

doi:10.3799/dqkx.2015.119

植被覆盖区羟基和碳酸盐矿物光谱吸收深度校正模型

周超¹,汪大明²,陈圣波¹,刘彦丽³,王明常¹

- 1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林长春 130026
- 2. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100027
- 3. 中科院地理所地理信息系统培训中心, 江苏苏州 215000

摘要: 为增强植被覆盖区羟基和碳酸盐矿物的吸收特征,提高矿物信息提取精度,通过模拟单像元内新鲜植物、干枯植物、羟基和碳酸盐矿物的混合光谱,发现在一定波段范围内4种端元的特征波段处吸收深度呈显著线性关系,并建立了羟基和碳酸盐矿物的植物校正吸收深度(vegetation corrected continuum depths,VCCD)模型.将模型应用于黑龙江呼玛的Hyperion影像,提取了高岭石和方解石矿物信息.在去除河床、道路等干扰信息后,经野外实地验证和室内岩石鉴定,矿物信息提取结果较好.

关键词: 高光谱;连续统去除;遥感;羟基/碳酸盐类矿物含量;植被;Hyperion.

中图分类号: P627 **文章编号:** 1000-2383(2015)08-1365-06 **收稿日期:** 2015-04-11

Vegetation Corrected Continuum Depths Model and Its Application in Mineral Extraction from Hyperspectral Image

Zhou Chao¹, Wang Daming², Chen Shengbo¹, Liu Yanli³, Wang Mingchang¹

- 1. College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China
- 2. Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100027, China
- 3. GIS Training Centre Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215000, China

Abstract: The objective of this study is to enhance the absorption feature of hydroxyl and carbonate minerals, and to improve the precision of the minerals information extraction in the vegetation covered area. The linear mixing spectra of a pixel containing a hydroxyl/carbonate mineral, green and dry vegetation has been simulated. When a fixed wavelength range is considered, continuum removed absorption depths for diagnostic absorption features of three end-members show significantly linear relation. The vegetation corrected continuum depths (VCCD) model was established to detect hydroxyl or carbonate mineral, which was tested with hyperspectral data (Hyperion) collected at Huma in Xiaoxing'anling, China. Comparing the extracting mineral results and field samples of rock, it is found that the extracting minerals information correspond with that of the polished section of mineral, but the disturbance information is found in the river bed or along the road.

Key words: hyperspectral; continuum removal; remote sensing; hydroxyl/carbonate mineral content; vegetation; Hyperion.

高光谱影像具有精细的光谱分辨率,一系列诊断性的吸收特征可以用来识别特定地物,其中高光谱影像的短波红外(short wave infrared, SWIR)电子波谱可定性定量的识别多种矿物(宫鹏和浦瑞良, 2000;Hewson *et al.*,2006).在很多蚀变矿物和硅酸盐中均含有羟基离子(OH⁻),其仅在2.74 μm处存在基本对称的电子伸缩振动,然而当羟基离子和金属离子(Mg²⁺/Al³⁺)的电子跃迁叠加时,金属羟基

基金项目: 国家地质矿产调查评价项目(No.1212011087112);国家自然科学基金项目(No.41402293);国家高技术研究发展计划(863计划)项目(No.2012AA12A308);吉林大学研究生创新基金资助项目(No.2014029);数字制图与国土信息应用工程国家测绘地理信息局重点实验室开放研究基金项目(No.GCWD201402).

作者简介: 周超(1988—),男,博士研究生,主要从事高光谱地质遥感研究.E-mail: zhouc0316@126.com

引用格式: 周超,汪大明,陈圣波,等.2015.植被覆盖区羟基和碳酸盐矿物光谱吸收深度校正模型.地球科学——中国地质大学学报,40(8): 1365-1370.

的电子伸缩和组合振动就会产生 2.20 μm 处的吸收特征(Crowley *et al.*, 1989; Clark *et al.*, 1990).针对碳酸盐类矿物,白云岩和方解石等在 2.33 μm 附近存在碳酸盐离子的强吸收谱带(甘甫平等, 2003). Hunt(1982)研究指出,在短波红外光谱区(1.30~2.50 μm)吸收光谱由羟基、水分子和碳酸根等基团的分子振动引起.同时 2.10~2.40 μm 附近处波段作为遥感传感器普遍选用的“大气窗口”,受大气分子吸收和气溶胶影响较小(Karnieli *et al.*, 2001).因此,若传感器具有足够的能力识别 2.20 μm 和 2.33 μm 处的吸收特征,也就可以提取其吸收深度值,用来评价含羟基族(高岭土、蒙脱石和伊利石等)和碳酸岩类矿物(方解石、石灰石和白云石等)的含量(van der Meer, 2004; Nanni and Demattê, 2006).

在卫星遥感影像中或多或少覆盖有绿色或干枯植物,绿色植物所特有的红谷(0.670 μm)以及干枯植物内纤维素和木质素的吸收波段(Kokaly and Clark, 1999; Mutange and Skidmore, 2007),均会压制 2.20 μm 处的吸收特征,降低羟基或碳酸岩类矿物的可识别度(Nagler *et al.*, 2000; Galvão *et al.*, 2005).在植被覆盖较多地区开展遥感蚀变信息提取,对植被干扰的处理方法主要为植被抑制法和混合像元分解补偿置换法(罗文斐等, 2010).植被抑制法可有效去除植被信息(吕凤军等, 2011; 陈圣波等, 2013),但被抑制地区的蚀变信息如何提取有待进一步研究.混合像元分解法通过分离植被信息,使用非植被信息置换植被部分,但当植被覆盖较大时,可利用的置换信息较少,从而降低矿物信息提取精度. Murphy(1995)和 Rodger and Cudahy(2009)研究发现, 2.20 μm 处的吸收深度与绿色植物覆盖度呈现线性负相关,而与干草呈现曲线型相关.因此,本文通过模拟单像元内矿物、绿色和干枯植物的混合光谱,假设并验证了端元间的线性混合关系,建立羟基和碳酸盐矿物的吸收深度校正模型,探讨模型适用的植被覆盖面积,并在黑龙江呼玛开展示范应用.

1 模型建立

1.1 数据准备

笔者采用羟基、碳酸盐类矿物、绿色植物和干枯植物 4 种样品光谱作为模型建立的数据基础.根据黑龙江呼玛地区的地质概况,选择了高岭土和方解石两种典型矿物,分别代表羟基和碳酸盐类矿物,光谱曲线均取自美国地质调查局(United States Ge-

ological Survey, USGS)波谱库.示范区的 Hyperion 影像过境时间为 2001 年 9 月 28 日,该时间绿色植物和干枯落叶共存,结合当地的植被样本调查,选择了当地优势物种白桦的绿色植物光谱以及枯叶光谱作为植物端元.选定的 4 种端元光谱曲线如图 1 所示.

1.2 不同比例的混合光谱线性模拟

为模拟传感器角度下的混合像元光谱,根据不同的目的选择不同端元,利用公式(1)对端元光谱进行线性模拟:

$$R(\lambda) = \sum_{i=1}^n W_i R_i(\lambda), \tag{1}$$

式中: $R(\lambda)$ 为波段 i 对应的混合光谱反射率, $R_i(\lambda)$ 为选定的端元光谱反射率, n 为选定端元的个数, W_i 代表每种端元的混合比例系数,并且满足以下条件:

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1; 0 \leq W_i \leq 1. \tag{2}$$

1.3 混合光谱的连续统去除

采用包络线去除法获得建立校正模型所用的吸收深度.连续统定义为光谱曲线上最大值的直线连线,且满足连线的外角大于 180°,采用公式(3)计算去除连续统后的反射率(Kokaly and Clark, 1999).

$$CRR(i) = OR(i) / CL(i), \tag{3}$$

式中: i 为对应的波段, $OR(i)$ 为端元光谱反射率曲线, $CL(i)$ 为端元光谱包络线, $CRR(i)$ 为去除连续统之后的反射率.

吸收深度的计算公式为:

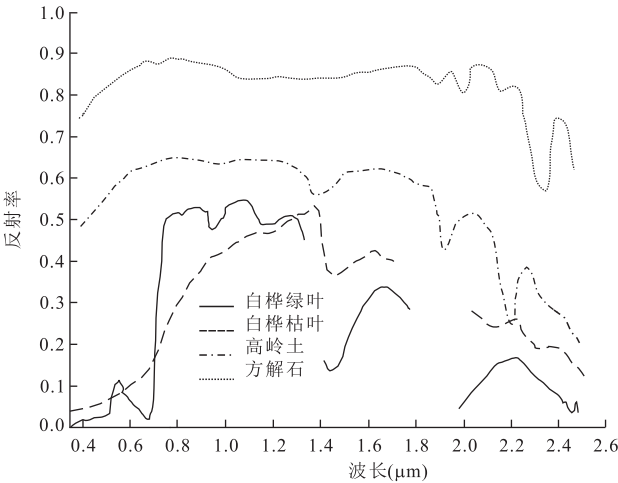


图 1 混合光谱模拟所使用的光谱端元
Fig.1 The spectra selected for the synthetic analysis portion of the study

表 1 4 种端元的连续统去除范围和中心波长

Table 1 The center wavelength and left and right wave-length extent of the four spectral used for continuum remove

端元	中心波长(μm)	左肩(μm)	右肩(μm)
绿色植物	0.670 0	0.551 0	0.751 0
干枯植物	2.135 0	2.035 0	2.195 0
羟基矿物	2.205 0	2.135 0	2.245 0
碳酸岩矿物	2.335 0	2.215 0	2.400 0

$$BD(i) = 1 - CRR(i) . \tag{4}$$

根据包络线的定义可以得出,不同波长范围的吸收深度不同.因此针对每种端元的诊断性光谱特征,可确定去除连续统的左肩、右肩和中心波长(表 1).USGS 所测定干草的吸收波段在 2.080 μm 附近,而研究区获取的干枯植物吸收波段在 2.135 μm 附近,因此干枯植物的连续统去除波段范围以研究区为准.

1.4 校正模型建立

为验证所建立校正模型的精确度,利用所有模拟混合光谱吸收深度数据的 2/3 以式(5)建立模型,解算系数,预留的 1/3 对校正模型进行显著性检验.

$$N_{VCCD} = A_1 D_G + A_2 D_D + A_3 D_M , \tag{5}$$

式中: N_{VCCD} 为 2.20 μm 或 2.35 μm 处的植被校正后的吸收深度; D_G 为绿色植物在 0.670 μm 处的吸收深度; D_D 为干枯植物在 2.135 μm 处的吸收深度; D_M 为羟基矿物或碳酸盐矿物的吸收深度; A_1 、 A_2 和 A_3 分别为 D_G 、 D_D 和 D_M 的拟合系数.

2 光谱混合模拟结果分析及模型建立

2.1 绿色和干枯植物光谱与矿物光谱的响应分析

为研究绿色和干枯植物光谱对矿物光谱的压制响应,依据公式(2)分别设定绿色、干枯植物和矿物(高岭土和方解石)的一种端元所占混合比(W_i)从 0%以 4%的增幅上升至 100%,其他两种端元的比例为剩余比例的 1/2,计算不同混合比下的植物和矿物混合光谱,利用公式(3)和(4)求取相应的吸收深度.如图 2a 和 2b 为每种比例下混合光谱 0.670 μm、2.135 μm处吸收深度分别与 2.200 μm 和 2.335 μm 处吸收深度的散点图.图 2 中 x 轴由左至右表示植物混合比逐渐增加, y 轴由下至上表示矿物混合比逐渐增加.由图 2 所示,混合光谱 2.200 μm 和 2.335 μm 处与 0.670 μm 和 2.135 μm 处的吸收深度呈明显的负相关,即随着植物混合比的增加,羟基

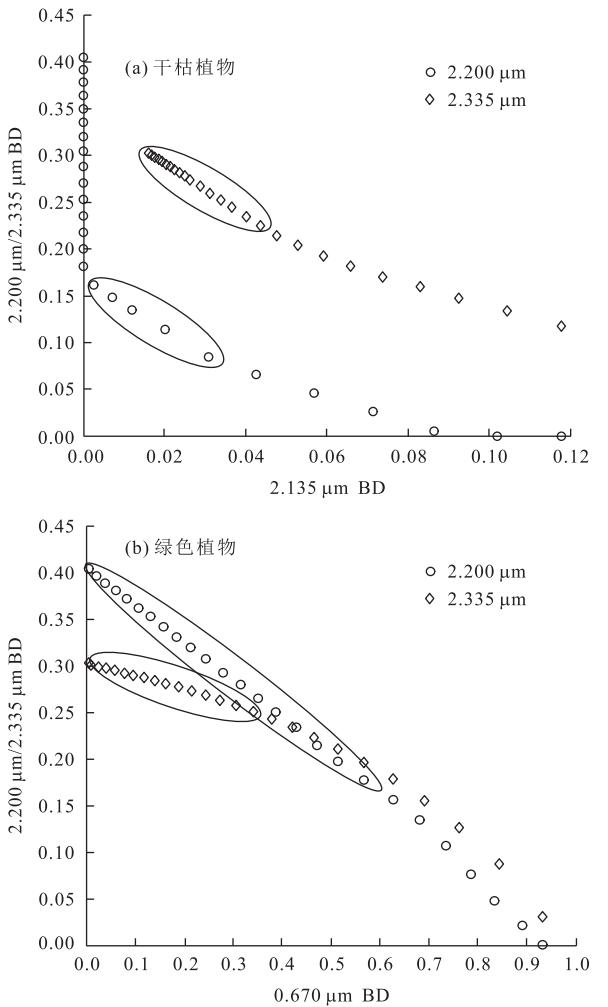


图 2 绿色和干枯植物对 2.200 μm/2.335 μm 处吸收深度的响应

Fig.2 Response of 2.200 μm/2.335 μm continuum removed band depth to green and dry vegetation

图中 0.670 μm、2.135 μm、2.200 μm 和 2.335 μm 分别代表绿色植物、干枯植物、高岭土和方解石的特征吸收波长

和碳酸盐类矿物的吸收特征被压制.

整体来看,0.670 μm 和 2.135 μm 与 2.200 μm 和 2.335 μm 处的吸收深度并不是严格的线性关系,且绿色植物的曲线为凸形,干枯植物为凹形.其中由于 2.135 μm 与 2.200 μm 处的吸收特征相互重叠影响(图 1),使得 2.200 μm 处吸收波段的左肩部下沉,使得干枯植物的非线性关系更为明显.然而考虑小范围内(图 2 中椭圆框内)的吸收深度变化,例如当 0.670 μm 的吸收深度为 0~0.6 时,与 2.200 μm 的吸收深度呈显著线性关系.另外,由图 1 所示,方解石和干枯植物的吸收特征较为相似,在 2.135 μm 和 2.335 μm 附近均存在吸收谷,导致图 2a 中方解石比例为 0 和干枯植物比例为 0 时,其对应的吸收深度

均不为 0.因此,干枯植被的存在对碳酸盐类矿物影响程度较难分析.另外,混合像元中每种端元间互相影响,对其他端元的诊断性吸收特征也存在明显的抑制作用.干枯植物会导致 $D_{0.670}$ 和 $D_{2.200}$ 的吸收深度变小,绿色植物会导致 $D_{2.135}$ 和 $D_{2.200}$ 的吸收深度变小,羟基矿物会导致 $D_{0.670}$ 和 $D_{2.135}$ 的吸收深度变小.

2.2 VCCD 模型阈值设定及模型解算

为使建立的植物校正吸收深度(vegetation corrected continuum depths, VCCD)校正模型的线性关系更为显著,针对不同的矿物设定合理的阈值.高岭石 $0.670\text{ }\mu\text{m}$ 的吸收深度 $D_{0.670}\leq 0.60$,代表绿色植物像元面积为 75%,或者更少; $2.135\text{ }\mu\text{m}$ 的吸收深度 $D_{2.135}\leq 0.03$,代表干枯植物像元面积为 30%~40%,或者更少;羟基矿物 $2.200\text{ }\mu\text{m}$ 的吸收深度 $D_{2.200}\leq 0$.方解石 $0.670\text{ }\mu\text{m}$ 的吸收深度 $D_{0.670}\leq 0.4$,代表绿色植物像元面积为 60%,或者更少; $2.135\text{ }\mu\text{m}$ 的吸收深度 $D_{2.135}\leq 0.05$,代表干枯植物像元面积为 50%~60%,或者更少;碳酸岩矿物 $2.235\text{ }\mu\text{m}$ 的吸收深度 $D_{2.235}\leq 0$.

在 2.1 节计算得到的不同混合比混合光谱的吸收深度基础上,利用确立的阈值筛选吸收深度后以公式(5)建立 VCCD 模型.模型拟合结果通过判定系数 R^2 和显著性水平 P 检验.判定系数 R^2 值越大,表示拟合方程的效果越好;得到结果如表 2 所示,显著性水平 P 小于 0.05,表示拟合方程是显著的.根据结果可知,回归方程中判定系数 R^2 值大于 0.9, P 值小于 0.001,说明拟合效果较好.

表 2 VCCD 模型的检验系数和拟合系数
Table 2 The calculated calibration statistics for the VCCD model

系数	高岭土	方解石
R^2	0.914 2	0.978 1
P	0.001 0	0.001 0
A_1	0.408 5	0.314 8
A_2	-0.317 4	0.048 7
A_3	0.936 5	-0.855 9

3 Hyperion 数据矿物信息提取及验证

为检验 VCCD 模型的实用性,在黑龙江呼玛进行了示范应用.所使用数据为 Hyperion 影像,经过了波段重建、辐射定标、坏线修复和大气校正得到反射率数据,然后经包络线去除处理,掩膜得到阈值内

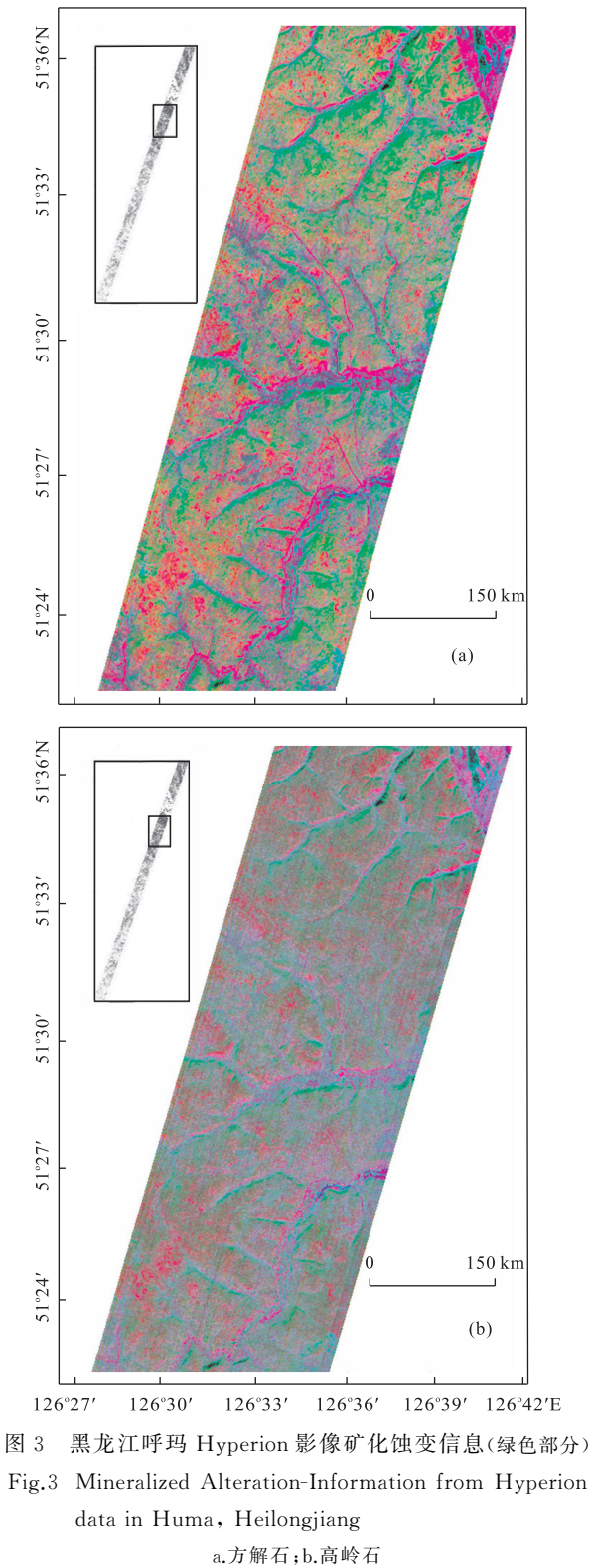


图 3 黑龙江呼玛 Hyperion 影像矿化蚀变信息(绿色部分)
Fig.3 Mineralized Alteration-Information from Hyperion data in Huma, Heilongjiang
a.方解石;b.高岭石

的 $0.670\text{ }\mu\text{m}$ 、 $2.135\text{ }\mu\text{m}$ 、 $2.200\text{ }\mu\text{m}$ 和 $2.335\text{ }\mu\text{m}$ 处的吸收深度影像.根据表 2 中的拟合系数,带入公式(5)中分别得到校正后 A_1D_G 、 A_2D_D 和 A_3D_M 的单波段影像.最终以 $R:A_1D_G$ 、 $G:A_3D_M$ 、 $B:A_2D_D$ 进行假彩色合成,得到的影像中绿色组分即为方解石

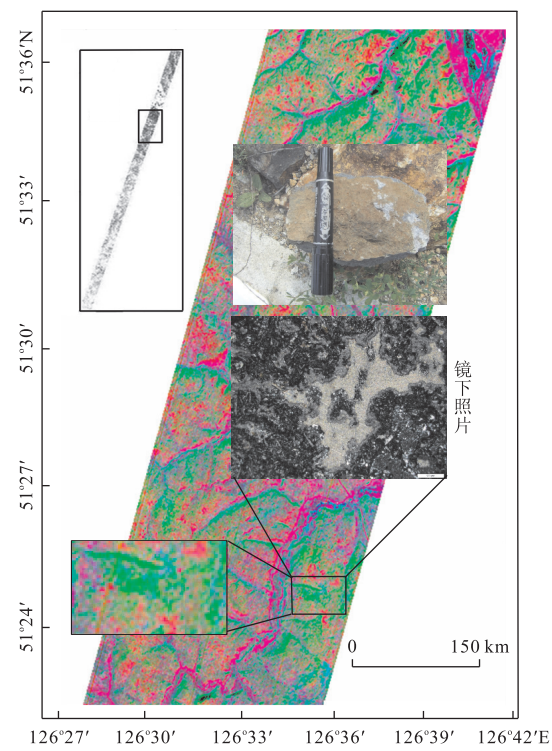


图 4 方解石提取结果野外验证

Fig.4 The field verification of calcite extraction result

或高岭土蚀变信息.如图 3a 和 3b 分别表示提取的方解石和高岭石蚀变信息.

由于示范区处于高植被覆盖的森林区,道路不便通行,因此并未在所有蚀变信息富集区采集样品,仅选择可以通行且岩石出露较多的区域(图 4 中白框中)采集岩石样品在实验室内进行抛光切片,制成光片在高分辨率显微镜下鉴定矿物类型.如图 4 所示,在白色框内的方解石富集区所采集的岩石样本,经过室内光片鉴定发现,岩石发生蚀变,呈碳酸盐化,长石绢云母化.如图 3b 所示,高岭石在验证区域并不富集,因此在验证区域所采集的岩石样品中并未发现较多的高岭石矿物.

其中干涸的河床和道路周围没有植被信息,使得方程中植被吸收深度拟合系数变大,方解石和高岭石的吸收深度被高估.但是道路和河床在遥感图像中呈现特定的形状,可以根据形状从蚀变信息中剔除.

4 结论

通过模拟绿色植物、干枯植物以及羟基和碳酸盐矿物的混合光谱,笔者分析了 4 种端元对混合光谱的影响,设定合理的吸收深度阈值,建立了植被覆

盖区的羟基矿物吸收深度校正模型,并应用于黑龙江呼玛 Hyperion 影像分析,提取了高岭土和方解石蚀变信息:

- (1)通过分析植物与羟基和碳酸盐矿物的混合光谱,证实了其特征波段处的吸收深度为线性关系,但该线性关系在某混合比范围内较为显著.因此,校正模型在用于遥感影像矿物提取时,适用的植被覆盖面积不同,例如高岭石的校正模型适用于绿色和干枯植物覆盖面积分别小于 75%和 35%.将模型应用于植被覆盖度为 70%左右的黑龙江呼玛的 Hyperion 影像,矿物提取效果较好.总体来说,在植被覆盖度较大地区,校正模型能得到较理想的矿物提取效果.
- (2)利用校正模型所提取的矿物中容易混淆道路和干枯河道信息,它们的形状较规律,可手动剔除.在研究中结合示范区的地质概况,针对性的探讨了植物、羟基和碳酸盐的混合光谱特征,并没有考虑如硅酸盐等其他类型矿物对线性关系的影响程度,在后续研究中需要考虑第 4 种未知端元对模型的敏感性,从而开展多种研究区的模型应用.

References

Chen, S. B., Liu, Y. L., Yang, Q., et al., 2013. Lithological Classification from Hyperspectral Data in Dense Vegetation Cover Area. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(6): 1959—1965 (in Chinese with English abstract).

Clark, R. N., King, T. V. V., Klejwa, M., et al., 1990. High Spectral Resolution Reflectance Spectroscopy of Minerals. *Journal of Geophysical Research*, 95 (B8): 12653. doi:10.1029/jb095ib08p12653

Crowley, J. K., Brickey, D. W., Rowan, L. C., 1989. Airborne Imaging Spectrometer Data of the Ruby Mountains, Montana; Mineral Discrimination Using Relative Absorption Band-Depth Images. *Remote Sensing of Environment*, 29(2): 121—134. doi: 10.1016/0034—4257(89)90021—7

Galvão, L. S., Almeida-Filho, R., Vitorello, Í., 2005. Spectral Discrimination of Hydrothermally Altered Materials Using ASTER Short-Wave Infrared Bands: Evaluation in a Tropical Savannah Environment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7(2): 107—114. doi:10.1016/j.jag.2004.12.003

Gan, F. P., Wang, R. S., Ma, A. N., 2003. Spectral Identification Tree (Sit) for Mineral Extraction Based on Spectral Characteristics of Minerals. *Earth Science Frontiers*, 10

- (2):445—454 (in Chinese with English abstract).
- Gong, P., Pu, R. L., 2000. Hyperspectral Remote Sensing and Its Applications. Higher Education Press, Beijing (in Chinese).
- Hewson, R. D., Cudahy, T. J., Drake-Brockman, J., et al., 2006. Mapping Geology Associated with Manganese Mineralisation Using Spectral Sensing Techniques at Woodie Woodie, East Pilbara. *Exploration Geophysics*, 37(4):389. doi:10.1071/eg06389
- Hunt, G. R., 1982. Spectroscopic Properties of Rocks and Minerals. Volume I, Handbook of Physical Properties of Rocks, CRC Press, Boca Raton.
- Karnieli, A., Kaufman, Y. J., Remer, L., et al., 2001. AFRI-Aerosol Free Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*, 77(1):10—21. doi:10.1016/s0034—4257(01)00190—0
- Kokaly, R. F., Clark, R. N., 1999. Spectroscopic Determination of Leaf Biochemistry Using Band-Depth Analysis of Absorption Features and Stepwise Multiple Linear Regression. *Remote Sensing of Environment*, 67(3):267—287. doi:10.1016/s0034—4257(98)00084—4
- Luo, W. F., Zhong, L., Zhang, B., et al., 2010. Independent Component Analysis for Spectral Unmixing in Hyperspectral Remote Sensing Image. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 30(6):1628—1633 (in Chinese with English abstract).
- Lü, F. J., Hao, Y. S., Wang, J., et al., 2011. Extraction of Alteration Mineral Information Based on Hyperspectral Data in Vegetation Covering Field. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(1):316—321 (in Chinese with English abstract).
- Murphy, R. J., 1995. The Effects of Surficial Vegetation Cover on Mineral Absorption Feature Parameters. *International Journal of Remote Sensing*, 16(12):2153—2164. doi:10.1080/01431169508954548
- Mutanga, O., Skidmore, A. K., 2007. Red Edge Shift and Biochemical Content in Grass Canopies. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62(1):34—42. doi:10.1016/j.isprsjprs.2007.02.001
- Nagler, P. L., Daughtry, C. S. T., Goward, S. N., 2000. Plant Litter and Soil Reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 71(2):207—215. doi:10.1016/s0034—4257(99)00082—6
- Nanni, M. R., Demattê, J. A. M., 2006. Spectral Reflectance Methodology in Comparison to Traditional Soil Analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2):393. doi:10.2136/sssaj2003.0285
- Rodger, A., Cudahy, T., 2009. Vegetation Corrected Continuum Depths at 2.200 μm : An Approach for Hyperspectral Sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(10):2243—2257. doi:10.1016/j.rse.2009.06.011
- van der Meer, F. V. D., 2004. Analysis of Spectral Absorption Features in Hyperspectral Imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(1):55—68. doi:10.1016/j.jag.2003.09.001

附中文参考文献

- 陈圣波, 刘彦丽, 杨倩, 等, 2013. 植被覆盖区卫星高光谱遥感岩性分类. 吉林大学学报(地球科学版), 42(6):1959—1965.
- 甘甫平, 王润生, 马蒿乃, 2003. 基于特征谱带的高光谱遥感矿物谱系识别. 地学前缘, 10(2):445—454.
- 宫鹏, 浦瑞良, 2000. 高光谱遥感及其应用. 北京: 高等教育出版社.
- 罗文斐, 钟亮, 张兵, 等, 2010. 高光谱遥感图像光谱解混的独立成分分析技术. 光谱学与光谱分析, 30(6):1628—1633.
- 吕凤军, 郝跃生, 王娟, 等, 2011. 植被覆盖区高光谱蚀变矿物信息提取. 吉林大学学报(地球科学版), 41(1):316—321.