

利用卫星云图反演云导风的新思路*

龙智勇[†] 石汉青 黄思训[‡]

(解放军理工大学气象学院, 南京 211101)

(2010年7月18日收到; 2010年8月3日收到修改稿)

本文首先借助于近年来发展起来的数值微分方法, 从图像灰度中提取出图像梯度信息; 然后利用正则化方法, 实现了云导风反演; 最后采用仿真和实际试验两种方法, 对云图中有扰动时加入灰度梯度信息和未加入灰度梯度信息的风场反演结果进行比较. 结果表明, 加入图像灰度梯度信息所实施的新反演方法可有效减小图像干扰的影响, 同时也大大提高了风矢量反演的精度, 为卫星云图反演云导风探索一条新路子.

关键词: 云导风, 数值微分, 图像灰度梯度, 正则化

PACS: 92.60.Gn, 42.30.Va

1. 引言

风是气象中最重要的要素之一, 它与其他气象要素有着紧密的联系. 风对人们的生产、生活产生着重大的影响. 众所周知常规手段获取的风场信息主要来自于测站的测量, 对于像高山、海洋、沙漠和极地等缺乏测站的地区, 就很难获取真实的风场资料, 卫星资料反演风场是重要的信息源^[1]. 近几十年来, 利用气象卫星资料反演的云导风已广泛应用于数值预报^[2]、台风分析^[3,4]等, 并越来越显示其重要的作用.

目前, 云导风计算过程中示踪云的追踪用得最有成效的是 Leese 等人提出的相关匹配法^[5], 许健民等人^[6]对算法进行了改进, 并在利用卫星图像反演云导风方面取得了显著的成果, 为云导风产品的业务化打下了坚实的基础, 孙林等人^[7]利用傅里叶相位分析技术对短时间间隔的云导风也进行了深入研究, 做了十分有益的工作.

所谓相关匹配法主要利用了图像间的灰度相似性特征, 而没有考虑到灰度梯度特征. 而卫星云图中的灰度是通过星载传感器观测转化来得到的, 从而存在着观测误差, 如果对灰度直接采用数值差分得到灰度梯度特征, 加入到相关匹配法中去, 会引起较大的风速误差. 本文首先借助于近几年反问

题中发展起来的数值微分方法, 即离散观测数据求微商^[8-14], 利用一维数值微分方法计算云图各点在经度和纬度方向上灰度的导数(从而得到灰度的梯度), 然后利用正则化方法将云图灰度的梯度信息加入相关匹配的要素中去, 最后采用仿真和实际试验两种方法对云导风进行反演, 数值结果表明这种新的相关匹配方法, 即利用了灰度的信息又吸收了图像灰度梯度信息, 在提高反演精度的同时, 又提高了反演的稳定性, 为云导风产品精度的提高及进一步应用于预报走出一条新路.

2. 云导风反演新方法实施

2.1. MCC 方法介绍

云导风通常追踪图像块(示踪云)在三幅连续云图中的移动来估算风速, 并由示踪云的高度指定风场的高度. 其原理如图 1 所示, 左侧为 t_0 时刻的云图, A 区域为示踪云块, 右侧为 t_1 时刻云图, 在搜索区域 C 中寻找示踪云块在 t_1 时刻的位置. 实际处理中主要包括四个步骤:

- 1) 数据预处理: 对用于计算云导风的云图进行精确定位;
- 2) 示踪云追踪: 在目标图像中搜索示踪云的位置;

* 国家自然科学基金(批准号:40775023)资助的课题.

[†] E-mail: longju9999@yahoo.com.cn

[‡] 通讯联系人. E-mail: huangxp@yahoo.com.cn

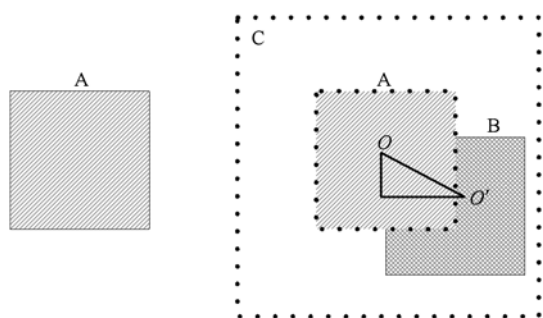


图1 云导风计算原理示意图

$$R_1(m, n) = \frac{\sum_i \sum_j [f(i, j) - \bar{f}][g(i + m, j + n) - \bar{g}]}{\left[\sum_i \sum_j [f(i, j) - \bar{f}]^2 \sum_i \sum_j [g(i + m, j + n) - \bar{g}]^2 \right]^{1/2}}, \quad (1)$$

其中 $i, j \in [1, 32]$ 分别为示踪云模板中的行与列号, $m, n \in [0, 64]$ 为目标搜索区位移改变量, $f(i, j)$ 为示踪云模板的灰度值, $g(i, j)$ 为目标搜索区云的灰度值, 记 $\bar{f} = \frac{1}{N^2} \sum_i \sum_j f(i, j)$ 为示踪云的平均灰度, $\bar{g} = \frac{1}{N^2} \sum_i \sum_j g(i + m, j + n)$ 为目标搜索区的平均灰度, 其中取 $N = 32$.

当最大相关系数取得时, 目标搜索区内相对于示踪云在 x, y 方向上分别移动了 m 和 n 个像素点, 建立地球模型可计算出目标云相对于示踪云的位移量, 除以两幅图像的观测时间间隔可得到风矢量^[6].

2.2. 云图灰度梯度计算方法

在 2.1 中, 介绍了示踪云追踪的 MCC 法, 这里有许多问题需要深入研究, 因为灰度是通过观测得到的离散数据, 传统的 MCC 法仅仅利用了图像的灰度信息, 没有充分利用图像灰度的梯度信息, 而灰度梯度信息会直接影响到图像的相似性. 众所周知灰度的梯度计算 (亦即观测资料求导数) 在数学上是一个不适定的问题. 此问题, 通过离散点上观测值, 要寻找一个函数, 使得它与观测点上观测值充分接近, 同时其导数与真实函数的导数要有足够的精度. 显然, 当离散数据不存在数据误差时, 这一问题一般用有限差分法就可求得近似导数, 并且其收敛性亦得到保证, 但当离散数据存在误差时, 用有限差分法求近似导数会产生很大误差. 本文采用了

3) 高度指定: 指定计算风场的高度;

4) 质量控制: 利用三幅云图计算出的两个风场结果进行连续性和空间一致性检验等质量控制.

示踪云追踪方法中目前使用最广泛的是最大交叉相关系数 (maximum cross-correlation coefficient, MCC) 法, 即在搜索区域滑动, 计算示踪云块 (为 32×32 像素图像块) 在目标搜索区 (为 96×96 像素图像块) 里的交叉相关系数的最大区域即为目标区域, 交叉相关系数 $R_1(m, n)$ 为

数值微分方法^[8], 该方法所得到的解是一个分片三次样条函数, 此解的导数与真实解的导数具有足够高的精度, 实施方案如下:

设 $y = f(x)$ 是定义在 $[0, 1]$ 上的一个函数, 记 $\Delta = \{0 = x_0 < x_1 < \dots < x_n = 1\}$ 是 $[0, 1]$ 上的一个划分, $h_j = x_{j+1} - x_j, h = \max(h_j), (j = 1, 2, \dots, n - 1)$, 若给定函数在点 x_j 处的观测值 \tilde{y}_j , 用 δ 表示观测数据的观测误差, 则

$$|\tilde{y}_j - y(x_j)| \leq \delta, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

数值微分方法是寻找函数 $f^*(x)$, 使得 $f^*(x)$ 的导数与真是函数 $y(x)$ 的导数充分接近, 于是构造泛函 J 如下:

$$J(f) = \sum_{j=1}^{n-1} \frac{h_j + h_{j+1}}{2} (\tilde{y}_j - f(x_j))^2 + \alpha \left| \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_{L^2(0,1)}^2 = \min! \quad (2)$$

这里 α 是正则化参数. 则重构图像的函数 f^* 是一个分段的三次样条函数且一阶微分是连续的, 在子区间 $[x_j, x_{j+1}]$ 上其表达式为

$$f^*(x) = a_j + b_j(x - x_j) + c_j(x - x_j)^2 + d_j(x - x_j)^3, \quad j = 0, 1, \dots, n - 1, \quad (3)$$

其一阶导数为

$$f^{*'}(x) = b_j + 2c_j(x - x_j) + 3d_j(x - x_j)^2, \quad x \in [x_j, x_{j+1}], \quad (4)$$

其中 a_j, b_j, c_j, d_j 系数的值见文献[8—12], 根据理论分析, 此时正则化参数 α 的选取原则应为 $\alpha = \delta^2$.

对于数字化的静止气象卫星云图 (日本 MTSAT

气象卫星),每一个像素代表了约 20 km² 范围内的平均光谱信息,图像灰度值范围为 0—1023. 将每一行坐标归一化为 [0, 1] 之间,每一点对应的灰度值即为函数值,由此可根据 (4) 式分别求出每一点在经度方向和纬度方向上的梯度值. 图 2 表示的数值微分(点实线)和差分(实线)两种方法求出的一行中(2009 年 08 月 06 日 02:30 的云图)100 个连续点在经度方向上的导数,从图中可见,采用差分法得出的导数在相邻点差异可达 100 左右,而采用数值微分法得到的结果就显著减小,这说明数值微分比差分计算的导数更为准确合理.

2.3. 云导风反演的新方法实施

将图像灰度的梯度信息加入相关系数的计算中,三种信息单独计算出的交叉相关系数分别记为

$$R_2(m, n) = \frac{\sum_i \sum_j [f_x^{*'}(i, j) - \overline{f_x^{*'}}][g_x^{*'}(i + m, j + n) - \overline{g_x^{*'}}]}{[\sum_i \sum_j [f_x^{*'}(i, j) - \overline{f_x^{*'}}]^2 \sum_i \sum_j [g_x^{*'}(i + m, j + n) - \overline{g_x^{*'}}]^2]^{1/2}}, \quad (5)$$

$$R_3(m, n) = \frac{\sum_i \sum_j [f_y^{*'}(i, j) - \overline{f_y^{*'}}][g_y^{*'}(i + m, j + n) - \overline{g_y^{*'}}]}{[\sum_i \sum_j [f_y^{*'}(i, j) - \overline{f_y^{*'}}]^2 \sum_i \sum_j [g_y^{*'}(i + m, j + n) - \overline{g_y^{*'}}]^2]^{1/2}}, \quad (6)$$

其中 $f_x^{*'}(i, j)$ 为示踪云模板在经度方向的梯度, $g_x^{*'}(i, j)$ 为目标搜索区在经度方向的梯度, $f_y^{*'}(i, j)$ 为示踪云模板在纬度方向的梯度, $g_y^{*'}(i, j)$ 为目标搜索区在纬度方向的梯度, $\overline{f_x^{*'}}, \overline{g_x^{*'}}, \overline{f_y^{*'}}, \overline{g_y^{*'}}$ 的定义与 (1) 式类似,表示梯度的平均值.

构造函数如下:

$$J[m, n] = R_1(m, n) + \gamma[R_2(m, n) + R_3(m, n)] = \max! \quad (7)$$

其中 γ 表示最大交叉相关系数法中正则化参数,取 $\gamma = \delta^2$, δ 为观测误差值, $\delta = \frac{\delta^*}{1024}$, δ^* 为观测灰度误差,使得 (7) 式最大所对应的区域即为目标云区域位置.

3. 云导风仿真试验

为了讨论方便,记方法 1 为只用灰度进行计算的方法,记方法 2 为加入灰度梯度信息的新方法. 由于云导风矢量与实际风矢量在高度和速度上具有

R_1, R_2, R_3 . R_1 由 (1) 式求出, R_2, R_3 分别由 (5) 式与 (6) 式求出.

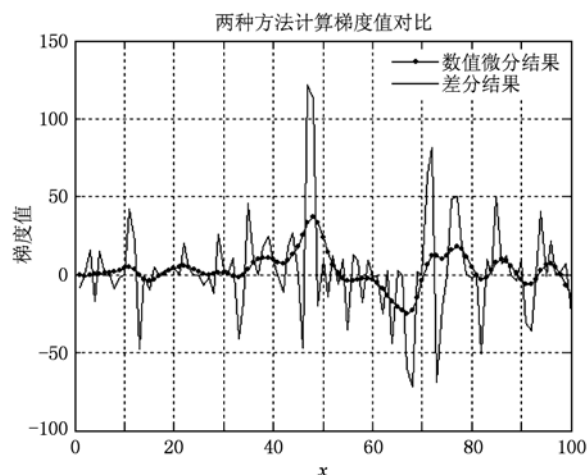


图 2 梯度计算结果对比

一定的差异,故能准确代表云导风矢量真值的观测风资料不易获取. 由于真实风场无法取得,就无法判别两种方法的优劣,于是我们实施了如下的仿真试验,仿真数据采用如下方法来实现,选取日本 MTSAT 静止气象卫星 2009 年 08 月 06 日 02:00 云图,在 0—40°N, 100—140°E 范围进行等经纬度投影后,假定在一个小时内每一点上在经度和纬度方向上运动速度均为 8 m/s,可以由此构造出 02:30 和 03:00 时刻的云图,分别加入 5 和 15 以内(观测灰度误差 δ^*) 的随机扰动,分别以方法 1 和方法 2 计算云导风,并将加入与未加入随机扰动的结果进行风速和风向均方根误差统计.

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v - v_1)^2}{n - 1}}, \quad (8)$$

$$\sigma_\theta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta - \theta_1)^2}{n - 1}}, \quad (9)$$

其中 n 代表位置相同的风矢量个数, v, v_1 代表真值

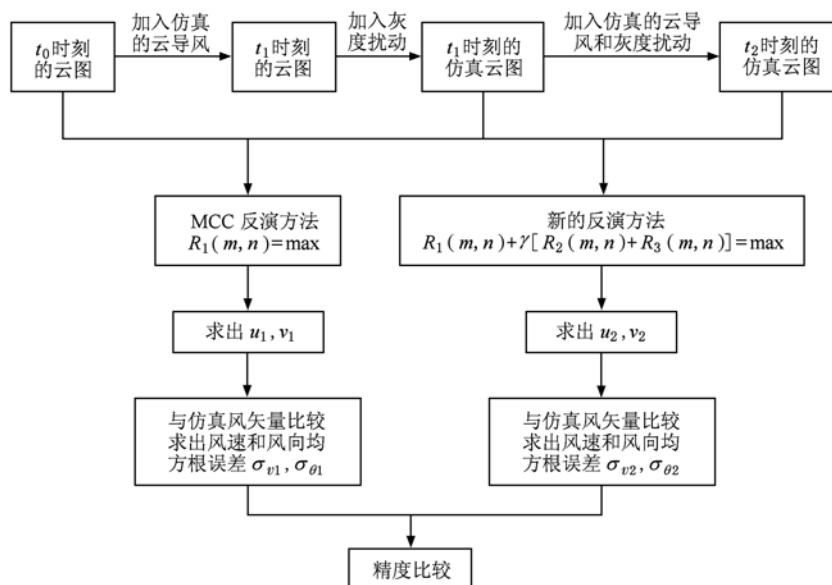


图3 云导风仿真试验流程图

和计算出的风速, θ, θ_1 代表真值和计算出的风向, 实施方案见图3.

用两种方式计算风矢量的均方根误差, 表1为两种方法计算结果与仿真真值进行比较的结果; 表2为两种方法有灰度扰动时计算结果与无扰动时的计算结果进行比较的结果.

表1 与模拟仿真真值对比结果

方法	随机扰动值范围	风速均方根误差/(m/s)	风向均方根误差/(°)
	0	1.73721	9.16991
方法1	-5—5	1.73912	10.38306
	-15—15	1.74783	12.27632
方法2	0	1.52648	7.09845
	-5—5	1.52709	7.64321
	-15—15	1.53066	9.07316

表2 灰度随机误差引起的误差对比结果

方法	随机扰动值范围	风速均方根误差/(m/s)	风向均方根误差/(°)
方法1	-5—5	0.01637	5.07380
	-15—15	0.03803	5.27343
方法2	-5—5	0.00921	2.78032
	-15—15	0.01625	3.02057

仿真试验结果表明:

1) 云图灰度的扰动会引起风矢量计算的误差,

且灰度扰动越大风矢量误差也越大;

2) 加入图像梯度信息后, 可有效提高风矢量的反演精度, 表1中在无灰度扰动时方法2计算的风速均方根误差比方法1低0.21073 m/s, 方向均方根误差低2.07146°;

3) 加入图像梯度信息后, 可有效抑制灰度扰动的的影响, 减小灰度扰动引起的风矢量误差, 表1和表2的比较结果均如此.

4. 实际试验

按照3中的流程和方法, 选取日本MTSAT静止气象卫星2009年08月06日01:30, 01:57, 02:30三幅连续的实际云图, 与未加入扰动时的计算结果对比分析如表3所示(风矢量与云图的叠加图见图4).

实际云图试验的误差计算结果与仿真云图试验的结果一致.

表3 加入灰度随机误差引起的风矢量均方根误差

方法	随机扰动值范围	风速均方根误差/(m/s)	风向均方根误差/(°)
方法1	-5—5	0.60321	2.55873
	-15—15	0.61481	2.57675
方法2	-5—5	0.53223	2.20369
	-15—15	0.56305	2.32139

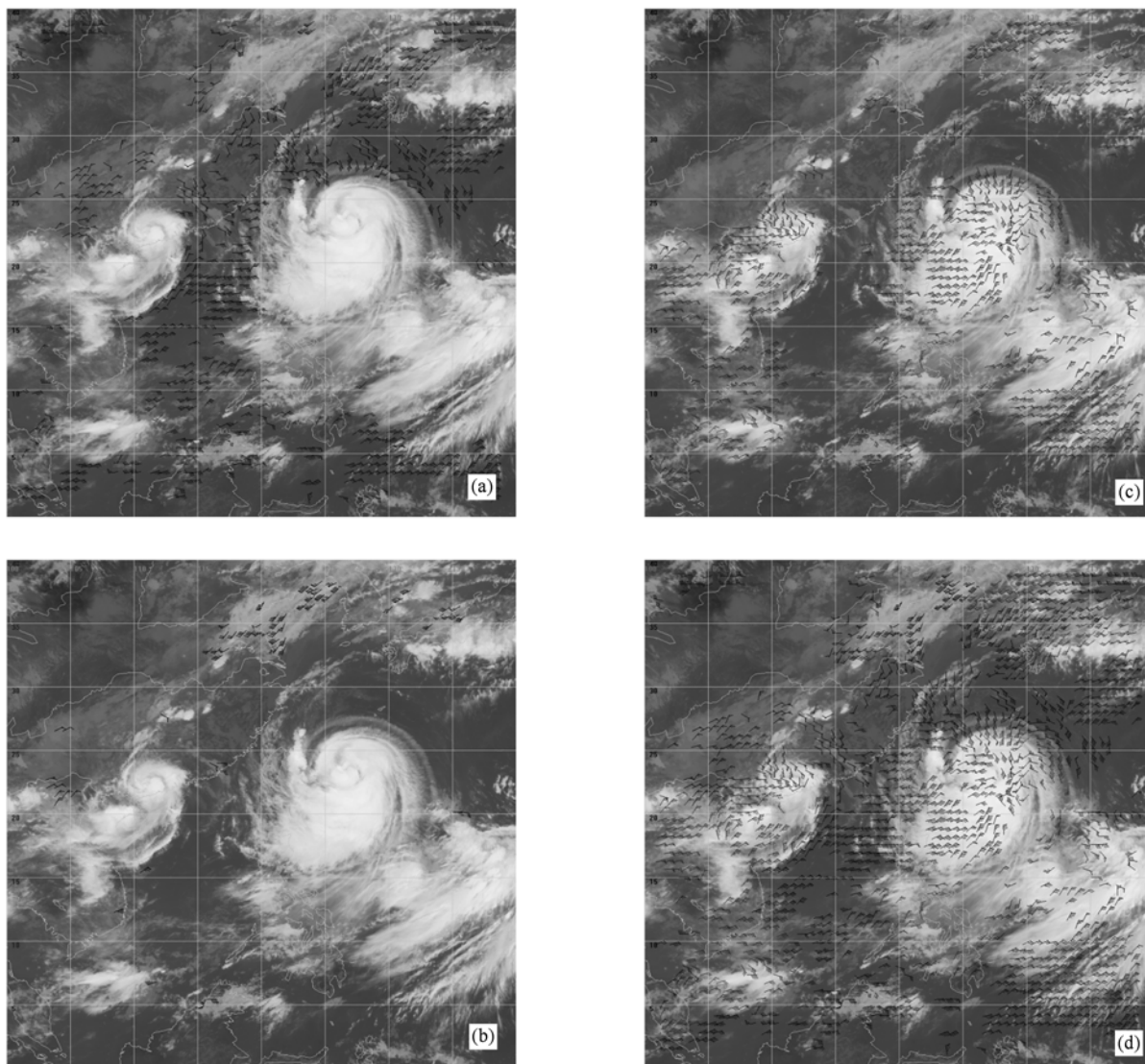


图4 方法2 风场计算结果与云图叠加图(2009.08.06 02:30UTC) (a)低层风(700—950 hPa); (b)中层风(400—699 hPa);(c)高层风(150—399 hPa);(d)高中低层风

5. 结 论

在总结现有云导风反演方法的基础上,将数值微分方法计算出的图像灰度梯度信息加入到云导风追踪运算中,利用正则化构建了云导风反演新方法.经过对比两种方法计算出的风场结果,加入图像梯度后能够有效降低观测干扰引起的误

差,较大地提高了反演的精度,研究表明图像灰度梯度能够有效改善云导风反演的精度.最后将两种方法计算的结果与实际观测结果进行精度对比,进一步优化云导风反演的算法.下一步工作中将联合多星源卫星观测资料建立云高计算模型,在风场高度指定的准确性上进行深入研究,并对云导风算法进行优化和长时间试验,力争应用到云导风业务系统中.

[1] Huang S X, Liu Y D, Zhang L, Zhong J 2010 *Chin Phys. B* **19** 2889

[2] Li H H, Wang M, Xue J S, Qi M H 2008 *Acta Meteor. Sin.* **66**

50 (in Chinese) [李华宏、王曼、薛纪善、纪明辉 2008 气象学报 **66** 50]

[3] Zhou Y S, Cao J, Gao S T 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6654 (in

- Chinese) [周玉淑、曹洁、高守亭 2008 物理学报 **57** 6654]
- [4] Zhuang Z R, Xue J S 2004 *J. Trop. Meteor.* **20** 225 (in Chinese) [庄照荣、薛纪善 2004 热带气象学报 **20** 225]
- [5] Leese J A, Novak C S 1971 *J. Appl. Meteor.* **10** 118
- [6] Xu J M, Zhang Q S, Wang D C, Fan C Y 1997 *Q. J. Appl. Meteor.* **8** 11 (in Chinese) [许健民、张其松、王大昌、樊昌尧 1997 应用气象学报 **8** 11]
- [7] Sun L, Wang Z H, Xu J M 2004 *J. Nanjing Insti. Meteor.* **27** 210 [孙林、王振会、许建明 2004 南京气象学院学报 **27** 210]
- [8] Wang Y B, Hon Y C, Cheng J 2006 *J. Inv. III-Posed Problems* **14** 205
- [9] Wang Y B, Jia X Z, Cheng J 2002 *Inv. Problems* **18** 1461
- [10] Jia X Z, Wang Y B, Cheng J 2003 *Numer. Math. : A J. Chinese Univ.* **25** 81 (in Chinese) [贾现正、王彦博、程晋 2003 高等学校计算数学学报 **25** 81]
- [11] Lu S, Wang Y B 2004 *Numer. Math. : A J. Chinese Univ.* **26** 62 (in Chinese) [陆帅、王彦博 2004 高等学校计算数学学报 **26** 62]
- [12] Cai Q F, Huang S X, Gao S T, Zhong K, Li Z Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3912 (in Chinese) [蔡其发、黄思训、高守亭、钟科、李自强 2008 物理学报 **57** 3912]
- [13] Wang Y G, Cai Q F, Huang S X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4359 (in Chinese) [王业桂、蔡其发、黄思训 2010 物理学报 **59** 4359]
- [14] Huang S X, Cai Q F, Xiang J, Zhang M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3022 (in Chinese) [黄思训、蔡其发、项杰、张铭 2007 物理学报 **56** 3022]

A new Idea of cloud motion wind derived from satellite images^{*}

Long Zhi-Yong[†] Shi Han-Qing Huang Si-Xun[‡]

(Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

(Received 18 July 2010; revised manuscript received 3 August 2010)

Abstract

In this paper we firstly use a new method——numerical differentiation, which was developed in recent years to calculate gray gradient, and then realize the inverse cloud motion wind by regularization. At last, through simulation and practical experiments, we compared the wind inverse results between the algorithms with or without gray gradient information when the cloud images include perturbation. The experimental results show that the new algorithm with gradient information can reduce the influence of image disturbance effectively, and also increase the precision of cloud motion winds. We are in a position to find a new way to cloud motion wind inversion.

Keywords: cloud motion wind, numerical differentiation, image gray gradient, regularization

PACS: 92.60.Gn, 42.30.Va

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40775023).

[†] E-mail: longju9999@yahoo.com.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: huangsexp@yahoo.com.cn