

基于南海 PY30-1 平台的 MODIS 水色卫星替代定标

高 飞 朱建华 杨安安 李 军 韩 冰

(国家海洋技术中心, 天津 300112)

摘要 为提高水色卫星遥感数据的质量并实现遥感定量化应用目标, 卫星传感器精确的辐射定标是重要前提和关键。采用南海 PY30-1 平台上观测的水体与大气光学特性参数, 通过反射率基法对 Aqua 卫星上 MODIS 传感器的可见-近红外波段进行替代定标。结果表明, 定标增益因子与 MODIS 国外研究结果非常接近, 除 443 nm 波段偏差较大外, 相对差异均小于 5%。证明在海上利用反射率基法进行替代定标是可行的, 能够给出精确的替代定标增益因子。

关键词 传感器; 替代定标; 反射率基法; 增益因子

中图分类号 TL822⁺.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.s101002

Vicarious Calibration of MODIS Based on PY30-1 Platform in South China Sea

Gao Fei Zhu Jianhua Yang An'an Li Jun Han Bing

(National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China)

Abstract In order to improve the quality of ocean color satellite remote sensing data and achieve quantitative applications, the accurate calibration of satellite sensor is the key. By using the water and atmospheric optical parameters measured in the South China Sea PY30-1 platform, we have carried out the vicarious calibration of Aqua satellite's moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) sensor by reflectance-based method. Our results show that the calibration gain factor is very close to the MODIS research. In addition to 443 nm band, the calibration gain factor relative deviations were less than 5%. This study shows that the reflectance-based method can be applied to the China Sea, we can get the accurate calibration gain factor.

Key words sensors; vicarious calibration; reflectance-based method; gain factor

OCIS codes 150.1488; 010.0280; 010.5620

1 引 言

自从新一代水色卫星传感器 SeaWiFS、MODIS、POLDER 与 MERIS 等问世以来, 人们更加重视对传感器的辐射测量结果进行精确定标, 尤其是在卫星发射后计划了相应的在轨辐射定标的工作。在星载传感器定量化遥感技术中, 在轨替代定标是非常重要的。不同于卫星上的定标系统^[1], 替代定标将卫星传感器和大气校正算法作为整个系统加以考虑。替代定标完善了水色卫星的定标体系, 也为大气校正算法的测试和改进提供依据, 是传感器准确反演水色信息的重要前提。

水色卫星在轨替代定标方法主要有 4 种^[1~4]: 反射率基法、辐亮度基法、改进反射率基法与卫星大气校正法^[5]。这 4 种方法都是以现场观测数据为主

的独立的替代定标方法。P. Jeremy 与 Bryan 等以卫星大气校正法为主, 利用 2005 年 8 月内 20 个 MODIS Aque 与夏威夷 Lanai 的 MOBY 同步水体观测数据进行了替代定标^[6], 他们利用基于 MODIS 卫星反演算法获取精确的替代定标增益因子。2010 年 Frederic 与 Giuseppe 利用亚得里亚海北部与波罗的海试验塔上观测的归一化离水辐亮度, 已获取了水色卫星可见光波段在指定区域的替代定标系数, 这些系数与 SeaWiFS 和 MODIS 卫星在贫营养水域获取的系数是一致的^[7]。NASA 的海洋生物处理组也以卫星大气校正法为主, 在 2009 年利用全球水色数据集给出 Aque MODIS 精确的替代定标增益因子^[8]。2000 年 K. Arai^[9]利用反射率基法正演卫星入瞳处总辐亮度, 发现 ADEOS/AVNIR 卫

收稿日期: 2013-01-01; **收到修改稿日期**: 2013-02-01

基金项目: 国家 863 计划(2008AA09A403)和公益性专项-海洋环境要素水色遥感技术与应用示范项目(2010418030-05)资助课题。

作者简介: 高 飞(1977—), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事大气气溶胶观测技术、水色卫星替代定标与大气校正算法等方面的研究。E-mail: gaofei_1977@163.com

星的波段 1 和波段 2 分别有 -3.5% 和 7.2% 的偏差,且其波段 3 和波段 4 有大约 -20% 的偏差, OCTS 卫星的偏差在 $-4\% \sim 5\%$; 2004 年 K. Thome 等^[10] 在内华达州利用反射率基法对 Terra 卫星上 ASTER、MISR 和 MODIS 传感器进行定标,该方法进行了 5 个传感器 (ALI, ETM+, MISR, MODIS, SeaWiFS) 的可见与近红外波段的比较,偏差小于 5% ($\pm 2.5\%$); 2010 年 A. Angal 等^[11] 利用反射率基法跟踪 ETM+ 和 Terra MODIS 传感器辐射的稳定性,发现 ETM+ 波段 1 和 MODIS 波段 3 在 10 年内很稳定,大气层顶反射率的年变化小于 0.1% ,且可见光波段长期偏差要大于近红外波段。2000 年 B. J. Sohn 等^[12] 在韩国近海海域利用反射率基法给 OSMI 卫星传感器进行替代定标,在晴天下定标结果不确定度在 5% 以内; 巩慧等^[13] 在 2007 年 5 月采用反射率基法对 MODIS 可见光-近红外波段开展定标与真实性检验,得到准确、可靠的卫星定标系数。水色卫星替代定标是跟踪卫星传感器性能的重要手段之一,也是精确反演海洋水色遥感信息(叶绿素浓度、悬浮泥沙浓度、有色溶解有机物、水质信息等)的重要基础,只有精确地获取卫星增益因子(或定标系数)才能达到精确量化应用的目标。

本文针对在轨 MODIS 可见光-近红外波段,利用南海 PY30-1 平台上观测设备获取的水体与大气光学等参数,以最新版本的 6SV 矢量辐射传输算法为基础算法,开展 MODIS 传感器替代定标工作。

2 替代定标基本原理

到达水色卫星传感器入瞳处的总辐亮度 $L_t(\lambda)$ 可表示为

$$L_t(\lambda) = L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + t(\lambda)L_{wc}(\lambda) + t(\lambda)L_w(\lambda), \quad (1)$$

式中 $L_r(\lambda)$ 指大气分子散射辐亮度; $L_a(\lambda)$ 指气溶胶散射辐亮度(其中包括气溶胶与大气分子之间的多次散射辐射); $L_{wc}(\lambda)$ 是海面白帽辐亮度; $L_w(\lambda)$ 指来自水体的离水辐亮度; $t(\lambda)$ 是海面到卫星传感器的大气漫射透过率。

目前,为了减小替代定标的不确定度,替代定标主要以大气层顶卫星入瞳处辐射传输算法正演与卫星观测辐亮度比值为主^[6,12,14]。替代定标增益因子可表示为

$$g = \frac{L_i^t}{L_i}, \quad (2)$$

式中 L_i^t 表示辐射传输算法正演的卫星入瞳处总辐亮度, L_i 表示卫星观测总辐亮度。

3 基于海上平台的反射率基法及定标流程

3.1 反射率基法

针对 Aqua 卫星 MODIS 传感器,以南海 PY30-1 平台为固定站点,以反射率基法为主,确立卫星定标增益因子。反射率基法是主要的、独立的水色卫星替代定标方法,是当卫星飞越同步站点上空时,进行现场水体反射率、大气光学和常规气象等同步测量,通过现场数据处理得到中间参数输入 6SV 大气辐射传输算法,计算出卫星入瞳处可见光-近红外波段总辐亮度,并与卫星观测总辐亮度值建立关系,获得替代定标增益因子^[15]。该方法的精度取决于水体离水辐亮度、大气气溶胶光学厚度等参数的准确获取。同时,大气辐射传输算法自身精度也是替代定标的关键。

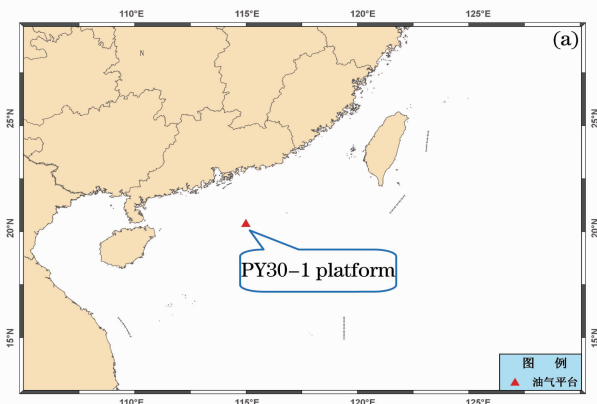


图 1 (a)南海 PY30-1 平台站点与(b)观测仪器安装位置

Fig. 1 (a) South sea PY30-1 placferm and (b) installation position of observation instruments

南海 PY30-1 平台 (E114. 94°, N20. 24°, 如图 1 所示) 距广州岸边约 200 km, 水深约 200 m。平台附近水域基本属于 I 类水体, 同时该海域大气气溶胶主要以海洋型为主。因此, 该平台是较理想的海上替代定标站点, 平台上安装有 SAS 水上光谱仪,

CE318 自动太阳光度计, 自动气象站等设备, 如图 2 所示, 为开展替代定标提供有力的数据集。SAS 水上光谱仪、CE318 自动太阳光度计与自动气象站均采用无人值守的自动观测模式进行观测, 确保卫星过顶前后 1 h 内有准同步数据。

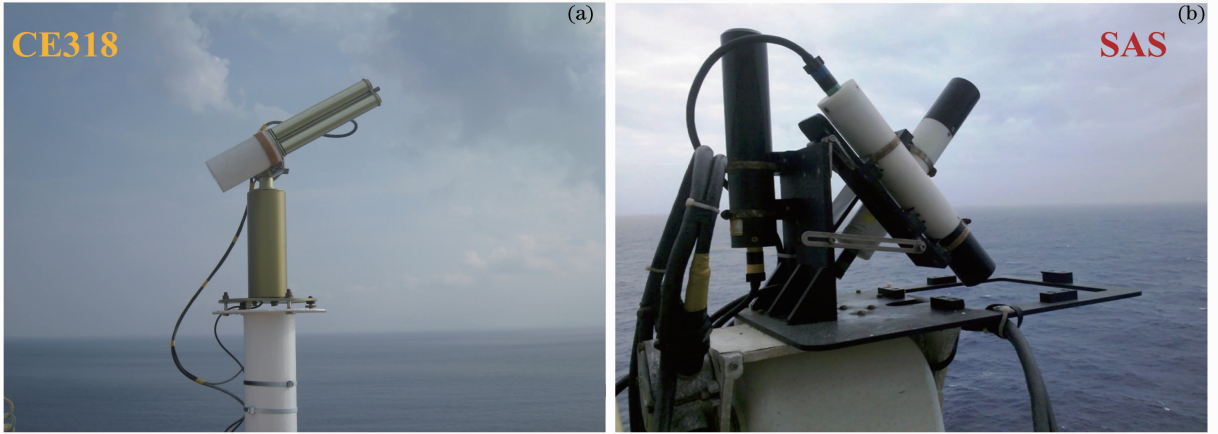


图 2 (a) CE318 自动太阳光度计与 (b) SAS 水上光谱仪

Fig. 2 (a) CE318 auto sun photometer and (b) SAS water spectrometer

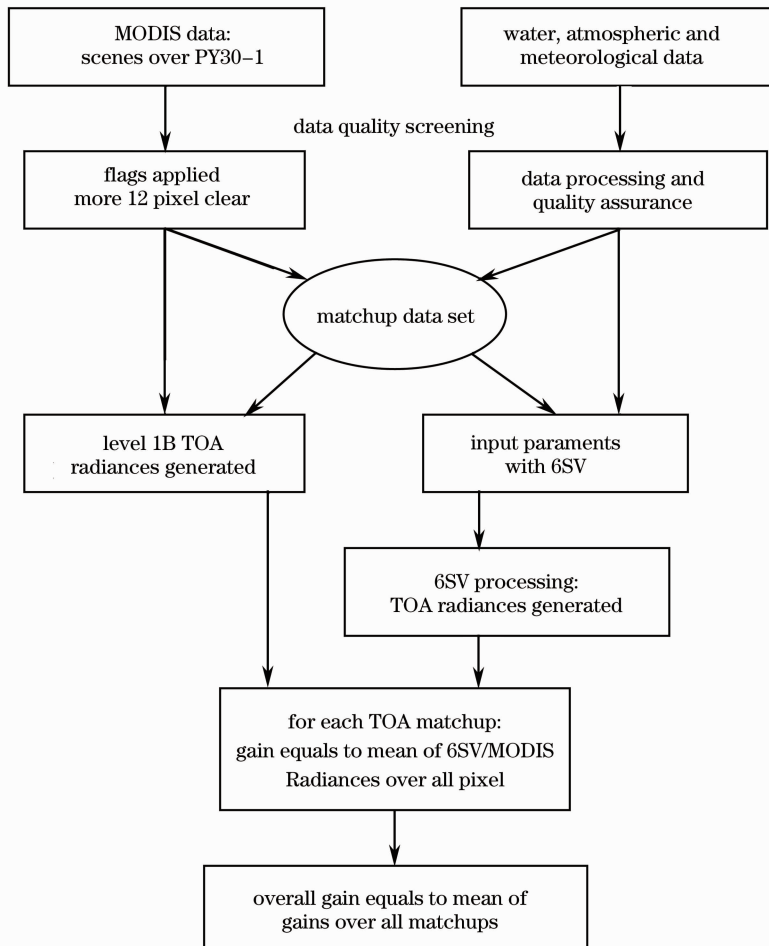


图 3 基于 PY30-1 平台的 MODIS 传感器替代定标流程

Fig. 3 Process of vicarious calibration of MODIS sensor based on PY30-1 platform

3.2 替代定标流程

星地数据匹配、现场水体与大气参数准确获取以及辐射传输算法精度是反射率基法替代定标的关键。对于星地数据匹配来讲,需要确立严格的匹配条件;对于现场相关参数的准确获取,需要进行严格的质量控制;对于辐射传输算法来讲,需要选择高精度的算法。目前,以最新版本的 6SV 矢量辐射传输算法为基础算法。6SV 是在 6S 标量版本的基础上发展而来的。该模型采用了近似和逐次散射(SOS)算法来计算散射和吸收。它能够通过朗伯与非均匀地表来精确模拟卫星和地面观测(包括高海拔目标),在计算斯托克斯矢量的 4 个元素中,考虑到偏振的影响。目前,6SV 是生成 MODIS 大气校正算法查询表的基本辐射传输算法。基于 PY30-1 平台的 MODIS 反射率基法替代定标流程如图 3 所示。

4 星地匹配数据集

对于地面与卫星数据的匹配来讲,以平台上 SAS 水上光谱仪等观测仪器所在的像元为中心点,在 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 范围内,求出每个像元对应的大气层顶总辐亮度及定标增益因子,然后取 25 个像元平均值作为最终增益因子。在开展 MODIS 卫星替代定标之前,首先必须建立星地匹配数据集。参照 SeaWiFS 与 MODIS 等卫星的相关要求,初步确立海上替代定标数据集匹配条件,以平台为中心点的卫星 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 内至少有 12 个像元符合匹配要求:

- 无陆地标识
- 无云与海冰标识
- 无太阳耀斑标识
- 无散射光标识
- 无大气层顶总辐亮度标识
- 无大气校正失效标识
- 无浑浊水体标识
- 无 coccolithophores 标识
- 550 nm 离水辐亮度小于 $0.15 \text{ mW}/(\text{cm}^2/\text{sr}/\mu\text{m})$
- 太阳天顶角小于 70°
- 卫星观测天顶角小于 56°
- 870 nm 处气溶胶光学厚度小于 0.1

依据以上匹配条件,针对海上 PY30-1 平台与 MODIS 传感器进行了数据匹配。从 2011 年 8 月至 2012 年 6 月总共得到 7 d 可用于替代定标的卫星同步数据,但其中仅有 2011 年 11 月 18 日、2012 年 1 月 28 日和 2012 年 3 月 18 日拥有现场同步观测数

据可进行替代定标。

5 同步观测与处理

5.1 水体反射率

SAS 水上光谱仪采用整点间隔模式进行水体反射率的连续观测。光谱仪在海面上方测量海面的总辐射量主要源于三方面的贡献:天空光海面反射的辐射贡献、离水辐射的辐射贡献以及耀斑、白帽等随机污染的辐射贡献。并可表示为

$$L'_i = L_w + \rho_{\text{Sea}} L_i + \Delta, \quad (3)$$

式中 L'_i 是光谱仪对海面测量的总辐射亮度, L_w 是需要得到的离水辐亮度, ρ_{Sea} 是气-水界面对天空光的反射率, L_i 为天空漫散射光的辐射, Δ 为耀斑、白帽等随机辐射影响。光谱仪现场观测部分安装在可转动云台上,可根据太阳方位角的变化,改变观测方位角以减小耀斑等因素干扰。水体总反射率可表示为

$$\rho = \frac{L'_i}{E_s}, \quad (4)$$

式中 E_s 是气-水界面以上下行光谱总辐照度。2012 年 1 月 28 日水体总反射率如图 4 所示。

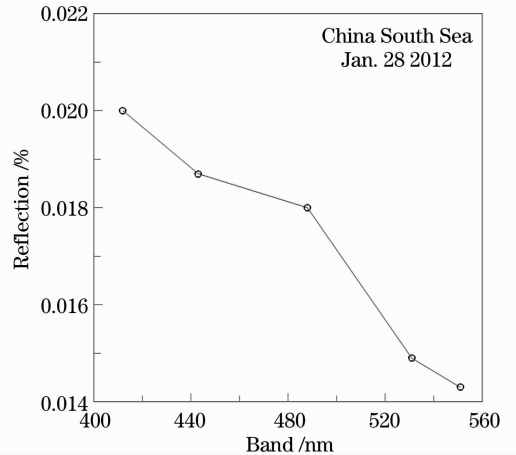


图 4 2012 年 1 月 28 日 SAS 仪器 5 个波段水体总反射率

Fig. 4 Total water reflectance of five bands for SAS instrument on January 28, 2012

5.2 大气光学特性

在自动观测模式下,利用 CE318 型自动太阳光度计的太阳直射辐射测量,根据 Beer 定律可计算出气溶胶光学厚度(AOT)。同时利用 CE318 等高度角等天空辐射扫描可反演气溶胶复折射指数与粒子谱分布等重要参数。在生成数据集之前,必须进行云干扰滤除和质量控制^[16],以确保现场大气观测数据的准确度。以卫星过顶时刻为准,利用前后 1 h 内观测数据进行插值获得准同步大气光学参数。

2012 年 1 月 28 日 MODIS 在 14:10 过顶, 550 nm 气溶胶光学厚度为 0.164。气溶胶光学厚度变化如图 5 所示, 气溶胶光学厚度随波长的增加而减小, 具有明显的选择性。380 nm 波段处气溶胶光学厚度最高, 而 1246 nm 波段气溶胶光学厚度要比 1020 nm 波段偏大。气溶胶粒子谱分布如图 6 所示, 气溶胶体积谱呈现双峰分布特征, 且体积偏小。峰值分别在 0.17 μm 与 2.5 μm 附近。

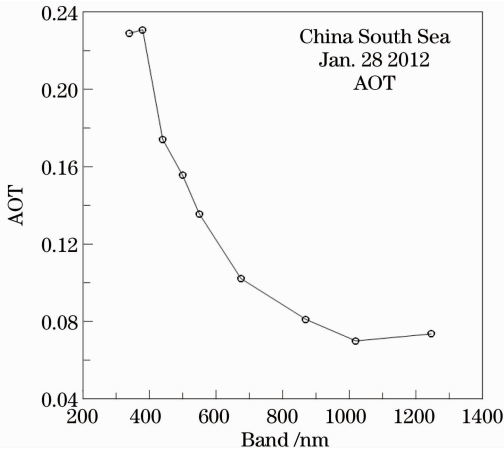


图 5 2012 年 1 月 28 日卫星过境气溶胶光学厚度的波长变化

Fig. 5 Aerosol optical thickness changed with wavelength when satellite passed by on January 28, 2012

6 定标增益因子

将 MODIS 可见光-近红外波段的响应函数、水体反射率、550 nm 处气溶胶光学厚度、气溶胶粒子谱分布、气溶胶复折射指数、水气总量、臭氧总量以及太阳和卫星几何参数等输入到 6SV 辐射传输

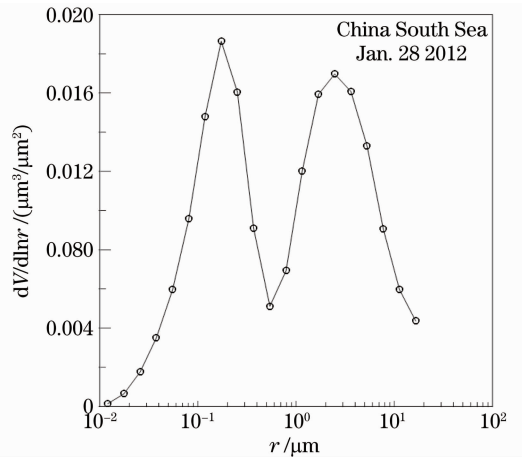


图 6 2012 年 1 月 28 日卫星同步时现场反演的气溶胶体积谱分布

Fig. 6 A satellite synchronization field inversion volume spectrum on January 28, 2012

模型, 计算 MODIS 传感器 7 个波段卫星入瞳处总辐亮度。由于 667~870 nm 的 4 个波段辐射测量误差较大, 因此利用现场风速、风向、盐度和叶绿素浓度代替其反射率, 而其他参数不变。Aque MODIS 过境时水气总量 2.278 g/cm^2 , 臭氧总量 0.232 cm-atm 。由于 2011 年 11 月 18 日与 2012 年 3 月 18 日的现场观测数据质量不高, 导致增益因子偏差较大。因此主要采用 2012 年 1 月 28 日的定标结果。2012 年 1 月 28 日的增益因子与 2005 年^[6]和 2009 年^[7,8]国外替代定标历史数据相对偏差很小, 除 443 nm 波段外, 其他所有波段的相对偏差基本在 5% 以内, 如表 1 所示。表中 AAOT 是阿尔塔海洋观测塔, 位于亚得里亚海北部 (45°19'N, 12°30'E), 利用 124 个同步数据在 2009 年给出 MODIS 定标增益因子。

表 1 2012 年 1 月 28 日定标增益因子与相对偏差

Table 1 Calibration gain factor and relative deviations on January 28, 2012

MODIS Band /nm	2005 g	2009 g	AAOT g	2012-01-28 g	Deviations /% with 2005	Deviations /% with 2009	Deviations /% with AAOT
412	0.9710	0.9768	0.9809	0.9753	0.44	-0.15	-0.57
443	0.9848	0.9936	0.9892	0.9438	-4.34	-5.27	-4.81
488	0.9795	0.9972	0.9859	0.9645	-1.56	-3.39	-2.22
531	0.9870	0.9946	0.9916	1.0050	1.79	1.04	1.33
551	0.9850	0.9950	0.9953	1.0003	1.53	0.53	0.50
667	0.9797	0.9961	0.9946	1.0234	4.27	2.67	2.81
678	0.9776	0.9974	0.9908	1.0275	4.86	2.93	3.57
748	0.9855	0.9977	—	0.9966	1.12	-0.11	—
870	1	1	—	0.9863	-1.39	-1.39	—

MODIS 卫星 443 nm 波段偏差较大初步分析是:1) SAS 观测方位角调节受到限制,观测中受到了海面镜面反射一定影响;2)该海域叶绿素含量较低,水体离水辐亮度变化较大。2009 年的相对偏差基本比 2005 年要小。总体上讲,利用南海海上 PY30-1 平台开展水色卫星替代定标,定标结果准确,满足卫星替代定标要求。

7 结 论

卫星遥感定量化应用的前提和关键在于传感器精确的辐射定标。针对 Aqua MODIS 水色卫星,通过 PY30-1 平方观测数据首次在我国海上利用反射率基法对 MODIS 传感器上可见-近红外波段进行替代定标,且给出精确的定标增益因子,定标增益因子 5% 的偏差达到国内先进水平。为了进一步提高替代定标精度,达到国内外先进的 1% 不确定度要求,须开展海面非朗伯体反射与海上气溶胶模式确立等关键技术研究,以提高现场数据精度。

致谢 对唐军武在大气辐射传输算法与定标检验方面给予的帮助和指导表示感谢。

参 考 文 献

- 1 X. Xiong, J. Sun, J. Esposito *et al.*. MODIS reflective solar bands calibration algorithm and onorbit performance [C]. *SPIE*, 2002, **4891**: 95~104
- 2 S. Biggar, M. Dinguirard, D. Gellman *et al.*. Radiometric calibration of SPOT 2 HRV-a comparison of three methods [C]. *SPIE*, 1991, **1943**: 155~162
- 3 P. N. Slater, S. F. Biggar, R. G. Holm *et al.*. Reflectance and radiance based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1987, **22**(1): 11~37
- 4 M. Dinguirard, P. N. Slater. Calibration of space-multispectral

- imaging sensors; a review [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1999, **68**(3): 194~205
- 5 R. E. Eplee, W. D. Robinson, S. w. Bailey *et al.*. Calibration of SeaWiFS. II. vicarious techniques [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(36): 6701~6718
- 6 P. J. Werdell, B. A. Franz, S. W. Bailey *et al.*. Recent advances in the operational vicarious calibration of visible and near-infrared ocean color satellite radiometry [J]. *Ocean Optics XVIII, Montreal, Quebec*, 2006. 9~13
- 7 F. Melin, G. Zibordi. Vicarious calibration of satellite ocean color sensors at two coastal sites [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(5): 798~810
- 8 R. E. Eplee, Jr., J. Q. Sun *et al.*. Cross calibration of SeaWiFS and MODIS using on-orbit observations of the Moon [J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(2): 120~133
- 9 K. Arai. Atmospheric correction and vicarious calibration of ADEOS-AVNIR and OCTS [J]. *Adv. Space Res.*, 2000, **25**(5): 1051~1054
- 10 K. Thome, S. Biggar, H. J. Choi. Vicarious calibration of TERRA ASTER, MISR, and MODIS [C]. Conference on Earth Observing Systems IX, 2004, IX: 290~299
- 11 A. Angal, X. Xiong, T. Choi *et al.*. Using the sonoran and libyan desert test sites to monitor the temporal stability of reflective solar bands for landsat 7 ETM+ and terra MODIS sensors [J]. *J. Appl. Remote Sens.*, 2010, **4**(1): 1~12
- 12 B. J. Sohn, D. H. Kim, S. J. Yoo *et al.*. Examining a vicarious calibration method for the TOA radiance initialization of KOMPSAT OSMI [J]. *J. Korean Society of Remote Sensing*, 2000, **16**(4): 305~313
- 13 Gong Hui, Tian Guoliang, Yu Tao *et al.*. Calibration and validation of MODIS visible and near-infrared bands [J]. *J. Beijing Jiaotong University*, 2010, **34**(1): 109~113
- 14 巩 慧, 田国良, 余 涛等. MODIS 可见近红外波段定标与真实性检验[J]. *北京交通大学学报*, 2010, **34**(1): 109~113
- 15 S. B. Hooker, E. R. Firestone, R. E. Eplee *et al.*. Algorithm Updates for the Fourth SeaWiFS Data Reprocessing. SeaWiFS Postlaunch Technical Report Series [R]. NASA Technical Memorandum 2003-206892, 22
- 16 S. F. Biggar. In-Flight Methods for Satellite Sensor Absolute Radiometric Calibration [D]. America: the University of Arizona, USA, 1990
- 16 A. Smirnov, B. N. Holben, T. F. Eck *et al.*. Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2000, **73**(3): 337~349

栏目编辑: 韩 峰