

文章编号：1004-4965 (2003) 02-0177-07

卫星图像像元云分析的方案研究和初步试验

陈子通

(广州热带海洋气象研究所, 广东 广州 510080)

摘 要：为了充分利用卫星图像逐像点的信息来构造更加精细的中尺度数值天气预报初始场，设计了静止卫星（GMS5）图像逐像点的云分析方法，并进行了初步试验。多种数据表明，分析结果是比较合理的。文中主要介绍了用可见光和红外通道的辐射值订正碎云分析，用红外水汽通道亮温差的直方图分布规律，并结合可见光反照率阈值分割子集，以及联合红外水汽通道的数据计算云高、判定云类等的方法。

关 键 词：卫星；像元；云分析

中图分类号：P434.4

文献标识码：A

1 引 言

云和降水的信息用于业务数值预报一直是倍受关注的问题，特别是应用于中小尺度数值天气预报。强对流天气系统的时空尺度一般都非常小，仅靠常规资料是远不足以描述模式的初始场的，充分利用高分辨的非常规观测，如卫星、雷达等分析出的三维云和降水，并良好地纳入业务数值预报系统是非常重要和非常紧迫的工作。许多国家已经有了不少的尝试。如美国 LAPS^[1]，其分析系统分析出了三维云和降水，用 Nudging 方法同化到其中模式当中，明显地改善了中尺度预报效果；近来，降水资料的同化研究也取得了较大的进展，如 Kuo (1995) 等^[2]用四维变分方法同化可降水量资料，以及 D.Zupanski (1995) 等^[3]用四维变分方法同化降水资料等都是比较有代表性的工作。

当前数值预报系统的分辨率愈来愈高，如大多数的非静力模式已经达到了积云尺度，甚至更细。静止气象卫星（如 GMS5 的红外）的星下点分辨率为 5 km，逐像点的云分析场可以有较高的分辨率，从而有可能改进模式初始场的中小尺度信息。本文主要介绍利用静止卫星（GMS5）多通道的图像资料估计像元的云高、云类和云量等参数，初步试验表明，分析结果基本合理。

收稿日期：2002-03-08；修订日期：2002-06-20

基金项目：1997～1998 北京大学暴雨监测和预测国家重点实验室(LSSR)开放课题资助

作者简介：陈子通（1968-），男，广东人，高级工程师，硕士，主要从事非常规资料应用研究。

2 用 GMS5 多通道资料进行像元云分析的方法

像元云分析的难点在于,卫星接收到的辐射有多种复杂的情况存在。比如:(1)卫星观测的像元,其视场仅部分有云,即碎云的情况;(2)卫星接收到的辐射包含了背景辐射。另外单个像元的辐射测值是难以断定其云类的。正因为如此,我们决定采用分割子集的办法。考虑到小区内多种类型的像元同时存在,所以就要想办法分割出辐射特性相同或相近的子集,并假定同一子集内的像点是同类的云,具有相同的辐射特性,然后再进行量的计算。主要是采用红外与水汽通道的亮温差制成直方图,并根据红外水汽亮温差的直方图分布特征,以及结合可见光反照率阈值分割子集,最后用多通道的数据进行云参数的计算。

分析区域是这样:(1)范围,106~122°E,18~28°N。经纬网资料,水平分辨为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$;(2)逐个小区进行计算,小区大小为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,即有 11×11 的像点分布,分析出小区内每一像元的云高、云类和云量。

2.1 碎云和晴空像元的分析

较低的云中,卫星容易观测到的是碎云的情况。碎云是视场中部分有云的像点,所以碎云有时与晴空像点是比较相近的,特别是在红外通道上。碎云或晴空像点一般来说:(1)红外亮温较高,其值接近地面温度;(2)红外亮温与水汽亮温的差值较大,接近地面与400 hPa等压面的温差(这与气柱的水汽还有一些关系);(3)可见光通道的反照率较小,但碎云像点反照率要大一些。采用阈值法进行分析。采用的阈值:(1)红外与水汽亮温差大于 $T_s - T_{400} - C$,其中 T_s 和 T_{400} 分别为地面和400 hPa气温;(2)根据可见光反照率分离晴空与碎云像点,反照率大于 $V(\theta)$ 为碎云像点, θ 为太阳天顶角。 C 和 $V(\theta)$ 为经验性取值(本文 $C=8$ 。 V 是与太阳天顶角有关的值,参考最近10天内相同钟点的晴空可见光反照率的值)。

卫星测量的可见光通道的反照率 \hat{a} 和红外通道的辐射 I 可由下式表示

$$\begin{aligned} \hat{a} &= (1 - A_c) \hat{a}_{\text{clr}} + A_c \hat{a}_{\text{cld}} \\ I &= (1 - A_c) I_{\text{clr}} + A_c I_{\text{cld}} \end{aligned} \quad (1)$$

其中下标 clr 表示晴空, cld 表示云, A_c 为碎云量, 晴空反照率和云反照率用排序法求得, 认为小区内同类的像点中最小反照率为晴空像点, 最大反照率为云像点。所以由式(1)可以得出

$$A_c = \frac{\hat{a}_{\text{clr}} - \hat{a}}{\hat{a}_{\text{clr}} - \hat{a}_{\text{cld}}} \quad (2)$$

由式(2)可以得出

$$I_{\text{cld}} = \frac{I - (1 - A_c) I_{\text{clr}}}{A_c} \quad (3)$$

所以由式 (2) 可以计算碎云量, 由式 (3) 可以求云的红外辐射, 从而计算出云高。

2.2 云像元的分类和各参数计算

小区内的云像点可能是不同层次、多种类型的云混合在一起, 所以必须把它们分离开来, 然后才能进行量的计算。一般来说: (1) 云顶较高 (如高于 400 hPa) 且浓密的对流云, 如发展成旺盛积雨云, 其红外与水汽的亮温差非常小, 接近于零度; (2) 云顶较低的低云, 其红外与水汽的亮温差比较大; (3) 中等高度的云或透明的卷云, 其红外与水汽亮温差一般来说处于上述两者之间, 当然透明云的情况比较复杂, 还与其透明度和背景辐射有关。假定红外与水汽的亮温差为 x , 其频数为 y , 所以就有 $y=f(x)$, 即亮温差的直方图分布。考查亮温差直方图的分布特征, 如果直方图明显呈多峰分布, 认为有多种类型云的存在, 每一种云的像点就在其对应峰值的围周, 而两峰之间的最小值就是不同类型的分界。如图 1 中有三个明显的峰值。

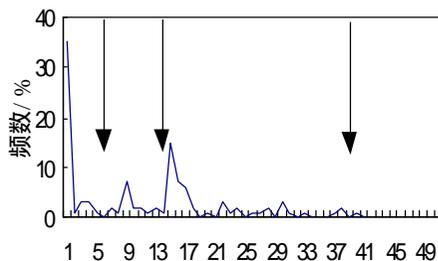


图 1 红外水汽亮温差的频数分布(小 4 区)

假定红外与水汽的亮温差为 x , 其频数为 y , 所以就有 $y=f(x)$, 即亮温差的直方图分布。考查亮温差直方图的分布特征, 如果直方图明显呈多峰分布, 认为有多种类型云的存在, 每一种云的像点就在其对应峰值的围周, 而两峰之间的最小值就是不同类型的分界。如图 1 中有三个明显的峰值。

2.2.1 不同类型像点集的分割

如上所述, 可以用红外水汽亮温差的直方图分布分割不同类型的子集, 先求 $y=f(x)$ 的极大值点, 包括边界极值点, 假如 x_i, x_j 为极大值点, 如果有 (1) $y_i=f(x_i)$ 且 $y_i > y_0$, (2) $y_j=f(x_j)$ 且 $y_j > y_0$ (y_0 为一常数, 设为总像点数的 6%), 则可以求出 i, j 之间的分界点为 x_{ij} , $f(x_{ij})$ 为 (x_i, x_j) 之间的最小值, 依此类推则可以求出各个不同类型分界点, 从而分割出各个子集。图 1 箭头所示为各个分界点, 最末的分界点 (指向 40 K) 不是在两个峰值之间, 是采用 2.1 节所述的阈值法定出的, 指示云像点与碎云晴空像元的分界。

2.2.2 云高的计算和云的分类

云高和云类的确定是难点之一。研究表明, 用窗区通道和吸收通道的辐射值共同推算云参数比用单通道的效果好, 如 Szejwach (1982)^[4] 引入水汽通道作为吸收通道, 证明比单独使用一个窗区通道效果更好。单个像元计算云高、确定云类是很困难的。假定上一步分割出的子集是同一种类型的云, 有相同的辐射特性, 因此对一个子集进行操作是比较恰当的, 这样既避免了单个像元计算的困难, 也避免了因小区域内多种类型的云同时存在而造成的误差。本文选用红外通道和水汽通道共同参与计算, 可以有

$$\begin{aligned} R_{\text{sat,wv}} &= (1 - \bar{a}_{\text{wv}}) R_{\text{bkg,wv}} + \bar{a}_{\text{wv}} R_{\text{cld,wv}} \\ R_{\text{sat,ir}} &= (1 - \bar{a}_{\text{ir}}) R_{\text{bkg,ir}} + \bar{a}_{\text{ir}} R_{\text{cld,ir}} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 R 代表辐射, \bar{a} 代表云的半透明度。下标 sat 代表卫星所接收、wv 和 ir 分别代表水汽和红外通道、bkg 和 cld 分别代表背景和云。

对于云顶很高且浓密的对流云, 如发展较旺盛的积雨云, 卫星所接收到红外和水汽通道的辐射都不包含来自背景的贡献, 且因云顶高, 受水汽的削弱很小, 所以可以近似地得出下面的关系

$$R_{\text{sat,wv}} \approx R_{\text{sat,ir}} \approx R_{\text{cld,ir}}$$

由普朗克公式可以有亮温的关系式

$$BT_{\text{sat,wv}} \approx BT_{\text{sat,ir}} \approx BT_{\text{cld,ir}} \quad (5)$$

也就是说云顶很高且是浓密的对流云,其红外与水汽的亮温大体相同。因此如果红外水汽亮温差很小,则可断定该像点为云顶很高且浓密的对流云像点,并且直接用红外亮温值就可以估算其云顶的温度,再根据实测的温度廓线就可计算出该点的云顶高度。

对于云顶较低的中低云比较复杂。对流活动比较明显的云体,如浓积云,其亮温分布有较大的非均匀性,而层云类则较为均一,因此可求出子集的标准偏差,如果标准偏差较大者(大于 3.5 K,为经验常数)就定为积状云,否则定为层状云。这种情况下,计算云高只能用红外通道的数据,即用红外亮温估算云顶的温度,进而估算云顶的高度。

对于云顶较高的半透明云,如卷云,许健民等(1997)^[5]联合红外和水汽通道计算半透明高云的云高,效果较好。文中用以下公式求取云高

$$\begin{aligned} R_{\text{sat,wv}} &= aR_{\text{sat,ir}} + b \\ BT_{\text{wv}} &= BT_{\text{ir}} \end{aligned} \quad (6)$$

式中 BT 为亮温, a 和 b 是常数,且 a 在 $0 \sim 1$ 之间,观测的事实是,在水汽与红外的散布图上,散点常常是呈小于 45° 度角的斜线分布。因此可以联合子集的水汽、红外两个通道的数据估算 a 值,并结合红外水汽亮温差来判定云类。云高的计算使用式(6),并结合布朗克公式可算得云顶的温度,从而算得云顶的高度。

3 像元云分析试验

试验例子取自 1999 年 8 月 31 日 13 时(北京时),图 2 和图 3 分别是红外与可见光云图。云图上的云是比较丰富的,红外云图上标有阿伯拉数字 1~7,代表几种不同情况的 7 个小区域,四周的十字表区域大小,既有完全晴空的小区,也有云顶较高的积雨云团,也有多种云的混合等情况,下面将这个例子做一些分析说明。

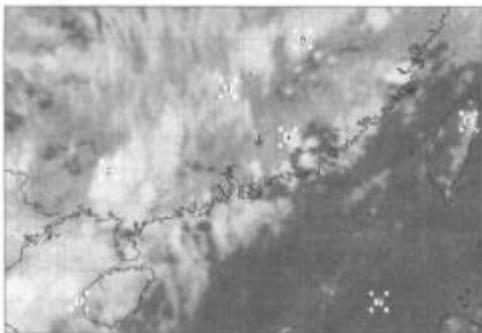


图 2 1999 年 8 月 31 日 13 时红外云图

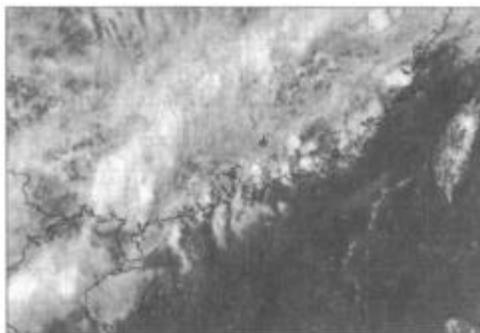


图 3 1999 年 8 月 31 日 13 时可见光云图

3.1 晴空与碎云

图 2 中编号为 7 的小区经上述方法进行分类,结果定为无云的小区。计算得所有像点的红外水汽亮温差都在 46 K 以上,大于地面与 400 hPa 的温度差(40 K),且可见光反照

率都小于 0.25 (经过太阳高度订正), 图 3 可见光图中可见该区是很暗的区域, 因此由阈值法判定小区所有点都是无云像点。编号 6 的小区中分析出有部分碎云的像点。如图 4 等值线为计算的碎云量, 图中的水平方向为小区 6 的经度, 垂直方向为纬度, 等值线为碎云区, 间隔为 2, 表示云量为 0~10 不同的云量等级, 而其它非碎云的云像点云量为 10, 晴空像点云量为 0。参考可见光云图 (图 3)。

3.2 像点集的割分

编号 4 的小区, 有多种不同类型的云混合存在, 云图中可以看出, 其右侧大部分为云顶高且浓密的对流云, 左侧为一些中低云, 左下侧可能还有一些碎云像点, 可见光云图表现更为清楚。前文所示的图 1 是小区的频数分布图, 图中明显呈多峰分布, 第一个峰值在 0 度边界, 对应云顶高的积雨云, 第二个峰值也是浓密的对流云, 但云顶稍低一些, 第三个峰值对应的是一些中低云, 最后一个子集是一些碎云像点。

3.3 积雨云分析

编号 5 的小区 (图 2), 图上为白亮的云团, 图 5 中可见像点主要集中在亮温差较小, 反照率较大且有一定水平变化的区域, 因而可判定这些像点为云顶较高且浓密的积雨云。图 6 为内插所得的小区 5 的探空曲线。图中整层的温度露点差很小, 一直到 200 hPa 左右均为湿层。 θ_{se} 反映中低层为不稳定层结, 一直到 700 hPa 都是比较明显的。

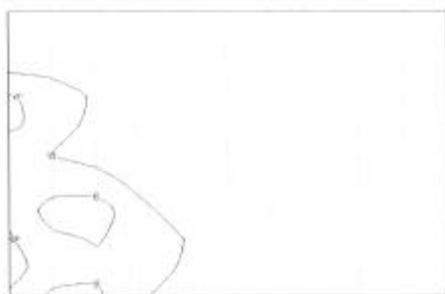


图 4 碎云的云量分布

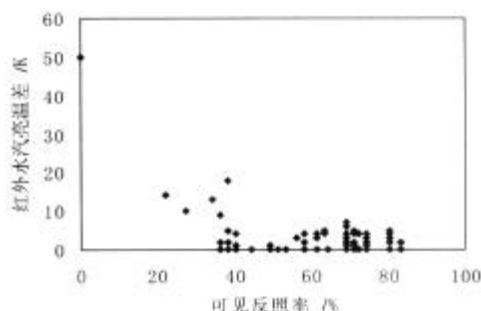


图 5 可见光与红外水汽亮温差点聚图 (小区 5)

3.4 半透明云分析

小区 3 (图 2) 可以看出有一卷云带, 如果不进行子集分割, 计算整个小区的水汽红外散布率 a , 则可算得 $a=0.21$ 。其实小区内除了卷云外, 还有云顶较高的密蔽云, 采用子集分割算法就可以比较好地分离出来, 直方图有两个明显的峰值 (图略) 分别对应的是两种云的情况, 与实际情况相符, 再次计算两个子集的 a 值, 则有 $a=0.56$ 和 $a=0.38$, 前者 a 值较大, 对应浓密高云, 而后者 a 值较小, 则对应卷云的子集。

用 $a=0.38$ 计算出来卷云高度 (图 7), 中间云顶最高的条状区域 (云高于 12000 米), 就是分析出来的卷云带, 比两侧的积云略高, 这是比较合理的。如果不用两通道的数据调整卷云的高度, 则大大低估了云顶高度, 会把卷云当成中低云来处理, 而用 $a=0.21$ 则会过高估云顶, 也是不合理的。

3.5 中低云分析

小区4前文已经分析过,小区的左侧有大量的中低云像点。如图1,第三个峰值对应的子集就是中低云,像点分布在小区的左侧,经计算其标准差较大,所以定为积云。如图8,左侧像点与右侧的积雨云像点是一个整体,只是高度低些,所以计算确定为积云应该是正确的。

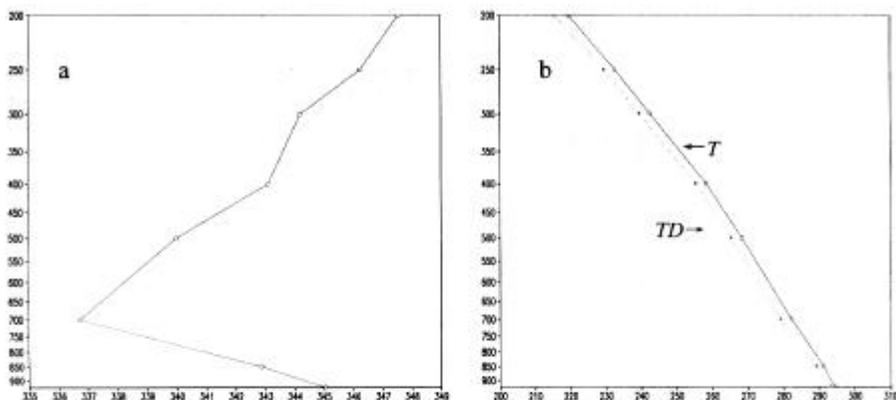


图6 31日08时 θ_w 的垂直分布(a)及 T 和 TD 的垂直分布(b)(小区5)

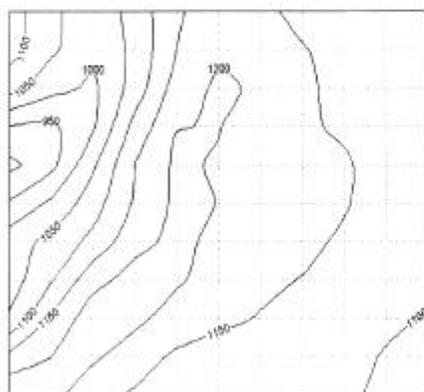


图7 各像点计算的云顶高度
单位:10米,小区3。

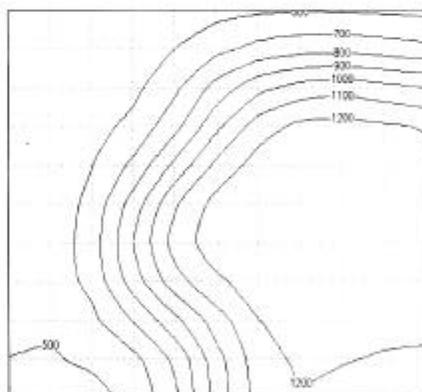


图8 各像点计算的云顶高度
单位:10米,小区4。

4 结论和展望

云分析的客观检验问题还是比较困难的,实际的应用过程也许是比较好的检验,并可以促进进一步地完善。夜间没有可见光通道资料,低层的分析质量或许有些下降。像元云分析比较难还是半透明云的分析,有专家研究表明,进一步使用热红外通道分裂窗区的差

值特性，有助于断定半透明云，因为两个通道对冰云粒子的消光特性有明显的不同。本文主要是针对云图上逐个像元的云分析提出一种方法，还有许多方面的工作需要进一步完善。

致 谢：感谢许健民先生给予技术指导并赠送技术材料！

参 考 文 献：

- [1] ALBERS S, MCGINLEY J, BIRKENHEUER D. LAPS analyses of clouds and precipitation[A]. 5th conf on mesoscale processes[C]. *Amer Meteor Soc*, 1995. 158-161.
- [2] KUO Y H, ZOU X, GUO Y R. Assimilation of precipitable water into a nonhydrostatic mesoscale model using a variational approach[J]. *WMO/TD*, 1995, 651 :349-354.
- [3] ZUPANSKI D, FEDOR Mesinger. Four-dimensional variational assimilation of precipitation data[J]. *Mon Wea Rev*, 1995, 123 : 1112-1127.
- [4] SZHEJWACH G. Determination of semi-transparent cirrus cloud temperature from Infrared radiances application to Meteosat[J]. *J Appl Meteor*, 1982, 21 : 384-393.
- [5] 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[J]. *气象学报*, 1997 ,55 : 408-417.

SCHEME DESIGN AND PRELIMINARY TEST OF CLOUD ANALYSIS BASED ON SINGLE SATELLITE IMAGE PIXEL

CHEN Zi-tong

(Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, Guangzhou 510080, China)

Abstract : Because of the requirement for high resolution initial field of mesoscale or small scale numeric weather prediction model, we designed the cloud analysis scheme based on single satellite image pixel. Some evidences show that the results of analysis are proved to be effective and proper. In our paper, we mainly introduced the methods of using both visible and infrared channels in computing pixel of partially filled FOV, and using bright temperature difference between infrared and vapor channel to separate pixels in an area into several groups, as well as using data of infrared and vapor channels to calculate cloud height and cloud classification.

Key words: satellite; image pixel; cloud analysis