

西藏多龙矿集区铜元素遥感地球化学模型

姚佛军^{1,2}, 杨建民¹, 陈红旗³, 张天平³, 李玉彬³, 刘朝强³, 耿新霞¹

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用和资源评价重点实验室, 北京 100037; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 3. 西藏自治区地质矿产勘查开发局 第五地质大队, 青海 格尔木 816000)

摘要: 遥感在一定程度上可以反映地物元素含量的特征, 利用遥感反演元素特征在地质工作程度低地区或者国外地质资料难以获取地区可以提供一个参数。本文根据元素含量与光谱关系, 建立了波段相关斜率、波段的斜率指数、波段相关吸收深度指数、波段的相关多项式指数这4个遥感地球化学反演模型的指标, 以西藏多龙矿集区为研究区, 通过回归算法反演了铜元素遥感地球化学, 并经过F检验证实反演可信, 比较预测值与实际值吻合较好, 最后把实测铜元素地球化学、蚀变遥感异常与遥感反演铜元素地球化学进行了对比, 证实遥感铜元素地球化学反演结果较好, 且可以作为一个独立的遥感参数。

关键词: 地球化学; 遥感; 光谱; 铜元素

中图分类号: P627

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)05-0710-11

A remote sensing Cu geochemical model for the Duolong ore concentration area, Tibet

YAO Fo-jun^{1,2}, YANG Jian-min¹, CHEN Hong-qi³, ZHANG Tian-ping³, LI Yu-bin³, LIU Chao-qiang³
and GENG Xin-xia¹

(1. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. No. 5 Geological Party, Tibet Bureau of Geology and Mineral Exploration, Golmud 816000, China)

Abstract: The characteristics of elements content can be somewhat reflected by remote sensing. The remote sensing geochemistry can provide a parameter in many areas, especially in low geological exploration regions or in areas abroad where the acquisition of geological data are difficult. In this paper, according to the relationship between the element content and the spectra, four indicators of the remote sensing geochemical model were established, i. e., correlation slope of bands, slope index of bands, absorption depth of index of bands, and polynomial related index of bands. With the Duolong ore concentration area in Tibet as the study area, Cu element remote sensing geochemistry based on regression algorithm is in accordance with the measured Cu geochemistry, and F test confirmed the credibility of the inversion results. The remote sensing Cu geochemical results are good and can be considered to be an independent remote sensing parameter, as demonstrated by the comparison between the measured Cu element geochemistry and the remote sensing alteration anomalies.

Key words: geochemistry; remote sensing; spectroscopy; copper

收稿日期: 2014-07-28; 修订日期: 2015-07-07

基金项目: 中央级科研院所基本业务费项目(K1501, K1208); 国家自然科学基金资助项目(41102205)

作者简介: 姚佛军(1980-), 男, 副研究员, 主要研究领域为遥感地质与行星地质, E-mail: fjyao@sina.com

多年的实践表明,遥感在蚀变矿物信息提取中具有一定的作用,遥感所接收到的主要吸收特征(主要指吸收谷的波长)与分子晶体结构中分子振动和电子跃迁有关,如羟基、碳酸盐基团铁离子和锰离子的吸收特征,而与元素丰度关系不大。但也有研究表明,遥感特征与地球化学元素存在相关关系,也就是说元素含量对分子吸收特征有影响,如高铝白云母和低铝白云母的遥感特征有一定的差异,铝含量的增加使吸收谷向左偏移(Swayze, 1997)。在地外天体研究中,反演地球化学时遥感常用于研究月球上的铁、钛元素含量,根据月壤光谱特征与元素含量关系,Lucey等(1998)给出了经验公式。国内也有相关研究,如吴昫昭等(2003)做过遥感地球化学的研究。一般在遥感反演地球化学的研究中,主要应用遥感DN值与元素含量建立关系,但DN值与元素关系没有具体的特征值参与计算,导致精度不够。本文以西藏多龙矿集区为例,从元素含量与遥感特征对应关系入手,推演4个参与地球化学反演的特征指数并进行计算,利用多元回归模型进行遥感反演地球化学。这是一种新的方法。反演的遥感地球化学结果与蚀变遥感异常及实际地球化学填图结果对比显示反演效果较好。

1 地质背景

多龙矿集区是在西藏班公湖-怒江成矿带发现的大型铜矿矿集区,位于西藏改则县西北的多不杂5 040.9 m高地一带,地理坐标:东经 $83^{\circ}25' \sim 27'$,北纬 $32^{\circ}49' \sim 51'$ 。矿区属高原中低山地貌区,平均海拔5 000 m,东南距改则县城约90 km,有简易公路相通,交通较为便利。大地构造上位于特提斯-喜马拉雅成矿域班公湖-怒江多金属成矿带西段的多不杂构造岩浆带中,以多不杂为中心,西至地堡那木岗,东至铁格隆。其北临羌塘-三江复合板片南缘,紧邻班怒缝合带,其南属于冈底斯-念青唐古拉板片(王璞珺等,2003;李超等,2011)。

多龙矿集区出露地层主要为中侏罗统雁石坪群和下白垩统美日切组。其中雁石坪群为一套滨海相碎屑岩建造,分布于矿区南部,由灰色中厚层状长石石英岩夹钙质粉砂岩组成;下白垩统美日切组分布于矿区北部,由一套陆相喷发的安山岩、玄武质安山岩、安山玢岩和火山碎屑岩组成。另外,在矿区外

围还有少量第三系康托组棕红色粘土及砂砾岩和第四系残坡积层分布(图1)。岩浆活动强烈,以喷发、喷溢和超浅成侵入为主,侵位于雁石坪群和美日切组的岩体主要为花岗闪长斑岩和闪长玢岩两种岩体。含矿斑岩主要为花岗闪长斑岩,出露于矿区中东部,岩体呈略不规则的长椭圆形近东西向展布,与围岩呈侵入接触关系。此外,还有花岗闪长岩、辉绿玢岩、闪长岩、石英闪长岩等岩体侵位于雁石坪群和美日切组中,主要以岩株、岩脉、岩墙等形式产出。矿集区处于铁格山大型环形构造NWW段的环境上,紧靠环缘外侧发育有英安岩和蚀变花岗闪长斑岩岩体。断裂构造发育,岩体顶部发育穹隆构造,断裂以早期的近东西向断裂、中期的北东向断裂和晚期北西向断裂3组形成菱形状构造格架。矿集区普遍发生围岩蚀变,并且蚀变相当强烈,主要蚀变类型为硅化、钾长石化、绢云母化、黑云母化、绿泥石化、碳酸盐化和粘土化等。热液围岩蚀变具有分带性,从含矿斑岩中心至外围依次划分出钾硅化带→绢英岩化带→青磐岩化带→伊利石-水白云母化→角闪岩带,形成以斑岩体为中心的同心环状(曲晓明等,2006;宁墨兔等,2011;冯彩霞,2011;李丹等,2011)。矿集区主要包括多不杂铜矿和波龙铜矿(图2)。

2 矿物中元素含量与波谱特征关系

由于可见光-短波红外的光谱都是矿物(或岩石)的分子振动和电子跃迁产生的,因此,阳离子的大小和含量对矿物波谱特征有影响。为了分析元素对光谱特征的影响,依据美国地质调查局(USGS)最新谱库中白云母的化合物含量与光谱曲线数据,提取出其光谱吸收特征,并对光谱吸收特征与 Al_2O_3 含量做了相关性分析,来研究单一蚀变矿物元素含量对光谱特征的影响。表1列出了白云母 Al_2O_3 元素含量与短波红外区吸收谷位置的对应关系。

从表1中可以看出,白云母的 Al_2O_3 含量与光谱吸收谷位置有一定的关系。分别利用最小二乘法拟合白云母的 Al_2O_3 含量与光谱吸收谷位置,结果显示在 $1.4\text{ }\mu\text{m}$ 和 $2.2\text{ }\mu\text{m}$ 左右二者具有典型的线性关系:在 $2.2\text{ }\mu\text{m}$ 左右吸收谷位置,二者相关性为0.927 4;在 $1.4\text{ }\mu\text{m}$ 左右吸收谷位置,二者相关性为0.844 3(图3)。

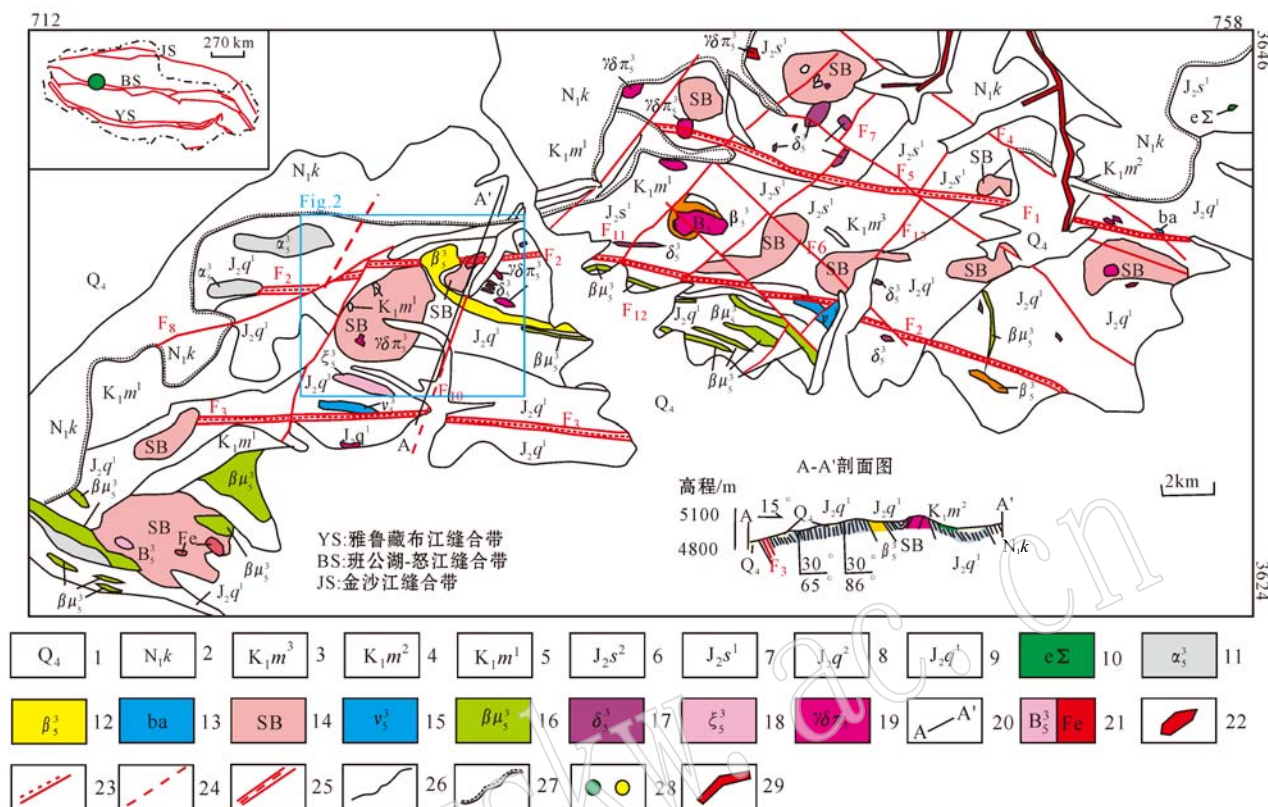


图1 多龙矿集区区域地质图(据西藏地质五队,2010)^①

Fig. 1 Regional geological schematic map of the Duolong ore concentration (after No. 5 Geological Party, Tibet Bureau of Geology and Mineral Exploration, 2010)^①

1—第四系残坡积物; 2—新近系康托组棕红色粘土及砂砾石层; 3—下白垩统美日切组上段火山角砾岩; 4—下白垩统美日切组中段火山碎屑岩; 5—下白垩统美日切组下段安山玢岩、安山质玄武岩; 6—中侏罗统色哇组二段: 变石英砂岩、变长石石英砂岩夹深灰色粉砂质板岩; 7—中侏罗统色哇组一段: 变长石石英砂岩砂砾岩夹深灰色至深黑色变石英粉砂岩; 8—中侏罗统曲色组二段: 变长石石英砂岩、粉砂岩、粉砂质板岩、夹硅质岩、灰绿色玄武岩、基性火山熔岩; 9—中侏罗统曲色组一段: 深灰色粉砂质板岩夹变长石石英砂岩、灰岩条带及透镜体; 10—蛇纹石化橄榄岩; 11—褐红色、褐灰色安山岩; 12—绿帘石化玄武质安山岩; 13—枕状玄武岩; 14—蚀变体; 15—浅绿灰色辉长岩; 16—灰绿色辉绿岩; 17—灰绿色闪长岩、石英闪长岩; 18—英安岩; 19—花岗闪长斑岩; 20—地质剖面位置及编号; 21—不明火山角砾岩、铁帽; 22—石英脉; 23—实测性质不明断层、推测断层; 24—实测平移断层及断层产状; 25—切—脆性构造破碎带; 26—实测地质界线; 27—实测角度不整合界线; 28—铜矿(化)点、岩金矿(化)点; 29—砂金矿点、砂金矿体

1—Quaternary residual material; 2—Neogene Kangtuo Formation: red-brown clay and gravel layers; 3—upper member of lower Cretaceous Meirique Formation: volcanic breccia; 4—middle member of lower Cretaceous Meirique Formation: volcanic breccia; 5—lower member of lower Cretaceous Meirique Formation: andesitic porphyrite, andesitic basalt; 6—second member of middle Jurassic Sewa Formation: altered quartz sandstone, altered quartz sandstone conglomerate interbedded with deep gray silty slate; 7—first member of middle Jurassic Sewa Formation: altered quartz sandstone conglomerate interbedded with deep black to dark gray altered quartz siltstone; 8—second member of Middle Jurassic Quse Formation: metamorphosed feldspar quartz sandstone, siltstone, silty slate with siliceous rocks, grayish green basalt, mafic volcanic lava; 9—first member of middle Jurassic Quse Formation: dark gray aleuritic texture slate with metamorphosed feldspar quartz sandstone, limestone bands and lenses; 10—serpentinized peridotite; 11—brownish red and brown gray andesite dacite; 12—epidotized basaltic andesite; 13—pillow shaped basalt; 14—altered body; 15—greenish gray gabbro; 16—grayish green diabase; 17—grayish green diorite, quartz diorite; 18—dacite; 19—granodiorite porphyry; 20—location and serial number of geological section; 21—unknown volcanic breccia, gossan; 22—quartz vein; 23—measured fault, unknown fault; 24—measured slip fault and fault attitude; 25—ductile brittle fracture zone; 26—measured geological boundary; 27—measured angular unconformity; 28—copper deposit (ore spot); 29—placer gold ore spot (orebody)

① 西藏地质五队. 2010. 西藏班公湖-怒江成矿带西段铜多金属资源调查.

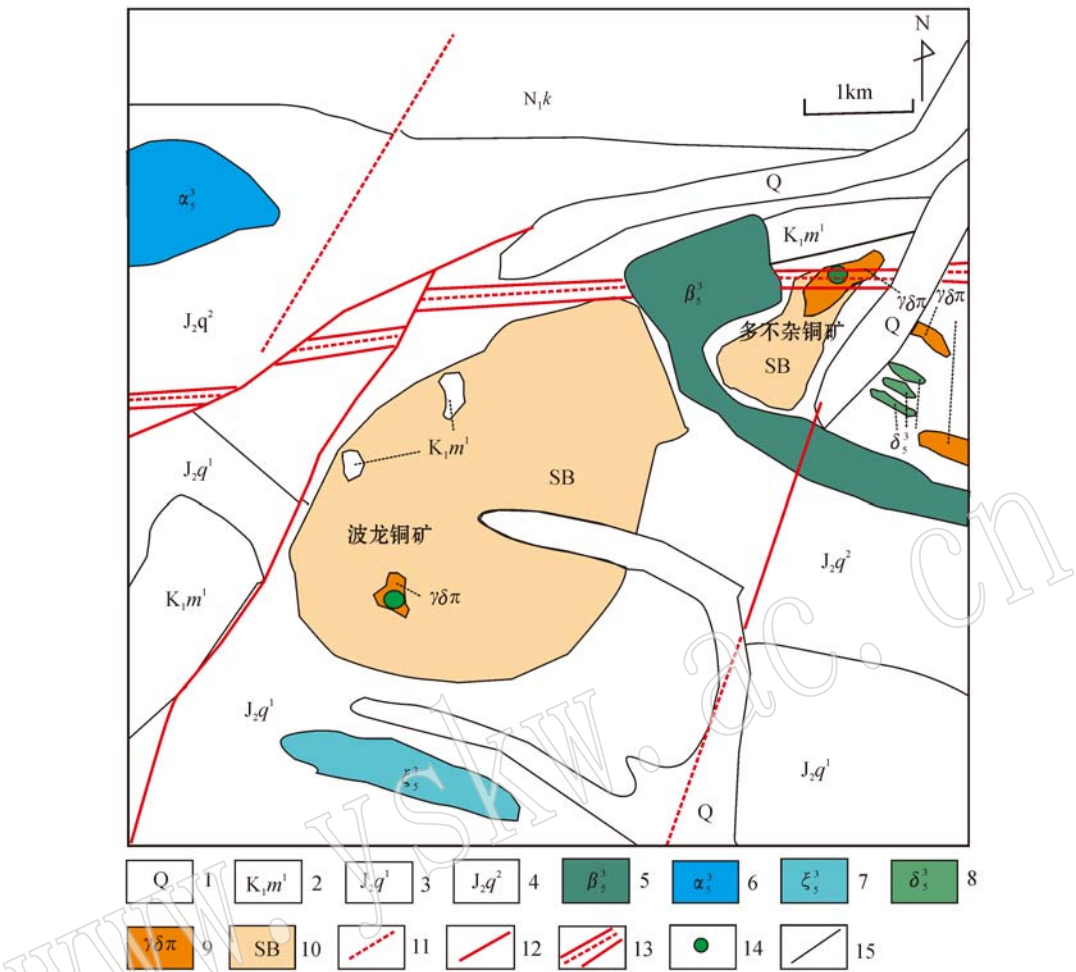


图 2 多龙矿集区矿床地质简图(据西藏地质五队, 2010)^①

Fig. 2 Geological sketch map of the Duolong ore concentration area (after No. 5 Geological Party, Tibet Bureau of Geology and Mineral Exploration)^①

1—第四系残破积物；2—下白垩统美日切组上段火山角砾岩；3—中侏罗统曲色组一段：深灰色粉砂质板岩夹变长石石英砂岩、灰岩条带及透镜体；4—中侏罗统曲色组二段：变长石石英砂岩、粉砂岩、粉砂质板岩、夹硅质岩、灰绿色玄武岩、基性火山熔岩；5—绿帘石化玄武质安山岩；6—褐红色、褐灰色安山岩；7—英安岩；8—灰绿色闪长岩、石英闪长岩；9—花岗闪长斑岩；10—蚀变体；11—推测断层；12—实测不明断层；13—韧—脆性构造破碎带；14—铜矿(点)；15—地质界限

1—Quaternary residual material; 2—upper member of lower Cretaceous Meiriqui Formation: volcanic breccia; 3—first member of middle Jurassic Quse Formation: dark gray aleuritic texture slate with metamorphosed feldspar quartz sandstone, limestone bands and lenses; 4—second member of Middle Jurassic Quse Formation: metamorphosed feldspar quartz sandstone, siltstone, silty slate with siliceous rocks, grayish green basalt, mafic volcanic lava; 5—epidotized basaltic andesite; 6—brownish red and brownish gray andesite dacite; 7—dacite; 8—grayish green diorite, quartz diorite; 9—granodiorite porphyry; 10—altered body; 11—measured fault; 12—unknown fault; 13—ductile brittle fracture zone; 14—copper deposit (ore spot); 15—geological boundary

为了更好地表示元素含量与光谱吸收特征的关系,从 USGS 最新谱库上获得橄榄石的光谱特征与元素含量(表 2),利用最小二乘法拟合 FeO 的含量与橄榄石光谱吸收谷 2.2 μm 左右位置,结果仍然显示典型的线性关系,铁含量与 2.2 μm 左右吸收谷位置相关性为 0.975(图 4)。

由于岩石是硅酸盐、碳酸盐、硫酸盐等一系列矿物的组合,而混合矿物光谱又是线性和非线性的单矿物组合,含量较少的矿物的吸收特征可能被含量较多的某个矿物的吸收特征所掩盖,所以岩石的吸收特征与元素含量的关系非常复杂,需要建立的参数特征也非常复杂,需要进行回归分析。

① 西藏地质五队. 2010. 西藏班公湖-怒江成矿带西段铜多金属资源调查.

表 1 白云母 Al_2O_3 含量与吸收谷位置关系(据 USGS 谱库)

Table 1 The relationship between content of element Al and absorption peak position of muscovite (after USGS spectral library)

白云母样品编号	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	吸收特征
G120	35.69	1.412 191, 2.200 405
G119	33.34	1.411 807, 2.201 339
G118	31.31	1.413 346, 2.207 902
G117	35.54	1.411 230 5, 2.199 938 5
G116	31.06	1.414 503, 2.213 559
G114	33.09	1.412 961, 2.205 085
G113	35.64	1.411 807, 2.197 607
G111	28.03	1.416 435, 2.219 719 5
G108	35.0	1.410 462, 2.198 539

3 铜元素遥感地球化学特征指标

根据西藏地质五队提供的多龙矿集区铜元素的地球化学采样数据,笔者分析了铜元素含量与 ASTER 数据(先进星载热发射和反射辐射仪接受的遥感数据)对应光谱的关系。

为了研究铜含量空间分布与对应 ASTER 光谱之间的关系,选择几处具有不同铜含量的地表进行 ASTER 遥感数据采样。为了表示铜含量与遥感图像采样的特征,在遥感图像上色调差别不大区域,基本上按 $1\text{ }\mu\text{g/g}$ 铜含量递进,选择几种不同的铜元素

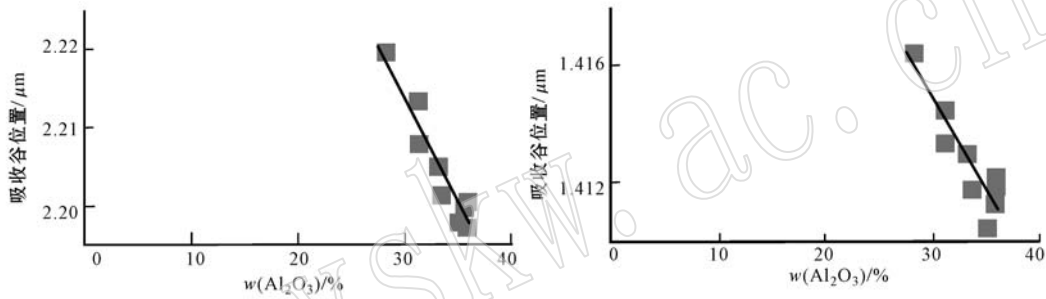


图 3 白云母吸收谷位置与 Al_2O_3 含量相关关系

Fig. 3 The relationship between absorption position and the content of Al_2O_3 of muscovite

表 2 橄榄石 FeO 含量与吸收谷位置关系(据 USGS 谱库)

Table 2 The relationship between the content of FeO and absorption position of olivine (after USGS spectral library)

橄榄石编号	$w(\text{FeO})/\%$	吸收特征
KI3005	62.82	2.214 504
KI3054	30.59	2.202 275
KI3188	41.43	2.207 432
KI3189	34.63	2.204 147
KI3291	53.65	2.209 784
KI3377	59.75	2.212 614
KI4143	47.65	2.207 902

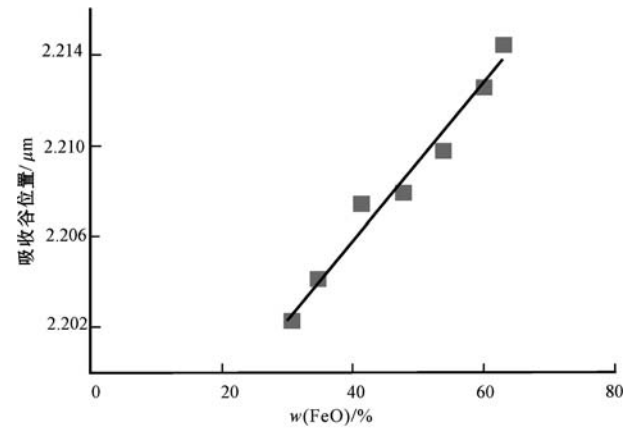


图 4 橄榄石吸收谷位置与 FeO 含量相关关系

Fig. 4 The relationship between the content of FeO and absorption position of olivine

含量(9.8、10.8、11.9、13.1、14.1、15.1、16.1、17.1 $\mu\text{g/g}$),按其坐标采集了 ASTER 图像对应位置的光谱(图 5)。从图 6 可以看出,随着铜元素含量的增加,第 7 和第 8 波段与第 4 波段之间的差值在增大,即光谱曲线的斜率在逐步增大。但是这种对应关系不是特别明显,反演铜元素的地球化学时需要把这种差别放大。根据波段的特征,定义 4 组差别指标来放大铜元素对波谱斜率影响的特征:

波段相关斜率: $(B4 - B5)/(B5 - B6)$

波段的斜率指数: $e^{(B5 - B6)/B5}$

波段相关吸收深度指数: $e^{(B4 - B6)/(B4 - B5)}$

波段的相关多项式指数: $e^{(B4 - B6)/B5 + (B7 - B9)/B8}$

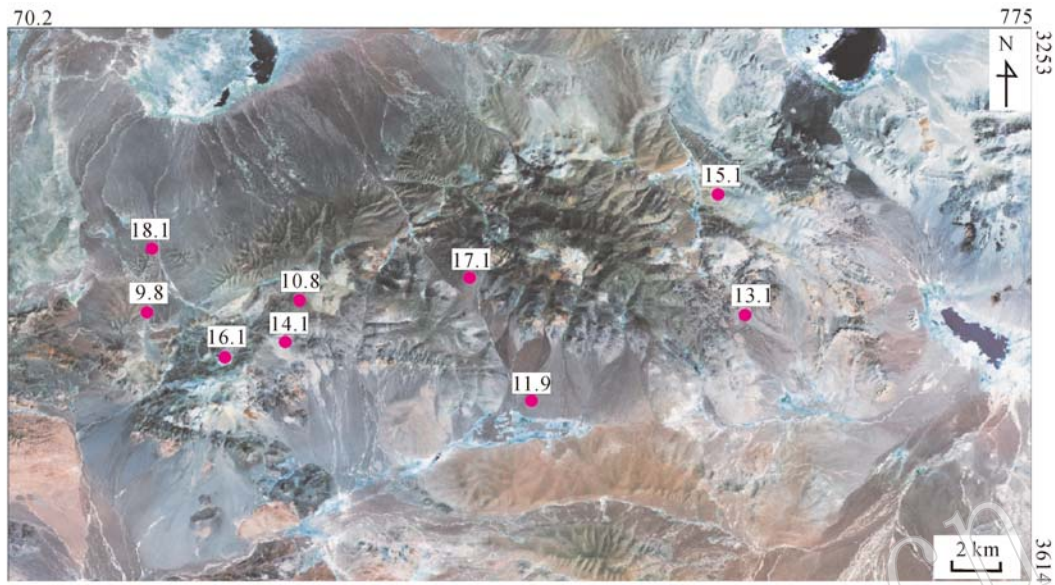


图 5 多龙矿集区铜元素采样位置简图及铜元素与光谱分析用数据

Fig. 5 The sampling location map showing spectral data and element Cu in the Duolong ore concentration area

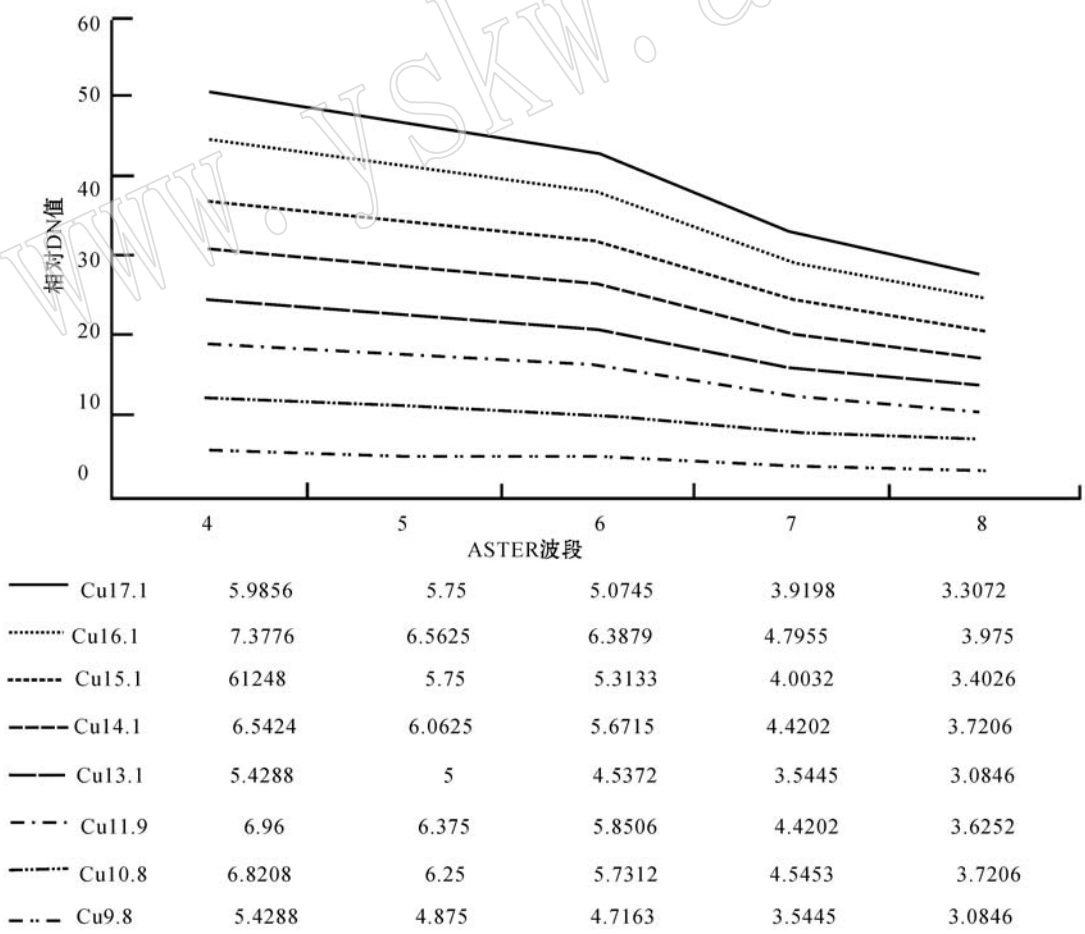


图 6 铜元素含量与 ASTER 对应光谱之间的关系(铜元素含量单位为 10^{-6})

Fig. 6 The relationship between the content of element Cu and ASTER spectra (Cu unit: 10^{-6})

其中,B4、B5、B6、B7、B8、B9 分别指 ASTER 的第 4、5、6、7、8、9 波段。这 4 个参数可以把铜元素对光谱斜率的影响放大。表 3 为铜元素含量与 ASTER 对应波段关系表。

表 3 铜元素含量与波段 DN 值及反演参数对比表
Table 3 The relationship of the content of element Cu to bands DN values and inversion parameters

ASTER 近红外-短波红外 DN 值						$w(Cu)/10^{-6}$	反演参数			
B4	B5	B6	B7	B8	B9		相关斜率	斜率指数	吸收深度指数	多项式指数
18.479	6.403	6.063	5.612	4.420	3.752	24.1	35.444	8.401	21.860	10.589
22.392	7.586	7.062	6.448	5.004	4.070	20.4	28.261	15.836	22.335	12.131
22.392	7.447	7.062	6.448	4.962	4.134	82.7	38.848	7.895	21.698	12.487
21.088	6.890	6.688	6.030	4.629	3.784	23.7	69.972	3.247	20.965	13.132
14.348	5.290	4.688	4.298	3.253	2.830	98.3	15.045	94.925	24.518	9.755
16.957	6.125	5.563	5.134	4.003	3.466	25.4	19.264	39.242	23.470	9.748
19.566	6.612	6.000	5.492	4.128	3.562	150	21.167	40.543	23.144	12.421
19.131	6.682	6.063	5.672	4.295	3.657	29.2	20.109	40.703	23.317	11.302
22.175	6.890	6.50	5.791	4.629	3.752	20.1	39.151	9.644	21.685	15.109
20.653	7.099	6.563	5.910	4.587	3.848	23.9	25.254	20.573	22.619	11.409
18.262	6.194	5.688	5.075	3.920	3.371	24.6	23.806	26.398	22.783	11.758
18.696	6.403	5.938	5.433	4.170	3.530	18.7	26.397	18.342	22.503	11.576
20.436	6.960	6.438	5.970	4.670	3.816	21.5	25.791	20.143	22.563	11.851
19.566	6.751	6.250	5.731	4.420	3.721	23.5	25.568	19.483	22.586	11.328
17.827	6.264	5.563	5.313	4.003	3.371	22.8	16.483	88.196	24.095	11.509
17.175	6.125	5.750	5.373	4.128	3.562	21.7	29.482	11.562	22.237	10.015
19.783	6.612	6.188	5.731	4.462	3.752	20.8	31.028	13.040	22.125	12.179
22.392	7.169	6.813	6.269	4.921	4.134	20.4	42.726	7.301	21.547	13.559
20.218	6.96	6.438	5.851	4.535	3.816	43.7	25.375	20.143	22.606	11.332
19.566	6.82	6.313	5.672	4.420	3.752	20.5	25.074	19.705	22.638	10.775
22.175	7.030	6.256	6.030	4.587	3.816	18.7	19.429	84.445	23.440	15.611
.....										

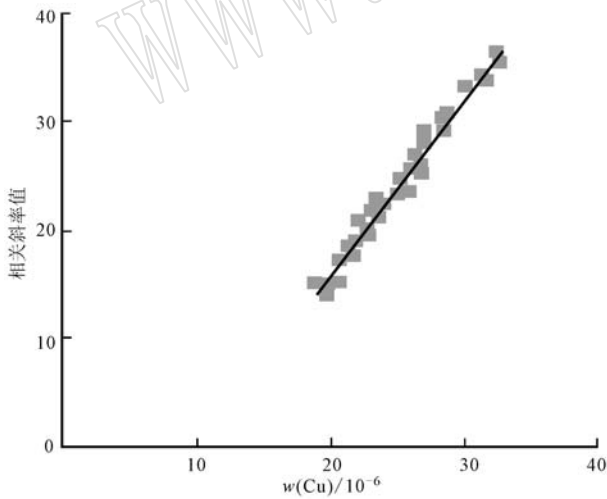


图 7 铜元素含量与波段相关斜率的关系
Fig. 7 The relationship between the content of element Cu and bands slope

为了简化研究,我们把铜元素含量从低到高进行排列,按 1%递进步骤选择铜元素含量分析其与上述 4 个反演参数之间的关系。需要说明的是,如果全部统计,相关系数非常低,约为0.004 8。

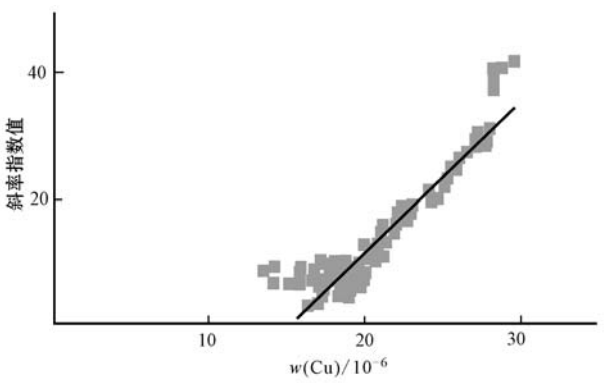


图 8 铜元素含量与波段斜率指数的关系
Fig. 8 The relationship between the content of element Cu and bands slope index

铜元素含量与 4 个参数的关系分别如图 7、8、9、10。从图 7 可以看出,铜元素含量与波段相关斜率存在相关关系,相关系数为0.964 3。从图 8 中可以看出,斜率指数与铜元素含量存在相关关系,相关系数为0.862 4,在低值区域有部分(<16%或 17%的几个点)和高值区域部分(>28%的几个点)样品线性关系不强,但总体相关性很好。从图 9 中可以看

出,相关吸收深度指数与铜元素含量存在相关关系,其相关系数为0.883 1。从图 10 中可以看出,相关多项式指数与铜元素含量存在相关关系,其相关系数为0.946 9。

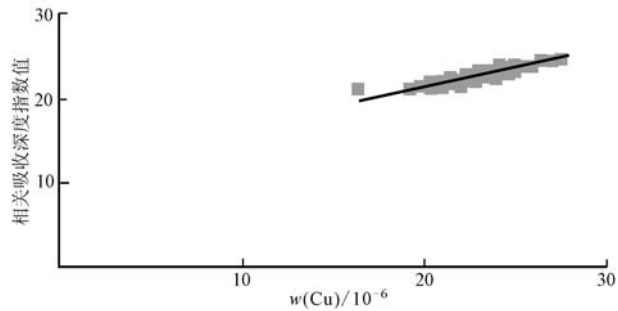


图 9 铜元素含量与波段相关吸收深度指数的关系
Fig. 9 The relationship between the content of element Cu and bands absorption depth index

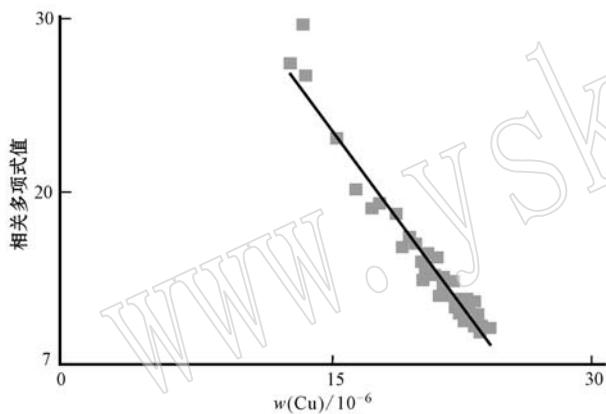


图 10 铜元素含量与波段相关多项式指数的关系
Fig. 10 The relationship between the content of element Cu and bands correlation polynomial index

4 铜元素遥感地球化学反演结果

笔者对不同地物性质的波段进行了组合统一分析,发现虽然这些参数与铜元素含量没有确定的函数关系,决定系数较小,总自由度 198,回归自由度为 4,残差自由度为 194,平方和 SS 为 1 971, F 值为 2.266 326 6(表 4),但给定置信度 $\alpha=0.1$, $F(3, 120)=2.13<2.266 326 6$,总体回归效果比较显著,总体来看还是可以做回归分析的。通过对表 5 中各个自变量参数的实际值与预测值(表 6、图 11)之间的关系比较,发现其相关性比较显著。因此,笔者在前文基础上,采用多元回归分析建立了铜元素遥感地球化学反演模型。

根据以上计算结果,截距 $b_0=-108.71$,斜率分别为 0.137、0.011、5.795 和 0.03,得出其二元回归方程如下:

$$\text{Con}_{\text{Cu}} = -108.71 + 0.137 \times \text{Val}_{\text{r-sl}} + 0.011 \times \text{Val}_{\text{sl-in}} + 5.795 \times \text{Val}_{\text{r-AbDe}} + 0.03 \times \text{Val}_{\text{mul}}$$

式中, Con_{Cu} 是反演 Cu 的含量, $\text{Val}_{\text{r-sl}}$ 是相关斜率的值, $\text{Val}_{\text{sl-in}}$ 是斜率指数的值, $\text{Val}_{\text{r-AbDe}}$ 是相关吸收深度指数的值, Val_{mul} 是多项式指数的值。反演后的铜元素遥感地球化学图见图 12。

5 讨论与结论

从图 12 可以看出,实测铜元素地球化学高值区域的分布与遥感反演铜元素地球化学对应关系非常好。遥感反演铜高值区都为岩体和蚀变出露区(图 1、

表 4 回归各参数值表

Table 4 The table of various regression parameter values

	自由度	离均差平方和	均方差	F 检验	F 显著性
回归分析	4	1 970.814	492.703 4	2.266 326 6	0.063 511 737
残差	194	42 175.94	217.401 8		
总计	198	44 146.75			

表 5 各自变量参数值表

Table 5 The table of various variables parameter values

	系数	标准误差	T 统计值	P 值(假定值)	下限 95%	上限 95%
截距	-108.708 82	88.436 77	-1.229 23	0.220 48	-283.13	65.712 17
X 变量 1	0.136 85	0.167 56	0.816 73	0.415 08	-0.193 62	0.467 32
X 变量 2	0.011 28	0.056 50	0.199 65	0.841 97	-0.100 15	0.122 72
X 变量 3	5.795 14	3.703 36	1.564 83	0.119 25	-1.500 89	13.099 17
X 变量 4	0.030 17	0.619 99	0.048 67	0.961 24	-1.192 6	1.252 95

表 6 预测值与实际值关系

Table 6 The relationship between forecast values and actual values

预测 Y	样品值 Y	标准残差
25.817 430 57	24.037 1	-0.412 3
27.745 293 06	24.047 2	-0.624 75
23.117 986 68	24.094 3	0.781 674
22.704 664 22	24.1	-0.020 87
27.624 786 84	24.125 9	-0.611 28
25.660 019 89	24.153 7	0.170 99
30.293 841 39	24.163 4	-0.235 26
27.986 344 93	24.261 8	0.649 328
22.466 162 71	24.400 4	0.297 559
24.342 034 99	24.421 2	-0.049 42
24.538 254 52	24.425 2	0.712 85
26.622 976 15	24.499 2	-0.383 39
24.630 551 46	24.570 4	-0.242 38
25.739 112 17	24.674 5	-0.198 45
25.743 225 97	24.822 1	-0.301 62
27.581 319 48	24.895 6	-0.523 58
24.012 232 96	25.057 1	-0.089 39
26.064 012 03	25.155 5	-0.123 48
28.669 770 31	25.619 6	-0.012 98
...	...	...

图 12b),也是多龙铜矿体分布区域。分布于第四系中的铜地球化学元素可以追踪到北部的地层和岩体中,指示了其来源,可以看做追索找矿法的可视图像。多不杂、波龙、地堡那木岗、那顿、拿若、塞角等几个矿床或矿化点都在遥感地球化学的高值区,表明可以利用遥感数据进行找矿元素的地球化学反演,为斑岩铜矿找矿提供了新的遥感找矿参数。这是一种新的区别于蚀变遥感异常的遥感找矿参数。我们把蚀变遥感异常与铜元素遥感地球化学进行了对比,因用“去干扰主成分分析方法”提取的 ASTER 铁染异常(主成分分析方法提取 ASTER 第 1、2、3、4 波段组合,记为 PCA1234)和 ASTER 镁羟基异常(PCA1348)与铜元素的地球化学关系不大,因此主要对比了 ASTER 铝羟基异常(PCA1346),发现有几点明显的特点:

(1) 遥感反演铜元素地球化学(图 12b)反演的是铜元素相对高低值,这应该与地球化学背景和矿床矿体及蚀变等具有一定的关系。从空间分布上来看,遥

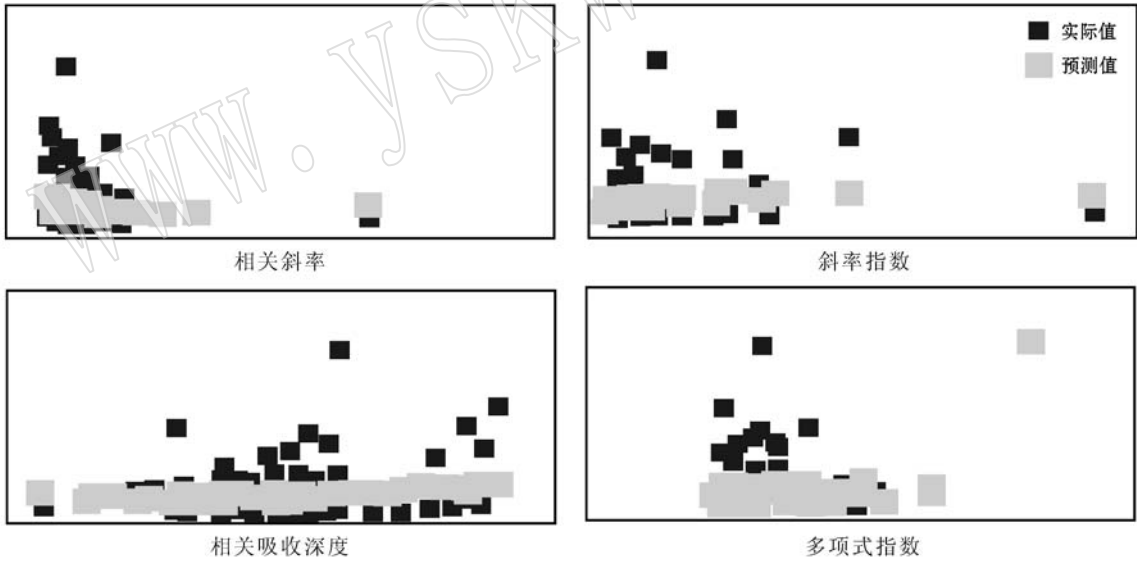


图 11 各个参数预测值与实际值之间的关系

Fig. 11 The relationship between forecast values and actual values of each parameter

感反演的铜元素地球化学与岩体和蚀变相对应(图 1)。对照图 1 和图 12b 可以看出,铜元素遥感地球化学和岩体、蚀变一样在区域上都受构造控制,表明遥感所反演的铜元素地球化学能够反映构造控制下含铜矿岩体和蚀变的空间位置。从多龙矿集区几个铜矿位置与铜元素遥感地球化学关系来看,多不杂、波龙、地堡那木岗、那顿、拿若、塞角等几个铜矿体与遥

感地球化学高值对应非常好(对比图 12b 和图 1)。

(2) 对比铜元素遥感地球化学与蚀变遥感异常,发现二者虽具有相似性,但仍有非常显著的区别:首先第四系中基本没有蚀变遥感异常(图 12c 中 A 区),而铜元素遥感地球化学则具有冲刷分布的特征(图 12b 中 A 区),利用追溯法可以推断出第四系中铜元素来源于地层和岩体中(对比图 12b 中 A 区和图 1),因

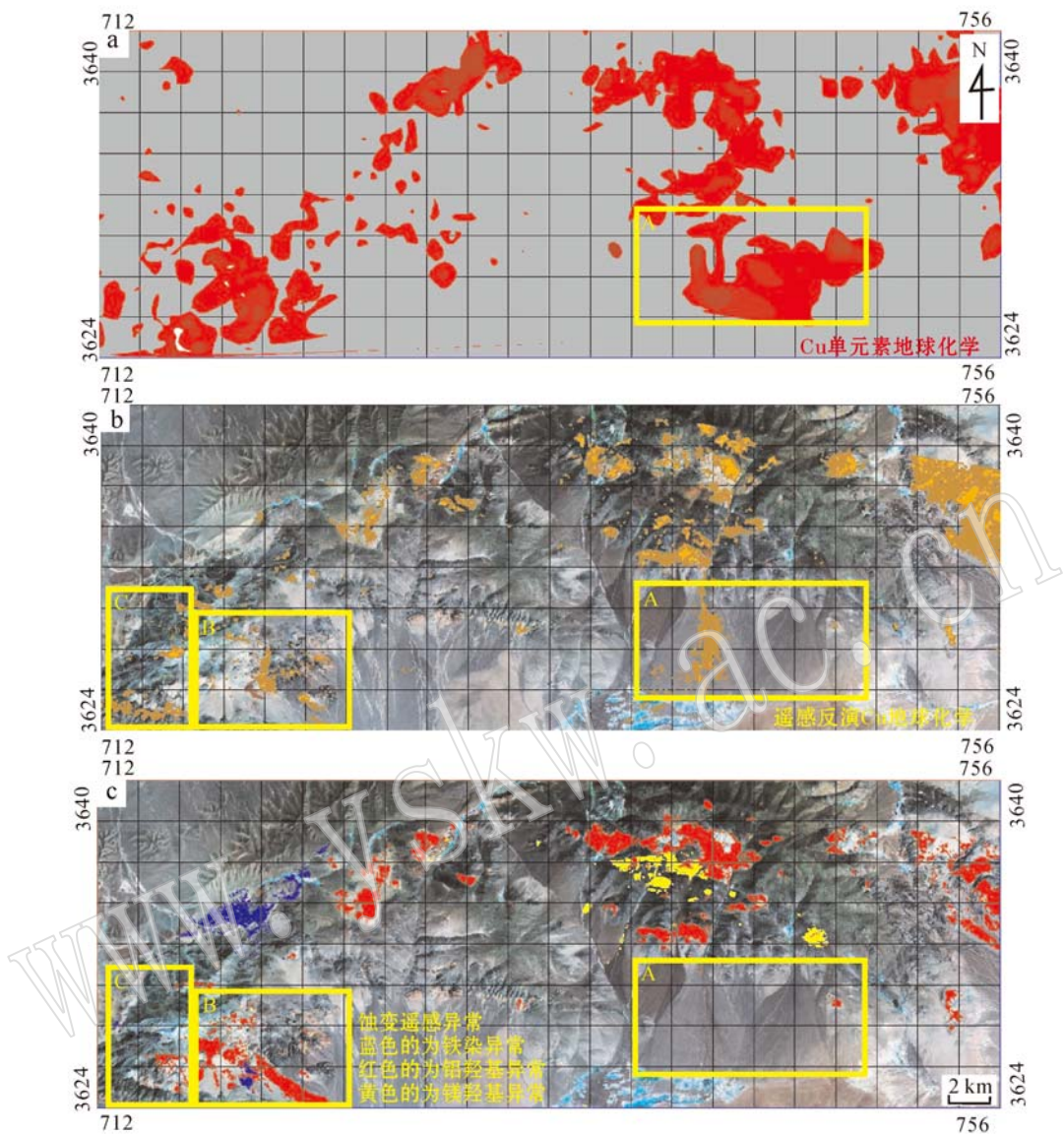


图 12 铜元素遥感地球化学图

Fig. 12 Remote sensing geochemical map of element Cu

a—实测地球化学; b—遥感地球化学; c—蚀变遥感异常信息提取结果

a—measured geochemistry; b—remote sensing geochemistry; c—extraction results of alteration remote sensing information

此,可以把铜元素遥感地球化学信息看作为一个找矿的参数。虽然铜元素遥感地球化学与蚀变遥感异常在第四系中具有明显不同,但其与实测铜元素地球化学相似,二者有继承关系(图 12a 中 A 区的大片化探异常由于采用位置数量及光谱差异性在铜遥感地球化学图上没有相应反映),在第四系都有异常,且都能够追溯到岩体和地层中,这也表明,我们提取的铜元素遥感地球化学区别于蚀变遥感异常,但接近于实测铜元素地球化学,是利用遥感进行铜元素地球化学反演的一种方法。

(3) 多龙矿集区蚀变遥感异常信息以铝羟基信息为主,对比铜元素遥感地球化学与铝羟基蚀变遥感异常,发现两者之间高值覆盖区域总体上是一致的,但又有各自的特色:从 B 区来看,铜元素遥感地球化学明显少于铝羟基蚀变遥感异常,但从 C 区来看,铜元素遥感地球化学多于铝羟基蚀变遥感异常,因此,两者之间是可以相互验证的(图 12b 中 B 区、C 区和图 12c 中 B 区、C 区)。另外,蚀变遥感异常覆盖的区域可能没有遥感地球化学高值覆盖(图 12c 中 B 区),而遥感地球化学高值区覆盖区也可能没有蚀变遥感异

常覆盖(图12b中B区),这也说明铜元素遥感地球化学提取的信息区别于铝羟基蚀变遥感异常信息,在实际工作中可以利用铜元素遥感地球化学替代测试铜元素地球化学,进行叠加分析,指导找矿,特别是在国外实测地球化学工作困难区域。

(4) 仔细对比铜元素遥感地球化学高值区和铝羟基蚀变遥感异常区,可以看出,铜元素遥感地球化学比铝羟基蚀变遥感异常多了几个高值区(位于多龙矿集区地堡纳木岗铜矿远景区)(图12b中C区和图12c中C区),野外查证表明,这几个高值区正好为岩体出露区,岩体本身具有较强的蚀变,构造也比较发育,因此,铜元素遥感地球化学反演的这几个蚀变没有遥感异常的区域,可以作为地堡纳木岗的找矿靶区。

(5) 铜元素遥感地球化学为基于“栅格”图像像素点的铜元素遥感地球化学反演值,可以按标准离差进行实际大小的切割,其提取的铜元素遥感地球化学高值与蚀变遥感异常具有相似性,都具有原位的特点,可以避免实测地球化学“漂移”现象。且遥感反演基于数学分析,能够利用误差理论对反演结果进行控制,避免人为因素。

(6) 铜元素遥感地球化学的“缺点”也很明显,在分析铜元素与光谱特征吸收位置关系时,仅仅选择图像上颜色相似区域进行,而综合考虑,其相关性较低,是一种基于数理统计的方法,在找矿时只宜作为一个参数,不能替代实测地球化学的作用,但在国外实测地球化学难以进行情况下,可以起到辅助作用,应用在找矿预测中。

总之,作为利用遥感进行矿产资源勘查与评价工作的一个方法,遥感地球化学配合蚀变遥感异常、遥感蚀变分带等信息,结合地物化遥等信息可为斑岩铜矿的找矿提供更多的参数。这个参数不同于蚀变遥感异常或者蚀变分带参数,它根据主元素含量与光谱特征的直接经验关系,适用于荒漠戈壁无人区等艰苦地区和境外矿产资源勘查与评价,对斑岩铜矿利用追索法找矿且蚀变遥感异常明显的矿种更为有效。

References

Feng Caixia. 2011. Geochemical characteristics and sedimentary environment of siliceous rocks of Gerze area in western Bangong Co-Nujiang suture zone, Tibet[J]. Mineral Deposits, 30(5): 773~786(in Chinese with English abstract).

Li Chao, Xiao Chuantao, Gong Wenping, *et al.* 2011. Reinvestigation into the Tectonic Evolution of Bangong-Nujiang structure[J]. Journal of Yangtze University (Nat. Sci. Edit), 8(3): 41~43(in Chinese with English abstract).

Li Dan, Wen Chunqi, Fei Guangchun, *et al.* 2011. The investigation of sandstone composition and tectonic environment of Duolong Cu deposit, Tibet[J]. Acta Mineralogica Sinica, 31(supplement): 358~359 (in Chinese).

Lucey P G, Blewett D T and Hawke B R. 1998. Mapping the FeO and TiO₂ content of the lunar surface with multispectral imagery[J]. Journal of Geophysical Research, 103(2): 3 679~3 699.

Ning Mohuan and Wen Chunqi. 2011. The prospecting direction research of Nujiang suture, Tibet[J]. Acta Mineralogica Sinica, 31(supplement): 974~975 (in Chinese).

Qu Xiaoming and Xin Hongbo. 2006. Ages and tectonic environment of the Banonghu Co porphyry copper belt in western Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 25(7): 792~799(in Chinese with English abstract).

Swayze G A. 1997. The Hydrothermal and Structural History of The Cuprite Mining District, Southwestern Nevada: An Integrated Geological and Geophysical Approach(Ph. D. Thesis)[D]. Colorado: University of Colorado.

Wang Pujun, Frank Matern, Werner Schnerder, *et al.* 2003. The Cretaceous of the eastern Bangong-Nujiang suture zone (Tibet): Tectono-Sedimentation[J]. World Geology, 22(2): 105~110(in Chinese with English abstract).

Wu Yunzhao, Tian Qingjiu, Ji Junfeng, *et al.* 2003. Study on the remote-sensing geochemistry[J]. Advances in Earth Sciences, 18(2): 228~235(in Chinese).

附中文参考文献

冯彩霞. 2011. 班公湖-怒江缝合带西段改则硅质岩地球化学特征及沉积环境[J]. 矿床地质, 30(5): 773~786.

李超, 肖传桃, 龚文平, 等. 2011. 班公湖怒江缝合带中段构造演化再探讨[J]. 长江大学学报(自然科学版), 8(3): 41~43.

李丹, 温春齐, 费光春, 等. 2011. 西藏波龙铜矿床的砂岩成分与构造环境探讨[J]. 矿物学报, 31(增刊): 358~359.

宁墨奂, 温春齐. 2011. 西藏班怒缝合带多龙矿集区找矿方向研究[J]. 矿物学报, 31(增刊): 974~975.

曲晓明, 辛洪波. 2006. 藏西班公湖斑岩铜矿带的形成时代与成矿构造环境[J]. 地质通报, 25(7): 792~799.

王璞珺, Frank Matern, Werner Schneider, 等. 2003. 西藏班公湖——怒江缝合带白垩系沉积特征及其构造意义[J]. 世界地质, 22(2): 105~110.

吴昉昭, 田庆久, 季峻峰, 等. 2003. 遥感地球化学研究[J]. 地球科学进展, 18(2): 228~235.