

光学学报

高光谱遥感器通道中心波长漂移对红边光谱的影响

张雅琼¹, 张文娟², 陈正超², 李海巍^{3*}

¹生态环境部卫星环境应用中心国家环境保护卫星遥感重点实验室, 北京 100094;

²中国科学院空天信息创新研究院航空遥感中心, 北京 100094;

³中国科学院西安光学精密机械研究所光谱成像技术重点实验室, 陕西 西安 710119

摘要 通过模拟高光谱遥感器通道中心波长漂移前后的典型植被红边区间反射率, 定量分析通道中心波长漂移对红边光谱的影响。结果表明, 通道中心波长漂移导致植被红边区间反射率曲线出现多处尖峰、抖动, 使植被反射率曲线在不具有特征吸收的区域变得不光滑, 并与红边位置误差呈显著线性关系, 决定系数 R^2 达到 0.99。10 nm 分辨率的高光谱遥感器, 存在 1, 3, 5 nm 的通道中心波长漂移量时, 给植被红边区间反射率造成的最大误差分别为 1.46%、4.49% 和 9.57%, 所获取的植被红边将分别“蓝移”0.75, 2.60, 5.52 nm。通道中心波长漂移会导致红边伪漂移, 或对植被受胁迫引发的红边漂移造成“掩盖”或“强化”效应, 进而影响基于高光谱遥感数据的植被受胁迫状态等指标的监测精度。高光谱遥感器通道中心波长漂移是红边漂移不可忽视的来源, 精确的光谱定标是植被红边光谱相关定量化应用的重要基础。

关键词 遥感; 红边光谱; 高光谱遥感器; 中心波长漂移; 辐射传输模型

中图分类号 TP722

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1428003

Influence of Channel Center Wavelength Shift of the Hyperspectral Remote Sensor on Red Edge Spectra

Zhang Yaqiong¹, Zhang Wenjuan², Chen Zhengchao², Li Haiwei^{3*}

¹Key Laboratory of Satellite Remote Sensing for National Environmental Protection, Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China;

²Airborne Remote Sensing Center, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

³Key Laboratory of Spectral Imaging Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract We simulated the reflectance of typical vegetation in the red-edge region before and after the channel center wavelength shift of hyperspectral remote sensors to quantitatively examine the effect of the channel center wavelength shift on the red edge spectra. The results show that the channel center wavelength shift leads to many “spike” and “shake” phenomena in the reflectance curves of the red-edge region, and the reflectance curves in the region without characteristic absorption become unsmooth. Moreover, there is a significant linear relationship between the channel center wavelength shift and the red edge position (REP) error (coefficient of determination $R^2=0.99$). For a 10 nm hyperspectral remote sensor, when the channel center wavelength shifts are 1 nm, 3 nm, and 5 nm, the maximum errors in red-edge reflectance are 1.46%, 4.49%, and 9.57%, respectively, and the red edge spectra have the obvious “blue shift” phenomenon, with the REP shifting by 0.75 nm, 2.60 nm, and

收稿日期: 2020-12-09; 修回日期: 2021-01-28; 录用日期: 2021-02-22

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0503905)、国家自然科学基金(91638201, 41771397)、西部之光青年学者基金(XAB2017B19)

通信作者: *lihaiwei@opt.ac.cn

5.52 nm, respectively. The channel center wavelength shift will lead to the pseudo-shift of the red edge or cause the “covering” or “strengthening” effect on the red edge shift induced by vegetation stress, which will directly affect the monitoring accuracy of vegetation stress based on hyperspectral remote sensing data. Channel center wavelength shift is an important source of the red edge shift. Accurate spectral calibration is the important basis of quantitative application related to the red edge spectra of vegetation.

Key words remote sensing; red edge spectra; hyperspectral remote sensor; center wavelength shift; radiative transfer model

OCIS codes 280.4788; 120.0280; 300.6320

1 引言

在植被反射光谱中,叶绿素在红光波段存在强吸收,光在叶片细胞内的多次散射导致近红外波段存在强反射。植被红边正是由强吸收和强反射共同形成,是植被光谱最显著的特征之一。红边参数常被用于估测植被叶绿素含量等生理生化指标、监测植被长势及胁迫状态等^[1-5]。红边位置(REP)对应红边区间(670~780 nm)光谱曲线最大斜率处的波长值,随着植被叶绿素含量的增加,REP 将发生“红移”现象,反之,发生“蓝移”现象^[6-7]。红边位置漂移是表征植被胁迫状态及衰老程度的诊断性指标。目前针对气候及重金属等外界因素造成的植被红边漂移的监测,已开展较多研究:武永峰等^[8]基于霜冻影响下的冬小麦进行红边位置提取,为其霜冻害早期诊断提供了依据;Zheng 等^[9]基于红边位置提取监测马铃薯长势;李苑溪等^[10]指出玉米在铜胁迫下的红边位置与铜浓度显著相关;刘圣伟等^[11]发现德兴矿区废水池旁的芦苇,与距离废水池较远的芦苇相比,出现红边蓝移现象;冯锐等^[12]指出苗期干旱胁迫的玉米红边位置存在“蓝移”-“红移”-“蓝移”的现象;Horler 等^[6]通过对长期受空气污染的叶簇光谱的研究发现,污染区内叶片与正常叶片相比,其红边位置向短波方向漂移 5 nm;Vogelmann 等^[13]研究表明实验矿区受毒害的植被与周边背景植被相比,其红边蓝移量约为 5 nm。

高光谱遥感器能从上百个通道获取一系列连续的光谱数据,为植被光谱特征的精细刻画以及植物理化参量的精确反演提供了强有力的工具,在植被定量遥感中具有显著的技术优势。高光谱遥感器在轨后,受环境变化、光学器件老化、机械振动等的影响,光路结构改变,导致仪器光谱响应发生变化,光谱通道中心波长发生漂移^[14-15],同时,星上定标装置在空间环境中随时间发生衰减^[16]。因此,需要定期进行在轨替代光谱定标,确定通道中心波长等参数,保证地物光谱特征刻画的精确度。目前,在轨替代

光谱定标主要是基于图像光谱与参考光谱在太阳 Fraunhofer、典型大气吸收带的光谱匹配以及图像反射率曲线在特征吸收带的光谱平滑^[14,17-22],光谱定标误差将影响后续辐射定标及大气校正精度^[17-18],特别是对地物或大气吸收带、光谱急剧变化的光谱区域有较大影响。植被红边光谱对应植被反射率急剧增大的区间,同时红边区间(670~780 nm)涵盖多个氧气 O₂ 吸收带,包括氧气 A 强吸收带(762 nm)、氧气 B 弱吸收带(690 nm),因此红边区间反射率将不可避免地受到中心波长漂移的影响,进而影响红边位置提取及其定量化的产品精度。

本文通过模拟加入不同中心波长光谱漂移量的植被红边区间反射率,研究了通道中心波长漂移对植被红边区间反射率的影响,构建了中心波长漂移量和红边位置误差间的关系模型,以定量反映二者间的误差传递特征,为红边相关应用提供借鉴。

2 方法

2.1 辐亮度数据模拟

利用大气辐射传输模型 Modtran,模拟高光谱遥感器各通道存在中心波长漂移时对应的典型植被红边区间大气层顶(TOA)辐亮度。参考目前典型高光谱遥感器在轨运行后的光谱漂移情况,对于氧气吸收通道,Hyperion 数据在全视场的光谱漂移量为 0.38~1.39 nm^[14],PHILLS 数据的光谱漂移量为 2.37 nm^[17],RODIS 数据在全视场的光谱漂移量为 0.02~0.7 nm^[18],IFTS 数据在全视场的光谱漂移量为 -3.18~-3.4 nm^[19];资源一号 02D 卫星高光谱相机可见光近红外(VNIR)谱段光谱漂移均值为 0.6 nm,短波红外(SWIR)谱段光谱漂移均值为 0.75 nm^[23]。考虑到高光谱遥感器长时间在轨运行后的光谱性能衰减,本研究将中心波长模拟漂移范围设为 -5~5 nm。Modtran 输入参数中,大气参数、观测几何参数选用典型值或当前模式下的缺省值(见表 1),输出采样间隔为 0.05 nm。

高光谱遥感器的通道中心波长漂移会导致通道

表 1 Modtran 主要输入参数
Table 1 Main input parameters of Modtran

Parameter	Value
Atmosphere model	Mid-latitude summer pattern
CO ₂ volumetric mixing ratio /10 ⁻⁶	390
Aerosol model	RURAL
Surface altitude /km	0.1
Sensor altitude /km	1000
View zenith /(°)	180
Relative solar azimuth /(°)	90
Solar zenith /(°)	45

光谱响应函数(SRF)发生变化,进而影响辐亮度经过光谱等效后的等效 TOA 辐亮度。

对于高光谱遥感的每一个光谱通道 i , 首先基于其原始中心波长 $\lambda_c(i)$ 和半峰全宽(FWHM) $h_b(i)$, 将 $\lambda_c(i)$ 以 0.2 nm 的步长漂移, 漂移量为 $\Delta\lambda$, 漂移范围为 $-5 \sim 5$ nm, $h_b(i)$ 不变, 利用 Gaussian 函数^[14,16], 模拟得到不同 $\Delta\lambda$ 对应的该通道 i 的光谱响应函数 $f(i, \Delta\lambda)$, 表达式为

$$f(i, \Delta\lambda) = \exp\left\{-\left\{\frac{\lambda - [\lambda_c(i) + \Delta\lambda]}{h_b(i)/2\sqrt{\ln 2}}\right\}^2\right\}, \quad (1)$$

进而与植被 TOA 辐亮度 $L(\lambda)$ 进行卷积, 得到不同 $\Delta\lambda$ 对应的通道 i 的等效植被辐亮度 $L_{eq}(i, \Delta\lambda)$, 表达式为

$$L_{eq}(i, \Delta\lambda) = \frac{\int_{\lambda_{i_start}}^{\lambda_{i_end}} f(i, \Delta\lambda) \cdot L(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{i_start}}^{\lambda_{i_end}} f(i, \Delta\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

式中 λ_{i_start} 和 λ_{i_end} 分别代表通道 i 的起始波长和终止波长。

2.2 反射率及红边位置计算

假设地表为均一、朗伯面时, 地表反射率可以表示为^[18]

$$\rho(\lambda) = \frac{\pi[L(\lambda) - L_0(\lambda)]}{\tau_v(\lambda)E_g(\lambda)}, \quad (3)$$

式中, ρ 是地表反射率, L 是传感器入瞳处 TOA 的辐亮度, L_0 是程辐射, E_g 是到达地表的总太阳辐照度(包括直射和漫射), $\tau_v(\lambda)$ 是从地表到传感器的总大气透过率。

为规避通道中心波长漂移之外的误差, 利用 Modtran 进行大气校正参数(程辐射 L_0 、总太阳辐照度 E_g 和透过率 τ_v)的模拟。采用与植被 TOA 辐亮度模拟中一致的观测几何与大气输入参数, 将其与基于原始中心波长参数模拟得到的光谱响应函数进行卷积, 得到等效的大气校正参数。进一步结合

2.1 节中模拟得到的等效植被 TOA 辐亮度, 计算得到相应植被反射率, 进而利用倒高斯(IG)模型^[24] 提取植被红边位置参数, IG 模型可表示为

$$R(\lambda) = R_s - (R_s - R_0) \exp\left[-\frac{(\lambda_0 - \lambda)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (4)$$

$$\lambda_p = \lambda_0 + \sigma, \quad (5)$$

式中, R_s 、 R_0 、 λ_0 、 λ_p 、 σ 分别为红边区间反射率最大值、红边区间反射率最小值、红边区间反射率最小值对应的波长位置、红边位置和高斯模型标准差系数。

3 实验与结果

3.1 数据源

模拟实验所用的数据源主要包含典型植被地表反射率数据和典型高光谱遥感器 Hyperion 的光谱定标参数。在植被 TOA 辐亮度模拟过程中, 选用 ENVI 自带光谱库中 7 种不同类型的植被反射率光谱, 包括 veg_2grn. sli 光谱库中的粘草(Tarweed)、阿罗约柳(Arroyo Willow)、海岸红酸枝(Coast Redwood)、普通灌木(Common buck bush)、鸽子草(dove weed), 以及 usgs_veg. sli 光谱库中的山杨(Aspen_Leaf-A DW92-2 [W1R1Ba AREF])和冷杉(Fir_Tree IH91-2 [W1R1Ba AREF])。veg_2grn. sli 光谱库由斯坦福大学 Christopher D. Elvidge 利用 Beckman UV-5240 光谱仪测量植被半球反射率获得, 波长范围 0.4~2.5 μm , 其中 0.4~0.8 μm 波段的波长精度为 1 nm, 0.8~2.5 μm 波段的波长精度为 4 nm。usgs_veg. sli 光谱库由 USGS(united states geological survey)丹佛光谱学实验室利用 Beckman 光谱仪测量所得, 波长范围为 0.4~2.5 μm , 其中可见光波段的波长精度为 0.2 nm, 近红外波段的波长精度为 0.5 nm。本研究采用的植被反射率光谱曲线见图 1。在光谱等效过程中, 选用的 EO-1 Hyperion 高光谱遥感的中心波长、半峰全宽见表 2, 其光谱分辨率约为 10 nm。

3.2 通道中心波长漂移对红边区间反射率的影响

针对所选的每一种植被, 首先依据前文 2.1 和 2.2 节中提出的方法, 利用 Moatran 模拟得到植被红边区间的 TOA 辐亮度(分辨率为 0.05 nm)(图 2), 基于高斯函数模拟得到不同中心波长漂移量对应的红边区间通道光谱响应函数(图 3 中光谱响应函数以未发生中心波长漂移为例), 基于光谱卷积得到不同中心波长漂移量对应的植被红边等效辐亮度(图 4), 进一步计算通道中心波长漂移前后的植被红边反射率(图 5), 进而对红边区间的反射率误差进行统计分析。

表 2 Hyperion 遥感器的红边区间通道光谱参数

Table 2 Spectral parameters of the channels in the red-edge region of Hyperion sensor

Channel number	Center wavelength /nm	FWHM /nm	Channel number	Center wavelength /nm	FWHM /nm
25	671.02	11.3871	32	742.25	10.6933
26	681.2	10.3349	33	752.43	10.7058
27	691.37	10.3909	34	762.6	10.7276
28	701.55	10.4591	35	772.78	10.7907
29	711.72	10.5322	36	782.95	10.8833
30	721.9	10.6004	37	793.13	10.9938
31	732.07	10.6562			

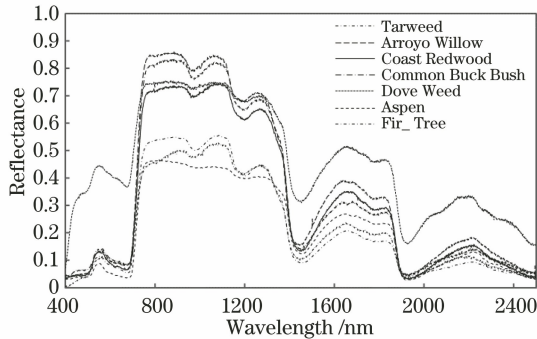


图 1 ENVI 光谱库植被反射率光谱曲线

Fig. 1 Vegetation reflectance from ENVI spectral library

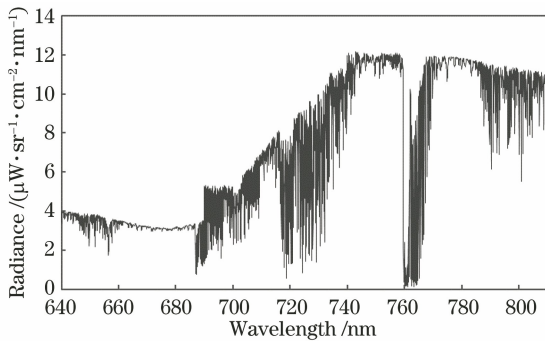


图 2 Modtran 模拟的植被红边区间 TOA 辐亮度 (以粘草为例)

Fig. 2 TOA radiance spectra of red-edge region simulated by Modtran (e.g., Tarweed)

从图 5 可见, 高光谱遥感器通道中心波长漂移给植被红边反射率形状带来显著影响, 尤其是在 O_2 吸收带(近 760 nm 处)附近, 曲线出现多处尖峰、抖动, 通道中心波长漂移量越大, 此现象越明显。这说明通道中心波长漂移使得植被反射率曲线在本不具有特征吸收的区域变得不光滑, 通道中心波长漂移量越大, 大气校正效果越差。

通道中心波长漂移方向与红边光谱漂移方向相反, 即随着短波方向中心波长漂移量的增加, 红边光谱向长波方向漂移。随着长波方向中心波长漂移量的增加, 红边位置向短波方向漂移。

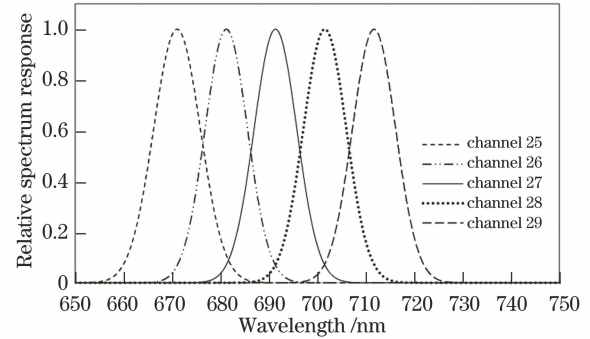


图 3 基于高斯函数模拟的 Hyperion 遥感器红边区间部分通道光谱响应函数(以未发生中心波长漂移为例)

Fig. 3 Spectral response functions of some channels in the red-edge region of Hyperion based on Gaussian function simulation (e.g., without center wavelength shift)

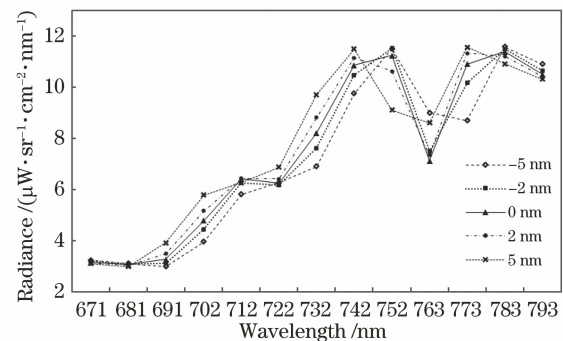


图 4 不同中心波长漂移量对应的植被红边区间辐亮度(以粘草为例)

Fig. 4 Radiance spectra of red-edge region corresponding to different center wavelength shift values (e.g., Tarweed)

对于 Hyperion 这一 10 nm 分辨率的高光谱遥感器, 1, 2, 3, 4, 5 nm 的通道中心波长漂移量给植被红边区间反射率造成的最大误差分别为 1.46%、2.98%、4.49%、6.45% 和 9.57%; -1, -2, -3, -4, -5 nm 的通道中心波长漂移量给植被红边区间反射率造成的最大误差分别为 0.85%、2.54%、5.38%、8.67%、12.12%。

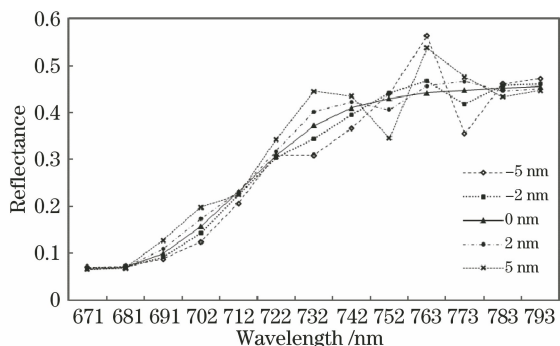


图 5 不同中心波长漂移量对应的植被红边区间反射率(以粘草为例)

Fig. 5 Reflectance spectra of red-edge region with different center wavelength shift values (e.g., tarweed)

3.3 通道中心波长漂移对 REP 的影响

基于模拟植被反射率计算植被 REP 及其误差, 计算结果经统计发现, 对于 7 种不同类型的植被, 高光谱传感器通道中心波长漂移导致的 REP 误差基本一致, 求取 7 种植被 REP 误差均值见表 3, 结果表明, 高光谱传感器通道中心波长漂移量与 REP 误差间呈显著线性关系(图 6), 决定系数 R^2 达到 0.9938。对于光谱分辨率为 10 nm 的 Hyperion 高光谱传感器, 通道中心波长漂移量为 1, 2, 3, 4, 5 nm 时, 分别导致 -0.75, -1.59, -2.60, -3.82, -5.52 nm 的植被红边漂移量; 通道中心波长漂移量为 -1, -2, -3, -4, -5 nm 时, 分别导致 0.87, 1.82, 2.87, 4.03, 5.26 nm 的植被红边漂移量。以上结果表明, 通道中心波长漂移是红边漂移不可忽视的来源, 可导致红边“伪漂移”, 或对植被受胁迫引发的红边漂移造成“掩盖”或“强化”效应。

表 3 中心波长漂移导致的不同植被红边误差均值

Table 3 Averaged REP errors of different vegetation types caused by center wavelength shift

Channel center wavelength shift value /nm	Averaged REP error /nm	Channel center wavelength shift value /nm	Averaged REP error /nm
0.50	-0.35	-0.50	0.39
1.00	-0.75	-1.00	0.87
1.50	-1.16	-1.50	1.30
2.00	-1.59	-2.00	1.82
2.50	-2.08	-2.50	2.28
3.00	-2.60	-3.00	2.87
3.50	-3.22	-3.50	3.42
4.00	-3.82	-4.00	4.03
4.50	-4.65	-4.50	4.65
5.00	-5.52	-5.00	5.26

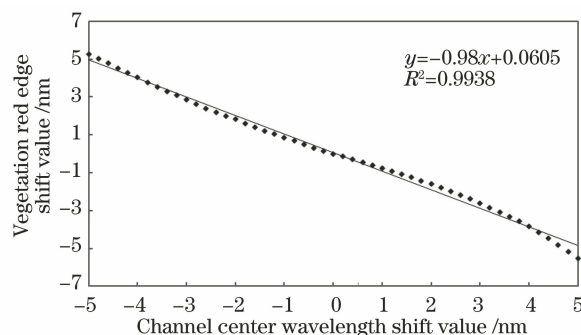


图 6 通道中心波长漂移量与植被红边漂移量之间的关系
Fig. 6 Relationship between channel center wavelength shift and vegetation red edge shift

4 结 论

基于大气辐射传输过程模拟, 构建加入不同中心波长漂移量的典型植被红边区间反射率模拟数据集, 发现高光谱传感器通道中心波长漂移导致植被红边区间反射率形状显著改变, 致使曲线出现多处尖峰、抖动, 使植被反射率曲线在本不具有特征吸收的区域变得不光滑, 这将对基于植被红边区间反射率数据的定量化应用带来影响。

高光谱传感器通道中心波长漂移方向与红边光谱漂移方向相反, 中心波长漂移是红边漂移不可忽视的来源, 二者间有显著的线性关系。对于 10 nm 分辨率的高光谱传感器, 存在 1, 3, 5 nm 的通道中心波长漂移量时, 所获取的植被红边将分别“蓝移” 0.75, 2.60, 5.52 nm, 中心波长漂移导致的红边“伪漂移”将直接影响植被受胁迫状态等的监测精度。

高光谱传感器的光谱定标精度将直接影响植被红边相关应用的精度, 只有精确的通道中心波长系数才能保证植被光谱特征刻画的精确度, 继而保障后续植被定量化应用成果的可靠性。

参 考 文 献

[1] Pu R L, Gong P, Biging G S, et al. Extraction of red edge optical parameters from Hyperion data for estimation of forest leaf area index [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(4): 916-920.

[2] Smith K L, Steven M D, Colls J J. Use of hyperspectral derivative ratios in the red-edge region to identify plant stress responses to gas leaks [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 92(2): 207-217.

[3] Zhang Y H, Guo X C, Chu W D, et al. Estimation model of schima superba leaf chlorophyll content

- based on red edge position [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 798-804.
- 张永贺, 郭啸川, 褚武道, 等. 基于红边位置的木荷叶片叶绿素含量估测模型研究 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(3): 798-804.
- [4] Li F, Miao Y X, Feng G H, et al. Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices [J]. *Field Crops Research*, 2014, 157(2): 111-123.
- [5] Qin Z F, Chang Q R, Shen J, et al. Red edge characteristics and SPAD estimation model using hyperspectral data for rice in Ningxia irrigation zone [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(9): 1168-1175.
- 秦占飞, 常庆瑞, 申健, 等. 引黄灌区水稻红边特征及 SPAD 高光谱预测模型 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2016, 41(9): 1168-1175.
- [6] Horler D N H, Dockray M, Barber J. The red edge of plant leaf reflectance [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1983, 4(2): 273-288.
- [7] Curran P J, Windham W R, Gholz H L. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll concentration in slash pine leaves [J]. *Tree Physiology*, 1995, 15(3): 203-206.
- [8] Wu Y F, Hu X, Lü G H, et al. Comparison of red edge parameters of winter wheat canopy under late frost stress [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(8): 2190-2195.
- 武永峰, 胡新, 吕国华, 等. 晚霜冻影响下冬小麦冠层红边参数比较 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(8): 2190-2195.
- [9] Zheng T, Liu N, Wu L, et al. Estimation of chlorophyll content in potato leaves based on spectral red edge position [J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, 51(17): 602-606.
- [10] Li Y X, Chen X Y, Luo D, et al. Effects of cuprum stress on position of red edge of maize leaf reflection hyperspectra and relations to chlorophyll content [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(2): 546-551.
- 李苑溪, 陈锡云, 罗达, 等. 铜胁迫下玉米叶片反射光谱的红边位置变化及其与叶绿素的关系 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(2): 546-551.
- [11] Liu S W, Gan F P, Wang R S. The application of Hyperion data to extracting contamination information of vegetation in the Dexing copper mine, Jiangxi Province, China [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2004, 16(1): 6-10, 31-79.
- 刘圣伟, 甘甫平, 王润生. 用卫星高光谱数据提取德兴铜矿区植被污染信息 [J]. *国土资源遥感*, 2004, 16(1): 6-10, 31-79.
- [12] Feng R, Wu J W, Wang H B, et al. Influence of drought stress on maize in the seedling stage on spectral characteristics at the critical developmental stage [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(7): 2222-2228.
- 冯锐, 武晋雯, 王宏博, 等. 玉米苗期干旱胁迫对关键生育期的光谱特征影响分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(7): 2222-2228.
- [13] Vogelmann J E, Rock B N, Moss D M. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(8): 1563-1575.
- [14] Green R O, Pavri B E, Chrien T G. On-orbit radiometric and spectral calibration characteristics of EO-1 Hyperion derived with an underflight of AVIRIS and *in situ* measurements at Salar de Arizaro, Argentina [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(6): 1194-1203.
- [15] Zhang Y C, Liu W. Compensating focusing for space hyper spectral imager's fore optical system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(2): 021102.
- [16] Huang W X, Zhang L M, Si X L, et al. On-orbit performance evaluation of on-board calibration component of GF-5 visible and infrared multispectral imager [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(20): 2029001.
- 黄文薪, 张黎明, 司孝龙, 等. GF-5 全谱段光谱成像仪星上定标组件在轨性能评价 [J]. *光学学报*, 2020, 40(20): 2029001.
- [17] Gao B C, Montes M J, Davis C O. Refinement of wavelength calibrations of hyperspectral imaging data using a spectrum-matching technique [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(4): 424-433.
- [18] Guanter L, Richter R, Moreno J. Spectral calibration of hyperspectral imagery using atmospheric absorption features [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(10): 2360-2370.
- [19] Zhang Y Q, Chen Z C, Zhang H, et al. Spectral calibration and reflectance reconstruction for the hyperspectral data derived from HJ-1A [C] // 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 13-18, 2014, Quebec City, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2014: 2003-2006.
- [20] Wang T X, Yan G J, Ren H Z, et al. Retrieval of spectral characteristics of hyperspectral sensor and retrieval of reflectance spectra [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(10): 2714-2718.
- 王天星, 阎广建, 任华忠, 等. 高光谱传感器光谱性能参数反演与反射率恢复 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(10): 2714-2718.

- [21] Zhang M, Wei W, Zhang Y N, et al. On-orbit automated calibration of Hyperion hyperspectral remote sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0528002.
张孟, 韦玮, 张艳娜, 等. Hyperion 高光谱遥感器的在轨自动化定标 [J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0528002.
- [22] Feng X, Han C P, Zou Y P, et al. On-orbit spectral calibration algorithm of infrared Fourier transform spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0630002.
冯绚, 韩昌佩, 邹曜璞, 等. 红外傅里叶光谱仪在轨光谱定标算法研究 [J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0630002.
- [23] Liu Y N, Sun D X, Liang J, et al. Overview of ZY-1-02D satellite AHSI on-orbit performance and stability[J]. *Spacecraft Engineering*, 2020, 29(6): 93-97.
刘银年, 孙德新, 梁建, 等. 资源一号 02D 卫星高光谱相机在轨性能及稳定性评估 [J]. *航天器工程*, 2020, 29(6): 93-97.
- [24] Miller J R, Hare E W, Wu J. Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance 1. an inverted-Gaussian reflectance model [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(10): 1755-1773.