# 基于光谱和纹理的 SVM 矿化蚀变 信息提取研究

薛云<sup>1,2</sup>,戴塔根<sup>1</sup>,杨自安<sup>3</sup>,邹林<sup>3</sup>,刘江龙<sup>1</sup>

(1. 中南大学 地学院,长沙 410083; 2. 湖南城市学院, 湖南 益阳 413000;

3. 有色地质调查中心, 北京 100814)

摘 要: 针对传统矿化信息提取方法单一,利用光谱或纹理、信息量相对较少、需要大量样本的 缺陷,利用基于光谱和纹理的支持向量机(SVM)原理,建立矿化信息提取模型。选择青海泽库县 析界日地区作为典型研究区。首先提取研究区光谱和纹理信息,选取训练样本;然后求解最优超 平面,进而确定决策函数;最后泛化推广识别其他待识别的样本。通过所提取的遥感蚀变异常信 息与重砂异常点叠加分析,叠加基本吻合;从野外实地验证来看,均发现了不同程度的矿化现象, 并指出了5个重点异常区。

关键词: 支持向量机; 矿化蚀变; 光谱特征; 纹理特征; 析界日地区; 青海省 中图分类号: P627 文献标识码: A 文章编号: 100-1412(2008)03-0254-06

## 0 引言

目前,基于像元光谱和目视解译的矿化信息提 取方法广泛应用。但是,基于像元光谱的信息提取 方法只能够根据光谱信息提取对象,忽略了大量的 空间信息<sup>[1,2]</sup>;目视解译方法主要利用遥感图像的纹 理和结构信息,它要求有丰富的专业经验和充足的 野外实地调查资料且效率低下<sup>[3]</sup>。所以,基于像元 光谱的信息提取方法的不足和目视解译信息提取的 缺陷使矿化信息提取很难达到理想的效果。而且, 现有矿化信息提取方法主要是以传统统计学为基 础,其统计方法只有在样本数量趋于无穷大时才能 有理论上的保证,而在实际问题中,样本数往往是有 限的,同样也会影响提取的效果。

本文综合考虑基于像素的光谱和基于空间特性 的纹理和结构信息,利用基于光谱和纹理的 SVM 原理,建立矿化信息提取模型。选取青海泽库县析 界日地区为研究区,进行矿化蚀变信息提取试验。

## 1 研究方法与数据来源

1.1 纹理特征简介

单纯的光谱信息是最基本的信息,只反映单个 像元的特征。人们经常通过纹理分析来区分数字图 像中不同的空间特征。纹理特征包括直方图特征、 局部统计特征、频谱特性和灰度共生矩阵特征等。 灰度共生矩阵纹理特征是目前应用最多的特征。灰 度共生矩阵首先由 H aralick 等<sup>[4]</sup>提出,以研究沿一 定方向(右、下、右上和左下)相隔一定距离的像元之 间相关关系为目的。先依据影像的灰度级数和灰度 变化情况计算出各个方向任意两个灰度级相邻出现 的概率矩阵即灰度共生矩阵,再将该矩阵做对称化 和归一化处理,得到灰度联合矩阵<sup>51</sup>。人们往往不 是直接应用灰度共生矩阵,而是在灰度共生矩阵的 基础上再提取纹理量。最初,Haralick 等定义了 14 个纹理量,在遥感图像分析中比较重要的主要是对 比度、熵、相关、角二阶距、同质性和方差等 6 个纹理

收稿日期: 2007-08-29; 改回日期: 2008-07-30

基金项目: 中国地质调查项目(编号: 1212010660601)资助。

作者简介: 薛云(1972),男,湖南桃江人,博士研究生,国土信息工程专业,从事遥感与地理信息系统方面的研究工作。通信地址:湖南 长沙左家垅,中南大学校本部研究生北楼 203 号,邮政编码: 410083, E-mail: yunxu e1209@ 163. com

量<sup>[6]</sup>。具体选择哪些纹理量要看图像的光谱分辨 率、空间分辨率和探测目标的特征。

#### 1.2 支持向量机基本原理

支持向量机是在统计学习理论的基础上发展起 来的一种新型机器学习算法。该算法是根据结构风 险最小化原则进行学习,是一种由有限训练样本取 得的决策规则对独立的测试集仍能够取得小误差的 方法;同时,它将优化问题转化为求解一个凸二次规 划的问题,能够保证找到的极值解就是全局最优解; 另外,它运用核函数巧妙地解决了维数问题,使得算 法的复杂度与样本维数无关。SVM的优越性能引 起人们极大的研究兴趣,它被越来越多的图像处理 研究者和工作者所应用。

支持向量机的基本思想可用图 1 说明。图中, 实心点和空心点代表两类样本, H 为分类线, H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>分别为过各类样本中离分类线最近的样本且平 行于分类线的直线, 他们之间的距离叫做分类间隔 (Margin)。概括地讲, SVM 通过最优分类超平面, 不但能将两类样本正确分开, 而且能使两类的分类 间隔最大, VC 维最小, 从而达到使真实风险最小。 支持向量机(SVM)主要包括线性支持向量机和非 线性支持向量机。对非线性问题, 能把样本非线性 映射到高维核空间, 在高维核空间创建具有低 VC 维的最优分类超平面。它通过综合考虑经验风险和 置信范围的大小, 根据结构风险最小化原则取其折 衷, 从而得到风险上界最小的分类函数。

在线性可分的情况下,设线性可分样本集为  $(x_i, y_i) i= 1, 2, ..., n; x \in R^2, y \in \{+1, -1\}$ 是类别 标号。通过求解一个约束条件下的极值问题,然后 转化成它的对偶问题,就会得到简化的不等式约束 极值问题,最终得到最优分类函数:



图 1 支持向量机的基本思想



$$f(x) = \operatorname{sgn}\{\sum_{i=1}^{n} a_{i}^{*} y_{i}(x_{i}, x) + b^{*}\}$$
(1)

其中, sgn()为符号函数;  $a_i^*$ 为最优解;  $b^*$ 是分 类的域值。

若训练集是线性不可分的,或事先不知道它是 否线性可分, Vapnik 和 Cones<sup>[7]</sup> 引入了非负松弛变 量 $\xi(i = 1, 2, ..., n)$ 来允许错分样本的存在,并对错 分样本进行惩罚。

而在实际分类问题中,分类问题往往是一个非 线性的问题,理想的分类面应该是非线性的。对非 线性问题,可以通过非线性变换将非线性问题转化 为某个高维空间中的线性问题,在变换后的高维空 间中求其最优分类面<sup>[8]</sup>。支持向量机理论通过引入 核函数巧妙地解决了低维输入空间向高维特征空间 映射的问题。对于满足 Mercer 条件的核函数 *K* (*x*<sub>i</sub>, *x*<sub>j</sub>),最优分类函数是:

$$f(x) = \operatorname{sgn}\{\sum_{i=1}^{m} a_i y_i k(x_i, x+b)\}$$
(2)

常用的核函数主要有:多项式核函数、RBF 径 向基函数、Sigmoid 核函数等。

#### 2.3 数据来源

研究区遥感数据为 Landsat 7 号卫星的 ET M, 景号为 132-35, 1999 年 8 月 1 日获取的影像,太阳 高度角为 62.1°。根据研究区图像数据的统计特征, 可以看出波段 1, 2, 3, 4, 5, 7 的像元平均值较大,波 段 5 的方差最大,信息含量多,波段 1 的方差最小, 信息含量相对较少。

## 3 研究区概况

析界日地区位于青海省泽库县东北部的瓦勒 根,地处北纬 35°20′~ 35°30′,东经 101°30′~ 101° 45′,面积 370 km²,已知矿化有金、银、铅、砷、钴、钨、 多金属矿化。

区内出露地层主要是下三叠统上段(T<sup>1</sup>)砂岩、 板岩夹灰岩,中三叠统下段(T<sup>1</sup>)砂岩、板岩夹灰岩 透镜体,上段(T<sup>1</sup>)砂岩、板岩及不稳定复成分砾岩, 上三叠统(T<sub>3</sub>)中性熔岩及火山碎屑岩,第三系中新 统(N<sub>2</sub>)泥岩、粉砂岩夹泥灰岩、砂岩。区内断裂主 要呈NW向,具有控岩、控矿特征,控制着矿化带的 分布。岩浆岩主要为燕山期花岗岩、斑状黑云母花 岗岩和花岗闪长岩,多呈岩株或岩基产出(图 2)。



图 2 析界日地区地质图

Fig. 2 Geological map of Xijieri area

第四系中更新统冰川堆积物 2. 第三系中新统泥岩、粉砂岩、砂岩 3. 上三叠统中酸性熔岩及火山碎屑岩 4. 三叠系中统砂岩、板岩及不稳定复杂成分砾岩 5. 中三叠统砂岩、板岩夹灰岩透镜体,局部夹中性熔岩 6. 下三叠统砂岩、板岩,偶夹中酸性火山碎屑岩 7.肉红色细粒花岗岩 8.肉红色斑状黑云母花岗岩 9. 灰白- 灰色花岗闪长岩 10. 花岗斑岩脉 11. 花岗闪长岩脉 12. 闪长岩脉 13. 断裂 14. 地质界线 15. 重砂测量高值点

# 4 基于纹理和光谱的 SVM 矿化信息 提取

#### 4.1 数据预处理

对图像进行包括大气校正、几何校正和地理配 准等的数据预处理。因为 TM 图像的每个像元值 是灰度值,需将它转换为反射率值,具体转换公式 为<sup>[9]</sup>:

$$L = gain \times DN + bias$$
(3)  
$$\rho = \pi L d^{\frac{2}{5}} / (E^{0} \cos \theta)$$
(4)

其中, L 是地物在大气顶部的辐射亮度; DN 是像元 灰度值; 增益(gain) 和偏移值(bias) 从头文件中得 到;  $\rho$ 是地物反射率; ds 为日地天文单位距离;  $E_0$  为 大气顶部的太阳辐照度;  $\theta$  为成像时的太阳天顶角, 从图像的头文件中读取。然后将反射率转换为 SVM 支持的格式。

4.2 图像纹理特征的提取
图像纹理特征提取的主要步骤如下:

(1) 图像融合。试验区图像采用 ETM7(R),

ETM 4(G), ETM1(B)3 波段合成图像(分辨率为 30 m)与 ETM8 波段(分辨率 15 m)的融合图像。融合 图像是采用 HIS 正变换(蒙塞尔空间变换)获得。 即 R, G, B 空间与 H(色度), I(明度), S(饱和度)之 间的数学变换。融合后的图像既保留了多波段图像 丰富的色彩信息,又提高了图像的精度(分辨率达 15 m),使图像更加清晰、细腻。

(2)用灰度共生矩阵提取图像纹理特征。窗口 大小、计算的步长、像素对的相对方向是影响共生矩 阵计算结果的 3 个因素。另外纹理特征的选取也是 影响提取结果的因素。根据吴樊等的研究成果<sup>[10]</sup>, 并通过反复试验比较,最后选用距离为 1,方向为 45°,窗口为 11×11,灰度级为 32 时的纹理方差这个 纹理量作为下一步提取矿化信息的纹理特征。

(3) 纹理统计值与光谱信息的组合。通过 EN-VI 4.1 把 ET M + 5, ET M 7, 方差的 RGB 共 9 个波 段的数据组合起来, 作为 SVM 矿化信息提取的基 础数据。

#### 4.3 SVM 矿化信息的提取

(1)样本的选取。研究工作的样本选取是根据已知的矿床(点)地质资料并结合在析界日地区的野外遥感地质调查成果,确定本研究区所要提取的信息主要为含铁离子的蚀变矿物(简称 化矿物)。含铁离子的蚀变矿物主要选取褐铁矿、黄铁矿的矿物光谱;含羟基的蚀变矿物主要选取高岭土、绿泥石、蒙脱石的矿物光谱,将这些矿物的标准光谱重采样成 TM 6个波段的波长光谱(图3)作为反映铁离子和羟基离子变化信息的提取光谱;然后在预处理时得到的反射率图像上通过光谱角算法,把铁化和泥化蚀变的矿化样本分别控制在 200 个左右。由于 SVM 对上述信息的提取还需要与其他未知类别来参与分类,先进行



图 3 典型矿物 TM 宽度光谱



K-MEANS 非监督分类, 通过矿产地质图以及野外 实地调查发现的典型矿化蚀变矿物的标准光谱重采 样后的光谱进行对比分析, 可选取出其他的类别, 本 次实验总共分为 8 个其他类别, 加上铁化和泥化样 本, 从而确定用来参与分类的类别主要有 10 类。每 类样本控制在 200 个左右。最后把所有样本都配准 到纹理光谱组合的图像上。

(2)模型选择。选择合适的核函数参数和误差 惩罚因子 C 对 SVM 的性能至关重要。Vapnik 等 人的研究表明, SVM 的性能与所选用的核函数的类 型关系不大, 而核函数的参数和误差惩罚因子 C 是 影响 SVM 性能的主要因素<sup>[11]</sup>。本次工作采取一对 一的多类分类算法, 选择 RBF 作为核函数, 利用目 前较流行的网格搜索和交叉验证方法来选取核参数 和惩罚因子。

(3)构造 SVM 分类器模型。利用上一步选取 的核函数和最佳参数对对选取的训练样本集进行训 练,从而构造本次矿化蚀变遥感信息的 SVM 分类 器模型。

(4) 矿化蚀变遥感信息提取。对机器进行训练 之后, 就可用训练好的 SVM 分类器模型对工作区 整个纹理光谱组合影像进行信息提取, 即读取每个 纹理光谱组合影像像元 9 个波段像元值构成的矩 阵, 进行分类后将数据反演, 输出提取结果, 即可得



#### 图 4 析界日遥感蚀变异常图

Fig. 4 The remotely sensed alteration anomly map of Xijieri area 方框为重点异常区

到所需要的矿化蚀变遥感信息(图4)。

## 5 提取结果评价

通过利用1:50 000 地质矿产图提取24 个重 砂测量高值点,并与所提取的铁化泥化异常图进行 空间叠合分析,可以看出,在重砂测量高值点的周围 铁化泥化异常现象比较发育,所提取的矿化信息与 重砂异常点叠合较好。

另外,利用提取结果,野外实地验证了6个点 (表1),均发现了不同程度的矿化现象。

析界日地区断裂主要为 NW 向, 具有控岩、控 矿特征, 控制着矿化带的分布。岩浆岩主要为燕山 期花岗岩、斑状黑云母花岗岩和花岗闪长岩, 多呈岩 株或岩基产出。将遥感蚀变异常及筛选出的遥感异 常区(图 4) 与图 2 对照可以看出, 异常总体上呈 NW 向展布, 与区内断裂构造、岩体及接触带关系密 切, 显示了该区具有良好的找矿前景。根据异常分 布特点及地质特征、成矿地质条件分析, 初步筛选出 5 个重点异常区(I, II, III, IV, V)。通过本次的遥感 实地调查工作初步查明了各异常区的异常成因和地 质背景:

> I区:重砂异常较多,主要为铜、金、 钼、锡、钨矿化。出露的燕山期斑状黑云 母花岗岩、花岗闪长岩脉及闪长岩脉能 够提供大量含矿热液,地层为含砂板岩 及复成分岩石组合,具接触交代作用条 件,且有关化探异常、重砂异常亦有显 示。应关注岩体接触带及岩体内部,寻 找夕卡岩型矿床。

> II 区: 出露恰力曲砷金矿点, 铁化、 泥化异常呈 NW 向带状展布明显, 与区 域内构造线一致。异常区西部及南西部 出露的斑状黑云母花岗岩可能在深部连 为一体, 形成岩基, 携带大量含矿热液。 异常南西部有 NW 向断裂通过, 构成良 好的热液迁移通道和矿体沉淀就位场 所。同时地层岩石组合为砂板岩夹灰岩 及火山岩, 具有接触交代作用的条件。 应注意寻找构造蚀变岩型金矿和夕卡岩 型矿床。

> III 区:已知矿点为瓦勒根锑金矿床, 重砂异常已有清晰显示。矿化应与出露

的燕山期花岗斑岩脉关系密切,地层岩石为为砂板 岩夹灰岩及火山岩岩石组合,具接触带成矿的地质 条件。值得注意的是砷元素化探异常在本区也有良 好显示,砷异常形态较规则,出现浓集中心。这些说 明本区具热液蚀变作用发生。应注意寻找夕卡岩型 锡石矿床,同时还应注意低温热液金矿床。

Ⅳ 区:本区内出现 3 处锡石重砂异常,遥感异 常大面积出现,表明蚀变作用较为强烈。此与异常 区北部、西部出露的燕山期花岗闪长岩和斑状黑云 母花岗岩关系紧密, 岩体携带热液, 地层为砂板岩夹 灰岩及火山岩岩石组合。同时 NW 向断裂发育, 为 热液运移提供良好通道, 而且野外可见硅化蚀变。 因此, 本区是找矿的有利地段。

V区:本区出露大片的中性火山岩及燕山期花 岗闪长岩,火山岩走向 NW 向,与区域构造线方向 一致。侵入岩与火山岩所携带的热量充分,可产生 强烈热液蚀变作用。同时,侵入岩与火山岩的接触 带也是找矿应注意的地段。

Table 1 Field test points in Xijieri 平面直角坐标 经纬度坐标 矿化蚀变现象 101.7333 17748197 3922997 褐铁矿化、粘土化 1 35 40551 2 17748113 3923007 101.7324 35.40562 褐铁矿化、粘土化、黄钾铁矾化 3 101.7293 35.40638 褐铁矿化、粘土化、黄钾铁矾化 17747829 3923084 4 17734602 3924511 101.5842 35, 42243 褐铁矿化 5 褐铁矿化、粘土化、黄钾铁矾化、碳酸盐化 17734542 3925443 101.5838 35.43084 6 17734579 3925547 101.5843 35.43176 褐铁矿化、粘土化

表1 析界日野外验证点

# 6 结论

(1)基于纹理和光谱的 SVM 矿化信息提取方 法综合考虑了基于像素的光谱和基于空间特性的纹 理和结构信息,充分利用了现有的遥感资料光谱分 辨率和空间分辨率,克服了传统上只利用光谱或者 只利用纹理,信息量相对较少的局限;用 SVM 提取 矿化信息,克服了传统的统计方法只有在样本数量 趋于无穷大时才能有理论上保证的缺陷,保证了矿 化信息提取的精度。

(2) 通过所提取的遥感蚀变异常信息与重砂异 常点叠加分析, 叠加基本吻合; 从野外实地验证来 看, 均发现了不同程度的矿化现象; 研究区所提取的 遥感蚀变信息异常总体上呈 NW 向展布, 与区内断 裂构造、岩体及接触带关系密切, 根据异常分布特点 及地质特征、成矿地质条件分析, 初步筛选出 5 个重 点异常区

(3)由于研究中采用的 ET M 影像的全色波段 仅有 15 m 的分辨率,若能把高空间分辨率的影像和 高光谱的影像结合起来,效果可能会更好,这方面的 工作还有待开展。

#### 参考文献:

- Zhang Y. Optimisation of Building Detection in Satellite Imagesby Combining Multispectral Classification and Texture Filtering[J]. PE& RS, 1999, 54: 50-60.
- [2] 张锦水,何春阳,潘耀忠,等.基于 SVM 的多源信息复合的高空间分辨率遥感数据分类研究[J].遥感学报,2006,10(1):49-57.
- [3] 黄慧萍,吴炳方,李苗苗.高分辨率影像城市绿地快速提取技术 与应用[J].遥感学报,2004,8(1):68-74.
- [4] Haralick R, Shanmugam B, Dinstein I. Texture Features for Image Classification, IEEE Trans. on Systems [J]. Man and Cybernetics, 3: 610–622.
- [5] 颜梅春,张友静,鲍艳松.基于灰度共生矩阵法的 IKONOS 影 像城市草地信息提取[J].测绘工程,2005,14(1):27-29.
- [6] Rao P V N, Sai M V R S, Sreenivas K, et al. Textural analysis of IRS-1D panchromatic data for land cover classification[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(17): 3327-3345.
- [7] Cortes C, Vapnik V. Support-vector networks[J]. Machine Learning, 1995.
- [8] Muller K R, Mika S, Ratsch G. An Introduction to Kernel-Based Learning Algorithms [C] # IEEE Transactions on Neural Networks, 2001.
- [9] 韦玉春,黄家柱. Landsat5 图像的增益偏置取值及其对行星反 射率计算分析[J]. 地球信息科学, 2006, 8(1): 111-113.
- [10] 吴樊, 王超, 张红. 基于纹理特征的高分辨率 SAR 影像居民区 提取[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(1): 148-152.
- [11] Vapnik V N(张学工译). 统计学习理论的本质[M]. 北京: 清 华大学出版社, 2000.

Central south university, Changsha 410083, China; 2. Hunancity university, Yiyang 413000, Hunan, China;
Nonferrous Metals Resource Geological Survey of China, Beijing 100814, China)

**Abstract:** Due to the singleness of the spectrum texture mineralization information extraction and less information extracted the principle of the spectrum texture based SVM is applied to set up the mineralization information extraction model. Xijieri area, Zeku county, Qinghai province is chosen as the test area. Firstly the spectrum and texture information was extracted and training sample pickod up, then the optimum hyperplane calculated and decision making function determined, lastly it is used to distinguish other samples to be distinguished. The extracted remote sensing anomly is basically coincided with the heavy mineral anomly and the more or less mineralization is recognized by field check. Five key anomalies are outlined. **Key Words:** support vector machine; alteration; spectrum; texture; Xijieri area