

引用格式:Zhao Xiaoxing, Qian Jianping, Qin Shunqiao, *et al.* Remote Sensing Prospecting in High Vegetation Coverage Area——A Case Study of the in Datuanbao Copper Ore Deposit and Its Environs, Jiangcheng, Yunnan Province[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(5): 879-889. [赵小星, 钱建平, 覃顺桥, 等. 云南江城大团包铜矿及外围高植被区遥感找矿预测[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(5): 879-889.]

云南江城大团包铜矿及外围高植被区遥感找矿预测

赵小星^{1,2}, 钱建平¹, 覃顺桥¹, 黄克宸¹, 韩 帅¹

(1. 桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林 541004; 2. 福建省地质调查研究院, 福建 福州 350013)

摘要:应用 ENVI4.6 软件, 对云南江城大团包铜矿及外围 ETM+ 遥感数据, 通过彩色合成、直方图拉伸进行信息增强处理, 运用主成分分析和监督分类法, 提取了高植被覆盖区遥感影像上铜、铅等植物地球化学异常信息。利用卷积滤波和形态学分析方法进行线性构造解译, 利用计盒维数法求得研究区的线性构造分维值, 得出本区线性构造具有良好的统计自相似性和分形特征。比较线性构造分维等值线图 and 植物地球化学异常图可知, 线性构造集中区与植被异常区基本吻合, 区内已知 80% 以上的矿点分布于植被异常和线性构造集中区。综合分析地层岩性、构造、矿点、线性构造分维等值线特征和遥感植被异常特征等信息, 圈出了 9 个三级找矿靶区。

关键词: ETM+ 遥感数据; 线性构造解译; 植物地球化学异常信息提取; 找矿预测

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2013)05-0879-11

1 引言

植物对铜、铅等多金属具有吸收和积聚作用, 铜、铅等多金属矿区上的植被由于吸收过量的成矿元素及伴生元素而表现出生态上的异常; 异常植被的波谱反射率与正常植被相比, 或高或低, 存在一定的差异; 反映在遥感图像上, 表现为异常植被和正常植被灰度值的差异, 即植被遥感异常; 因此, 在植被覆盖区可以通过与铜、铅等多金属矿化有关的异常植被信息提取矿化信息^[1]。与此相应, 线性构造则蕴含着与成矿有关的空间信息, 利用遥感图像上的线性信息, 可以获得野外地质调查不易发现的地表构造形迹。

2 研究区地质概况

2.1 研究区地质特征

研究区位于云南省南部边陲地区, 与老挝、越南接壤部位(图 1), 区内地表大部为植被覆盖, 山坡多

为森林和灌木及杂草区, 露头不好。

区域出露地层由老到新依次为石炭系、二迭系、三迭系、侏罗系、白垩系、第三系和第四系等。其中上石炭统为灰岩、白云岩、砂岩和粉砂岩; 下二叠统为灰岩、砂岩、板岩、砾岩、凝灰岩和页岩; 上二叠统为灰岩、凝灰岩及煤层、页岩夹岩屑砂岩; 中三叠统为泥岩、凝灰岩; 上三叠统为凝灰岩、灰岩和泥岩; 中侏罗统为泥岩、砂岩、砾岩和泥灰岩; 上侏罗统为砂岩、泥岩; 下白垩统为砂岩夹泥岩、砂岩; 上白垩统为砂岩和泥岩; 下第三系为砾岩、泥岩、砂岩和石盐钾盐岩; 上第三系为砾岩、粉砂岩和炭质粘土岩夹褐煤层; 第四系为砾石、粘土、砂砾层和砂等。其中侏罗系和白垩系砂岩为有利的赋矿岩性, 而其上下部泥岩为很好的地球化学障。

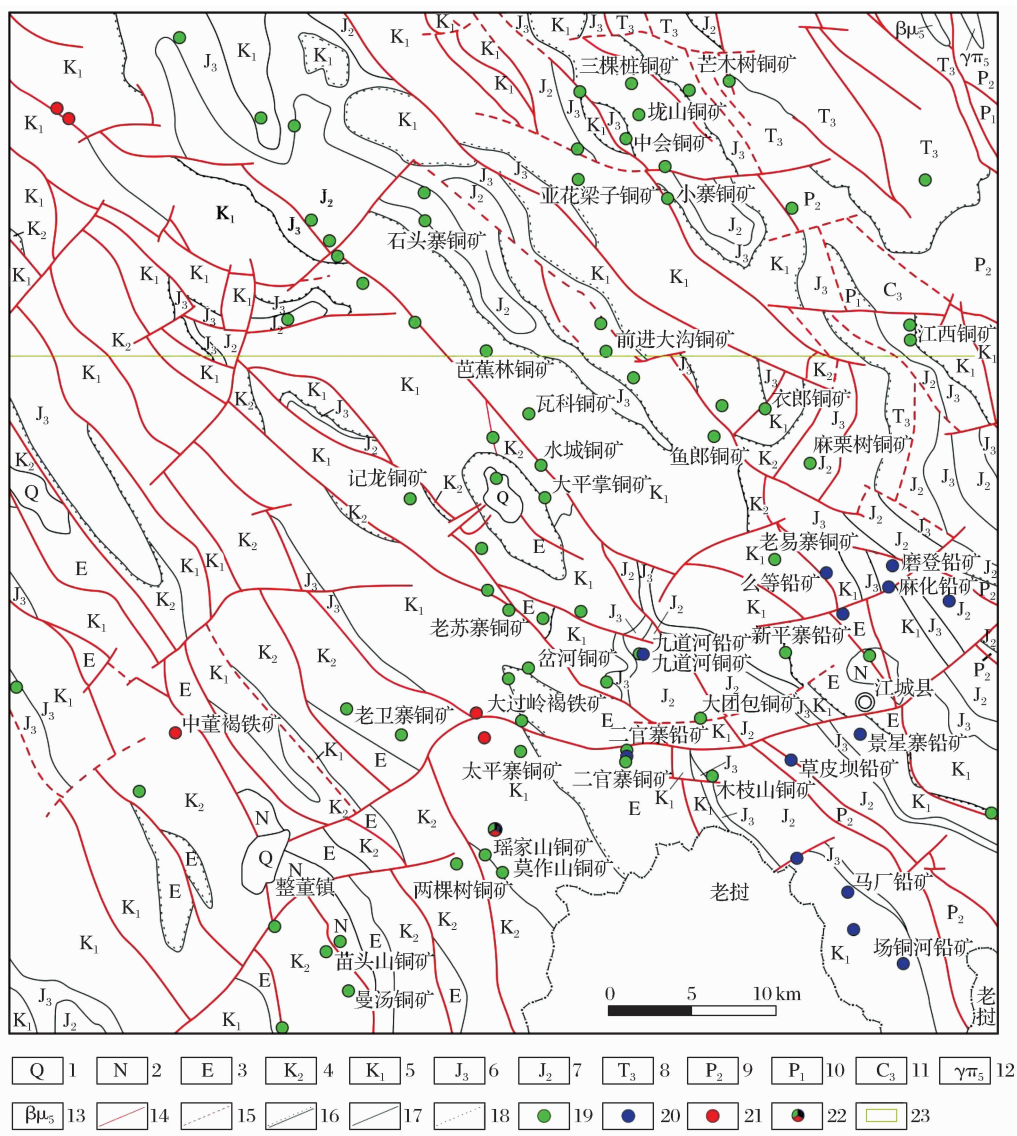
本区的大地构造位置位于藏滇地槽褶皱系横断山地槽褶皱带的兰坪—思茅上迭拗陷的南部, 经历了多次的地壳运动, 褶皱、断裂非常发育。

收稿日期: 2012-08-05; 修订日期: 2012-12-02

基金项目: 桂林理工大学广西矿冶与环境科学实验中心、广西隐伏金属矿产勘查重点实验室、中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室开放基金项目(200913)和云南省普洱市锦晟矿业投资有限公司项目资助。

作者简介: 赵小星(1984—), 男, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 主要从事遥感地质和构造地质方面的研究。E-mail: smallstars999@163.com。

通讯作者: 钱建平(1953—), 男, 安徽黄山人, 教授, 博士生导师, 主要从事成矿构造和构造地球化学方面的研究。E-mail: jpqian@163.com。



1. 第四系沉积物; 2. 上第三系; 3. 下第三系; 4. 上白垩统; 5. 下白垩统; 6. 上侏罗统; 7. 中侏罗统; 8. 上三叠统; 9. 上二叠统; 10. 下二叠统; 11. 上石炭统; 12. 燕山期斜长花岗斑岩; 13. 印支期辉绿岩; 14. 断层; 15. 推测断层; 16. 不整合界线; 17. 地层界线; 18. 推测地层界线; 19. 铜床(矿点); 20. 铅床(矿点); 21. 铁床(矿点); 22. 多金属床(矿点); 23. 遥感找矿预测范围

图 1 大团包铜矿区及外围区域地质图

Fig. 1 Regional geological map of Datuanbao copper ore deposit and its environs

区内褶皱具有明显的方向性,大部分为北西向,少数为南北向,呈紧闭线状褶皱为主。轴面多直立,个别轴面西倾或倒转。由于断裂破坏,区内褶皱出露不完整。

区内断裂构造十分发育,具多期活动性,按其方向可分为北西和北东两组。比较而言,北西向纵断层更为发育,其规模也较大,以压性为主;北东向横断层明显地切割北西向纵断层,其形成时期较晚,以张性为主。

本区岩浆岩活动不强烈,仅有少量印支期辉绿岩、燕山期斜长花岗斑岩、火山喷发所形成的火山碎屑岩和熔岩。其中火山碎屑岩和熔岩赋存层位(时

代)大致可分成海西早期、印支晚期和燕山期。印支晚期火山喷发活动比较强,而其他两期活动十分微弱。主要岩石类型为:燕山期为玻屑晶屑凝灰岩,角砾凝灰岩;印支晚期为英安斑岩、中酸性凝灰岩和沉凝灰岩;海西早期以安山质英安凝灰岩、中酸性沉凝灰岩为主。

2.2 已知矿床(矿点)地质特征

已知矿点多分布于构造活动强烈的区域,呈群、带状分布,矿种以铜矿为主。有两种矿化类型:一是沉积型铜矿,赋存于砂岩中,受层位控制;二是脉状铜矿,受构造破碎蚀变带控制,成矿元素来源于含矿层位。矿体在倾向上品位变化较大,但矿化蚀变带

连续性较好。

矿石矿物主要为辉铜矿、黝铜矿、孔雀石、兰铜矿、铜蓝和褐铁矿等,其次为黄铜矿、少量斑铜矿,伴生矿物以黄铁矿、磁铁矿为主,脉石矿物有石英、方解石、云母和粘土类矿物。

矿石结构按辉铜矿矿物特征可分为微粒结构、隐晶结构;按辉铜矿、黄铁矿、磁铁矿的结晶形态可分为自形晶粒结构,半自形、他形粒状结构;按破碎程度可分为碎裂和压碎结构。

矿石构造主要有浸染状构造、细脉状构造、网脉状构造、块状构造和角砾状构造。

矿化蚀变主要为绿泥石化、绢云母化、硅化、碳酸盐化和退色等,蚀变范围较大,多呈带状分布。

3 线性构造解译与分形特征分析

线性构造由霍布斯提出,泛指航空照片和卫星照片上呈现的线形影像。它们大多与构造要素有关、具优选方位且能反映一个地区的基本构造格局^[2]。断裂构造在遥感影像上一般以线性体的形式出现,也有一些断裂带以弧形影像特征或其他一些特殊纹理形式出现^[3]。

线性构造解译是基于地物波谱差异以及所表现的颜色、纹理特征,首先通过增强图像中的特征信息差异,突现感兴趣地物信息,然后根据线性构造解译标志,推断地质构造类型、地质构造解译的过程。本次运用 ENVI4.6 的卷积滤波和形态学 (Convolutions and Morphology) 工具对影像进行增强处理,抑制噪音以及一些细节问题,突出主要线性构造。利用计盒维数法求得研究区线性构造分维值,用 Surfer 软件求得线性构造分维等值线图。

3.1 线性构造的解译标志

- 本区线性构造解译标志主要有:
- (1) 延伸较长、呈直线状的水系与沟谷切割不同的地质体,水体呈高角度转弯处。
 - (2) 横剖面上,平缓的负地形陡升成为山地,相对高差较大,陡坎、断层三角面或断层崖呈线性排列,是断裂的明显标志,在遥感影像上具有明显的色调异常。
 - (3) 密集隐约可见的线性体组合带。
 - (4) 大规模的构造带,影像上表现为忽宽忽窄、时隐时现、断续延伸的线性影像特征。
 - (5) 线性构造界面两侧的影像波谱特征存在差异或线性构造本身有独特的波谱特征,在遥感影像

上常沿线性构造走向出现与背景色调有显著差异的色调异常线、色调异常带及色调异常分布面。

3.2 线性构造的基本特征

运用 ENVI4.6 对遥感影像 6 个波段进行主成分分析^[4]。主成分 (PC3) 主要反映了主干构造信息,分别对其进行低通滤波和 3×3 像元中值滤波 (Median) 变换处理,增强构造信息;然后通过 ETM+7(R)、PC1(G)、PC3 中值滤波结果 (B) 进行假彩色合成,最终得到突出线性构造的影像图 (图 2);在图 2 基础上,根据上述线性构造解译标志,运用直接判读法、对比分析法、追索法和合理推理法^[5],对该区遥感影像进行目视解译 (图 3)。

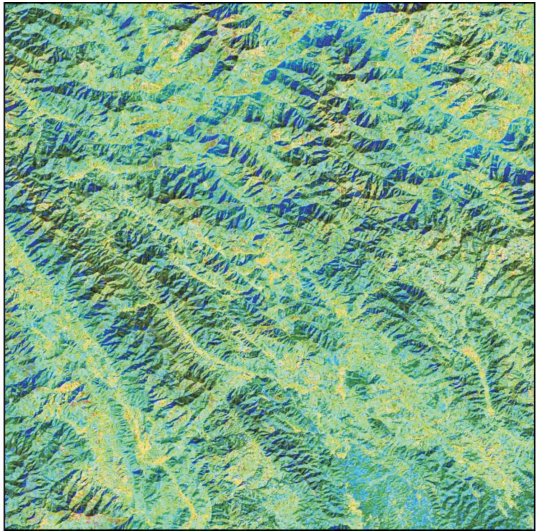


图 2 大团包铜矿区及外围区域遥感影像滤波效果图
Fig. 2 The filter effect image of Morphology of Datuanbao copper ore deposit and its environs

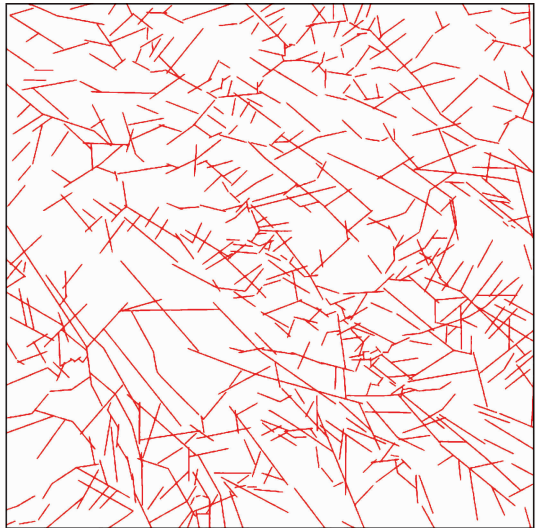


图 3 大团包铜矿区及外围区域遥感线性构造解译图
Fig. 3 The interpretation image of linear structures of Datuanbao copper ore deposit and its environs

从线性构造解译图(图 3)可以看出,按线性构造的方位,以 NW 向为主,NE 向为次,少量的 NWW、NNW、NNE、NEE 向。在遥感影像上,NW 向线性构造延伸长,较为稀疏;NE 向线性构造延伸短,较为密集。二者相互交切,线性构造密集和交汇部位是成矿作用的有利部位,也是矿床(点)集中分布区,为圈定找矿预测区提供了构造依据。

3.3 线性构造的分形特征

线性构造分维值(D 值)的大小反映了线性构造展布结构的复杂程度,构造活动的强烈及发育的程度。一般认为分维值愈大,表明断裂的空间复杂程度愈高^[6-7],构造活动性愈强,愈有利于成矿元素活化和成矿流体运移聚集,形成具有较大规模的矿床。

3.3.1 全区线性构造的分形特征

采用计盒维数法(Box-Counting Dimension method)对研究区的线性构造进行分维统计。首先,用边长为 L 的正方形初始网格覆盖在遥感线性构造解译图上,在此基础上,分别选取 $r=L/2$ 、 $L/4$ 、 $L/8$ 、 $L/16$ 、 $L/32$ 的网格,求出相应标度下含有线性构造的网格数 $N(r)$ 。其次,在 $\lg(r)-\lg N(r)$ 坐标系中作图,在计算机中用回归求解方法求得最后回归直线斜率的绝对值即为分维值 D,同时求得相关系数平方 R^2 。

对研究区遥感线性构造进行分形统计,所采用的标度为 29.685~1.8553125 km。经过统计计算(表 1),最后求得本区的分维值 $D=1.9354$, $R^2=0.9995$,针对本区线性构造的分形特征,选择了 5 个标度进行研究。当显著性水平取 0.01 时,相关系数的临界值为 0.874;研究区的相关系数远远大于临界值,说明 $\lg(r)$ 和 $\lg N(r)$ 具有极好的相似性,表明研究区线性构造具有分形特征,其分形结构具有很好的统计自相似性。

表 1 研究区分形统计结果

Table 1 Statistical result of fractal of the study area	
标度/km	有线的格子个数/个
29.685	4
14.843	16
7.421	64
3.710	242
1.855	842

将研究区的分维值与其他地区进行对比可知,研究区的分维值略高于桂东地区线性构造分维值,且明显高于中国大陆断裂分维值和华南地区线性构

造分维值(表 2),说明本区线性构造比较复杂,活动性比较强。

表 2 研究区与其他地区线性构造分形特征比较

Table 2 The comparison of fractal characteristics between study area and other areas

区域	分维值	资料来源
云南大团包铜矿区域	1.9354	本次计算
桂东地区线性构造	1.8720	(赵少杰等,2011) ^[3]
中国东部季风区断层	1.2352	(朱晓华,2002) ^[8]
中国西部干旱区断层	1.1455	(朱晓华,2002) ^[8]
中国青藏高原地区断层	1.2373	(朱晓华,2002) ^[8]
中国大陆断层	1.2366	(朱晓华,2002) ^[8]
日本岛弧线性构造	<1.6	(Hirata,1989) ^[9]
华南地区线性构造	1.35	(孔凡臣等,1991) ^[10]

3.3.2 不同区段线性体的分形特征

构造运动的不平衡性导致了不同区段构造变形程度具有一定的差异性,进而影响后期热液成矿作用的发育,因此需要研究不同区段线性构造的分形分维特征。

以研究区遥感线性构造解译图(图 3)为底图,将其划分为 64 个边长(L_1)为 7.42125 km 的正方形区域,在每个正方形区域内,以边长为 $r_0=L_1$ 的正方形网格进行覆盖,记录有线性构造穿过的正方形网格数 $N(r_0)$,然后改变网格边长,使 $r=r_0/2$ 、 $r_0/4$ 、 $r_0/8$ 、 $L/16$ 、 $L/32$ 得到每一级别有断层穿过的正方形网格数 $N(r)$,把每组 $[r, N(r)]$ 投放到双对数坐标系中,经拟合发现每个正方形区域中 4 个点均呈直线关系,相关系数的平方在 0.9423~0.9999 之间。上述结果表明:在 $r=7.42125-0.231$ km 标度范围之间,研究区内线性构造具有自相似性,即具有分形的特征。所得直线斜率的绝对值即为该块的分维值 D,然后把各正方形块的分维值赋予各块体的中心,并读出所有中心点的横坐标和纵坐标,最后利用 Surfer 软件绘制出研究区线性构造分维等值线图(图 4)。

由图 4 可知,研究区线性构造分维与其发育数量紧密相关,各个子区的线性体数量越多,密度越大,线性体复杂程度越高,分维值也就越大,反之越小。将已知矿床(点)投在线性构造分维等值线图上(图 4),发现已知矿床(点)均分布在高分维值区或附近,其中 $D>1.3$ 的强构造带是成矿优势场所,而低分维值或其附近很少有矿点分布。因此,线性构造分维值对找矿预测具有一定的参考价值。

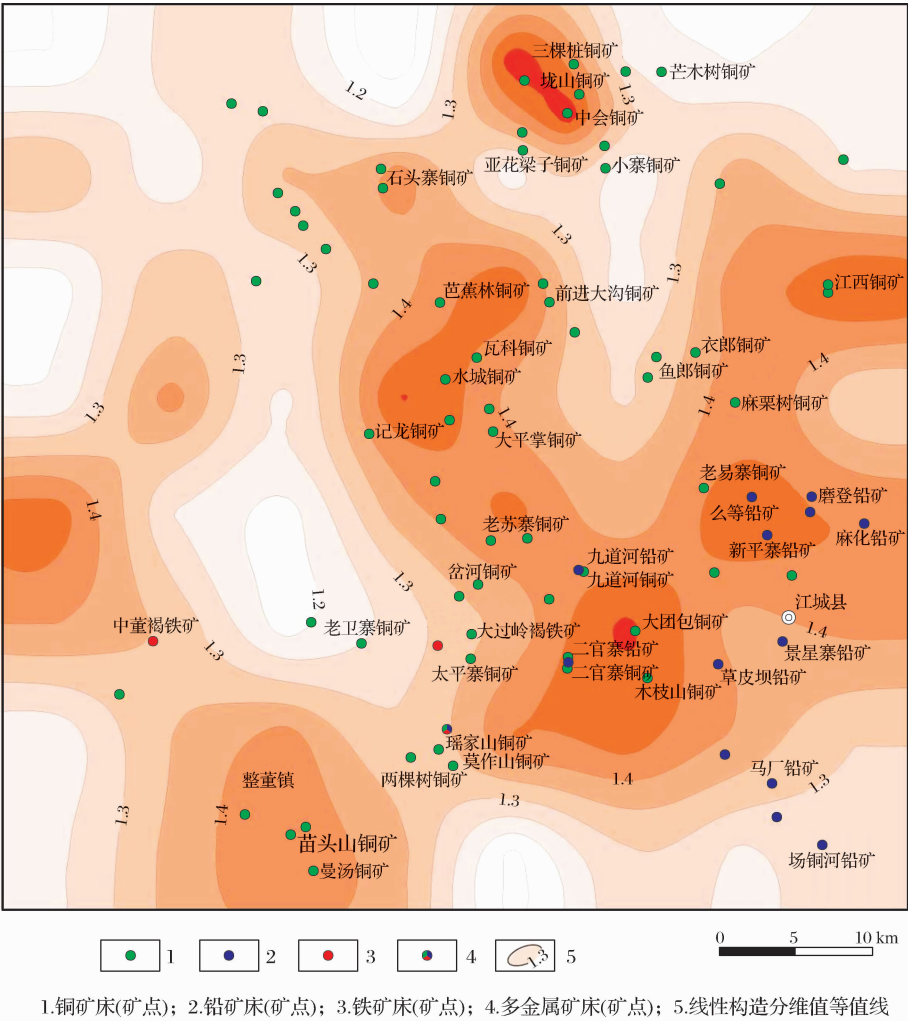


图 4 大团包铜矿区及外围区域遥感线性构造分维等值线图

Fig. 4 The counter map of fractal dimension value of linear structure of Datuanbao copper ore deposit and its environs

4 植被覆盖区异常信息提取

根据铜、铅等植物地球化学效应,通过彩色合成、直方图拉伸进行信息增强处理,运用主成分分析和监督分类法,提取植被异常信息。

4.1 植物地球化学效应

植物地球化学效应,即元素对植物的毒害作用所造成的影响。元素对植物的毒害作用导致植物的变种和植物群落的变化,这些变种或变化的植物叫做异常植被^[11],表现在遥感影像上,出现单波段影像灰度值的差异(异常植被区与正常植被区相比灰度值或高或低),彩色合成上色差异。前人在植物地球化学效应找矿方面做了一定的工作,他们的研究成果表明,铜、铅矿区上生长的植物对铜、铅及伴生元素(Ag、Zn、As、Sb、Hg、Mo 等亲铜元素)有较强的吸收和聚积作用,吸收过量就会对植物造成一定的毒害作用,表现为植被异常^[12-17]。

植物的光谱性质决定于植物叶子的色素成分、细胞结构和水分含量等因素。在可见光区的 0.4~0.7 μm 波段,叶面反射特征的主控因素是色素(叶绿素、胡萝卜素和叶黄素等),大部分入射辐射被吸收,小部分被反射,叶色素中叶绿素对光谱特性的影响最大,它强烈吸收蓝光(0.48 μm 左右)和红光(0.68 μm 左右),而对绿光(0.52~0.60 μm)起微弱反射,在 0.56 μm 处显示出反射率增高;在 0.68~0.75 μm 光谱区,植物叶的反射率急剧上升,这种特性被称为“红缘”^[18]。

由于成矿元素植物地球化学效应产生了植物生理、生态变异,使铜、铅矿区植物叶冠的反射光谱特征与正常植物相比出现较大差异。植物的叶冠波谱特征主要表现在两个方面:一是受铜、铅及伴生元素毒化作用植物叶冠的波形与正常的相比,会发生“蓝移”或“红移”;二是受铜、铅及伴生元素毒化植物叶冠的反射率与正常相比,或高或低。这种差异反映

在遥感图像上,表现为:①铜、铅矿区植物遥感图像的灰度值高于或低于正常区,高低差异受毒害程度的控制,毒害越强,差异越大;②铜、铅矿区植物遥感图像以其特征的色调与正常区相区别。奥地利阿尔卑斯南部受金属毒害的云杉林在 800~2 400 nm 光谱区,受毒害植物相对比未受害植物显示出树冠反射率的整体上升^[19]。山东招远台上金矿区赤松和荆条的反射率与背景区相比,均表现为可见光内金矿区反射率升高,近红外内反射率降低;金矿区植物叶绿素红光吸收波长发生“红移”,而红界拐点波长则发生“蓝移”;光谱反射率特征与赤松针叶内的 Au、Ag、Cu、Pb 元素含量相关,与叶绿素含量、针叶受损害程度有一定相关^[20-22]。陕西太白金矿区植被 ETM+图像像元亮度值均较背景区高 10%~30%^[23]。黑龙江乌拉嘎金矿区 ETM+图像亮度值高于背景区^[15]。本矿区植被与外围植被在 ETM+各波段遥感影像灰度值和彩色合成图像色彩上亦具有明显差异,其具体特征详见 3.2 中叙述。

4.2 遥感影像特征

对本区 ETM+数据各个波段灰度值、相关系数

进行分析研究,为拟定能突出植被异常特征的假彩色合成方案提供依据。

各波段进行灰度值对比分析表明:在 ETM+1、3、5、7 4 个波段中,矿区植被灰度值低于矿区外围植被,其中 ETM+7 波段的矿区植被灰度值与外围植被相差最大,其次为 ETM+3、ETM+5、ETM+1;在 ETM+4 波段中,矿区植被灰度值高于矿区外围植被;而 ETM+2 波段矿区植被灰度值与矿区外围植被相差不明显。这正是植物地球化学效应在本区的体现。在假彩色合成影像上,R(红)、G(绿)、B(蓝)对应的波段灰度值相差越大,图像色彩越饱和,地表信息特征越明显。

相关系数统计分析(表 3)表明:ETM+2 和 ETM+3、ETM+5 和 ETM+7 相关性很高,达 0.9 以上,ETM+1 与 ETM+4、ETM+3 与 ETM+4 相关性较差,在 0.4 以下,其中 ETM+3 与 ETM+4 相关性最差。同样在假彩色合成影像上,R(红)、G(绿)、B(蓝)对应的波段相关性相差越大,图像色彩越饱和,地表信息特征越明显。

为了使彩色合成影像能够最大限度地反映地表

表 3 ETM+1、2、3、4、5、7 波段相关性统计分析
Table 3 The relativity statistics analytical of ETM+1,2,3,4,5,7

相关性	ETM+ 1	ETM+ 2	ETM+ 3	ETM+ 4	ETM+ 5	ETM+ 7
ETM+ 1	1.000000	0.868673	0.866414	0.364592	0.654848	0.752544
ETM+ 2	0.868673	1.000000	0.912308	0.603691	0.835515	0.868165
ETM+ 3	0.866414	0.912308	1.000000	0.363002	0.747336	0.882957
ETM+ 4	0.364592	0.603691	0.363002	1.000000	0.769466	0.540803
ETM+ 5	0.654848	0.835515	0.747336	0.769466	1.000000	0.926311
ETM+ 7	0.752544	0.868165	0.882957	0.540803	0.926311	1.000000

信息量(植被异常信息),选择灰度值相差较大、相关性较小的波段作为假彩色合成对象。通过上述分析,选择 ETM+7、ETM+4、ETM+3 波段,分别对应 R(红)、G(绿)、B(蓝)假彩色合成。

在用上述 ETM+7、4、3 波段的假彩色合成影像上,由于铜、铅及其伴生元素对矿区地表覆盖植被的毒化作用,发生植物化学效应,矿区植被出现与外围不一样的色彩异常,异常植被区色调表现为紫色,正常植被区色调表现为绿色、浅绿色,水体为深蓝色,裸地为浅紫色(图 5)。

4.3 植被异常信息提取

遥感影像异常信息提取,本次研究主要运用主成分分析和监督分类^[24]两种方法相结合,对本区提取植被异常信息。

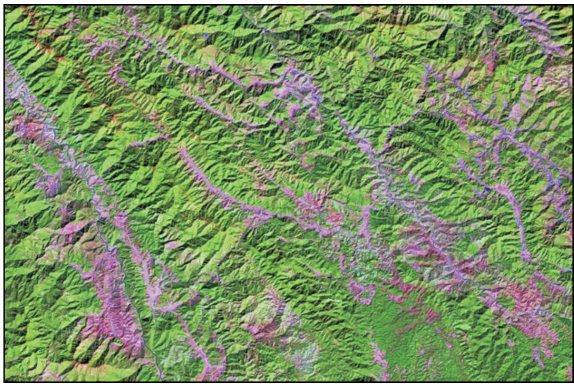


图 5 大团包铜矿区及外围区域 ETM+7、4、3 假彩色合成遥感影像图

Fig. 5 The false color composite image of ETM+ 7,4,3 of remote sensing for Datuanbao copper ore deposit and its environs

4.3.1 主成分分析

主成分分析是在统计特征基础上的多维正交线性变换,通过变换可消除原有图像间的相关性,并把信息集中在少数维数中,而不丢失信息达到降维的目的。

对研究区遥感影像主成分分析结果(表 4)表明:在得到的 6 个主成分中,PC1 含 82.629%的信息,它反映 ETM+各波段对亮度值的贡献,主要代表地形地貌信息和部分其他信息。PC1 中的 ETM+4 为正权重值(0.7599),贡献最大,它主要反映植物的叶绿素对近红外的反射,是绿度和湿度信息,它反映 ETM+各波段对土壤和植被水分的敏感程度;PC2 中的 ETM+4 为负权重值(−0.6160),贡献最大,主要反映植物的叶绿素对近红外的吸收,亦是绿

度和湿度信息,ETM+7 为正权重值(0.5127),贡献相对较大,反映植物的叶绿素对热红外的反射,是湿度信息;PC3 中的 ETM+3 和 ETM+5 分别为负权重值(−0.5944)和正权重值(0.5060),说明植被叶绿素在可见光的红光区的强吸收作用和植物对中远红外的反射信息;PC4 中的 ETM+7 为正权重值(0.7467),贡献最大,是湿度信息;PC5 中的 ETM+1 和 ETM+3 分别是正权重值(0.7449)和负权重值(−0.5869),主要反映植物的叶绿素在可见光的蓝光区的强反射作用和在红光区的吸收信息,PC5 反映的其他信息不明确;PC6 中的 ETM+2 和为 正权重值(0.8125),它主要反映植物的叶绿素对绿光的反射作用,是绿度信息和噪音。

表 4 ETM+1、2、3、4、5、7 波段的 PCA 统计
Table 4 PCA statistic of band ETM+ 1,2,3,4,5,7

主成分	ETM+1	ETM+2	ETM+3	ETM+4	ETM+5	ETM+7	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
PC 1	0.0602	0.1258	0.1245	0.7599	0.5541	0.2840	977 498.90	82.629	82.629
PC 2	0.1341	0.1635	0.3207	−0.6160	0.4583	0.5127	180 538.79	15.261	97.890
PC 3	−0.3865	−0.4652	−0.5944	−0.1567	0.5060	−0.0193	18 072.20	1.527	99.417
PC 4	−0.3655	−0.2843	0.0105	0.1302	−0.4593	0.7467	3 808.39	0.322	99.739
PC 5	0.7449	−0.0114	−0.5869	0.0131	−0.1156	0.2951	1 909.87	0.162	99.901
PC 6	−0.3750	0.8125	−0.4287	−0.0377	−0.0507	0.1072	1 168.17	0.099	100

从主成分分析可以看出,PC2 可作为探测植物生理生态及反射光谱的一个重要指标,PC3、PC4 可作为探测植物的含水量和矿物蚀变信息的重要指标。根据上述分析结果,选择 PC2、PC3、PC4 主成分影像进行红(R)、绿(G)、蓝(B)彩色合成,得到的彩色影像进行直方图均衡,再经过 HIS 变换,已知矿点分布区植被呈现出黄色色调,而在背景区植被呈现出天蓝色、深蓝色和浅蓝色色调,水体呈现出大红色色调,裸地为粉红色色调(图 6),获得了有效的生物地球化学效应异常色调信息,该信息为进一步

监督分类建模做好了准备。

4.3.2 监督分类

监督分类(Supervised)用于在数据集中根据用户定义的训练样本类别(training classes)聚集像元,训练样本类别是像元(ROIs)的集合或单一波谱。本次用最大似然法(Maximum Likelihood)^[25-26]的监督分类方法对本区的遥感影像进行监督分类。

在上述主成分分析得到的假彩色合成图像的基础上进行监督分类(图 7)。区内已知大多数铜铅多

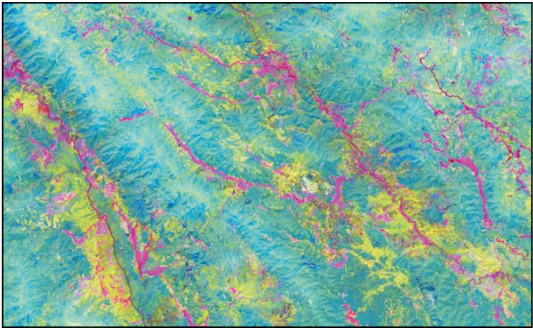


图 6 大团包铜矿区及外围区域遥感影像
第 2、3、4 主成分假彩色合成图

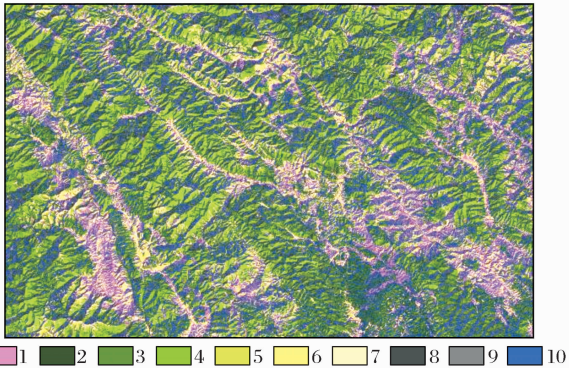


图 7 大团包铜矿区及外围区域遥感影像监督分类图

Fig. 6 The false color composite image of PC 2,3,4 of remote sensing for Datuanbao copper ore deposit and its environs

Fig. 7 The supervised classification image of remote sensing for Datuanbao copper ore deposit and its environs

金属矿床(点)均位于植被异常区。结合线性构造解译结果,研究区植被异常区域与线性构造分维图高值区域亦大体重合,说明本区构造与铜铅成矿关系密切。

5 综合成矿预测

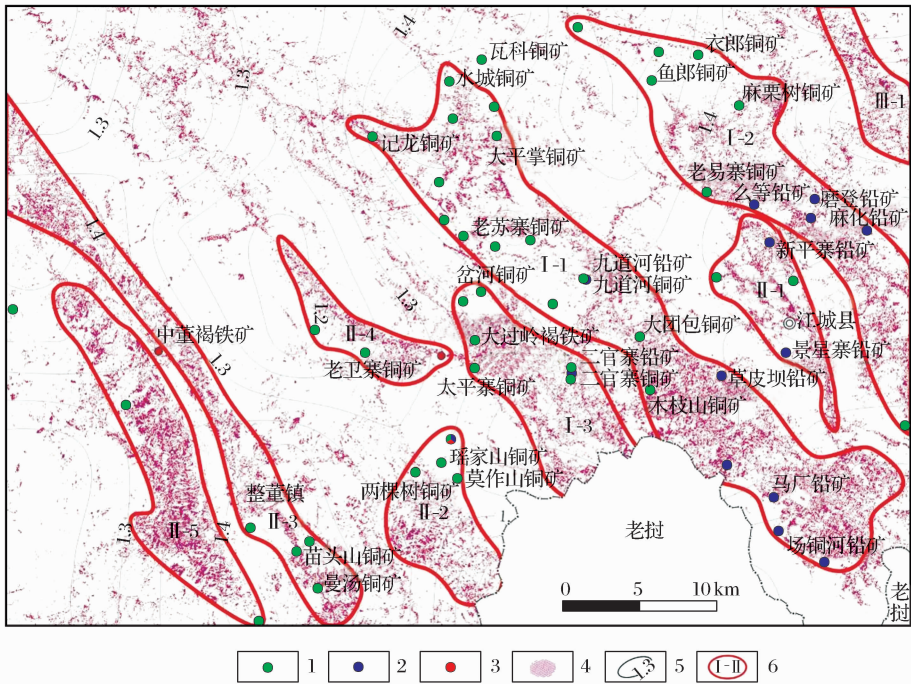
基于线性构造分维值等值线与遥感植被异常综合图,根据区内地质特征、线性构造分维值大小、遥

感植被异常强弱程度和靶区已知矿点等因素综合分析,将靶区分为 9 个三级找矿靶区(图 8、表 5)。

第一级,已知矿点较多,遥感植被异常强度强或较强,线性构造分维值大于 1.30。

第二级,已知矿点较少,遥感植被异常强度强或较强,线性构造分维值大于 1.30。

第三级,无已知矿点,遥感植被异常强度较强,线性构造分维值大于 1.30。



1. 铜矿床(矿点);2. 铅矿床(矿点);3. 铁矿床(矿点);4. 异常植被; 5. 线性构造分维值等值线;6. 找矿靶区及编号

图 8 大团包铜矿区及外围区域综合成矿预测图

Fig. 8 The comprehensive prospective area image of Datuanbao copper ore deposit and its environs

表 5 大团包铜矿区及外围区域遥感植被异常区特征

Table 5 The characteristics of remote vegetation anomaly areas in Datuanbao copper ore deposit and its environs

编号	地质特征			线性构造特征		植被异常特征		
	出露地层	构造	已知矿点	走向	分维值	形态	强度	规模/km
I-1	上二叠统、中上侏罗统、白垩系、下第三系、第四系	发育 NW、NE、NEE 向断裂	记龙铜矿、老苏寨铜矿、九道河铜铅矿、大团包铜矿、木枝山铜矿、草皮坝铅矿、马场铅矿、场铜河铅矿等主要矿床(点)	NE、NW、NEE	1.3~1.5	NW 向长条状	强	长:42 宽:6
I-2	上二叠统、中上侏罗统、白垩系、下第三系	发育 NW、NE、NNW、NNW 向断裂	鱼郎铜矿、衣郎铜矿、麻栗树铜矿、老易寨铜矿、么等铅矿、摩登铅矿、麻化铅矿等主要矿床(点)	NE、NW、NEE、NNW	1.3~1.5	NW 向长条状	强	长:34 宽:5
I-3	下白垩统、下第三系	发育 NNW 向断裂	岔河铜矿、太平寨铜矿、二官寨铜铅矿等主要矿床(点)	NW、NNW、SN、SE	1.3~1.5	NW 向条带状	强	长:22 宽:4.5
II-1	上侏罗统、下白垩统、第三系	发育 NW、NNW、NE、NEE 向断裂	新平寨铅矿、景星寨铅矿等主要矿床(点)	NNW、NW、NNW、NNE、NE	1.35~1.45	NW 向条带状	强	长:14 宽:3.5
II-2	白垩系、下第三系	发育 NNW、NNE 向断裂	瑶家山铜矿、莫作山铜矿、两棵铜矿等主要矿床(点)	NW、NE、SEE、SWW	1.2~1.35	NW 向不规则	较强	长:10 宽:4.5

续表 5

编号	地质特征			线性构造特征		植被异常特征		
	出露地层	构造	已知矿点	走向	分维值	形态	强度	规模/km
Ⅱ-3	白垩系、第三系、第四系	发育 NW、NE 向断裂	苗头山铜矿、曼汤铜矿等主要矿床(点)	NE、NW、 NWW、NEE	1.3~1.45	NW 向条带状	强	长:37 宽:2.5
Ⅱ-4	白垩系	发育 NE、NW 向断裂	老卫寨铜矿、大过岭褐铁矿等主要矿床(点)	NE、NW	1.2~1.3	新月形	较强	长:12 宽:2.5
Ⅱ-5	白垩系、下第三系	发育 NE、NW 向断裂	少量铜矿等矿床(点)	NW、NNW、 NNE、NE	1.3~1.45	NW 向长条状	强	长:25 宽:4
Ⅲ-1	上三叠统、中上侏罗统	发育 NW、NNW、 NNE、NEE 向断裂	无	NW、NWW、 NEE	1.3~1.45	NW 向长条状	强	长:10.5 宽:2.5

6 结 语

(1)研究区遥感影像解译显示,区内线性构造的方位,以 NW 向为主,NE 向为次,相互交切构成网格状。

(2)研究区线性构造具有明显的分形特征,其分形结构具有良好的统计自相似性,分维值高于中国大陆地区一般的断裂构造分维值。线性构造分维值(D)大于 1.3 的强构造活动带是成矿优势区域。已知矿床(点)大部分分布于线性构造高分维值区。

(3)铜铅等金属对矿区地表植被具有毒化作用,产生铜铅重金属元素明显的植物化学效应。与周围背景区相比,矿区 ETM+各波段影像灰度值具有明显差异。其中 ETM+1、3、5、7 4 个波段矿区植被灰度值低于矿区外围植被,ETM+4 波段矿区植被灰度值高于矿区外围植被。在 ETM+7、4、3 波段假彩色合成影像图上亦有显著的色彩异常。

(4)本次研究表明,NW、NE 向线性构造交汇部位、线性分维高值区和植被异常信息可以作为成矿预测的标志。对有利岩性、断裂构造、线性构造和遥感植被异常等信息进行综合分析,圈出了 9 个三级找矿靶区,其中Ⅰ级区 3 个、Ⅱ级区 5 个、Ⅲ级区 1 个。

参考文献(References):

[1] Liu Zhijie, Liu Yinchun. The Remote Sensing Anomaly of Vegetation and Its Significance in Gold Exploration[J]. Journal of East China Institute of Technology(Natural Science), 2008,31(1):50-54. [刘志杰,刘荫椿. 植被遥感异常及金找矿意义[J]. 东华理工大学学报(自然科学版),2008,31(1):50-54.]

[2] Chen Jianping, Hu Mingming, Li Juchu. Statistical Analysis for Regional Structure by Remote Sensing Geology in Kang Dian Axis of Earth[J]. Journal of Chengdu University of

Technology,1999,26(1):78-81. [陈建平,胡明铭,李巨初. 康滇地轴中南段区域构造格架的遥感地质统计分析[J]. 成都理工大学学报,1999,26(1):78-81.]

[3] Zhao Shaojie, Qian Jianping, Chen Hongyi. Application of Fractal Statistics of Linear Structure and Alteration Information Extraction of Remote Sensing on the Au, Pb, Zn, Sn Polymetallic Minerogenetic Prognosis in Eastern Guangxi[J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2011, 35(3): 364-371. [赵少杰,钱建平,陈宏毅. 遥感线性构造分形统计和蚀变信息提取在桂东地区金铅锌锡多金属成矿预测中的应用[J]. 大地构造与成矿学,2011,35(3):364-371.]

[4] Crósta A,Souza F C,Azevedo F,et al. Targeting Key Alteration Minerals in Epithermal Deposits in Patagonia,Argentina, Using ASTER Imagery and Principal Component Analysis [J]. International Journal of Remote Sensing,2003,24(21): 4233-4240.

[5] Nahid D S,Mohamed G A. Remote Sensing Analysis of the Gorge of the Nile, with Emphasis on Dejen-gohatsion Region [J]. Journal of African Earth Sciences,2006,44(2):135-150.

[6] Xie Yanshi, Tan Kaixuan. Fractal Research on Fracture Structures and Application in Geology [J]. Geology-geochemistry, 2002,30(1):71-77. [谢焱石,谭凯旋. 断裂构造的分形研究及其地质应用[J]. 地质地球化学,2002,30(1):71-77.]

[7] Yu Yong, Qian Jianping, Yuan Aiping. Fractal Characteristics of High Resolution Remote Sensing Lineations in Gaolong Gold Deposit and Integrated Ore Deposit Prediction[J]. Mineral Resources and Geology,2005,19(2):209-211. [余勇,钱建平,袁爱平. 高龙金矿区高分辨率遥感影线性构造分形特征及综合成矿预测[J]. 矿产与地质,2005,19(2):209-211.]

[8] Zhu Xiaohua. Study of Relationship Between China Main Geomorphologic Phenomena and Fractal Characters of Geological Disasters[D]. Nanjing: Nanjing Normal University,2002. [朱晓华. 中国主要地貌与地质灾害的空间分维及其关系研究[D]. 南京:南京师范大学,2002.]

[9] Hirata T. Fractal Dimension of Fault Systems in Japan, Fractal Structure in Rock Fracture Geometry at Various Scales [J]. Pure and Applied Geophysics,1989,131(1-2):157-170.

- [10] Kong Fanchen, Ding Guoyu. The Implications of the Fractal Dimension Values of Lineaments[J]. Earthquake, 1991, 5: 33-37. [孔凡臣, 丁国瑜. 线性构造分维值的含义[J]. 地震, 1991, 5: 33-37.]
- [11] Ma Yueliang, Xu Ruisong. Application of Remote Sensing and Biogeochemistry to Prospecting and Their Practical Results [J]. Geology and Prospecting, 1999, 35(5): 39-41. [马跃良, 徐瑞松. 遥感生物地球化学在找矿勘探的应用及效果[J]. 地质与勘探, 1999, 35(5): 39-41.]
- [12] Lv Huiping, Xu Ruisong, Xu Huosheng. The Study of Biogeochemical Characteristic of Mo-deposit in Lake Dinghu, Guangdong Province [J]. Remote Sensing of Environment China, 1994, 9(1): 22-28. [吕惠萍, 徐瑞松, 徐火盛. 广东鼎湖钼矿区的生物地球化学效应[J]. 环境遥感, 1994, 9(1): 22-28.]
- [13] Wu Jiyou, Ni Jian, Feng Suping, Jiang, *et al.* Phytogeochemical Properties and Spectral Reflectance Characteristics of Korean Pine Forest in Spring in the Gold Mine Area of Zhaoyuan City (Shandong Province) [J]. Remote Sensing of Environment China, 1994, 9(2): 113-121. [吴继友, 倪健, 冯素萍, 等. 山东省招远金矿区春季赤松林的植物地球化学和反射光谱特征[J]. 环境遥感, 1994, 9(2): 113-121.]
- [14] Xu Ruisong, Ma Yueliang, Lv Huiping. Biogeochemical Effects of Gold and Associated Elements—A Case Study of The Hetai Gold Deposit [J]. Geochimica, 1996, 25(2): 196-203. [徐瑞松, 马跃良, 吕惠萍. AU 及伴生元素生物地球化学效应研究——以广东河台金矿为例[J]. 地球化学, 1996, 25(2): 196-203.]
- [15] Ma Yueliang, Xu Ruisong, Wei Dongyuan. Application of Biogeochemical Remote Sensing Technology in Predicting Gold Deposits: A Case Study of Wulaga Region, Heilongjiang Province [J]. Geochimica, 1997, 26(1): 92-100. [马跃良, 徐瑞松, 魏东原. 生物地球化学遥感技术在金矿成矿预测中的应用研究——黑龙江省乌拉嘎地区为例[J]. 地球化学, 1997, 26(1): 92-100.]
- [16] Song Ci'an, Lei Liangqi, Yang Qijun, *et al.* Characteristics of Phytogeochemistry in Gongpoquan Copper Ore Field, Gangsu, China [J]. Geochimica, 2000, 29(4): 343-350. [宋慈安, 雷良奇, 杨启军, 等. 甘肃公婆泉铜矿区植物地球化学特征[J]. 地球化学, 2000, 29(4): 343-350.]
- [17] Feng Suping, Wang Yanhua, Zhang Yuling, *et al.* The Biological Accumulation of Au, Ag and Cu in Certain Plants and Their Concentration in Soils in Gold Ore Field [J]. Geology and Resources, 2006, 15(2): 116-118. [冯素萍, 王燕华, 张玉玲, 等. 金矿区某些植物中 Au、Ag、Cu 元素的富集及其与土壤的关系[J]. 地质与资源, 2006, 15(2): 116-118.]
- [18] Ma Yueliang. Biogeochemical Characteristics of The Hetai Gold Deposit, Guangdong Province and Their Significance in Remote Sensing Exploration [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2000, 20(1): 80-86. [马跃良. 广东省河台金矿生物地球化学特征及遥感找矿意义[J]. 矿物学报, 2000, 20(1): 80-86.]
- [19] Ni Jian, Wu Jiyou. Prospection of Hidden Deposit Using Spectral Reflectance of Plant Leaves Surface [J]. Chinese Bulletin of Botany, 1997, 14(1): 36-40. [倪健, 吴继友. 利用植物叶面反射光谱探测隐伏地下矿产[J]. 植物学通报, 1997, 14(1): 36-40.]
- [20] Ni Jian, Wu Jiyou. Changes of Spectral Reflectance of Pinus Densiflora Forest and Relations to Some Factors in Spring at Au Ore Region in Zhaoyuan County, Shandong Province [J]. Acta Botanica Sinica, 1994, 36(6): 466-473. [倪健, 吴继友. 山东省招远金矿区春季赤松林光谱反射率的变化及其与某些因子的相关性[J]. 植物学报, 1994, 36(6): 466-473.]
- [21] Ni Jian, Wu Jiyou. The Studies on Spectral Reflectances “Red Shift” and “Blue Shift” of Vitex Negulido Var. Heterophylla at Taishang Gold Area in Shandong Province [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 1995, 4(4): 17-21. [倪健, 吴继友. 山东省台上金矿区荆条反射光谱的“红移”和“蓝移”现象[J]. 植物资源与环境, 1995, 4(4): 17-21.]
- [22] Wu Jiyou, Yang Xudong, Zhang Fujun, *et al.* Seasonal Characteristics of Spectral Reflectance of Korean Pine Leaves in The Gold Mine Area of Zhaoyuan City in Shandong Province [J]. Journal of Remote Sensing, 1997, 1(2): 124-127. [吴继友, 杨旭东, 张福军, 等. 山东招远金矿区赤松针叶反射光谱红边的季节特征[J]. 遥感学报, 1997, 1(2): 124-127.]
- [23] Ma Jianwei, Xu Ruisong, Ao Hehui. Preliminary Analysis of the Abnormal Imagery Feature of Vegetation Landscape and the Reason Caused by in the Gold Deposits of Qinling of China [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 1996, 30(4): 23-29. [马建伟, 徐瑞松, 奥和会. 秦岭金矿区植被景观异常遥感影像特征及影响植物反射光谱变异原因初步分析[J]. 国土资源遥感, 1996, 30(4): 23-29.]
- [24] Camps-Valls G, Bandos T, Zhou D. Semi-supervised Graph based Hyperspectral Image Classification [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(10): 3044-3054.
- [25] Atkinson P M, Lewis P. Geostatistical Classification for Remote Sensing: An Introduction [J]. Computer & Geoscience, 2000, 26(4): 361-371.
- [26] Lo C P, Yeung A K. Concepts and Techniques of Geographic Information Systems [M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.

Remote Sensing Prospecting in High Vegetation Coverage Area

——A Case Study of the in Datuanbao Copper Ore Deposit
and Its Environs, Jiangcheng, Yunnan Province

Zhao Xiaoxing^{1,2}, Qian Jianping¹, Qin Shunqiao¹, Huang Kechen¹, Han Shuai¹

(1. *College of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;*

2. *Fujian Institute of Geological Survey, Fuzhou 350013, China*)

Abstract: This article described the way to extract information of copper and lead anomaly in high vegetation coverage area through a case study from the Datuanbao copper ore deposit and its environs, Jiangcheng, Yunnan Province. Principal component analysis, false color composite, stretch Histogram and supervise classification etc were analyzed in the remote sensing images using ENVI4.6 software. It is suggested that the linear structure, which is delineated by convolution filter and morphological analysis method, is characterized by statistical self-similarity and fractal geometry. It is found that the high value of fractal dimension is roughly coincident with the copper and lead anomaly of vegetation by the comparison between contour maps of plant geochemical anomaly and fractal dimensions, which is calculated by box-counting. As a matter of fact, 80 percent of copper and lead deposits or occurrences are located in areas of high value of fractal dimension and vegetation anomaly. By the comprehensive analysis of stratigraphy, igneous rocks, copper and lead mineralizations, fractal dimension of linear structures and vegetation anomaly from remote sensing, nine exploration targets with three levels of probabilities are figured out.

Key words: ETM+ remote sensing; Linear structure interpretation; Extraction of plant geochemical anomaly; Metallogenic prognosis