

吴晓,白文广,张婉春,2018.改进的FY-3B/VIRR OLR反演模式及其应用效果[J].气象,44(6):844-849.

改进的FY-3B/VIRR OLR反演模式及其应用效果^{*}

吴晓^{1,2} 白文广^{1,2} 张婉春^{1,2}

1 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室,北京 100081

2 国家卫星气象中心,北京 100081

提 要: FY-3B 卫星 VIRR 仪器的向外长波辐射(outgoing long-wave radiation, OLR)产品处理采用与 NOAA/AVHRR 相同的算法模型,即用窗区通道亮温-通量等效亮度温度的回归关系式计算 OLR,但两星的 OLR 业务产品与目前国际质量最好的云和地球辐射能量系统(cloud and earth's radiant energy system, CERES)仪器观测 OLR 产品相比,存在约 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的系统负偏差。FY-3B 的原因在于 OLR 反演模式建立过程中红外辐射传输计算软件的精度不够。鉴于此,本文采用美国 21 世纪开发的逐线辐射传输模型计算软件(LBLRTM),模拟计算了全球 2521 条大气廓线的大气顶辐射率光谱,在此基础上计算了每条廓线的 OLR 和 FY-3B/VIRR 窗区通道亮温,应用最小二乘法统计回归模拟数据,重新建立了由 FY-3B/VIRR 窗区通道亮温计算 OLR 的回归关系式及系数。模式应用于 FY-3B L1 级数据,处理 2016 年 1,3,7 和 10 月的 FY-3B 逐日全球 OLR 资料,该资料与 AQUA-TERRA 卫星的 CERES 仪器 OLR 观测产品相比,得到日平均 OLR: $RMSE=9\sim 15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $R=0.9834$, $Bias=-0.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; 月平均 OLR: $RMSE=4\sim 7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $R=0.9915$, $Bias=-0.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,表明改进的模式能处理出无系统偏差的、精度基本与 CERES 观测相当的 OLR 产品,尽管单通道反演算法有着固有的模式回归误差。

关键词: FY-3B, 射出长波辐射, 反演模式

中图分类号: P405

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.06.012

Improved FY-3B OLR Retrieval Model and Its Application Effect

WU Xiao^{1,2} BAI Wenguang^{1,2} ZHANG Wanchun^{1,2}

1 Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, CMA, Beijing 100081

2 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: The outgoing longwave radiation (OLR) product processing of FY-3B/VIRR adopts the same method as that used in NOAA/AVHRR, that is, the regression equation relating flux equivalent brightness temperature with window channel brightness temperature is used to calculate OLR. But the OLR products of the two satellites have a negative bias of $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ when compared with the clouds and earth's radiant energy system (CERES) observed OLR product, which is considered the best OLR product in quality in the world. The cause for the FY-3B OLR bias is the lower accuracy of the software used in infrared radiative transfer model during the process of developing OLR retrieval model. Herein, with American line-by-line radiative transfer model software (LBLRTM) developed in 21st century, the spectral radiances at the top of atmosphere (TOA) for 2521 global atmospheric profiles are simulated, and then the OLR and window channel radiance of FY-3B/VIRR are calculated. By applying the least square method to sum up and regress the simulated data, this paper rebuilds the regression equation and coefficient of OLR, which are calculated by the FY-3B/VIRR window channel-5 brightness temperature. The FY-3B L1 data are applied to the model and the daily global OLR data in January, March, July, October of 2016 are

^{*} 中国气象局气象资料质量控制与多源数据融合与再分析攻关项目(GMAGGTD003-5)资助

2017年11月7日收稿; 2018年2月11日收修定稿

第一作者:吴晓,主要从事气象卫星遥感反演. Email: wuxiao@cma.gov.cn

processed out. Comparing the processed data with the CERES OLR products, the following results are obtained: daily averaged OLR; $RMSE=9-15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $R=0.9834$, $Bias=-0.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, monthly averaged OLR; $RMSE=4-7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $R=0.9915$, $Bias=-0.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. The validation results indicate that the improved model can work out the OLR data without systematic bias and the accuracy is basically similar with the CERES observation although the inherent model regression error might exist in the single channel retrieval method.

Key words: FY-3B, outgoing longwave radiation (OLR), retrieval model

引 言

向外长波辐射(outgoing longwave radiation, OLR)是地球大气系统在大气顶向外空辐射出去的热辐射通量,是地球大气系统能量平衡的参量之一,在气候模式中是一个重要的输出参量。从 20 世纪 60 年代气象卫星问世以来,对 OLR 的观测一直延续至今,各种仪器、各种反演方法被设计和研究出来用以从卫星获取对地球上不同地区的 OLR 观测(Wark et al, 1962; Jacobowitz et al, 1979; Gube, 1982; Jacobowitz and Tighe, 1984; Green and Wielicke, 1997; Loeb et al, 2001; 吴晓和白文广, 2017; 吴晓, 2011),如搭载在 NOAA、NIMBUS 卫星上的 ERB 仪器, AQUA、TERRA 卫星上的 CERES 仪器,均通过宽波段通道观测地球 OLR,而 NOAA 的 AVHRR 仪器、GOES 的 VISSR、METEOSAT 的 SEVIRI 和 FY-2 的 VISSR、FY-3 的 VIRR 等仪器均通过其窄波段的红外通道观测由反演模式估算得到区域或全球 OLR。在种类繁多的各卫星 OLR 产品中,历史最长、应用最广的是 NOAA 系列卫星 AVHRR 仪器的全球 OLR 产品,其处理方法是经典的 AVHRR 窗区通道 5 亮温-通量等效辐射温度($T_{B5}-T_F$)反演模式, Gruber(1997)通过辐射传输模拟和统计回归,建立了 $T_{B5}-T_F$ 的回归关系, Ohring et al(1984)根据 Nimbus-7 卫星上宽波段通道的辐射率和窗区通道亮温匹配数据,又建立 $T_{B5}-T_F$ 的经验关系式,这一经验模式 NESDIS (National Environmental Satellite Data and Information Service)处理 NOAA/AVHRR 的 OLR 产品达 40 多年。而我国的 FY-3 极轨气象卫星,因其星载 VIRR 仪器与 AVHRR 近似,也采用了 $T_{B5}-T_F$ 模型反演处理 FY-3/VIRR 的 OLR 产品(吴晓和鄢俊洁, 2011),但无论 NOAA/AVHRR 还是 FY-3/VIRR,其 OLR 产品与国际最先进的 CERES 仪器

OLR 观测产品相比,都存在 $-10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的系统负偏差, NESDIS 的原因在于模式建立过程中匹配数据源的定标处理有误, FY-3 则是由于模式建立过程中辐射传输计算软件精度不够(吴晓, 1998), 吸收系数过于老化。鉴于这一原因,我们采用了美国最新逐线辐射传输模型计算软件(line-by-line radiative transfer model, LBLRTM),重新模拟大气廓线的大气顶光谱辐射率和 OLR,基于模拟数据重新建立了 FY-3A, 3B, 3C 卫星 VIRR 仪器的 OLR 反演模式,以期解决 VIRR OLR 产品 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 负偏差的问题。本文就是关于新的 FY-3B/VIRR OLR 反演模式的建立及应用情况的详细介绍。

1 建立 FY-3B/VIRR 仪器 OLR 反演

1.1 红外辐射传输计算

1.1.1 LBLRTM 软件及大气顶红外辐射传输计算方程

LBLRTM 是美国在 21 世纪初开发的软件,其融入了国际最新吸收带试验数据,光谱分辨率为 0.01 cm^{-1} ,是继 LOWTRAN 和 MORTAN 之后精度更高的辐射传输模型计算软件,其计算准确度达 99.5%(Clough et al, 2005), LBLRTM 通过如下红外辐射传输方程计算大气顶的射出辐射率。

$$I_v(z_t, \theta, \phi) = \epsilon_v B_v(T_s) \tau_v(z_t, 0; \theta, \phi) + \int_0^{z_t} B_v(z') \frac{\partial \tau_v(z_t, z'; \theta, \phi)}{\partial z'} dz' + (1 - \epsilon_v) \tau_v^2(z_t, 0; \theta, \phi) \int_0^{z_t} B_v(z') \times \frac{\partial \tau_v(z_t, z'; \theta, \phi)}{\tau_v^2(z_t, z'; \theta, \phi) \partial z'} dz' \quad (1)$$

$$B_v(T_s) = \frac{c_1 v^3}{e^{c_2 v/T_s} - 1.0} \quad (2)$$

式中, $I_v(z_t, \theta, \phi)$ 是大气顶射出辐射率[单位: $\text{mW} \cdot$

$\text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot (\text{cm}^{-1})^{-1}$], T_s 是地表温度(单位:K), ϵ_v 是地表光谱比辐射率, B 是普朗克函数, c_1 和 c_2 是辐射常数, ν 是波数(单位: cm^{-1}), τ_v 是单色透过率, θ 是当地天顶角, ϕ 是方位角, z_t 是大气顶高度。

1.1.2 大气廓线的射出辐射率光谱模拟

由 2010 年 ECMWF 资料整理出代表全球各种天气状况的 2521 条大气廓线, 每条廓线分为 101 层, 内容为温度、水汽混合比、 O_3 体积混合比、地面温度、地面气压等, 将廓线输入到 LBLRTM 软件中, 得到了 2521 条廓线的大气顶射出辐射率光谱, 图 1 是一条廓线的辐射率光谱。

1.1.3 大气廓线的 OLR 模拟

整理廓线的光谱数据, 由式(3)计算大气顶 $0 \sim +\infty \text{ cm}^{-1}$ 波段的总波段射出辐射率,

$$I(z_t, \theta) = \int_0^{\infty} I_\nu(z_t, \theta) d\nu \quad (3)$$

式中 $I(z_t, \theta)$ 为总波段射出辐射率, 整理时, 将式(3)的上限取为 2500 cm^{-1} , 因为地球发射的小于 $4 \mu\text{m}$ (即波数 $\geq 2500 \text{ cm}^{-1}$) 的红外辐射信号已很弱, 每一条廓线 OLR 由如下方程计算(Wark et al, 1962):

$$\text{OLR} = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} I(z_t, \theta) \sin\theta \cos\theta d\theta \quad (4)$$

通过对 2521 条廓线的统计分析, $I(z_t, \theta)$ 具有如下临边变暗关系:

$$I(z_t, \theta) = I(z_t, 0)(1 + a\theta + b\theta^2 + c\theta^3) \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{I(z_t, \theta) - I(z_t, 0)}{a\theta + b\theta^2 + c\theta^3} = \alpha + \beta I(z_t, 0) \quad (6)$$

式中 a, b, c, α, β 是经验回归系数, 将式(5)和式(6)代入式(4)得到:

$$\text{OLR} = I(z_t, 0)[A + CI(z_t, 0)] \quad (7)$$

$$A = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} [1 + \alpha(a\theta + b\theta^2 + c\theta^3)] \sin\theta \cos\theta d\theta$$

$$C = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \beta(a\theta + b\theta^2 + c\theta^3) \sin\theta \cos\theta d\theta$$

1.2 建立统计回归模式

每条廓线的 FY-3B/VIRR 仪器通道 5 辐射率, 可由辐射率与光谱响应函数的卷积计算得到, 如下:

$$I_5(\theta) = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} I_\nu(z_t, \theta) f(\nu) d\nu}{\int_{\nu_1}^{\nu_2} f(\nu) d\nu} \quad (8)$$

式中, $f(\nu)$ 是通道 5 光谱响应函数, I_5 是 VIRR 通

道 5 辐射率, ν_1 和 ν_2 是通道响应的起始波数, 通道 5 亮度温度 T_{B5} 进一步由普朗克公式的反函数得到:

$$T_{B5} = \frac{c_2 \nu_0}{\ln\left[\frac{c_1 \nu_0^3}{I_5(0)} + 1.0\right]} \quad (9)$$

式中 ν_0 是通道中心波数。每条廓线的通量等效亮度温度 T_F 为

$$T_F = \left(\frac{\text{OLR}}{\sigma}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (10)$$

式中 σ 是斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 如此分别得到 2521 条廓线的 T_{B5} 和 T_F , 图 2 是 T_{B5} 和 T_F 的回归关系, 由图得出:

$$T_F = A + BT_{B5} + CT_{B5}^2 \quad (11)$$

式中, A, B, C 是统计回归系数。

2 新旧模式的对比

FY-3B/VIRR 的新旧 OLR 反演模型相同, 但由于采用了不同的辐射传输计算软件, 对大气顶辐射率光谱及 OLR 的模拟数据不尽相同, 由此建立的模式系数也不同, 图 3 是一条廓线新老两种软件计算出的射出辐射率光谱分布, 可见两者有明显差别, 尤其在水汽转动吸收带; 图 4 是新旧软件的 OLR 差值图, 可见 LBLRTM 模拟的 OLR 系统偏高于旧软件, 这使得有可能从理论模式上解释 FY-3B/VIRR OLR 业务反演模式得到的产品系统偏低与 CERES 观测 OLR 产品 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的现象, 新旧模式的回归系数分别为: $A = -53.69, B = 1.65227,$

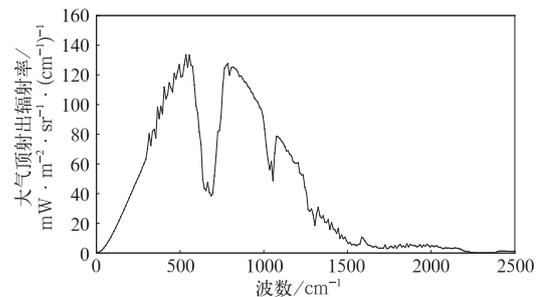


图 1 洋面晴空大气廓线大气顶光谱辐射率
(地面温度 $T_s = 299.25 \text{ K}$, 地面气压 $p_s = 1012 \text{ hPa}$)

Fig. 1 Simulated radiances at TOA for a clear-sky atmospheric profile over ocean (surface temperature $T_s = 299.25 \text{ K}$, surface pressure $p_s = 1012 \text{ hPa}$)

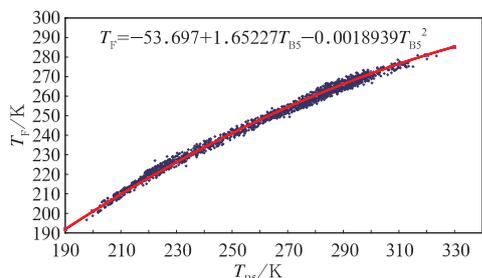


图 2 2521 条廓线的 FY-3B/VIRR 通道 5 亮温与通量等效辐射温度的回归关系

Fig. 2 Regression relationship between FY-3B/VIRR Channel 5 brightness temperature and flux equivalent temperature of 2521 global atmospheric profiles

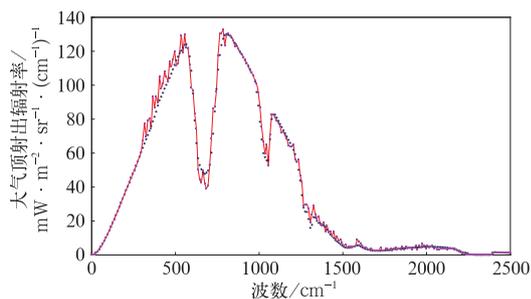


图 3 两种辐射传输计算软件计算的一条廓线大气顶射出辐射率光谱 (红色:LBLRTM,蓝色:旧软件)

Fig. 3 Simulated radiances at TOA for a clear-sky atmospheric profile with LBLRTM and radiative transfer calculation softwares (red: LBLRTM, blue: old software)

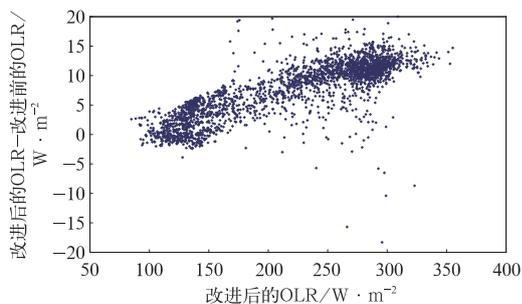


图 4 LBLRTM 与旧软件对 2521 条大气廓线模拟 OLR 的差值图

Fig. 4 The OLR simulated with LBLRTM minus the OLR calculated by old software for 2521 atmospheric profiles

$C = -0.0018939$ (新); $A = 10.5, B = 1.1333, C = -0.000917$ (旧); 图 5 是新旧两种模式 $T_{B5}-T_F$ 关系曲线对比图, 图中新模式的 T_F 偏高于旧模式 $2 \sim 3$ K。

3 模式应用效果

图 6a 是新模式应用于 FY-3B/VIRR L1 数据资料处理得到的 2016 年 7 月平均 OLR, 图 6b 是用于检验的 CERES 仪器多星融合 OLR 产品, 图中两者相比: $RMSE = 5.69 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}, Bias = 0.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 表明新模式系数可反演出与 CERES 观测相比无系统偏差的 OLR 资料, 尽管从理论上单通道反演整个长波段总辐射存在反演误差, 但获得的精度还是可观的。图 7a 是 2016 年 7 月 10 日 FY-3B/VIRR 日平均 OLR, 图 7b 是与之对比的 CERES 日平均 OLR, 图中: $RMSE = 13.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}, Bias = 1.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 由于 CERES 日平均 OLR 产品是在 24 h 资料平均基础上得到的, 而 FY-3B 为白天、夜间 2 次观测的平均, 因此一天中的天气变化不可避免地增加了比较误差, 我们对比了 2016 年 1, 3, 7 和 10 月的 FY-3B 与 CERES OLR, 得出: $RMSE = 9 \sim 15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (日平均), $RMSE = 4 \sim 7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (月平均), 说明尽管单通道反演方法和 OLR 日变化带来误差, 新模式系数估算的 FY-3B/VIRR OLR 资料与 CERES 产品是可以比拟的, 图 8 和图 9 分别是 2016 年 3 和 7 月 FY-3B/VIRR 月平均 OLR 与 CERES 月平均 OLR 的差值图, 图中偏差在 $-15 \sim 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 对比资料的观测频次固然是误差的原因之一, 单通道反演模式的回归误差应是两种资料不同的另一主要原因。

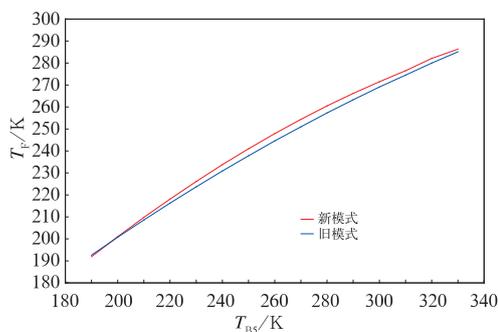


图 5 新旧两种 $T_{B5}-T_F$ 模式关系曲线对比图
Fig. 5 The $T_{B5}-T_F$ regression curves of the new and old models

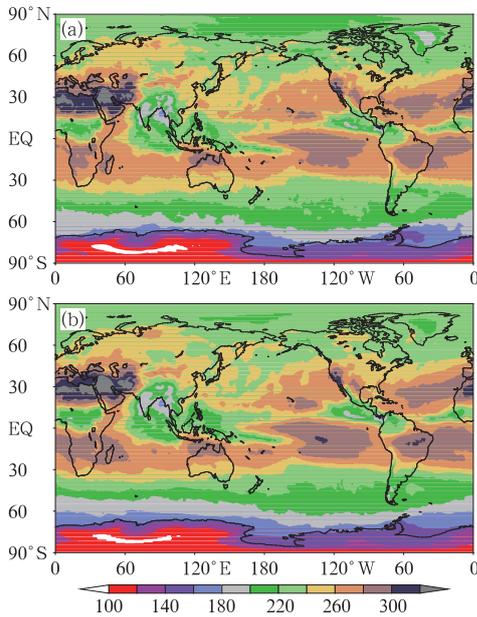


图 6 2016 年 7 月月平均 OLR

(a)FY-3B/VIRR, (b)AUQA-TERRA/CERES

Fig. 6 Monthly average OLR in July 2016

(a)FY-3B/VIRR, (b)AUQA-TERRA/CERES

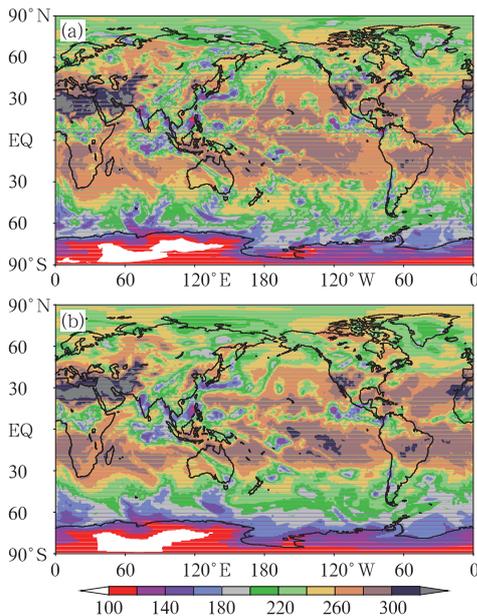


图 7 同图 6, 但为 2016 年 7 月

10 日日平均 OLR

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for daily

average OLR on 10 July 2016

4 结 论

由极轨气象卫星窗区通道亮温计算 OLR 的反

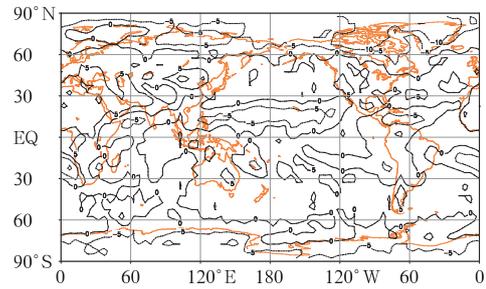


图 8 2016 的 3 月 FY-3B/VIRR 月平均 OLR 减去 AQUA-TERRA/CERES 月平均 OLR

Fig. 8 Monthly average OLR of FY-3B/VIRR minus that of AQUA-TERRA/CERES in March 2016

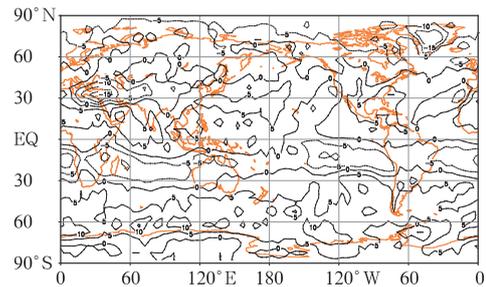


图 9 同图 8, 但为 2016 年 7 月

Fig. 9 Same as Fig. 8, but for that in July 2016

演模式是一个经典的模型,应用于 NOAA 系列卫星 AVHRR 仪器的 OLR 产品处理已有 40 多年之久,产品广泛应用于气候分析、气候模式验证、ENSO 监测和季风监测等方面,我国 FY-3 系列卫星的 VIRR 仪器因为有着与 AVHRR 相近的光谱特征,其 OLR 产品反演也采用了与 AVHRR 相类似的模型,但由于历史的原因,这两星的 OLR 业务产品与世界先进的 CERES 仪器观测 OLR 产品相比,都存在约为 $-10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的偏差,NOAA 是由于反演模式建立过程中匹配资料来源的定标出现误差, FY-3 是由于模式建立过程中辐射传输模拟的精度不够;因此,在引进了国际最新逐线辐射传输模型计算软件 LBLRTM 后,利用该软件我们重新建立了 FY-3 系列 VIRR 仪器的 OLR 反演模式,应用模式处理得到了无系统偏差的、精度较为可观的 FY-3 卫星 OLR 资料,从新旧模式处理 OLR 资料的精度验证结果来看,新模式在精度上有了较大改进,尽管局限于观测通道,单通道 OLR 估算方法仍能得到较好

精度的 OLR 产品。下一步我们将用新模式处理 2008 年以来的 FY-3A, 3B, 3C 历史 OLR 资料, 以期该资料更好地应用于气候诊断和气候模式等方面的应用研究。

参考文献

- 吴晓, 1998. 地球大气透过率及辐射率计算[J]. 应用气象学报, 9(1): 124-128.
- 吴晓, 2011. 用卫星 OLR 资料估算中国大陆月降水量[J]. 气象, 37(1): 99-102.
- 吴晓, 白文广, 2017. 基于 FY-3/IRAS 利用非线性模式反演 OLR [J]. 应用气象学报, 28(2): 189-199.
- 吴晓, 鄢俊洁, 2011. 从 FY-3B 极轨气象卫星 VIRR 仪器通道 5 遥测数据计算射出长波辐射[J]. 科学通报, 56(31): 2604-2608.
- Clough S A, Shephard M W, Mlawer E J, et al, 2005. Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the AER codes[J]. J Quant Spectrosc Rad Transfer, 91(2): 233-244.
- Green R N, Wielicke B A, 1997. CERES inversion to instantaneous TOA flux[R]. CERES Algorithm Theoretical Basis Documents.
- Gruber A, 1977. Determination of the Earth-atmosphere radiation budget from NOAA satellite data[R]. NOAA Technical Report NESS 76. Washington DC: US Department of Commerce.
- Gube M, 1982. Radiation budget parameters at the top of the Earth's atmosphere derived from METEOSAT data[J]. J Appl Meteor, 21(12): 1907-1921.
- Jacobowitz H, Smith W L, Howell H B, et al, 1979. The first 18 months of planetary radiation budget measurements from the nimbus 6 ERB experiment[J]. J Atmos Sci, 36(3): 501-507.
- Jacobowitz H, Tighe R J, 1984. The Earth radiation budget derived from the NIMBUS 7 ERB experiment[J]. J Geophys Res, 89(D4): 4997-5010.
- Loeb N G, Priestley K J, Kratz D P, et al, 2001. Determination of unfiltered radiances from the clouds and the Earth's radiant energy system instrument[J]. J Appl Meteor, 40(4): 822-835.
- Ohring G, Gruber A, Ellingson R, 1984. Satellite determinations of the relationship between total longwave radiation flux and infrared window radiance[J]. J Climate Appl Meteor, 23(3): 416-425.
- Wark D Q, Yamamoto G, Lienesch J H, 1962. Methods of estimating infrared flux and surface temperature from meteorological satellites[J]. J Atmos Sci, 19(5): 369-384.