

星载大气痕量气体差分吸收光谱仪光谱 图像校正方法研究

赵敏杰 司福祺* 陆亦怀 王煜 汪世美 江宇 周海金 刘文清

中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪是一种宽视场、高分辨率的成像光谱仪。光谱弯曲和条纹的存在干扰光谱仪的成像质量,影响光谱数据的反演精度,需要在轨对光谱图像进行校正。为此,在地面对仪器的全视场光谱图像校正算法进行研究。通过图像合并方法获得仪器全视场光谱图像,并对光谱图像的光谱弯曲和条纹进行详细的分析,结合仪器的特点提出相应的光谱弯曲校正算法和均匀性校正算法。光谱图像校正结果表明,光谱图像的光谱弯曲、横条纹和斜条纹得到了较好的校正,验证了光谱校正算法的可行性,为仪器在轨光谱图像校正提供了依据。

关键词 光谱学; 光谱图像; 成像光谱仪; 光谱弯曲; 图像条纹

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1230002

Spectral Image Correction Method for Space-Born Differential Optical Absorption Spectrometer

Zhao Minjie Si Fuqi Lu Yihuai Wang Yu Wang Shimei

Jiang Yu Zhou Haijin Liu Wenqing

Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Space-born differential optical absorption spectrometer is an imaging spectrometer with wide field of view and high resolution. Spectral curve and stripe noise interferes the image quality, influences the inversion accuracy, and thus needs to be corrected on orbit. A study on full field-of-view spectral image correction method is completed on ground. The full field-of-view spectral image is obtained by using image combination, and then the spectral image is analyzed in detail. Based on the spectrometer characteristics, a spectral curve and stripe noise correction method is proposed. The correction results show that the spectral curve, cross stripe and inclined stripe are well corrected, demonstrating the feasibility of the proposed correction method and providing the basis for on-orbit spectral image correction.

Key words spectroscopy; spectral image; imaging spectrometer; spectral curve; image stripe

OCIS codes 300.6320; 280.4788; 040.1520

1 引言

星载大气痕量气体差分吸收光谱仪是一种推扫式成像光谱仪,穿轨方向视场为 114° (对应地面2600 km),光谱范围为240~710 nm,光谱分辨率优于0.5 nm。成像光谱仪的探测器采用面阵CCD,面阵CCD的其中一维

收稿日期: 2015-05-28; 收到修改稿日期: 2015-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(41275037)、安徽省杰出青年科学基金(1308085JGD03)

作者简介: 赵敏杰(1987—),男,博士研究生,主要从事成像光谱仪定标与光谱图像处理方面的研究。

E-mail: mjzhao@aiofm.ac.cn

导师简介: 陆亦怀(1954—),男,研究员,博士生导师,主要从事环境污染光学监测新技术、目标特性及遥感监测技术等方面的研究。E-mail: lyh@aiofm.ac.cn

*通信联系人。E-mail: sifuqi@aiofm.ac.cn

记录地球大气辐射的光谱分布信息,另一维记录空间分布信息。仪器在轨运行对天底方向的探测目标进行光谱成像时,由于穿轨方向较宽的视场,使得光谱图像在空间维度出现光谱弯曲。另外,由于探测器响应的不均匀性,光谱图像也会有横条纹、斜条纹的存在。这些因素干扰了高分辨率成像光谱仪的成像质量^[1-5]。星载大气痕量气体差分吸收光谱仪通过探测地球大气或地表反射、散射的紫外/可见光来反演大气中痕量气体的分布和变化,由于差分吸收光谱(DOAS)算法^[6-7]对光谱结构比较敏感,利用该方法进行数据反演时,光谱弯曲及斜条纹的存在对反演干扰严重,制约了数据的反演精度。臭氧监测仪(OMI)在轨采用卤钨灯(5 W, 12 V)作为白光源,卤钨灯光源光经过漫透射板后进入 OMI 光学系统,可对仪器面阵 CCD 的非均匀性进行较好的校正^[8]。由于卤钨灯光源光谱较为平滑,经过漫透射板透射后可在光谱维和空间维产生均匀光充满仪器整个视场。星载大气痕量气体差分吸收光谱仪在轨采用同样的方案进行光谱图像校正。为了取得较好的校正效果,需要针对星载大气痕量气体差分吸收光谱仪本身的特点研究相应的校正方法。为此,在地面利用均匀面光源对星载大气痕量气体差分吸收光谱仪进行全视场测量,并详细地分析全视场光谱图像,提出相应的校正方法,为仪器在轨光谱图像校正的可行性分析提供依据。

2 光谱图像测量

2.1 光谱图像测试方法

由于星载大气痕量气体差分吸收光谱仪具有 114°的大视场,在地面实验中没有足够大的均匀面光源能够直接充满视场。可采用分视场光谱图像合并的方法得到全视场光谱图像,测量流程如图 1 所示。均匀面光源选择 Labsphere 公司型号为 US-200-SF 的积分球辐射系统(球直径为 50 cm,开口直径为 20 cm)。仪器在轨采用卤钨灯进行光谱图像校正,为保证一致性,选取卤钨灯作为积分球的照明光源。为保证积分球开口光源具有较好的面均匀性和角均匀性,星载大气痕量气体差分吸收光谱仪入射狭缝与积分球开口距离不宜靠得太近,实验中选择两者的距离为 50 cm,积分球开口面光源能够照亮仪器的 13°视场。

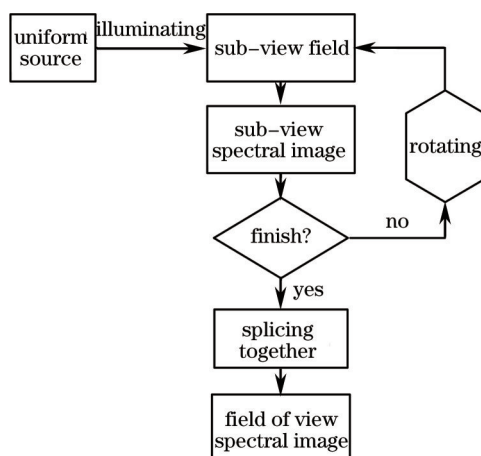


图 1 全视场光谱图像获取流程图

Fig.1 Flow chart of acquisition of full field of view spectral image

实验时将仪器放置在二维转台上,仪器从边缘视场-57°开始观测面光源获取分视场光谱图像,旋转 9 步到仪器另一侧边缘视场+57°,得到 9 幅连续的分视场光谱图像。将 9 幅分视场光谱图像合并得出仪器的全视场光谱图像。仪器测得的分视场为中心视场的光谱图像及合并的全视场光谱图像如图 2 所示。图 2 中垂直方向为空间维,对应穿轨方向的 114°大视场,水平方向为光谱维。

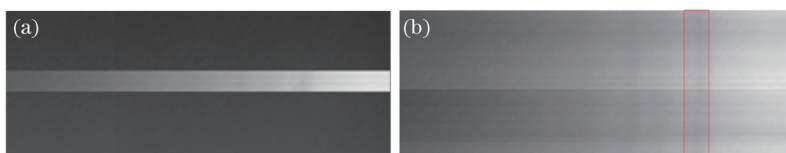


图 2 (a) 分视场为中心视场的光谱图像;(b) 全视场光谱图像

Fig.2 Spectral images of (a) center field of view and (b) full field of view

2.2 光谱图像分析

对全视场光谱图进行分析,从图 2(b)中看出图像右侧垂直方向(空间维)存在一条较宽的黑线,图中红色框内,黑线对应卤钨灯光谱上的一个波谷(见图 3 中光谱右侧的波谷)。在理想情况下图像上、下端光谱波谷位置和中心波谷位置在同一列像元上。但由于光谱成像系统的装调不可能完全精准,被测目标单色像成像于光谱仪的焦平面时,会出现空间的非线性现象,即产生光谱弯曲^[9],图像上部、下部的光谱图像相对于中心处光谱向左侧偏移,其中下部图像偏移量较大。图 2(b)中水平条纹可能与两个因素有关,一是由图像合并引入,二是由成像光谱仪的入射狭缝引入。仪器在轨光谱图像校正时光源可充满仪器整个视场,因而不存在第一个因素。明显地,光谱弯曲和条纹的存在干扰了光谱成像质量。

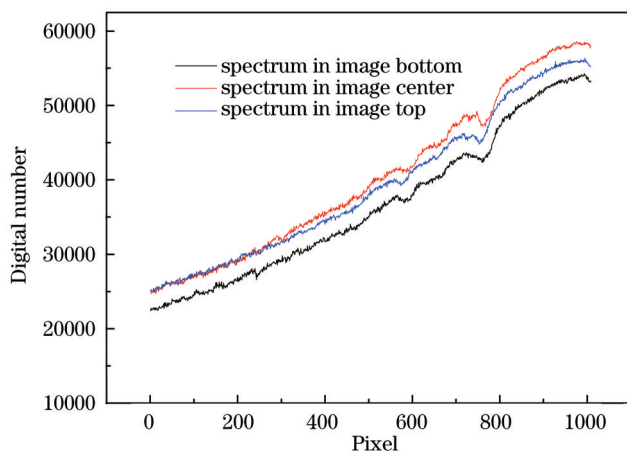


图 3 图像校正前不同位置的光谱

Fig.3 Spectra at different positions before image correction

图 3 中横坐标为像元数,纵坐标为遥感探测器像元响应值,记录被测地物的灰度值。从图 3 也可以看出,3 条光谱上都有高频的光谱结构,因为实验中的积分球采用卤钨灯作为光源,光谱是平滑的,因此高频光谱结构并非由光源引入,初步判断由探测器像元之间响应的不均匀性引入。对图 2(b)中的光谱图像进行曝光观察,可得出更多的图像细节,4 倍曝光后的光谱图像如图 4 所示。

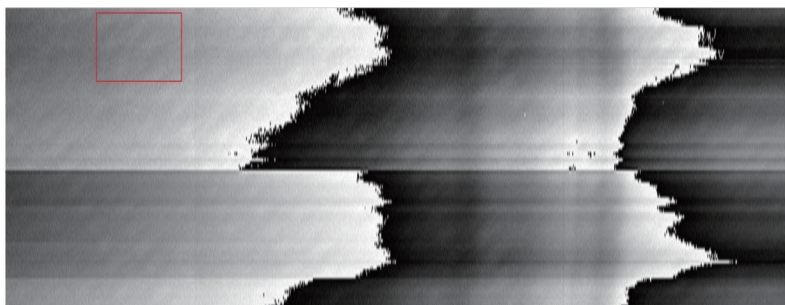


图 4 未校正光谱图像 4 倍曝光

Fig.4 Uncorrected spectral image after four times of exposure

从图 4 可以看出,曝光后图像中可看出斜条纹的存在,特别是图像左侧红色方框内的斜条纹。斜条纹主要由于探测器本身特性而产生,国外载荷 OMI 光谱图像同样出现了其他形状的斜条纹^[8],斜条纹可能在测量的光谱中引入光谱结构,影响光谱反演精度。

3 光谱图像校正

上节对星载大气痕量气体差分吸收光谱仪测量的光谱图像进行了详细的分析。针对光谱图像存在的光谱弯曲、横条纹和斜条纹,给出相应的校正算法。

3.1 光谱图像光谱弯曲校正

星载大气痕量气体差分吸收光谱仪采用的探测器为面阵 CCD,采集的光谱图像数据可采用二维矩阵形

式表示：

$$r = \begin{bmatrix} R_{11} & \cdots & R_{1j} & \cdots & R_{1k} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ R_{m1} & \cdots & R_{mj} & \cdots & R_{mk} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ R_{i1} & \cdots & R_{ij} & \cdots & R_{ik} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中矩阵行为光谱维,列为空间维,其中下标 m 、 i 为面阵 CCD 像元的列号, j 、 k 为面阵 CCD 像元的行号。每一列对应的光谱仪狭缝单色像即

$$\begin{bmatrix} R_{1j} \\ \vdots \\ R_{mj} \\ \vdots \\ R_{ij} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \lambda_{1j} \\ \vdots \\ \lambda_{mj} \\ \vdots \\ \lambda_{ij} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \lambda_{mj} - \sigma_{1j} \\ \vdots \\ \lambda_{mj} \\ \vdots \\ \lambda_{mj} - \sigma_{ij} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 λ 为探测像元的中心波长,由于光谱弯曲的影响,每一列探测像元的中心波长并不相同,不同像元之间中心波长有一定的偏移^[10], $[\sigma_{1j}, \dots, \sigma_{ij}]$ 表示波长偏移量。由于星载大气痕量气体差分吸收光谱仪空间维探测像元数为 576 个,不可能对每个像元中心波长进行测量来确定波长偏移量。可采用光谱匹配方法确定光谱弯曲量^[11-13],该方法具有快速、准确的特点。光谱匹配时以中心视场的谱线作为参考谱线,将空间维其他谱线在选定的光谱范围内按照一定步长和参考谱进行匹配,得出每个步长下的匹配结果,由匹配结果最优的步数可得出谱线的偏移量。将得到的偏移量应用于(1)、(2)式中的矩阵,光谱弯曲校正后的光谱图像如图 5 所示。



图 5 光谱弯曲校正后的光谱图像

Fig.5 Spectral image after spectral curve correction

图 5 中左边缘黑色部分为图像平移量,校正结果显示光谱图像向右侧进行了平移。由图可知,图像下部校正时向右侧平移较多,即图像下部偏移量较大(图 4)。图 2 中右侧红色框内的黑线得到了校正,光谱波谷校正到了同一列像元上。

3.2 光谱图像条纹校正

经过光谱弯曲校正后的光谱图像的一列像元对应光谱仪狭缝的单色像,当入射光为均匀光时,单色像也应该为均匀的。但由于像元响应的差异性和入射狭缝本身的结构特性,单色像变得不均匀。需要采用一定的校正算法进行校正^[13],选取 CCD 探测器某一列像元,其响应非均匀性校正模型可表示为

$$R = \begin{bmatrix} a_{1j} \cdot R_{1j} \\ \vdots \\ a_{mj} \cdot R_{mj} \\ \vdots \\ a_{ij} \cdot R_{ij} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{1j} \\ \vdots \\ b_{mj} \\ \vdots \\ b_{ij} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中下标 i 、 j 为面阵 CCD 行、列号。均匀光 $\varphi(\lambda)$ 入射时,一列像元上的探测信号强度相同,理想情况下其响应值 R_{ij} 也相同。实际应用中可将一列像元响应值的平均值 R 作为此列像元的响应值, a_{ij} 、 b_{ij} 为像元的非均匀性校正系数。(3)式中未知数为 a_{ij} 、 b_{ij} ,为了能够解出 a_{ij} 、 b_{ij} ,改变入射辐射强度为 $\varphi'(\lambda)$,得到

$$\mathbf{R}' = \begin{bmatrix} a_{1j} \cdot R'_{1j} \\ \vdots \\ a_{mj} \cdot R'_{mj} \\ \vdots \\ a_{ij} \cdot R'_{ij} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{1j} \\ \vdots \\ b_{mj} \\ \vdots \\ b_{ij} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 R'_{ij} 、 \mathbf{R}' 对应 (3) 式中的 R_{ij} 、 \mathbf{R} 。联合 (3) 式和 (4) 式, 可求出星载大气痕量气体差分吸收光谱仪 CCD 每列像元的非均匀性校正系数 (a_{ij} , b_{ij}) 为

$$\begin{bmatrix} (1.03, -2626.6) \cdots (0.96, 1356.8) \cdots \cdots (0.94, 1632.4) \\ \vdots \\ (0.96, 1901.3) \cdots (1.00, 1781.9) \cdots (0.95, 1965.7) \\ \vdots \\ (1.05, -572.5) \cdots (1.10, -3051.4) \cdots (1.07, -497.3) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中每个括号对应一个像元, 将校正系数应用到光谱图像的每个像元, 可完成对光谱图像的均匀性校正。对光谱图像 (图 5) 进行校正, 校正结果如图 6 所示。



图 6 均匀性校正后的光谱图像

Fig.6 Spectral image after stripe noise correction

由图 6 可以看出, 光谱图像上的横条纹得到了校正, 光谱图像在空间维是均匀的, 在光谱维是平滑的, 提高了高分辨率成像光谱仪的成像质量。

4 光谱图像校正结果分析

对光谱弯曲和均匀性校正后的光谱图像 (图 6) 进行 4 倍曝光后如图 7 所示。校正后的光谱图像相对于校正前的光谱图像 (图 4), 图像的横条纹、斜条纹得到了很好的校正。图中的宽水平条带是分视场的光谱图像, 此条带是由于图像合并产生的。由图 4 分析可知, 仪器在轨光谱图像校正时, 不经过图像合并这一步, 所以在轨校正后不会存在图 7 中的水平条带。



图 7 均匀性校正后的光谱图像 4 倍曝光

Fig.7 Corrected spectral image after four times of exposure

校正后光谱图像 (图 6) 的上部、下部和中心处光谱如图 8 所示。图中 3 条光谱基本重合, 且光谱上的高频率光谱结构已经去除, 光谱变得平滑。验证了此光谱结构是由探测像元响应不均匀性引入。

星载大气痕量气体差分吸收光谱仪光谱图像校正后得到的辐亮度与光源原始标准光谱辐亮度的比较如图 9 所示。由图 9 可知, 光谱图像校正后得到的辐亮度与光源原始标准光谱辐亮度有很好的 consistency, 说明

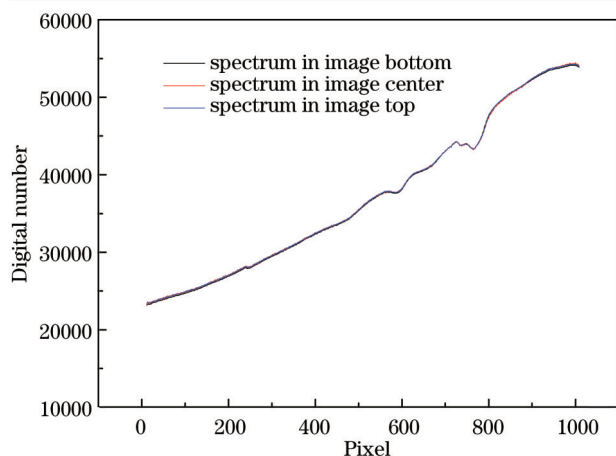


图8 图像校正后不同位置的光谱

Fig. 8 Spectra at different positions after image correction

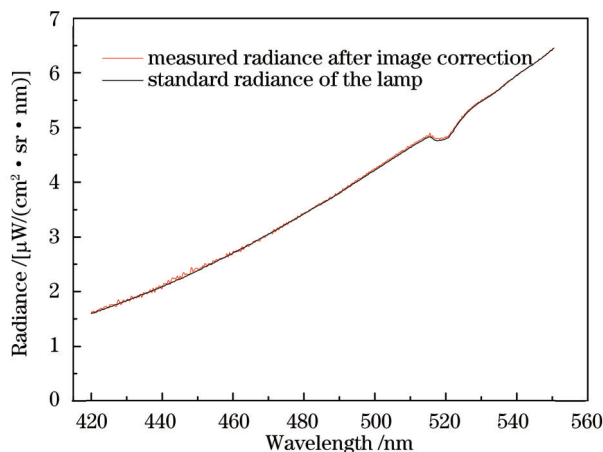


图9 光谱辐亮度比较结果

Fig.9 Comparison of spectral radiance

采用的光谱图像处理算法未对所测光谱的准确度产生影响。

5 结 论

在地面校正星载大气痕量气体差分吸收光谱仪的光谱图像时,首先采用图像合并方法获取仪器全视场光谱图像,然后完成全视场光谱图像的光谱弯曲校正,最后对光谱图像的非均匀性进行校正。从校正结果可知,光谱图像的光谱弯曲和条纹得到了较好的校正,且校正算法未对所测光谱的准确度产生影响。说明提出的光谱图像校正方法是可行、有效的。仪器在轨校正时,星上定标系统在光谱维和空间维提供的均匀光源能够充满仪器整个视场,可采用提出的光谱弯曲校正算法和条纹校正算法对光谱图像进行校正。

参 考 文 献

- 1 Guo Lingling, Wu Zepeng, Zhang Liguo, *et al.*. Destriping of remote sensing images with application to push-broom-type cameras[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0828001.
郭玲玲, 吴泽鹏, 张立国, 等. 推扫式遥感相机图像条带噪声去除方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0828001.
- 2 Xie Xufen, Zhang Wei, Zhi Xiyang, *et al.*. Scene-based assessment method for nonuniformity of infrared focal plane array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0604001.
谢蓄芬, 张 伟, 智喜洋, 等. 基于场景的红外焦平面阵列非均匀性评价方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0604001.
- 3 Li Zhiwei, Xiong Wei, Shi Hailiang, *et al.*. Correction of detector response error for hyperspectral spatial heterodyne interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0530001.
李志伟, 熊 伟, 施海亮, 等. 超光谱空间外差干涉仪探测器响应误差校正[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0530001.
- 4 Zhu Shanyou, Zhang Guixin, Gong Cailan, *et al.*. Non-uniformity correction method based on standard deviation value compensation after moment matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1211002.
祝善友, 张桂欣, 巩彩兰, 等. 基于方差补偿矩匹配的红外图像非均匀性校正算法[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1211002.
- 5 Chen Ying, Zhu Ming, Li Zhaoze. Remote sensing digital image enhancement based on Gaussian mixture modeling[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(12): 1209002.
陈 莹, 朱 明, 李兆泽. 基于高斯混合模型的遥感数字图像增强[J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1209002.
- 6 Si Fuqi, Liu Jianguo, Xie Pinhua, *et al.*. Determination of aerosol optical thickness and atmospheric visibility by differential optical absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(7): 961-964.
司福祺, 刘建国, 谢品华, 等. 差分吸收光谱技术监测气溶胶光学厚度及大气能见度的研究[J]. *光学学报*, 2006, 26(7): 961-964.
- 7 Liu Jin, Si Fuqi, Zhou Haijin, *et al.*. Differential optical absorption spectroscopy technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0801002.
刘 进, 司福祺, 周海金, 等. 被动差分吸收光谱技术测量大气中水汽垂直柱浓度[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0801002.
- 8 M R Dobber, R J Dirksen, P F Levelt, *et al.*. Ozone monitoring instrument calibration[J]. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(5): 1209-1238.
- 9 J K Zhou, X L Liu, Y Q Ji, *et al.*. Smile effect detection for dispersive hyperspectral imager based on the doped reflectance panel[C]. SPIE,

- 2012, 8557: 85571T.
- 10 Xue Qingsheng. Optical system design of large relative-aperture and wide field of view spaceborne imaging spectrometer[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0316003.
薛庆生. 星载大相对孔径宽视场成像光谱仪光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0316003.
- 11 R O Green. Spectral calibration requirement for earth-looking imaging spectrometers in the solar-reflected spectrum[J]. Applied Optics, 1998, 37(4): 683-690.
- 12 P S Barry, J Shepanski, C Segal. Hyperion on-orbit validation of spectral calibration using atmospheric lines and an on-board system [J]. SPIE, 2002, 4480: 231-235.
- 13 L Guanter, R Richter, J Moreno. Spectral calibration of hyperspectral imagery using atmospheric absorption features[J]. Applied Optics, 2006, 45(10): 2360-2370.

栏目编辑: 吴秀娟