

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.
DOI: 10.11898/1001-7313.20170302

半透明云风矢量高度算法中代表运动像元的使用

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,需要使用来自半透明云体的辐射和云下背景辐射两个变量。为了更精确地获得来自半透明云体的辐射,采用像元对追踪相关系数的贡献和红外亮温两个变量进行统计分析,将追踪图像块中的像元分为 3 个部分:小贡献像元、暖区段大贡献像元和冷区段大贡献像元;对暖区段、冷区段内大贡献像元的特征进行考察表明,冷区段的大贡献像元更能代表追踪图像块运动,称为代表运动像元。选择代表运动像元参与计算来自半透明云体的辐射,对半透明云风矢量高度指定算法进行改进,在该算法中分别使用和不使用代表运动像元,计算 FY-2 气象卫星风矢量,将结果与欧洲中期天气预报中心(ECMWF)分析场进行对比表明,在半透明云高度指定算法中使用代表运动像元,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;代表运动像元

引 言

风矢量是静止气象卫星的重要定量产品。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^[1-7]。FY-2 气象卫星风矢量产品 2006 年 1 月开始业务发布,在业务运行初期误差较大^[8],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^[9-11]。

卫星风矢量的精度与追踪目标物(通常是云)的高度确定精度关系极大。静止气象卫星在 3.6×10^4 km 的高度观测地球,而云最高十几千米,用几何方法很难确定云的高度,因此,云高确定一般采用物理方法^[12-14]。在物理方法中,对于密实不透明云,可用窗区红外通道亮温直接确定其高度;但对于地球上大量存在的半透明卷云,由于从半透明卷云向上的辐射中含有来自云下背景的辐射,窗区红外通道亮温高于半透明卷云本身的亮温,因此,如果仅使

用 1 个窗区红外通道,将低估云的高度。

针对单通道卫星风矢量高度指定算法的不足,发展出双通道高度指定的算法。Szejwach^[15]首先提出使用 1 个透明通道(红外)和 1 个半透明通道(水汽)亮温,共同确定半透明云高度的算法。该算法需要使用来自半透明云体的辐射和云下背景辐射两个变量。对于来自半透明云体的辐射,早期的风矢量高度指定算法是将追踪图像块作为整体进行处理^[16-18];对于密实云体的风矢量高度指定,认为追踪图像块中亮温最低(高度最高)的云的高度,代表风矢量所在的高度;对于半透明云体风矢量高度指定,追踪图像块中全部像元参与聚类分析,得到来自半透明云体辐射,进行半透明云高度订正。

Büche^[19]在估计自半透明云体的辐射时,不再将追踪图像块作为整体进行处理,提出在追踪图像块中选择部分对相关系数做出较大贡献的像元参与来自半透明云体辐射的计算;Borde^[20]和 Oyama 等^[21]将对相关系数做出较大贡献的像元用于红外图像风矢量高度指定,利用像元对相关系数的贡献和像元的红外辐射亮温绘制散点图(以下简称贡献

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

/亮温散点图),根据图中散点分布分析追踪图像块中哪些像元更能代表追踪图像块中云的运动。使用对相关系数做出贡献的像元参与卫星风矢量的高度指定,较以前将图像块作为整体进行处理更精细准确。

本文采用文献[19-21]方法,考察了 FY-2 气象卫星图像和风矢量资料,尝试从贡献/亮温散点图上找出更能代表追踪图像块中云运动的区段,通过考察该区段内像元所代表的云的高度,改善 FY-2 气象卫星风矢量高度指定效果。

1 半透明云风矢量高度指定算法简介

1.1 半透明云风矢量高度指定的物理原理

由于从半透明卷云向上的辐射中含有来自云下背景的辐射,窗区红外通道的亮温高于半透明卷云本身亮温,因此,如果只使用一个窗区红外通道,将低估云的高度。Szejwach^[15]提出使用一个透明通道(红外)和一个半透明通道(水汽)亮温共同指定半透明云高度的算法。半透明云像元的辐射测值,由两部分组成,一部分来自半透明云本身,另一部分来自云下背景^[17];而半透明云的透过率,不同的通道之间差别不大。这样的假定可以表示为式(1)、式(2),半透明云风矢量高度指定算法示意图 1。图 1 中密实云、半透明云、云下背景这 3 个点,分别表示来自半透明云、密实云、云下背景的辐射率。将它们分别乘该辐射率所占面积的比例,得到式(1)和式(2)中的 3 项:

$$R_{\text{IR}}(T_{\text{pixel}}) = ER_{\text{IR}}(T_{\text{cloud}}) + (1-E)R_{\text{IR}}(T_{\text{surface}}), \quad (1)$$

$$R_{\text{WV}}(T_{\text{pixel}}) = ER_{\text{WV}}(T_{\text{cloud}}) + (1-E)R_{\text{WV}}(T_{\text{background}})。 \quad (2)$$

式(1)和式(2)分别适用于红外和水汽通道。其中, $R_{\text{IR}}(T_{\text{pixel}})$, $R_{\text{WV}}(T_{\text{pixel}})$ 为卫星观测到的半透明云像元的红外及水汽辐射,相当于亮温为 T_{pixel} 的黑体辐射率乘半透明云所占的面积比例 1,为已知量。 $ER_{\text{IR}}(T_{\text{cloud}})$ 和 $ER_{\text{WV}}(T_{\text{cloud}})$ 为来自半透明云体自身的辐射对卫星入瞳辐射的贡献,相当于半透明云体同高度上假定存在密实云体时,密实云体的红外及水汽黑体辐射率(简称密实云体的辐射率)乘有云区域在像元中所占的比率 E ,其与半透明云的环境温度有关,因此,也与云的高度有关,是指定云高所需未知量。 $(1-E)R_{\text{IR}}(T_{\text{surface}})$ 和 $(1-E)R_{\text{WV}}(T_{\text{background}})$ 为从

半透明云下面穿过云上行的红外及水汽通道背景辐射对卫星入瞳辐射的贡献,是云下背景辐射率,即红外通道的地面辐射率 $R_{\text{IR}}(T_{\text{surface}})$ 或水汽通道的背景辐射率 $R_{\text{WV}}(T_{\text{background}})$ 分别乘无云区域在像元中所占比率 $(1-E)$ 。云下背景辐射发生在云下,未被卫星直接观测到,但它对半透明云像元的卫星辐射测值有重要贡献,是准确估计半透明云高度必需的物理量。由于式(1)和式(2)所表达的规律,半透明云体自身的辐射率、从半透明云下面穿过云上行的背景辐射率、密实云体的辐射率这 3 个点,在图 1 中位于同一条直线上。

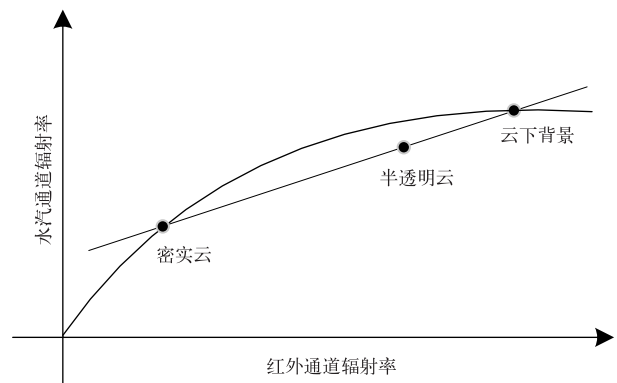


图 1 半透明云风矢量高度指定算法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the algorithm of semi-transparent cloud height estimation

式(1)和式(2)仅指出对于半透明云,这 3 个点辐射率之间存在线性相关关系,还未解算出密实云体的辐射率。为了得到密实云体的辐射率,还需要约束条件,即在任何高度上,当存在不透明的密实云时,两个通道黑体辐射率之间的相互关系曲线。该关系曲线可以根据数值预报温湿度廓线等数据用辐射传输模式计算得出,为图 1 所示曲线。密实云体的辐射率,既要在卫星观测到的半透明云体红外、水汽通道相互关系直线上;又要在利用数值预报资料计算得到的密实云体红外、水汽通道相互关系曲线上。算法中,首先必须确定通过半透明云体辐射率 $R_{\text{IR}}(T_{\text{pixel}})$, $R_{\text{WV}}(T_{\text{pixel}})$ 及云下背景辐射率 $R_{\text{IR}}(T_{\text{surface}})$, $R_{\text{WV}}(T_{\text{background}})$ 的直线。其中来自半透明云体的辐射率虽为观测已知量,但过去将追踪图像块作为一个整体估计这一物理量不够精细,而云下背景辐射率未被卫星直接观测到,因此,准确估计来自半透明云体的辐射率和云下背景辐射率,对于半透明云高度指定十分重要。

本文讨论半透明云体辐射率的估计,云下背景辐射率的计算问题另文讨论^[22]。

1.2 对相关系数做出较大贡献像元的高度指定算法简介

如果将某时刻的追踪图像块 B,在下一时刻范围较大的追踪图像块 A 内搜索相关系数最大的匹配图像块,那么相关系数 c 的计算公式可写为

$$\begin{aligned} c(m,n) &= \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{a_{i+m,j+n} - \bar{a}(m,n)}{\sigma_a(m,n)} \frac{b_{i,j} - \bar{b}}{\sigma_b} \\ &= \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N c_{i,j}(m,n). \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中, M,N 分别为追踪图像块 B 的大小(M 行、 N 列), m,n 分别为追踪图像块 B 在图像块 A 中行、列方向的偏移, $c(m,n)$ 为追踪图像块 B 和匹配图像块的相关系数, b 和 a 分别为追踪图像块 B 和匹配图像 A 中的像元亮温, \bar{b} 和 σ_b 分别为追踪图像块 B 内所有像元的亮温平均值和标准差, \bar{a} 和 σ_a 分别为图像块 A 中匹配图像块内所有像元的亮温平均值和标准差, $c_{i,j}$ 为两幅图中某两个像元即追踪图像块 B 中 (i,j) 位置的像元和图像块 A 中 $(i+m,j+n)$ 位置的像元,对相关系数的贡献值。Büche 等^[19]观察了追踪图像块中逐个像元对相关系数的贡献与像元亮温之间的关系发现,可以在追踪图像块中选择一部分对相关系数做出较大贡献的像元,参与风矢量的高度指定,由于这里所讨论的问题是用相关搜索法追踪云的运动,因此,形象地将一部分对相关系数做出较大贡献的像元称为代表运动像元。

Borde^[20]和 Oyama 等^[21]将对相关系数做出较大贡献的像元用于半透明云风矢量高度指定,利用像元贡献/亮温散点图,点的分布表现为“C”字型,在“C”字型的右上部和右下部,分别聚集着两部分对相关系数做出较大贡献的像元,其亮温有很大差别,称为冷区段大贡献像元和暖区段的大贡献像元。其中仅一个区段的图像像元,能代表追踪图像块中云的运动。Borde^[20]和 Oyama 等^[21]认为,如果追踪图像块部分被云覆盖,那么冷区段的图像像元更能代表追踪图像块中云的运动;如果追踪图像块全部被云覆盖,那么暖区段的图像像元更能代表追踪图像块中云的运动;如果所考察的云形状发生了改变,或者正处于快速地发展或消散之中,那么那些变化之中的云对应的像元,对相关系数所做贡献很小,甚至为负值,不应参与半透明云风矢量高度指定。

2 典型案例

典型案例均取自 2016 年 6 月 22 日 23:30(世界时)的 FY-2G 气象卫星云图。虽然本文所用案例仅取自一个时刻的云图,但其所代表的图像特征是从长时间大量卫星图像的观察中归纳总结出来的,具有典型性、代表性和完整性。

每个案例(图 2、图 3)的图件分为两部分展示,左侧自上而下包含 4 幅 32×32 像元的红外图像,第 1 幅为该案例所考察的追踪图像块(32×32 像元)红外图像,第 2 幅~第 4 幅为以第 1 幅为底图分别叠加了蓝、绿、红颜色的图像;右侧为贡献/亮温散点图。左侧第 2 幅~第 4 幅图像中的蓝、绿、红颜色像元与右侧散点图上同色彩的散点对应,标识出散点在追踪图像块中的位置。贡献/亮温散点图使用左侧追踪图像块中所有像元计算并绘制,纵坐标轴为追踪区内像元的红外亮温,横坐标轴为在追踪图像块内用式(3)算出的像元对相关系数的贡献 $c_{i,j}(m,n)$ 。贡献/亮温散点图中散点分布呈“C”字型,利用分隔竖线 $x=c'$ 将散点图分为左右两部分,使左右两侧像元数之比为 1:2。分隔线左侧散点的红外亮温处于整个追踪图像块像元红外温度平均值附近,表示为绿色,其散点在追踪图像块的位置见左侧图中的第 3 幅;分隔线右侧分为上下两部分,在“C”字型的右上端的散点具有较高的红外亮温,称为暖区段大贡献像元,表示为蓝色,其散点在追踪图像块的位置见左侧图中的第 2 幅;在“C”字型的右下端的散点具有较低的红外亮温,称为冷区段大贡献像元,表示为红色,其散点在追踪图像块的位置见左侧图中的第 4 幅。

追踪区内云覆盖不同时,散点图之间的差别表现为暖区段、冷区段之间像元数和个别像元贡献不同。为了恰当使用对相关系数做出贡献的像元改进风矢量的高度估计,需要确定某区段的大贡献像元更能代表追踪图像块内云的运动,更能代表风矢量高度。

3 追踪图像块部分被云覆盖的散点图特征

图 2 为 3 个追踪图像块部分被云覆盖的典型案例。图 2a 为追踪区部分被密实的孤立深对流云覆盖,图 2b 为追踪区部分被深对流云团覆盖,图 2c 为追踪区部分被北太平洋中纬度地区的层积云覆盖。

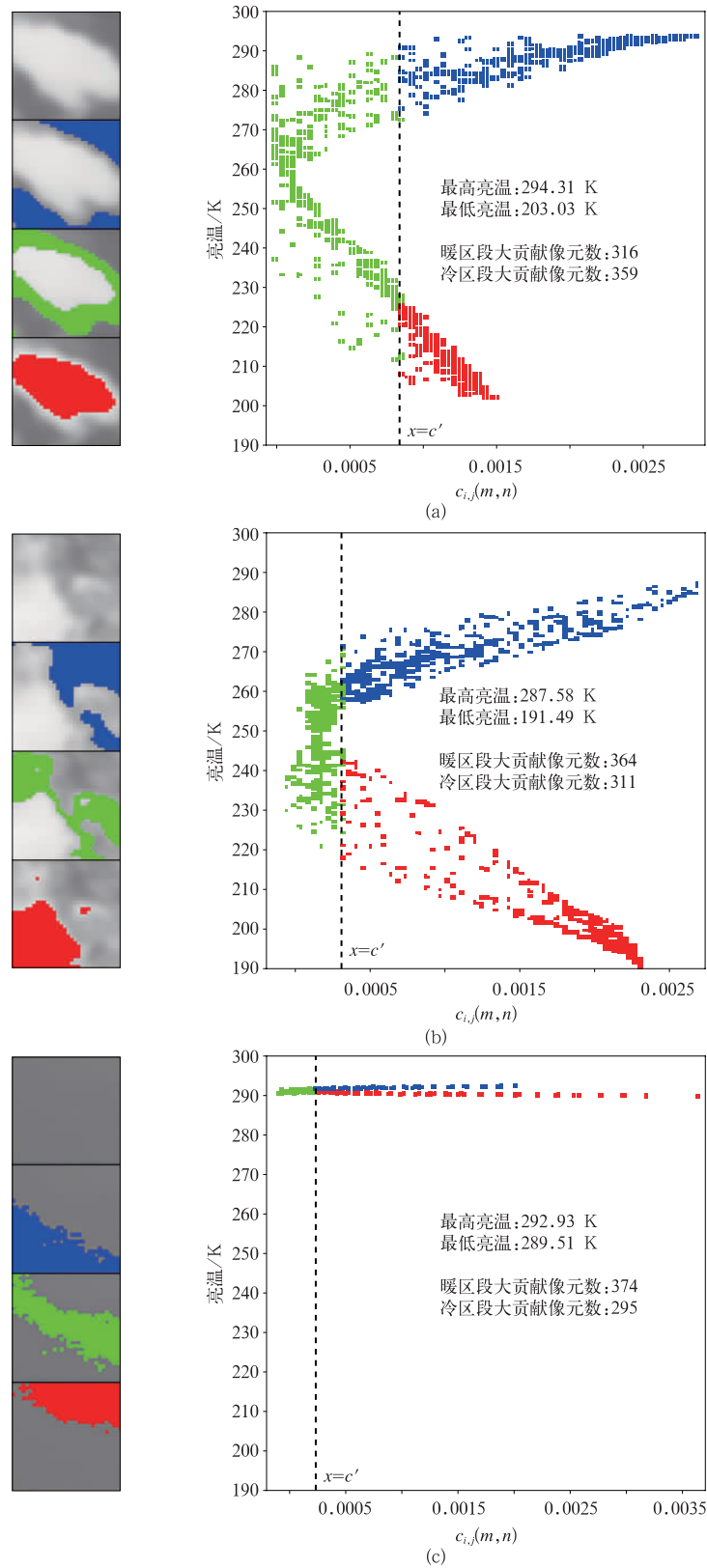


图 2 追踪区部分被云覆盖案例 (a)追踪图像块位于 30.94°N,120.44°E,
(b)追踪图像块位于 15.86°N,118.81°E,(c)追踪图像块位于 33.41°N,123.83°E

Fig. 2 Typical examples for the tracer partly covered by clouds (a)tracer box located at 30.94°N,120.44°E,
(b)tracer box located at 15.86°N,118.81°E,(c)tracer box located at 33.41°N,123.83°E

3.1 散点的温度分布特征

图2a和图2b所示案例代表了在追踪图像块云中既有高云又有低云和地面,部分像元为密实的高云,贡献/亮温散点图上“C”字型的开口纵向分布跨度很大,因为红色深对流云冷区段大贡献像元亮温低,蓝色的地面暖区段大贡献像元亮温高,且追踪图像块内亮温差别极大。图2c所示的案例代表了在追踪图像块里部分被低云覆盖的情况,贡献/亮温散点图上“C”字型开口纵向分布跨度很小,是因为红色的低云冷区段和蓝色的地面暖区段之间大贡献像元亮温相差不大。

部分被云覆盖的案例“C”字型的散点温度分布(即纵向的分布跨度)与追踪区里云的高度有关。云

的高度高(低),“C”字型在纵向的分布跨度大(小)。

3.2 散点对相关系数贡献分布特征

在横坐标轴(对相关系数贡献值)方向上,这3个案例的贡献/亮温散点图冷区段和暖区段长度表现比较对称,蓝色暖区段大贡献像元和红色冷区段大贡献像元像元数和个别像元的贡献量(见图2c)差别不大。3个案例暖区段与冷区段之间像元数之比依次为0.88,1.17和1.27。图2中3个案例的暖区段伸展长度与冷区段伸展长度之比不超过2。

4 追踪图像块全部被云覆盖散点图特征

图3为追踪图像块全部被云覆盖的5个典型案

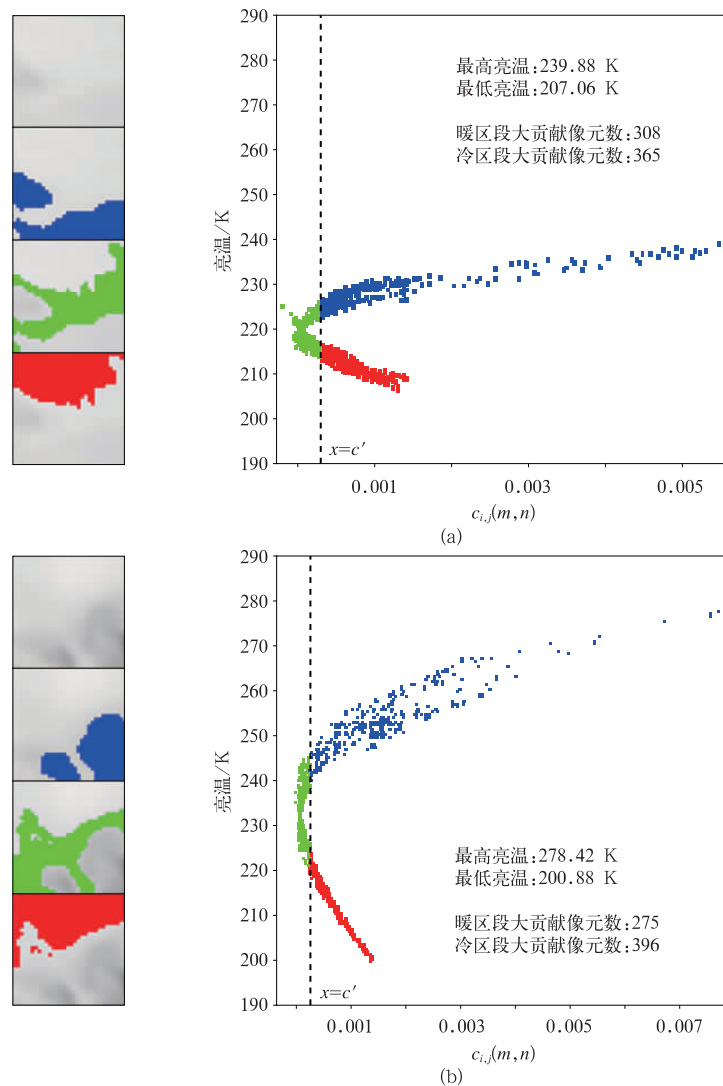
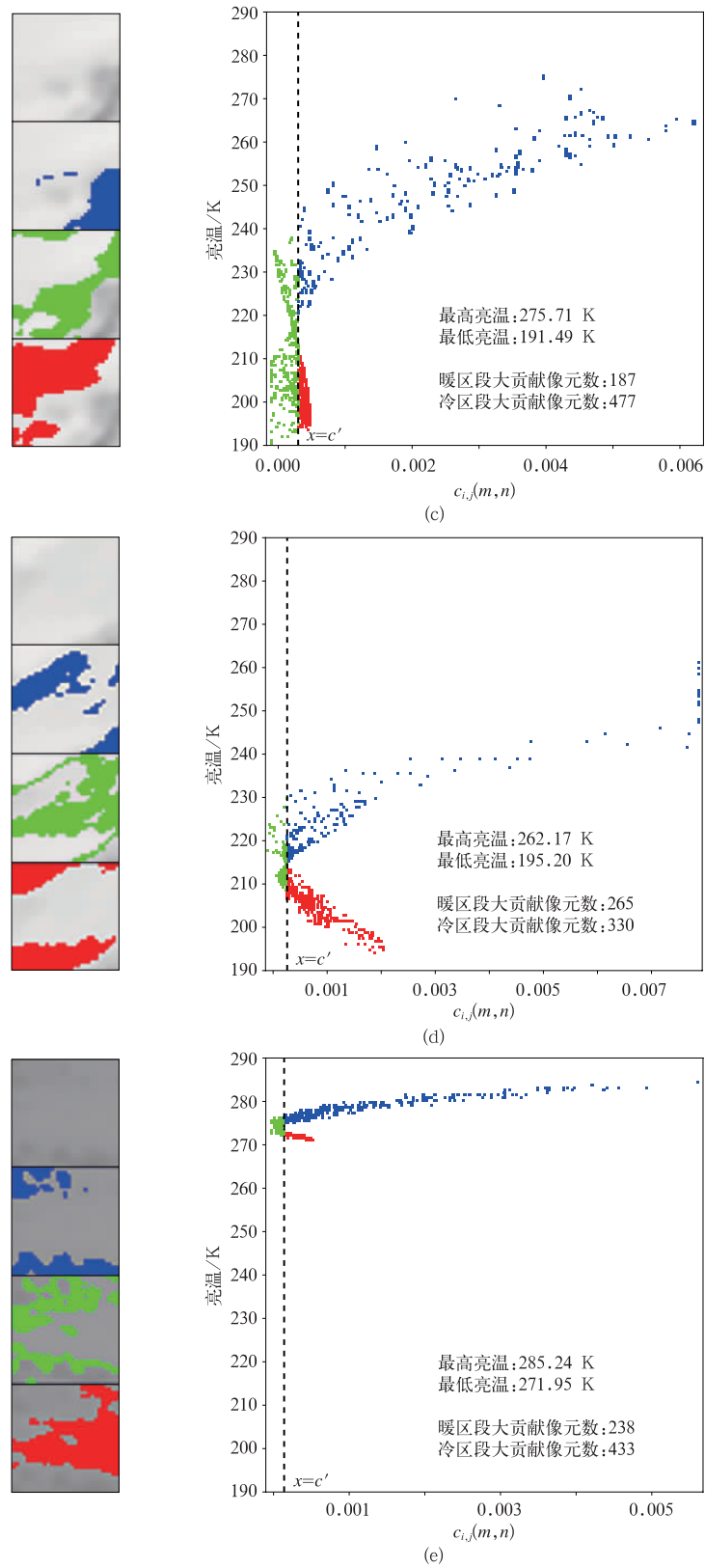


图3 追踪区全部被云覆盖典型案例 (a)追踪图像块位于 $34.56^{\circ}\text{N}, 112.82^{\circ}\text{E}$, (b)追踪图像块位于 $6.27^{\circ}\text{N}, 139.42^{\circ}\text{E}$, (c)追踪图像块位于 $5.33^{\circ}\text{N}, 93.30^{\circ}\text{E}$, (d)追踪图像块位于 $2.42^{\circ}\text{N}, 90.35^{\circ}\text{E}$, (e)追踪图像块位于 $29.27^{\circ}\text{S}, 97.89^{\circ}\text{E}$

Fig. 3 Typical examples for the tracer totally covered by cloud (a)tracer box located at $34.56^{\circ}\text{N}, 112.82^{\circ}\text{E}$, (b)tracer box located at $6.27^{\circ}\text{N}, 139.42^{\circ}\text{E}$, (c)tracer box located at $5.33^{\circ}\text{N}, 93.30^{\circ}\text{E}$, (d)tracer box located at $2.42^{\circ}\text{N}, 90.35^{\circ}\text{E}$, (e)tracer box located at $29.27^{\circ}\text{S}, 97.89^{\circ}\text{E}$



续图 3

例。图 3a 为追踪区全部被发展中温带气旋叶状云内部密实的锋面云带覆盖,图 3b、图 3c、图 3d 均为

追踪区全部被热带密实云区的深对流云覆盖,图 3e 为追踪区全部被南印度洋中纬度地区层积云覆盖。

4.1 散点的温度分布特征

在追踪图像块完全被云覆盖的情况下,贡献/亮温散点图亮温分布规律与3.1节中的分析类似,与追踪区内云的高度有关。分别将图2a~2b与图3a~3d(高、中云的案例)、图2c与图3e(低云的案例)进行比较可以看到,云的高度高(低)，“C”字型在纵坐标方向的伸展范围大(小)。

4.2 散点对相关系数贡献值分布特征

将图3中蓝色暖区段与红色冷区段大贡献像元在横坐标轴(对相关系数贡献值)方向的跨度进行比较可以看到,它们明显不对称,蓝色暖区段像元在散点图的横坐标轴方向上跨度大,为红色冷区段像元的多倍。这与部分被云覆盖案例(图2)中,冷区段和暖区段长度所表现出的较对称的“C”字型不同。这说明在追踪图像块全部被云覆盖的情况下,有的暖区段像元对相关系数贡献大。图3所示案例证实,Borde^[20]和Oyama等^[21]所指出现象可以复现,即在追踪图像块全部被云覆盖的情况下,有少数像元可以对相关系数做出非常大的贡献,Borde^[20]和Oyama等^[21]认为在追踪图像块全部被云覆盖的情况下,位于散点图暖区段大贡献像元更能代表追踪图像块的运动。大量分析发现,在追踪图像块全部被云覆盖的情况下,虽然位于散点图暖区段的少数像元对相关系数做出了非常大的贡献,但这样的像元非常少,且位于云与云之间的缝隙之中(见蓝色暖区段大贡献像元在追踪图像块中的位置)。这些位于云缝中的像元,虽然对相关系数贡献大,但高度并不能代表云的高度。

5 大贡献像元数和贡献量统计

对贡献/亮温散点图暖区段和冷区段之间大贡献像元数和贡献量进行比较可以发现,像元数多的区段,个别像元对相关系数的贡献量反而小。图3的5个案例中在暖区段有少数大贡献像元,对相关系数贡献大,表现为贡献/亮温散点图上,暖区段蓝色散点在横坐标轴方向跨度比冷区段红色散点大,但比较暖区段和冷区段大贡献像元数可以发现,这5个案例暖区段大贡献像元数远少于冷区段。在图3的5个案例中,虽然暖区段个别像元的贡献比冷

区段大很多倍,但暖区段内大贡献像元的数目依次仅为冷区段的85%,69%,39%,80%,55%。

对2016年1月5日05:30 FY-2G圆盘图中每个追踪图像块,统计暖区段和冷区段里个别像元贡献和大贡献像元数之间的关系,统计样本共29113个(图4、图5)。图4为追踪图像块内暖区段和冷区段的大贡献像元数之比(横坐标)和像元平均贡献量之比(纵坐标)的散点图,图5是暖区段和冷区段内所有的像元对相关系数所做总贡献之比(横坐标)的统计直方图。

5.1 大贡献像元数和贡献量的关系

图4的图型属于位于第1象限中的双曲线之一。其方程表达式为

$$X \cdot Y = k, \quad (4)$$

式(4)中, X 为暖区段和冷区段大贡献像元数之比, Y 为暖区段和冷区段平均每个大贡献像元的贡献量之比, k 为暖区段和冷区段的所有像元对相关系数总贡献之比(k 为常数,且 $k > 0$)。这种双曲线型分布说明大贡献像元数多的区段单个像元所做的贡献小。

图5横坐标为暖区段和冷区段所有像元对相关系数总贡献之比,即式(4)中的常数 k 。图5表明,暖区段和冷区段像元对相关系数贡献之比呈略偏左侧的正态分布。直方图的峰值在1附近,说明对于绝大部分追踪图像块,暖区段和冷区段对相关系数总贡献大体相当;峰值左侧距离大,表示冷区段对相关系数总贡献比暖区段大;反之表示暖区段对相关系数总贡献比冷区段大。

为了分析暖区段和冷区段分别对相关系数的总贡献与区段中所包含像元数关系,在图5中取3个位置进行分析。第1个在直方图的左侧,冷区段像元对相关系数总贡献大,暖区段和冷区段总贡献之比小于0.3,样本量为941;第2个在直方图的峰值附近,暖区段和冷区段总贡献之比相当,为0.8~1.2,样本量为14421;第3个在直方图的右侧,暖区段像元对相关系数总贡献大,暖区段和冷区段总贡献之比大于2,样本量为354。图6a、图6b、图6c依次表示在这3个统计取样部位,追踪图像块中暖区段和冷区段大贡献像元数之比直方图。

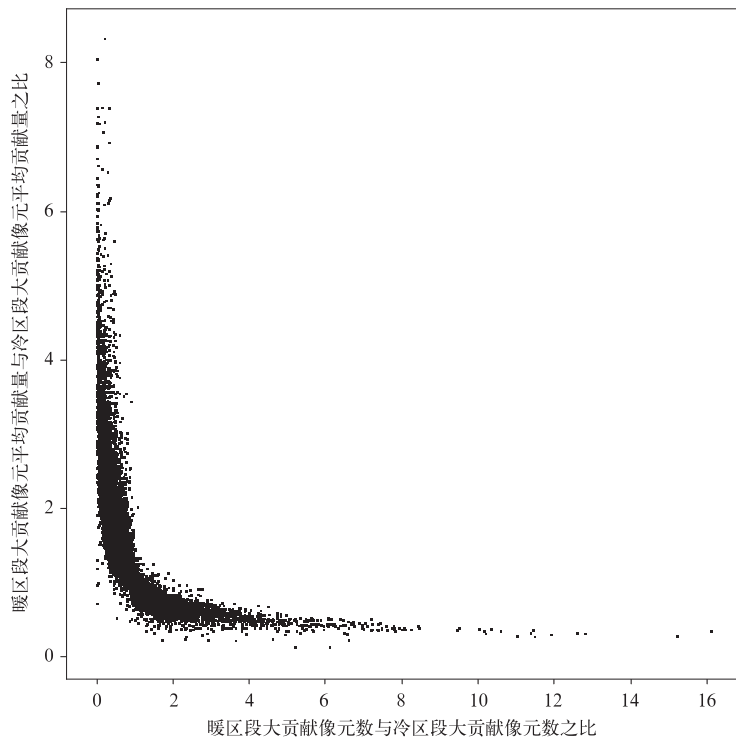


图 4 暖区段和冷区段大贡献像元数及像元平均贡献量关系

Fig. 4 Diagram of pixel number ratio and pixel mean contribution ratio between warm and cold segments

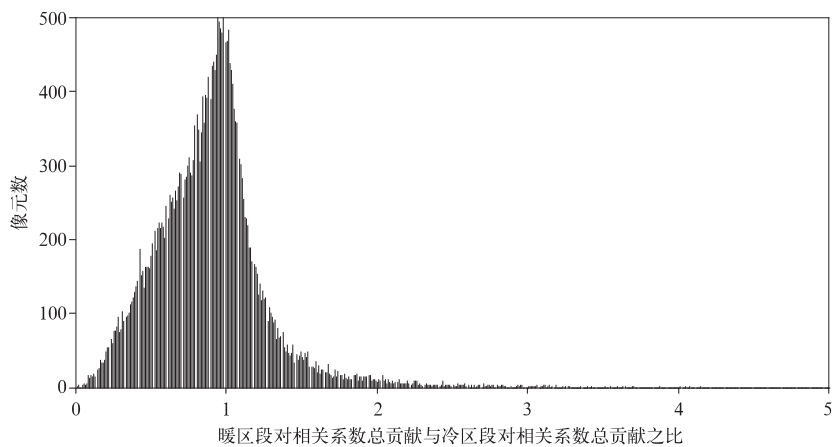


图 5 暖区段和冷区段所有像元对相关系数总贡献之比直方图

Fig. 5 Histogram of total contribution ratio between warm and cold segments

图 6a 是冷区段像元对相关系数总贡献远大于暖区段的情况。该情况下暖区段大贡献像元数远大于冷区段。由图 6a 可见,暖区段和冷区段像元数之比大于 1,其峰值在 2.449 附近。图 6b 是暖区段和冷区段总贡献相当的情况。由图 6b 可见,暖区段和冷区段的像元数之比接近于 1,其峰值为 1.016。图

6c 是暖区段像元对相关系数总贡献远大于冷区段的情况。该情况下冷区段大贡献像元数远大于暖区段。由图 6c 可见,其峰值为 0.56。图 5 和图 6 统计表明,对相关系数贡献大的区段像元数少。

5.2 暖区段像元亮温及可变性统计

对相关系数做出较大贡献的区段有两个:一个

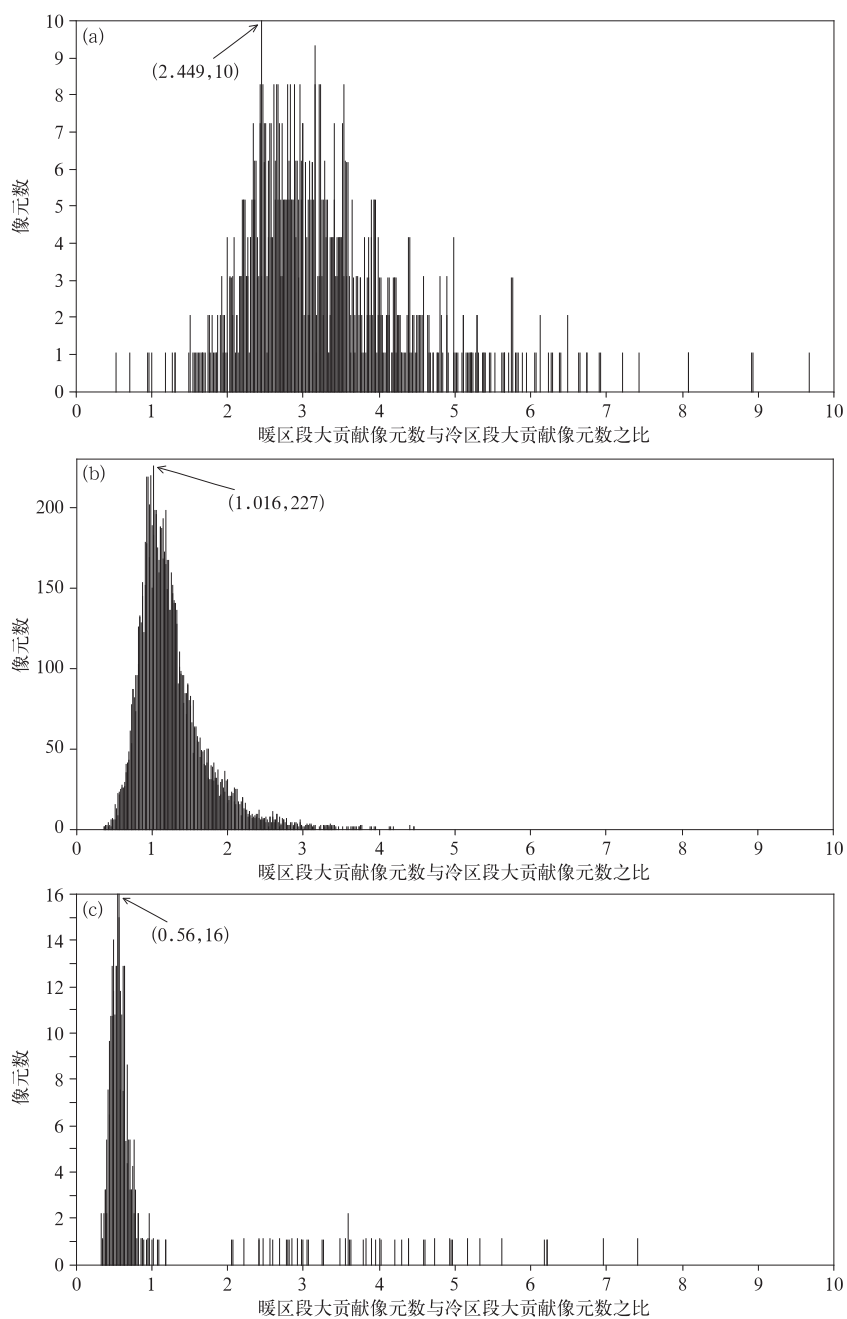


图6 暖区段和冷区段像元数之比直方图

(a)暖区段和冷区段总贡献之比小于0.3,(b)暖区段和冷区段总贡献之比为0.8~1.2,(c)暖区段和冷区段总贡献之比大于2

Fig. 6 Histogram of pixel number ratio between warm and cold segments
(a)total contribution ratio between warm and cold segments less than 0.3,
(b)total contribution ratio between warm and cold segments in 0.8-1.2,
(c)total contribution ratio between warm and cold segments greater than 2

区段代表云,另一个区段可能代表地面。将可能代表地面的大贡献区段识别并剔除,对于风矢量的高度指定非常重要。为了揭示图6a、图6b、图6c的3种情况下,追踪图像块中是否存在代表地面的像元,

对追踪图像块中暖区段亮温进行统计分析。如果在追踪图像块中存在代表地面的像元,那么追踪图像块中暖区段亮温应在地面亮温合理范围内,且地面亮温的可变性比云小;如果在追踪图像块中不存在

代表地面的像元,那么追踪图像块里暖区段亮温应在云亮温合理范围内,且云体亮温的可变性比地面

大很多。图 7 是在 3 个统计取样部位,每个追踪图像块中最高红外亮温的直方图。

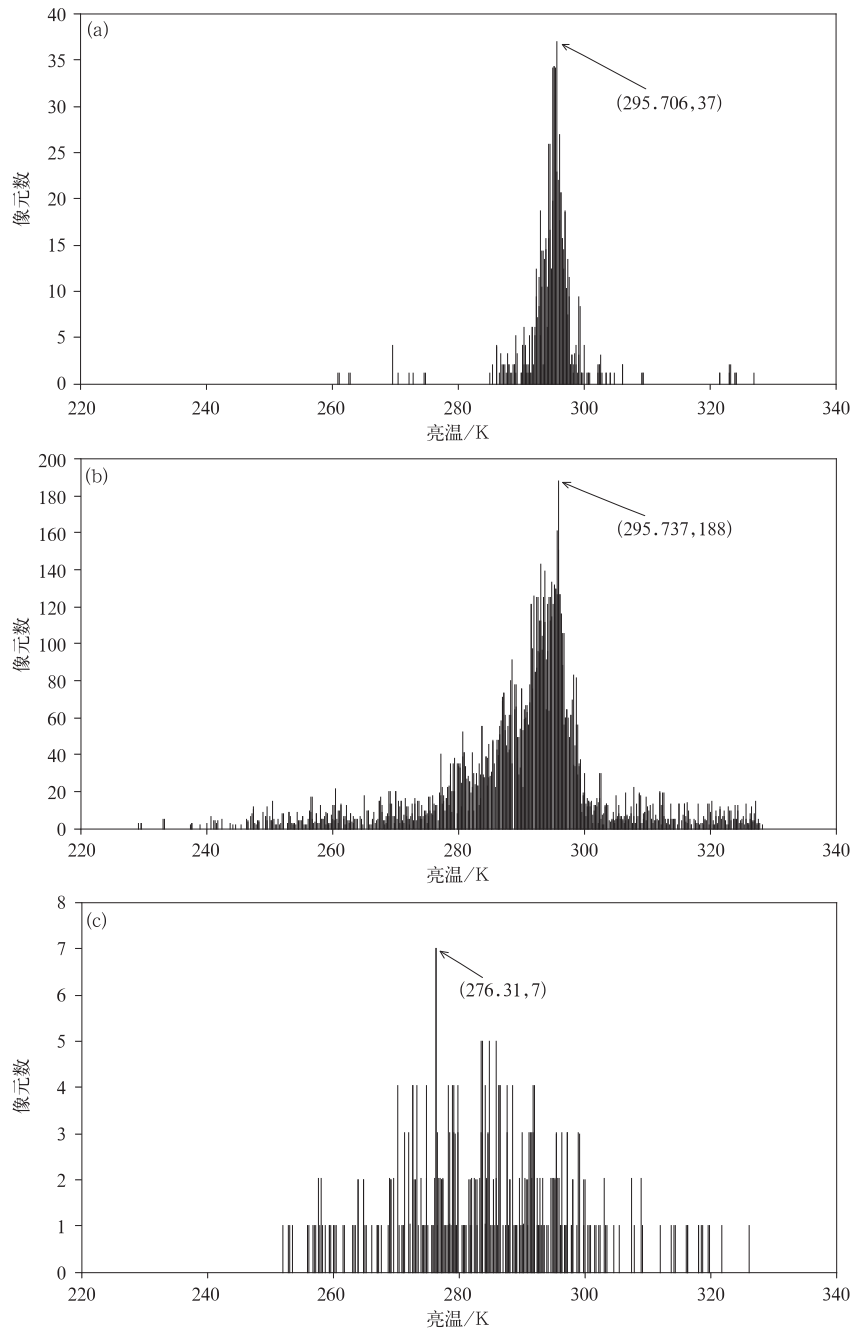


图 7 追踪图像块中最高红外亮温的直方图

(a)暖区段和冷区段总贡献之比小于 0.3,(b)暖区段和冷区段总贡献之比为 0.8~1.2,(c)暖区段和冷区段总贡献之比大于 2

Fig. 7 Histogram of IR maximum temperature in tracer boxes

(a)total contribution ratio between warm and cold segments less than 0.3, (b)total contribution ratio between warm and cold segments in 0.8-1.2, (c)total contribution ratio between warm and cold segments greater than 2

图 7a 为暖区段像元对相关系数总贡献远小于冷区段的情况,图 7b 为暖区段和冷区段总贡献相当的情况,本文第 3 章所分析的追踪图像块部分被云覆盖的案例属于这两种情况。对于这两种情况直方图显示:暖区段像元亮温出现频数的峰值非常集中,在 295 K 附近;表明在追踪图像块部分被云覆盖的情况下,追踪图像块里包含代表地面的像元,暖区段像元处于地面亮温的典型值范围内。

图 7c 为暖区段像元对相关系数总贡献远大于冷区段的情况。本文第 4 章所分析的追踪图像块全部被云覆盖的案例属于这种情况。对于这种情况,暖区段亮温出现频数对应的亮温比图 7a 和图 7b 亮温低,在云的合理范围内,且较为分散,表明在追踪图像块全部被云覆盖的情况下,追踪图像块中没有代表地面的像元,追踪图像块中少数位于云缝中的像元具有相对高的亮温,但它们仍然是代表云的像元,具有云像元的典型亮温值和可变性特征。

6 代表运动像元的选择

卫星风矢量的计算采用相关匹配法对追踪图像块进行追踪。云图中有不同层面的云和地面信息,云是运动的而地面是静止的,地面特征的空间可变性比云小,这是卫星云图的基本特征。

追踪图像块部分被云覆盖时,如本文第 3 章的案例和图 7a 和图 7b 的统计分析所示,追踪图像块里有一部分像元代表地面,由于地面特征的空间可变性小,在相关系数计算中,会将不同地点的地面误判为相同的地面,从而计算出的地面像元对相关系数的贡献很大。该情况下,暖区段对相关系数贡献较大的像元,不能代表追踪图像块中云的运动。

追踪图像块全部被云覆盖时,如本文第 4 章的案例和第 5.2 节图 7c 所示,对相关系数的贡献较大的暖区段像元代表的是云与云之间的缝隙,而不是云的主体。也就是说,在追踪图像块全部被云覆盖时,虽然暖区段像元对相关系数总贡献大于冷区段,

仍应选择冷区段的大贡献像元代表追踪图像块中云的整体运动,这是卫星云图上云和地面特征空间可变性的差异决定的。

根据本文所做的统计分析,本文未采用 Borde^[20] 和 Oyama 等^[21] 的主张,而选择冷区段对相关系数大贡献像元代表追踪图像块中云的整体运动。

对相关系数做出贡献像元的考察,在半透明云风矢量高度指定中起了排除快速改变中云像元的作用。正如 Borde^[20] 和 Oyama 等^[21] 所述,如果追踪图像块中云的形状发生改变或正处于快速地发展或消散中,那么变化之中的云像元对相关系数所做出的贡献很小,甚至为负值,不应参与风矢量的高度估计。观察图 3c 热带密实云区中的深对流云典型案例中的散点图,可以看到有相当多的绿色小贡献像元。这些像元代表迅速发展和变化中的云,不能参与半透明云风矢量高度指定。

在未使用代表运动的像元时,半透明云风矢量高度指定算法将追踪图像块作为一个整体处理。追踪图像块中全部像元参与聚类分析,得到半透明云体辐射。观察图 2 和图 3 可以看到,追踪图像块中既包括蓝色暖区段大贡献像元,它们可能代表地面;也包括绿色小贡献像元,它们可能位于云的边缘,可能是变化之中的云;还包括红色冷区段大贡献像元,这些才是移动的半透明云。在高度指定中使用代表运动的像元,就是从图像块中,剔除蓝色暖区段大贡献像元和绿色小贡献像元,将代表移动半透明云的红色冷区段大贡献像元挑选出来,用红色冷区段大贡献像元的加权平均红外和水汽辐射进行聚类,获得图 1 中的半透明云体辐射。这样比将追踪图像块作为一个整体处理更加精细,进而提高半透明云风矢量高度指定的效果。

7 高度指定算法中使用代表运动像元效果

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未

表 1 半透明云高度指定算法中是否使用代表运动像元 FY-2E 卫星红外高层风风速与 ECMWF 分析场比较
Table 1 Bias and standard deviations between FY-2E wind vectors and ECMWF analyses for height assignment algorithms whether using contribution to the motion

统计量	未使用代表运动像元	使用代表运动像元
偏差/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	-4.239	-2.103
标准差/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	7.787	7.436
风矢量数	13895	13536

使用和使用代表运动像元(其他均一致)时,红外高层风(0~399 hPa)风速与欧洲中期天气预报中心(ECMWF)分析场之间的偏差和标准差。表1中两列数据分别为高度指定算法中未使用代表运动像元和使用像元的计算结果。由表1可以看到,使用代表运动像元后,风速与ECMWF分析场的偏差和标准差均降低,偏差降低明显。

8 小 结

未使用代表运动像元半透明云风矢量高度指定算法将追踪图像块作为一个整体处理。图像块中全部像元参与聚类分析,得到来自半透明云体的辐射。在高度指定中使用代表运动像元,就是从追踪图像块中挑选出代表移动半透明云的像元进行聚类,估计来自半透明云体的辐射。采用像元对相关系数所做贡献,将追踪图像块中的像元分为小贡献像元、暖区段大贡献像元和冷区段大贡献像元3个部分,重点考察暖区段和冷区段大贡献像元的表现和统计特征。

1) 在追踪图像块部分被云覆盖的情况下,散点图上暖区段和冷区段比较对称,像元数和个别像元贡献量差异小,由于追踪图像块中有地面信息,暖区段的像元处于地面亮温的典型值范围中。在追踪图像块全部被云覆盖的情况下,散点图上暖区段和冷区段明显不对称,暖区段里的大贡献像元数比冷区段大、贡献比冷区段大,但这些像元位于云的缝隙中。因此,无论追踪图像块部分被云覆盖还是全部被云覆盖,均应选择冷区段的大贡献像元估计来自半透明云体的辐射。

2) 在风矢量高度指定中,对相关系数做出贡献像元的考察有排除快速改变中云像元的作用。如果追踪图像块中云的形状发生了改变,或正处于快速发展或消散中,那么变化中的云像元对相关系数贡献很小,甚至为负值,可有效排除。

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. EUM P18, 1996: 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. EUM P24, 1998: 41-48.
- [3] Xu Jianmin, Zhang Qisong. Recent Works Aimed at Operational FY-2C 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, 王大昌. 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. 卫星风推导和应用综述. 应用气象学报, 2006, 17(5): 574-582.
- [8] 薛谔彬, 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Menzel W P, Smith W L, Stewart T. Improved cloud motion wind vector and altitude assignment using VAS. *J Climate Appl Meteor*, 1983, 22: 377-384.
- [13] Nieman N J, Schmetz J, Menzel W P. A comparison of several techniques to assign heights to cloud tracers. *J Appl Meteor*, 1993, 32: 1559-1568.
- [14] 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.
- [15] Szejwach G. Determination of semitransparent cirrus cloud temperature from infrared radiances: Application to Meteosat. *J Appl Meteor*, 1982, 21(3): 384-393.
- [16] Menzel W P. Cloud tracking with satellite imagery: From the pioneering work of Ted Fujita to the present. *Bull Amer Meteor Soc*, 2001, 82: 33-47.
- [17] Velden C. Recent innovations in deriving tropospheric winds from meteorological satellites. *Bull Amer Meteor Soc*, 2005, 86: 205-223.
- [18] Xu J, Holmlund K, Zhang Q, et al. Comparison of two schemes for derivation of atmospheric motion vectors. *J Geophys Res*, 2002, 107(D14): ACL 4-1-ACL 4-15.
- [19] Büche G. Water vapor structure displacements from cloud-free Meteosat scenes and their interpretation for the wind field. *J Appl Meteor*, 2006, 45: 556-575.
- [20] Borde R. A Direct Link Between Feature Tracking and Height Assignment of Operational Atmospheric Motion Vectors. Proc the Ninth Int Winds Workshop, 2008.
- [21] Oyama R, Borde R, Schmetz J, et al. Development of Height Assignment Directly Linked to Feature Tracking at JMA//

Proceedings of 9IWW, 2008.

景辐射的估计. 应用气象学报, 2017, 28(3): 283-291.

[22] 张晓虎, 张其松, 许健民. 半透明云风矢量高度算法中云下背

Use of Representative Pixels of Motion 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 semitransparent clouds themselves and radiation from the background underneath semitransparent clouds. Generally, the former radiation is calculated using algorithms based on all pixels in tracer boxes. A new algorithm, however, is proposed considering only pixels with great contribution to correlation coefficients during wind vector tracing stage, and only allow these pixels to join the calculation. Scatter diagrams are made with infrared brightness temperature against their contribution to the feature tracking correlation coefficients. Scatter diagrams show a “C” shape pattern and can be used to recognize representative pixels of motion. Pixels with relative less contribution to correlation coefficients are at the left side of the “C” shape with infrared brightness temperature in the middle range. The other pixels with relative more contributions are naturally separated into two branches with warmer and colder infrared brightness temperature respectively. When tracer boxes are partly covered by clouds, the warm branch pixel brightness temperature is with typical ground feature at both the scope and the variability. And when tracer boxes are totally covered by clouds, warm branch pixels are in the slot of clouds with typical cloud features among cloud cells. Thus, no matter tracer boxes are partly covered or totally covered by clouds, cold branch pixels with greater contribution to correlation coefficients are better at representing the cloud motion and can be named as pixels with contribution to the motion. The algorithm using different pixel’s contribution to the feature tracking improves height assignment quality by effectively removing rapid changing pixels in tracer boxes when estimating the cloud height. Using representative pixels of motion at the estimation of radiation from semi-transparent clouds themselves, FY-2 wind vector height assignment quality is improved.

Key words: wind vector; height assignment; pixels representative of motion