

文章编号 1004-924X(2015)07-1874-06

## FY-3C/可见光红外扫描辐射计中红外通道太阳污染的识别和修正

徐寒列, 胡秀清\*, 徐娜, 闵敏

(国家卫星气象中心 中国遥感卫星辐射测量与定标重点开放实验室, 北京 100081)

**摘要:** 基于风云-3C/可见光红外扫描辐射计(FY-3/CVIRR)的中红外通道( $3.7\ \mu\text{m}$ )的太阳污染现象和发生规律, 分析了太阳污染出现的时空特征, 提出了初步判识并修正北半球太阳污染数据的方法, 并就太阳污染对定标系数和黑体亮温的影响做了定量的评估。结果表明, 对于FY-3C/VIRR的中红外通道, 太阳光线照射到定标黑体时所形成的北半球高纬度太阳污染主要出现在太阳天顶角在 $85^\circ\sim 118^\circ$ 之间的位置时; 由太阳污染导致的该区域地球观测亮温日平均偏差为4.5 K左右, 最大偏差达到15 K左右。通过对逐日太阳污染数据进行识别, 并采用污染前后定标系数进行线性求差值, 可以初步修正太阳污染对定标系数带来的异常影响。

**关键词:** 风云-3C/可见光红外扫描辐射计(FY-3C/VIRR); 太阳污染; 中红外通道; 在轨定标

**中图分类号:** TP732.2; P414.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152307.1874

## Discrimination and correction for solar contamination on mid-infrared band of FY-3C/VIRR

XU Han-lie, HU Xiu-qing\*, XU Na, MIN Min

(Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites,  
National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

\* Corresponding author, E-mail: huxq@cma.gov.cn

**Abstract:** On the basis of solar contamination phenomenon and occurrence rules of the mid-infrared channel ( $3.7\ \mu\text{m}$ ) in the Fengyun-3C/Visible and Infrared Radiometer(FY-3C/VIRR), temporal and spatial characteristics of the solar contamination were analyzed. The method to discriminate initially and correct the solar contamination data in the northern hemisphere was proposed and the effect of solar contamination on calibration coefficients and blackbody brightness temperature was evaluated quantitatively. The results show that for the mid-infrared channel ( $3.7\ \mu\text{m}$ ) in the FY-3C/VIRR, the solar contamination in the northern hemisphere caused by the sun irradiation on calibrated blackbody will appear at the solar zenith angle between  $85^\circ\sim 118^\circ$ . The daily mean absolute error of blackbody temperature is up to 4.5 K, and the maximum absolute error in a day is up to 15 K. By discrimination of the solar contamination data day by day and calculating the linear difference of calibration coeffi-

收稿日期: 2015-03-17; 修订日期: 2015-05-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 41471302, No. 41405035); 公益性行业(气象)科研专项基金资助项目(No. GYHY201406011)

coefficients before and after contaminations, the effect of solar contamination on calibration coefficients can be corrected initially.

**Key words:** Feng Yun-3C/Visible and Infrared Radiometer (FY-3C/VIRR) solar contamination; mid-infrared band; on-orbit calibration

## 1 序 言

卫星红外通道数据的定标精度直接影响反演参数的精度和其它相关研究的可靠性,因此解析红外通道定标不确定性的各种来源,研究红外通道在轨工作的环境变化波动特征、变化趋势及内外干扰因素,是提高定标精度的关键<sup>[1-2]</sup>。红外通道辐射定标通常采用星上黑体和深冷空间观测进行线性两点法定标,近年来随着一些定标改进措施和算法的应用,红外通道的定标精度大大提高,目前国际上公认红外通道定标最高精度为0.1~0.2 K量级<sup>[2-3]</sup>。

极轨卫星在高纬昼夜交替时,太阳光会进入传感器内部,造成定标系统和图像的严重污染,导致卫星观测的每一条轨道都存在数据或定标异常,而且这种污染随着季节变化存在地区、影响范围和数值上的差异,严重制约了极轨卫星数据全球定量应用的深度和广度。早在1982年,科学家就发现了NOAA/高级超高分辨率辐射计(AVHRR)的中红外通道定标系数在昼夜交替区域出现异常,此时的太阳正处于卫星轨道的地平线上。十多年后,Walton报导了3.7  $\mu\text{m}$ 通道在卫星出地影时黑体计数值的异常问题<sup>[4]</sup>,这一异常导致了定标斜率误差,并最终导致该通道定标误差约1.5 K,当时Walton采用了未污染前的定标系数替代受到太阳污染时的定标系数。Cao等评估了长期极轨卫星轨道漂移对中红外定标的影响,分析了轨道漂移带来太阳污染的长期趋势和季节变化,并且评估了定标误差对地球场景观测亮温以及海面温度(SST)反演的影响<sup>[5]</sup>。研究结果表明,NOAA-14/AVHRR受太阳的污染随着卫星寿命增长而增大,由1995年5%数据受太阳污染影响增加到2000年的25%,即使经过业务定标算法订正后仍然存在0.5 K的场景温度偏差,太阳污染发生的区域大部分是在晚间、地面场景太阳天顶角70~118°内。太阳对空间载荷观测数据的污染在国外遥感卫星上也经常发生,如

美国军事气象卫星(DMSP)的卫星专用传感器微波成像仪/探测仪(SSMIS)的主反射镜和热定标源由于太阳的直接或者间接照射<sup>[6]</sup>,导致探测通道出现2 K天线亮度温度异常,严重影响该传感器数据进入NWP模式同化和大气地表参数的反演精度。以后经订正后达到了<0.5 K的精度,显著改进对流层和平流层低层的反演精度。类似的微波仪器还有2003年发射的美国国防卫星Coriolis上搭载的WindSat<sup>[7]</sup>。

本文利用FY-3C/VIRR的星上定标和工程遥测数据文件(OBC数据),分析了太阳污染发生的时空特征,研究太阳污染对辐射定标的影响,并对太阳污染数据进行了初步的判识和修正,将为仪器研制的改进设计提供参考和建议,也会为建立极轨气象卫星高质量高精度的全球红外 $L_1$ 观测数据奠定基础。

## 2 VIRR 中红外通道的太阳污染现象及判识和修正方法

图1所示为2014年2月14日FY-3C/可见光红外扫描辐射计(VIRR)的OBC文件中的几个参数监测结果,日期为任意取得。从黑体计数值和定标斜率可以发现其除了存在随机噪声之外,还存在周期性的显著异常跳动。第一种形式表现为黑体计数值的显著减小并伴随着定标系数的显著增加,主要出现在北半球中高纬度、太阳天顶角在80~120°之间由大变小的过程中,即卫星由黑夜到白天穿越晨昏线,在卫星日出时表现出来;第二种形式表现为黑体计数值的增加和黑体计数值的减小,主要表现在南半球,太阳天顶角由小变大的过程中,即卫星日落的情况下。这种周期性的信号异常现象不仅在某一天存在,每天的OBC监测结果均发现了这种周期性的异常现象。异常现象在北半球更显著,存在时间更长,周期性特征更明显,以下主要针对北半球太阳污染进行分析。

图2所示为2014年2月14日FY-3C/VIRR中红外黑体计数值和定标系数分别随纬度和太阳

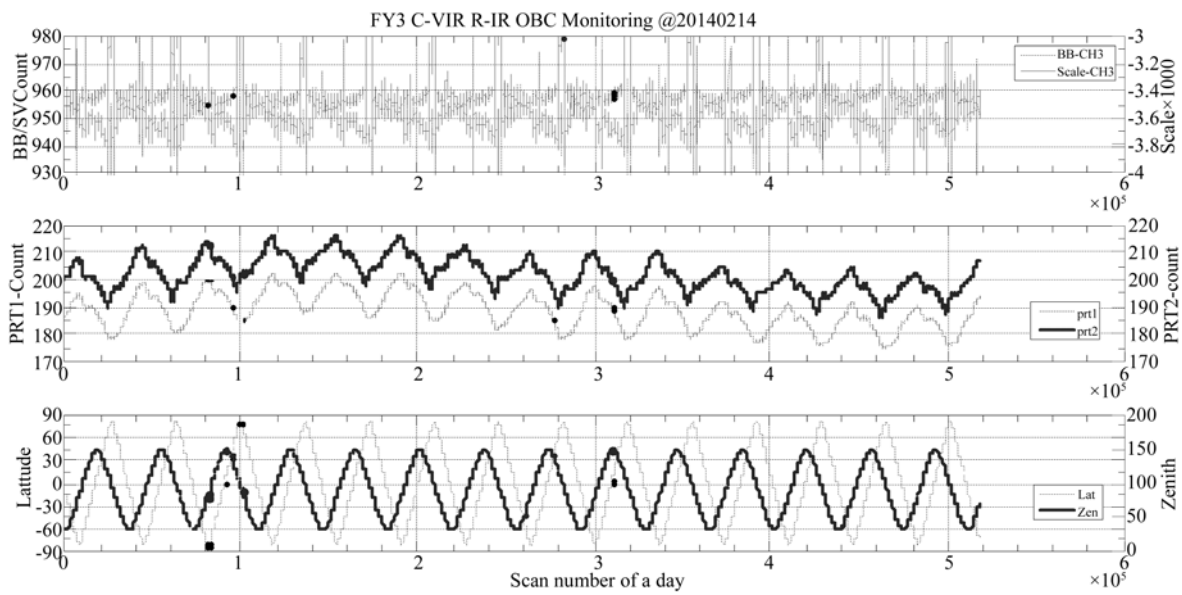


图 1 2014 年 2 月 14 日 FY-3C/VIRR OBC 数据监测结果(上:虚线为黑体计数值,实线为定标斜率;中:虚线为 PRT1 的计数值,实线为 PRT2 的计数值;下:虚线为纬度,实线为太阳天顶角)

Fig. 1 Monitor result of FY-3C/VIRR on 14 February, 2014 (Top: dotted line as blackbody counts, solid line as calibration coefficients; middle: dotted line as PRT1 counts, solid line as PRT2 counts; dotted line as latitude, solid line as solar zenith angle)

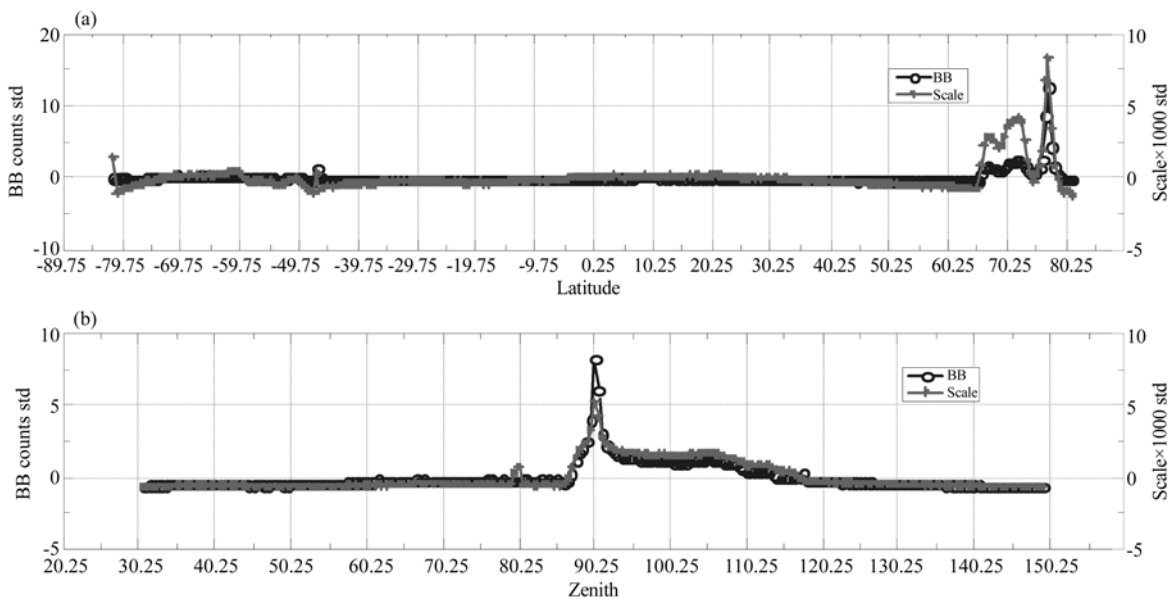


图 2 2014 年 2 月 14 日黑体计数值(空心圆)和定标系数(实心圆)在不同的纬度(a)和太阳天顶角(b)间隔带内的标准差(标准化之后的结果)

Fig. 2 Standard deviations of blackbody counts (empty circle) and calibration coefficients (solid circle) in different latitudes (a) and solar zenith angle (b) intervals

天顶角的变化。将纬度和太阳天顶角分别以 $0.5^\circ$ 为间隔,分别计算每个间隔区间内的黑体计数值与定标系数的标准差。由图 2 可见,在北半球 $65^\circ$

N 以北地区,每个纬度区间的黑体计数值与定标系数的标准差明显高于其他区域,同样的,在太阳天顶角 $85\sim 115^\circ$ 之间,黑体计数值与定标系数的

标准差也明显偏高。即2014年2月14日,北半球 $65^{\circ}\text{N}$ 以北地区,同时太阳天顶角在 $85^{\circ}\sim 115^{\circ}$ 之间的黑体计数值和定标系数离散度明显增加,出现显著的数据异常现象。

为了准确判识太阳污染异常信号出现的位置,这里采用统计的方法。对于标准化后的每个纬度区间和太阳天顶角区间的标准差 $std(i)$ ,若其后(前)连续4个区间内的结果均大于(小于) $std(i)$ 超过0.2,则认为 $i$ 为太阳污染数据开始(结束)位置。通过对随机选取的日期进行计算,可以很好地确定太阳污染起始和截止的纬度和太阳天顶角位置。采用这种统计方法对自2013年11月1日以来的VIRR中红外通道太阳污染的纬度和太阳天顶角的位置进行统计。结果

显示:受污染的太阳天顶角范围变化不大,在大部分日期,太阳污染主要集中在 $85^{\circ}\sim 118^{\circ}$ ,多日平均结果为 $87.4^{\circ}\sim 115.6^{\circ}$ ,与Cao等<sup>[9]</sup>的结果比较接近,北半球纬度位置呈明显的周期性特征。

对每天的北半球太阳污染出现的位置进行有效判识之后,就可利用污染前后的正常数据通过对污染区间的数据进行线性插值来对污染数据做简单的修正。图3所示为2月14日黑体计数值和定标系数修正后的结果。通过纬度和太阳天顶角确定的空间阈值来识别受污染数据的方法是可行的,通过对污染区间内的数据进行线性差值,可以初步修正太阳污染对黑体计数值和定标系数的影响。修正前后,定标系数的标准差分别为0.26和0.14,修正的效果比较明显。

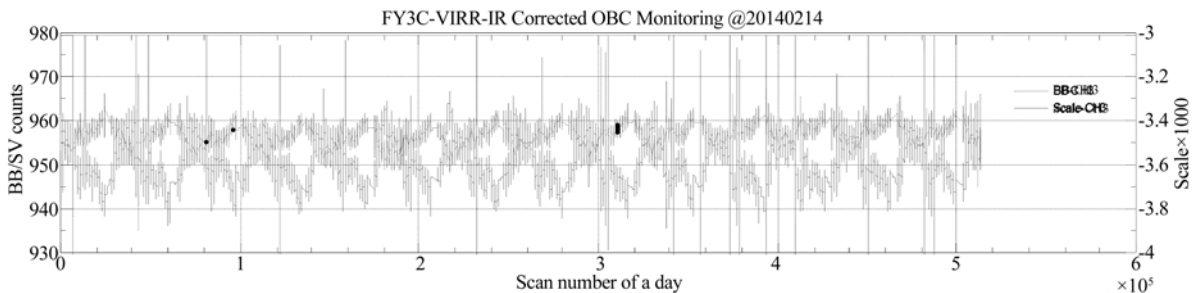


图3 2014年2月14日修正后的黑体计数值(虚线)和定标系数(实线)的时间序列

Fig. 3 Time series of modified blackbody counts (dotted line) and calibration coefficients (solid line) in 14 February, 2014

### 3 太阳污染现象的修正对辐射和亮温的影响

通过对定标系数的修正,可以进一步修正辐射和亮温在受到太阳污染时的偏差。对2013年11月1日~2014年4月16日的修正前后对辐射和亮温的结果进行了长序列分析。图4进一步给出了通过OBC数据计算得到的日平均黑体辐射和黑体亮温的偏差结果。由图4(a)、(b)可见,黑体辐射和亮温的日平均偏差结果的时间变化与黑体计数值的时间变化特征一致,日平均最大异常出现在1月中旬到3月上旬,日平均辐射偏差在 $-0.04 \text{ mW/m}^2 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sr}$ ,亮温偏差在 $-4.5 \text{ K}$ 左右,最小日平均偏差也达到 $-2 \text{ K}$ 以上。图4(c)、(d)进一步给出了日最大的黑体辐射和黑体

亮温的偏差的时间序列。最大黑体亮温偏差均超过 $5 \text{ K}$ ,在2014年1月中旬~3月上旬,日最大黑体亮温偏差达 $15 \text{ K}$ 以上,进一步说明了太阳污染所导致的定标系数的偏差可以引起较大的辐射和亮温偏差,严重影响该通道数据的使用和产品精度。

图5给出了2014年4月5日4时3通道对地扫描亮温结果。在第500~600扫描处,太阳污染使得此扫描区间内定标后的辐射值偏低,导致其亮温结果出现一条带状逐渐变化的偏低区域,并且偏低存在于整条扫描线中;在通过对定标系数和截距的修正后,第500~600扫描区间内,其亮温偏低的带状异常消失,亮温图像比较连续。图5(c)进一步给出了太阳污染修正前后的亮温差值。在污染最大异常处,亮温偏差普遍达到 $8 \text{ K}$ 以上。图5证明了太阳污染修正对于对地观测的定标结果的修正效果。

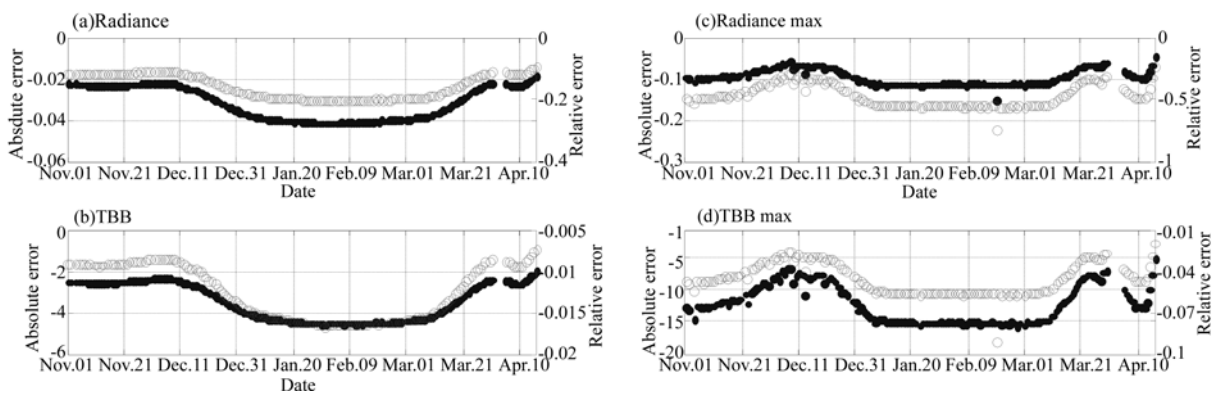


图 4 FY-3C/VIRR 中红外通道日平均(a,b)和日最大(c,d)的辐射(a,c)和黑体亮温(b,d)的绝对偏差(实心圆)和相对偏差(空心三角),时间为 2013 年 11 月 1 日至 2014 年 4 月 16 日

Fig. 4 The daily mean (a, b) and daily maximum (c, d) absolute errors (solid cricle) and relative errors (empty triangle) of radiance (a, c, unit:  $\text{mW}/\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sr}$ ) and blackbody temperature (b, d, unit: K) from 1 November, 2013 to 16 April, 2014

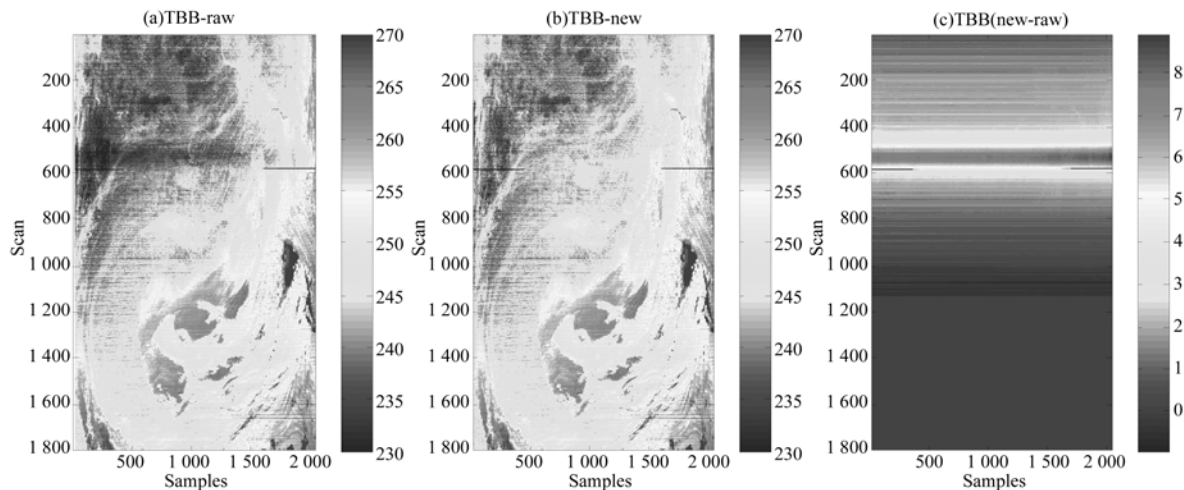


图 5 FY-3C/VIRR 在 2014 年 4 月 5 日 04 时修正前(a)和修正后(b)的亮温结果及其差值(c)

Fig. 5 Blackbody temperatures before (a), after (b) modifying and the difference between them (c) for FY-3C/VIRR on UTC 04, 5 April, 2015

## 4 结 论

本文以 FY-3C/VIRR 遥感器为例,分析了北半球太阳污染对仪器定标结果以及对地观测亮温的影响。揭示了 VIRR 中红外通道太阳污染的现象及发生规律,提出了太阳污染现象的修正方法,并分析了太阳污染修正对辐射和亮温的影响。结果表明:对于 FY-3C/VIRR,其北半球太阳污染主要发生在地面像元太阳天顶角为  $85 \sim 118^\circ$ ,经计算,太阳污染的数据占每天总数据的 10%左右;通过逐日对太阳污染数据进行识别,并采用污染前后

定标系数进行线性插值,可以初步修正太阳污染对定标系数带来的异常影响。定标系数的偏差导致的黑体亮温异常的日平均结果在 5.5 K 左右,一日的最大亮温偏差在计算时段内平均达到 20 K。

针对 FY-3C/VIRR 的太阳污染现象,提出了判识和初步修正方法,并对太阳污染现象及其影响长序列资料进行了分析,从 OBC 数据监测结果还可以发现,污染位置与 PRT 温度变化趋势也存在一定的关系,必要进一步研究;此外,由于数据长度的限制,目前的研究结果只针对发射以来半年左右的数据,对于更长时间的数据结果是否同样适用有待于进一步的分析,并且太阳

污染对定标系数和亮温的影响是否存在季节或年际的周期性特征,也是以后的研究中需要重点关注的问题。

定标黑体受到太阳污染对仪器的定标系数产

生较大的影响,从而直接影响到对地观测图像的结果。为了从根本上解决红外通道定标黑体受太阳污染的影响,建议在仪器设计时给黑体加上遮光板,以便减少太阳对定标黑体的污染。

#### 参考文献:

- [1] GEORGE O. Workshop on Achieving satellite instrument calibration for climate change [C]. *Workshop on Achieving Satellite Instrument Calibration for Climate Change (ASIC3)*, 2006:16-18.
- [2] LIANG X M, IGNATOV A. AVHRR, MODIS, and VIIRS radiometric stability and consistency in SST bands [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(6): 3161-3171.
- [3] PRASANJIT D, IGNATOV A. Validation of clear-sky radiances over oceans simulated with MODTRAN4.2 and global NCEP GDAS fields against nighttime NOAA15-18 and MetOp-A AVHRR data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(6): 3012-3029.
- [4] WALTON C, SULLIVAN J T, RAO C R N, et al.. Corrections for detector nonlinearities and calibration inconsistencies of the infrared channels of the advanced very high resolution radiometer [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(C2): 3323-3337.
- [5] CAO C, SULLIVAN J, MATURI E, et al.. The effect of orbit drift on the calibration of the 3.7  $\mu\text{m}$  channel of the AVHRR onboard NOAA-14 and its impact on night-time sea surface temperature retrievals [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(5):975-986.
- [6] YAN B, WENG F. Assessments of F16 special sensor microwave imager and sounder antenna temperatures at lower atmospheric sounding channels [J]. *Advances in Meteorology*, doi: 10.1155/2009/420985.
- [7] ELIZABETH M T, PURDY W E, GAISER P W, et al.. WindSat on-orbit warm load calibration [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(3): 516-529.
- [8] 杨军,董超华. 新一代风云极轨气象卫星业务产品及应用[M]. 北京:科学出版社,2011:100-102.  
YANG J, DONG CH H. *The new generation of the polar orbit meteorological satellite business product and applications* [M]. Beijing: Science Press, 2011:100-102.
- [9] CAO C, WEINREB M, SULLIVAN J. Solar contamination effects on the infrared channels of the advanced very high resolution radiometer (AVHRR) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(24): 33463-33469.

#### 作者简介:



徐寒列(1985—),女,辽宁葫芦岛人,博士,助理研究员,2013年于中国科学院大气物理研究所获博士学位,主要从事星载光学传感器辐射定标工作。  
Email: xuhanlie@cma.gov.cn



徐娜(1982—),女,山东烟台人,博士,副研究员。2010年毕业于中科院大气物理研究所获得大气物理学与大气环境理学博士学位。主要研究方向:辐射定标、云微物理特性和大气可降水等卫星遥感反演方法研究。  
Email: huxq@cma.gov.cn



胡秀清(1974—),男,湖北人,博士,正研级高工。1996年获南京大学学士学位。2004年获北京师范大学硕士学位,2006年起为中科院遥感所在职博士。主要研究方向:卫星光学遥感器的辐射定标,气溶胶、沙尘暴和大气可降水等大气参数的卫星反演算法研究,研发中分辨率光谱成像仪L1辐射定标业务算法。Email: huxq@cma.gov.cn



闵敏(1982—),男,湖北宜昌人,博士,副研究员,2010年于中国科学院大气物理研究所获得博士学位,国家卫星气象中心副研究员,主要从事卫星传感器定标和性能评估、云和气溶胶遥感、大气辐射传输方面的研究。Email: minmin@cma.gov.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)