

文章编号: 1007-4619(2006)02-0211-10

# CBERS-02 WFI 的辐射交叉定标 及其对植被指数的作用

李小英<sup>1, 2</sup>, 顾行发<sup>1, 2, 3</sup>, 余 涛<sup>1, 2</sup>, 傅俏燕<sup>4</sup>, 李小文<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 国家航天论证中心, 北京 100101;

3. CSE-INRA, Avignon, France; 4. 资源卫星应用中心, 北京 100073)

**摘 要:** 本文以 MODIS 作为参考传感器, 对 CBERS-02 星上的 WFI 传感器进行辐射交叉定标, 得到 WFI 两个波段 TOA 辐亮度、表观反射率的增益与计数值偏移量, 两个波段的计数值偏移量分别为 42 和 21 个 DN 左右。利用定标结果计算图像上另一均匀区的表观反射率, 与 MODIS 反演的表观反射率比较验证。WFI 与 MODIS 第 1 波段的表观反射率相差 3.6%, 第 2 波段相差 -3.6%。检验结果说明, 本文得到辐射交叉定标系数的精度能满足量化应用的要求。为了说明辐射定标对植被指数的影响, 本文选择 5 个实验区, 比较分析了实验区图像辐射定标前后的 NDVI。当 WFI 的 DN 值扣除定标得到的数字计数值偏移量后, DN 值的 NDVI 与表观反射率的二次非线性拟合度可达 99%。另外, WFI 辐射定标前后的 NDVI、RVI 与 MODIS 反演的 NDVI、RVI 的比较分析说明, WFI 辐射定标后表观反射率值的植被指数与 MODIS 反演植被指数较接近, 而且两个传感器 RVI 的差异小于 NDVI 的差异。

**关键词:** CBERS-02; WFI; 辐射交叉定标; NDVI; RVI**中图分类号:** TP702 **文献标识码:** A

## Radiometric Cross-calibration of CBERS-02 WFI with MODIS and the Effect on VI

LIXiao-ying<sup>1, 2</sup>, GUXing-fa<sup>1, 2, 3</sup>, YUTao<sup>1, 2</sup>, FUQiao-yan<sup>4</sup>, LIXiao-wen<sup>1</sup>

(1. Institute of Remote Sensing Applications CAS, Beijing 100101, China;

2. Demonstration Center for Spaceborne Remote Sensing, Beijing 100101, China;

3. CSE-INRA, Avignon, France; 4. Application Center for Chinese Resource Satellite, Beijing 100073, China)

**Abstract:** With the MODIS as a reference sensor, the radiometric cross-calibration was performed for CBERS-02 WFI and the calibration coefficients and the offsets were obtained. The offsets for both channels were very large, about 42 and 21 respectively. For validation, the calibration results were applied to another region of WFI image to get the apparent reflectance, which was compared to the one from MODIS image. The differences for both two corresponding channels were 3.6% and -3.6%, which demonstrated that the calibration results we got should satisfy the quantitative application. Five experimental regions from WFI images were selected to calculate their vegetation index both before and after radiometric calibration and the comparison showed that the degree of fitting using the quadratic polynomial function could reach 99% after the offsets were subtracted from the original DN's. The comparison between the NDVI and RVI from WFI and those derived from MODIS illustrated clearly that the VI derived from the WFI with calibration coefficients were much closer to those of MODIS and the variation of the RVI between two sensors was smaller than that of the NDVI.

**Key words:** CBERS-02; WFI; radiometric cross-calibration; NDVI; RVI**收稿日期:** 2005-03-15; **修订日期:** 2005-06-02**基金项目:** 中国科学院百人计划资助 (KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点资助 (HX040013)。**作者简介:** 李小英 (1975—), 女, 2002 年毕业于北京师范大学资源与环境系, 获理学硕士学位。现为中国科学院遥感应用研究所

在读博士研究生, 方向为定量遥感, 主要研究兴趣是可见光、近红外传感器辐射特性分析。

## 1 引 言

宽视场成像仪 (WFI) 是 CBERS-02 星上的载荷之一, 其信息的定量化及应用研究是中巴资源卫星数据为国民经济服务的一部分。WFI 有两个波段, 1 个可见光波段 ( $0.63\text{--}0.69\mu\text{m}$ )、1 个近红外波段 ( $0.77\text{--}0.89\mu\text{m}$ ), 星下点的可见分辨率为  $258\text{m}$ , 扫描幅宽为  $890\text{km}$ 。WFI 是推扫式分立相机, 总视场角达  $60^\circ$ , 具有较宽的扫描能力, 可以在很短的时间内获得高重复率的地面覆盖。国内外对 WFI 数据的应用不多, 关键原因之一在于缺乏对 WFI 信息定量化的研究。至今, 国内尚没有可提供给用户的 WFI 辐射定标系数。本文对 WFI 进行在轨辐射定标, 并分析它对植被指数的影响, 为 WFI 数据的实用性提供最基本的 TOA 辐亮度及表现反射率的转换系数及应用方法。在轨辐射定标的方法之一是利用均匀地表进行场地定标<sup>[1-9]</sup>, 但这种方法对地表的均一性要求较高, 对于 TM、ETM、HRV、IRHRV 及 CCD 等分辨率高的传感器比较适用。而 WFI 的分辨率为  $258\text{m}$ , 要获取足够的均一地表的采样点比较难, 另外场地定标法还有其他缺陷<sup>[10]</sup>。对于广角的传感器如 VEGETATION、AVHRR、POLDER 及 MODIS 等, 可以利用海洋上的瑞利散射对短波长的通道进行绝对辐射定标, 再将该绝对定标系数通过波段间的相对定标转移到其他通道<sup>[11-15]</sup>。但是这种定标方法是假设数字计数值的偏移量为 0 或已知的条件下得到的定标系数, 而目前对 CBERS 星上 WFI 在轨特性的研究很少, 两个通道的计数值偏移量在发射后是否发生变化还是未知数。在这种情况下, 最适用于 WFI 的在轨辐射定标是利用定标系数精度高的传感器进行辐射交叉定标, 这已被证明是成功的<sup>[16-21]</sup>。MODIS 具有理想的星上定标系统, 且每天覆盖同一地区。MODIS 的第 1 和第 2 波段与 WFI 两个波段的设置很相近, 分辨率也差不多。我们尝试利用 MODIS 对 WFI 进行辐射交叉定标, 确定两个通道的辐射定标系数与偏移量。广角的传感器, 如 AVHRR、MODIS 及 VEGETATION 等, 它们的红色波段及近红外波段常用于全球植被指数的监测<sup>[13, 14, 22]</sup>。WFI 波段的设置及其扫描幅宽大、重访周期短的特点, 可用来进行全国、全球植被动态监测。

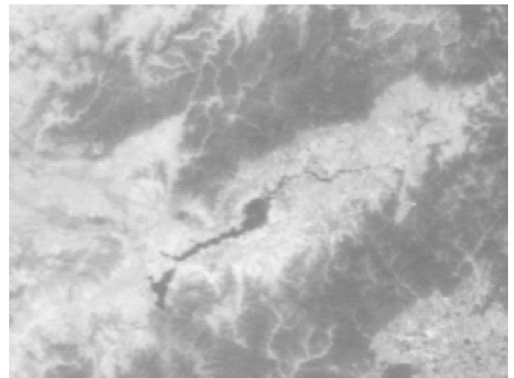
## 2 WFI 与 MODIS 的交叉定标

虽然交叉定标可以不需要地面同步测量数据,

但如果有地面同步测量的数据, 则可以减少计算光谱匹配因子所带来的不确定性<sup>[10]</sup>。2004 年 4 月 5 日、4 月 28 日与 5 月 4 日由中国科学院遥感应应用研究所航天论证中心、中巴资源卫星中心、国家气象局、国家海洋局等单位联合, 在河北怀来开展了 3 次与 CBERS-02 星的地面同步实验。5 月 4 日大气条件较好, 因此选择这天的数据来做辐射交叉定标。

### 2.1 图像预处理

MODIS 的几何变形比较大, 先对 MODIS 第 1 和第 2 波段的 L1B 数据几何校正, 并将原  $250\text{m}$  的分辨率重新采样成与 WFI 一样的分辨率  $258\text{m}$ 。因为分辨率差别不大, 重采样用的是最近邻方法。将 WFI 图像匹配到已经过几何校正的 MODIS 图像上, 误差在  $0.5\text{--}1\text{m}$  之内。两个传感器所获取的怀来图像红波段如图 1 所示。可以看出, WFI 的图像比 MODIS 对应波段的图像显得模糊, 近红外波段也类似。



(a)



(b)

图 1 WFI 与 MODIS 获取的怀来试验区图像

(a) WFI 通道 1; (b) MODIS 通道 1

Fig. 1 WFI and MODIS images of Huailai site

(a) WFI band 1; (b) MODIS band 1

对怀来实验区两个传感器对应波段图像 DN 值 (396 行 × 589 列) 进行相关分析: 第 1 通道 (红色波段) DN 值的相关系数达 95% 以上, 第 2 通道 (近红外波段) 为 90% 左右。

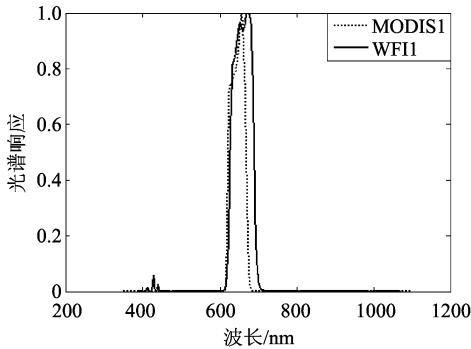
### 2.2 WFI 与 MODIS 的光谱差异

WFI 与 MODIS 的波段设置及其响应函数存在一些差别, 如表 1 和图 2 所示。这种差异对 TOA 反射率的作用主要体现在大气外太阳辐照度、大气的透过率及地表反射率的差异。

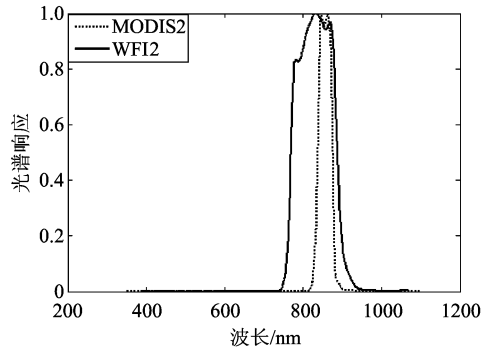
通过 MODTRAN 模拟实验区当天正午时的大气透过率及太阳向下辐照度的谱分布。WFI 与 MODIS 对应通道中心波长在这两个谱分布中的差异如图 3 所示。表 2 列出了两个传感器对各地物及大气的响应差异。表 2 中的地表反射率是利用 WFI 两个通道光谱响应函数和地物实测 ASD 光谱得到的地表等效反射率。图 3 和表 2 显示, WFI 与 MODIS 各对应通道的通道太阳辐照度、透过率及各地物的地表反射率都有较大的差别, 这些不同最终体现为 MODIS 与 WFI 各通道入瞳处的表观反射率的差异。

表 1 WFI 与 MODIS 各对应通道的参数  
Table 1 Parameters of bands of WFI and MODIS

通道	CBERS WFI/nm	中心波长 /nm	分辨率 /m	通道	MODIS /nm	中心波长 /nm	分辨率 /m
1	630—690	657.74	258	1	620—670	646.3	250
2	770—890	831.98	258	2	841—876	856.48	250



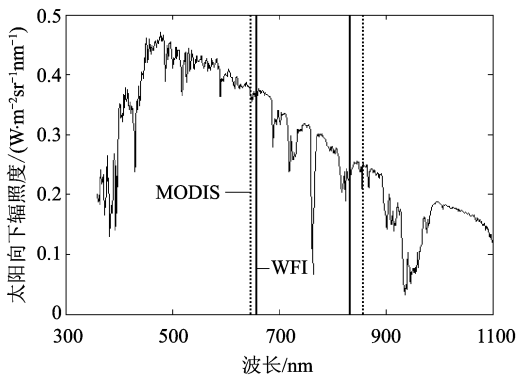
(a)



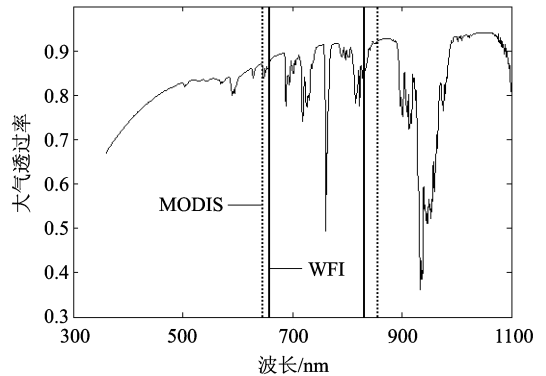
(b)

图 2 WFI 与 MODIS 各对应通道的光谱响应

Fig 2 The spectral response of WFI and MODIS's spectral bands



(a)



(b)

图 3 WFI 与 MODIS 过顶时大气的透过率 (a) 及太阳向下辐照度 (b) 及两个传感器中心波长的位置

Fig 3 Center wavelengths of WFI and MODIS on (a) the transmittance and (b) solar downward irradiance

表 2 WFI及 MODIS通道太阳辐照度 (W / (m<sup>2</sup> · sr · μm))、透过率及地物地表反射率比较

Table 2 The solar irradiance transmittance and surface reflectance of WFI and MODIS's spectral bands

	WFI通道 1	MODIS通道 1	WFI通道 2	MODIS通道 2
太阳辐照度(日地平均距离处)	1564.7	1602.1	1048.7	973.88
透过率(5月4日过顶条件下)	0.8751	0.8651	0.8920	0.9147
滩涂地表通道反射率	0.24654	0.24633	0.3057	0.30912
水体通道反射率	0.019665	0.02125	0.005929	0.0053372
裸地地表通道反射率	0.22921	0.22651	0.28921	0.29232

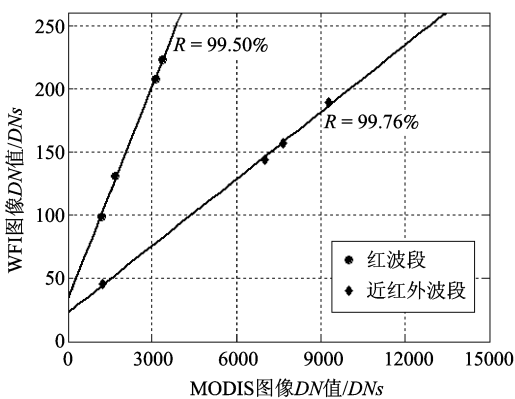
2.3 辐射交叉定标及结果分析

在辐射交叉定标中,要考虑两个传感器过顶时间差异带来的大气、地物及太阳辐照度的变化,两个传感器本身光谱差异,观测几何差异以及地物的BRDF特性。由于WFI与MODIS获取试验区图像的时间相差不到10分钟,可以认为这之间地表及大气状况基本不发生变化。MODIS过顶时观测天顶角、方位角分别是17.96°与99.76°,太阳天顶角与方位角分别是28.52°与143.52°;WFI的观测天顶角、方位角分别是10°与104.13°,太阳天顶角与方位角分别是28.85°与142.35°。它们的观测几何很相似,大气路径的差异较小,且观测天顶角都不大,因此本文在辐射定标中没考虑地物的BRDF特性。以MODIS作为参考传感器,WFI辐亮度及表观反射率的定标公式分别为下面的公式(1)和(2),具体的公式推导见文献[10]。

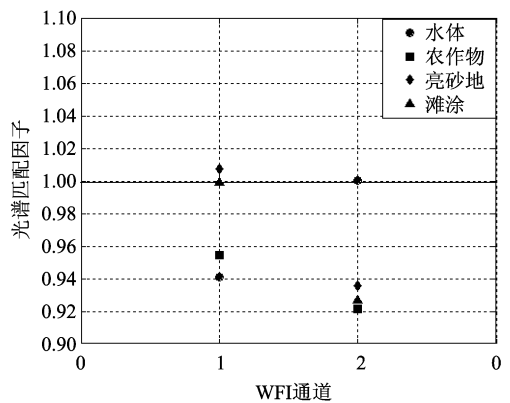
$$DC_{wi} = \frac{\rho_{wi}}{\rho_{mi}} \cdot \frac{E_{wsi} \cdot \cos\theta_w}{\pi \cdot d^2} \cdot \frac{1}{c_{mi}} \cdot DC_{mi} \cdot a_{wi} + DC_{w0i} \quad (1)$$

$$DC_{wi} = \frac{\rho_{wi}}{\rho_{mi}} \cdot \frac{1}{c_{mi}} \cdot DC_{mi} \cdot c_{wi} + DC_{w0i} \quad (2)$$

式中,  $a_{wi}$ 、 $c_{wi}$ 是WFI第*i*通道的TOA辐亮度及表观反射率的增益系数; $DC_{wi}$ 是通道*i*的数字计数值; $DC_{w0i}$ 是通道*i*的数字计数值的偏移量; $E_{wsi}$ 是日地平均距离(*d*)处的等效太阳辐照度; $\theta_w$ 为WFI过顶时太阳天顶角; $c_{mi}$ 是MODIS对应于WFI第*i*通道的TOA反射率的定标系数,是MODIS数据提供的反射率转换因子与太阳天顶角的比值; $DC_{mi}$ 是MODIS图像上的计数值; $\frac{E_{wsi} \cdot \cos\theta_w}{\pi \cdot d^2}$ 是对两个传感器过顶时太阳辐照度差异的修正,这一项可以较精确地计算获得; $\frac{\rho_{wi}}{\rho_{mi}}$ 是两个传感器对应通道的光谱匹配因子, $\rho_{wi}$ 与 $\rho_{mi}$ 分别为WFI与MODIS第*i*通道地物的表观反射率。在模拟两个传感器表观反射率时已考虑了传感器的观测几何,光谱匹配因子实际上包含了对两个传感器观测几何及通道光谱响应差异的修正。因此光谱匹配因子的模拟精度在辐射定标中是关键。



(a)



(b)

(C)1994-2019 © China University of Mining and Technology. All rights reserved. http://www.cnki.net

Fig 4 (a) DN s on WFI and MODIS images for four targets (b) Spectral band matching factor

分别在 WFI 及 MODIS 图像上选取官厅水库水体、滩涂、农作物及亮砂地 4 种均匀地物作为定标点。计算出这 4 种均匀地物在 WFI 及 MODIS 图像上的均值, 它们的相关系数高达 99% 以上, 如图 4 (a) 所示, 线性拟合度在 95% 以上。利用同步测量的地物光谱, 以及不同时期不同地区获取但同一类型地物的光谱, 通过 MODTRAN 模拟出 WFI 及 MODIS 过顶时各地物的 TOA 辐亮度, 并算出各地物 WFI 与 MODIS 的光谱匹配因子<sup>[10]</sup>, 如图 4 (b) 所示。将 MODIS 的表观反射率定标系数、4 种地物在 WFI 及 MODIS 各对应通道 DN 值的均值及其光谱匹配因子代入式 (1) 和 (2), 得到 WFI 两个波段 TOA 辐亮度及表观反射率的定标系数和计数值偏移量, 结果见表 3。

表 3 WFI 的辐射定标结果

Table 3 Calibration results for WFI

	WFI 通道 1	WFI 通道 2
辐亮度定标系数	2.0275	1.7672
反射率定标系数	870.12	508.27
偏移量 (DN <sub>s</sub> )	42.33	21.023

表 3 显示 WFI 两个通道的数字计数值的偏移量约为 42 和 21 个 DN 值。如果假设其数字计数值的偏移量为 0 (将图像上 DN 已扣除发射前测出的数字计数值的偏移量), 不同定标点得到的定标系数差别会很大<sup>[10]</sup>, 计算得到的定标系数将会有很大的误差。大的计数值的偏移量也证实瑞利散射定标法不适合于 WFI。

本文定标结果的不确定性主要来源于以下几个方面。首先, 是参考传感器 MODIS 定标系数的不确定性, 为 2%; 第二是 WFI 及 MODIS 图像之间残余的配准误差, 但由于对应地物的 DN 值是取均匀地块的均值, 估计所带来的误差较小, 在 0.5% 左右; 第三是光谱匹配因子的不确定性, 研究所选的地物光谱中水体和滩涂是同一测区的同步测量数据, 其光谱匹配因子的计算误差主要是由于测量误差带来的, 而测量误差对光谱匹配因子的影响很小, 估计小于 1%; 农作物的冠层光谱是同一生长期的同类型作物, 误差 3% 左右, 而亮砂地光谱匹配因子的误差在 2% 以内, 4 种地物平均误差在 2% 左右。虽然两个传感器的观测几何类似, 但 MODIS 的观测天顶角要大些, 地物的 BRDF 特性会有影响, 估计在 1%—2% 左右。其他的测量误差及 MODTRAN 模拟时所带来的误差

估计在 1%—2%。各误差的算术平方根即为 WFI 交叉定标的总误差<sup>[19]</sup>, 为 ±4.3% 左右。

### 3 辐射交叉定标结果检验

在 WFI 图像上取另一均匀地物来检验定标结果。将 WFI 的表观反射率定标系数应用于所选的均匀区域, 得到其平均表观反射率, 与 MODIS 反演出所选均匀区域的平均表观反射率进行对比。所选的验证区是河流旁边的较均匀的滩涂区, 其经度为 113.02°E, 纬度为 40.78°N。由于 MODIS 与 WFI 对该地区的观测几何及光谱响应有差异, 通过 MODTRAN 模拟得到光谱匹配因子对观测几何及光谱响应差异进行修正。在 MODTRAN 模拟计算光谱匹配因子时, 采用的部分输入参数见表 4。

表 4 WFI 及 MODIS 光谱匹配因子模拟参数

Table 4 Inputs for simulating the spectral band matching factor

	WFI	MODIS
观测天顶角 / (°)	24.86	27.41
观测方位角 / (°)	104.13	99.11
太阳天顶角 / (°)	28.85	29.94
太阳方位角 / (°)	142.35	142.55
过顶时间 / h	11.05	11.08
能见度 / km		12.14
大气模型		中纬度夏季

以同一天在怀来官厅水库测得的滩涂光谱数据, 通过 MODTRAN 模拟计算得到两个传感器的光谱匹配因子, 红波段及近红外波段的光谱匹配因子分别约是 0.99 及 0.926。利用 MODIS 的表观反射率定标系反演出来的两个通道的反射率分别为 0.1582 与 0.2373, 而利用定标结果得到的 WFI 两个通道的表观反射率分别是 0.1515 与 0.2275。两者分别相差 -4.35% 与 -4.21% 左右。对 WFI 与 MODIS 的表观反射率进行光谱及观测几何匹配, 它们之间分别相差 -3.6% 与 3.62%。验证结果说明 WFI 的交叉定标结果是可用的。

### 4 WFI 的辐射定标对植被指数的影响

植被指数是描述地表植被特征的重要指标, 可

直接用于反演叶面积指数及农作物的估产。另外，对植被指数的动态监测可以反映地表植被覆盖的变化情况，对全球的生态环境变化研究有着辅助作用。

### 4.1 WFI图像 DN值 NDVI与表观反射率 NDVI的关系

WFI辐射定标前后的归一化植被指数 (NDVI) 数值有很大的变化。从 WFI 图像的原始数字值，可以得到定标前 DN 值的  $NDVI_{bc}$ ：

$$NDVI_{bc} = \frac{DC_{nir} - DC_r}{DC_{nir} + DC_r} \quad (3)$$

式中， $nir$ 和  $r$ 分别表示近红外和红波段。将 WFI 的表观反射率应用于图像的 DN 值，从表观反射率可求得表观反射率的  $NDVI_p^*$ ：

$$NDVI_p^* = \frac{\rho_{nir}^* - \rho_r^*}{\rho_{nir}^* + \rho_r^*} \quad (4)$$

WFI 图像的 DN 值与用表观反射率得到的  $NDVI_{bc}$  与  $NDVI_p^*$  数值上不同。为了分析它们之间的关系，我们选取 5 个实验区：5 月 4 日怀来试验区

的 WFI 及 MODIS 图像 (396 行 × 589 列) 及同一天包括华中大部分地区的图像 (1521 行 × 1144 列)、6 月 3 日包括韩国大部分地区的图像 (706 行 × 725 列) 及同一天我国东北地区图像 (309 行 × 479 列) 及 5 月 10 日日本西南部 (307 行 × 311 列)，分别计算得到各试验区的  $NDVI_{bc}$  与  $NDVI_p^*$ ，并进行比较分析。

5 个实验区的计算结果说明，表观反射率的 NDVI 的数值比较高。这 5 个试验区图像  $NDVI_{bc}$  与  $NDVI_p^*$  的相关系数都达 97%—99% 左右。图 5 是 3 个试验区的  $NDVI_p^*$  与  $NDVI_{bc}$  的散点图。可以清楚地看到，在这些试验区中， $NDVI_p^*$  与  $NDVI_{bc}$  的散点图很集中，在图 5(a)–(c) 中，都有一个明显的转折点，而且这个转折点是一个固定值，即  $NDVI_{bc}$  等于 -0.2。另两个实验区，中国东北地区与日本岛西南部的散点图没有这个转折点，因为这两个实验区的植被覆盖度较高， $NDVI_{bc}$  基本上都大于 -0.2。 $NDVI_p^*$  与  $NDVI_{bc}$  转折点的存在及它们的二次拟合度不高，可能与 WFI 两个波段的计数值偏移量很大有关。

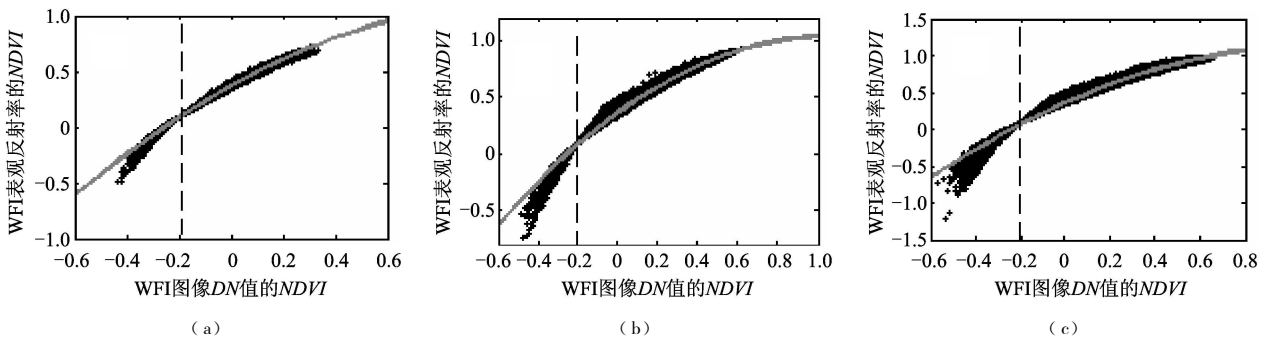


图 5 各试验区  $NDVI_{bc}$  与  $NDVI_p^*$  的散点图 (a) 河北地区；(b) 华中地区；(c) 韩国大部分地区

Fig 5 Scattering plots of  $NDVI_p^*$  and  $NDVI_{bc}$  for experiment sites (a) Hebei; (b) Center China; (c) Korea

先扣除 WFI 两个波段的计数值偏移量，再计算  $NDVI_{bc}$ ，并与  $NDVI_p^*$  比较。5 月 4 日华中地区的图像中该实验区的图像范围大 (1521 行 × 1144 列)，包括各种地物，具有代表性，选择该地区的图像来分析。先扣除计数值偏移量得到  $NDVI_{bc}$ ，再与  $NDVI_p^*$  进行二次拟合，结果如图 6 所示。拟合曲线的表达式如下：

$$y = -0.2174x^2 + 0.9313x + 0.2622 \quad (5)$$

式中， $x$  为  $NDVI_{bc}$ ， $y$  是拟合的 NDVI 记为  $NDVI_p^*$ 。在图 6 中，已没有上面所述的“转折点”，且  $NDVI_{bc}$  与  $NDVI_p^*$  的二次拟合度相当高，总残差小于 2，拟合度几乎达 (100%) (表 5)。

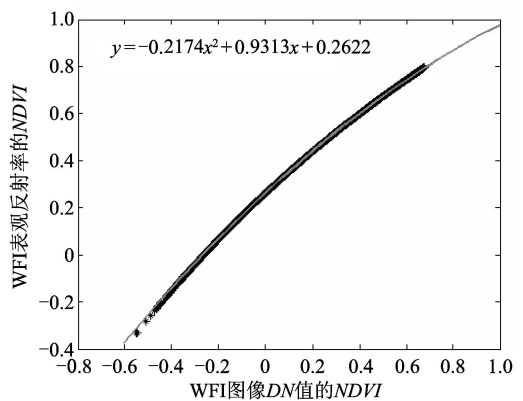


图 6  $NDVI_{bc}$  与  $NDVI_p^*$  的二次拟合

Fig 6 The quadratic polynomial fitting for  $NDVI_{bc}$  and  $NDVI_p^*$

将式 (5) 的拟合曲线应用于其他 4 个实验区的

表 5 NDV<sub>bc</sub>与 NDV<sub>l\*</sub>的二次拟合及其验证

Table 5 Validation for the quadratic polynomial fitting

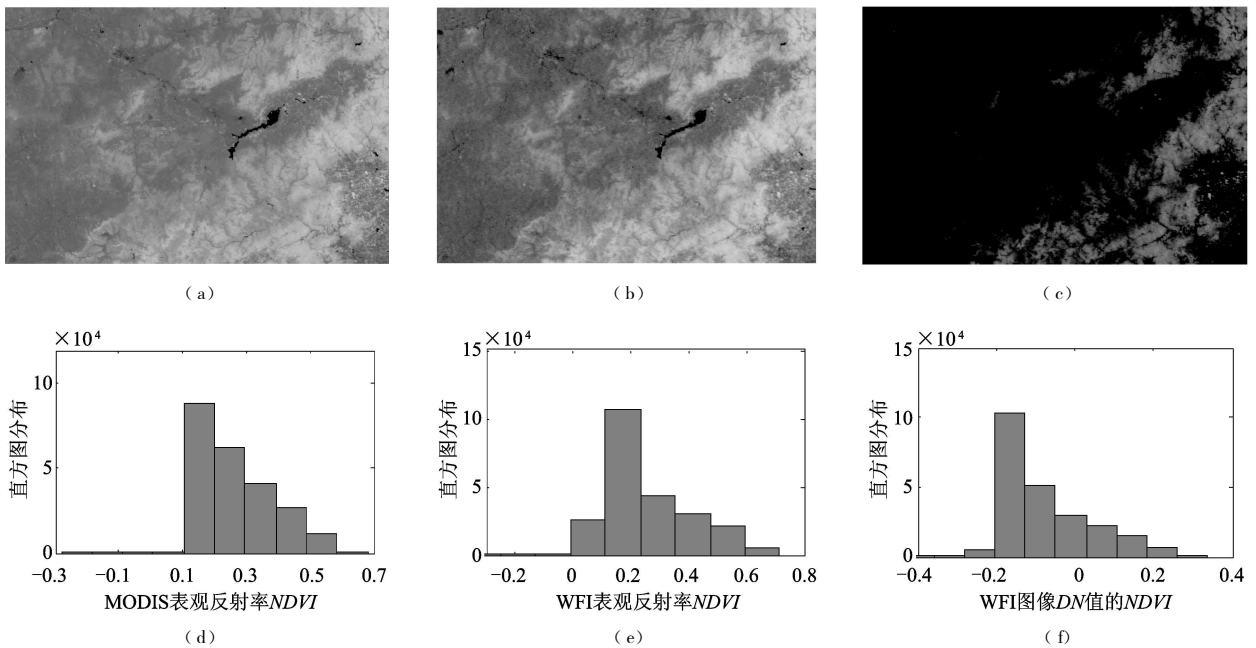
相差范围	±0.02	±0.01	±4%	±3%
华中地区	99.97	99.93	99.85	99.84
河北地区	99.92	99.77	98.43	96.69
东北地区	100	99.99	100	100
韩国地区	99.24	98.26	97.51	97.40
日本西南部	100	100	100	100

图像,其拟合度都相当高。将其余 4 个实验区的 DN 值 NDVI 代入拟合曲线计算得到表观反射率的 NDV<sub>l\*</sub>,当 NDV<sub>l\*</sub>与实际 NDV<sub>l\*</sub>绝对误差在 ±0.01 内时,4 个实验区的拟合度都可达 98%—100%;而当相对误差在 ±3% 时,拟合度也都达 95% 以上。东北地区与日本西南部地区两个实验区的图像的拟合度基本上都是 100% (表 5),这是因为在拟合过程中 NDVI 低端的值误差比较大,而这两个实验区的 NDVI 值都较高,误差相对小些。当 NDV<sub>bc</sub> 的值在 -0.4—+0.9 之间时,拟合值与实际值的误差在 ±0.01 内,当 NDV<sub>bc} > -0.5 时,拟合值的误差在 ±0.02 内。比较结果说明,当 NDV<sub>bc} 值 > -0.5 时,利用式 (5),可以较精确地从 WFI 的 NDV<sub>bc} 转换到 NDV<sub>l\*</sub>。</sub></sub></sub>

## 4.2 辐射定标对 WFI 与 MODIS 植被指数差异的影响

WFI 与 MODIS 之间的植被指数在数值上相差比较大,原因在于 WFI 与 MODIS 各对应波段存在光谱差异且比较明显,植被指数是两个波段之间的组合运算,这种组合加重了 WFI 与 MODIS 之间光谱的差异。另外植被指数受尺度效应的影响较大,两个传感器对地表的采样及分辨率的差异也会增加它们的植被指数的差别。通过比较 WFI 定标前后的植被指数与 MODIS 植被指数的差异来分析辐射定标的作用,归一化植被指数与比值植被指数是应用较广的植被指数,因此我们选择这两种植被指数来分析。

WFI 辐射定标前利用 DN 值计算得到的 NDVI 与 MODIS 的 NDVI 之间的差异要远远大于 WFI 定标后的差异。所有实验区的 NDVI 图都表明 WFI 的 NDV<sub>l\*</sub> 与 MODIS 反演得到的 NDVI 图像非常相似。图 7 分别是怀来试验区 MODIS 反演出的 NDVI、WFI 的 NDV<sub>bc}、NDV<sub>l\*</sub> 以及它们的直方图分布。从它们的 NDVI 图像及直方图可看到,MODIS 的 NDVI 与 WFI 的 NDV<sub>l\*</sub> 值主要分布在 0.1—0.2 左右,而 WFI 的 NDV<sub>bc} 主要在 -0.2—-0.1 之间。为了进一步验证 WFI 辐射定标前后 NDV<sub>bc}、NDV<sub>l\*</sub> 与</sub></sub></sub>

图 7 MODIS 与 WFI 怀来试验区的 DNVI 及其直方图 (a) 与 (d) MODIS 的 NDV<sub>l\*</sub>;(b) 与 (e) WFI 的 NDV<sub>l\*</sub>; (c) 与 (f) WFI 的 NDV<sub>bc}</sub>

MODIS 表现反射率 NDVI 的关系。另外选取华中地区经几何纠正的 WFI 和 MODIS 大小为 1120 像元  $\times$  1070 像元的子图像。分别计算该试验区 WFI 的  $NDVI_{bc}$ 、 $NDVI_r$ 、MODIS 表现反射率 NDVI 及它们相应的直方图。其对比结果也与怀来试验区类似。

本文以包括怀来试验区的 WFI 及 MODIS 图像 (396 行  $\times$  589 列) 为实验区, 在 WFI 与 MODIS 的 DN 值图像上选择 14 个较均匀的地点, 分别计算出每个点的 WFI 定标前后的 NDVI 及 MODIS 表现反射率 NDVI 并比较各点的差异, 如表 6。表 6 中的实验点包括了各种典型地物: 水体、沙地、滩涂、亮砂地、植被及城区等。从表 6 可以看到, 所有的这些地

物在 WFI 图像上的  $NDVI_{bc}$  都很低, 而  $NDVI_r$  较高, 与 MODIS 的  $NDVI_r$  接近。WFI 图像的  $NDVI_{bc}$  与 MODIS 的  $NDVI_r$  的差异几乎都在 50% 以上, 水体差异小些, 但也在 50%—70% 左右; 沙地和滩涂的差异基本上在 200% 左右; 植被覆盖区的差异比水体大些但比沙地等裸地小, 在 50%—100% 之间。WFI 图像的  $NDVI_r$  与 MODIS 的  $NDVI_r$  的差异较小, 除了一个水体实验点外, 其他比 WFI 的  $NDVI_{bc}$  的小得多。在 14 个实验点中, 有 10 个实验点的 NDVI 差异小于或接近于 10%; 有 3 个实验点的差异在 20%—30% 左右。表 6 与图 7 都说明 WFI 的  $NDVI_r$  与 MODIS 的 NDVI 数值上更加接近。

表 6 辐射校正前后 WFI 的 NDVI 与 MODIS 的 NDVI 的差异

Table 6 The variations of NDVI from MODIS and NDVI from WFI with and without radiometric calibration

	WFI 的 DN 值 NDVI	WFI 的表现反射率 NDVI	MODIS 的表现反射率 NDVI	WFI 辐射校正前与 MODIS 相差 %	WFI 辐射校正后与 MODIS 相差 %
实验点 1(水体)	-0.27536	-0.078739	-0.18832	46.219	-58.189
实验点 2(水体)	-0.3125	-0.15777	-0.17647	77.084	-10.594
实验点 3(滩涂)	-0.1826	0.1124	0.1629	-212.09	-31.002
实验点 4(滩涂)	-0.12056	0.19493	0.20002	-160.27	-2.5439
实验点 5(亮砂地)	-0.15796	0.1423	0.16	-198.72	-11.064
实验点 6(亮砂地)	-0.18171	0.11281	0.14699	-223.62	-23.253
实验点 7(沙地)	-0.14568	0.16058	0.16825	-186.59	-4.5587
实验点 8(沙地)	-0.13967	0.17148	0.18544	-175.32	-7.531
实验点 9(沙地)	-0.16087	0.14025	0.18121	-188.77	-22.601
实验点 10(作物)	0.11249	0.46603	0.52165	-78.436	-10.663
实验点 11(植被)	0.036074	0.38843	0.39134	-90.782	-0.74255
实验点 12(植被)	0.28911	0.64849	0.60196	-51.972	7.7284
实验点 13(植被)	0.11088	0.50299	0.45883	-75.834	9.6249
实验点 14(城区)	-0.13337	0.18358	0.18534	-171.96	-0.95297

另外, 我们分别计算怀来及华中实验区 WFI 定标前后 RVI、MODIS 的 RVI 及它们的直方图分布, 直方图的分布规律也与 NDVI 类似。同样以包括怀来试验区的 WFI 及 MODIS 图像 (396 行  $\times$  589 列) 为实验区, 以上述 14 个较均匀的地表计算出每个点的 WFI 定标前后的 RVI 及 MODIS 表现反射率的 RVI。在这 14 个实验点中, WFI 定标前的 RVI 数值约在

0.5—2; WFI 定标后的 RVI 与 MODIS 的 RVI 范围相近, 约在 0.7—5。WFI 定标前的 RVI 与 MODIS 的 RVI 的相差在 -50% 左右, 农作物及植被的差异相对要大一些, 一般在 -50% 以上; 而 WFI 定标后的 RVI 与 MODIS 的 RVI 的差异比较小, 除了实验点 1 外, 其余小于或在 -15% 左右。以上说明, WFI 的 RVI 与 MODIS 的 RVI 的差异比两个传感器的 NDVI

差异小,这可能是因为 NDVI 的波段组合比 RVI 更复杂,而波段组合运算使得两个传感器之间的光谱差异更加明显。

## 5 结论与讨论

本文利用 MODIS 作为参考传感器,对 WFI 进行交叉定标,得到 WFI 两个波段的辐亮度及表观反射率的增益系数及数字计数值的偏移量。并利用辐射定标结果分析 WFI 定标前后 NDVI 的关系以及 WFI 定标前后和 MODIS 的 NDVI 与 RVI 的差异,得到以下结论:

(1) 利用 MODIS 对 WFI 进行辐射交叉定标不仅简单易用且精度较高;

(2) 由于 WFI 两个波段的数字计数值的偏移量较大,WFI 定标前后 NDVI 的散点图存在转折点;当从 DN 值中扣除截距后, DN 值与表观反射率 NDVI 之间为二元非线性相关性,拟合度高达 99%。

(3) 辐射定标后 WFI NDVI 及 RVI 的数值比辐射定标前的数值,与 MODIS 的 NDVI 及 RVI 更接近,可用于植被的定量化研究。

本研究中还有些需要进一步研究和探讨的地方。首先文章在进行辐射交叉定标时,将 MODIS 的分辨率从 250m 用最近邻法采样成 258m,没有考虑 MODIS 的 MTF 影响,需要进一步探讨其对交叉定标带来的影响;其次,交叉定标中的农作物定标点的 MODIS 近红外波段 DN 值均值的偏差比较大,可能对定标结果有影响;第三,由于选择的定标点面积不够大,使得定标结果可能会有混合像元带来的误差,其影响有待于进一步验证。

**致谢** 资源卫星中心提供了 WFI 图像及大气测量参数,遥感所开放室的辐射研究组提供了对 MODIS L1B 数据几何纠正的程序以及大量的地物光谱数据,在此一并致谢!

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Gu M L. Methods for the In-flight Absolute Radiation Calibration of Space-borne Remote Sensors [ J ]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2000, **21**(1): 16-21. [ 顾明澧. 星载遥感器在飞行时的绝对辐射定标方法 [ J ]. *航天返回与遥感*, 2000, **21**(1): 16-21. ]
- [ 2 ] Slater P N, Biggar S F, Holm R G, et al. Reflectance and Radiance-based Methods for the In-flight Absolute Calibration of Multispectral Sensors [ J ]. *Remote Sensing of Environment* 1987, **22**(1): 11-37.
- [ 3 ] Santer R, Gu X F, Guyot G, et al. SPOT Calibration at the La Crau Test Site (France) [ J ]. *Remote Sensing of Environment* 1992, **41**: 227-237.
- [ 4 ] Richter R. On the In-flight Absolute Calibration of High Spatial Resolution Spaceborne Sensors Using Small Ground Targets [ J ]. *Int J Remote Sensing*, 1997, **18**(3): 2827-2833.
- [ 5 ] Thome K J, Crowther B G, Biggar S F. Reflectance and Irradiance-based Calibration of Landsat-5 Thematic Mapper [ J ]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1997, **23**: 309-317.
- [ 6 ] Thome K J. Absolute Radiometric Calibration of Landsat 7 ETM+ Using the Reflectance-based Method [ J ]. *Remote Sensing of Environment* 2001, **78**: 27-38.
- [ 7 ] Kurtis J, Biggar S F, Thome K J, et al. In-flight Radiometric and Spatial Calibration of EO-1 Optical Sensors [ A ]. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium [ C ]*. Sydney, Australia, 2001.
- [ 8 ] Li X C, Min X J, Gu Y Q, et al. An Application Research on Absolute Radiometric Calibration for CBERS-1 Satellite [ J ]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2002, **23**(3): 43-47. [ 李杏朝, 闵祥军, 顾英圻等. CBERS-1 卫星绝对辐射校正试验应用初探 [ J ]. *航天返回与遥感*, 2002, **23**(3): 43-47. ]
- [ 9 ] Zhang D Y, Qiao Y L, Yi W N, et al. The Radiance-based Method Research of Experimentation on Radiometric Calibration Site—the Comparison of Synchronous Observing Instruments [ J ]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2002, **15**(3): 9-13. [ 张冬英, 乔延利, 易维宁等. 于辐照度法的场地辐射校正试验研究——场地同步观测仪器的比较 [ J ]. *光电子技术与信息*, 2002, **15**(3): 9-13. ]
- [ 10 ] Li X Y, Gu X F, Min X J, et al. Radiometric Cross-calibration of the CBERS-02 CCD with the TERRA MODIS [ J ]. *Chinese Science D*, accepted [ 李小英, 顾行发, 闵祥军等. 利用 MODIS 对中巴资源卫星 CCD 进行交叉定标 [ J ]. *中国科学 D 辑*, 已接收. ]
- [ 11 ] Vermote E, Santer R, Deschamps P Y, et al. In-flight Calibration of Large Field of View Sensors at Short Wavelengths Using Rayleigh Scattering [ J ]. *Int J Remote Sensing*, 1992, **13**(18): 3409-3429.
- [ 12 ] Kaufman Y J, Holber B N. Calibration of the AVHRR Visible and Near-IR Bands by Atmospheric Scattering, Ocean Glint and Reflection [ J ]. *Int J Remote Sensing*, 1993, **14**(1): 21-52.
- [ 13 ] Vermote E, Kaufman Y J. Absolute Calibration of AVHRR Visible and Near-infrared Channels Using Ocean and Cloud Views [ J ]. *Int J Remote Sensing*, 1995, **16**(13): 2317-2340.
- [ 14 ] Patrice Henry, Aline Meygret. Calibration of HRVIR and VEGETATION Cameras on SPOT4 [ J ]. *Adv Space Res*, 2001, **28**(1): 49-58.
- [ 15 ] Olivier Hagolle, Philippe Goloub, Pierre-Yves Deschamps, et al. Results of POLDER In-Flight Calibration [ J ]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, **37**(3).
- [ 16 ] Teillet P M, Slater P N, Ding Y, et al. Three Methods for the

- Absolute Calibration of the NOAA AVHRR Sensors In-flight[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, **31**(3): 105–120.
- [17] Nagaraja Rao C R, Chen J. Inter-satellite Calibration Linkages for the Visible and Near-infrared Channels of the Advanced Very High Resolution Radiometer on the NOAA-7, -9, and -11 Spacecraft [J]. *Int J Remote Sensing*, 1995, **16**(11): 1931–1942.
- [18] Nagaraja Rao C R, Zhang N, Sullivan J T. Inter-calibration of Meteorological Satellite Sensors in the Visible and Near-infrared [J]. *Adv Space Res*, 2001, **28**(1): 3–10.
- [19] Teilleta P M, Barkerb J L, Markham b B L, et al. Radiometric Cross-calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM Sensors Based on Tandem Data Sets[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **78**: 39–54.
- [20] Manfred Schroeder, Laurent Poutier, Rupert Müller, et al. Intercalibration of Optical Satellites-A Case Study with MOMS and SPOT[J]. *Aersp Sci Technol*, 2001, **5**: 305–315.
- [21] Tong J J. The Study on Synthesis Radiometric Calibration Methods for Satellite Sensors [D]. PHD dissertation, Beijing Normal Univ., 2004. [童进军. 遥感卫星传感器综合辐射定标方法研究 [D]. 北京师范大学博士研究生学位论文, 2004.]
- [22] Rasmus Fensholt, Inge Sandholt, Michael Schultz Rasmussen. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the Relation between fAPAR and NDVI in a Semi-arid Environment Using in Situ Measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **91**: 490–507.