

基于交叉相关法的卫星云图中 云团移动的短时预测

刘科峰¹⁾ 张 韧^{1),2)} 孙照渤²⁾

¹⁾(解放军理工大学气象学院海洋与空间环境系,南京 211101) ²⁾(南京信息工程大学大气科学博士后流动站,南京 210044)

摘 要 在卫星云图应用研究中引入交叉相关法的思想进行云团移动的短时预测。选取连续两个时次的 GMS-5 卫星云图,将云图区域划分为 32×32 像素的图像子集,采用交叉相关法计算获取两幅云图的最佳匹配区域,根据前后云图匹配区域的位置和时间间隔,确定出每个图像子集的移动矢量(速度和方向),并对图像子集的移动矢量进行客观分析,其后,基于检验后的云图移动矢量集,利用后向轨迹方法对云图作短时外推预测。试验结果表明,该方法对卫星云图上较为平稳的云团移动的短时预测效果较好,具有直观、定量、快捷的优点。

关键词 卫星云图 云矢量 交叉相关法

中图分类号: TP391 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2006)04-0586-06

A Cloud Movement Short-time Forecast Based on Cross-correlation

LIU Ke-feng¹⁾, ZHANG Ren^{1),2)}, SUN Zhao-bo²⁾

¹⁾(Institute of Meteorology, PLA University of Sciences and Technology, Nanjing 211101)

²⁾(Postdoctoral Mobile Station, Nanjing University of Information Engineering, Nanjing 210044)

Abstract The paper describes a cloud forecast technique using cross-correlation from two time sequential GMS-5 images. Cloud movement vectors are retrieved at a 32×32 subset of points through application of a cross-correlation analysis. An area in the first of two sequential frames of satellite data is correlated with surrounding areas in the second frame to find the one surrounding area best correlated. The location difference of the areas defines the displacement vector. After the objective analysis of the displacements, using these displacements, forecast are then produced with a backward trajectory technique. The result show that short time forecast of cloud motion with slowly change achieve better result by the quantificational and fast scheme.

Keywords satellite cloud image, cloud vector, cross-correlation

1 引 言

在气象业务预报,尤其是灾害性天气预报中,卫星云图已成为关键的气象信息资源,发挥着越来越重要的作用,但云图内含的丰富信息远远没有得到充分的开发利用。近年来,基于各种统计分析和模式识别方法的卫星云图计算机自动分析处理得到了快速发展和积极应用,极大地促进和推动了气象卫

星遥感的理论研究和技术应用。当前,卫星遥感应用主要是针对遥感云图进行实时客观分析和监测识别,然而,人们更关心的问题是如何在云图上预测云团的移动和变化。飚线、暴雨和雷暴大风等中小尺度灾害性天气往往具有发生发展快、移动迅速、破坏性强等特点,对其进行预测(尤其是 1~3 小时的临界预测)是气象预报中尚未解决的难点问题,也是灾害性天气监测的迫切需要。多谱雷达虽然能够实时有效地监测强风暴活动,但成本昂贵、设备布点

基金项目:中国博士后科学基金项目(2004036012);江苏省博士后科研资助计划项目(2004087)

收稿日期:2004-08-30;改回日期:2005-05-23

第一作者简介:刘科峰(1978~),男。2001 年于解放军理工大学气象学院获气象学硕士学位,现在解放军理工大学气象学院攻读博士学位。感兴趣的方向是卫星遥感图像信息提取及处理。E-mail: fengke_liu@126.com

和监测范围有限,而静止卫星能够提供大范围、全天候的云图信息,对云团(尤其是强对流云团)活动进行监测和预测有助于客观实时地追踪预警灾害性天气,是卫星遥感更有意义、更为实用,同时也更复杂的研究课题。

美国自20世纪70年代起,对静止卫星云图中云团的移动进行了分析研究,如利用电影动画胶片人为判断云团的移动^[1];人机交互系统MCIDAS(A man-computer interactive data access system)通过在计算机屏幕上由操作员用光标指定云团中心,利用匹配相关系数求出云团的移动^[2];SATS(SRI automatic traction system)通过提取云团的特征量,用模式匹配技术追踪云团^[3,4];对云团进行傅里叶变换,利用傅里叶位相差来估计云团移动^[5];在云图匹配移动研究中提出的相关分析的思想方法^[6]。目前,国内卫星遥感研究中对云团匹配追踪、移动预测等方面的研究尚不多见,如借鉴MPEG-2中运动矢量的概念,利用序列相似性检测计算云团的位移矢量,用计算所得矢量直接对云图未来趋势进行外推预测^[7],取得了一定的效果,但该方法未对计算所得的云团移动矢量做客观分析以剔除不准确的位移矢量,从而影响了云图预测效果;区域平滑滤波和阈值剔除相结合的强对流云团过滤算法^[8],用模式匹配识别技术对强对流云团进行追踪,取得一定的效果;用Bayes判别方法对云和陆地进行分类,用傅里叶变换方法计算相关系数,得到云团的位移矢量,并用分析后的位移矢量预测未来时刻的云图^[9]。上述研究探索无疑为云团预测研究奠定了重要基础。但鉴于云团变化的复杂性和非线性,目前云团预测理论和方法及预测效果并不完善,具有实用意义的云图预测模型几乎没有。因此,继续探索卫星云图预测的方法思路和技术途径不仅具有学术意义,更有实用价值。本文拟基于连续时次的GMS-5卫星云图,引入交叉相关法计算云团的移动矢量,并用客观分析后的矢量,利用后向轨迹法对未来云团

的移动进行预测。

2 算法模型

2.1 图像预处理

选用目前气象业务工作中应用最为普遍的日本GMS-5静止气象卫星红外云图(10.5 μm ~11.5 μm 波段),经麦卡托投影后选取东南沿海地区作为云图预测试验区域。

一幅卫星云图通常会存在一些干扰和噪声,这些干扰和噪声无疑会降低云图质量,影响云团属性和云团移动的判断。采用9点均值平滑法对云图进行平滑滤波预处理,旨在消除云图中的噪声干扰。所取均值平滑公式为

$$x_{m,n} = \frac{1}{(2k+1)(2k+1)} \sum_{i=-k}^k \sum_{j=-k}^k x(i+m, j+n)$$

式中, k 决定了 (m,n) 点邻域大小, $k=1$ 时为 3×3 , $k=2$ 时为 5×5 。 k 较大时,会使得图像边缘信息变得模糊,为了尽量保持边缘信息,取 $k=1$ 。

2.2 交叉相关法

交叉相关法是针对两幅不同时次的卫星云图进行分析计算。首先,在前一时次卫星云图中选定某一区域内定义的一个像素子集 S ,其后在后一时次卫星云图相应子集的扩大区域内计算逐个像素子集与子集 S 的交叉相关系数,找出与子集 S 具有最大交叉相关系数的像素子集 T ,将像素子集 S 中心与像素子集 T 中心之间的位置变化看作是像素子集 S 的移动。具体计算如下:

设 t_1 和 t_2 两个时刻云图的灰度距平函数分别为 $f(x,y,t_1)$ 和 $f(x,y,t_2)$,则它们之间的交叉相关系数为

$$R(p,q) = \frac{\iint f(x,y,t_1) \cdot f(x+p,y+q,t_2) dx dy}{\left\{ \left[\iint f^2(x,y,t_1) dx dy \right] \left[\iint f^2(x+p,y+q,t_2) dx dy \right] \right\}^{1/2}}$$

实际使用中,可将上式离散到网格点上,即

$$R(p,q) = \frac{\sum_i \sum_j \{ [g(i,j,t_1) - \overline{g(t_1)}] \cdot [g(i+p,j+q,t_2) - \overline{g(t_2)}] \}}{\left\{ \sum_i \sum_j [g(i,j,t_1) - \overline{g(t_1)}]^2 \cdot \sum_i \sum_j [g(i+p,j+q,t_2) - \overline{g(t_2)}]^2 \right\}^{1/2}}$$

式中, $g(i,j,t_1)$ 为云图区域内像素点 (i,j) 在 t_1 时刻的灰度值, $\overline{g(t_1)}$ 为前一时次云图区域内像素 (i,j) 子集的平均灰度值, $\overline{g(t_2)}$ 为后一时次云图区域内像素子集 $(i+p,j+q)$ 的平均灰度值, (p,q) 分

别为后一时次像素子集中心距前一时次像素子集中心在 (i,j) 方向上的位移矢量。通过 p,q 的变化,分别求出后一子集群与前一子集的相相关系数,并从中选出最大相关系数,以确定出位移矢量。

2.3 质量控制

通过交叉相关法计算得到的云团位移矢量,尚不能直接用于云团预测,还必须进行质量控制。质量控制主要是基于以下几种情况的考虑:(1)若像素子集的区域太小,则通过交叉相关法计算得到的位移矢量可能会不准确,表现为虽然高相关但并非真实的位移方向;(2)对一子集而言,可能包含多层云系,在此情况下,一个单独的位移矢量对该像素子集来说可能是不适用的;(3)若该像素子集对应的是一晴空区,即使该区域的风速很大,但所得到的位移矢量是零,如果直接将零矢量用于后向轨迹预报,晴空区将不会有云出现。

针对上述情况所致的不准确的位移矢量和随机矢量,本文拟采用以下途径进行订正:

(1)增加像素子集包含的像素点数,但这是以增加运算时间为代价的,这里选取 32×32 像素子集,既减少了随机矢量,也不会占用太多运算时间;

(2)将每一矢量和周围矢量进行比较,若该矢量偏离局地平均矢量 4 个像素,那么该矢量用局地平均矢量代替(经试验,该替代方案效果最好);

(3)多层云系会严重影响位移矢量的准确性,因此须用一符合实际情况的位移矢量来代替。一般情况下,该矢量可通过各层云的位移矢量比较加权来计算^[6]。对于零位移矢量,将在客观分析中首先将其剔除掉,以保持流场的连续性^[6]。

2.4 客观分析与后向轨迹预报法

经矢量订正和零矢量剔除后,将对矢量进行客观分析。客观分析旨在通过平滑每一像素子集的位移矢量,以产生每个像素子集合理的位移矢量。为保持整个流场的连续性,这里采用多层连续订正法^[6]对像素子集的位移矢量进行客观分析。

用客观分析后的矢量,结合后向轨迹预报法,即可对未来时刻云团的移动方向做出预测。所谓后向轨迹预报法是在假定云体运动具有保守性及连续性的基础上,以前一时次云团的运动状态线性外推下一时次云团的运动状态。后向轨迹预报法的关键在于导出准确的位移矢量。

3 应用试验

选取 1999 年 5 月 17 日 09 时和 10 时(北京时)连续两个时次 GMS-5 红外云图(经麦卡托投影变换),在云图上选定一块大小为 352×352 像素的区

域($22.5^{\circ}\text{N} \sim 36.5^{\circ}\text{N}, 107^{\circ}\text{E} \sim 124.5^{\circ}\text{E}$),采用上述计算方案计算云团的位移矢量,并进行了 1 小时、2 小时和 3 小时的云图预测试验。图 1 是经质量控制和客观分析后所得的云团移动矢量图。图 2 分别为 1 小时、2 小时、3 小时的预测结果与实况图的对比。

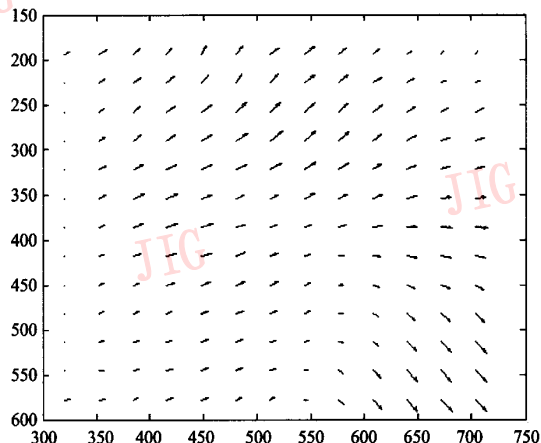


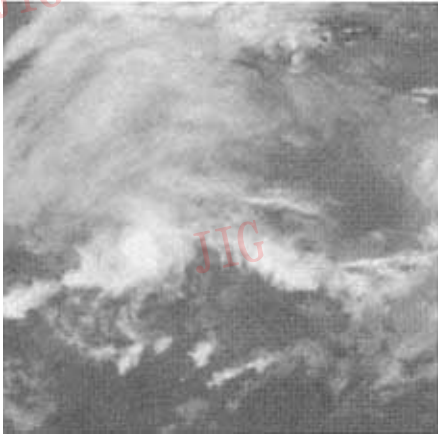
图 1 云团位移矢量图

Fig. 1 Cloud motion vector

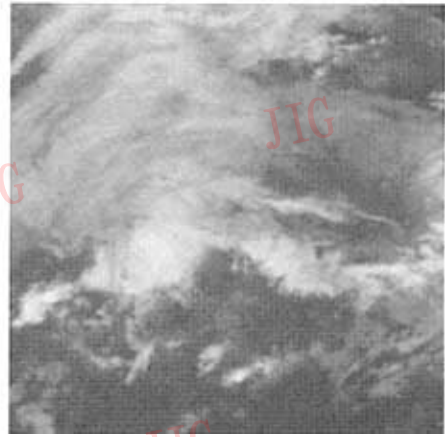
通过对比分析可以看出,1 小时和 2 小时的预测结果与实况云图的整体结构差异不大,预测结果可行,但由于本预测方法是建立在线性外推预测基础之上的,因此该方法仅适宜于云团移动较为平稳的短时预测,对云团生消变化显著和较长时间的预测,本方法固有的局限性(线性外推)决定了其难以取得好的预测结果;3 小时的预测结果与实况图的对比分析中,可以看出预测结果随时间增加而出现相对较大的偏差。

图 3(a)是基于 1999 年 5 月 1 日 02 时~03 时连续两个时次 GMS-5 红外云图(图 3(b),图 3(c))估算出的热带气旋的位移矢量图(352×352 像素区域; $22.5^{\circ}\text{N} \sim 36.5^{\circ}\text{N}, 115^{\circ}\text{E} \sim 132.5^{\circ}\text{E}$)。该矢量图大致反映出了涡旋云团向东北方向移动的趋势特征。

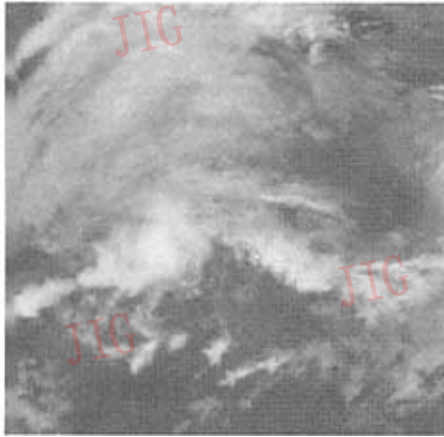
此外,还利用上述计算方法,对 1999 年 1 月、7 月的 GMS-5 红外和可见光云图资料分别进行了预测试验,并分别计算了 1 月、7 月可见光、红外云图 1~5 小时预测结果和实况云图的平均相关系数(表 1)。相关系数越大,表明预测结果和实况场越接近,预测结果越好,反之则越差。比较 1 月、7 月可见光、红外云图 1~5 小时预测结果和实况场的平均相关系数,其结果表明:(1)冬季(1 月份)的预测结



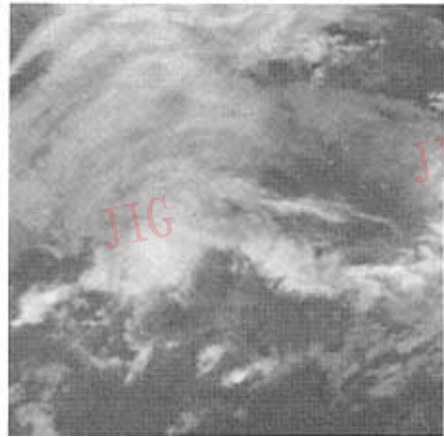
(a) 1 小时预测图



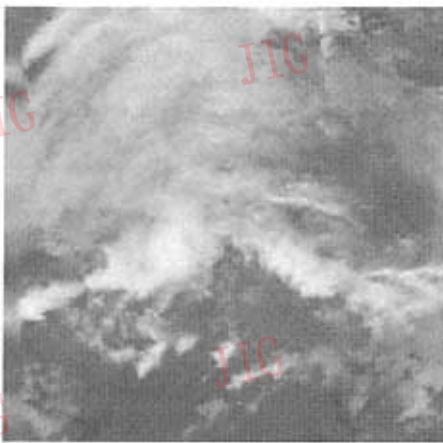
(b) 1 小时实况图



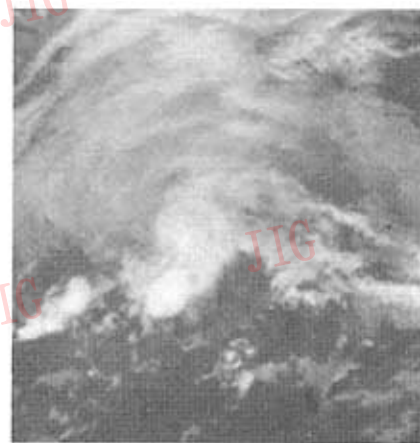
(c) 2 小时预测图



(d) 2 小时实况图



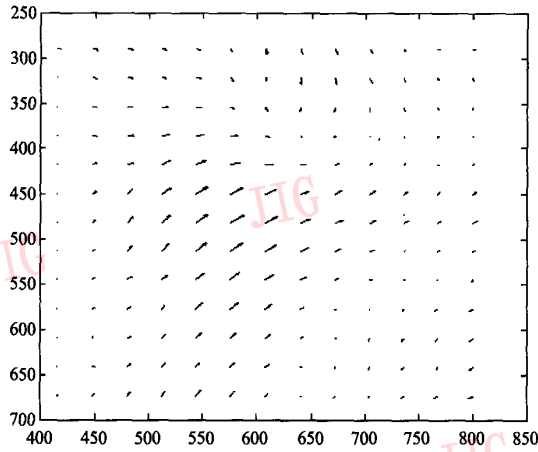
(e) 3 小时预测图



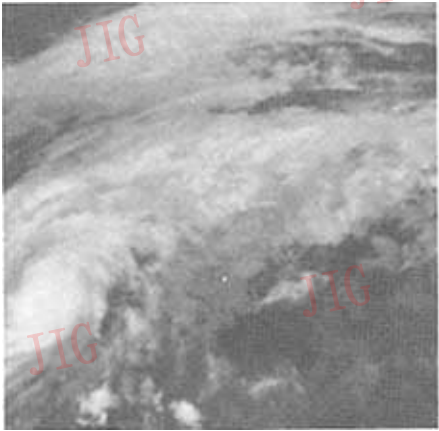
(f) 3 小时实况图

图 2 1~3 小时预测实验

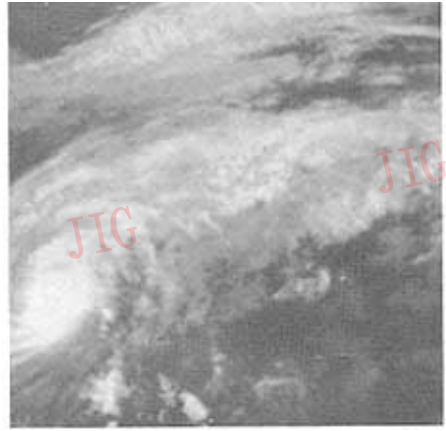
Fig. 2 Forecast experiment from one to three hours



(a) 云团位移矢量图



(b) 超前 1 小时云团



(c) 当前云团

图 3 云团移动矢量分析

Fig. 3 Analysis of cloud motion vector

表 1 1 月、7 月 1~5 小时预测结果与实况平均相关系数

Tab. 1 Average correlation coefficients between cloud forecast from one to five hours and corresponding cloud case in January and July

	1 小时	2 小时	3 小时	4 小时	5 小时
1 月(可见光)	0.928 6	0.897 4	0.878 8	0.819 4	0.643 5
1 月(红外)	0.969 9	0.944 3	0.928 4	0.901 6	0.877 2
7 月(可见光)	0.836 6	0.757 1	0.656 2	0.336 5	NaN(非数)
7 月(红外)	0.882 1	0.813 7	0.727 5	0.611 6	NaN(非数)

果优于夏季(7 月份);(2) 红外云图的预测结果优于可见光云图;(3) 随着预报时间增长, 预测结果与实况云图的误差亦增大。究其原因, 可归纳为以下几点:(1) 冬季多为稳定环流形势和天气系统, 云团

移动较为平稳; 夏季对流活动旺盛, 云团生、消显著, 故夏季的云图预测结果逊于冬季;(2) 可见光云图是太阳辐射经地-气系统散射、反射后到达卫星的图像, 图像灰度取决于地表或云的散射、反射系数, 太

阳高度角变化(对应不同时次)的可见光云图亮度/灰度差异,将导致其预测结果出现较大误差(因此,在可见光云图预测前,应先对其进行太阳高度角订正,以减小前后时次亮度差异而引起的误差);而红外云图是通过接收地气系统辐射亮温成像,图像稳定性和连续性相对较好;(3)云团在移动过程中,不可避免地存在着不同程度的云团生消和转向等非正常运动,由于本文云图预测方法是以线性外推为基础,故对云团发展、消散、转向等变化难以作出准确的预测。随着预报时效的增加,这种预测误差将会越来越明显,这是本方法的固有的缺陷所致。

4 结 论

本文基于连续两个时次的 GMS-5 静止卫星红外云图,对云图上选定的预测区域,利用交叉相关法分析计算出前、后两个时次云团的位移矢量,随后对位移矢量进行质量控制和客观分析。最后,基于优化后的云图矢量,进行云图预测。试验结果表明,交叉相关法可较好地应用于卫星云图短时预测,尤其对相对平稳的云团(云系)运动,该方法能取得较好的预测结果。该方法通过对云团的移动方向、移动速度作客观、量化的分析计算,可弥补通常分析中凭借个人经验判断云团移动的不足,该方法对卫星云图中云团(云系)的发展变化趋势预测有一定的参考应用意义。值得注意的是,由于本方法以及目前所有的云团预测方法均是基于连续时次云图所提取出的移动矢量进行线性外推,因此,即使移动矢量计算获取完全准确,若云系出现生消、转折等非正常变化时,也将导致预测失败,这是现有云图预测方法固

有的局限性。为识别云图的非正常运动,改进提高预测效率,在随后工作中,拟引入多光谱卫星云图灰度、梯度信息和纹理特征,采用非线性模式识别方法进行云图预测的进一步研究探索。

参考文献 (References)

- 1 Fujita T, Bradbry D L, Murino C, *et al.* A Study of Mesoscale Cloud Motions Computed from ATS-I and Terrestrial Photographs [R]. SMRP Res. Pap. 71, Chicago, IU, USA: The University of Chicago, 1968.
- 2 Smith E A. The McIDAS system[J]. IEEE Trans Geosci Electron GE-13, 1975, 6(3):123~136.
- 3 Endlich R M, Wolf D E, Hall D J, *et al.* Use of a pattern recognition technique for determining cloud motions from Sequences of Satellite photographs[J]. J. Appl. Meteor, 1971, 10(2):105~117.
- 4 Hall D J, Endlich R M, E Wolf, *et al.* Experiments in automatic cloud tracking using SMSGOES Data[J]. J. Appl. Meteor, 1997, 16(11):1219~1230.
- 5 Arking A, Robert C L, Rosenfield A. A furrier approach to cloud motion estimation[J]. J. Appl. Meteor, 1978, 17(6):735~744.
- 6 Thomas M H, Thomas N. A short-term cloud forecast scheme using cross-correlations[J]. Weather and Forecasting, 1993, 8(4):401~411.
- 7 Gong Ke, YE Da-lu, Ge Cheng-hui. A method for geostationary meteorological satellite cloud image prediction based on motion vector [J]. Journal of Image and Graphics, 2000, 5(4):349~352. [龚克,叶大鲁,葛成辉. 卫星云图预测的卫星矢量方法[J]. 中国图形图像学报, 2000, 5(4):349~352.]
- 8 Bai Jie, Wang Hong-qing, Tao Zu-yu. Recognition and tracing of severe convective cloud from IR images of GMS [J]. Journal of Tropical Meteorology, 1997, 13(2):148~167. [白洁,王洪庆,陶祖钰. GMS 卫星红外云图强对流云团的识别与追踪[J]. 热带气象学报, 1997, 13(2):148~167.]
- 9 Li Zhen-jun. Estimation of cloud motion using cross-correlation[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1998, 15(2):277~282.