

张晓虎,张其松,许健民. 半透明云风矢量高度算法中云下背景辐射的估计. 应用气象学报,2017,28(3):283-291.  
DOI: 10.11898/1001-7313.20170303

# 半透明云风矢量高度算法中云下背景辐射的估计

张晓虎 张其松 许健民\*  
(国家卫星气象中心,北京 100081)

## 摘 要

半透明云风矢量高度指定是卫星风矢量算法的重要部分,需要来自半透明云体的辐射和云下背景辐射两个变量。云下背景辐射发生在云层下面,未被卫星直接观测到,为了在半透明云风矢量高度指定算法中更精确地获得云下背景辐射,使用风矢量附近无云区的红外/水汽散点图,估计云下背景辐射。分析表明:在追踪区域内存在无云区的情况下,追踪区的最高红外亮温可代表红外通道的背景辐射;而水汽通道的背景辐射,却在红外亮温高值区段内水汽亮温相对较低区段。追踪区内找不到无云区时应扩大搜索范围,找到无云区后可估计云下背景辐射。在半透明云风矢量高度指定算法中使用云下背景辐射估计的改进算法前后,计算 FY-2 气象卫星进行风矢量,并将结果与欧洲中期天气预报中心(ECMWF)分析场进行对比表明,在半透明风矢量高度指定算法中使用云下背景辐射估计,FY-2 气象卫星风矢量误差明显降低。

**关键词:** 风矢量;半透明云风矢量高度指定;云下背景辐射

## 引 言

风矢量是静止气象卫星的重要定量产品,由国家卫星气象中心自主研发并建立了完整的气象卫星风矢量算法<sup>[1-8]</sup>。FY-2 气象卫星风矢量 2006 年 1 月开始业务发布,在业务运行的初期误差较大<sup>[9]</sup>,经过国家卫星气象中心卫星风矢量工作组的多次算法改进,产品精度显著提高,目前 FY-2 气象卫星风矢量产品已在国家气象中心的 GRAPES 模式中使用<sup>[10-12]</sup>。

在半透明云风矢量高度指定算法中,首先从风矢量附近找到无云区,然后采用无云区的红外/水汽亮温散点图估计云下背景辐射。Takahito 等<sup>[13]</sup>讨论了半透明云高度指定的细节,包括日本气象厅半透明云高度指定算法过去存在的问题,对文献<sup>[14]</sup>方法实施了改良:在红外/水汽散点图上根据卫星测值点图型分布,推测晴空辐射点的位置,这里的晴空辐射点就是来自云下背景辐射。

在云区的范围非常大完全覆盖追踪图像块的情况下,追踪图像块中未包含地面像元,有的甚至只有高云信息。但在进行半透明云高度指定时,需要使用来自云下背景辐射。因此,在 FY-2 气象卫星半透明云高度指定算法中,追踪图像块完全被云覆盖的情况下,需要逐步扩展寻找范围,直至找到无云像元,然后进行半透明云风矢量高度指定。

## 1 典型案例

本文通过分析红外/水汽散点图典型案例,讨论根据红外/水汽散点图的图型估计云下背景辐射的方法。

图 1~图 4 显示了 8 个典型图型案例的 32×32 像元红外(IR)/水汽(WV)图像块、红外/水汽通道相互关系散点图(简称红外/水汽散点图),以及散点图上某些典型特征点在追踪图像块中的位置(A,B,C)。散点图上叠加的红色曲线为数值预报产品指示存在不透明的密实云时红外/水汽两个通道黑

2016-12-13 收到,2017-04-10 收到再改稿。

资助项目:国家自然科学基金项目(41275036),公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306001)

\* 通信作者, email: xujm@cma.gov.cn

体辐射之间的相互关系(简称不透明云曲线)。这些典型案例重点显示云型情况下,如何从卫星图像上得到红外通道的云下地面辐射和水汽通道的云下背景辐射。本章中所使用的图型案例均取自2016年1月27日23:00(世界时,下同)的FY-2G气象卫星云图。虽然本章所使用的图型案例仅取自一个时刻的云图,但这些案例所代表的图像特征是从长时间大量卫星云图的观察中归纳总结出来的,具有典型性、代表性和完整性。

### 1.1 追踪图像块内存在多种发展高度不同云的情况

图1a代表热带辐合带中混合着深对流的多层云的情况,图1b代表孤立深对流云及其周边的情况。在这两个案例的散点图上,测值点的分布范围非常广,几乎与数值预报产品不透明云曲线伸展范

围相当。因为数值预报产品不透明云曲线包含了案例所在地点对流层里出现的所有亮温,卫星测值范围与之相当,说明在这两个案例的追踪区域里,高、中、低各个层的云都存在。将图1a和图1b的红外/水汽散点图与追踪区图像对比可以看到,在散点图A区,红外和水汽亮温均处于低值区段,图像块为密实云区;散点图红外和水汽亮温均在测值中间区段的B区,在图像块上位于密实云区的边缘;散点图红外和水汽亮温处于高值区段的C区,在图像块上位于云区之间的缝隙中,那里可能没有云,也可能只有一些低云。

在这种情况下,可以使用追踪区内红外亮温高值区段的散点作为晴空辐射点进行云下背景辐射的估计。

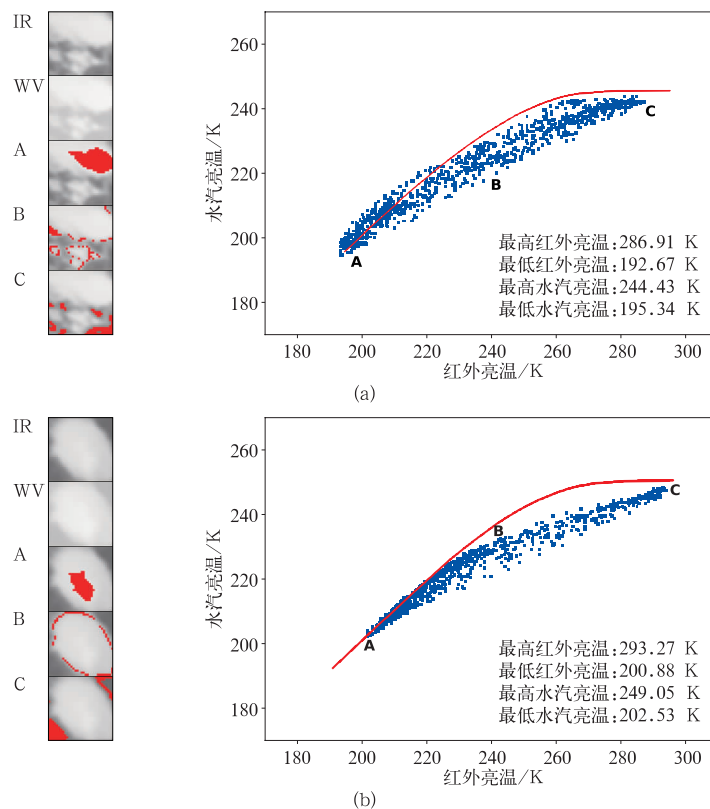


图1 热带辐合带中混合着深对流的多层云典型案例

(a)追踪图像块位于 $2.86^{\circ}\text{N}, 138.7^{\circ}\text{E}$ ,

(b)追踪图像块位于 $2.77^{\circ}\text{N}, 111.88^{\circ}\text{E}$

Fig. 1 Typical example analysis charts for multiple layers of clouds with deep convections in ITCZ

(a)tracer box located at  $2.86^{\circ}\text{N}, 138.7^{\circ}\text{E}$ ,

(b)tracer box located at  $2.77^{\circ}\text{N}, 111.88^{\circ}\text{E}$

### 1.2 追踪图像块位于云区外围的情况

图 2 的追踪图像块代表在高云区外围,卷云向云区以外越来越薄的情况。此类案例非常多见,值得关注。图 2 散点图表现为“逗点”型,位于右上角的头部很浓密,位于左下角的尾部则相对稀疏。散点图尾部对应的 A 区红外亮温和水汽亮温在追踪图像块的范围内相对最低,位于密实云区的边缘。B, C, D 3 个区在散点图上的分布依次向右、向上移动,即从 B 区经 C 区到 D 区,红外亮温和水汽亮温逐渐提高,在对应图像上的地理位置离密实云区的边缘越来越远。对比 E 区和 D 区,两个区的红外亮温相当,但 E 区的水汽亮温比 D 区更高。对比 E 区和 D 区在图像上的位置, E 区比 D 区离密实云区更靠外围。因此,追踪图像块从 A 区向 C 区越来越远时,云离开其母体越来越远,云越来越薄,从云下背景向上的辐射更多地被卫星获得,从 A 区向 C 区,红外亮温和水汽亮温越来越高。从 C 区到 D 区, C 区尚存在极薄的云, D 区无云, D 区红外亮温与 E 区

相当。D 区和 E 区无云,但它们所在地点的湿度条件不同。D 区比 E 区离云区更近,大气中水汽更多,受水汽通道吸收再发射过程的影响, D 区水汽亮温比 E 区低。为了指定从 A 区到 C 区追踪云范围内半透明云的高度,应使用离云的母体更近的 D 区的水汽亮温, D 区水汽条件比 E 区更接近从 A 区到 C 区存在半透明云位置。

由以上分析可知,如果追踪区域已观测到晴空无云区,且该区域下垫面均匀,从云缝观测到的红外亮温高值区段,可以代表从云下地面向上的红外辐射。在红外/水汽散点图上,红外亮温高值区段内,应选择水汽亮温相对较低区段估计自下而上水汽通道的背景辐射。即图 2 所示案例中,应选择 D 区而非 E 区亮温,估计来自云下水汽通道背景辐射。Takahito 等<sup>[13]</sup>首先指出了这一现象,且提出红外/水汽散点图上选择红外亮温高值区段内的水汽亮温低值区段散点作为晴空辐射点进行云下背景辐射的估计。

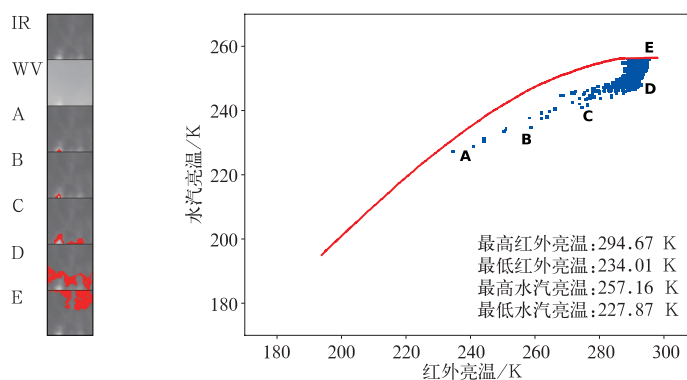


图 2 深对流云外围消散中的卷云典型案例

(追踪图像块位于 12.59°N, 130.44°E)

Fig. 2 Typical example analysis chart for dissipating cirrus cloud outer of deep convective clouds

(tracer box located at 12.59°N, 130.44°E)

以上分析表明:如果追踪区内包含有地面像元,可以使用追踪区内红外亮温高值区段,以及红外亮温高值区段内水汽亮温相对低值,代表从云下背景向上的辐射。

### 1.3 追踪图像块内仅存在高云或中高云的情况

图 3 代表存在大尺度天气系统,追踪图像块位于大范围密实云区的内部,仅观测到高云或中高云,未观测到中低云和地面的情况。图 3a 所示追踪图像块位于一个热带气旋密实云区的内部,图 3b 所示

追踪图像块位于一个发展中温带气旋叶状云锋面云带的内部。在图 3a 和图 3b 红外/水汽散点图上,亮温多分布在数值预报产品不透明云曲线的左下侧。由图 3a 的 A 区—B 区—C 区以及图 3b 的 A 区—B 区变化可知,红外亮温和水汽亮温的变化幅度小,在追踪图像块范围内未寻找到代表云下地面的像元点。对于这种类型的案例,需要扩大搜索范围,在追踪区的附近寻找红外通道地面辐射和水汽通道背景辐射。

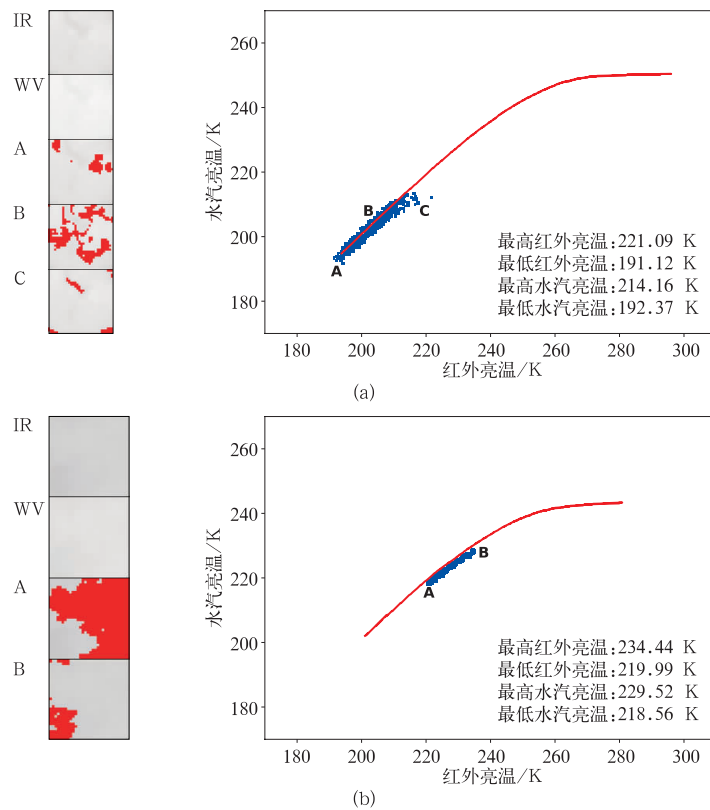


图3 热带密实云区中的深对流云典型案例

(a)追踪图像块位于 18.48°S, 117.45°E,

(b)追踪图像块位于 25.90°N, 112.84°E

Fig. 3 Typical example analysis charts for deep convective clouds in a tropical cyclone

(a)tracer box located at 18.48°S, 117.45°E,

(b)tracer box located at 25.90°N, 112.84°E

#### 1.4 追踪图像块内仅存在中低云和地面的情况

图4代表追踪区内存在中云、低云以及晴空的情况。追踪区内不存在高云,这些案例水汽亮温变化范围小。图4a和图4b的红外/水汽散点图上,亮温呈“一”字型分布;图4c中亮温缩成一个点。该特征也反映在追踪区域里红外/水汽亮温的相关上。追踪区域里有密实深对流的案例(图1a、图1b、图3a、图3b),因为红外通道和水汽通道均可观测到高云,红外/水汽亮温的相关系数最高,达到0.9以上;追踪区域位于深对流云外围存在消散中卷云的案例(图2)以及追踪区域存在高度较高层状云的案例(图4a),水汽通道被较高的云屏蔽,仅观测到部分云下背景,云下背景对卫星观测贡献有限,红外/水汽亮温相关系数为0.7~0.8;对于追踪区域仅有低

云的案例(图4b),水汽通道不能获得低云信息,红外/水汽亮温相关系数为负值;对于追踪区为晴空的案例(图4c),追踪区内像元亮温几乎一致,导致计算相关系数时由于方差过小,该情况不进行风矢量的计算。

根据这样的分析,Xu等<sup>[2]</sup>首先提出,只对追踪区内红外/水汽亮温相关系数大于0.35的追踪图像块进行半透明云高度指定处理。如果追踪区域内红外/水汽亮温相关系数小于0.35,说明追踪区域内只存在低云或地面。因为低云一般是水云,其发射率与黑体相当,可直接使用追踪区域内的最低红外亮温估计云高。对此第4届国际卫星风会议曾给予高度评价<sup>[15]</sup>,在中国国家卫星气象中心风矢量高度指定算法中,一直使用这样的处理方法<sup>[16]</sup>。

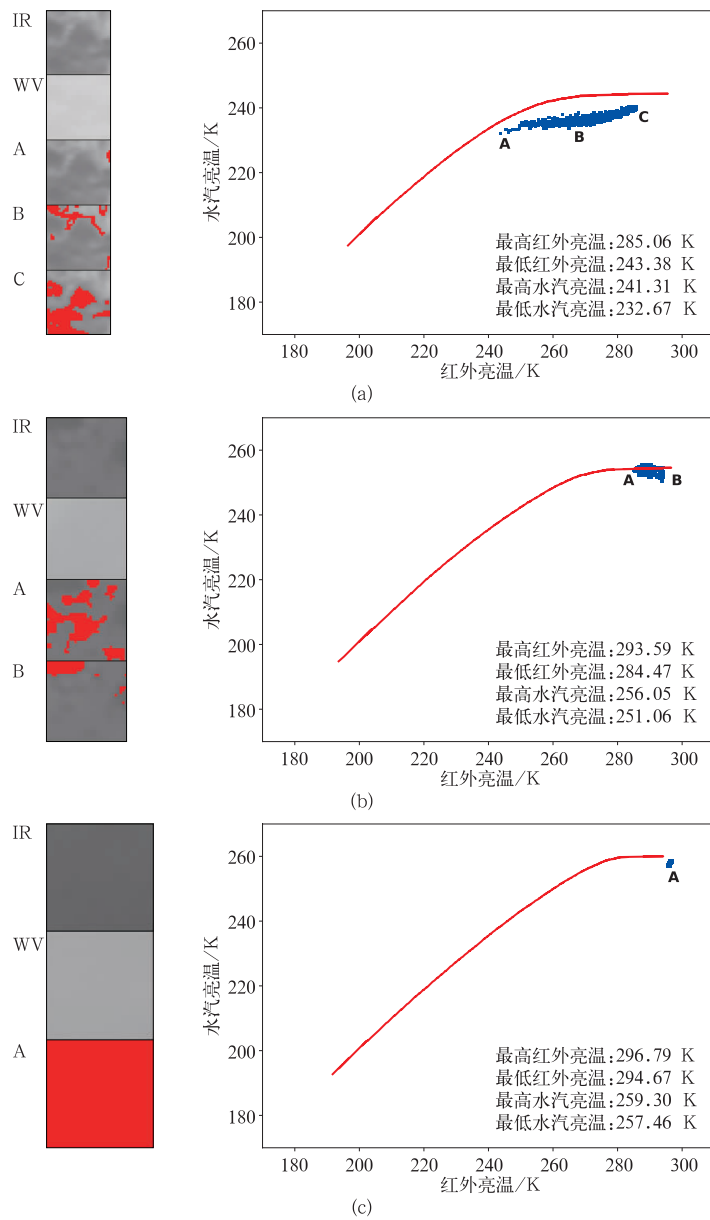


图 4 追踪区内只存在中低云和地面典型案例分析  
 (a)追踪图像块位于 6.09°S,131.98°E,(b)追踪图像块位于 14.51°S,105.39°E,(c)追踪图像块位于 17.02°N,90.38°E

Fig. 4 Typical example analysis charts for middle or low layer clouds

- (a)tracer box located at 6.09°S,131.98°E,
- (b)tracer box located at 14.51°S,105.39°E,
- (c)tracer box located at 17.02°N,90.38°E

## 2 散点图的图型特征对云下背景辐射指示意义

1.1~1.4 节分析 4 种情况:①追踪区内存在多种发展高度不同的云;②追踪区在云区的外围,从云

区向外云越来越薄;③追踪区内仅存在高云或中高云,不存在中低云和地面;④追踪区内仅存中低云和地面。除了情况③,其余的情况在追踪区均存在地面信息。在追踪区内包含有地面的情况下,可以采用追踪区内最高红外亮温代表红外通道的云下地面。对于情况②,红外/水汽散点图上红外亮温高值

区段里,应选择水汽亮温相对较低区段,估计自下而上水汽通道的背景辐射。对于情况④,从低云向上的水汽通道辐射,被云层上面大气中的水汽屏蔽,所以卫星水汽通道无法获得高度低于权重函数高度的低云,水汽通道亮温对于低云中半透明云高度指定不发挥作用。低云一般为水云,可直接使用红外通道亮温指定云的高度,不需要进行半透明云高度指定处理。

### 3 追踪图像块不包含地面像元的解决方案

图 3a 和图 3b 代表由于追踪图像块恰好位于大尺度天气系统中大范围密实云区的内部,仅观测到高云或中高云,未观测到中低云和地面的情况。在该情况下,需要通过在追踪图像块周边扩大搜索范围,寻找云下地面亮温。在图 3a 和图 3b 图像块以外的周边地区,搜索云下地面亮温的效果显示于图 5a 和图 5b。在图 5a 和图 5b 的红外/水汽散点图上蓝色表示取自  $32 \times 32$  像元追踪区以内,绿色表示取自  $32 \times 32$  像元以外、 $32 \times 80$  像元以内,红色表示  $32 \times 80$  像元以外、 $32 \times 128$  像元以内。图 5a 和图 5b 中右下方嵌入的小图,代表 3 种颜色范围里的红外图像,从蓝色、绿色到红色,搜索范围逐渐扩大。对比图 5 和图 3 可以看到,扩大搜索范围以后,散点

图上逐渐显示出红外和水汽亮温较高部分;红外图像上也看到了色调较深的目标,它们位于云的缝隙之中,显然比中高云观测像元更接近地面。

对本文所列举的所有案例以及大量其他案例,进行扩大搜索范围,在追踪区以外的周边地区,寻找云下地面亮温的检查。结果表明:扩大搜索范围后,在红外/水汽散点图上可以看到从高到低更加完备的各类云状。利用红外/水汽散点图和数值预报产品密实云红外/水汽曲线联合进行半透明云风矢量高度指定,需要卫星观测到的云状特征比较完备,包括从密实到半透明、从高到低的各类云状以及地面。在该情况下,红外/水汽散点图的左上方边缘,与数值预报产品密实云曲线吻合,半透明云高度指定效果可能更佳。如果追踪区位于大尺度天气系统内部,追踪区以内仅为高云,没有云缝下的地面信息,云下背景辐射估计不准确,会给半透明云高度指定带来误差。所以扩大范围搜索云下地面亮温是必要的。

图 6 是在图 2 的追踪区外,扩大范围搜索云下地面亮温的效果。由图 6 的红外/水汽散点图可以看到,扩大搜索范围后,外围红色区域为密实的深对流云,这些深对流云出现在图 6 中红外图像追踪区西南方向的外围。

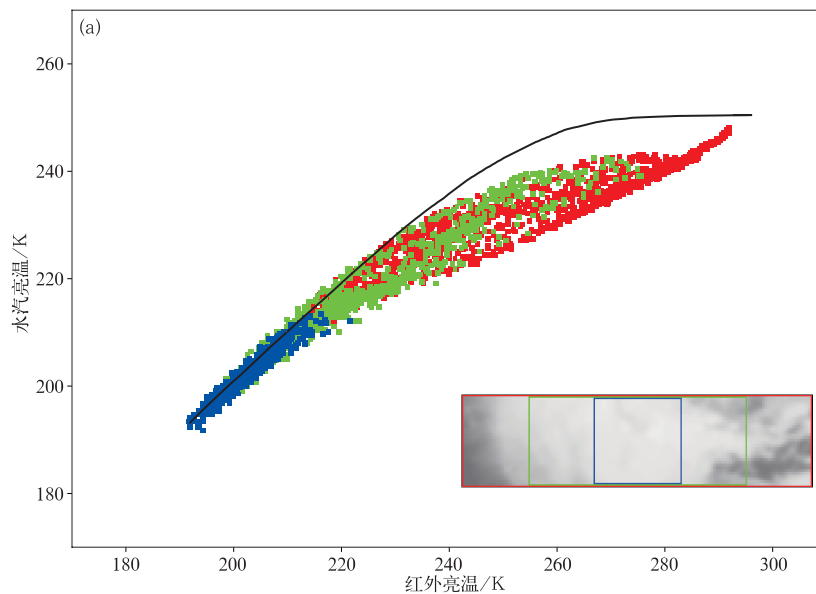
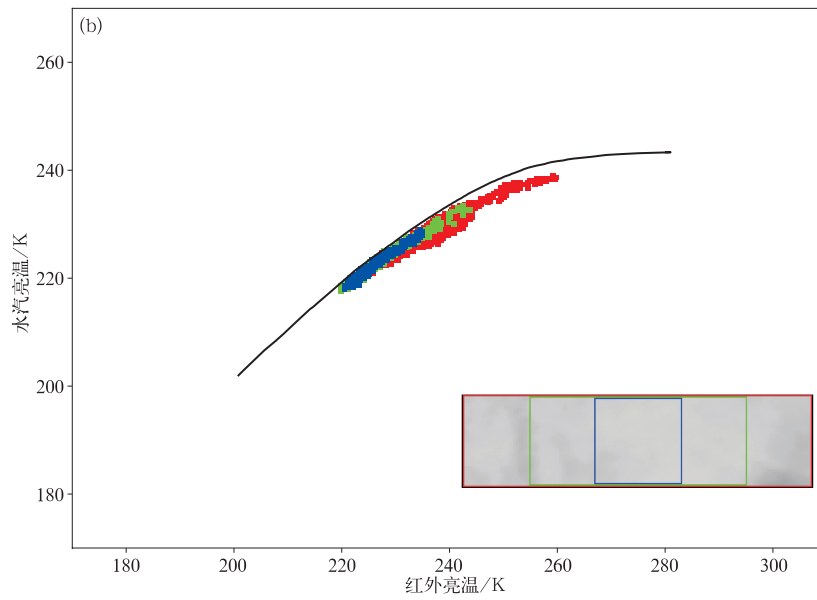


图 5 对密实云区的典型案例扩大搜索范围寻找云下地面亮温的效果

(a)追踪图像块位于  $18.48^{\circ}\text{S}, 117.45^{\circ}\text{E}$ , (b)追踪图像块位于  $25.90^{\circ}\text{N}, 112.84^{\circ}\text{E}$

Fig. 5 For deep convective clouds, expanding search area to seek back ground temperature underneath clouds (a) tracer box located at  $18.48^{\circ}\text{S}, 117.45^{\circ}\text{E}$ , (b) tracer box located at  $25.90^{\circ}\text{N}, 112.84^{\circ}\text{E}$



续图 5

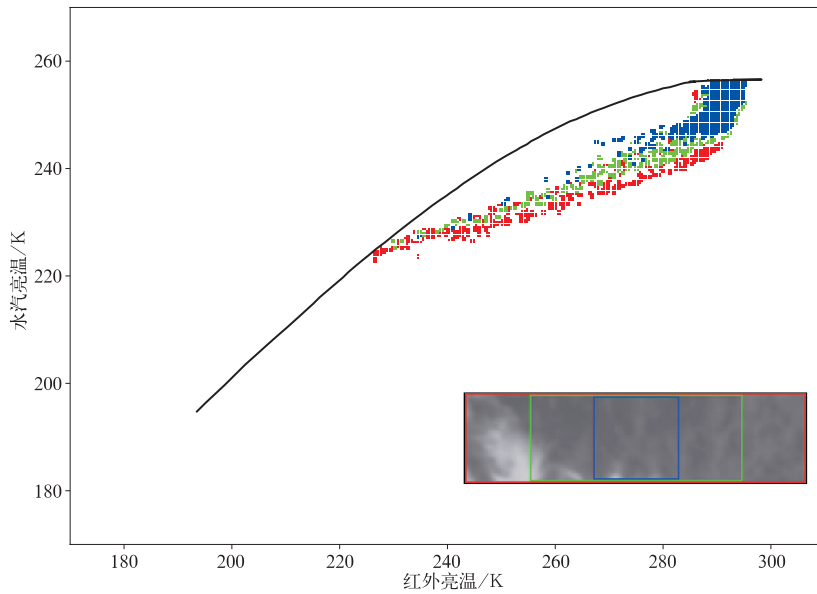


图 6 扩大范围在深对流云外围消散中卷云搜索云下地面亮温效果  
 (追踪图像块位于 12.59°N,130.44°E)

Fig. 6 For dissipating cirrus cloud outer of deep convective clouds, expanding search area to seek background temperature underneath clouds  
 (tracer box located at 12.59°N,130.44°E)

#### 4 是否使用云下背景辐射风矢量误差对比

表 1 列出 2012 年 1 月 16 日 FY-2E 气象卫星 4 个观测时次,在半透明云风矢量高度指定算法中是

否使用云下背景辐射(其他均一致),红外高层风(0~399 hPa)风速与欧洲中期天气预报中心(ECMWF)分析场的偏差和标准差。由表 1 可以看到,使用了云下背景辐射以后,风速的偏差和标准差均降低。



表1 半透明云风矢量高度指定算法中是否使用云下背景辐射  
FY-2E 气象卫星红外高层风风速与 ECMWF 分析场比较

Table 1 Biases and standard deviations between FY-2E wind vectors and ECMWF analyses for height assignment algorithms whether using background radiation

统计量	未使用云下背景辐射	使用云下背景辐射
偏差/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	-1.571	-1.012
标准差/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	7.964	7.754
风矢量数	31507	34187

## 5 小 结

研究表明:

1) 在实施半透明云高度指定算法时,需要使用来自云下面的红外通道地面辐射和水汽通道背景辐射。

2) 在追踪区内包含地面信息时,可以用追踪区内观测到的最高红外亮温,代表红外通道的云下地面辐射;在红外/水汽散点图上,红外亮温高值区段应选择水汽亮温相对低值区段,估计自下而上水汽通道的背景辐射。红外亮温高值区段内,具有相对较低水汽亮温的观测像元,位于云区边缘附近的晴空区,这些区段比远离云区处湿度大,更能代表云下的大气层结条件。由于水汽吸收的再发射作用,水汽通道亮温相对较低。

3) 如果追踪区位于大尺度天气系统内部,追踪区内仅有高云,无云缝下地面信息,扩大范围搜索云下地面亮温是必要的。

4) 使用欧洲中期天气预报中心分析场对在半透明云风矢量高度指定算法改进前后的 FY-2E 气象卫星风矢量进行误差分析,结果表明:在半透明云风矢量高度指定中使用云下背景辐射估计的算法,卫星风矢量误差明显降低。

## 参 考 文 献

- [1] Xu Jianmin, Zhang Qisong. Calculation of Cloud Motion Wind with GMS-5 Images in China // Proceedings of the Third International Winds Workshop. EUMETSAT Publication, 1996, EUM P18:45-52.
- [2] Xu Jianmin, Zhang Qisong, Fang Xiang, et al. Cloud Motion Winds from FY-2 and GMS-5 Meteorological Satellites // Proceedings of the 4th International Winds Workshop. EUMETSAT Publication, 1998, EUM P24:41-48.
- [3] Xu Jianmin, Zhang Qisong. Recent Works Aimed at Operational FY2C AMVS // Proceedings of the 7th International Winds, 2004.
- [4] Xu Jianmin, Zhang Qisong, Zhang Xiaohu, et al. Status of Operational AMVs from FY-2C // Proceedings of the 8th International Winds Workshop, 2006.
- [5] Zhang Xiaohu, Xu Jianmin. Two Applications of Improvements for AMVs of NSMC/CMA - Re-navigation Based on Full Earth Disk Image & Calibration of Radiation Transfer Using NWP data. The 10th International Winds Workshop, 2010.
- [6] 许健民,张其松.云迹风计算中的两个几何问题.应用气象学报,1997,8(1):11-18.
- [7] 许健民,张其松,方翔.用红外和水汽两个通道的卫星测值指定云迹风的高度.气象学报,1997,55(4):408-417.
- [8] 许健民,张其松.卫星风推导和应用综述.应用气象学报,2006,17(5):574-582.
- [9] 薛湛彬,龚建东,薛纪善,等. FY-2E 卫星云导风定高误差及在同化中的应用.应用气象学报,2011,22(6):681-690.
- [10] 王金成,陆慧娟,韩威,等. GRAPES 全球三维变分同化业务系统性能.应用气象学报,2017,28(1):11-24.
- [11] 黄丽萍,陈德辉,邓莲堂,等. GRAPES\_Meso V4.0 主要技术改进和预报效果检验.应用气象学报,2017,28(1):15-37.
- [12] 朱立娟,龚建东,黄丽萍,等. GRAPES 三维云初始场形成及在短临预报中的应用.应用气象学报,2017,28(1):38-51.
- [13] Takahito I, Oyama R. Developments for Quality Improvement of Atmospheric Motion Vectors Product, 2008:55.
- [14] Szejwach G. Determination of semitransparent cirrus cloud temperature from infrared radiances: Application to Meteosat. *J Applied Meteor*, 1982, 21(3):384-393.
- [15] Schmetz J, Hinsman D, Menzel W P. Summary of the Fourth International Wind Workshop. *Bull Amer Meteor Soc*, 1999, 80(5):893-899.
- [16] 张晓虎,张其松,许健民.半透明云风矢量高度算法中代表运动像元的使用.应用气象学报,2017,28(3):270-282.



## Estimation of Background Radiation Underneath Clouds for Wind Vector Height Assignment of Semi-transparent Clouds

Zhang Xiaohu Zhang Qisong Xu Jianmin

(*National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081*)

### Abstract

Height assignment of semi-transparent clouds needs two variables: Radiation from the semi-transparent clouds themselves and radiation from the background underneath semi-transparent clouds. The background radiation is not directly observed by the satellite, but can be estimated with infrared/water vapor scatter diagrams of satellite measurements around tracer image boxes. According to the cloud amount and type observed, tracer image boxes can be divided into 4 types: With different levels of clouds inside, near the cloud edge, with only high or middle-high clouds inside and with only middle-low clouds or ground in tracer box. By studying characteristics of infrared/water vapor scatter diagrams of satellite measurements in 8 typical cases of 4 types which are variety, different estimation methods are discussed and a new estimation method for only high or middle-high clouds in tracer box is proposed. When there are cloud-free pixels in tracer boxes, infrared maximum brightness temperature may represent the background radiation for infrared channel; on the other hands, observation pixels with the highest infrared but relative lower water vapor brightness temperatures are used to estimate the background radiation for water vapor channel. Observation pixels with high infrared, but relative lower water vapor brightness temperatures are located in the clear sky region near the cloud edge, where atmospheric stratification conditions are relatively wetter than the region far away from clouds. The clear sky region near the cloud edge relatively better represent the condition underneath clouds better. Due to absorption and retransition processes, the water vapor brightness temperatures with wetter atmospheric stratification conditions in the clear sky region near the cloud edge are relative lower. When there are no cloud-free pixels in the tracer image box, the searching area should be expanded in the east—west direction to find cloud free pixels, until the background radiation can be estimated.

Based on the new estimation method, FY-2 wind vector height assignment algorithm is improved, and effectiveness is analyzed by comparing with ECMWF reanalysis data, showing that FY-2 wind vector quality including biases and standard deviations is improved obviously.

**Key words:** wind vectors; height estimation of semi-transparent clouds; background radiation underneath clouds