

doi:10.3799/dqkx.2015.112

基于植被胁迫光谱的高光谱遥感 植被元素富集信息提取

帅琴¹, 黄爽^{2*}, 李志忠³, 陈圣波², 徐守礼³

1. 中国地质大学材料与化学学院, 湖北武汉 430074

2. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林长春 130026

3. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100029

摘要: 含矿层中成矿元素的迁移富集可胁迫影响上覆植物光谱, 因此, 利用植物响应特征提取成矿元素富集信息可指示潜在的矿床位置. 以内蒙古西乌旗草原覆盖区为例, 采集典型植物光谱并测试元素含量, 分析红边和吸收深度对不同成矿元素的敏感性, 并进行模型显著性参数检验, 建立了基于植物吸收深度的 Co 和 W 元素响应模型, 应用于示范区的 Hyperion 影像, 圈定了 Co 和 W 元素富集信息. 结合野外实地采样验证, 富集点元素含量均高于背景值. 该研究可为植被覆盖区的高光谱遥感地质调查提供新的思路.

关键词: 成矿元素; 胁迫光谱; 红边位置; 遥感; 吸收深度.

中图分类号: P627

文章编号: 1000-2383(2015)08-1319-06

收稿日期: 2015-03-19

The Metal Element Information Extraction from Hyperion Data Based on the Vegetation Stress Spectra

Shuai Qin¹, Huang Shuang^{1*}, Li Zhizhong³, Chen Shengbo², Xu Shouli³

1. Faculty of Materials Science and Chemistry, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

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

3. Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100029, China

Abstract: The migration enrichment of metallogenic elements in the bearing bed can cause changes of the spectrum of overlying vegetation. Therefore, the metallogenic elements enrichment information which is extracted by using vegetation spectral response characteristics can be used to indicate the underlying mineral deposits. In this paper, Xi Ujimqin Qi grassland in Inner Mongolian was taken as an example. The spectra of the vegetation was collected and Nine metal elements in the vegetation were measured. The influence of red edge and absorption depth on the sensitivity of different metallogenic elements were analyzed. The significance of model parameters was verified and the element-response model based on absorption depth was established to detect W and Co elements, which was applied to hyperspectral data(Hyperion). Combined with the field work, the element contents of enriched samples are testified to be higher than the background values. This research shall provide new perspective for mineral investigation and prediction of hyperspectral remote sensing in vegetated area.

Key words: metallogenic elements; stress spectrum; red edge position; remote sensing; absorption depth.

基金项目: 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(Nos.2008AA121100, 2012AA12A308).

作者简介: 帅琴(1963-), 女, 教授, 主要研究方向为地质分析. E-mail: shuaiqin@cug.edu.cn

* **通讯作者:** 黄爽, E-mail: hsmlylife2012@163.com

引用格式: 帅琴, 黄爽, 李志忠, 等, 2015. 基于植被胁迫光谱的高光谱遥感植被元素富集信息提取. 地球科学——中国地质大学学报, 40(8): 1319-1324.

高光谱遥感已经成功应用在裸露地区矿物识别 (Kruse *et al.*, 2003) 和岩性分类中 (陈圣波等, 2012a). 尤其是通过高光谱遥感提取蚀变矿物信息, 可以有效的指导成矿预测. 但是在植被覆盖区, 岩石和矿物属于弱信息, 不容易被直接提取. 研究表明, 植被受到重金属的胁迫, 其反射光谱会发生相应的变化 (Rosso *et al.*, 2005; 龚绍琦等, 2010; 徐明星等, 2011; Zhu *et al.*, 2014). 因此, 植被冠层的光谱反射特征, 已被应用于定量分析生物物理化学过程及其参数 (Zarco-Tejada *et al.*, 2004; Darvishzadeh *et al.*, 2008; Houborg *et al.*, 2009; 林芬芳等, 2009). Sánchez-Azofeifa *et al.* (2009) 开展了土壤环境污染的植被光谱效应及其微观响应机制研究; 甘甫平等 (2004) 估算了土壤中重金属元素的含量. 利用已知矿区中植被的光谱特征变异和成矿元素含量之间的关系可以来提取高光谱岩性弱信息. 矿山环境中植被光谱特征的研究是高光谱遥感应应用到植被覆盖区矿床预测和评价的基础 (陈圣波等, 2012b).

本文以内蒙古西乌珠穆沁旗矿区为例, 分析矿区内受重金属胁迫的植被光谱特征; 分别建立实测光谱、影像光谱与叶片中重金属含量的关系, 并在影像中提取出重金属元素, 与植被样品重金属元素测量值对比分析, 为植被覆盖区高光谱遥感成矿预测提供依据.

1 样品采集

结合研究区的地质概况 (图 1), 在不同岩性的接触带设置了 8 个植物采样点. 根据采样点的植被样方调查, 研究区内植被覆盖率达 95% 以上, 优势物种为大针茅、羊草和糙隐子草 3 种草本植物. 在每个采样点采集典型植物 1~2 棵, 8 个采样点共采集植物 12 棵. 野外植物光谱采集和样品采集同步进行, 植物光谱使用美国 ASD 公司生产的 FieldSpec Pro 仪器采集, 仪器探测的波段范围为 350~2500 nm, 其中 350~1000 nm 范围内光谱分辨率为 3 nm. 探头全视场角为 25°, 为保证所采集光谱为植物冠层光谱, 每次采集距离植物 15 cm.

植物样品采集后经加工, 在实验室测试了其中 Au、As、Co、Cu、Hg、Ni、Pd、W 和 Zn 共 9 个成矿元素的含量. 变异系数作为植物地球化学找矿指标中的一种, 可表征局部区域内成矿元素的分布情况, 定义为标准偏差与平均值的比值 (朱小影等, 2009):

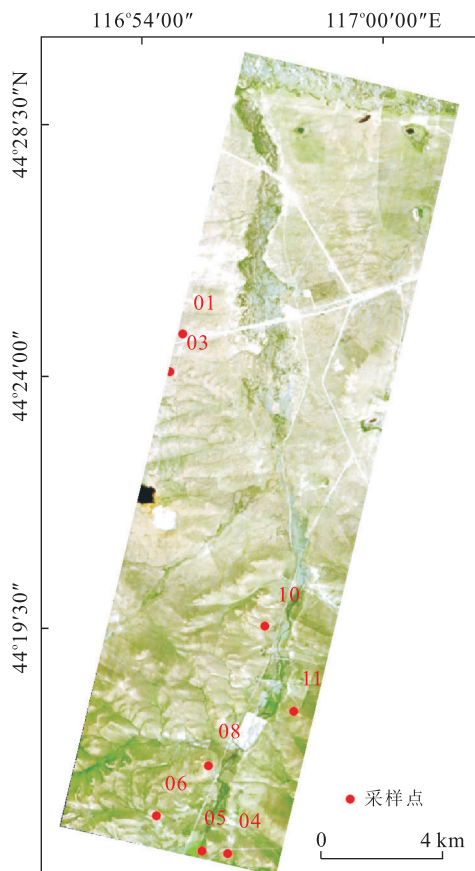


图 1 研究区采样点分布

Fig.1 The distribution of sampling point in study area

$$v_a = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2 / n}}{\bar{a}} \times 100\%, \quad (1)$$

式(1)中, v_a 为元素 a 的变异系数, a_i 为第 i 个采样点处元素 a 的含量, \bar{a} 为元素 a 的平均值. 计算研究区内不同元素的变异系数, 如表 1 所示, Co 和 W 的变异系数分别为 80.9 和 87.5, 明显高于其他元素, 表明两种元素分布不均匀, 局部地区存在富集成矿的可能性. 因此, 在后续植物光谱响应研究中, 笔者重点针对 Co 和 W 两种元素进行分析.

2 光谱分析

2.1 植被光谱“红边”位置分析

植物叶内的组织结构导致其反射光谱在 680~750 nm 内急剧上升, 形成反射陡坡, 称为“红边” (Gitelson *et al.*, 1996). 通常定义红边内的一阶微分最大值所对应的波段为红边位置. 一阶微分算法减少了产生变异的来源, 提取红边位置的精度较高 (陈圣波等, 2012b). 一阶微分计算红边位置的公式为:

表 1 植被元素含量

Table 1 Elements content within vegetation

	Au	As	Co	Cu	Hg	Ni	Pb	W	Zn
NXV01-1 羊草	0.41	218.00	24.50	5 459.00	238.00	532.00	549.00	144.00	19 180.00
NXV01-2 糙隐子草	0.61	294.00	113.00	6 604.00	159.00	1 352.00	954.00	336.00	27 660.00
NXV01-3 大针茅	1.88	359.00	125.00	3 651.00	223.00	647.00	2 725.00	172.00	15 440.00
NXV03 大针茅	0.58	272.00	37.70	4 136.00	142.00	776.00	916.00	19.30	19 110.00
NXV04-1 大针茅	0.40	337.00	247.00	4 240.00	245.00	366.00	1 452.00	193.00	20 640.00
NXV05-1 大针茅	0.54	235.00	0.33	2 466.00	78.90	479.00	491.00	6.34	12 040.00
NXV05-2 糙隐子草	0.30	481.00	88.80	7 321.00	165.00	811.00	1 135.00	29.60	10 880.00
NXV06-2 糙隐子草	0.57	572.00	394.00	7 971.00	207.00	867.00	2 208.00	247.00	27 240.00
NXV08-1 大针茅	0.51	461.00	303.00	6 201.00	461.00	571.00	2 347.00	60.80	12 410.00
NXV08-2 羊草	0.67	249.00	33.80	4 069.00	536.00	170.00	346.00	22.50	15 690.00
NXV10-1 大针茅	0.69	469.00	148.00	4 129.00	281.00	551.00	2 883.00	86.50	9 603.00
NXV11-1 大针茅	0.38	430.00	236.00	7 885.00	215.00	1 010.00	1 282.00	24.10	24 250.00
均值	0.62	370.54	142.16	5 302.92	247.76	647.85	1 497.54	112.09	17 878.69
标准偏差	0.38	108.22	114.95	1 682.45	120.27	305.22	839.91	98.12	5 731.83
变异系数	61.90	29.20	80.90	31.70	48.50	47.10	56.10	87.50	32.10

注:植物含量单位:ng/g.

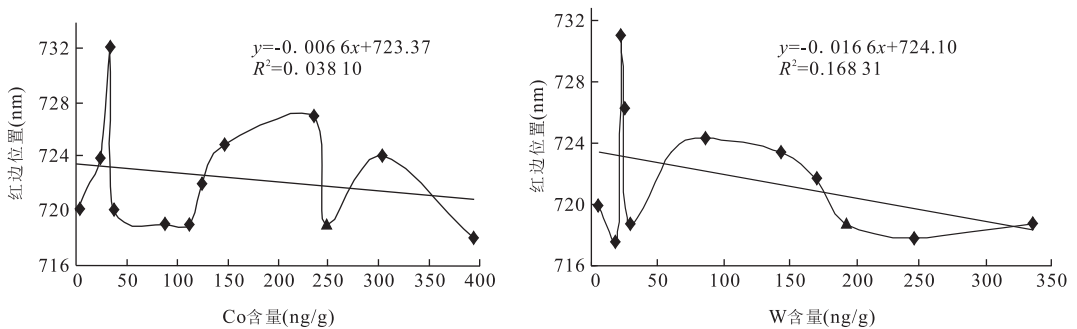


图 2 红边位置与元素含量的相关性分析

Fig.2 Analysis of relation between red edge position and elements content

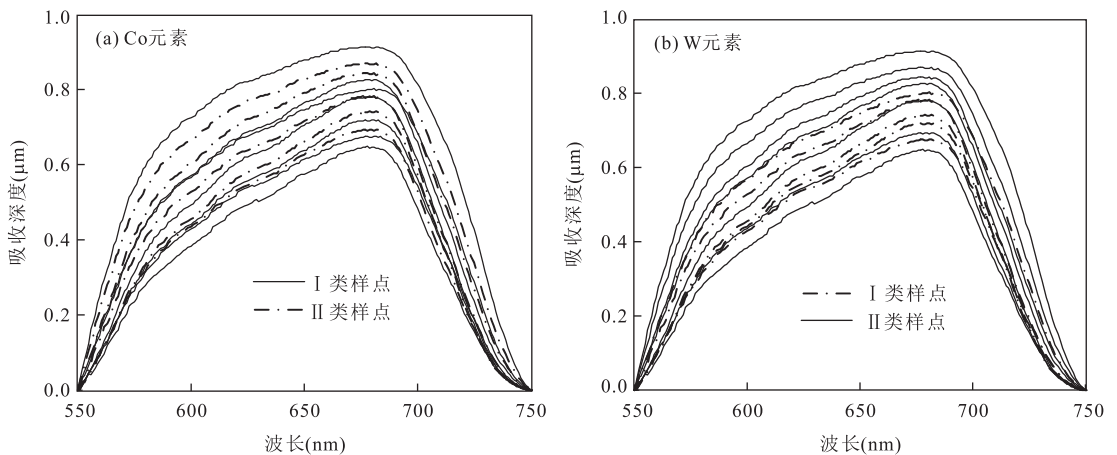


图 3 各采样点植物的光谱吸收深度

Fig.3 Spectral absorption depth of vegetation in each sample site

I 类样点:植物元素含量高于均值和标准差;II 类样点:植物元素含量低于均值和标准差

$$\rho'(\lambda_i) = [\rho(\lambda_{i+1}) - \rho(\lambda_{i-1})] / 2\Delta\lambda, \quad (2)$$

式(2)中, λ_i 为每个波段的波长, $\rho'(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 的

一阶微分值, $\Delta\lambda$ 是 λ_i 到 λ_{i+1} 的间隔.其中红边位置即为 $\rho'(\lambda_i)$ 最大时对应的波长位置;分别求得每棵

植物的光谱红边位置,并生成与元素含量的散点图(图 2),Co 和 W 元素含量与红边位置的复相关系数分别为 0.038 1 和 0.168 3,结果均不显著,这表明相对室内定量培养,野外植物生长状态的影响因素极为复杂,红边位置类的单一特征变量不能充分指示元素含量变化.但如图 2 所示,所有采样点植物的红边位置呈现先增长后降低的变化趋势,这表示适量的金属元素可促进植物生长,其中 W 元素表现最为明显.由于采样点 4(图 2 中三角形的标志点)的 Co 元素和 W 元素含量均较高,导致该点植物的光谱红边位置蓝移程度较为明显.

2.2 植被光谱吸收深度分析

当植物受到胁迫时,表现最明显的为色素变化,同时植物光谱 550~750 nm 范围内受多种色素影响,因此可利用该波段范围内的光谱特征参数表征元素胁迫程度.包络线去除可压制背景光谱,扩大弱吸收特征信息.包络线定义为逐点连接局部波谱最大值的折线,且满足峰值点上的外角大于 180°,再以原始光谱曲线值除以包络线值,即为光谱去包络(Huang *et al.*, 2004).在包络线去除后的新谱线上得到每个点的值表示为 $\rho_c(\lambda)$,则吸收深度 $D_c(\lambda)$ 为:

$$D_c(\lambda) = 1 - \rho_c(\lambda). \quad (3)$$

利用式(3)求取各采样点植物光谱 550~750 nm 的吸收深度.如图 3 所示,虚线光谱代表 I 类采样点,表示采样点处的元素含量高于平均值;实线光谱代表 II 类样点,表示采样点处的元素含量低于平均值.随着元素含量的增加,吸收深度的变化趋势并不明显.整体来看,元素含量较高植物的光谱吸收深度处于较为平均的水平,说明了元素对植被的生长抑制和促进作用共存,同时这与多种元素的共同作用和外部环境的差异有关.因此,需要综合考虑多个波长处的吸收深度的共同作用.

3 元素富集信息提取

单个波长的红边和吸收深度对成矿元素的响应

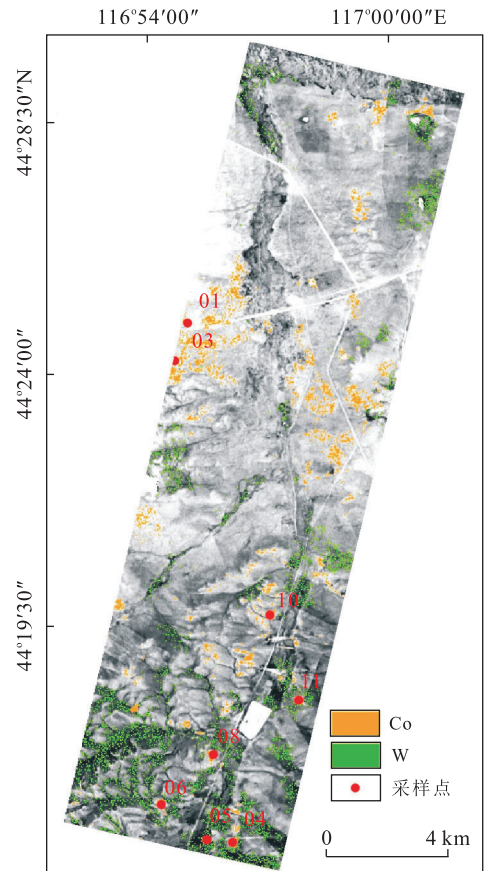


图 4 研究区富集元素分布

Fig.4 The distribution of metal elements enrichment in study area

程度较差,植物叶片内重金属含量变化,往往受多个波段处吸收特征协同影响.因此,引入多元回归方法综合多个波段特征来建立成矿元素与光谱特征的响应模型,模型表达式如下:

$$M = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \times D_c(\lambda_i), \quad (4)$$

式(4)中, M 代表重金属的含量, a_0 和 a_i 代表拟合系数, $D_c(\lambda_i)$ 为参与运算的波段 i 处的吸收深度.

表 2 中 R^2 为复相关系数,反映了方程中的植物光谱 583 nm、616 nm、649 nm、682 nm 和 715 nm 波长处的吸收深度变化对 Co 元素含量变化的线性影响程度;植物光谱 590 nm、630 nm、670 nm 和

表 2 金属元素 Co 和 W 含量与光谱吸收深度拟合方程

Table 2 Regression equation between the absorption depths and the contents of Co and W

拟合方程	R^2	R
$M_{Co} = -2543.752 + 1200.211x_1 - 14161.749x_2 + 12005.275x_3 + 3038.511x_4 - 89.022x_5$	0.996 0	0.997 9
$M_W = -972.878 + 1908.580x_1 - 11395.301x_2 + 8814.099x_3 + 1886.741x_4$	0.949 9	0.974 6

注: $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ 和 x_7 分别表示 $(750-550)/(n-1)$ 处的波段吸收深度值.

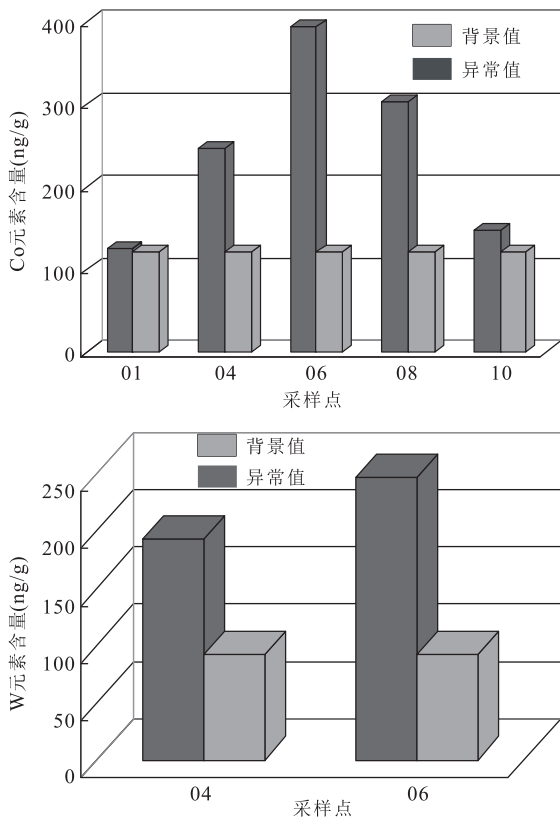


图 5 富集点的 Co 和 W 元素含量与背景值对比

Fig.5 Elements contents of Co and W in enrichment point and background value compared

710nm 波长处的吸收深度变化对 W 元素含量变化的线性影响程度,其值范围均在 0~1 之间。 R^2 越大表明建立的方程回归效果越好。 R 为决定系数,反映回归方程拟合的优劣程度,决定系数越大,回归效果越好。Co 和 W 元素的复相关系数均在 0.75 以上,线性关系显著。为了将得到的拟合方程应用于研究区的 Hyperion 数据,先对影像中 550~750 nm 波长范围内的所有波段求解吸收深度,然后应用建立的拟合方程对影像进行运算,求出元素富集的相对高值,得到元素富集的分布图(图 4)。

将提取出的 Co 和 W 两种元素富集点的含量与背景值做对比(图 5),Co 元素在 5 个采样点处提取出异常,且在 04、06 和 08 采样点处异常值较明显;W 元素在 2 个采样点处存在异常,异常值与背景值差异较明显。Co 和 W 元素在采样点 04 和 06 处均有富集,与红边位置在 04 采样点处的低值相符。

4 结论

为探讨在植被覆盖区利用植物胁迫光谱进行成

矿元素信息提取的可能性,笔者以内蒙古西乌旗草原覆盖区为例,野外采集植物样品并测试元素含量,分析植物光谱红边和吸收深度对成矿元素的敏感性,并建立 Co 和 W 元素的响应模型,圈定了研究区的成矿元素异常信息。

根据部分统计研究资料,兴蒙造山带地区的 1:20 万地球化学异常显示亲铜、亲硫元素地球化学异常明显,异常元素组合和异常展布特征在区域上与地质构造格架和区域成矿活动有明显的关系,研究区位于东乌珠岛弧火山岩发育区,具有 Cu、Mo、Au、Pb、Zn、Ag、As、Sb、Bi、Co、Ni、W、Sn 等异常元素组合。且在研究区内已探明存在毛登铜—锡矿床和白音查干银多金属矿床。通过分析得出以下结论。

(1) 相对于实验室内人工定性定量培养,野外受胁迫的植物生长影响因素更为复杂,使得植物光谱的响应特征并无明显的规律。但从植物光谱红边和吸收深度的变化趋势来看,适量元素可促进植物生长,多种元素之间也会产生协同作用。

(2) 利用单波长的光谱特征参数表征成矿元素胁迫程度较为片面,应综合分析多波长处的特征参数来量化成矿元素异常信息。另外,色素变化并不为受胁迫植物的唯一特征,成矿元素还可引起植物水分含量变化,因此,在后续研究中还应考虑受水分影响的短波红外光谱。

(3) 总体来说,利用植物胁迫光谱可圈定植被覆盖区成矿元素的异常信息,为植被覆盖区的地质矿产调查提供了新的方法和评价指标。

References

- Chen, S.B., Liu, Y.L., Yang, Q., et al., 2012a. Lithologic 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).
- Chen, S.B., Zhou, C., Wang, J.N., 2012b. Vegetation Stress Spectra and Their Relation with the Contents of Metal Elements within the Plant Leaves in Metal Mines in Heilongjiang. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 32(5): 1310—1315 (in Chinese with English abstract).
- Darvishzadeh, R., Skidmore, A., Schlerf, M., et al., 2008. LAI and Chlorophyll Estimation for a Heterogeneous Grassland Using Hyperspectral Measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(4): 409—426. doi:10.1016/j.isprsjprs.2008.01.001
- Gan, F.P., Liu, S.W., Zhou, Q., 2004. Identification of Mining

- Pollution Using Hyperion Data at Dexing Copper Mine Jiangxi Province, China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(1): 119—126 (in Chinese with English abstract).
- Gitelson, A. A., Merzlyak, M. N., Lichtenthaler, H. K., 1996. Detection of Red Edge Position and Chlorophyll Content by Reflectance Measurements Near 700 nm. *Journal of Plant Physiology*, 148(3—4): 501—508. doi: 10.1016/s0176—1617(96)80285—9
- Gong, S. Q., Wang, X., Shen, R. P., et al., 2010. Study on Heavy Metal Element Content in the Coastal Saline Soil by Hyperspectral Remote Sensing. *Remote Sensing Technology and Application*, 25(2): 169—177 (in Chinese with English abstract).
- Houborg, R., Anderson, M., Daughtry, C., 2009. Utility of an Image-Based Canopy Reflectance Modeling Tool for Remote Estimation of LAI and Leaf Chlorophyll Content at the Field Scale. *Remote Sensing of Environment*, 113(1): 259—274. doi: 10.1016/j.rse.2008.09.014
- Huang, Z., Turner, B. J., Dury, S. J., et al., 2004. Estimating Foliage Nitrogen Concentration from HYMAP Data Using Continuum Removal Analysis. *Remote Sensing of Environment*, 93(1—2): 18—29. doi: 10.1016/j.rse.2004.06.008
- Kruse, F. A., Boardman, J. W., Huntington, J. F., 2003. Comparison of Airborne Hyperspectral Data and EO-1 Hyperion for Mineral Mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6): 1388—1400. doi: 10.1109/tgrs.2003.812908
- Lin, F. F., Chen, Z. L., Wang, K., et al., 2009. Determination of Nitrogen in Rice Leaf Based on Ftir Spectra and siPLS-GA-PLS Algorithm. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 28(4): 277—280 (in Chinese with English abstract).
- Rosso, P. H., Pushnik, J. C., Lay, M., et al., 2005. Reflectance Properties and Physiological Responses of *Salicornia Virginica* to Heavy Metal and Petroleum Contamination. *Environmental Pollution*, 137(2): 241—252. doi: 10.1016/j.envpol.2005.02.025
- Sánchez-Azofeifa, G. A., Castro, K., Wright, S. J., et al., 2009. Differences in Leaf Traits, Leaf Internal Structure, and Spectral Reflectance between Two Communities of Lianas and Trees: Implications for Remote Sensing in Tropical Environments. *Remote Sensing of Environment*, 113(10): 2076—2088. doi: 10.1016/j.rse.2009.05.013
- Xu, M. X., Wu, S. H., Zhou, S. L., et al., 2011. Hyperspectral Reflectance Models for Retrieving Heavy Metal Content: Application in the Archaeological Soil. *J. Infrared Milli. Waves*, 30(2): 109—114 (in Chinese with English abstract).
- Zarco-Tejada, P. J., Miller, J. R., Morales, A., et al., 2004. Hyperspectral Indices and Model Simulation for Chlorophyll Estimation in Open-Canopy Tree Crops. *Remote Sensing of Environment*, 90(4): 463—476. doi: 10.1016/j.rse.2004.01.017
- Zhu, X. Y., Zhou, H., Yu, X. B., 2009. The Calculation Methods of Permeability Variation Coefficient-Taking Ningdong Oilfield in Mahuangshan West Block as An Example. *Offshore Oil*, 29(2): 23—27 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. Q., Qu Y. H., Liu S. H., et al., 2014. A Reflectance Spectra Model for Copper-Stressed Leaves: Advances in the PROSPECT Model through Addition of the Specific Absorption Coefficients of the Copper Ion. *International Journal of Remote Sensing*, 35(4): 1356—1373. doi: 10.1080/01431161.2013.876123

附中文参考文献

- 陈圣波, 刘彦丽, 杨倩, 等, 2012a. 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.
- 陈圣波, 周超, 王晋年, 2012b. 黑龙江多金属矿区植物胁迫光谱及其与金属元素含量关系研究. 光谱学与光谱分析, 32(5): 1310—1315.
- 甘甫平, 刘圣伟, 周强, 2004. 德兴铜矿矿山污染高光谱遥感直接识别研究. 地球科学——中国地质大学学报, 29(1): 119—126.
- 龚绍琦, 王鑫, 沈润平, 等, 2010. 滨海盐土重金属含量高光谱遥感研究. 遥感技术与应用, 25(2): 169—177.
- 林芬芳, 陈祝炉, 王珂, 等, 2009. 基于傅里叶变换红外光谱和 siPLS-GA-PLS 的水稻叶片氮素含量预测研究. 红外与毫米波学报, 28(4): 277—280.
- 徐明星, 吴绍华, 周生路, 等, 2011. 重金属含量的高光谱建模反演: 考古土壤中的应用. 红外与毫米波学报, 30(2): 109—114.
- 朱小影, 周红, 余训兵, 2009. 渗透率变异系数的几种计算方法——以麻黄山西区块宁东油田 2, 3 井区为例. 海洋石油, 29(2): 23—27.