

doi:10.3799/dqkx.2015.118

基于实测高光谱数据空间特征的光谱混合模型

陈磊, 陈圣波, 杨倩*, 马明, 刘道飞

吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林长春 130026

摘要: 为提高高光谱混合像元分解精度, 利用地物多角度二向性反射平台和 ASD FieldSpec3 Hi-Res 便携式地物波谱仪, 设计等距离/等面积实验, 考虑探测距离远近对混合光谱的影响, 获取不同覆盖条件下叶片与方解石的混合光谱, 找出光谱数据空间特征变化规律, 提出等距离/等面积模型来消除空间位置对混合光谱的影响, 并将模拟混合光谱与实测混合光谱进行对比。通过实测数据分析, 混合反射率分布的权重系数随探测单位面积点与探头距离呈高斯变化规律; 与线性模型和线性改进模型进行光谱混合模拟结果相比, 应用权重系数高斯分布规律以等距离/等面积模型进行混合光谱模拟, 其模拟结果相似度平均增加了 1.20%, 均方根误差平均降低了 7.78%。等距离/等面积光谱混合模型考虑了光谱空间变化特征, 提高了光谱混合模拟的精度, 为进一步研究高光谱数据混合像元分解提供了新的方法。

关键词: 混合光谱; 光谱空间特征; 权重系数; 等距离/等面积模型; 遥感。

中图分类号: P627

文章编号: 1000-2383(2015)08-1359-06

收稿日期: 2015-03-05

A Spectral Mixture Model Based on Spectral Spatial Character of Measured Hyperspectral Data

Chen Lei, Chen Shengbo, Yang Qian*, Ma Ming, Liu Daofei

College of Geoporation Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: In order to enhance the estimation of mixed spectral model, the equidistant/ homalographic model is established to analyze the spectral spatial character to simulate the mixture spectra. Based on the reflex platform and FieldSpec 3 Hi-Res portable spectrum instrument, the equidistant/ homalographic experiment, which takes the effect of distance between optical fiber probe and detected endmember into account, was designed to acquire the mixed spectral reflectance of calcite and green leaf. The measured mixed spectra analysis shows the weight coefficients of distribution change with the distance between the detected endmember and the probe is in a Gauss distribution. Compared with the linear spectral mixture model and improved linear spectral model, the results simulated by the equidistant/ homalographic model is 1.20% greater in similarity and 7.78% lower in RMSE. Considering the influence exerted by spectral spatial structure on mixed spectral simulation, the equidistant/ homalographic model proves to improve the accuracy of mixed spectral simulation and a new method for unmixing the mixed pixel of hyperspectral data.

Key words: mixed spectra; spectral spatial character; weight coefficient; equidistant/homalographic model; remote sensing.

0 引言

高光谱数据因其分辨率高、信息量丰富等特有优势而被广泛应用于农业估产、林业资源调查等领

域(朱蕾等, 2008; 吕杰和刘湘南, 2012)。高光谱数据蕴含地物信息丰富, 可在地物光谱库的基础上对地表地物进行特征提取, 提高地表覆盖地物识别的精度(杜培军等, 2006)。由于地表物质的复杂混合及传

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(No.2012AA12A308); 自然科学基金项目(No.41402293); 国家地质矿产调查评价项目(No.1212011087112); 吉林大学研究生创新基金资助项目(No.2015061)。

作者简介: 陈磊(1989-), 博士研究生, 主要研究方向为混合像元分解。E-mail: chenlei0106@126.com。

* **通讯作者:** 杨倩, E-mail: 754989375@qq.com。

引用格式: 陈磊, 陈圣波, 杨倩, 等, 2015. 基于实测高光谱数据空间特征的光谱混合模型. 地球科学——中国地质大学学报, 40(8): 1359-1364.

传感器的物理限制,遥感数据单个像元大多为混合像元,往往都包含两种或两种以上地物类型,由此增加了地物识别与遥感定量化的难度(朱锋等,2013)。

近年来,用于混合像元分解模型主要有线性模型、辐射传输模型和几何光学模型。线性混合模型计算过程简单,易实现,但因模型的局限性,求解结果精度不高(Roberts *et al.*, 1990; Miao *et al.*, 2006; Raksuntorn and Du, 2010; Yang *et al.*, 2010)。辐射传输模型能模拟非常复杂的辐射传输过程,但其反射率和透射率难以精确测量,且分解方法复杂,不适合应用于成像遥感数据(Edward, 1970; Borel and Gerstl, 1994)。几何光学模型考虑了植被个体的结构特征,可基于孔隙率、开阔度等提高植被冠层二向性反射特性模拟精度,但其参数求解非常复杂(Li and Strahler, 1985, 1986)。所以,建立新的光谱混合方法以降低计算复杂度,提高像元分解精度是至关重要的。

应用光谱混合模型对混合像元光谱反射率进行模拟或矿物含量反演,大多是通过通过对光谱特征参数进行分析,建立新的方法,从而得到目标光谱或端元物质含量(Chen *et al.*, 2013; 陈圣波等, 2014)。但是这些模型大多都只对光谱特征进行分析,均未考虑光谱空间特征变化对混合像元分解及目标物含量反演等结果的影响。本文基于 ASD FieldSpec3 Hi-Res 便携式地物光谱仪测量所得的波谱数据对叶片与方解石进行混合光谱模拟,并考虑光谱空间变化特征对混合光谱的影响,建立新的光谱混合方法来模拟混合光谱,提高了模拟精度。

1 实验过程

1.1 实验仪器

实验仪器由光谱仪和装载光谱仪的地物多角度二向反射测量平台组成。实验使用的光谱仪器为美国 ASD 公司生产的 FieldSpec3 Hi-Res 便携式地物光谱仪。测量平台由入射光源和反射光接收装置仪器组成,入射光源为镍钨灯,根据反射光接受装置设定入射角为 30° ,出射角为 0° ,方位角为 0° ,视场角为 25° ,平台测量精度为 0.5° 。

1.2 光谱数据测量

实验材料主要为粉末状方解石和新鲜绿色稠李叶片,黑色背景圆盘,低反射率的黑纸板。测量时,使叶片或黑纸板与方解石基本处于同一水平面。同时探测多条混合光谱,做平均值处理降低随机误差,并对反射率光谱进行 Savitzky-Golay 滤波法去噪

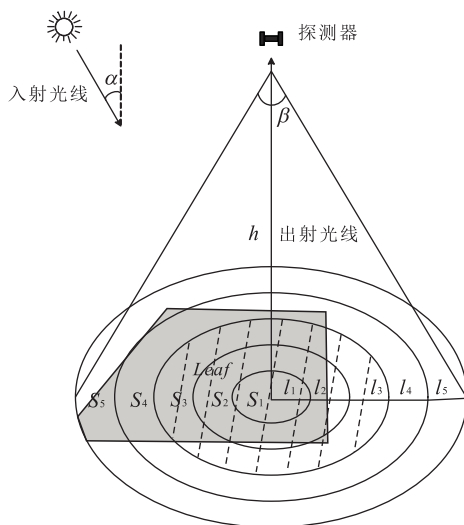


图 1 等距离/等面积划分探测区域示意

Fig.1 Schematic of the equidistant/homolographic area

(Savitzky and Golay, 1964)。根据 ASD 地面光谱仪探测光纤探头的特性,其探测示意如图 1。

实验中,探测器距探测平面中心距离高度 $h = 18 \text{ cm}$,视场角为 25° ,圆环平面内所有区域为探测范围。当 $l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = l_5$ 时,即圆环的环宽相等时,探测区域按照等距离划分,定义以 l_1 为半径的圆形区域为 DJ1,以 $l_1 + l_2$ 为半径的圆形区域为 DJ2,以此类推,定义以 $l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5$ 为半径的圆形区域为 DJ5;当 $S_1 = S_2 = S_3 = S_4 = S_5$ 时,即各个圆环的面积相等时,探测区域等面积划分,定义圆形区域 S_1 为 DM1,圆形区域 $S_1 + S_2$ 为 DM2, ..., 圆形区域 $S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5$ 为 DM5。分别测量叶片覆盖不同探测区域时与方解石的混合光谱反射率(图 2),DJ1 和 DM1 分别代表等距离和等面积划分探测区域时叶片覆盖 S_1 区域,方解石覆盖 $S_2 + S_3 + S_4 + S_5$ 区域的混合光谱, ..., DJ4 和 DM4 分别代表等距离和等面积划分探测区域时叶片覆盖 $S_1 + S_2 + S_3 + S_4$ 区域,方解石覆盖 S_5 区域的混合光谱;DJ5 和 DM5 分别代表等距离和等面积划分探测区域时叶片覆盖 $S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5$ 区域(即全视场内叶片覆盖于方解石上)的混合光谱。如图 1,当叶片覆盖斜虚线部分,方解石覆盖其他区域时,若等面积划分探测区域,测得反射率如图 2 中 DM3;若等距离划分探测区域,测得反射率如图 2 中 DJ3。测量方解石处于不同探测区域时与低反射率的黑纸板混合光谱反射率值(图 3),测量方法和测量叶片与方解石混合光谱方法相同。

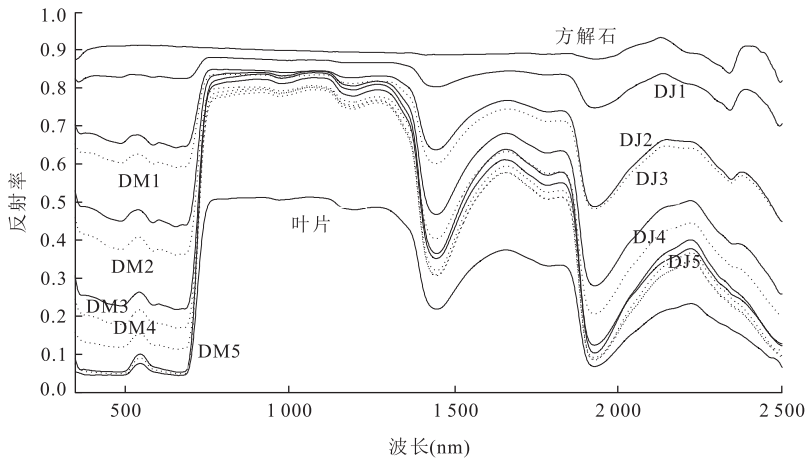


图 2 等距离/等面积划分探测区域叶片覆盖不同区域与方解石混合光谱

Fig.2 The mixed spectra of leaf and calcite by different equidistant/homolographic area

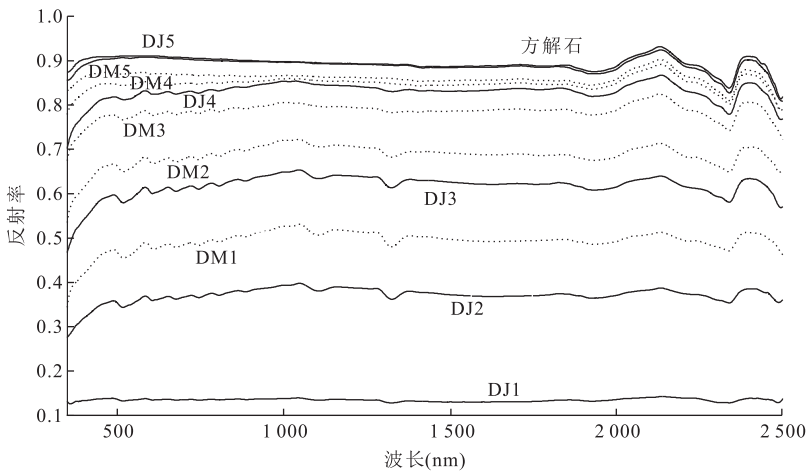


图 3 等距离/等面积覆盖不同区域方解石光谱曲线

Fig.3 The calcite spectra of different equidistant/homolographic area

2 模型描述

2.1 等距离/等面积混合光谱模型

探测点距离探测区域内中心位置越远,其对光谱反射率的贡献度越小,设计实验等距离/等面积划分平面探测区域,求出等距离/等面积划分后每部分区域的反射率贡献比率,也即权重系数,划分的区域越细,模拟结果越好,本文以等距离/等面积 5 等分为例,模型运算方程如下:

$$\begin{cases} R = \sum_i \gamma_i \times (\alpha_i \times R_s + \beta_i \times R_y + \beta_i \times \tau_y) + \epsilon \\ \sum_i \gamma_i = 1, \alpha_i + \beta_i = 1 \\ 0 \leq \alpha_i \leq 1, 0 \leq \beta_i \leq 1, 0 \leq \gamma_i \leq 1 \end{cases}, \quad (1)$$

其中, R 为模拟的混合光谱, i 为探测区域等分区域数, γ_i 为第 i 部分区域的权重系数, α_i 为第 i 部分

区域中矿物所占比例, β_i 为第 i 部分区域中叶片所占比例, R_s 为矿物反射率, R_y 为叶片反射率, ϵ 为误差值, τ_y 为透射过叶片的反射率,是实测方解石与叶片混合光谱同纯净方解石光谱之间的差值(Chen *et al.*, 2013).

2.2 等距离/等面积权重系数

分别测量方解石在 DJ1~DJ5, DM1~DM5 区域反射率大小,光谱曲线如图 3.图 3 中实线为等距离划分探测方解石与黑纸板的混合光谱,虚线为等面积划分探测区域方解石与黑纸板的混合光谱.通过最小二乘拟合方法,分析覆盖不同区域方解石光谱与全视场范围方解石光谱,求出覆盖不同平面区域光谱对全视场光谱的贡献大小,即权重系数(表 1).

等距离/等面积划分探测区域后,计算每个圆环与平面探测区域中心的平均距离及不同区域内每单位面积的权重系数.根据探头特性及探测区域的对

表 1 等距离/等面积划分探测区域各部分权重系数

Table 1 The weight coefficient of different equidistant/homolographic area

方解石覆盖区域	DJ1	DJ2	DJ3	DJ4	DJ5
权重系数	0.150 0	0.414 8	0.690 7	0.928 8	0.995 2
方解石覆盖区域	DM1	DM2	DM3	DM4	DM5
权重系数	0.551 5	0.767 0	0.879 1	0.949 0	0.963 1

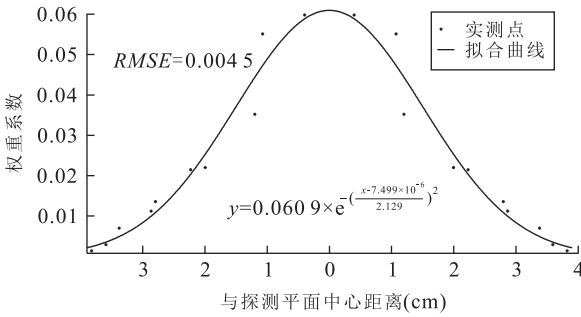


图 4 每单位面积权重系数随探测点与探头距离远近变化
Fig.4 The weight coefficient of per unit area with the increase of distance between the detector and detected unit area

称性,对权重系数随距离远近变化规律做拟合运算,拟合曲线如图 4,以与探测平面中心距离(x)为自变量、以权重系数(y)为因变量对实测数据进行拟合,求解拟合方程并计算探测区域内每单位面积对光谱反射率的权重系数。

3 结果与讨论

3.1 规则叶片与方解石混合光谱模拟结果分析

笔者以线性光谱混合模型 (Joseph *et al.* ,

1998)、改进线性光谱混合模型 (Chen *et al.* , 2013) 及等距离/等面积模型分别模拟混合光谱与实测混合光谱进行对比。为分析模拟效果,对模拟混合光谱与实测混合光谱做均方根误差及相似度分析 (朱峰等, 2013),均方根误差计算公式为:

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^{2151} (x_i - y_i)^2 / 2151} \quad (2)$$

式(2)中: x_i 表示模拟混合光谱在第 i 波段的反射率, y_i 表示实测混合光谱在第 i 波段的反射率;相似度计算公式如下:

$$\cos\theta = \frac{\mathbf{d}_1 \times \mathbf{d}_2}{|\mathbf{d}_1| |\mathbf{d}_2|} \quad (3)$$

式(3)中: \mathbf{d}_1 、 \mathbf{d}_2 为两光谱矢量, $||$ 为模, \times 为内积。均方根误差越小,相似度越接近于 1,模拟的效果越好。叶片分别覆盖 DJ1~DJ5, DM1~DM5 区域时,每部分区域与探头距离不同,探测其混合光谱,分析结果对比如表 2。相对于线性模型和改进模型模拟结果,等距离/等面积模拟相似度值均较接近于 1,均方根误差均小于另两种混合光谱模拟结果。

3.2 随机形状叶片与方解石混合光谱模拟结果对比分析

以 3 种不同的方法对随机形状叶片与方解石混合光谱进行模拟,测量示意图如图 1 中的灰色阴影部分,其为叶片覆盖面积,混合光谱模拟结果如图 5,对 3 种方法求解的误差分析如表 3。由图 5 及表 3 可以看出,等距离/等面积划分探测区域对混合光谱进行模拟时,其模拟效果在近红外波段较好,且整体均方根误差明显减小,相似度更接近于 1,总体效果都优于另外两种方法模拟效果。

表 2 不同方法模拟混合光谱误差对比

Table 2 The simulated mixed spectra error by different mixture model

模拟方法		DJ1	DJ2	DJ3	DJ4	DJ5
相似度	等距离/等面积模拟	0.999 7	0.997 8	0.995 5	0.995 6	0.997 6
	线性模拟	0.999 5	0.993 1	0.977 5	0.966 3	0.999 6
	改进模型模拟	0.999 6	0.994 9	0.985 1	0.982 5	0.997 3
均方根误差	等距离/等面积模拟	0.021 6	0.050 8	0.066 9	0.064 7	0.075 1
	线性模拟	0.049 2	0.120 8	0.150 0	0.138 4	0.215 0
	改进模型模拟	0.051 5	0.127 6	0.156 6	0.122 1	0.077 0
模拟方法		DM1	DM2	DM3	DM4	DM5
相似度	等距离/等面积模拟	0.995 3	0.994 4	0.997 3	0.999 3	0.999 0
	线性模拟	0.993 4	0.969 1	0.948 7	0.976 9	0.999 6
	改进模型模拟	0.995 6	0.979 1	0.968 7	0.991 1	0.998 5
均方根误差	等距离/等面积模拟	0.086 2	0.060 6	0.037 7	0.022 9	0.032 4
	线性模拟	0.116 2	0.174 7	0.169 2	0.125 0	0.181 4
	改进模型模拟	0.125 1	0.188 5	0.175 2	0.077 9	0.043 0

表 3 不同方法模拟混合反射率的误差分析

Table 3 The simulated mixed spectra error by different mixture model

误差类别	线性模拟	改进模型模拟	等距离拟合	等面积拟合
相似度	0.977 6	0.988 5	0.996 4	0.996 1
均方根误差	0.141 6	0.141 7	0.061 7	0.062 2

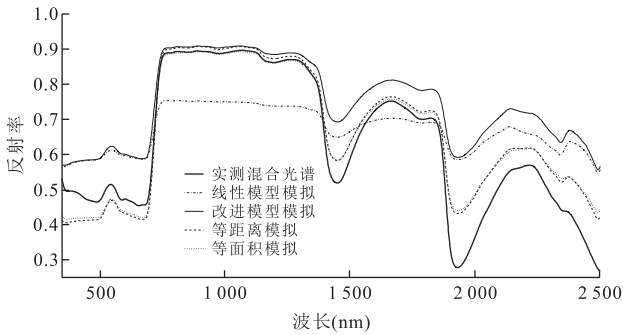


图 5 不同方法模拟混合反射率对比

Fig.5 Comparison of simulated mixed spectra by different mixture model

4 结论

以等距离/等面积实验为基础,测量不同空间位置处叶片与方解石的混合光谱.通过分析混合光谱反射率随探测位置变化规律,得到了光谱空间特征变化规律:探测单位面积点离探测探头越近,其对混合光谱贡献权重系数越大,且成高斯分布规律.以消除光谱空间特征变化对混合光谱的影响为目的,建立等距离/等面积模型模拟混合光谱,对模拟混合光谱结果进行相似度及均方根误差分析.通过分析结果可以看出,与线性模型及改进线性模型相比,等距离/等面积模型提高了混合光谱模拟精度,相似度平均增加了 1.20%,均方根误差平均降低 7.78%.等距离/等面积模型能减弱端元空间位置对混合光谱的影响,简化模型模拟过程,提高了混合光谱模拟精度,且为地形起伏对遥感数据的影响分析提供了思路,为进一步研究高光谱数据像元分解提供了新的方法.

References

Borel, C. C., Gerstl, S. A. W., 1994. Nonlinear Spectral Mixing Models for Vegetative and Soil Surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 47 (3): 403 - 416. doi: 10.1016/0034-4257(94)90107-4

Chen, S. B., Chen, L., Liu, Y. L., et al., 2013. Experimental Simulation on Mixed Spectra of Leaves and Calcite for Inversion of Carbonate Minerals from EO-1 Hyperion

Data. *GIS Science & Remote Sensing*, 50(6): 690 - 703.

Chen, S. B., Li, X. L., Chen, L., 2014. Study on Inversion of Soil Heavy Metal Elements Concentrations in Stream Sediments by In-Situ Hyperspectral Measurements. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(4): 1388 - 1394 (in Chinese with English abstract).

Du, P. J., Lin, H., Sun, D. X., et al., 2006. On Progress of Support Vector Machine based Hyper Spectral RS Classification. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (12): 37 - 40 (in Chinese).

Knipling, E. B., 1970. Physical and Physiological Basis for the Reflectance of Visible and Near-Infrared Radiation from Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1 (3): 155 - 159. doi: 10.1016/S0034-4257(70)80021-9

Li, X. W., Strahler, A. H., 1985. Geometric-Optical Modeling of a Conifer Forest Canopy. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 23 (5): 705 - 721. doi: 10.1109/tgrs.1985.289389

Li, X. W., Strahler, A. H., 1986. Geometric-Optical Bidirectional Reflectance Modeling of a Conifer Forest Canopy. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 24: 906 - 919.

Lü, J., Liu, X. N., 2012. Hyperspectral Remote Sensing Estimation Model for Cd Concentration in Rice Using Support Vector Machines. *Journal of Applied Sciences*, 30 (1): 105 - 110 (in Chinese with English abstract).

Miao, X., Gong, P., Swope, S., et al., 2006. Estimation of Yellow Starthistle Abundance through CASI-2 Hyperspectral Imagery Using Linear Spectral Mixture Models. *Remote Sensing of Environment*, 101(3): 329 - 341. doi: 10.1016/j.rse.2006.01.006

Piwowar, J. M., Peddle, D. R., LeDrew, E. F., 1998. Temporal Mixture Analysis of Arctic Sea Ice Imagery: A New Approach for Monitoring Environmental Change. *Remote Sensing of Environment*, 63(3): 195 - 207. doi: 10.1016/j.rse.2004.10.008

Raksuntorn, N., Du, Q., 2010. Nonlinear Spectral Mixture Analysis for Hyperspectral Imagery in an Unknown Environment. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 7(4): 836 - 840. doi: 10.1109/lgrs.2010.2049334

Roberts, D. A., Adams, J. B., Smith, M. O., 1990. Predicted Distribution of Visible and Near-Infrared Radiant Flux above and below a Transmittant Leaf. *Remote Sensing of Environment*, 34 (1): 1 - 17. doi: 10.1016/0034-4257(90)9008006

Savitzky, A., Golay, M. J. E., 1964. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry*, 36(8): 1627 - 1639.

Yang, C. H., Everitt, J. H., Du, Q., 2010. Applying Linear

Spectral Unmixing to Airborne Hyperspectral Imagery for Mapping Yield Variability in Grain Sorghum and Cotton Fields. *Journal of Applied Remote Sensing*, 4 (1):041887. doi:10.1117/1.3484252

Zhu, F., Gong, H. L., Sun, T. L., et al., 2013. Study on the Nonlinear Characteristics of the Mixed Pixel's Reflectance in Hyperspectral Space. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 33(3):737-740 (in Chinese with English abstract).

Zhu, L., Xu, J. F., Huang, J. F., et al., 2008. Study on Hyperspectral Estimation Model of Crop Vegetation Cover Percentage. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 28 (8):1827-1831 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈圣波, 李鑫龙, 陈磊, 2014. 基于地面实测光谱的水系沉积物重金属含量反演. *吉林大学学报(地球科学版)*, 44 (4):1388-1394.

杜培军, 林卉, 孙敦新, 等, 2006. 基于支持向量机的高光谱遥感分类进展. *测绘通报*, (12):37-40.

吕杰, 刘湘南, 2012. 利用支持向量机构建水稻镉含量高光谱预测模型. *应用科学学报*, 30(1):105-110.

朱蕾, 徐俊锋, 黄敬峰, 等, 2008. 作物植被覆盖度的高光谱遥感估算模型. *光谱学与光谱分析*, 28(8):1827-1831.

朱锋, 宫辉力, 孙天琳, 等, 2013. 高光谱空间中混合象元非线性反射特征研究. *光谱学与光谱分析*, 33(3):737-740.