出现,其中数值越大,表明距离斑岩体越远。划分出来的岩体及其缓冲带

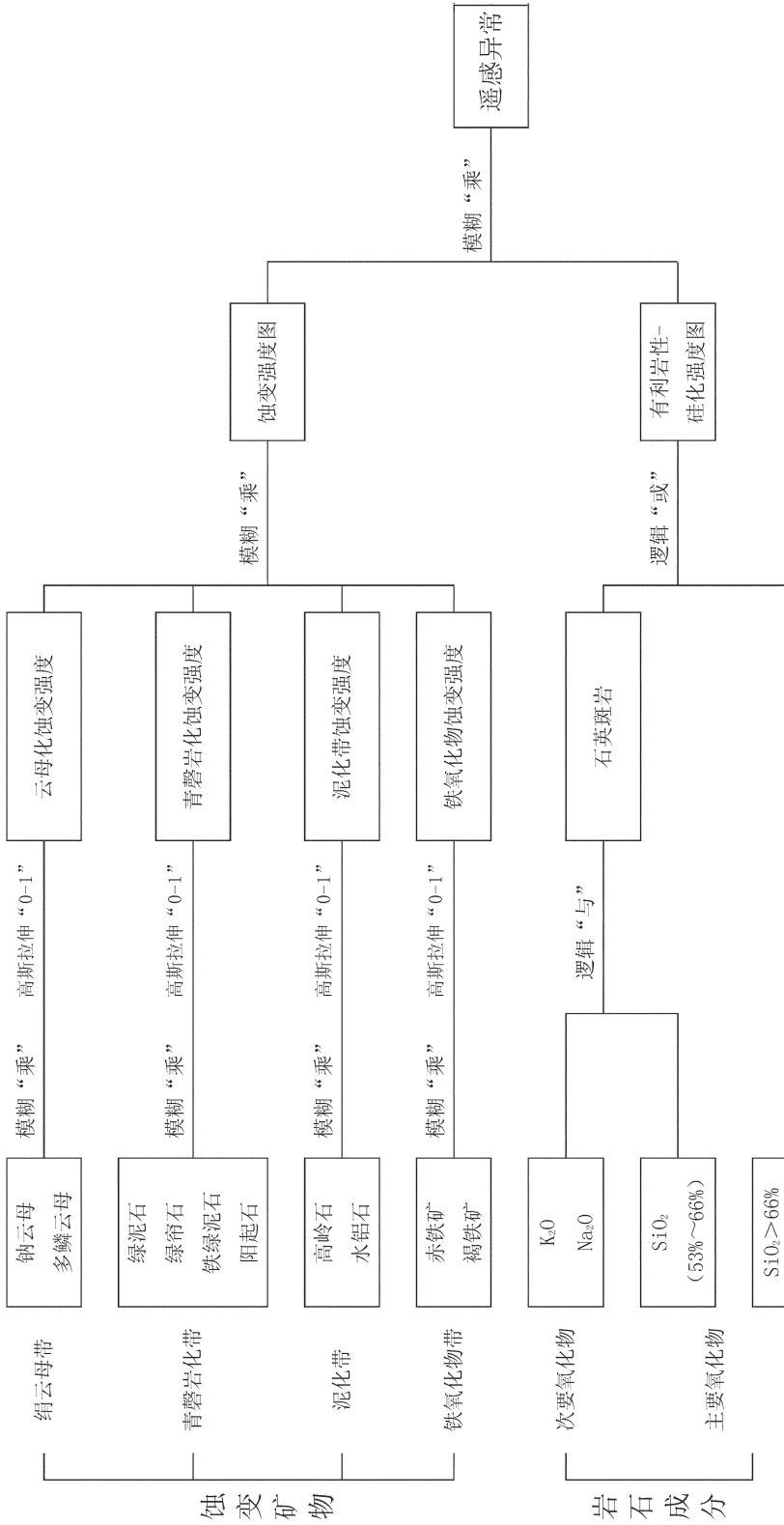


图 1 利用知识去顶模型生成矿产勘查遥感异常的工作流程图
 Fig.1 Flow chart of the formation of ore source remote sensing anomaly by means of knowledge top-removing model

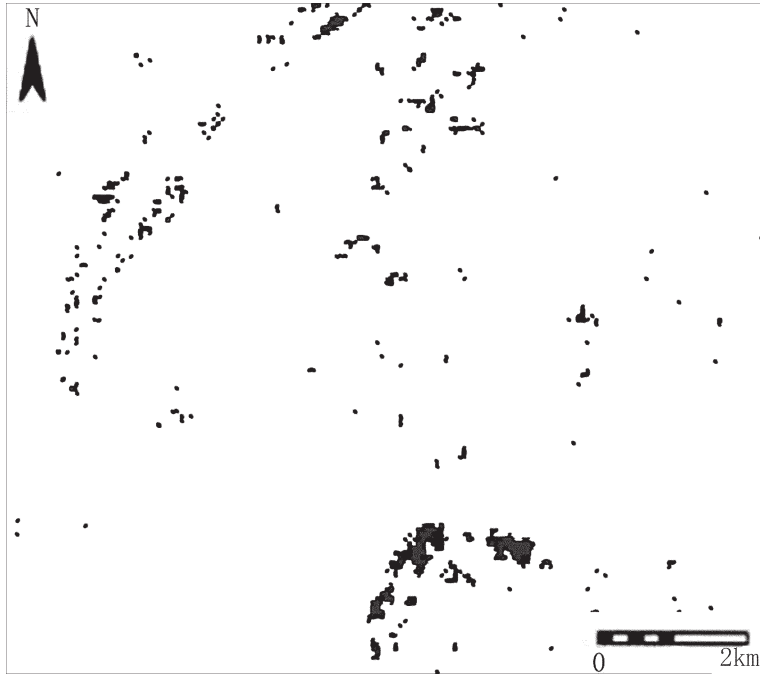


图 2 逻辑“或”产生的斑岩分布

图中只有 0 和 1 两种数值,0 以黑色来显示,代表非斑岩体的岩石;1 以红色来显示,代表斑岩体

Fig.2 Porphyry distribution created by the logic 'or' method

Only 0 and 1 appear in the map, zero is signified by white color, meaning rock body not belonging to porphyry, 1 is shown by white color, meaning porphyry

的面积占总面积的 27.2%。

工作区中由于大多数岩石为基性-中性岩石,酸性岩少见,因此 SiO₂ 含量较高的岩石也可以看作是与硅化有密切的关系。把上述的划分出的石英斑岩岩体与 SiO₂ 含量>66%的岩石进行布尔逻辑“或”的处理,这样就得到了石英斑岩或高硅岩石的分值。其中分值越高,表示出现石英斑岩或其他高硅岩石的可能性越大。

3.2 蚀变强度确定

根据斑岩铜矿成矿模型,与成矿有关的蚀变矿物分布在粘土化带、青磐岩化带、石英-绢云母化带,以及斑岩蚀变中有许多黄铁矿受到风化或氧化后会生成铁氧化物,进而形成于“铁帽”之中。因此选择出几种在该地区可能出现的几种端元矿物。

第一类,粘土矿物类,选择高岭石和水铝石作为蚀变粘土矿物的主要矿物类型。

第二类,选择绿泥石、绿帘石、铁绿泥石、阳起石作为青磐岩化矿物蚀变的代表矿物。

第三类,选择赤铁矿和褐铁矿作为铁氧化物(铁帽)的代表矿物。

第四类,石英(强硅化)、钠云母、细鳞云母作为石英绢云母带的代表矿物。对于云母矿物填图可以用短波-红外的蚀变矿物丰度图,而石英图层可以通过利用岩石填图的方法,在岩石成分部分已经得以划分,因此矿物蚀变强度中未进行处理。

对于蚀变矿物图层,可以把不同矿物波谱按匹配滤波的方法,得到各个蚀变矿物丰度值并对其数值进行归纳;对于上述 4 类蚀变矿物组合,在同一组合内先做模糊“乘”模型处理,数值越高,说明这类组合的蚀变强度越高。对各个组合经过模糊“乘”模型处理之后,进行高斯拉伸的增强处理,其拉伸的值为从“0”到“1”。这样就可以得到了蚀变强度级别,对各个拉伸结果进行模糊“或”模型处理,选取蚀变强度最大的蚀变组合,最终形成了 4 种最强蚀变程度的图件。图 3 是由绿泥石、绿帘石、铁绿泥石和阳起石形成的青磐岩化的蚀变相对丰度图,而图 4 是所有

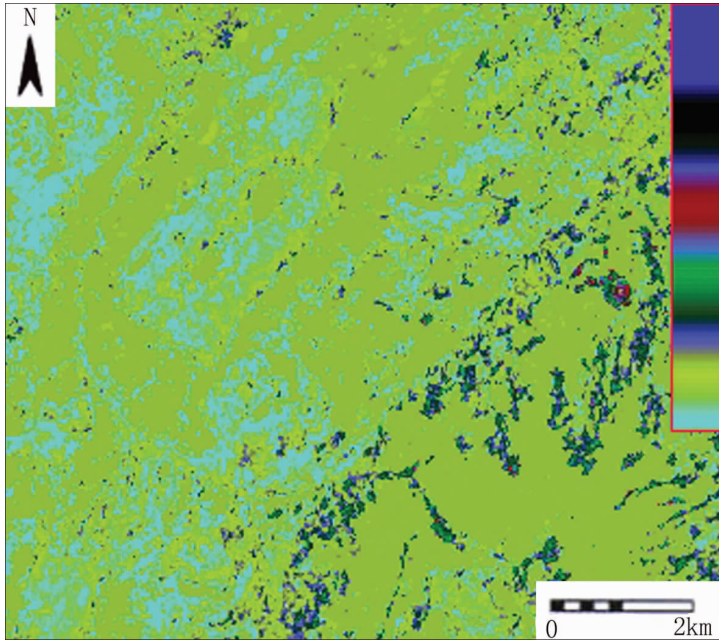


图3 青磐岩化蚀变程度彩色增强图

图中不同颜色代表青磐岩化的程度,其中天蓝色的值最低,代表蚀变程度低,而颜色转为草绿色,深蓝色、紫红色时,其数值是依次升高,代表青磐岩化的蚀变程度增强

Fig.3 Enhanced color map of propylitization

Different colors stand for different alteration intensities: cerulean color represents low values, meaning low intensity, whereas when the color changes to grass green and deep glue, the value becomes higher, meaning high alteration intensity

的蚀变叠加在一起形成的最终的蚀变强度图。

3.3 成矿预测区确定

上面分别确定了有利成矿的斑岩分布位置及确定了与斑岩铜矿成矿有关的岩石蚀变强度。根据二者之间的关系,进一步确定成矿预测区。由于两种因素都对成矿起着很大的作用,因而采用的模型是模糊“乘”。

对于斑岩或高硅岩石采用缓冲带方法,由于各种不确定性原因,采用缓冲带图。在缓冲带图中,共有0,1,1.4118,2,2.4118,2.8235,3,3.4118,3.8235,4,4.22353,4.4118,4.8235,4.2353,4.4118,4.8235,5 这 14 个数值,根据建立模型的需要,需要对缓冲带图做出分级处理。采用公式: $(6-\text{缓冲值})/6$ 来给出 16 个数值结果,也就是产生了 16 个分值,即分别是 1,0.833333333,0.7647,0.666666667,0.598033333,0.529416667,0.5,0.431366667,0.36275,0.333333333,0.294116667,0.2647,0.196083333,0.166666667。最大值为 1,是划分出来的斑岩,远离斑岩一个像素(15 m)则其分值为 0.833333333。最小值为 0.166666667,这

部分数值占了很大的比例,说明其离斑岩较远。但是由于其分值较小,与蚀变矿物强度分值相乘则值会很小,不会出现在预测区的范围之中。经过上述计算后,为达到更好的视觉效果,把这个图层进行高斯拉伸,其拉伸值范围为 0~1。

运用模糊“乘”,对代表斑岩体位置和蚀变强度的两个图层相乘,形成了既与岩体位置有关,又与蚀变强度有关的可能成矿的分值。图 5 为与斑岩岩体和蚀变强度均有关的预测图。在获得了成矿的分值之后,为了找矿勘查的需要,对分值进行分级,分级是根据直方图来进行的。其直方图是一个不规则的直方图。在直方图上,绝大部分数值为 0,这是因为大部分的面积不是斑岩或其缓冲带。根据直方图可以划分出斑岩成矿的遥感异常。可以分为三级(根据统计直方图分割):0.194~0.2258 为三级异常;0.2258~0.2544 为二级异常;0.2544~1 为一级异常。

4 模型验证

通过 GIS 知识驱动模型获得了遥感异常,为了

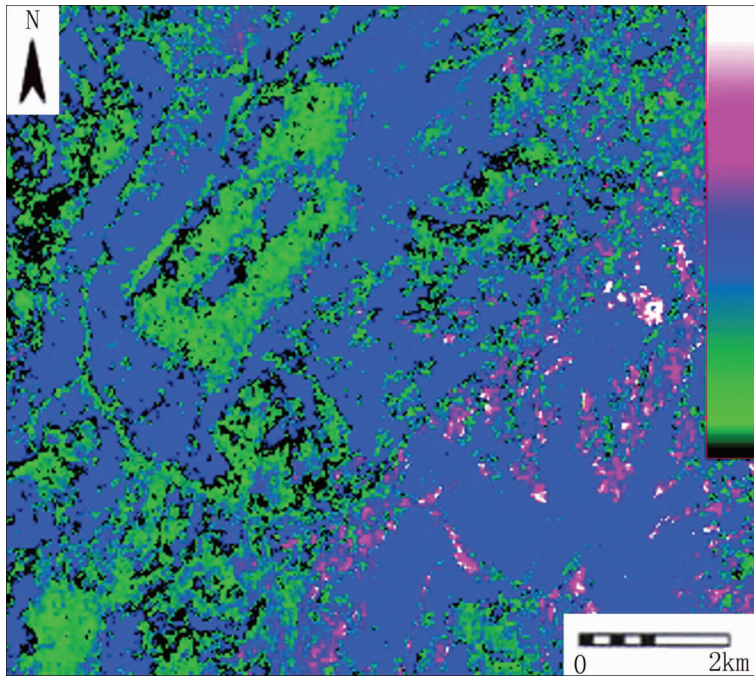


图 4 索引叠加模型得到的蚀变程度
图中黑、绿色为数值较低,代表总体的蚀变程度较弱,颜色由蓝色转变成粉红和白色时,
数值升高,代表总体的蚀变强度增高

Fig.4 Alteration degree map created by the index overlay model
In the figure, black and green represent low values, standing for relatively low alteration, whereas when the
color changes to pink and white, the value becomes higher, standing for higher alteration intensity

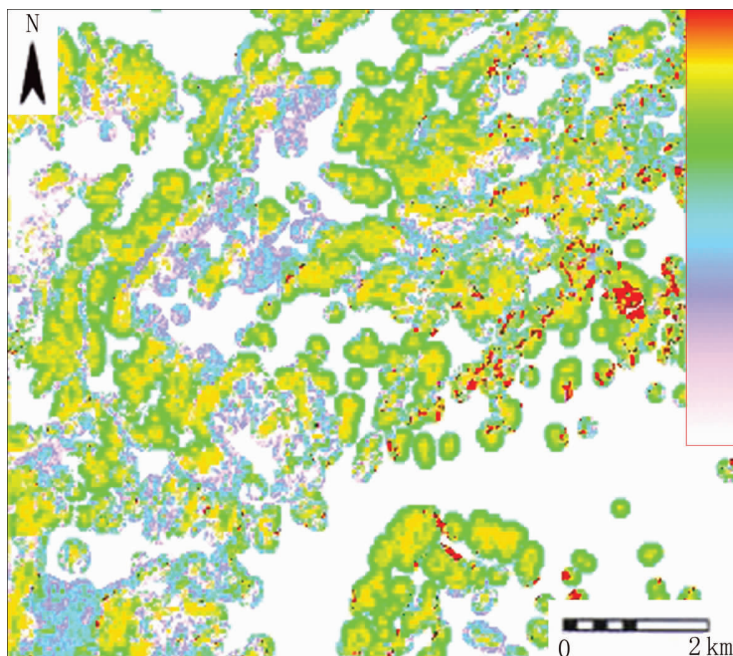


图 5 与斑岩体和蚀变矿物有关的预测分值
图中颜色由浅变深代表的是成矿分值增加,红颜色代表的是较高的成矿分值

Fig.5 Predicted mineralization weights related to porphyry rocks and corresponding alterations
In the figure, the color changes from light to dark, standing for the increasing values, and the red color
means higher predicted mineral weight

验证方法的有效性,对遥感异常进行了野外检查。异常的检查主要包括以下几方面的内容:异常是否由与成矿有关的地质因素引起;定量解译的遥感异常是否具有高置信度;本区或邻近地区的中型或小型铜矿床是否包括在所划分出的高蚀变强度异常区内;所圈定的异常区是否具有形成大型或特大型矿的成、控矿条件。

通过野外验证发现,利用 GIS 评价模型所得到的遥感异常与地质控矿条件有关。在所划分出的异常中,有区域性的异常,如所划分出的南北两个主要异常带,另外还有局部性的异常,如西范坪和萝卜地等小的斑岩等。在局部性的异常中,所圈出的异常与蚀变密切相关。另外,所圈出的蚀变与出露的斑岩密切相关,如西范坪铜矿和萝卜地铜矿中的斑岩体均具有较强的蚀变。在区域性的异常中,所划分出的北东向和北西向遥感异常带与上二叠统黑泥哨组有密切的关系,根据区域成矿规律,黑泥哨组地层中有米厘、拉马古等铜矿的产出,是铜矿的矿源层。另外在异常带内还发现了多处铜矿化点。

5 结果和探讨

本次通过对四川盐源地区遥感数据进行解译,提取与矿产勘查有关的各种蚀变矿物信息以及各种氧化物含量信息,采用布尔逻辑,索引叠加模型和模糊逻辑 3 种基本的方法进行了 GIS 分析,最终得出了找矿预测区。对预测区进行野外检查,证明了划分的预测区的可靠性。研究结果表明在遥感数据解译中充分利用知识驱动模型,可以把专家知识与遥感提供的客观信息有机结合起来,从而提供矿产预测的准确性。

参考文献(References):

- [1] 廖崇高, 杨武年, 徐凌, 等. 成矿预测中遥感与地质异常的综合分析——以兰坪盆地为例[J]. 中国地质, 2002, 29(4): 416-420.
Liao Chonggao, Yang Wunian, Xu Lin, et al. Integrated analysis of remote sensing and geological anomalies in ore deposit prediction: A case study of the Lanping basin [J]. *Geology in China*, 2002, 29 (4):416-420 (in Chinese with English abstract).
- [2] 张丽君. 基于 GIS 多准则空间分析(SMCE)的青海省矿产

资源开发地质环境脆弱性评价[J]. 中国地质, 2005, 32(3): 518-522.

Zhang Lijun. Application of GIS-based spatial multi-criteria evaluation (SMCE) in the geo-environment fragility assessment for the development of mineral resources in Qinghai Province [J]. *Geology in China*, 2005, 32 (3):518-522 (in Chinese with English abstract).

- [3] 韩坤英, 丁孝忠, 范本贤, 等. 基于 GIS 的区域地质编图方法[J]. 中国地质, 2005, 32 (4):713-717.
Han Kunying, Ding Xiaozhong, Fan Benxian, et al. Methods of regional geological map production based on GIS [J]. *Geology in China*, 2005, 32 (4):713-717 (in Chinese with English abstract).
- [4] An P, Moon W M, Rencz A. Application of fuzzy set theory for integration of geological, geophysical and remote sensing data [J]. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, 1991, 27:1-11.
- [5] Bonham - Carter G F. *Geographic Information Systems for Geoscientists Modelling with GIS*, Pergamon [J]. Ontario, 1994:1-23.
- [6] Chung C F, Fabbri A G. The representation of geoscience information for data integration[J]. *Nonrenewable Resources*, 1993, 2 (2):122-139.
- [7] Chung C F, Moon W M. Combination rules of spatial geoscience data for mineral exploration [J]. *Geoinformatics*, 1991, 2:159-169.
- [8] 陈江, 王安建, 黄妙芬. 多种植被覆盖地区 ASTER 影像岩石、土壤信息提取方法研究[J]. 地球学报, 2007, 28(1) 86-91.
Chen Jiang, Wang Anjian, Huang Miaofen. The ASTER imaging rock and soil information extraction method in multiple vegetations covered areas [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, (in Chinese with English abstract).
- [9] 陈江, 王安建. 利用 ASTER 热红外遥感数据开展岩石化学成分填图的初步研究[J]. 遥感学报, 2007, 11(4):601-608.
Chen Jiang, Wang Anjian. The pilot study on petrochemistry components mapping with ASTER thermal infrared remote sensing Data [J]. *Journal of Remote Sensing*. 2007, 11(4):601-608 (In Chinese with English abstract).
- [10] 陈江, 付建飞. 利用 GIS 知识驱动模型开展区域矿产资源预测[J]. 地质与勘探, 2005, 41(5):66-68.
Chen Jiang, Fu Jianfei. Mineral exploration prediction based on GIS knowledge-driven model[J]. *Geology and Prospecting*. 2005, 41(5):66-68 (in Chinese with English abstract).

A study of the remote sensing ore prognostic method based on a data-driven model

CHEN Jiang, WANG An-jian, FENG Yu-lin, CAO Dian-hua,
YANG Li-jun, SONG Li-hua, YANG Ze

(1. *Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Shenyang 110032, Liaoning, China;*

2. *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)*

Abstract: Based on the alteration mineral information derived from the ASTER data, combined with a typical ore-prospecting model, the authors studied the ore prognostic method that utilized the data-driven model and remote sensing data obtained from Yanyuan area, Sichuan Province. Different logical models were used to analyze alteration mineral abundances and oxide contents on the basis of such means as Bool logic, overlay index and fuzzy logical method. As a result, the prospecting target was delineated, and the interpretation result was well verified in field work.

Key words: remote sensing; data-driven model; ASTER; alteration; porphyry copper deposit

About the first author: CHEN Jiang, male, born in 1971, senior engineer, mainly engages in the application of GIS, RIS and GPS techniques in geology; E-mail: hardrock30@163.com.