

doi:10.3799/dqkx.2015.124

以 SiO₂ 含量为辅助因子的 ASTER 热红外遥感硅化信息提取

刘道飞^{1,2}, 陈圣波¹, 陈磊¹, 马明^{1,3*}

1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林长春 130026
2. 长春市城乡规划设计研究院, 吉林长春 130033
3. 吉林建筑大学测绘与勘查工程学院, 吉林长春 130118

摘要: 硅化蚀变是岩石矿物蚀变中一种重要的矿化蚀变类型, 与很多金矿的形成有着密切的关系, 且硅化信息常作为野外重要的找矿标志. 通过分析硅化蚀变矿物在先进星载热发射和反射辐射仪 (advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer, ASTER) 热红外波段的光谱特征, 依据硅化作用与 SiO₂ 含量间的关系, 选取了 SiO₂ 含量作为提取硅化信息的辅助因子, 提出了 ASTER 热红外遥感硅化信息提取方法. 以内蒙古二连浩特市北部地区为例, 完成了该地区硅化信息提取工作. 通过野外实地勘察验证, 发现在 39 个野外实地硅化蚀变采样点中 33 个采样点在蚀变图像中得到验证, 精度达到 86.14%.

关键词: 热红外; 先进星载热发射和反射辐射仪; 遥感; SiO₂; 硅化.

中图分类号: P627 **文章编号:** 1000—2383(2015)08—1396—07 **收稿日期:** 2015—03—14

Silicification Information Extraction Based on the Content of SiO₂ from ASTER TIR Data

Liu Daofei^{1,2}, Chen Shengbo¹, Chen Lei¹, Ma Ming^{1,3*}

1. College of Geop exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China
2. Changchun Institute of Urban Planning & Design, Changchun 130033, China
3. College of Surveying and Prospecting Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China

Abstract: Silicic alteration, an important alteration type among mineral rock alteration, has close relationship with the formation of several gold mines and it has often been treated as symbol for geological prospecting in the field. This paper proposes a method for the silicification information extraction through analyzing the ASTER (advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer) TIR spectral characteristics of silicification alteration minerals and selecting the content of SiO₂ as an accessory factor based on the relationship between silicification and the content of SiO₂. The method was applied in northern erlianhot city of Inner Mongolia and the silicification information of study area was extracted. By the field survey, 33 of the 39 silicification sampling sites have been verified, with an accuracy of 86.14%.

Key words: thermal infrared; ASTER; remote sensing; SiO₂; silicification.

硅化蚀变作用是指岩石在热液作用下, 产生含有石英、玉髓、蛋白石、似碧玉等蚀变矿物的过程, 是岩石矿物蚀变中一种重要的矿化蚀变类型, 且石英脉和硅化带等硅化信息也常作为野外重要的找矿标志(于正军等, 2010). 很多金矿的形成与硅化蚀变密切相关, 一般硅化越强, 矿化越显著(肖晋等, 1989).

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(No.2012AA12A308); 中国地质调查局项目(No.1212011220469); 国家自然科学基金项目(No.41402293).

作者简介: 刘道飞(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事热红外遥感研究. E-mail: liudaofei1989@126.com

*** 通讯作者:** 马明, E-mail: maming521521@163.com

引用格式: 刘道飞, 陈圣波, 陈磊, 等, 2015. 以 SiO₂ 含量为辅助因子的 ASTER 热红外遥感硅化信息提取. 地球科学——中国地质大学学报, 40(8): 1396—1402.

岩石在发生硅化作用后形成的蚀变矿物,其主要成分为 SiO₂,由此岩石在发生硅化蚀变作用前后 SiO₂ 含量会发生巨大的变化,而且蚀变程度越强,岩石所含 SiO₂ 含量越高.这就使得发生硅化作用的岩石在 SiO₂ 含量方面成为一种异常,偏离相对均一的地质体背景,所以依据 SiO₂ 含量可以用来辅助对硅化信息的提取.

自从先进星载热发射和反射辐射仪(advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer, ASTER)传感器问世以来,国内外诸多学者针对造岩矿物在 ASTER 热红外波段的发射光谱特征与 SiO₂ 含量的关系做了大量研究,Ninomiya(2002)实现了从定性到定量的突破;Lyon(1965)测得 25 个火成岩样品(酸性—超基性)的发射率光谱及其 SiO₂ 含量,结果表明随着 SiO₂ 含量的增加,发射率吸收位置会向短波方向偏移.在国内,杨长保和朱群(2009)从 USGS、JPL 和 JHU 3 个岩石矿物光谱库中选择 62 个火成岩样本,并利用 SPSS 软件进行多元逐步回归分析从而得出了定量反演 SiO₂ 含量的回归方程.在硅化信息提取研究方面,利用遥感可见光—近红外数据对其进行提取的技术方法已日趋成熟,杨波等(2005)利用 Landsat/TM 数据建立了矿化信息定量提取模型,对鹰嘴山金矿区的硅化信息进行了提取.

前人对于 SiO₂ 含量反演及硅化信息提取是分开独立研究,并没有考虑依据二者间的关系.利用 SiO₂ 含量和热红外遥感数据来对硅化信息的提取的研究还尚未见报道.因此,本文选取 ASTER 热红外数据,对蚀变矿物在 ASTER 热红外波段的光谱特征进行分析,以 SiO₂ 含量为辅助因子,寻求硅化信息的提取方法.

1 硅化信息提取方法

1.1 ASTER 热红外数据预处理

ASTER 热红外数据包含 5 个波段(波段 10~14),波段范围为 8.125~11.650 μm,空间分辨率为 90 m,辐射度分辨率≤0.3 k,量化级别为 12 bits.

ASTER 热红外数据的预处理包括辐射定标、大气校正、几何校正以及发射率反演.笔者基于 TIR AtmosCorrect 模型对 ASTER 热红外数据进行大气校正,消除了大气对地物发射率信息的影响;同时在 ASTER 可见光—近红外波段影像上选取与基准图像相对应的控制点,通过控制点坐标信息找到对应于热红外波段影像上的点,完成了 ASTER 热红外数据的几何校正.利用发射率归一化法对 ASTER

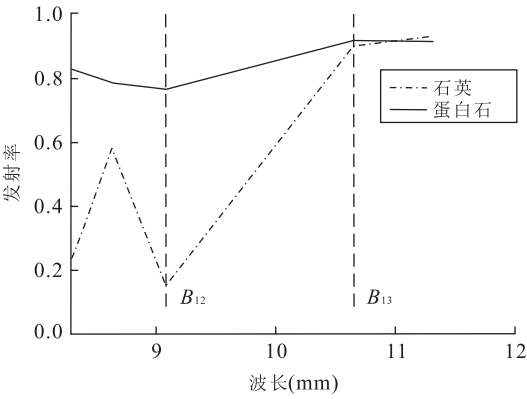


图 1 硅化蚀变矿物 ASTER 热红外发射率曲线
Fig.1 The ASTER TIR emissivity spectral of silicification minerals

热红外波段数据进行了发射率反演(徐州等,2006),得到了 ASTER 的 10~14 波段发射率影像图.

1.2 硅化蚀变矿物热红外波谱特征分析

在研究 ASTER 热红外数据硅化信息提取方法的过程中,对 USGS 标准波谱数据库中硅化蚀变矿物石英及蛋白石发射率曲线重采样到 ASTER 热红外波段,综合分析后,笔者发现石英和蛋白石在 9.0 μm 处有明显的吸收谷(对应 ASTER 数据的 B₁₂),在 10.65 μm 处有明显的发射峰特征(对应 ASTER 数据的 B₁₃)(图 1).

1.3 硅化信息提取方法

依据蚀变矿物在 ASTER 热红外波段的发射率

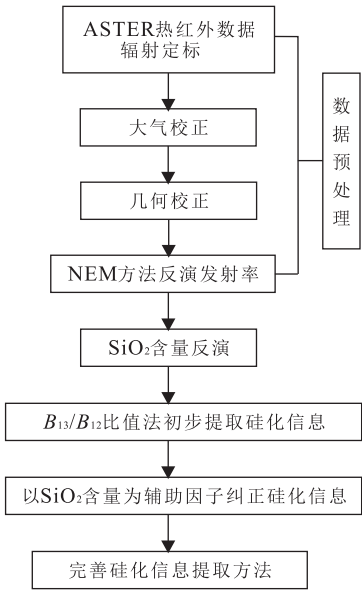


图 2 ASTER 热红外遥感硅化信息提取方法流程
Fig.2 The procedure of method for ASTER TIR silicification information extraction

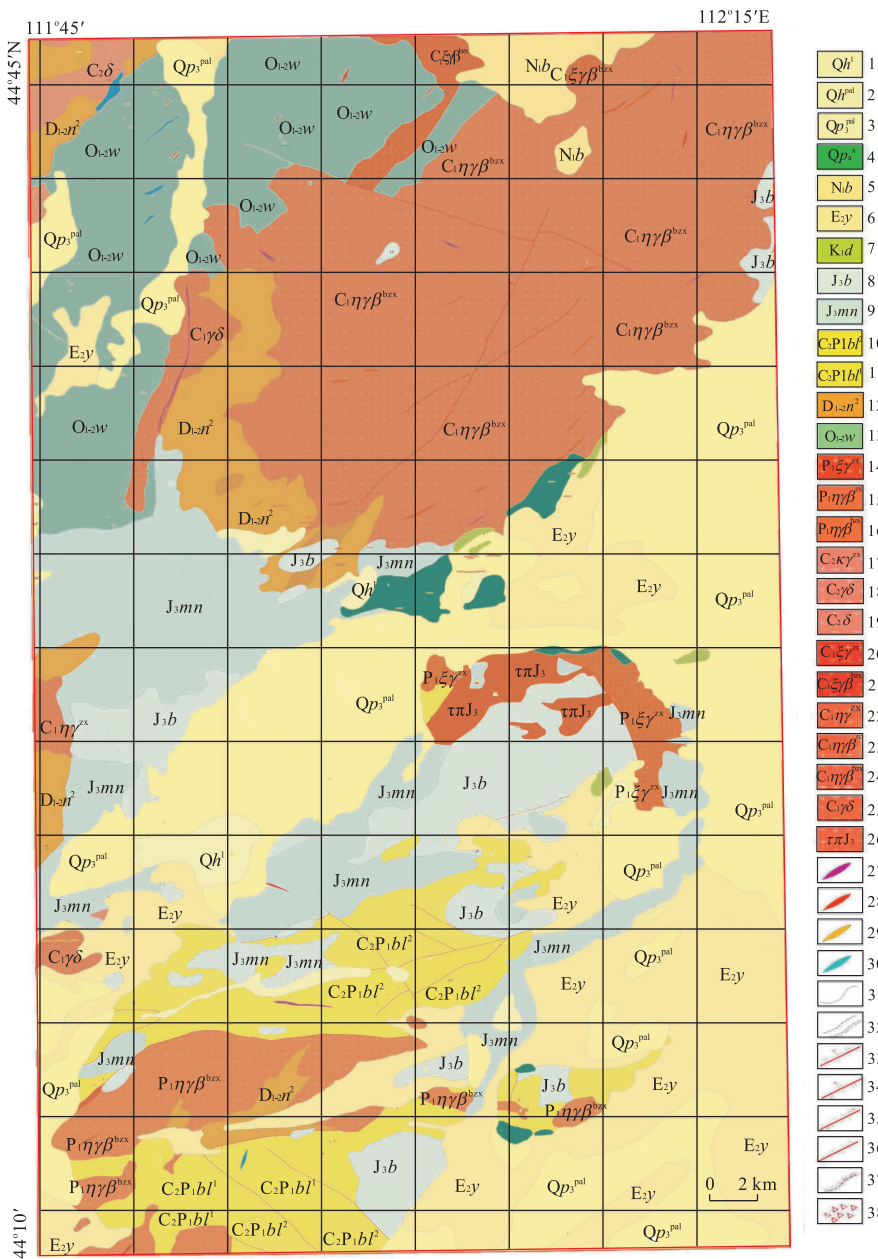


图 3 研究区地质图

Fig.3 Geological sketch of the research area

1.湖积层:现代湖积淤泥沉积;2.冲洪积层:由砂岩及砾石层组成;3.冲洪积层:由粗砂和砾石层组成;4.阿巴嘎组:灰紫色、紫褐色气孔状玄武岩及伊丁玄武岩、安山玄武岩;5.宝格达乌拉组:砖红色泥岩夹含砾粗砂岩;6.伊尔丁曼哈组:红色粘土和黄色砂砾岩;7.大磨拐河组:页岩、泥岩、砂岩、砂砾岩及砾岩组成夹褐煤;8.白音高老组:流纹质岩屑晶屑凝灰岩、流纹岩及流纹质溶结凝灰岩等酸性火山岩;9.玛尼吐组:安山岩、粗安岩、石英粗安岩、安山玢岩安山质角砾凝灰岩、英安玢岩及灰黑色及灰紫色玄武岩;10.宝力高庙组二段:灰-灰褐色安山岩、溶解凝灰岩,黄褐色灰绿色流纹质含角砾晶屑凝灰岩、凝灰质砂岩英安岩等酸性火山岩及火山碎屑岩,含植物化石;11.宝力高庙组二段:(变质)长石砂岩、板岩、砾岩、硬砂岩为主夹酸性岩屑晶屑凝灰岩、安山玢岩及灰岩透镜体;12.泥鳅河组:为浅海相碎屑岩夹灰岩组合,岩性为灰色、灰绿色、褐灰色(变质)粉砂质泥、砂岩夹灰岩;13.乌安敖包组:灰褐色、灰绿色板岩、绢云母板岩、分砂质板岩、长石砂岩、变泥岩夹安山玢岩及灰岩透镜体;14.肉红色中细粒正长花岗岩;15.肉红色中细粒云母二长花岗岩;16.肉红色斑状中细粒黑云母二长花岗岩;17.肉红色中细粒-细中粒碱长花岗岩;18.灰绿色角闪花岗岩闪长岩;19.灰绿-暗灰绿色中细粒闪长岩、石英闪长岩;20.灰、灰白、灰黄色中细粒正长花岗岩、碱长花岗岩局部有闪石碱性花岗岩;21.灰白-灰色斑状中细粒黑云母正长花岗岩;22.肉红色中细粒-细粒二长花岗岩;23.灰白-灰色中细粒黑云母二长花岗岩;24.灰白-灰色斑状中细粒黑云母二长花岗岩及少量花岗岩闪长岩;25.灰白-灰色花岗岩闪长岩及少量石英闪长岩、石英二长岩;26.晚侏罗世次粗面斑岩;27.石英脉;28.花岗岩脉;29.碱性花岗斑岩脉;30.闪长岩脉;31.地质界线;32.实测地层不整合界线、火山喷发不整合地质界线;33.实测正断层;34.实测逆断层;35.实测平移断层;36.实测性质不明断层;37.角岩化;38.构造破碎带

曲线特征,结合 Rowan and Mars(2003)针对 ASTER 热红外数据使用的比值法,笔者发现可以突出硅化信息,对硅化信息按照蚀变强度分为 3 级进行初步提取。

在对硅化信息初步提取的基础上,依据发生硅化作用的岩石在 SiO₂ 含量大小上明显高于其他地质背景,同时硅化蚀变越强 SiO₂ 含量越高.依据此,可以将 SiO₂ 含量定义为提取硅化信息的辅助因子,对初步提取的硅化信息做进一步纠正,以完善 ASTER 热红外遥感硅化信息提取方法,方法具体流程如图 2 所示。

2 方法应用

为验证提出的 ASTER 热红外硅化信息提取方法是否具有可行性,笔者选取两处成像于 2005 年 9 月 15 日的 ASTER 热红外影像,在内蒙古二连浩特市北部区域做实地验证分析。

2.1 研究区地质概况

研究区位于内蒙古二连浩特市北部,地理坐标范围 111° 45′ 00″ ~ 112° 15′ 00″ E, 44° 10′ 00″ ~ 44° 45′ 00″ N.由于研究区地处戈壁荒漠区,植被覆盖度较低,岩石裸露条件较好,所以被选作为低覆盖草原蚀变信息提取方法及地质填图方法研究区。

研究区出露地层以石炭系一二叠系为主,零星发育中、晚奥陶世、早石炭世、晚石炭世和晚侏罗世的地层,多为第四系覆盖.区内褶皱构造和断裂构造同等发育,所显示的构造线方向以 NE 方向为主.区内岩浆岩分布相对广泛,以华力西期和燕山期的花岗岩类侵入岩石为主.华力西期岩体侵入石炭系宝力高庙组或中、下奥陶统乌宾敖包组中,以二长花岗岩、正长花岗岩、砂砾岩以及黑云母花岗闪长岩为主,华力西晚期的岩体被侏罗纪地层不整合覆盖,或被燕山期花岗岩侵入(图 3)。

2.2 SiO₂ 含量反演

陈江和王安建(2007)将 ASU 波谱库的矿物波谱重采样至 ASTER 热红外波段,对矿物的波谱进行波段比值处理,选择波段比值与 SiO₂ 含量最大相关系数,进行对数模拟,从而确定了发射率波谱与 SiO₂ 含量的数值关系.其反演公式如下:

$$SiO_2 = 28.76 \times \ln(6.56 \times E_{13} \times E_{14} / (E_{10} \times E_{12})),$$

(1)

式(1)中, E_{10} 、 E_{12} 、 E_{13} 和 E_{14} 对应 ASTER 热红外波段中心波长处的发射率值.笔者依据公式(1),在对

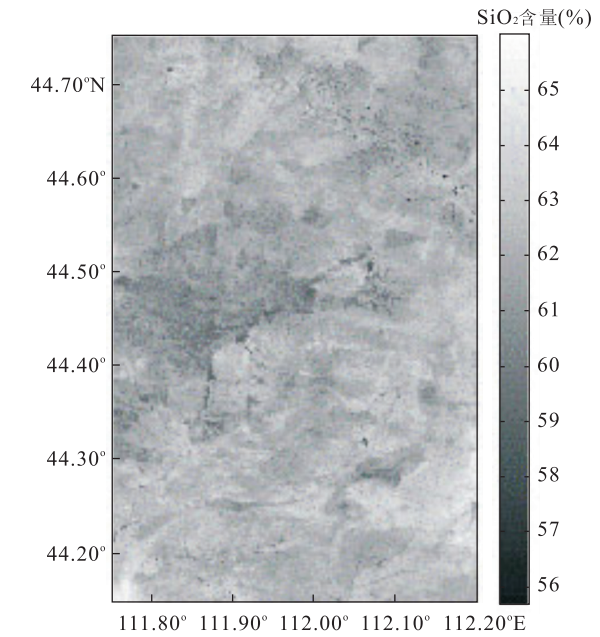


图 4 研究区 SiO₂ 含量
Fig.4 The sketch showing the content of SiO₂

ASTER 热红外数据做完预处理的基础上,利用波段计算工具得出了研究区的 SiO₂ 含量结果(图 4).图 4 中含量高值对应于地质图上的红色粘土和黄色砂砾岩,含量低值对应于地质图上的安山岩及粗安岩等。

2.3 硅化信息提取

利用比值法(B_{13}/B_{12})对研究区发射率影像进行处理,得到突出硅化信息的图像.对其进行滤波处理后,统计滤波后图像的均值和标准差,对初步提取的硅化信息按蚀变强度分为 3 级.硅化信息初步结果如图 5 所示。

对反演得到的 SiO₂ 含量结果与初步提取的硅化信息结果进行叠加对比分析,将图像中 SiO₂ 含量明显高于周围背景而没有在蚀变结果中得到体现的区域,认定为存在硅化蚀变.由此得到研究区的最终硅化信息结果(图 6).对比分析图 5 与图 6,可以明显地发现在区域 A ~ D 中,通过引入 SiO₂ 含量这一辅助因子使得在最终得到的结果图中硅化信息得以补充完善.尤其是在区域 A 与 C 中,完善的硅化信息在野外实地勘察中得到了实地验证。

通过实验区野外考察,笔者发现在研究区裸露岩石处硅化蚀变现象十分明显,硅化程度由弱到强,在 39 个野外硅化采样点中,33 个采样点在结果图中得到验证,精度达到 86.14%.然而对于初始硅化信息提取结果,其没有考虑 SiO₂ 含量与硅化信息间的关系,这就使得有些野外实际存在的岩石硅化蚀变在结果图中没有被提取出来,提取结果精度为 76.92%.总的

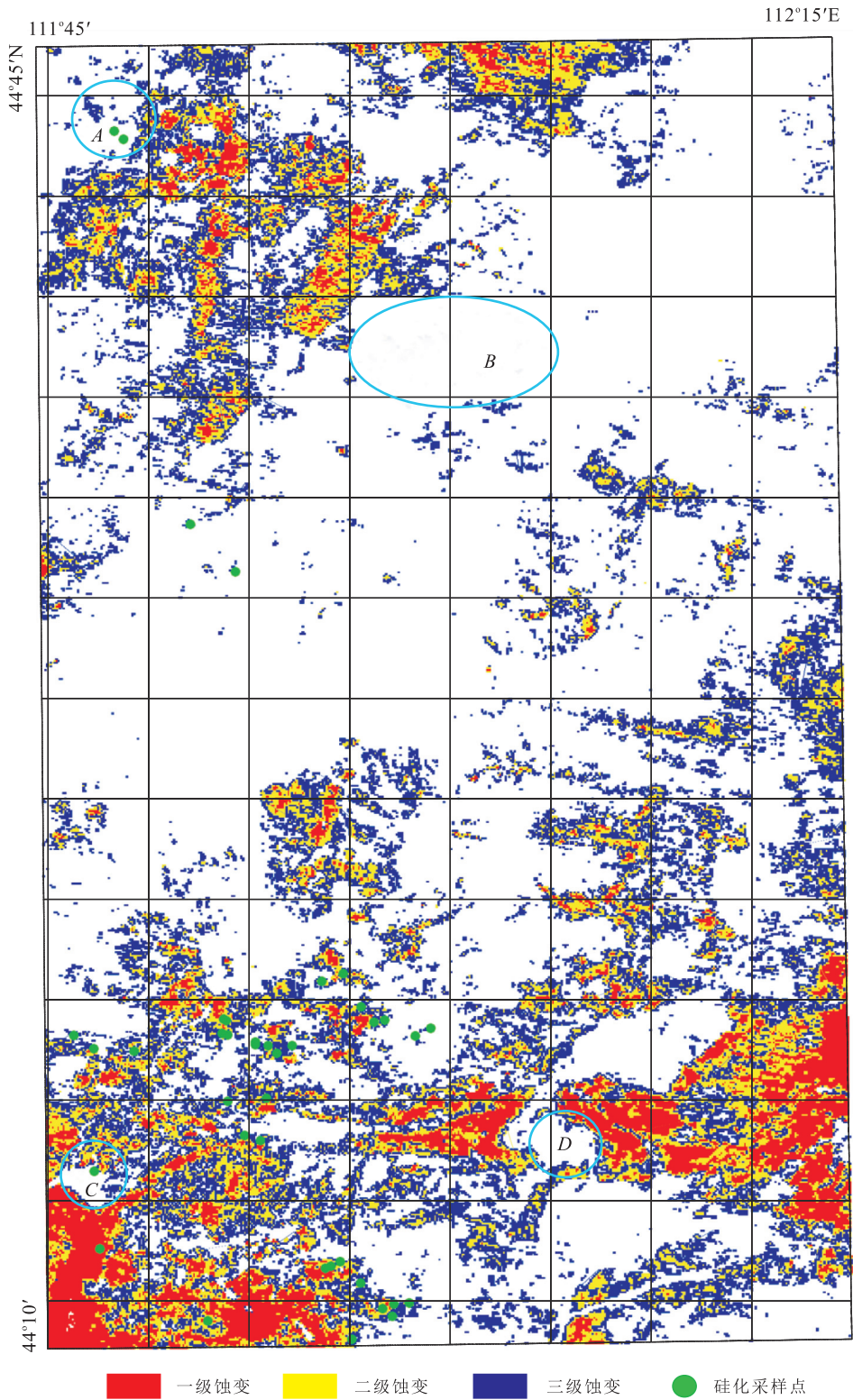


图 5 硅化蚀变信息初步结果

Fig.5 The original silicification information results of study area

来说,通过以 SiO_2 含量为辅助因子对硅化信息纠正,使得硅化信息提取结果精度提高了 9.22%.

3 结论

通过分析硅化蚀变矿物在 ASTER 热红外波段的

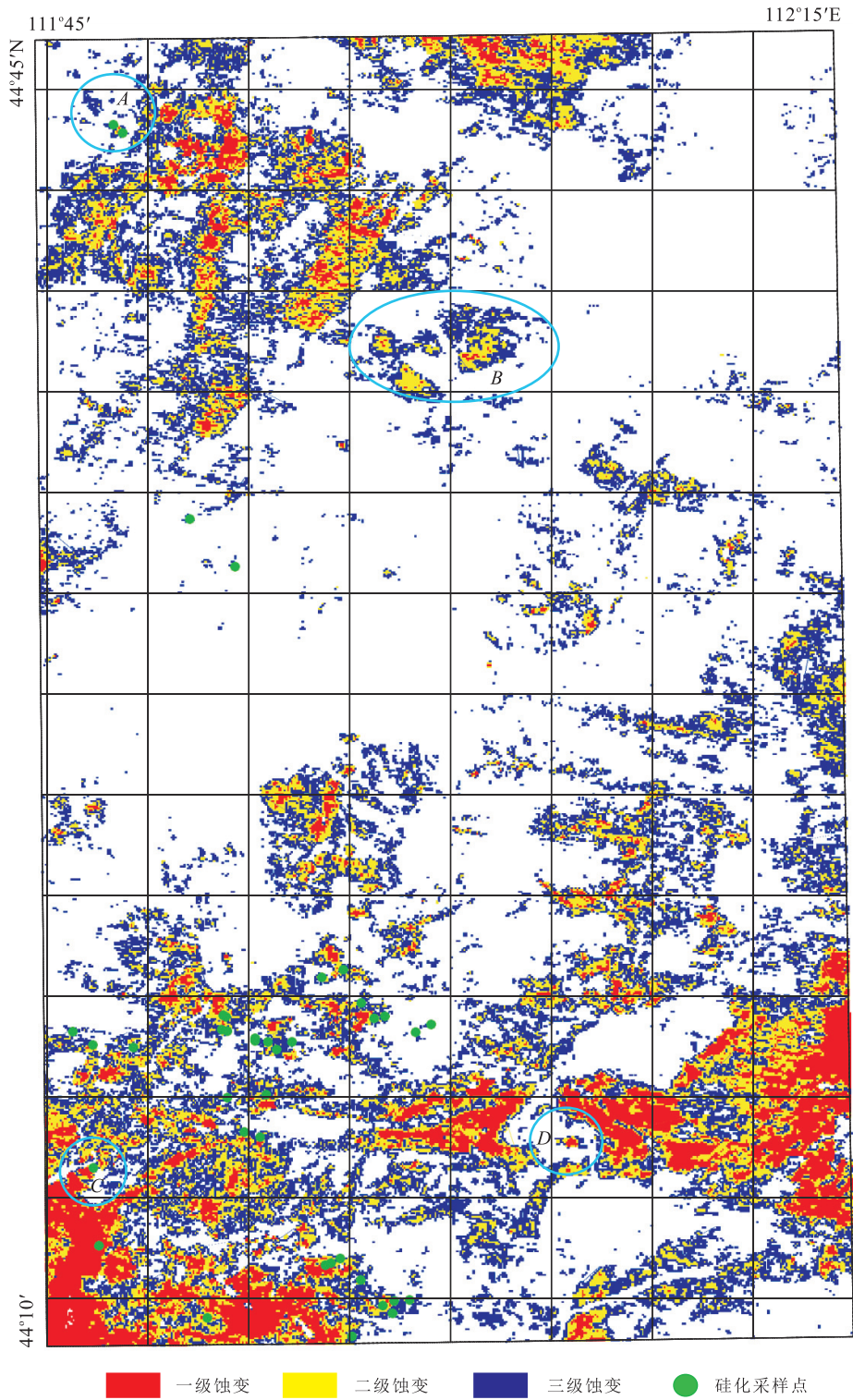


图 6 硅化蚀变信息最终结果

Fig.6 The ultimate silicification information results of study area

波谱特征,利用比值法(B_{13}/B_{12})得到初步硅化信息结果,结合硅化蚀变与 SiO₂ 含量间的关系对硅化信息进行纠正,完善了提取方法.通过在内蒙古二连浩特市北部区域对方法进行实地应用,笔者发现硅化信息提取结果与野外实地勘察吻合度较高,精度达到 86.14%,与

未利用 SiO₂ 含量来对硅化信息进行纠正的结果相比,精度提高了 9.22%.结果表明,以 SiO₂ 含量为辅助因子的硅化信息提取方法能够实现对外野硅化信息进行较精确的提取,丰富了利用遥感技术对硅化信息提取的手段,对遥感地质找矿工作带来了帮助.

References

- Chen, J., Wang, A. J., 2007. The Pilot Study on Petrochemistry Components Mapping with ASTER Thermal Infrared Remote Sensing Data. *Journal of Remote Sensing*, 11(4): 1—3 (in Chinese with English abstract).
- Lyon, R. J. P., 1965. Analysis of Rocks by Spectral Infrared Emission (8 to 25 Microns). *Economic Geology*, 60(4): 715—736.
- Ninomiya, Y., 2002. Mapping Quartz, Carbonate Minerals, and Mafic-Ultramafic Rocks Using Remotely Sensed Multispectral Thermal Infrared ASTER Data. *Proc. SPIE 4710, Thermosense XXIV*, 191. doi: 10.1117/12.459566
- Rowan, L. C., Mars, J. C., 2003. Lithologic Mapping in the Mountain Pass, California Area Using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Data. *Remote Sensing of Environment*, 84(3): 350—366.
- Xiao, J., Han, L. F., Tang, D. L., 1989. The Genesis of Silicified Zones in Southern Hunan and Their Ore-Prospecting Significance. *Journal of Ore Deposit Geology*, 8(4): 9 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z., Zhao, H. J., Li, N., 2006. Study of Inversing Land Surface Emissivity from ASTER Data. *Infrared and Laser Engineering*, 35(Suppl.): 517—522 (in Chinese with English abstract).
- Yang, B., Wu, D. W., Lai, J. Q., 2005. The Set Up of Quantization Remote Sensing Models for Mineralization and a Litteration—Take Silicification in Yingzuishan Gold Mine as an Example. *Journal of Remote Sensing*, 9(6): 717—724 (in Chinese with English abstract).
- Yang, C. B., Zhu, Q., 2009. Quantitative Inversion of SiO_2 Content in the Surface Rock from ASTER Thermal Infrared Data. *Geology and Exploration*, 6(11): 692—694 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Z. J., Xu, S. M., Wang, J. D., et al., 2010. A New Type of Reservoir of Paleozoic Buried Hill in Zhuanghai Area: Discovery and Characteristics of Silicified Rock. *Earth Science—China University of Geosciences*, 35(1): 87—96 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈江, 王安建, 2007. 利用 ASTER 热红外遥感数据开展岩石化学成分填图的初步研究. *遥感学报*, 11(4): 1—3.
- 肖晋, 韩兰生, 汤大立, 1989. 论湘南地区“硅化带”的成因及其找矿意义. *矿床地质*, 8(4): 9.
- 徐州, 赵慧洁, 李娜, 2006. 基于 ASTER 数据的地物光谱比辐射率的反演研究. *红外与激光工程*, 35(增刊): 517—522.
- 杨波, 吴德文, 赖健清, 等, 2005. 矿化信息提取定量遥感模型的建立——以鹰嘴山硅化蚀变为例. *遥感学报*, 9(6): 717—724.
- 杨长保, 朱群, 2009. ASTER 热红外遥感地表岩石的二氧化硅含量定量反演. *地质与勘探*, 6(11): 692—694.
- 于正军, 许淑梅, 王金铎, 等, 2010. 桩海地区下古生界潜山内新一类储层: 硅化岩储层的发现及特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 35(1): 87—96.