

doi: 10.6046/gtzyyg.2013.03.19

引用格式: 钱建平,张渊,赵小星,等. 内蒙古东乌旗遥感构造和蚀变信息提取与找矿预测 [J]. 国土资源遥感,2013,25(3): 109-117. (Qian J P, Zhang Y, Zhao X X, et al. Extraction of linear structure and alteration information based on remote sensing image and ore-prospecting prognosis for Dongwu Banner, Inner Mongolia [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25(3): 109-117.)

内蒙古东乌旗遥感构造和蚀变信息提取与找矿预测

钱建平, 张 渊, 赵小星, 赵少杰, 李承礼

(桂林理工大学地球科学学院, 桂林 541004)

摘要: 为了研究内蒙古东乌旗 Pb-Zn-Ag 多金属成矿区的找矿远景, 在对 Landsat7 ETM⁺ 数据进行几何纠正、大气校正和去干扰等预处理的基础上, 对多波段假彩色合成图像做滤波处理以增强区域构造信息、进行线性构造解译; 运用分形几何学原理和计盒维数法求取线性构造分维值, 得到线性构造的统计自相似性和分形特征; 采用主成分分析和阈值分割法对图像进行铁染、羟基蚀变信息提取; 最后根据区内线性构造、遥感蚀变信息、岩体分布特征、区域地球化学异常和已知矿床(点)分布资料综合分析, 圈定出 3 个级别的 7 个找矿预测区, 再次证实了基于遥感图像的线性构造和遥感蚀变异常信息可以作为找矿预测的标志。

关键词: ETM⁺ 遥感数据; 线性构造; 分维值; 蚀变信息提取; 找矿预测

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2013)03-0109-09

0 引言

近年来, 内蒙古东部东乌旗一带 Pb-Zn 多金属找矿在一些点上取得了重要成果。如何实现区域面上找矿的新突破, 很多研究者试图从区域遥感地质找矿研究入手。遥感是一种经济快捷、实用有效的区域找矿手段。金属矿床常富集在构造带附近或断裂交汇部位, 后者以线性体或环形体等结构信息的形式反映在遥感图像上^[1-3]。矿化程度往往与构造和蚀变的复杂程度相关。矿床具有与围岩不同的矿物组成和化学成分, 它们能够以特殊的波谱特征反映在遥感图像上^[4-5]。遥感技术应用于矿产勘查主要是运用各种图像处理技术增强和提取与成矿有关的构造信息和蚀变信息, 以达到识别矿床的目的^[6-7]。另一方面, 地球化学异常和遥感蚀变异常在本质上是成矿作用在不同物质层次上的表现形式, 两者具有一定的相关性。因此, 遥感、地质、地球化学等多种地学信息综合分析已成为一种地质找矿的重要手段^[8-9]。

前人在本研究区曾做过部分遥感地质工作, 但主要局限于遥感线性构造解译方面^[10], 尚未开展过区域遥感蚀变异常信息提取, 特别是未开展过多元信息综合分析和找矿研究工作。本文立足于区域成

矿地质背景分析, 运用 Landsat7 ETM⁺ 数据, 对研究区线性构造重新进行解译, 并进行分形统计; 采用主成分分析和阈值分割方法提取遥感蚀变异常信息; 总结线性构造和遥感蚀变信息在区域空间上的分布规律, 探讨线性构造集中区和遥感蚀变异常与区域岩浆岩、地球化学异常和 Pb-Zn-Ag 多金属矿床(点)在空间上的相互联系, 在此基础上进行区域成矿远景分析和找矿预测。

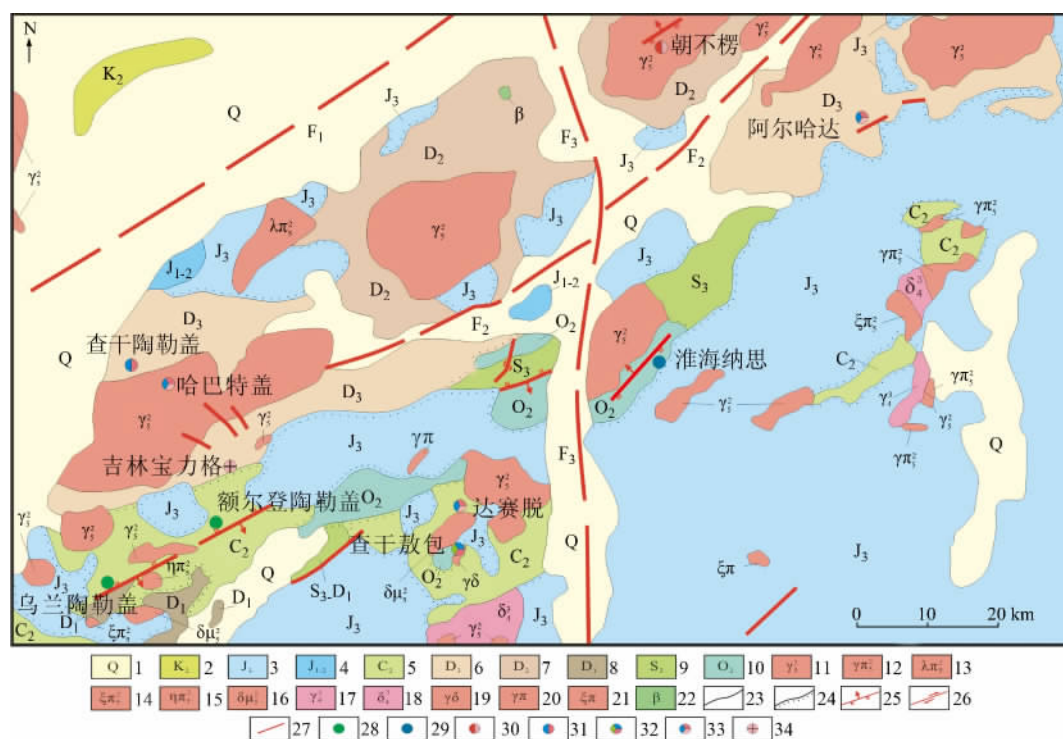
1 研究区概况与数据源

1.1 研究区地理地质概况

研究区位于内蒙古自治区中东部、东乌珠穆沁旗额仁高毕苏木至满都胡宝格拉苏木一带, 海拔高度一般在 900 ~ 1 100 m 之间, 地形切割较浅, 地势相对平缓, 为典型的草原覆盖区。区内水系极不发育, 仅在丘陵低洼处散布有少量面积大小不等的湿地。区域大地构造主要位于内蒙古—兴安岭地槽褶皱系的东乌旗褶皱束内。区域内出露地层主要有古生界和中生界(图 1), 二者为角度不整合接触。基底地层由奥陶系、志留系、泥盆系和石炭系组成, 其上为侏罗系和白垩系不整合覆盖。其中, 中上泥盆统和中石炭统碎屑岩与成矿关系密切。

收稿日期: 2012-10-03; 修订日期: 2012-12-12

基金项目: 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(编号: 200913)和中国冶金地质勘查工程总局第一地质勘查院项目(中冶勘一地任 [2006] 32 号)共同资助。



1. 第四系; 2. 上白垩统; 3. 上侏罗统; 4. 中下侏罗统; 5. 中石炭统; 6. 上泥盆统; 7. 中泥盆统; 8. 下泥盆统; 9. 上志留统;
10. 中奥陶统; 11. 燕山期花岗岩; 12. 燕山期花岗斑岩; 13. 燕山期石英斑岩; 14. 燕山期正长斑岩; 15. 燕山期二长斑岩;
16. 燕山期闪长玢岩; 17. 海西期花岗岩; 18. 海西期闪长岩; 19. 花岗闪长岩; 20. 花岗斑岩; 21. 正长斑岩;
22. 玄武岩; 23. 地质界线; 24. 不整合界线; 25. 逆断层; 26. 平移断层; 27. 断层; 28. Cu 矿床(点);
29. Fe 矿床(点); 30. Fe-Zn 矿床(点); 31. Pb-Zn 矿床(点); 32. Cu-Pb-Zn 矿床(点);
33. Pb-Zn-Ag 矿床(点); 34. Ag 矿床(点)

图1 内蒙古东乌旗区域地质图

(资料来源: 1:20 万区域地质矿产图)

Fig.1 Regional geological map of Dongwu Banner, Inner Mongolia Autonomous Region

区域构造线主要呈 NE 和 NW 向,少量沿 SN 和 EW 向展布,褶皱和断裂均很发育,形成格状构造。代表性断裂有巴润沙巴尔—朝不楞北大断裂(F_1)、朝不楞西—乌拉盖断裂(F_2)和白云呼布尔—满都宝力格大断裂(F_3)。

区内岩浆岩广泛分布,主要为中酸性、酸性,少量为碱性、基性侵入岩。海西期岩浆岩主要有花岗岩和闪长岩,燕山期岩浆岩主要有花岗岩、花岗斑岩、石英斑岩、正长斑岩、二长斑岩和闪长玢岩。

研究区位于内蒙古—兴安岭晚古生代—中生代 Cu, Pb, Zn, Au, Ag, Sn, Cr(Mo) 成矿区,锡林浩特—

东乌旗多金属成矿带的东段。总体来看,区域构造和岩浆活动频繁,多期的中酸性岩浆活动为多金属成矿提供了物质来源,中、上泥盆统和石炭系碎屑岩地层是有利的赋矿地层,NE 向断裂及其与 NW 向断裂交汇部位是有利的赋矿部位,区域成矿条件十分优越。区内典型矿床有朝不楞 Fe 多金属矿、吉林宝力格 Ag 矿、阿尔哈达 Pb-Zn-Ag 矿、达赛脱 Pb-Zn-Ag 矿和额尔登陶勒盖 Cu 矿等矿床。主要围岩蚀变有矽卡岩化、褐铁矿化、黄铁矿化、绿泥石化、绢云母化、高岭土化、萤石化、硅化、次生石英岩化和碳酸盐化等(表 1)。

表1 东乌旗主要金属矿床(点)地质特征

Tab.1 Geological features of polymetallic ore deposits in Dongwu Banner

矿床(点) 名称	矿床 (规模)	赋矿 地层	岩浆岩 类型	控矿构造	矿体产状	主要矿物组合	结构构造	蚀变类型
朝不楞	铁多金属 (中型)	中泥盆统 塔巴格特组	辉长岩、花岗岩	NE, NW 向 断裂破碎带	多呈 NE 走向,倾向 SE, 倾角 50~80°	金属矿物有磁铁矿、闪锌矿、磁黄铁矿、黄铁矿、自然铋、辉铋矿。脉石矿物有钙铁榴石和透辉石等	它形、半自形、自形结构; 浸染状、条带状、斑点状构造等	矽卡岩化

续表								
矿床(点)名称	矿床(规模)	赋矿地层	岩浆岩类型	控矿构造	矿体产状	主要矿物组合	结构构造	蚀变类型
阿尔哈达	铅锌银(大型)	上泥盆统安格爾音乌拉组	花岗岩	NW 向断裂控制,走向 306°,倾向 SW,倾角 35°	总体走向 305°,倾向 SW,倾角 25~55°	金属矿物有方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、毒砂、黄铜矿、辉银矿和自然银。脉石矿物有绿泥石、石英、绢云母、方解石、铁白云石和萤石以及粘土类矿物等	自形、半自形和它形粒状结构、交代残余结构和碎裂结构等;块状、角砾状、浸染状、脉状和条带状构造等	褐铁矿化、黄铁矿化、硅化、高岭土化、绢云母化、绿泥石化
达赛脱	铅锌银(小型)	中石炭统宝力格庙组	石英闪长岩	主要控矿构造为 NNE 向	走向 320°,倾向 NE,倾角 55°	褐铁矿、硬锰矿、软锰矿、方铅矿、闪锌矿	碎裂结构、填充结构等;细脉浸染状及块状构造	高岭土化、绿泥石化、硅化、褐铁矿化
吉林宝力格	银金(中型)	上泥盆统安格爾音乌拉组	花岗岩	NE 向	矿体走向 35~60°,倾向 NW,倾角 45~68°	金属矿物有黄铁矿、褐铁矿、方铅矿、闪锌矿、毒砂、自然银、银金矿。脉石矿物有石英、绢云母、粘土矿物、长石、绿泥石、碳酸盐矿物、萤石等	胶状、环带状、自形—半自形—它形粒状结构;细脉浸染状、网格状、团块状、角砾状构造	高岭土化、黄铁矿化、硅化、绢云母化、萤石化和碳酸盐化
查干陶勒盖	铅锌(矿点)	上泥盆统安格爾音乌拉组	二长花岗岩	NE,NW 向裂隙带	走向 NNW,倾向 265°,倾角 45°	主要金属矿物为方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等	稠密浸染—块状构造	角岩化、硅化、高岭土化和褐铁矿化
哈巴特盖	铅锌银(矿点)	上泥盆统安格爾音乌拉组	二长花岗岩	NEE, NE 向深断裂	走向 20°左右	主要金属矿物为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿等	浸染状构造	高岭土化、绢云母化、硅化、褐铁矿化
乌兰陶勒盖	铜(小型)	中石炭统宝力格庙组	二长斑岩	NW,NE 向		褐铁矿、孔雀石、铜蓝、辉铜矿、闪锌矿等	浸染状构造	矽卡岩化、硅化、褐铁矿化
额尔登陶勒盖	铜(矿点)	中石炭统宝力格庙组	二长花岗岩、闪长岩	NE, SN 向裂隙带		金属矿物有孔雀石、铜蓝、黄铜矿、蓝铜矿等,脉石矿物有石英、方解石、绿泥石、绢云母等	细脉状构造	褐铁矿化、高岭土化、次生石英岩化等

区内多金属元素地球化学异常发育,主要为 Cu,Pb,Zn,其次为 Cr。异常区呈点阵式分布,受 NE 和 NW 向断裂控制。具体异常主要围绕燕山期岩体分布,与 Cu,Pb,Zn 矿床关系密切。一般出现 Cu,Pb,Zn 多元素综合异常,异常强度高、规模大者,与成矿关系密切;单元素异常,异常强度小、规模小者,与成矿关系较差。

1.2 数据源

研究区涉及 2001 年 10 月 24 日获取的 1 景 ETM⁺ 图像及 2000 年 9 月 24 日获取的 1 景 ETM⁺ 图像。图像质量好,干扰信息较少,适用于地质构造和蚀变信息提取。

利用 ENVI 的几何纠正模块,选择图像对图像的几何纠正方法,以区域地质图为准,在采集地面控制点基础上,选用德洛内三角测量(DE los inside triangulation) 旋转、缩放和平移(rotation,scaling and translation,RST) 纠正和双线性内插重采样方法,对 ETM⁺ 图像进行了几何纠正。为了使彩色合成图像能最大限度地反映地表信息,通过波段相关性分析,选择相关性较小的 ETM⁺7(R),4(G),2(B) 波段组合进行假彩色合成,得到的假彩色合成图像色彩饱和,地表信息特征明显(图 2)。

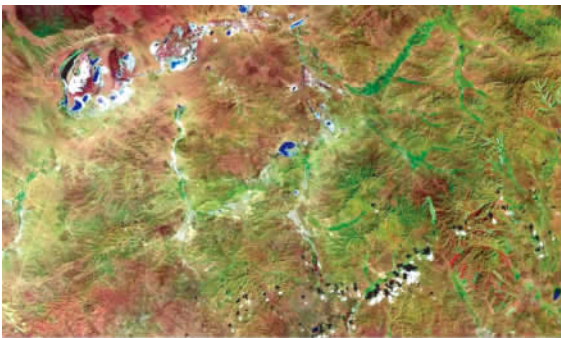


图 2 内蒙古东乌旗 ETM⁺ 7(R),4(G),2(B) 假彩色合成图像

Fig.2 False color image composed of ETM⁺ 7(R),4(G),2(B) for Dongwu Banner,Inner Mongolia Autonomous Region

2 线性构造解译与分形研究

2.1 线性构造增强处理

对基础图像(图 2)进行高通卷积滤波增强,以突出线性影像特征;对 ETM⁺1—5 和 7 波段进行主成分分析,在得到的主成分中,PC1 主要表现地形、地貌信息;PC2 突出表现构造信息,对 PC2 进行 3 像元×3 像元的低通卷积滤波,得到 PC2';ETM⁺4

反映了与水有关的地质构造、地貌和土壤、岩石类型等信息;通过 $PC1(R)$, $ETM^+4(G)$, $PC2(B)$ 假彩色合成,增强线性构造与其两侧影像间的亮度反差,突出主干构造。

2.2 线性构造解译

从图 2 和图 3 可看出,研究区内线性构造十分发育。线性构造的展布方位主要为 NE 和 NW 向,次为 NNW 向;NW 向线性构造较为密集断续,NE 向线性构造较为稀疏。其中,NE 向线性构造为成矿有利构造;已知矿床(点)主要分布于 NE 向与 NW 向线性构造交汇部位。

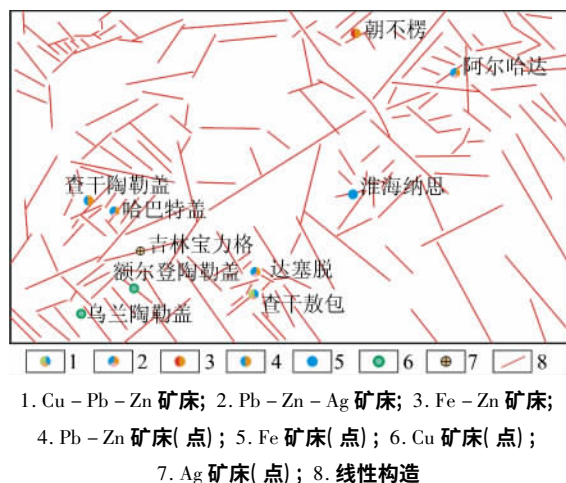


Fig.3 Interpretation map of linear structures of Dongwu Banner, Inner Mongolia Autonomous Region

2.3 线性构造分形研究

线性构造分维值的大小反映了线性构造展布结构的复杂程度、构造的发育程度和构造活动的强烈程度。一般认为分维值愈大,构造的空间愈复杂^[1],构造活动性愈强,愈有利于成矿元素的活化和成矿流体的运移和聚集、形成具有较大规模的矿床。

2.3.1 全区线性构造总体分形特征

目前线性构造分维统计的方法很多,本文采用计盒维数法,对研究区全区遥感线性构造进行分形统计,所采用的标度为 $66 \sim 4.125$ km。经统计计算,求得本区线性构造的分维值 $D = 1.7377$,相关系数 $r = 0.9992$ 。当显著性水平取 0.05 时,相关系数的临界值为 0.878。研究区的相关系数远远大于临界值,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。

将研究区的线性构造分维值与其他地区进行对比(表 2)可知,研究区线性构造较复杂,活动性较强。

表 2 研究区与其他地区线性构造分形特征比较

Tab.2 Comparison of fractal characteristics between the study area and other areas

区域	分维值(D)	资料来源
内蒙东乌旗一带线性构造	1.7377	本次计算
桂东地区线性构造	1.8720	赵少杰等 ^[2] , 2011
中国东部季风区断层	1.2350	朱晓华 ^[3] , 2002
中国西部干旱区断层	1.1450	朱晓华 ^[3] , 2002
中国青藏高原地区断层	1.2370	朱晓华 ^[3] , 2002
中国大陆断层	1.2360	朱晓华 ^[3] , 2002
日本岛弧线性构造	<1.6000	Hirata T ^[4] , 1989
华南地区线性构造	1.3500	孔凡臣等 ^[4] , 1991

2.3.2 不同区段线性体分形特征

以图 3 为底图,将其划分为 64 个边长为 16.5 km 的正方形区域,对每个正方形区域采用 $8.25 \sim 0.515625$ 的 5 个标度进行研究。经统计计算,求得各小正方形区域线性构造的分维值 $0.8316 \leq D \leq 1.4851$,相关系数 $0.9518 \leq r \leq 0.9984$ 。故每个小正方形区域的相关系数远远大于临界值(0.878),说明其分形结构具有极好的相似性。利用 Surfer 软件绘制出研究区线性构造分维等值线图(图 4)。

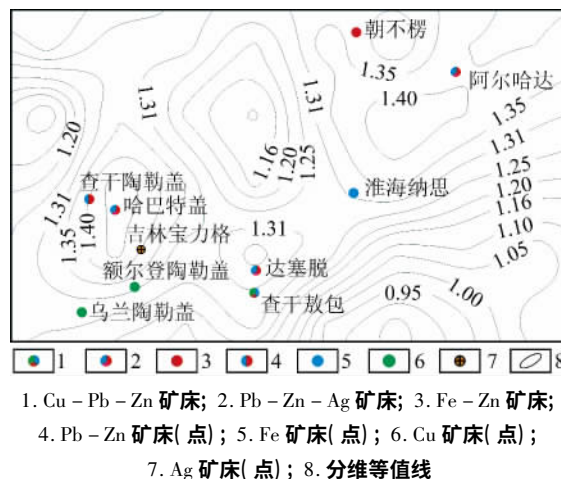


图 4 内蒙古东乌旗线性构造分维等值线图
Fig.4 Counter map of fractal dimension value of linear structures of Dongwu Banner, Inner Mongolia Autonomous Region

由图 4 可知,研究区线性构造分维值与其发育数量紧密相关,各正方形块子区内的线性构造数量越多、密度越大,分维值也就越大,反之越小。

将已知矿床(点)叠置在图 4 上,发现已知矿床(点)均分布在高分维值区或附近。由此可见,线性构造分维值对预测矿点有一定的参考价值。因此,从分形理论的角度来说,研究区中分维值 $D > 1.25$ 的强构造变形域是成矿的优势场所。

3 遥感蚀变信息提取

3.1 蚀变矿物反射光谱特征

研究区内矿化蚀变发育,几种常见蚀变岩的反

射波谱曲线如图 5 所示。与金属矿化有关的中低温

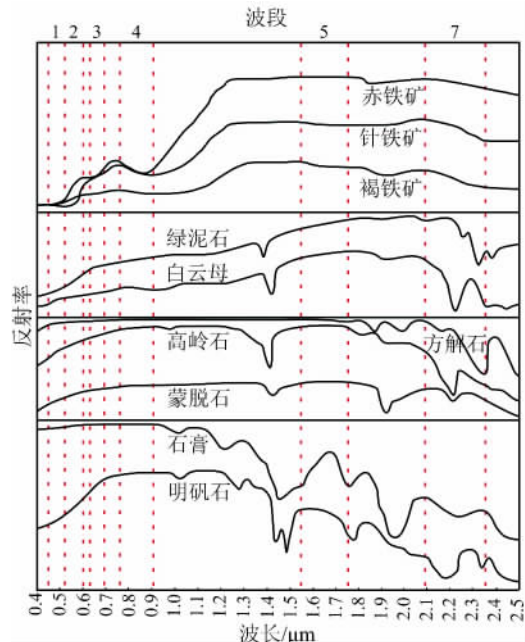


图 5 几种常见蚀变岩的反射波谱曲线

Fig. 5 Several common reflective curves of alteration rocks

热液蚀变类型主要有黄铁矿化、绿帘石化、萤石化、绿泥石化、硅化和粘土矿化等,这些近矿围岩蚀变矿物分别富含 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 离子、水 (H_2O)、羟基 (OH^-) 或碳酸根 (CO_3^{2-}) 等基团。上述结构离子的电子振动过程,会使富含这些离子或基团的矿物产生特征光谱^[3]。

3.2 蚀变信息提取方法

提取矿化蚀变信息的过程是对图像中所有像元信息统计归类分析的过程。研究区受植被、水系和阴影等诸多因素的影响,所以在蚀变信息提取前先去这些干扰因素,以使受干扰的像元不参与统计分析。利用 ENVI 软件中的掩模运算 (Masking) 功能对干扰信息进行掩模处理。

对于上述去除干扰后的图像,采用主成分分析方法提取蚀变异常信息。提取铁染信息用 $\text{ETM}^+1, 3, 4, 5$ 波段做主成分分析,异常主成分 PC4 具有的特点是 ETM^+1 和 ETM^+4 的贡献系数与 ETM^+3 的贡献系数符号相反(表 3)。

表 3 $\text{ETM}^+1, 3, 4, 5$ 波段的 PCA 统计
Tab. 3 PCA statistics of $\text{ETM}^+1, 3, 4, 5$

主成分	ETM^+1	ETM^+3	ETM^+4	ETM^+5	均值	标准离差
PC1	0.210 819	0.442 730	0.558 235	0.669 267	23.291 052	5.655 048
PC2	0.283 381	0.381 980	0.476 511	-0.739 408	47.013 466	10.170 302
PC3	0.935 343	-0.199 022	-0.283 139	0.073 189	59.211 276	12.816 301
PC4	0.019 618	-0.786 430	0.617 367	-0.000 891	71.932 040	15.595 231

从表 3 可以看出,在 PC4 中 ETM^+3 与 ETM^+1 , ETM^+4 具有相反的贡献值,且 ETM^+4 具有强负载

值(表现为正值),故 PC4 反映了铁染信息,即

$$\text{PC4} = 0.019\ 618(\text{ETM}^+1) - 0.786\ 43(\text{ETM}^+3) + 0.617\ 367(\text{ETM}^+4) - 0.000\ 891(\text{ETM}^+5)。$$
 (1)

提取羟基信息用 $\text{ETM}^+1, 4, 5, 7$ 波段做主成分分析,异常主成分 PC4 具有的特点是 $\text{ETM}^+4, \text{ETM}^+7$

的贡献系数与 ETM^+5 的贡献系数符号相反(表 4)。

表 4 $\text{ETM}^+1, 4, 5, 7$ 波段的 PCA 统计
Tab. 4 PCA statistics of $\text{ETM}^+1, 4, 5, 7$

主成分	ETM^+1	ETM^+4	ETM^+5	ETM^+7	均值	标准离差
PC1	0.199 684	0.512 775	0.641 001	0.535 076	22.620 615	7.069 426
PC2	0.311 281	0.757 797	-0.290 409	-0.494 481	57.302 067	16.834 819
PC3	0.537 075	-0.068 565	-0.602 200	0.586 690	69.167 360	20.459 737
PC4	0.758 143	-0.397 624	0.377 009	-0.353 522	57.551 099	17.306 110

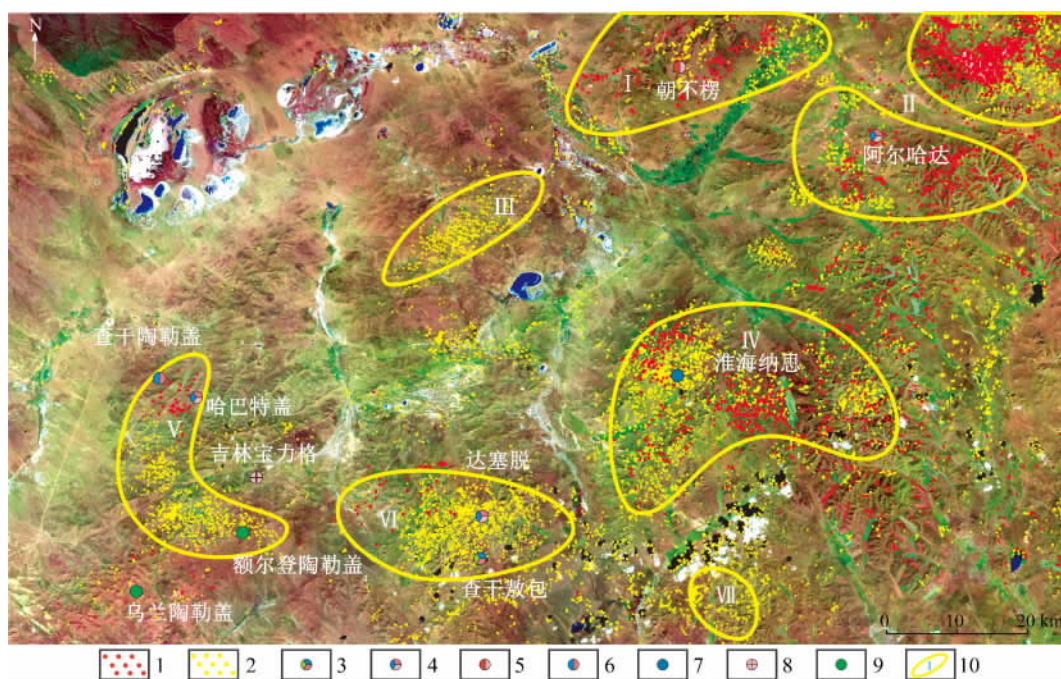
从表 4 可以看出,在 PC4 中 ETM^+5 与 ETM^+7 具有相反的贡献值,且 ETM^+5 具有强负载值(表现

为正值),故 PC4 反映了羟基信息,即

$$\text{PC4} = 0.758\ 143(\text{ETM}^+1) - 0.397\ 624(\text{ETM}^+4) + 0.377\ 009(\text{ETM}^+5) - 0.353\ 522(\text{ETM}^+7)。$$
 (2)

根据上述判断准则,铁染异常应该包含在 $\text{ETM}^+1, 3, 4, 5$ 主成分分析的 PC4 中,羟基蚀变应该包含在 $\text{ETM}^+1, 4, 5, 7$ 主成分分析的 PC4 中。根据概率密度分布曲线的数学含意,可以把统计均值理解为主成分分析结果的区域背景值,利用 $Y = X + K\sigma$

来划分异常等级,其中, Y 为异常等级; X 为均值; σ 为标准离差; K 为常数,对于羟基异常 K 一般取 2~3,对于铁染异常 K 一般取 1.5~2.5。据此,对所包含主要信息的主成分进行阈值分割,得到分级异常信息图像,并圈出 7 个遥感蚀变异常区(图 6)。



1. 铁染异常; 2. 羟基异常; 3. 成矿远景区及编号; 4. Cu - Pb - Zn 矿床; 5. Pb - Zn - Ag 矿床; 6. Fe - Pb 矿床; 7. Pb - Zn 矿床(点); 8. Fe 矿床; 9. Ag 矿床(点); 10. Cu 矿床(点); 11. 遥感蚀变异常区及编号

图6 内蒙古东乌旗遥感蚀变异常信息图

Fig. 6 Abnormal map of remote sensing alteration of Dongwu Banner, Inner Mongolia Autonomous Region

4 综合信息找矿预测

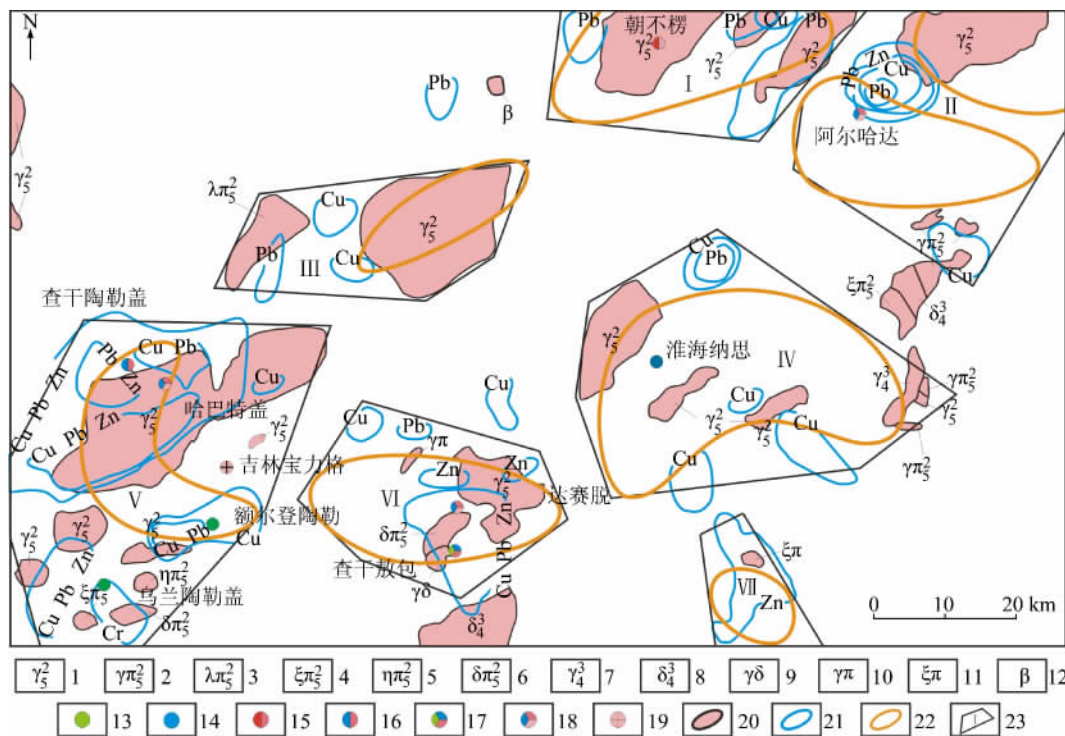
4.1 多种地质信息综合分析

将遥感蚀变异常、化探异常、矿床(点)与岩浆岩分

布等多种地质信息叠加(图7), 可以看出如下规律:

1) 与区域的格状构造一致, 岩浆岩体、蚀变异常区呈明显的点阵式排列。

2) 遥感蚀变异常、化探异常位于岩浆岩体之上



1. 燕山期花岗岩; 2. 燕山期花岗岩; 3. 燕山期石英斑岩; 4. 燕山期正长斑岩; 5. 燕山期二长斑岩; 6. 燕山期闪长玢岩; 7. 海西期花岗岩; 8. 海西期闪长岩; 9. 花岗闪长岩; 10. 花岗斑岩; 11. 正长斑岩; 12. 玄武岩; 13. Cu 矿床(点); 14. Fe 矿床(点); 15. Fe - Zn 矿床(点); 16. Pb - Zn 矿床(点); 17. Cu - Pb - Zn 矿床(点); 18. Pb - Zn - Ag 矿床(点); 19. Ag 矿床(点); 20. 岩体; 21. 化探异常区; 22. 遥感蚀变异常区; 23. 成矿远景区及编号

图7 内蒙古东乌旗找矿预测图

Fig. 7 Prediction map of mineral prospecting of Dongwu Banner, Inner Mongolia Autonomous Region

或其附近,已知矿床(点)大多位于蚀变异常区内。这表明,作为成矿物质运移通道和驱动力,区域构造和岩浆活动是本区成矿的基本因素。岩体周边热能量和物质交换最为活跃,导致遥感蚀变异常、化探异常最为显著,它们是成矿物质活化—迁移—再分布作用在不同物质层次上的表现形式,因此二者均可作为找矿预测依据。

3) 由 NE 向 SW,铁染异常强度渐减弱,羟基异常渐增强,相应地矿床(点)增加;且蚀变类型与矿床类型具有一定关联性,即北段分布铁或铁多金属矿床较多,南段分布多金属矿床较多(例外的是,阿尔哈达多金属矿床位于北段Ⅱ号预测区,但仔细分析可以看出,事实上它亦位于Ⅱ号预测区局部羟基异常中)。

4.2 找矿预测

根据区内线性构造分维值、遥感蚀变信息、岩体

分布特征、区域地球化学异常和已知矿床(点)分布等多种地学信息的综合分析,探讨区域找矿前景,划分了三级找矿远景区(图 7),具体如下:

一级找矿远景区蚀变强度强或较强, $D > 1.25$,具有多元素化探异常,区内有已知矿床(点)分布。

二级找矿远景区蚀变强度较强,线性构造分维值中等,具有多元素化探异常,区内有已知矿床(点)分布。

三级找矿远景区蚀变强度较强或较弱,线性构造分维值中等或较低,具有多或单元素化探异常,目前未发现矿点。

按上述原则,将研究区划分为 4 个一级找矿远景区(即Ⅰ,Ⅱ,V,Ⅵ号找矿远景区)、1 个二级找矿远景区(即Ⅳ号找矿远景区)和 2 个三级找矿远景区(即Ⅲ,Ⅶ号找矿远景区)(表 5)。

表 5 内蒙古东乌旗各找矿预测区特征
Tab. 5 Characteristics of mineral prediction areas of Dongwu Banner, Inner Mongolia Autonomous Region

编号	地质特征				地球化学特征	线性构造特征		蚀变异常特征	
	出露地层	构造	岩浆岩	已知矿点		方向	分维值	特征	规模/(10^6m^2)
Ⅰ	中泥盆统	NE 向逆断层	燕山期花岗岩	朝不楞	具 Pb, Cu 异常	NE, NW	1.29 ~ 1.35	铁染、羟基蚀变较强	200
Ⅱ	上泥盆统、上侏罗统	NE, NEE 向断层	燕山期花岗岩、花岗斑岩	阿尔哈达	具 Cu, Pb, Zn 异常	NE, NW, SN	1.31 ~ 1.42	铁染、羟基蚀变强烈	400
Ⅲ	中泥盆统	NE 向断层	燕山期花岗岩、石英斑岩		具 Cu, Pb 异常	NNW, NW, NE	1.00 ~ 1.20	羟基蚀变较强	70
Ⅳ	中奥陶统、上志留统、中石炭统	NE 向逆断层	海西期花岗岩、闪长岩、燕山期花岗岩、花岗斑岩	淮海纳思	具 Cu, Pb 异常	NE, NW	1.11 ~ 1.35	铁染、羟基蚀变强烈	386
Ⅴ	上泥盆统、中石炭统	NE 向逆断层、NW 向断层	燕山期花岗岩、正长斑岩、二长斑岩、闪长玢岩	查干陶勒盖、额尔登陶勒盖、吉林宝力格、哈巴特盖	具 Cu - Pb - Zn, Cu - Pb, Cu, Cr 异常	NE, EW	1.30 ~ 1.46	羟基蚀变强烈、铁染蚀变较弱	189
Ⅵ	中奥陶统、中石炭统	NE 向断层	燕山期花岗岩、闪长玢岩等	达赛脱、查干敖包	具 Cu - Pb - Zn, Cu, Pb, Zn 异常	NE, NW, EW, SN	1.25 ~ 1.35	羟基蚀变强烈、铁染蚀变较弱	198
Ⅶ	上侏罗统		正长斑岩		具 Zn 异常	NE	0.80 ~ 1.00	羟基蚀变较弱	36

5 结论

1) 区域遥感线性构造解译表明,研究区内线性构造十分发育,按线性构造的方位主要为 NE 和 NW

向,其次为 SN 和 EW 向,构成格状构造系统。

2) 研究区内线性构造具有分形特征,其分形结构具有良好的统计自相似性,其分维值高于中国大陆许多地区的断裂构造分维值。线性构造分维值 $D > 1.25$ 的强构造变形域有利于成矿作用的发生,

是成矿优势区域。

3) 研究区内具有显著的铁染和羟基遥感蚀变异常,已知矿床(点)大多位于遥感蚀变异常区内。与区域的格状构造一致,岩浆岩体、遥感蚀变异常区呈明显的点阵式排列。遥感蚀变异常和化探异常位于岩浆岩体之上或其附近。作为成矿物质运移通道和驱动力,区域构造和岩浆活动是本区成矿的基本因素。

4) 研究区内由 NE 向 SW,铁染异常强度渐减弱,羟基异常渐增强,相应的矿床(点)亦增多;蚀变类型与矿床类型具有一定关联性,即北段分布铁或铁多金属矿床较多,南段分布多金属矿床较多。

5) 通过遥感信息和已知矿点对比研究,证实了遥感解译线性构造和遥感蚀变异常信息可以作为找矿预测的标志。综合分析线性构造、遥感蚀变异常信息、地球化学异常、岩浆岩和矿床(点)分布等多种地质信息,确定了三级找矿远景区(其中 I, II, V, VI 号为一级远景区; IV 号为二级远景区; III, VII 号为三级远景区),可为研究区的地质找矿工作提供线索。

参考文献(References):

- [1] 况忠,龙胜清,曾禹人,等.黔西南地区遥感构造与金矿的关系及找矿预测[J].国土资源遥感,2012,24(1):160-165.
Kuang Z, Long S Q, Zeng Y R, et al. The relationship between remote sensing structures and gold deposits and ore - prospecting prognosis in Southwest Guizhou[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2012, 24(1): 160-165.
- [2] 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.
Zhao S J, Qian J P, Chen H Y. 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.
- [3] 余勇,钱建平,袁爱平.高龙金矿区高分辨率遥感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.
Yu Y, Qian J P, Yuan A P. 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.
- [4] Loughlin W P. Principal component analysis for alteration mapping[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1991, 57(9): 163-1169.
- [5] 郑桂香,池天河,蔺启忠.分形在岩性分类及蚀变信息提取中的应用[J].国土资源遥感,2012,24(2):110-115.
Zheng G X, Chi T H, Lin Q Z. Fractal application in lithological classification and alteration extraction[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2012, 24(2): 110-115.
- [6] Rajesh H M. Mapping proterozoic unconformity - related uranium deposits in the Rockhole area, northern Territory, Australia using Landsat ETM+ [J]. Ore Geology Reviews, 2008, 33(3/4): 382-396.
- [7] 邓吉秋,谢杨,张宝一,等. ETM+ 图像锰矿化蚀变信息提取与找矿预测[J].国土资源遥感,2011,23(1):102-105.
Deng J Q, Xie Y, Zhang B Y, et al. The extraction of the manganese mineralization alteration information from the ETM+ image and ore prognosis[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2011, 23(1): 102-105.
- [8] 刘文兰,张微.遥感构造蚀变异常信息提取及找矿预测——以老挝为例[J].国土资源遥感,2012,24(2):68-74.
Liu W L, Zhang W. Remote sensing structural alteration information extraction and ore prognosis: A case study of Laos[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2012, 24(2): 68-74.
- [9] 钱建平,伍贵华,陈宏毅.现代遥感技术在地质找矿中的应用[J].地质找矿论丛,2012,27(3):355-360.
Qian J P, Wu G H, Chen H Y. The application of modern remote sensing technology to geology and ore exploration[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2012, 27(3): 335-360.
- [10] 李继宏,张万昌.内蒙古东乌旗草原覆盖区遥感构造信息提取[J].地质找矿论丛,2005,20(2):137-141.
Li J H, Zhang W C. Tectonic information extract in the Dong Ujimqin county grassland district of Inner Mongolia[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2005, 20(2): 137-141.
- [11] 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].成都理工学院学报:自然科学版,1999,26(1):78-81.
Chen J P, Hu M M, Li J C. Statistical analysis for regional structure by remote sensing geology in Kang - Dian Axis of the Earth[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition, 1999, 26(1): 78-81.
- [12] 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[J].南京:南京师范大学,2002.
Zhu X H. The study on the relationship between landform or geological hazard and spatial fractal dimension of China [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2002.
- [13] 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(12): 157-170.
- [14] 孔凡臣,丁国瑜.线性构造分维值的含义[J].地震,1991(5):33-37.
Kong F C, Ding G Y. The implications of the fractal dimension values of lineaments[J]. Earthquake, 1991(5): 33-37.
- [15] 张玉君,杨建民,陈薇. ETM+ (TM) 蚀变遥感异常提取方法研究与应用——地质依据和波谱前提[J].国土资源遥感,2002,14(4):30-36.
Zhang Y J, Yang J M, Chen W. A study of the method for extraction of alteration anomalies from the ETM+ (TM) data and its application: Geologic basis and spectral precondition[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2002, 14(4): 30-36.

Extraction of linear structure and alteration information based on remote sensing image and ore – prospecting prognosis for Dongwu Banner, Inner Mongolia

QIAN Jianping, ZHANG Yuan, ZHAO Xiaoxing, ZHAO Shaojie, LI Chengli
(College of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Using ETM⁺ remote sensing data as the basic information sources, the authors carried out remote – sensing geological prospecting in Pb – Zn – Ag polymetallic ore zones of Dongwu Banner, Inner Mongolia. Remote sensing image was processed by geometric correction, atmospheric correction and the noise removal technology. Image filtering was conducted so as to enhance tectonic information and explain linear structure. The fractal dimension values were calculated by the method of fractal geometry and the box – counting dimension. As a result, the linear structures showed excellent statistical self – similarity and fractal characteristics in the study area. Principal component analysis and threshold segmentation were used to enhance the spectrum and space information and extract the iron – stained and hydroxy alteration information. Through comprehensively analyzing the linear structure, remote sensing alteration information, rock mass distribution characteristics, regional geochemical information and known deposits, seven metallogenic prospective areas at three levels were delineated.

Key words: ETM⁺ remote sensing data; linear structure; fractal dimension value; extraction of alteration information; prediction of mineral prospecting

第一作者简介: 钱建平(1953 –), 男, 教授, 主要研究方向为成矿构造和构造地球化学。E – mail: jpqian@163.com。

(责任编辑: 刘心季)