

基于遥感的多源信息融合在湖南永州南部地区找矿预测中的应用

雷天赐 崔 放 余凤鸣

(武汉地质矿产研究所, 湖北 武汉 430205)

摘要:以湖南永州南部地区 ETM+影像数据为信息源,通过信息提取、目视解译及统计分析,构建断裂优益度、蚀变矿物信息 2 个遥感找矿参数;选择工区 W、Sn、Cu、Pb、Zn 5 种元素,通过对其含量进行数据处理、相关性分析及因子分析,编制成矿元素地球化学特征及空间分布图,构建化探找矿参数。以 GIS 为平台,结合地质、遥感、化探手段,对找矿参数进行基于证据权重法的多源信息融合、分析及可视化,揭示出各找矿因子的致矿特征及相互关系,并形成一套多元信息综合找矿方法,为成矿预测及找矿靶区优选提供技术支持。

关键词:湖南永州;多元信息融合;遥感;优益度

中图分类号:P627 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2012)04-1069

随着信息技术与 GIS 的飞速发展,基于地、物、化、遥等多源信息集成与分析技术日趋成熟,且成为当今地学研究的热点和前沿之一。广大科研工作者通过选择不同方法、主攻矿种、组合模型等开展了各种综合研究,取得了丰硕的成果与认识。如赵鹏大等将地化、物探和遥感相结合,通过信息提取、关联、转换和综合等浓缩各类致矿信息,达到圈定“5P”找矿地段的目的^[1]。方洪宾等将地、化、遥找矿模式相结合,快速、准确地圈定了多处金矿(化)体^[2]。植起汉利用地、物、化、遥等多因素统计特征及综合模型,通过建立综合解译标志为提取新的二次信息提供了可靠的科学依据^[3]。刘磊等将遥感、化探与地质信息融合并进行综合分析,总结出云南思姑锡矿区矿体的产状和成矿地质特征^[4]。杨自安等采用遥感、化探信息融合技术,提出了基于套合关系的彩色图像合成、基于耦合关系的 HIS 彩色空间变化、二维相关编码和相关系数变换等综合技术模型,优选出具有地质找矿意义的综合异常和有利矿化地段^[5]。刘荫椿借助 GIS 建立起了与金矿有关的地、物、化、遥等多源信

息库,对研究区金矿进行了有效预测和显示^[6]。本文以湖南永州南部地区为例,通过遥感信息提取、化探数据处理及地质成矿分析,构建了断裂优益度、矿物蚀变信息及成矿元素地球化学特征 3 个找矿参数,并对其进行关联分析、融合及可视化显示,为成矿预测及找矿靶区圈定提供了方法支持。

1 地质概况

研究区主体位于湖南省永州地区南部,跨湘、桂、粤三省,是中国著名的有色金属成矿区,也是南岭地区重要的锡成矿远景区之一。地理坐标:东经 111°~112°30',北纬 25°~26°,面积约 16 500 km²。

大地构造处于华南陆块北部的湘中地块和湘东南地块两个二级构造单元、南岭东西向复杂构造带中段,先后经历了加里东、海西-印支、燕山、喜山 4 个构造旋回,形成了褶皱基底、中浅层次盖层与表壳断陷盆地。加里东构造层构成了该区褶皱基底,其岩性为一套浅变质陆源碎屑岩夹少量硅质岩、碳酸盐岩,属复理石、类复理石建造;海西-印支构造层构

收稿日期:2011-11-24;改回日期:2012-04-02

基金项目:中国地质调查局“南岭地区钨锡多金属矿找矿靶区优选与验证”项目编号:K201025。

作者简介:雷天赐,男,1977 年生,硕士,矿产普查与勘探专业;E-mail:leitianci@126.com。

成区内侏罗山式盖层,发育近南北、北东向构造,地层为一套浅海相碳酸盐岩夹陆源碎屑岩沉积;燕山构造层形成叠置于盖层之上的一套陆相红盆沉积构造盆地;喜山构造层由第四系组成,为河流冲积层、洪积层、残坡积土壤层等^①。

区内岩浆岩出露面积约 1 710 km²,占研究区总面积的 10.5%,时代主要集中在 S、T、J 三个时期;其中侵入岩出露面积达 1 665 km²,以花岗岩为主,主要包括海洋山、都庞岭、雪花顶、金鸡岭、砂子岭及西山岩体等大型岩体。

2 遥感数据处理与解译

2.1 遥感数据源的选取与图像处理

本次采用美国陆地资源卫星 7 号 (Landsat-7) 携带的增强型主题成像传感器 (ETM+) 接收的数据,共 4 景,轨道号为 p123r42、p123r43、p124r42 及 p124r43,成像时间 1999 年 12 月 24 日至 2002 年 01 月 05 日。选用波段光谱范围 0.45~2.35 μm,空间分

辨率 30 m。

遥感数据处理主要包括校正、色调调整、镶嵌拼接及波段组合等步骤,其中色调调整比较关键。因为不同时相数据成像条件不同,影像间的亮度差异变化较大,必须进行亮度调整。亮度调整采用方差均值法,其经验公式如下:

$$g(x) = \alpha f(x) + \beta, \text{ 其中: } \alpha = \frac{\sigma_{fg}^2}{\sigma_{ff}^2}, \beta = M_g - \frac{\sigma_{fg}^2}{\sigma_{ff}^2} M_f$$

当相邻两幅图像增益和零线漂移量变化很小时,α、β 视为常数,f(x)—原始影像,g(x)—目标影像,σ²_{fg}-f(x)和 g(x)协方差,σ²_{ff}-f(x)方差,M_f-f(x)灰度值均值,M_g-g(x)灰度值均值。

波段组合依据相关系数和优化指数^[7]分析结果,选取信息量最丰富的 ETM+742 假彩色组合显示图像,制作 1:25 万遥感影像图(图 1)。影像图色彩

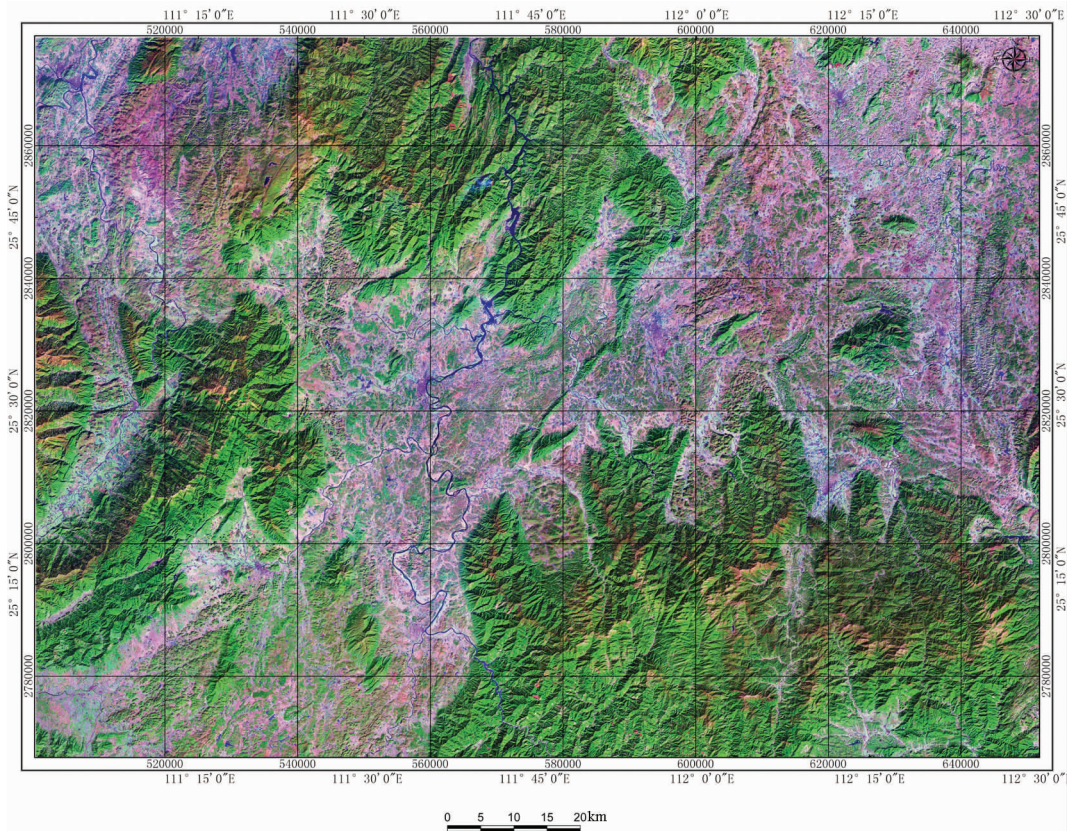


图 1 湖南永州南部地区 ETM+742 遥感影像图

Fig.1 Remote sensing image of ETM+742 in southern Yongzhou, Hunan Province

①湖南省地质调查院,道县幅 1:250000 区域地质调查报告,2004.4

鲜明、层次感强、纹理细节都有清晰的显示。

2.2 断裂构造解译与分析

断裂构造解译以目视解译为主、自动提取为辅,人机交互式解译相结合。断裂(线性)构造自动提取首先采用空间滤波消除噪声、增强边缘、使图像清晰化,边界、线段与周围的像元形成高反差;再在边缘增强图像上,对滤波图像进行二值化处理^[9]。线性构造自动提取函数表达式如下:

$$g(i,j) = \sum_{K=i-w}^{i+w} \sum_{l=j-w}^{j+w} f(K,l) \times h(i-K,j-l) \quad (1)$$

二值化阈值由下式确定:

$$T=255-Z$$

选择 Z 使其满足:

$$S = \sum_{i=0}^z H(255-i) \leq 20\% \quad (2)$$

式(1)中, f 为输入图像, h 滤波函数, g 滤波后的输出图像; 式(2)中, H 为滤波图像的直方图函数。根据工作区 ETM+ 图像线性体的方位分布特征, 在目视解译基础上设计了 NE、SN、NW 向及近 E-W 向空间滤波卷积运算的方位模板(图 2); 与此同时, 还尝试了多方法综合使用: TM7/4、5/4、5 合成+局部增强+动态反差变换, 增强并提取了线性体在不同方位上的空间分布信息, 最终编制断裂构造遥感解译图(图 3)。

以构造为主要控矿因素的内生矿产, 其有利容矿构造部位常是多组断裂交汇处或断裂密集部位。断裂优益度是据此理论运用统计学方法得出的一种有利储矿的构造特征函数, 它以线性构造两两间的夹角和线性构造的方位的控矿程度加权的构造密度的度量, 它的高值区一般是成矿有利区^[9]。其表达式如下:

$$\varepsilon = l_1 w_1 (1 + |\sin \theta| / 2) + \sum_{i=2}^n l_i [1 + |\sin(a_i - a_{i-1})| / 2] w_i \quad (3)$$

式中: i 为线性构造序数, w_i 是第 i 条线性体在该单元内的控矿权重, θ 一条线性构造与最后一条线性构造的夹角, l_i 第 i 条线性体在该单元内的长度, a_i 是第 i 条线性体的方位角, 将 ε 按 $a_1 < a_2 < \dots < a_n$ 及 $a_1 > a_2 > \dots > a_n$ 分别计算 ε_1 和 ε_2 值, $(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / 2$ 即为该统计单元的断裂优益度值。本次采用 1:25 万线性构造遥感解译成果, 实际面积按 2 019 m × 2 180 m 进行网格划分, 将全区划分为 49 × 75 个网格单元; 将计算出的优益度值经过网格离散化、克吕格空间值及线性拉伸处理(像元值 0~255、空间分辨率 30 m), 编制全区断裂优益度图(图 4), 用来显示内生矿产的有利成矿部位。

2.3 蚀变信息提取

蚀变信息是矿化作用产生的重要成矿标志的反

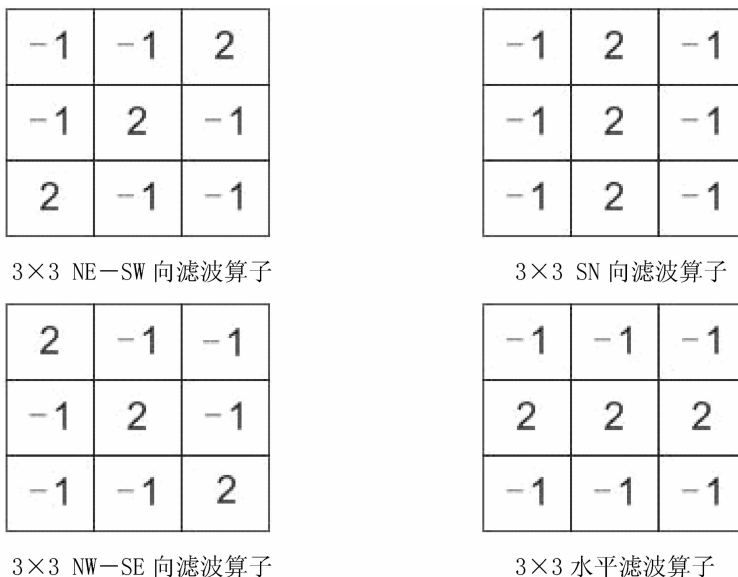


图 2 湖南永州南部地区方位滤波算子卷积核

Fig.2 The convolution kernel of azimuth filtering in southern Yongzhou, Hunan Province

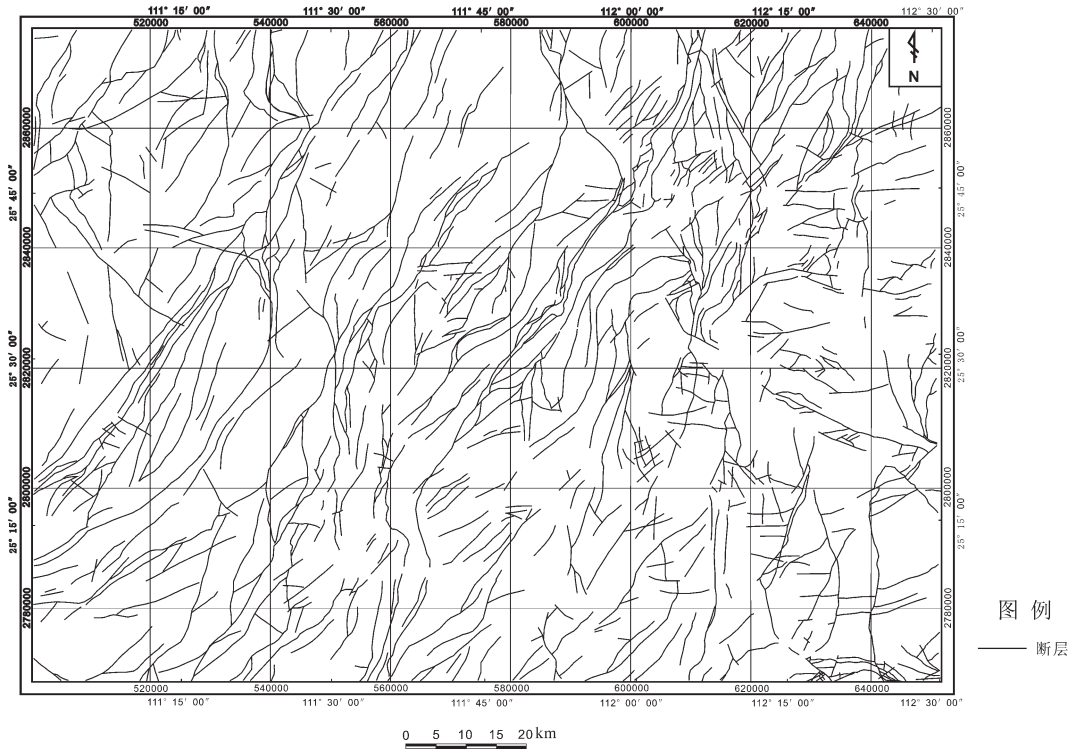


图3 湖南永州南部地区断裂构造遥感解译图

Fig.3 Remote sensing interpretation map of faults in southern Yongzhou, Hunan Province

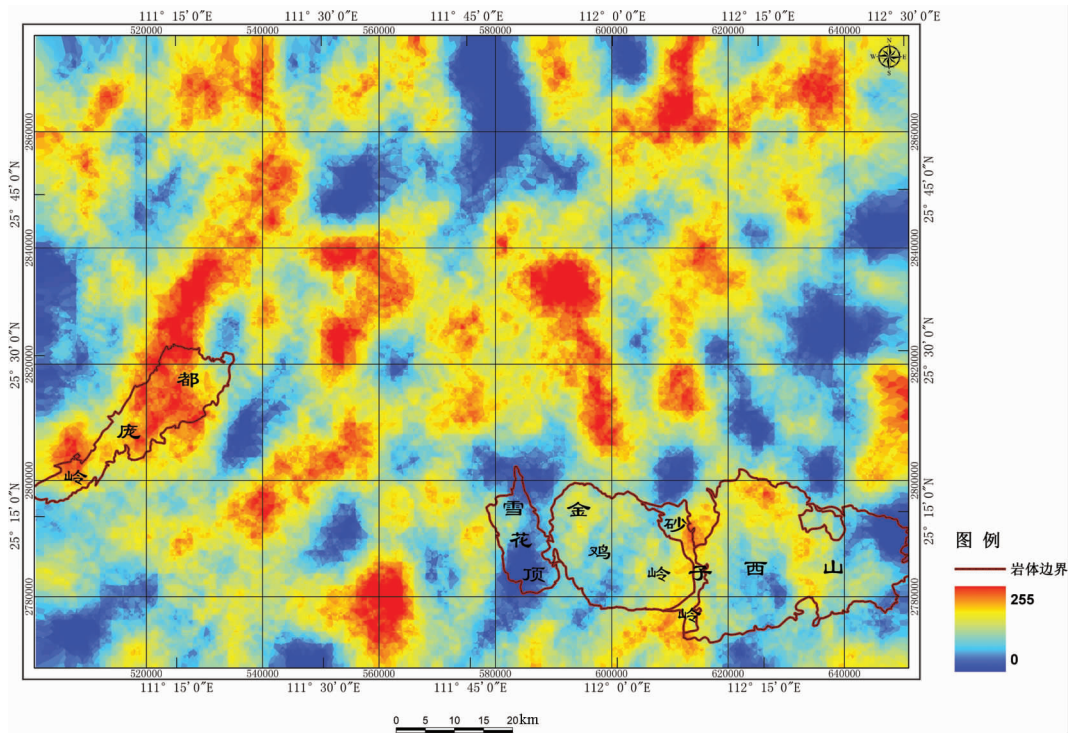


图4 湖南永州南部地区断裂构造优益度图

Fig.4 Map of fault structure advantage grade in southern Yongzhou, Hunan Province

表 1 研究区各元素含量相关性参数

Table 1 The parameters of the correlation of all elements in the study area

	W	Sn	Cu	Pb	Zn
W	1	.736	.354	.155	.146
Sn		1	.399	.111	.116
Cu			1	.684	.740
Pb				1	.898
Zn					1

表 2 羟基、铁染主成分特征向量相关矩阵表

Table 2 The eigenvectors of covariance matrix in PCA of OH⁻ and Fe³⁽²⁾⁺

组 分	羟基特征向量				铁染特征向量			
	ETM1	ETM4	ETM5	ETM7	ETM1	ETM3	ETM4	ETM5
PC1	0.20624	-0.27677	-0.32651	-0.14983	0.26847	-0.26767	0.29768	0.47617
PC2	0.68034	-0.33184	0.14764	0.63653	0.71444	0.40657	-0.56131	0.09599
PC3	0.69071	0.24332	0.18696	-0.65480	0.12160	0.52730	0.67402	-0.04407
PC4	0.13219	-0.46838	0.79126	-0.67897	-0.63460	0.68383	-0.37684	0.57029

映,主要体现在羟基和铁染上。本区内发育的与金属矿化有关的中低温热液蚀变类型主要有硅化、褐铁矿化、黄铁矿化、绿泥石化、绢云母化、矽卡岩化及碳酸盐化等,前人在此方面的尝试中取得过一些成功范例^[10-13]。

主成分变换 (PCA) 是一种建立在统计特征基础上的多维正交线性变换、离散变换,通集中和压缩将具有相关性的多波段图像压缩成完全独立的少数几个波段,并且压缩后的每一个主分量都有其独特的地质含义^[14-15]。根据含羟基离子矿物和含铁离子矿物的波谱特征,利用主成分因子分析,ETM+1457组合提取羟基异常信息、ETM+1345组合提取铁染异常信息,根据表2特征向量值及判别规则,其PC4分别反映了羟基、铁染信息^[16]。

波段比值是依据波段间差值和斜率关系,找出蚀变矿物波谱曲线斜率变化最大的区间和曲线中反射峰和吸收谷,通过作比值增强处理形成突出蚀变信息的图像。根据含羟基矿物和含铁离子矿物的波谱特征,利用ETM5/ETM7、ETM3/ETM1分别提取羟基、铁染异常信息^[17]。

基于研究区植被发育、地形起伏及水气含量大等特点,采用主成分变换+比值+主成分变换相结合的蚀变信息提取方法较为合适^[18]。首先,将TM1457

进行主成分分析,提取反映羟基蚀变信息的PC4并拉伸(0~255内拉伸);然后,进行比值运算,将TM5/TM7结果R拉伸(0~255内拉伸);最后,将PC4、R进行第二次主成分分析,变换后的第一主成分(PC1')为羟基蚀变信息,提取结果见图5。

3 化探数据处理与元素空间格局分布制图

3.1 数据处理与各元素含量特征分析

根据全国1:20万水系沉积物W、Sn、Cu、Pb、Zn元素相关性分析(表1)所示,W、Sn具有明显的相关性,与Pb、Zn明显不相关,而与Cu弱相关;而Cu、Pb、Zn具有明显的相关性,尤其Pb、Zn相关性高达0.898。由此可见,W、Sn可归为一组,Cu、Pb、Zn归为一组,但Cu具有一定的过渡性。同样,图6显示,因子分析与相关性分析结果吻合,经Varimax(方差最大法)旋转后第一主因子(F₁)由Cu、Pb、Zn组成,其中Pb、Zn元素因子载荷均大于0.9,Cu元素接近0.8,但Cu具有一定的过渡性;第二主因子(F₂)由W、Sn组成,两元素因子载荷都大于0.8。

3.2 元素地球化学特征及空间分布格局制图

根据元素含量相关性及因子分析结果,编制以Zn元素为代表的第一主因子、W元素为代表的第

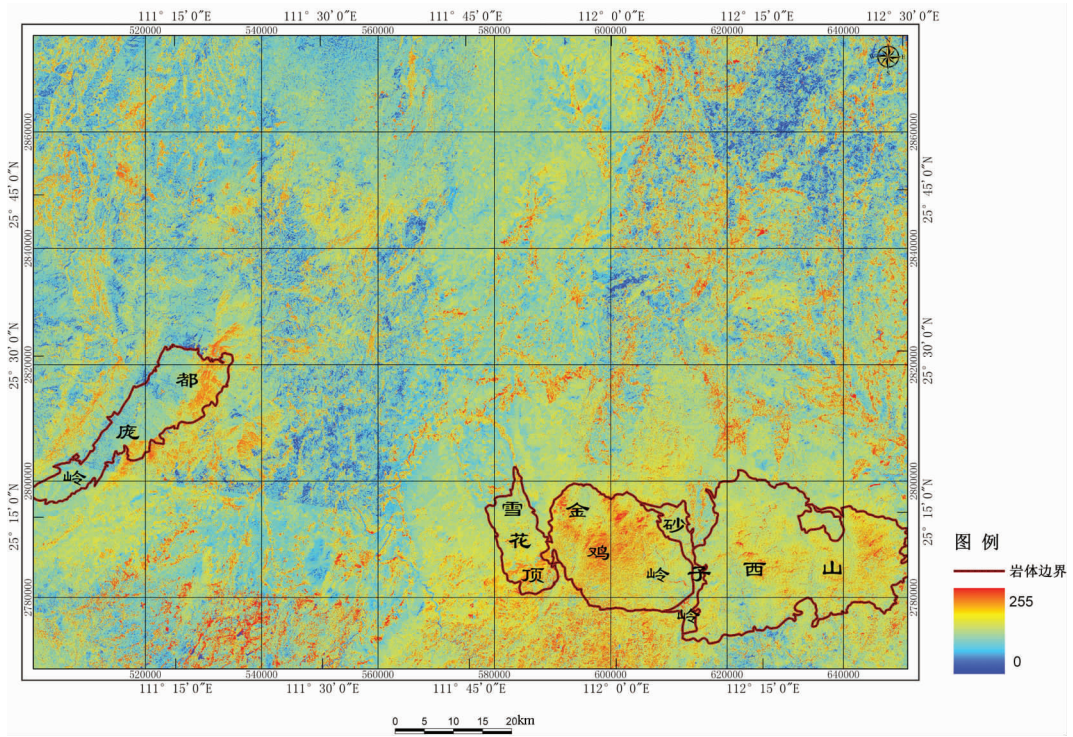


图 5 湖南永州南部地区蚀变信息(羟基)提取图

Fig.5 The extraction map of alteration information (OH) in southern Yongzhou, Hunan Province

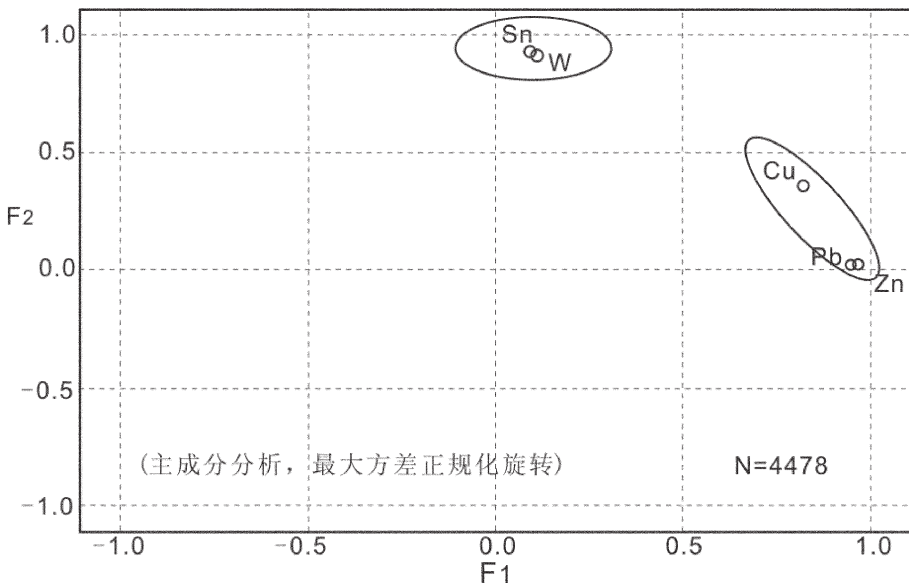


图 6 研究区各成矿元素含量因子载荷图

Fig.6 The loading diagram of ore-forming elements factors in the study area

二主因子空间分布格局图。成图使用地理信息系统软件 ArcGIS9.3 的地统计模块(Geostatistics), 选用球状半变异函数模型^[9], 采用普通克里格插值方法进行插

值^[9], 分别得到永州南部地区以 W(Sn)、Zn(Cu、Pb)为代表的两组成矿元素空间分布格局图, 并最终对图像进行归一化处理, 在 0~255 范围内线型拉伸(图 7~8)。

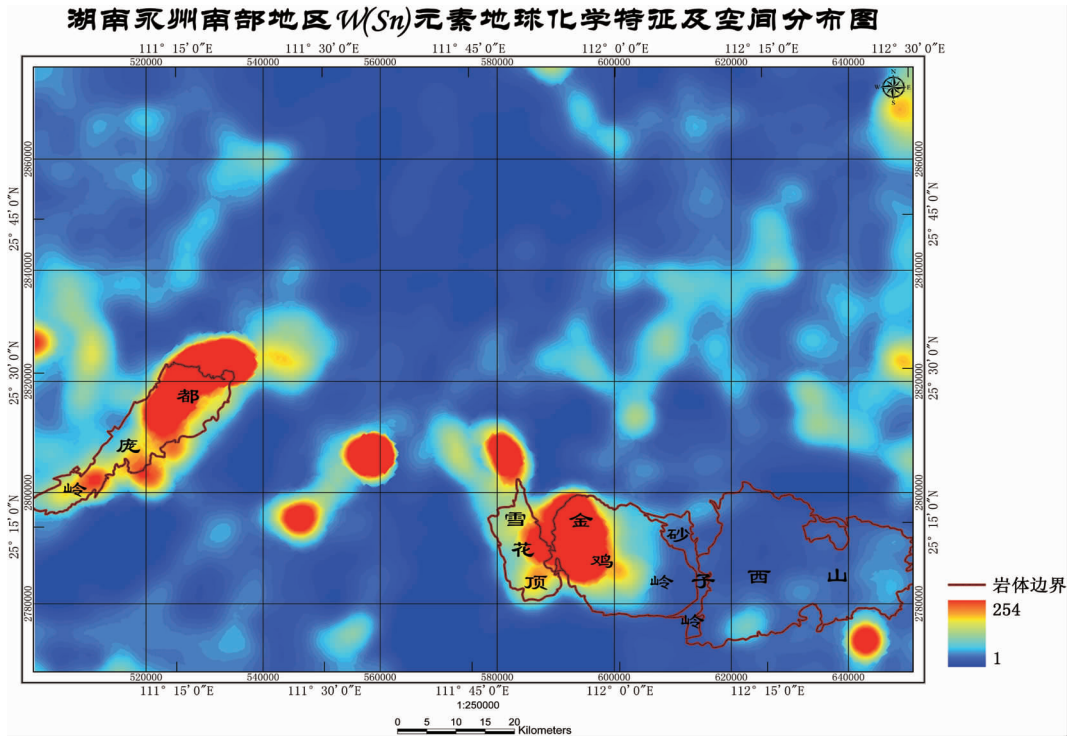


图 7 湖南永州南部地区 W(Sn)元素地球化学特征及空间分布图

Fig.7 Map of geochemical property and spatial distribution of W(Sn)elements in southern Yongzhou, Hunan Province

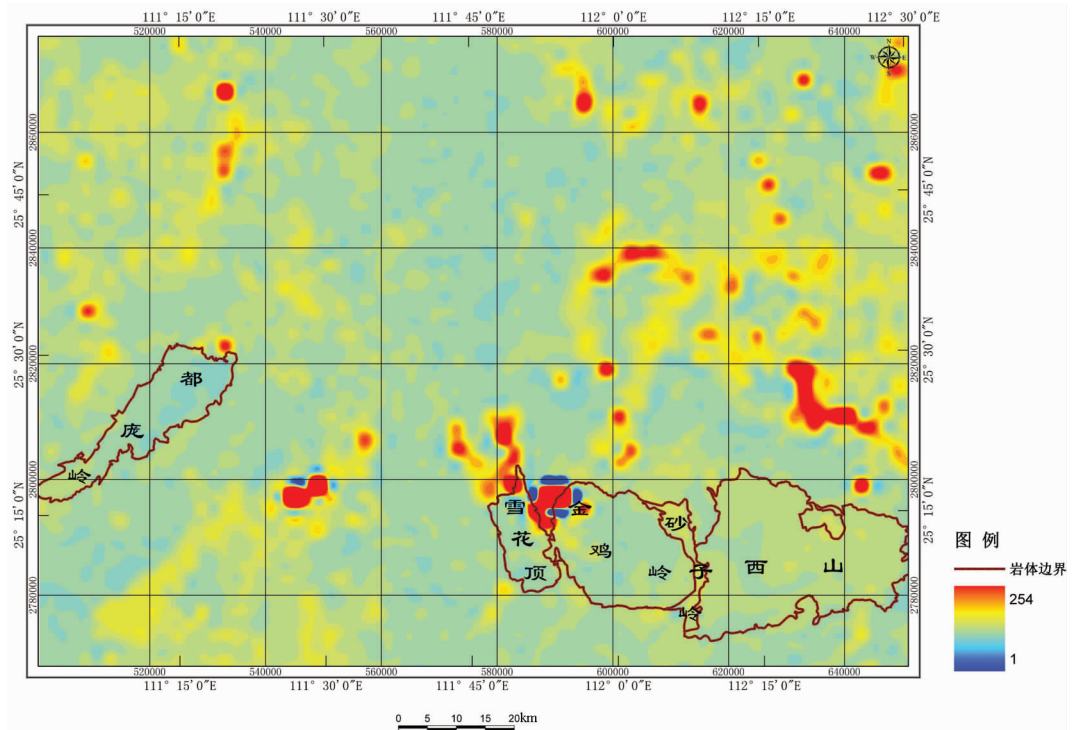


图 8 湖南永州南部地区 Zn(Cu,Pb)元素地球化学特征及空间分布图

Fig.8 Map of geochemical property and spatial distribution of Zn(Cu, Pb)elements in southern Yongzhou, Hunan Province

4 地化遥多源信息综合与分析

4.1 多源信息的比较与分析

据图 4 断裂构造优益度显示,研究区内断裂构造格架以北东、南北向最为发育,规模也比较大、成带出现,次级构造为北西向及近东西向。控矿构造多分布在中部,呈北东、南北及北西向。根据图 5 显示,蚀变(羟基)信息高值区分布零散,成片地分布在都庞岭岩体东侧接触带、雪花岭-金鸡顶-西山近东西向的岩体附近。图 7~8 元素分布特征显示,W(Sn)元素高值区主要有 3 块,左侧与都庞岭岩体产出位置较吻合,分布范围也与岩体形态相似;右侧高值区主要位于雪花顶及金鸡岭岩体内;中间两个高值区呈规模较小的点状,分布在铜山岭岩体周边。Zn(Cu、Pb)元素高值区规模相对较小且零散,主要分布在图幅东侧,在雪花顶及金鸡岭岩体间、铜山岭岩体周边形成一个小规模的高值区。就区内岩体而言,都庞岭岩体及其周边高羟基分布区 W(Sn)元素含量较高,构造也比较发育;而在雪花顶、金鸡岭岩体间,羟基异常值高、W(Sn)及 Zn(Cu、Pb)元素均形成高值区,但以 W(Sn)高值区规模大,构造不发育。

4.2 基于证据权重法的多源信息融合与可视化

4.2.1 证据权重模型的构建

证据权重法是加拿大数学地质学家 F.A. Agterberg 提出的一种地学统计方法,在假设条件独立的前提下开展综合证据因子的定量预测^[20]。它采用统计分析模式,将与成矿相关的每一种地学信息视为一个独立的证据因子,再通过对证据因子的叠加复合分析求取其权重值,判定研究区内每一网格单元含矿概率。其数学原理及实施步骤主要包括前

验概率、证据权重及后验概率计算。

(1) 前验概率计算

假设研究区的面积(以单元格为单位)为 $A(T)$,每个矿点所占的单元格面积为 u ,则研究区单元格数目 $N(T)=A(T)/u$,其中 T 表示研究区;若研究区内的矿点数为 $N(D)$,则随机选取一个单元格中矿点的前验概率为 $P(D)=N(D)/N(T)$,几率为 $O(D)=P(D)/[1-P(D)]$ 。

(2) 权重计算

对任一个证据因子二值专题权重定义为:

$$W^+=\ln\{P(B/D)/P(B/D^c)\}, W^-=\ln\{P(B^c/D)/P(B^c/D^c)\}$$

式中 W^+ 、 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,权重值为 0。 B^+ 为因子存在区的单元数、 B^- 为因子不存在区的单元数,证据层与矿床(点)的相关程度为: $C=W^+-W^-$ 。

(3) 后验概率计算

以多源信息构建证据层,在保证各证据因子之间相对于矿点分布满足条件独立环境下,通过证据层叠加分析计算预测区概率,其后验概率为:

$$O=\exp\left\{\ln\left|\frac{D}{1-D}\right|+\sum_{j=1}^n W_j^k\right\}, \text{式中 } \sum_{j=1}^n W_j^k \text{ 为第 } j \text{ 个因子的权重。}$$

针对地、化、遥解译分析数据,根据区内典型矿床主要控矿因素分析,提取出断层构造优益度、断层 2.5 km 缓冲区、羟基蚀变异常、W-Sn-Cu-Pb-Zn 等元素化探异常等证据因子,通过证据权、后验概率计算,最终获取各证据层的权值,并转化为构造、蚀变及化探权重百分比(表 3)。

表 3 各证据因子的权重值
Table 3 Weights of evidence factors

序号	证据因子名称	正权重值	负权重值	C 值	证据因子权重百分比/%	
					W、Sn 组	Cu、Pb、Zn 组
L1	断层构造优益度	0.687	-0.325	1.012	29.6	24.4
L2	断层 2.5km 缓冲区	0.542	-0.249	0.791		
L3	羟基蚀变异常	0.912	-0.325	1.237	20.3	16.7
L4	W 化探异常	1.026	-0.638	1.664	50.1	
L5	Sn 化探异常	0.958	-0.425	1.383		
L6	Cu 化探异常	0.895	-0.436	1.331	58.9	
L7	Pb 化探异常	0.956	-0.501	1.457		
L8	Zn 化探异常	1.125	-0.438	1.563		

4.2.2 信息融合的实现与可视化

以 ArcGIS9.3 为平台,将化探、断层构造(包括构造优益度和缓冲带)及遥感蚀变(羟基、铁染)信息设为 3 个独立的综合数据层,然后根据表 3 所示的各证据层因子权重百分比,分别构建 W(Sn)、Zn(Cu、Pb) 组基于证据权重法的多源信息融合暨可视化模型,其模型表达式如下:

$$RGB_{W(Sn)} = W(Sn) * 50.1\% + \text{断层构造值} * 29.6\% + \text{羟基蚀变信息} * 20.3\%$$

$$RGB_{Zn(Cu,Pb)} = Zn(Cu,Pb) * 58.9\% + \text{断层构造值} * 24.4\% + \text{羟基蚀变信息} * 16.7\%$$

融合后图像如图 9~10 显示,同种色调反映了成矿概率的一致性,即在某种色调范围内发现了某类矿,则在相同色调范围内的其他区域该矿成矿概率性较高;同时,合成色还反应了多要素控矿,且图像以哪一种色调为主则意味着其代表的找矿参数在成矿作用中占着主导地位。通过已知矿床(点)与融合图叠加分析,发现本区已知矿床(点)基本上分布在浅黄-粉红色调段。因此,研究区内,此种色调可视为成矿远景区或新的找矿靶区。

5 结论

利用湖南永州南部地区 ETM+遥感影像、1:20 万水系沉积物数据及地质资料,通过数据处理与分析,建立基于地质、遥感、化探方法的找矿参数证据层。以地理信息系统为平台,基于证据权重法进行多源信息融合,并按三原色机理设计、合成、显示综合图。本次主要通过以下手段并取得如下成果:

(1)本研究利用遥感解译断裂,构建了断裂构造优益度找矿参数,将断裂构造研究从定性分析上升到定量分析,并以图像的形式实现了参数的可视化,为寻找以构造为主要控矿因素的内生矿产提供方法支持。

(2)通过创建主成分分析+比值+主成分分析的蚀变信息提取方法,尽可能地减少了单一运用某种方法造成的误差,有效剔除了南方地区植被发育、湿度大及地形起伏高等造成的误差,最终提取结果准确显示:羟基高值区与岩体分布吻合较好。

(3)采用地统计学分析方法,将区内 5 种成矿元素按成因分为两类,运用克里格内插方法得出了两类元素地球化学特征及空间分布格局。

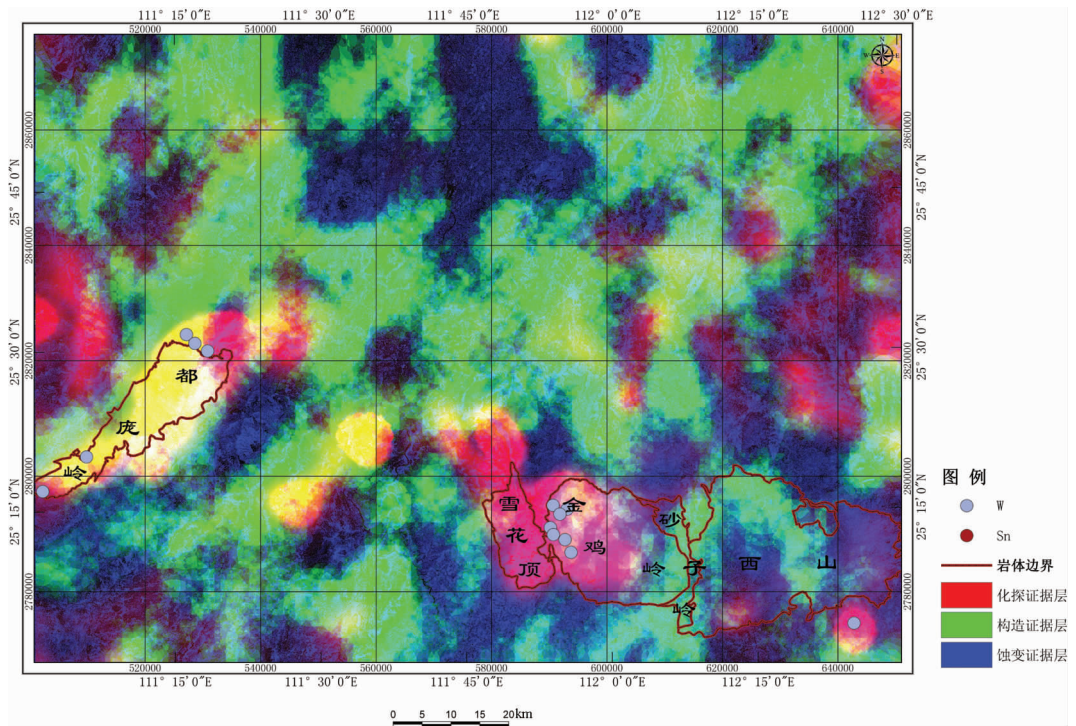


图 9 湖南永州南部地区 W(Sn)组化探-构造-蚀变信息合成图

Fig.9 Synthetic diagram of W(Sn)geochemical prospecting, structure and alteration in southern Yongzhou, Hunan Province

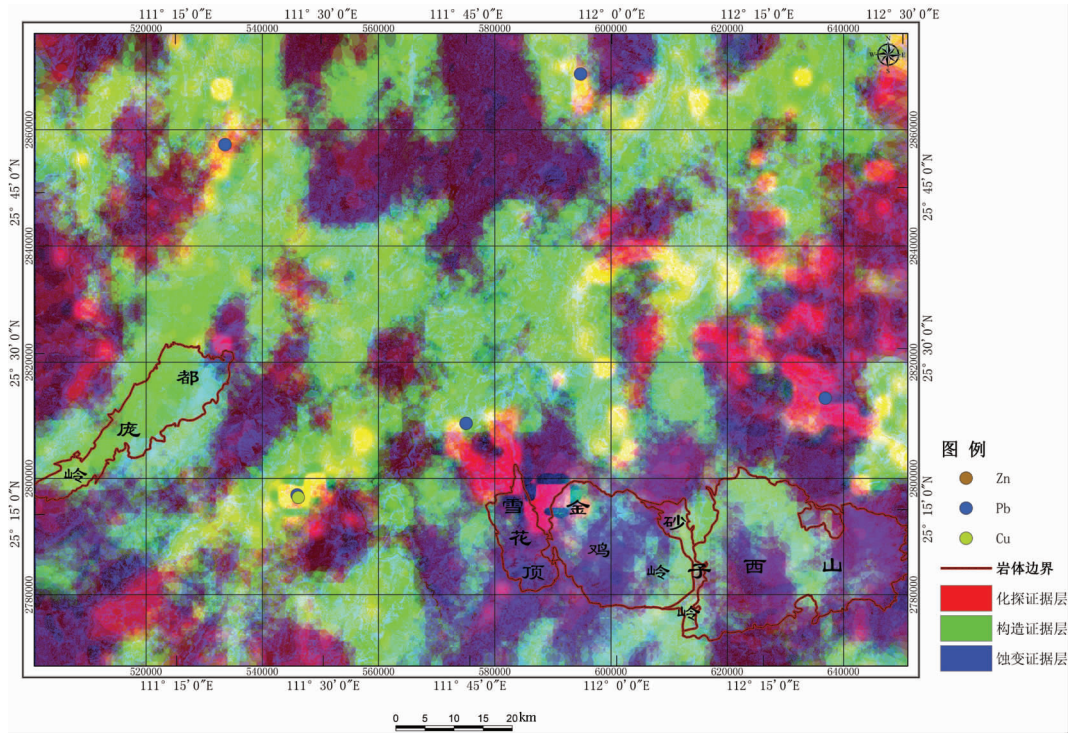


图 10 湖南永州南部地区 Zn(Cu, Pb)组化探-构造-蚀变信息合成图

Fig.10 Synthetic diagram of Zn(Cu, Pb) geochemical prospecting, structure and alteration in southern Yongzhou, Hunan Province

(4)以地理信息系统为平台,化探因子、构造因子及遥感蚀变因子为证据层,构建基于证据权重法的多源信息融合模型,基于三原色机理设计、合成及显示多源信息融合图。最后通过已知矿床(点)叠加分析,发现研究区内已知矿床(点)均出现在浅黄-粉红色区,并将该色调分布区划为成矿远景区。

参考文献 (References):

[1] 赵鹏大, 陈永清, 刘吉平, 等. 地质异常成矿预测理论与实践[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1999:1-2.
Zhao Pengda, Chen Yongqing, Liu Jiping, et al. Theory and Practice of Geoanomaly in Mineral Exploration [M]. Wuhan:China University of Geosciences, 1999:1-2 (in Chinese with English abstract).

[2] 方宏兵, 李志中. 遥感化探信息综合分析在地质找矿中的应用研究 [J]. 国土资源遥感, 1998, 38(4):33-36.
Fang Hongbing, Li Zhizhong. The application of integration of remote sensing and chemical exploration information analysis to studying geological mineral deposit prediction [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 1998, 38(4):33-36(in Chinese with English abstract).

[3] 植起汉, 张远飞, 朱谷昌. 多源地学数据综合处理技术在金属矿

产预测中的应用[J]. 国土资源遥感, 1990 (2):8-12.
Zhi Qihan, Zhang Yuanfei, Zhu Guchang. Application of integration processing technique for multisource geoscientific-data inpreoicting for metal mineraldeposits [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 1990,(4) :8-12(in Chinese with English abstract).

[4] 刘磊, 张兵, 周军, 等. 云南思姑锡矿区地质、化探、遥感多元信息综合找矿研究[J]. 地质与勘探, 2008, 44(5):70-75.
Liu Lei, Zhang Bing, Zhou Jun, et al. Synthetic analyses of remote sensing geochemical surveying and geology in the ore exploration in the Sigu tin deposit,Yunnan Province [J]. Geology and Prospecting, 2008, 44(5):70-75(in Chinese with English abstract).

[5] 杨自安, 彭省临, 刘悟辉, 等. 高寒山区遥感与化探综合找矿信息的提取[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(4):1121-1126.
Yang Zian, Peng Shenglin, Liu Wuhui, et al. Extraction of remote sensing and geochemical prospecting information in high and cold mountainous areas [J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2009, 40(4):1121-1126(in Chinese with English abstract).

[6] 刘荫椿, 董晓辉, 刘志杰. 基于 GIS 的金矿多源地学信息复合处理及应用[J]. 黄金地质, 1997, 3 (1):63-66.
Liu Yinchun, Dong Xiaohui, Liu Zhijie. The combination process and application of gold deposit polygenic information based on GIS [J]. Gold Geology, 1997, 3 (1):63-66 (in Chinese with English

- abstract).
- [7] 曾志远. 卫星遥感图像计算机分类与地学应用研究[M]. 北京:科学出版社, 2004:492-495.
Zeng Zhiyuan. Reseach on Computer Classification of Satellite Images and Application in Geoscience [M]. Beijing:Science Press, 2004:492-495(in Chinese with English abstract).
- [8] 方洪宾, 赵福岳, 和正民, 等. 1:25 万遥感地质填图方法和技术[M]. 北京:地质出版社, 2002.44-46.
Fang Hongbin, Zhao Fuyue, He Zhengmin, et al. 1:250000 Method and Technology of Remote Sensing Geological Mapping [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 44 -46 (in Chinese with English abstract).
- [9] 赵不忆, 秦小光. 遥感构造的定量分析方法[J]. 地质科技情报, 1988, 7(1):127-136.
Zhao Buyi, Qin Xiaoguang. The method of quantitative analysis of remote sensing structure [J]. Geological Science and Technology Information, 1988, 7(1):127-136(in Chinese with English abstract).
- [10] Crosta A, Moore J. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State , Brazil :a prospecting case history in Greenstone belt terrain [C] // Proceedings of the 7th ERIM Thematic Conference:Remote sensing for exploration geology, 1989:1173-1187.
- [11] Crowl E Y, James K. HUBBARD, Bernard E, et al. Hydrothermal Alteration on the cascade stratovolcanoes:A remote sensing survey [J] . Geological Society of America Abstracts with Programs, 2003, 35 (6):552.
- [12] 张远飞, 吴健生. 基于遥感图像提取矿化蚀变信息[J]. 有色金属矿产与勘查, 1999, 8 (6):604-606.
Zhang Yuanfei, Wu Jiasheng. Extraction of mineralization and alteration information from remote sensing images [J]. Geological Exploration for Non -Ferrous Metals, 1999, 8 (6):604 -606 (in Chinese with English abstract).
- [13] 刘素红, 马建文, 蔺启忠. 通过 Gram2Schmidt 投影方法在高山区提取 TM 数据中含矿蚀变带信息 [J]. 地质与勘探, 2000, 36 (5):62-65.
Liu Suhong, Ma Jianwen, Lin Qizhong. Depicting the hydro -thermal alterations of high mountains in multi -spectral data via gram -schmidt projection method [J]. Geology and Prospecting, 2000,36 (5):62-65(in Chinese with English abstract).
- [14] 党安荣, 王晓栋, 陈晓峰, 等. 遥感图像处理方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2003:116-117.
Dang Anrong, Wang Xiaodong, Chen Xiaofeng, et al. The Method of Remote Sensing Image Processing [M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2003:116-117(in Chinese with English abstract).
- [15] 荆凤, 陈建平. 矿化蚀变信息的遥感提取方法综述[J]. 遥感信息, 2005, 2:62-65.
Jing Feng, Chen Jianping. The review of the alteration information extraction with remote sensing [J]. Remote Sensing Information, 2005, 2:62-65(in Chinese with English abstract).
- [16] 张玉君, 曾朝铭, 陈薇. ETM+~(TM) 蚀变遥感异常提取方法研究与应用——方法选择和技术流程[J]. 国土资源遥感, 2003, 2:44-49.
Zhang Yujun, Zeng Zhaoming, Chen Wei. The methods for extraction of alteration anomalies from the ETM+~(TM) data and their application—method selection and technological flow Chart[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2003, 2:44-49(in Chinese with English abstract).
- [17] 张宝平, 张玉明. 遥感蚀变信息提取方法在西天山班禅沟一带铜、铁矿找矿中的应用[J]. 矿产与地质, 2007, 21(1):90-93.
Zhang Baoping, Zhang Yuming. Application of remote sensing alteration information extraction to copper and iron deposit exploration in Banchangou region,western Tianshan [J] . Mineral Resources and Ceology, 2007, 21 (1):90-93 (in Chinese with English abstract).
- [18] 赵元洪, 张福祥, 陈南峰. 波段比值的主成份复合在热液蚀变信息提取中的应用[J]. 国土资源遥感, 1991, 9(3):12-17.
Zhao Yuanhong, Zhang Fuxiang, Chen Nanfeng. The application of principal component integration of band ratios to extracting hydrothermal alteration information[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 1991, 9(3):12-17(in Chinese with English abstract).
- [19] 王仁铎, 胡光道. 线性地质统计学[M]. 北京:地质出版社, 1988:123-126.
Wang Renduo, Hu Guangdao. Linear Geological Statistics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988:123-126 (in Chinese with English abstract).
- [20] 张征, 张人权, 徐恒力, 等. 定量预测岩溶含水介质渗透性空间分布的克立格法[J]. 中国岩溶, 1995, 14(3):1-8.
Zhang Zheng, Zhang Renquan, Xu Hengli, et al. Estimation of spatial distribution of permeability in Karst water-bearing media by Kriging[J]. Carsologica Sinica, 1995, 14 (3):1-8(in Chinese with English abstract).
- [21] Spector A, Pichette R J. Applications of the aeromagneticme-tod to lead exploration in SE Missour [C]//Kisvarysanyl G,Grant S K, Pratt W P,et al. International conference on Mis-sissippi valley -type lead-zinc deposits. University of Missouri -Rolla, Missouri, 1983:596-603.

The application of multi-source information fusion based on remote sensing to ore prospecting prediction in southern Yongzhou of Hunan Province

LEI Tian-ci, CUI Fang, YU Feng-min

(*Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources, Wuhan 430205, Hubei, China*)

Abstract: With the ETM + image as the information source in southern Yongzhou area, two ore-prospecting parameters of remote sensing, i.e., advantage grade of fault structure and alteration mineral information, were built through the information extraction, visual interpretation and quantitative analysis. W, Sn, Cu, Pb and Zn elements in the working area were chosen to perform data-processing, correlation-analyzing and factor-analyzing and, as a result, the map of geochemical property and spatial distribution of metallogenic elements was drawn and geochemical exploration parameters were built. On the basis of the GIS platform, the ore-forming characteristics and mutual relationships of the prospecting factors were revealed through multi-source information fusion, analysis and visualization in combination with geological, remote sensing and geochemical exploration methods for multi-source information fusion, source analysis and visualization of the prospecting parameters. A set of multi-source information comprehensive prospecting technologies was established, which is helpful to predicting ore resources and optimizing metallogenic target areas.

Key words: southern Yongzhou in Hunan Province; multi-source information fusion; remote sensing; advantage grade

About the first author: LEI Tian-ci, male, born in 1977, master, engages in mineral exploration and survey; E-mail: leitianci@126.com.