



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

吴晓^{①②}, 郝俊洁^{①②}

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

E-mail: wuxiao@cma.gov.cn

2011-02-15 收稿, 2011-06-27 接受

摘要 基于红外辐射传输方程, 模拟了代表全球各种天气状况 3812 条大气廓线的大气顶射出长波辐射通量密度(OLR), 以及 FY-3B VIRR 通道 5 辐射率, 通过统计回归分析, 建立了通道 5 亮温与通量等效亮度温度的统计回归关系式. 将回归模式应用于 FY-3B VIRR 仪器的 L1 级数据, 处理出了卫星观测时刻的 OLR 格点场产品, 产品的精度经由与观测时间相近的 NOAA-18 卫星同类产品对比得出, 对于全球日平均产品, 两者的系统均方根误差 RMSE = 10~13 W/m², 相关系数 $R=0.97\sim0.98$, 误差的主要原因是对同一地理位置两星的观测时间不尽相同. 文中给出了处理出的 OLR 产品实例, 以及产品的应用范围和初步应用个例.

关键词OLR
反演模式
精度验证

FY-3B 极轨气象卫星的 VIRR(visible infrared radiometer)是一个类似于 NOAA AVHRR 的仪器, 它设计有短波和长波共 10 个探测通道, 通道的光谱特性见表 1, 其中红外窗区通道 4 和 5 相当于 AVHRR 的分裂窗通道 4 和 5. 从 NOAA 卫星的 AVHRR 通道 5 数据估算地气系统射出长波辐射通量密度(OLR)需要将通道 5 亮度温度通过一个理论或经验的回归公式转换为通量等效亮度温度: $T_F = A + B \times T_{B5} + C \times T_{B5}^2$, 这已成为一个经典的公式^[1], 在美国 NESDIS 使用该公式计算处理 NOAA 系列卫星 AVHRR 的 OLR 产品已有达 30 多年的历史, 全球 OLR 产品被国内外气象界广泛地用于气候预测、气候诊断、气候模式等多个方面. 中国在 2010 年 11 月成功发射了 FY-3B 极轨气象卫星, 其地面应用系统已正式业务运行, 生成的产品^[2]被存档和实时分发, VIRR 仪器的 OLR 产品也在其中之列. 文中将介绍 VIRR OLR 反演模式的建立过程、VIRR 的 OLR 处理方法、以及计算出的 OLR 产品实例和产品精度情况, 最后给出该产品的一些初步应用.

表 1 VIRR 10 个通道光谱特性

通道	波段(μm)	通道	波段(μm)
1	0.58~0.68	6	1.58~1.64
2	0.84~0.89	7	0.43~0.48
3	3.55~3.95	8	0.48~0.53
4	10.3~11.3	9	0.53~0.58
5	11.5~12.5	10	0.90~0.965

1 VIRR OLR 反演模式的建立

建立 VIRR 仪器的 OLR 反演模式主要是基于对大气廓线的红外辐射传输模拟^[3~5]计算, 分别模拟每条廓线的大气顶射出 OLR 和 VIRR 通道 5 亮度温度, 然后建立通道 5 亮度温度与 OLR(通量等效亮度温度)的统计回归关系. 模式建立流程如图 1.

1.1 大气顶红外射出辐射率计算

对代表全球各种天气状况的 3812 条大气廓线, 利用辐射传输方程计算大气顶射出辐射率, 红外辐

英文版见: Wu X, Yan J J. Estimating the outgoing longwave radiation from the FY-3B satellite visible infrared radiometer Channel 5 radiance observations. Chinese Sci Bull, 2011, 56: 3480~3485, doi: 10.1007/s11434-011-4686-6

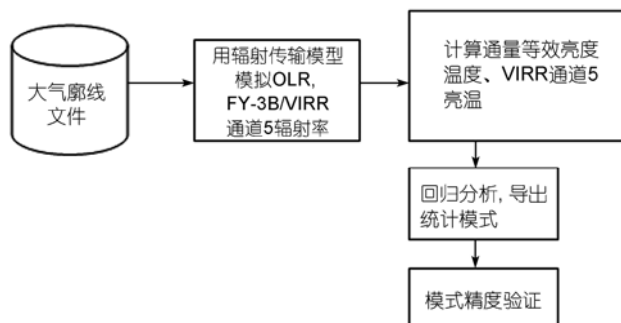


图1 OLR反演模式建立流程

射传输方程如下^[6,7]:

$$I(\nu, T, \theta) = B(\nu, T_s) \times \tau_s(\theta) + \int_{\tau_s}^1 B(\nu, T) d\tau. \quad (1)$$

将地面到大气顶(0.1 hPa)分为 40 层, (1)式写为级数形式有

$$I(\nu, T, \theta) = B(\nu, T_s) \times \tau_s(\theta) + \sum_{i=0}^{40} B(\nu, T_i) \Delta \tau_i. \quad (2)$$

有云存在时, 云顶近似为黑体, 云顶到大气顶分为 N 层, 大气顶辐射率写为

$$I(\nu, T, \theta) = B(\nu, T_c) \times \tau_c(\theta) + \sum_{i=0}^N B(\nu, T_i) \Delta \tau_i, \quad (3)$$

式中, $I(\nu, T, \theta)$ 是大气顶射出辐射率, T_s 是地表温度, τ 是透过率, ν 是波数, θ 是出射天顶角, T_i 是第 i 层的空气温度, $\Delta \tau_i = \tau_{i+1} - \tau_i$, B 是普朗克函数, T_c 是云顶温度, 普朗克函数为

$$B(\nu, T) = \frac{c_1 \nu^3}{e^{c_2 \nu / T} - 1.0}, \quad (4)$$

式中, $c_1 = 1.191066 \times 10^{-5}$, $c_2 = 1.438681$, T 是空气温度.

1.2 OLR 及通量等效亮度温度计算

每条廓线大气顶的所有波长的总辐射率由下式计算

$$I(\theta) = \sum_{i=1}^{280} I(\nu_i, T, \theta) \Delta \nu. \quad (5)$$

射出长波辐射通量密度 E (即 OLR):

$$E = 2\pi \int_0^{\pi/2} I(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta. \quad (6)$$

E 的详细计算见文献[7], 每条廓线的通量等效亮度温度由下式计算:

$$T_F = \left(\frac{E}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (7)$$

σ 是斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.6693 \times 10^{-8}$.

1.3 VIRR 仪器通道 5 亮温模拟计算

每条廓线的卫星观测到的通道 5 辐射率由下式模拟得到

$$I(\nu_0, T, \theta) = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} I(\nu, T, \theta) f(\nu) d\nu}{\int_{\nu_1}^{\nu_2} f(\nu) d\nu}, \quad (8)$$

式中, ν_0 是通道 5 中心波数, $f(\nu)$ 是通道光谱响应函数, ν_1 和 ν_2 是通道起始波数.

统计得出 3812 条廓线的通道辐射率 $I(\nu_0, T, \theta)$ 的临边变暗关系式如下:

$$I(\nu_0, T, 0) = [1 + \alpha_2 (\sec \theta - 1) + \beta_2 (\sec \theta - 1)^2] \times I(\nu_0, T, \theta) + \alpha_1 (\sec \theta - 1) + \beta_1 (\sec \theta - 1)^2, \quad (9)$$

式中, $I(\nu_0, T, 0)$ 为相当于卫星在天顶时的通道辐射率观测值, $I(\nu_0, T, \theta)$ 为卫星在天顶角 θ 的通道辐射率观测值; $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 为统计回归系数. 通道 5 亮温由下式得到:

$$T_{B5} = \frac{c_2 \nu_0}{\ln(c_1 \nu_0^3 / I(\nu_0, T, 0) + 1.0)}. \quad (10)$$

c_1 和 c_2 是普朗克常数.

1.4 通道 5 亮温-通量等效亮度温度回归关系的建立

基于计算出的 3812 条廓线的通道 5 亮温 T_{B5} 与通量等效亮度温度 T_F , 用 T_{B5} 做 X 轴, T_F 做 Y 轴, $T_{B5} - T_F$ 的回归散点图见图 2, 由图得出回归公式:

$$T_F = A + B \times T_{B5} + C \times T_{B5}^2, \quad (11)$$

式中, A, B, C 是回归系数.

2 VIRR OLR 处理方法

通过读取 FY-3B VIRR 的 1 级预处理数据文件, 应用以上回归模式, 经由一系列公式计算, 得到卫星观测目标的 OLR 值, 具体计算步骤如下:

(1) 通道 5 辐射率计算. 读取 FY3B VIRR 仪器的 L1 级预处理数据文件, 对通道 5 计数值做定标处理, 得到测点的通道 5 辐射率,

$$R(\theta) = s \times I_5 + d, \quad (12)$$

式中, s 和 d 分别是定标系数的斜率和截距, I_5 是通道 5 计数值, $R(\theta)$ 是通道 5 辐射率.

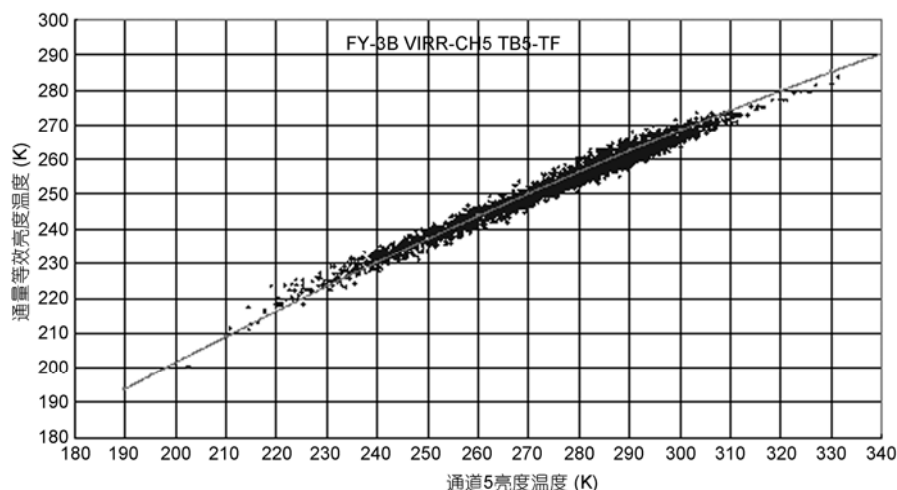


图 2 3812 条大气廓线的 FY3B VIRR 通道 5 等效亮度温度与通量等效亮度温度的回归关系图

(2) 通道 5 辐射率的临边变暗订证. 把卫星在天顶角 θ 测得的通道 5 辐射率 $R(\theta)$ 订证到天顶 $\theta = 0^\circ$ 的辐射率 $R(0)$,

$$R(0) = \left[1 + \alpha_2 (\sec \theta - 1) + \beta_2 (\sec \theta - 1)^2 \right] \times R(\theta) + \alpha_1 (\sec \theta - 1) + \beta_1 (\sec \theta - 1)^2, \quad (13)$$

$\alpha_1 = -5.62987$, $\alpha_2 = 0.08599$, $\beta_1 = 0.31874$, $\beta_2 = -0.00447$.

(3) 通道 5 等效亮度温度计算. 用普朗克公式的反函数计算通道 5 亮温:

$$T_{B5} = \frac{c_2 \nu_0}{\ln(c_1 \nu_0^3 / R(0) + 1)}, \quad (14)$$

式中, $\nu_0 = 856.50 \text{ cm}^{-1}$ 是通道 5 中心波数, c_1 和 c_2 为辐射常数, $c_1 = 1.191065 \times 10^{-5}$, $c_2 = 1.438681$, T_{B5} 单位为 K.

(4) 通量等效亮度温度计算. 用回归公式计算通量等效亮度温度:

$$T_F = A + B \times T_{B5} + C \times T_{B5}^2, \quad (15)$$

式中, $A = 10.5007$, $B = 1.13333$, $C = -0.000917$.

(5) 射出长波辐射通量密度 $E(\text{OLR})$ 计算.

$$E = \sigma \times T_F^4, \quad (16)$$

E 的单位是 W/m^2 , $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ 是斯蒂芬-玻尔兹曼常数.

(6) 日平均 OLR 计算. 对白天、夜间卫星过境时刻的 OLR, 作平均计算, 得到日平均 OLR, 如下式

$$\text{OLRM} = \frac{E_D + E_N}{2}, \quad (17)$$

OLRM, E_D , E_N 依次是日平均、白天和夜间 OLR 数据.

3 VIRR OLR 产品及产品精度

FY-3B 卫星 VIRR 仪器的 OLR 产品是覆盖全球范围的白天、夜间、日、候、旬、月平均 OLR 格点场数据文件, 数据分辨率是 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 经纬度, 图 3 是 2011 年 2 月 8 日的全球日平均 OLR 格点场灰度图像(具体业务存档产品是按 $10^\circ \text{N} \times 10^\circ \text{E}$ 分区的全球 648 个分区产品文件, 文件格式 HDF 5). 由于 FY-3B 卫星过境时间与 NOAA-18 接近, 都在当地时 13~14 时(白天)和 01~02 时(夜间)过境, 因此 FY-3B VIRR 的 OLR 产品精度是通过与 NOAA-18 OLR 产品相对比来确定的. 方法是: 对 FY-3B VIRR 的全球日 OLR 格点场产品作平均处理, 生成规格与 NOAA-18 OLR 产品一致的日 OLR 格点场, 即地理范围在 $87.5^\circ \text{N} \sim 87.5^\circ \text{S}$ 和 $0^\circ \text{E} \sim 0^\circ \text{W}$, 数据分辨率是 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 经纬度, 对格点场进行误差统计, 包括系统均方根误差

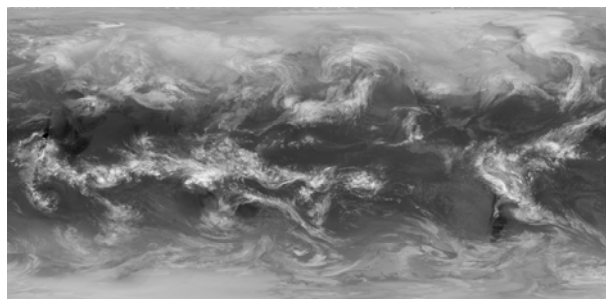


图 3 2011 年 2 月 8 日 FY-3B VIRR 全球日平均 OLR 产品灰度图

(RMSE)、相关系数、绝对误差等数学参量计算,同时对格点场的等值线图 and 灰度图进行对比分析,得出产品精度. 如图 4 和 5 是 2011 年 2 月 8 日的 FY-3B 和 NOAA-18 OLR 资料等值线图,图中格点场的系统误差统计结果为 $RMSE=10.28\text{ W/m}^2$, 相关系数 0.9733, 绝对误差 7.2094 W/m^2 . 造成较大误差的主要原因是两星过同一地理位置时间不完全相同以及定标精度. 在此值得一提的是定标精度,由于 FY-3B VIRR 的通道 5 仪器在高温端($>290\text{ K}$)偏低,造成了在 $OLR>270\text{ W/m}^2$ 的值域 FY-3B 偏低,NOAA-18 约 2 W/m^2 .

4 初步应用

OLR 是地球大气系统辐射能量平衡中的一个重

要组成部分,是气候模式不可缺少的输入参量,而且由于 $OLR\geq 250\text{ W/m}^2$ 的值域很好地反映了副热带高压区,以及 $OLR\leq 220\text{ W/m}^2$ 的值域反映了 ITCZ 的轴线位置,因此它被用来做气候预测,在国家气候中心 NOAA 卫星 OLR 资料被用来监测南海季风,也有不少学者用各种卫星的 OLR 资料研究中国夏季的副热带高压^[8,9]. 同时由于 OLR 的大小很大程度上由发射下表面的温度决定,OLR 高值区表明为温暖的晴空地表,而 OLR 低值区则表明下垫面温度低或是云顶,从图 3 可看出,OLR 产品的灰度图反映了当日全球的云和晴空及冷暖的天气气候状况,可以直接用来分析干旱、降雨等天气过程,功能相当于一张红外云图,寒潮天气过程在 OLR 灰度图上也反映明显. 图 6(a)和(b)是 2008 年 12 月 1 和 5 日华北地区($30^\circ\sim 40^\circ\text{N}$,

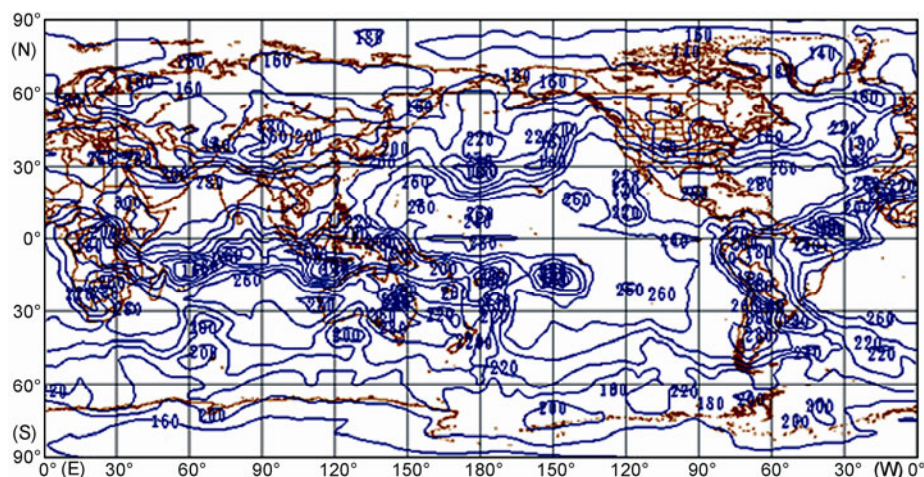


图 4 FY-3B VIRR 日平均 OLR 等值线图(2011 年 2 月 8 日)

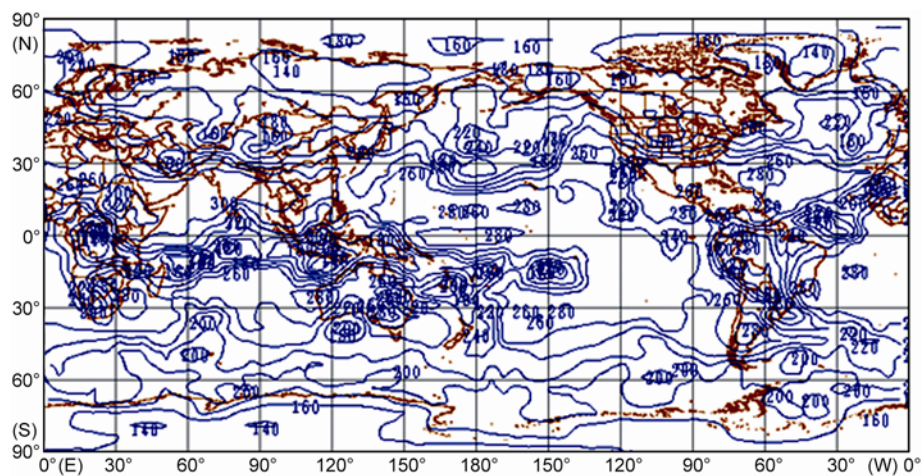


图 5 NOAA-18 AVHRR 日平均 OLR 等值线图(2011 年 2 月 8 日)

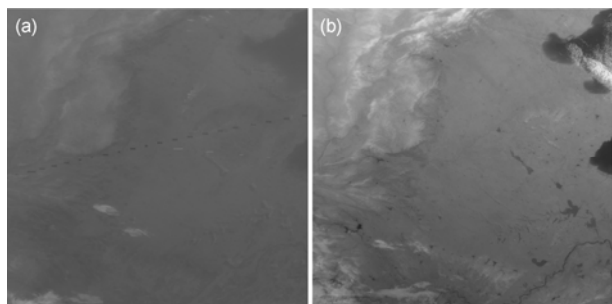


图 6 2008 年 12 月 1 日(a)和 2008 年 12 月 5 日(b)OLR 产品灰度图

110°~120°E)寒潮天气过程的 FY-3A OLR 产品灰度图, 由图看出, 对于晴空地区, 潮前地表温度高, OLR 值较大、图像呈暗色; 潮中温度降低, OLR 值低、图像较亮, 图 7 是 2008 年 12 月 5 日与 1 日的日平均 OLR 差值图, 图上表明寒潮过程引起了日 OLR 近 20 W/m^2 的降低. 此外, 由于 OLR 与云系的高相关性, 在美国它还被用来做降水量估算^[10,11], 以弥补人迹罕至地区的雨量观测不足.

5 结论

本文给出了 FY-3B VIRR 的 OLR 反演模式的建

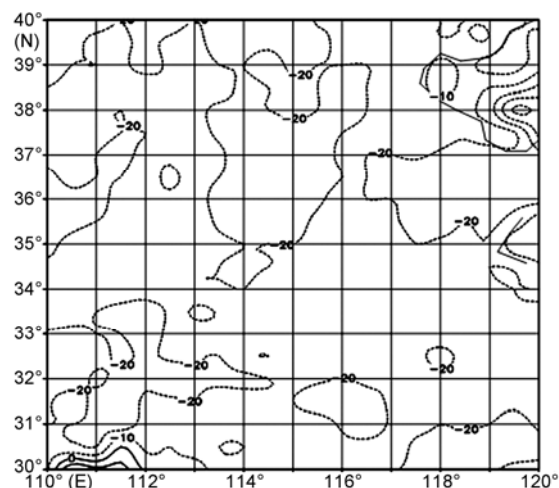


图 7 2008 年 12 月 5 日与 1 日 OLR 的差值图

立过程, 以及由模式及 FY-3B 卫星观测数据计算 OLR 的原理和方法. 从第 3 节精度分析可以看出, 产品精度还有待于提高. 一方面从反演模式着手, 例如改变辐射传输计算中的温室气体含量、以及整理出最近 1~2 年的大气廓线资料; 另一方面仪器定标的改进对于提高 OLR 产品精度也是非常重要的.

参考文献

- Ohring G, Gruber A, Ellingson R. Satellite determinations of the relationship between total longwave radiation flux and infrared window radiance. *J Appl Meteor*, 1984, 123: 416–425
- 黄富祥, 刘年庆, 赵明现, 等. 风云三号卫星紫外臭氧垂直廓线产品反演试验. *科学通报*, 2009, 54: 2556–2561
- 吴晓. 地球大气透射率及辐射率计算. *应用气象学报*, 1998, 9: 124–128
- Selby J E A, McClatchey R A. Atmospheric transmittance from 0.25–28.5 μm : Computer code LOWTRAN-2, AFCRL Technical Report TR-73-0745. 1973
- Kneizys F Y, Shettle E P, Gallery W O. Atmospheric transmittance and radiance: The LOWTRAN 5 Code. In: *Atmospheric transmission, proceedings of the meeting*, Washington D C, April 21, 22, 1981. Bellingham: SPIE, 1981. 116–124
- Peixoto J P, Oort A H, 著. 吴国雄, 刘辉, 译. 气候物理学. 北京: 气象出版社, 1995. 72–103
- 吴晓. FY-2D 静止气象卫星 OLR 反演模式. *气象科技*, 2008, 36: 634–638
- 蒋尚城, 戴志远. 卫星观测的西太平洋副热带高压的气候学特征. *科学通报*, 1989, 19: 1492–1493
- 许晨海, 倪允琪, 朱福康. OLR 资料描述西太平洋副热带高压的一种方法. *应用气象学报*, 2001, 12: 378–382
- Xie P P, Arkin P A. Global monthly precipitation estimates from satellite-observed outgoing longwave radiation. *J Clim*, 1998, 11: 137–164
- Arkin P A, Kelkar R R. Large-scale precipitation and outgoing longwave radiation from INSAT-1B during the 1986 southwest monsoon season. *J Clim*, 1989, 2: 619–628