

参赛密码 _____
(由组委会填写)

第九届“华为杯” 全国研究生数学建模竞赛

学 校 华北电力大学（北京）

参赛队号 10054016

队员姓名	1.蒋薇
	2.赖宇阳
	3.范莹

(由组委会填写)



摘 要:

在问题一中,根据灰度矩阵的行列坐标得到观测点相对卫星在南北方向的俯仰角 φ_1 与东西方向的俯仰角 φ_2 ,列写点法式平面方程。通过该空间曲面方程组求解地球上对应点,可以求解避免复杂的三角方程,并精确地实现灰度矩阵坐标到经纬度的转换。在灰度图上标注海岸线实际上是由已知地球上点经纬度,求解其在灰度矩阵上的对应坐标的过程。利用椭球的参数方程直接得到待求点在地球上的坐标,再利用三角函数边角关系,求得 φ_1 与行扫描角 φ_2 大小,根据角度与扫描间隔的关系求出灰度矩阵上的行列坐标,从而在图上标注出海岸线。

1

云块的移动。在完成云块识别后，利用时间连续性方法，对不正确风矢进行剔除。最终得到有效风矢在灰度图像上的起始点与终点的行列坐标，换算成经纬度后，利用平均半径，计算两点间球面距离。通过推导球面三角形的余弦定理，巧妙地解决了风矢方向空间角度的计算，并给出了题中要求点的计算结果。

在完成问题二计算后，我们通过对质量控制后有效非零风矢比例以及所生成图像进行了分析，发现在题目给定的像素块匹配所选用的窗口大小为 16×16 个像素，搜索范围限定为 64×64 个像素条件下，得到的 20:30 时刻风矢与 21:00 时刻风矢无论在速度上还是夹角上都有较大突变，说明在该条件下风矢计算精度较差，风矢场整体不协调。针对这个问题，我们在搜索区域像素大小不变的情况下，以 4 个像素为步长，针对题中所求的 5 个点，利用由 16×16 递增到 36×36 的搜索匹配像素块进行风矢计算。计算所得图像显示随着搜索匹配像素块边长增大到 28 像素后，同一点相邻时刻风矢计算结果相关性增强，速度与方向均符合云块运动的规律。由此可认定根据题中所给定的搜索条件计算出的风矢误差较大。

针对问题二中发现的问题，我们设计了两种确定搜索匹配像素块以及搜索范围大小的自适应算法：其一为基于数据的搜索算法，其二为基于统计参数的自适应搜索算法。前者针对若干个从处理后的灰度矩阵中随机选取的云块，利用算法速度与有效非零风矢比例构造一个评价指标。通过计算搜索块边长 l 与搜索范围 d 边长在取值区间内所有组合的评价指标，选出最优的 l 与 d 取值。计算结果表明， $l=32$ ， $d=40$ 时取得最优评价指标，基于云块移动极值估计，将 d 扩大为 64，并且利用该参数对文中所求点进行计算也得到了较好的结果。基于统计参数的自适应搜索算法则利用标准差与均值加权构成评价函数，求取搜索块边长在取值区间内取得极值处的 l 值。使得最优搜索块边长 l 能够根据不同的云块自适应变化。再利用上一时刻云块风矢速度动态的求取当前时刻搜索范围 d 边长的大小。计算结果表明该算法与前一算法虽取值不同，但在风矢计算上都取得了较好的效果。

问题四要求计算给定坐标处风矢的等压面。通过查表可得灰度与温度的对应关系。参照相关文献，剔除 temp3.mat 文件中云层不存在的等压层，利用内插法，确定风矢所在的等压面。并根据计算绘制卫星云图。

目录

一、问题重述.....	4
二、问题的假设.....	4
三、符号说明.....	5
四、问题分析.....	6
4.1 视场坐标的换算.....	6
4.2 21:00 时刻风矢场的计算	6
4.3 自适应算法模型的探索	6
4.4 计算非零风矢所在的等压面	7
五、视场坐标的换算.....	7
5.1 将灰度矩阵的行列号映射为地球的经纬度	7
5.2 将海岸线经纬度转换至灰度矩阵对应位置	8
5.2.1 第 I 卦限的计算.....	9
5.2.2 第 IV 卦限的计算.....	9
5.2.3 第 V 卦限的计算.....	10
5.2.4 第 VIII 卦限的计算	10
六、21:00 时刻风矢场的计算.....	11
6.1 数据预处理—示踪云的提取.....	11
6.1.1 灰度阈值截断.....	11
6.1.2 动态检测.....	11
6.2 示踪云的追踪	12
6.3 风矢的计算.....	13
6.4 质量控制	14
6.4.1 时间连续性控制.....	14
6.4.2 空间连续性质量控制.....	15
6.4.3 云地分离.....	15
6.5 窗口大小和搜索范围对计算结果的影响.....	15
七、自适应算法	17
7.1 基于数据搜索的自适应窗口大小选择	17
7.2 基于统计参数的自适应算法	19
7.2.1 基于云块纹理的自适应窗口大小算法.....	19
7.2.2 搜索范围的自适应整定.....	19
八、计算非零风矢所在的等压面.....	20
九、模型的评价与改进.....	21

一、问题重述

云导风，即从云的运动推导风。主要是根据连续三幅云图中同一图像块的移动，估算出某个区域大气的平均运动矢量。再根据给定的灰度值得出用来推算移动距离的云块的环境温度，由此温度推算出风矢量的等压面高度。

由静止气象卫星云图上求得的风称为云迹风或云风矢，云迹风目前已成为一种重要的卫星产品，其资料已经广范应用于台风、暴雨和洪涝灾害、中尺度天气分析等天气学研究。因此，研究更精确的云导风的度量模型和快速和更快速的算法具有重要的实际意义。

本文需要综合分析，重点解决以下四个问题：

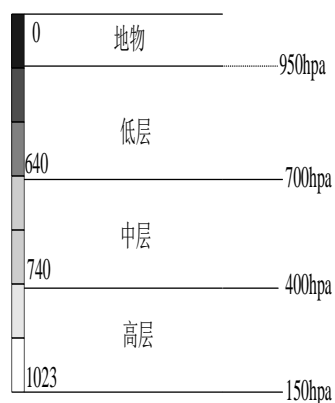
1. 换算视场坐标：要求构造空间立体几何模型，建立维数为 2288×2288 的灰度矩阵行列号向地球经纬度的映射与反映射的关系。
2. 根据 20:30、21:00、21:30 三个相邻时刻的卫星数据，在限定条件为窗口大小 16×16 个像素，搜索范围 64×64 个像素时，用适当的方法建立度量模型，求得 21:00 时刻确定计算范围内的风矢场。并对限定条件对计算量和计算结果的影响做出评价。
3. 根据问题 2 中计算过程的提示，根据实际情况设计自适应的方法确定窗口大小和搜索范围；并设计相应的指标，比较改进的算法与问题 2 中的算法的优劣。
4. 根据 21:00 时刻 36 个离散等压面与该层面温度值的对应关系，计算该时刻指定范围内非零风矢所在等压面的压强值。

二、问题的假设

1. 假设地球为理想的椭球体。
2. 云导风计算中不考虑卫星扫描不到的被高云覆盖的中低云产生的风矢。
3. 计算云层位移时不考虑云到地面的高度造成的结果误差。
4. 假设卫星云图得到的云迹风只含有风在水平面上的移向移速，不含垂直方向的分量。
5. 假设本题所给数据中大气层的气压高度和温度符合标准大气温度垂直廓线（如图一），将气压高度大于 950hpa 的像元认为是地物，将 950hPa~700hpa 之间的云认为是低层，将 700~400hPa 之间的云认为是中层，将 400hpa~150hpa 之间的云认为是高层。

表一 标准大气温度垂直廓线一览表

序号	海拔高度 $H(m)$	气压高度 $P(hpa)$	亮温度 $T(K)$
1	0	1013	288.14
2	100	1001	287.49
3	450	851	278.72
4	1949	800	275.47
5	2449	752	272.22
6	2999	701	268.65
7	4197	601	260.86
8	5595	499	251.77
9	7192	400	241.39
10	9187	299	228.43
11	11778	200	216.64



图一 灰度（黑白）、气压分层标准示意图

三、符号说明

符号	符号说明
φ_1	地面观测点与卫星连线南北方向转过的角度
φ_2	地面观测点与卫星连线东西方向转过的角度
(i, j)	灰度矩阵元素对应的行列号
(x, y, z)	观测点在地球球面的坐标
l	卫星与地心的距离
R_c	地球的赤道半径
R_j	地球的极地半径
ξ	观测点所在的地球球面的纬度
τ	观测点所在地球球面的经度
(x_0, y_0)	示踪云块的中心位置
(x_1, y_1)	匹配模块的中心位置
N	像素块匹配所使用的窗口大小
g'	两个风矢之间的方向差，
v'	两个风矢之间风速相对差
ρ_{im}	i 点处的云迹风矢 \vec{v}_i ，与附近 m 点的风矢量 \vec{v}_m 之间的一致性系数
D_{im}	风向的一致性系数
L_{im}	风速大小的一致性系数
\vec{V}_i	i 点处的云迹风矢

$\overline{V_m}$	i 点附近 m 点的风矢量
ρ_0	一致性系数的阈值
$\overline{\rho_i}$	i 点平均的一致性系数
$E(G)$	像素块方阵元素的灰度均值
$S(G)$	为素块方阵元素灰度的标准差

四、问题分析

4.1 视场坐标的换算

在已知星下点对应的经纬度和红外探测仪扫描的步进角和行扫描角的条件下,把灰度矩阵元素的行列号(i,j)映射成相应地球的经纬度,首先要建立空间坐标系,根据观测点(A)对卫星的俯仰角(ϕ_1, ϕ_2)推导出观测点所在的地球球面的坐标(x,y,z),再由该坐标计算出观测点的经纬度。而A点的坐标可以由两平面和地球球面的交点得到,因此求解的关键之处在于构建空间几何中平面和地球球面的解析表达式。

已知海岸线某点的经纬度,求其对应灰度矩阵的位置为前一个问题的逆运算。特殊之处在于题中给出的海岸线位置在 $x>0$ 的四个卦限中均有分布,因此计算之前必须弄清点所处的卦限。

4.2 21:00 时刻风矢场的计算

云导风问题一直是气象学非常重要的问题,包括数据预处理,示踪云的追踪,云的高度指定和风矢的质量控制四个步骤。由于云的高度指定需要双通道,在本题中数据不足,不能实现。因此在本文计算风矢的过程依照余下的三个步骤进行。

在数据预处理部分,主要作用是去处于干扰信号,找到高度可信的示踪云,可以通过阈值分割,相邻帧差法等来实现。

对于示踪云的跟踪,目前各国的卫星操作者均采用相关系数法。本文的第二问首先采用最为广泛应用的交叉相关系数算法在限定的像素块和搜索范围内实现对示踪云的匹配,找出示踪云在两个相邻时刻的位移。

质量控制有两种方法,在本文中,由于不指定云高,主要是利用 20:30 时刻求出的风矢根据时间连续性的指标来对 21:00 时刻求出的风矢做质量控制,剔除明显不合理的风矢。接着使用同一时刻某一点的风矢和周围风矢的空间连续性指标,对某些风矢做小范围的修订。以得到尽可能精确的风矢的方向和速度。

4.3 自适应算法模型的探索

在进行示踪云的匹配时,问题二采用的像素块大小和搜索区域都是不变的,但实际上,由于不同云系的纹理特征和大小都迥然不同,加之其运动速度也可能差别很大。选择固定的像素块和搜索范围可能导致匹配速度过慢或者匹配不精确。因此研究自适应的匹配方法具有十分重要的意义。

对像素块大小自适应方法的实现应遵循“因地制宜,因材施教”的原则。其根本是提取能反应云系本质特征的特征参数构成像素块大小的函数,求取极值来实现对像素块大小的最优控制。因此解决问题的关键在于找到诸如方差,相关性等能

体现云层纹理特征参数。

而搜索范围的自适应实现则相对比较简单，其大小与云层的移动速度存在直观的线性关系。云层的速度可以用前一个时刻计算出的风矢作参考，当云层的移动速度相对较快时，可以放大搜索范围；反之则应缩小搜索范围。

4.4 计算非零风矢所在的等压面

实际上，由气象学的相关标准知，大部分的云位于几百？到 10000 米的高空。其所在等压面的压强值范围为 150~950 hpa，在此范围内云层的温度与压强呈单调递增的关系。因此可以通过插值来计算所求等压面的压强值。

五、视场坐标的换算

图一所示为卫星观测的空间示意图。以地球球心为原点，建立 $xyzO$ 坐标系，以卫星位置为原点建立 $x'y'z'O'$ 坐标系，其中 Ox 与 $O'x'$ 重合。图中 A 点为当前卫星观测点， $O'C$ 为 $O'A$ 在 zOO' 平面的投影，C 为投影点， $\varphi_1 = \angle OO'C$ 为卫星观测的步进角（南北方向）。 $O'B$ 为 $O'A$ 在 yOO' 平面的投影，B 为投影点， $\varphi_2 = \angle OO'E$ 为卫星观测的行扫描角（东西方向）。做 $OF \perp OC$ 于 F， $OE \perp OB$ 于 E。

5.1 将灰度矩阵的行列号映射为地球的经纬度

在已知星下点对应的经纬度和红外探测仪扫描的步进角和行扫描角的条件下，把灰度矩阵元素的行列号 (i, j) 映射成相应地球的经纬度，首先要根据观测点 (A) 对卫星的俯仰角 (φ_1, φ_2) 推导出观测点所在的地球球面的坐标 (x, y, z) ，再由该坐标计算出观测点的经纬度。

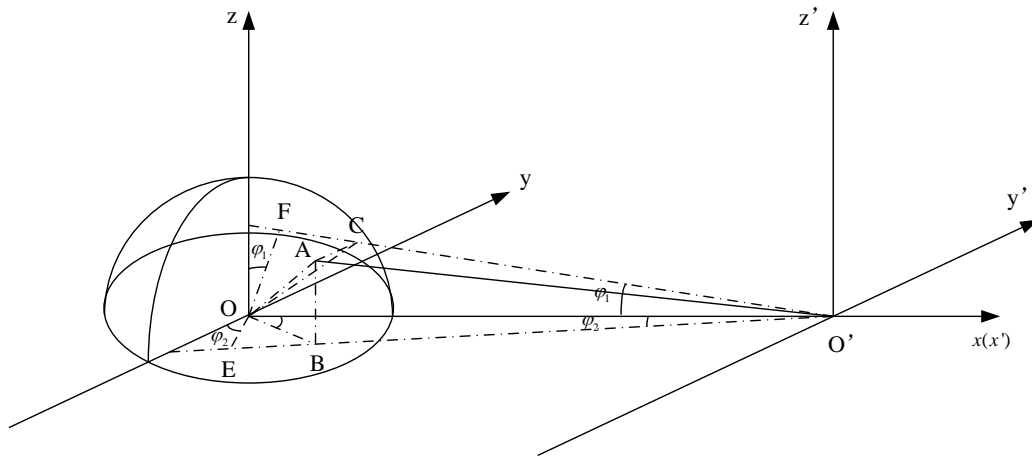


图 2 卫星观测空间示意图

由题意，星下点在灰度矩阵的 1145 行与 1145 列的交汇点，可知俯仰角 $\varphi_{1\max}$ ， $\varphi_{2\max}$ 最大为 $1144 \times 140 \times 10^{-6}$ 弧度。如果把地球视为理想的椭球体，那么题中所求的 451 行至 550 行，451 列至 550 列数据所对应的经纬度均在第四卦限 ($x > 0, y < 0, z > 0$)。因此：

$$\begin{cases} \varphi_1 = (1145 - i) \times 140 \times 10^{-6} \\ \varphi_2 = (1145 - j) \times 140 \times 10^{-6} \end{cases} \quad (1)$$

由图 1，A 点为地球球面， ACO' 平面， ABO' 平面相交得到的点。因此，通

过联立三个面的方程便可解出 A 点坐标 (x, y, z)。

对于 ACO' 平面, 可知 OF 为其法向量, OF 的单位向量坐标为 (sin(φ_1), 0, cos(φ_1)), 可得平面方程:

$$\sin(\varphi_1)(x-l)+\cos(\varphi_1)z=0 \quad (2)$$

其中 l 为 OO' 长度, 即 $l=4216400+6378136.5=10594536.5\text{m}$ 。

同理可知 OE 为平面 ABO' 的法向量, OE 的单位向量坐标为 (sin(φ_2), -cos(φ_2), 0), 可得平面方程:

$$\sin(\varphi_2)(x-l)-\cos(\varphi_2)y=0 \quad (3)$$

地球椭球体表面的曲面方程为:

$$\frac{x^2}{R_c^2}+\frac{y^2}{R_c^2}+\frac{z^2}{R_j^2}=1 \quad (4)$$

(4) 中 R_c 为赤道半径, R_j 为极半径。联立 (2), (3), (4) 三个方程可解出 A 点坐标。(要不要给出解的表达式?) 得到坐标后即可换算出 A 的经纬度。其中由于卫星处于赤道平面, A 点纬度角为 $\xi=\angle AOB$;

$$\sin(\xi)=\frac{z}{OA}=\frac{z}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} \quad (5)$$

又由于 A 点星下点对应经度为东经 86.5°, 所以 A 点经度角为

$$\tau=86.5-\angle O'OB \quad (6)$$

$$\cos(\angle O'OB)=\frac{x}{OB}=\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}} \quad (7)$$

由 (5), (7) 式求反三角函数, 并通过 (6) 即可得到所求点的纬度与经度 (要不要给出解析表达式)。

将以上表达式在 matlab 平台下编程求解, 即可得到灰度矩阵中所求点的行列数对应的经度以及纬度。此处给出 500 行与 500、501、502 列交叉点对应的经纬度, 数据格式为 (东经, 北纬)

表 2 第 500 行和第 500、501、502 列三个交叉点对应的经纬度

行 (北纬)\列 (东经)	500	501	502
500	(46. 4851, 32. 7405)	(46. 5696, 32.7353)	(46. 6538, 32.7302)

需要注意的是, 由于观测卫星所能观测到的曲面所处空间位置为 $x>0$ 的四个卦限 (I, IV, V, VIII), 在 V, VIII 卦限中 $z<0$, $\varphi_1=(i-1145)\times 140\times 10^{-6}$, OF 对应法向量变为 (sin(φ_1), 0, -cos(φ_1)), 因此 (2) 式系数符号需要修改。同时纬度由北纬变成南纬, (5) 式所得为南纬角度的负数。在 IV, VIII 卦限中 $y>0$, $\varphi_2=(j-1145)\times 140\times 10^{-6}$, OE 对应法向量变为 (sin(φ_2), cos(φ_2), 0), 同理 (3) 式系数符号需要修改。同时经度 $\tau=\angle O'OB+85.6$ 。

5.2 将海岸线经纬度转换至灰度矩阵对应位置

已知海岸线某点的经纬度, 求其对应灰度矩阵的位置为问题 5.1.1 的逆运算。特殊之处在于题中给出的海岸线位置在 $x>0$ 的四个卦限中均有分布, 因此计

算之前必须弄清点所处的卦限。

5.2.1 第 I 卦限的计算

在此卦限中 A 点坐标 $x>0, y>0, z>0$, 纬度 $\xi \geq 0$, 经度 $\tau \geq 86.5^\circ$ 。已知经纬度可先求得 $\angle A0z$ 和 $\angle B00'$ ：

$$\begin{cases} \angle A0z = 90^\circ - \xi \\ \angle B00' = \tau - 86.5^\circ \end{cases} \quad (8)$$

进而由椭球体的参数方程，得到海岸线上某点对应地球球面上的坐标 (x, y, z) ：

$$\begin{cases} x = Rc \sin(\angle A0z) \cos(\angle B00') \\ y = Rc \sin(\angle A0z) \sin(\angle B00') \\ z = Rj \cos(\angle A0z) \end{cases} \quad (9)$$

已知 (x, y, z) ，即可由平面 ACO' 和平面 ABO' 的方程解得俯仰角 φ_1 和 φ_2 ：

$$\begin{cases} \sin(\varphi_1)(x-l) + \cos(\varphi_1)z = 0 \\ \sin(\varphi_2)(x-l) + \cos(\varphi_2)y = 0 \end{cases} \quad (10)$$

而俯仰角与灰度矩阵的行列号有如下式的关系：

$$\begin{cases} \varphi_1 = (1145-i) \times 140 \times 10^{-6} \\ \varphi_2 = (j-1145) \times 140 \times 10^{-6} \end{cases} \quad (11)$$

解 (11) 式并对 i, j 取整（怎么取得）可得 I 卦象海岸线在灰度矩阵中的对应位置。

5.2.2 第 IV 卦限的计算

在此卦限中 A 点坐标 $x>0, y<0, z>0$, 纬度 $\xi \geq 0$, 经度 $\tau < 86.5^\circ$ 。已知经纬度可先求得 $\angle A0z$ 和 $\angle B00'$ ：

$$\begin{cases} \angle A0z = 90^\circ - \xi \\ \angle B00' = 86.5^\circ - \tau \end{cases} \quad (12)$$

进而由椭球体的参数方程，得到海岸线上某点对应地球球面上的坐标 (x, y, z) ：

$$\begin{cases} x = Rc \sin(\angle A0z) \cos(\angle B00') \\ y = -Rc \sin(\angle A0z) \sin(\angle B00') \\ z = Rj \cos(\angle A0z) \end{cases} \quad (13)$$

已知 (x, y, z) ，即可由平面 ACO' 和平面 ABO' 的方程解得俯仰角 φ_1 和 φ_2 ：

$$\begin{cases} \sin(\varphi_1)(x-l) + \cos(\varphi_1)z = 0 \\ \sin(\varphi_2)(x-l) - \cos(\varphi_2)y = 0 \end{cases} \quad (14)$$

而俯仰角与灰度矩阵的行列号有如下式的关系：

$$\begin{cases} \varphi_1 = (1145-i) \times 140 \times 10^{-6} \\ \varphi_2 = (1145-j) \times 140 \times 10^{-6} \end{cases} \quad (15)$$

解 (15) 式并对 i, j 取整可得 IV 卦象海岸线在灰度矩阵中的对应位置。

5.2.3 第 V 卦限的计算

在此卦限中 A 点坐标 $x>0, y<0, z>0$, 纬度 $\xi<0$, 经度 $\tau<86.5^\circ$ 。已知经纬度可先求得 $\angle A0z$ 和 $\angle B00'$ ：

$$\begin{cases} \angle A0z = 90^\circ + \xi \\ \angle B00' = 86.5^\circ - \tau \end{cases} \quad (16)$$

进而由椭球体的参数方程，得到海岸线上某点对应地球球面上的坐标 (x, y, z) ：

$$\begin{cases} x = Rc \sin(\angle A0z) \cos(\angle B00') \\ y = -Rc \sin(\angle A0z) \sin(\angle B00') \\ z = -Rj \cos(\angle A0z) \end{cases} \quad (17)$$

已知 (x, y, z) ，即可由平面 ACO' 和平面 ABO' 的方程解得俯仰角 φ_1 和 φ_2 ：

$$\begin{cases} \sin(\varphi_1)(x-l) - \cos(\varphi_1)z = 0 \\ \sin(\varphi_2)(x-l) - \cos(\varphi_2)y = 0 \end{cases} \quad (18)$$

而俯仰角与灰度矩阵的行列号有如下式的关系：

$$\begin{cases} \varphi_1 = (i-1145) \times 140 \times 10^{-6} \\ \varphi_2 = (1145-j) \times 140 \times 10^{-6} \end{cases} \quad (19)$$

解 (19) 式并对 i, j 取整可得 V 卦象海岸线在灰度矩阵中的对应位置。

5.2.4 第 VIII 卦限的计算

在此卦限中 A 点坐标 $x>0, y<0, z>0$, 纬度 $\xi<0$, 经度 $\tau \geq 86.5^\circ$ 。已知经纬度可先求得 $\angle A0z$ 和 $\angle B00'$ ：

$$\begin{cases} \angle A0z = 90^\circ + \xi \\ \angle B00' = \tau - 86.5^\circ \end{cases} \quad (20)$$

进而由椭球体的参数方程，得到海岸线上某点对应地球球面上的坐标 (x, y, z) ：

$$\begin{cases} x = Rc \sin(\angle A0z) \cos(\angle B00') \\ y = Rc \sin(\angle A0z) \sin(\angle B00') \\ z = -Rj \cos(\angle A0z) \end{cases} \quad (21)$$

已知 (x, y, z) ，即可由平面 ACO' 和平面 ABO' 的方程解得俯仰角 φ_1 和 φ_2 ：

$$\begin{cases} \sin(\varphi_1)(x-l) + \cos(\varphi_1)z = 0 \\ \sin(\varphi_2)(x-l) - \cos(\varphi_2)y = 0 \end{cases} \quad (22)$$

而俯仰角与灰度矩阵的行列号有如下式的关系：

$$\begin{cases} \varphi_1 = (i-1145) \times 140 \times 10^{-6} \\ \varphi_2 = (j-1145) \times 140 \times 10^{-6} \end{cases} \quad (23)$$

解 (23) 式并对 i, j 取整可得 VIII 卦象海岸线在灰度矩阵中的对应位置。

逐步计算出所有海岸线上的点对应卫星云图上元素的行列号后，画出添加海岸线后的卫星云图见附录 1-splic.pdf。

六、21:00 时刻风矢场的计算

6.1 数据预处理—示踪云的提取

在静止卫星云图上，并非所有的云都能作为示踪云。有些云的移动与风之间有良好的关系，而有些云的移动与风并无很好的相关关系，一般来说，贴近地面的云对于风的指示作用小。为了提高匹配的精度，需要进行数据预处理，对用于计算云导风的示踪云进行提取，减小计算量，同时减少无效风矢的产生。

根据示踪云的要求，我们设计提取步骤主要为灰度阈值截断、动态检测、均匀云块保留。

6.1.1 灰度阈值截断

根据气象学原理，如果天空无云，卫星探测到的温度可以看成是地球表面的温度，在有云层的地方探测到的温度相对较低，而且云层越高越厚温度就越低。对应于灰度值即是，云层越高越厚，灰度值越高。特殊的是，对于南极和北极的冰盖，即使无云，由于其地表温度低，灰度值也相对比较高。

我们分别绘制了不同灰度截断阈值下的云图。可见灰度阈值为 500 的云图对陆地的分离度不佳，阈值为 700 以上的图对云块的丢弃过于严重，权衡后我们选择了阈值为 600 的云图

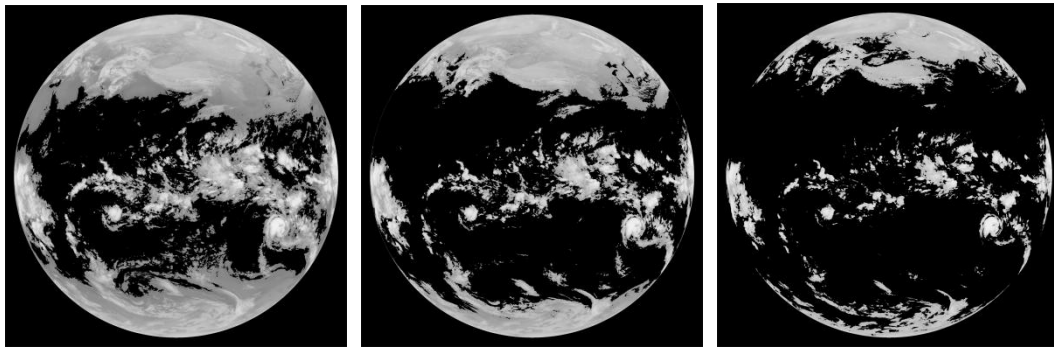


图 3 不同灰度截断阈值下的云图（从左到右阈值依次为 500、600、700）

所以初步选择阈值为 600，灰度值高于 600 的像素认为是云，灰度值低于 600 的像素认为是地面。

6.1.2 动态检测

6.1.2.1 相邻帧差法

运动的云才能产生风矢。为了剔除位移变化不大的云和极地的冰盖，在 6.1.1 的基础上，采用相邻帧差法，将相邻两个时刻的灰度矩阵相减，保留变化较大的像素点，得到可信度更高的示踪云。

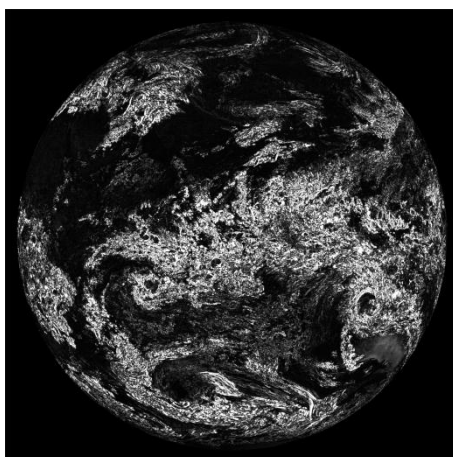


图 4 用相邻帧差法处理后的云图

6.1.2.2 平滑滤波

为了使同一云系的特征表现更明显, 选择一个像素点和其周围八个像素点的灰度值进行中值滤波计算。使同一云絮的灰度值变化更加平滑。

滤波后经过二值处理与 6.1.1 灰度阈值截断得到的结果进行逻辑与处理, 可以保留云块的细节, 同时剔除靠近南北极大块的低温陆地。

最后得到的云块分布如图 5 所示。

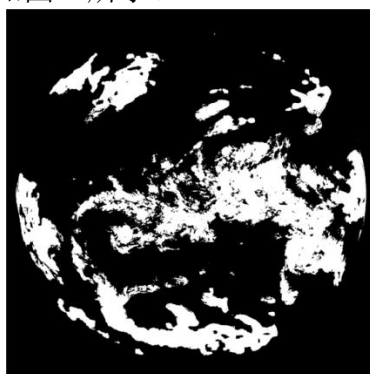


图 5 经过数据预处理后的云图

6.2 示踪云的追踪

目前各个卫星数据处理中心卫星风的算法大体一致和稳定。对风矢量的追踪采用基于灰度匹配的方法, 也称作相关匹配法, 包括 MAD 算法, SSAD 算法, NIC 算法等, 基本思想是用空间二维滑动模板进行图像匹配, 不同算法的区别主要体现在模板及相关准则的选择方面。

本文采用目前使用最广泛的 最大交叉相关系数 (maximum cross-correlation coefficient, MCC) 法。即使追踪模块 (16×16 像素) 在搜索区域 (64×64 像素) 内连续滑动, 选择与示踪云块 (16×16 像素) 交叉相关系数最大的区域为最终的目标区域。

具体匹配步骤如下:

(1) 如下图所示, A 为前一时刻示踪云模块, B 为追踪模块, C 为搜索范围。设 A 的中心坐标为 (x_0, y_0) , 则在 C 中的初始搜索模块的参考位置也为 (x_0, y_0) , 接着由 (x_0, y_0) 慢慢扩散到周围搜索。计算每一个追踪模块与示踪云模块的交叉相关系数 $R(m, n)$ 。

$$R = \frac{\sum_i \sum_j [f(i, j) - \bar{f}][g(i, j) - \bar{g}]}{[\sum_i \sum_j [f(i, j) - \bar{f}]^2 \sum_i \sum_j [g(i, j) - \bar{g}]^2]^{1/2}} \quad (24)$$

其中 $i, j \in [1, 16]$ ，分别为示踪云模块和追踪模块中的行与列号， $f(i, j)$ 与 $g(i, j)$ 分别为示踪云与追踪模块在 (i, j) 像素点的灰度值。 $\bar{f} = \frac{1}{N^2} \sum_i \sum_j f(i, j)$ 为示踪云的平均灰度， $\bar{g} = \frac{1}{N^2} \sum_i \sum_j g(i, j)$ 为追踪模块的平均灰度， $N = 16$ 。

设最终搜索到与 A 具有最大交叉相关系数的追踪模块为 B，则 B 为最终的匹配模块，其中心位于 (x_1, y_1) 。

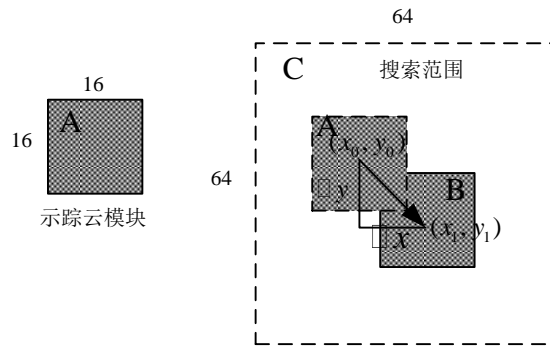


图 6 最大交叉相关系数法示意图

(2) 如果最终在 C 中搜到的匹配块 B 的中心位于 C 的边界附近，则代表精确的匹配块可能落在 C 外，这时需要根据向量 $(x_1 - x_0, y_1 - y_0)$ 确定 C 移动的方向，重新进行搜索。

6.3 风矢的计算

如图 (6)， Δx 和 Δy 分别为相邻两个时刻示踪云模块在 x 方向和 y 方向的位移。得到非零有效风矢起始点与终点的行列标号之后，利用问题一中矩阵行列号与经纬度的关系，可算出每一风矢的起始点经纬度，终点经纬度。忽略云的高度这一不确定因素，风矢的速度可利用云块在半小时内所经过的球面距离除以时间得到（如图 4 所示）。设 A 点为云块起点，B 点为云块终点。

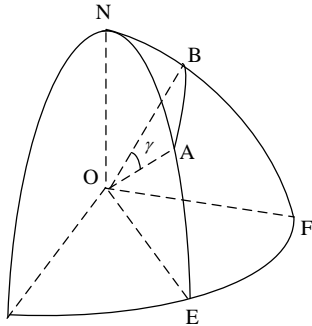


图 7a 球面三角形的余弦定理推导示意图

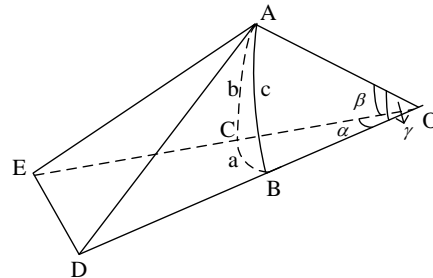


图 7b 地球球面上 A、B 两点之间的位移示意图

有：

$$v = \frac{AB}{t} \quad (25)$$

$$\vec{AB} = \vec{R} \times \gamma \quad (26)$$

$$\vec{R} = (R_A + R_B) / 2 \quad (27)$$

(26) 式中的 γ 可利用空间向量数量积计算:

$$\cos(\gamma) = \frac{\vec{OA} \cdot \vec{OB}}{|\vec{OA}| |\vec{OB}|} \quad (28)$$

空间点 A, B 坐标可由风矢行列标号换算得到。

计算风矢的方向需要利用球面三角形余弦定理。在图 4a 中 AE, AD 与弧 \vec{AB} 均切于 A 点, 对于三角形 ODE 有余弦定理:

$$\cos(\alpha) = \frac{OE^2 + OD^2 - DE^2}{2OE \cdot OD} \quad (29)$$

其中 $OE^2 = AE^2 + AO^2$, $OD^2 = AD^2 + AO^2$, 代入 (29) 得:

$$\cos(\alpha) = \frac{2AO^2 + 2AD \cdot AE \cos(\angle DAE)}{2OE \cdot OD} = \cos(\beta) \cos(\gamma) + \sin(\beta) \sin(\gamma) \cos(\angle DAE) \quad (30)$$

利用 (30) 式即可在知道 A, B 点纬度的情况下, 求出 $\angle BAN$ 的余弦值, 由反余弦函数可得风矢的角度, 若 B 点经度小于 A 点, 那么风矢角度为 $360 - \angle BAN$ 。需要注意的是, A 点若在南半球, 则风矢角度为 $180 - \angle BAN$ 。若 B 点经度小于 A 点, 风矢角度为 $360 - (180 - \angle BAN) = 180 + \angle BAN$ 。

题中所求在纬度 26 度, 经度分别是 52, 53, 54, 57, 58 (度) 处的风矢。换算到灰度矩阵坐标取整后为:

表三 给定经纬度对应的灰度矩阵的行列号

i	614	613	612	610	609
j	527	541	556	603	619

表四 所求给定经纬度处的风矢

纬度	经度	角度 (北顺)	速度 (米/秒)	压强 (毫巴)
25.943	51.987	340.01	14.59	950.26
25.957	52.928	74.061	21.083	804.98
25.97	53.92	322.82	21.891	798.1
25.957	56.949	92.357	17.664	688.87
25.974	57.942	108.45	12.012	761.95

6.4 质量控制

6.4.1 时间连续性控制

云迹风是一种决定于云在一定时间间隔内平均移动的平均风, 应具有良好的风场一致性。但是计算的风场中通常会出现一些凌乱风矢, 破坏了风场的整体连续性, 其产生的原因可能是: 在风速较大的区域, 计算水平速度或垂直速度分量时产生的误差相对较大。

因此在本题中, 20:30 时的风矢场可以作为待求 21:00 时刻风矢场的参考。对两幅风场图上相同点的风矢进行逐点的比较, 剔除第二幅图中相对第一幅图风向或风速偏差较大的风矢。

定义 θ' 为两个风矢之间的方向差, 风速相对差 $v' = \left| \frac{2(v_1 - v_2)}{v_1 + v_2} \right|$ 。当风向差或风

速相对差大于阈值时，就认为该风矢是错误风矢。相关文献表明当风矢密度为 16 像素时， θ' 的阈值为 40 度，风速相对差 v' 的阈值为 1 效果较好。

6.4.2 空间连续性质量控制

在气象学的应用上，空间连续性主要用来解决云层的高度调整问题。但是由于本题提供的灰度单通道数据不足以进行云层的定高计算。因此在本文将空间连续性控制作为时间连续性的辅助手段用来剔除错误风矢。

i 点处的云迹风矢 \bar{V}_i ，与附近 m 点的风矢量 \bar{V}_m 之间的一致性系数可写成

$$\rho_{im} = D_{im} \times L_{im} \quad (31)$$

其中 D_{im} 是风向的一致性系数， L_{im} 是风速大小的一致性系数，它们可分别写为

$$D_{im} = \cos \theta_{im} \quad (32)$$

$$L_{im} = 1 - \frac{\left| |\bar{V}_i| - |\bar{V}_m| \right|}{\max(|\bar{V}_i|, |\bar{V}_m|)} \quad (33)$$

为了使计算的云迹风与周围风场向量一致，应以点 i 为中心，以 R 为影响半径，将此范围内的同一高度层次上的所有风矢量选进来，分别计算点 i 处的风矢与周围各个风矢的一致性系数，然后进行加权平均，以得到总的平均的一致性系数。因为两点越近，风矢的相关性越好，故权重函数设为距离的函数，权重函数为：

$$\begin{cases} G_{im} = e^{1-2r_{im}/R} & r_{im} < R \\ G_{im} = 0 & r_{im} > R \end{cases} \quad (34)$$

其中 r_{im} 是点 i 与点 m 间的距离，因而平均的一致性系数为：

$$\bar{\rho}_i = \frac{\sum_m \rho_m \times G_{im}}{G_{im}} \quad (35)$$

设一临界值 ρ_0 (本文取 0.6)，将计算所得的平均一致性系数 $\bar{\rho}_i$ 与 ρ_0 相比较，如果 $\bar{\rho}_i \geq \rho_0$ 认为这个风矢是合理的。反之，如果 $\bar{\rho}_i < \rho_0$ ，则认为不合理，需要调整。

6.4.3 云地分离

根据国家卫星中心的标准，将气压高度大于 950hpa 的物象 (根据假设 5，也即温度高于 287.4K) 以及风速小于 4 米/秒的像元认为是地物，具有类似特征的风矢将被剔除。

6.5 窗口大小和搜索范围对计算结果的影响

由于气象学知识的不足，研究风矢必须先指定像素块的大小，题目将像素块匹配的窗口大小以及搜索范围限定，有利于简化问题的。但将在题中限定条件下，搜索得到的风矢数量对比经过校验后留下的有效风矢数量可知，有近一半风矢被剔除。此外，从图 5a 中可以看出，两个时段的风矢并不具有连贯性。因此我们

有理由相信在像素块匹配选择 16×16 个像素，搜索范围限定为 64×64 个像素对风矢的计算并不精确，不能满足气象预测的要求。我们认为造成风矢计算不准确的一个原因是因为 16×16 的像素块过小，无法完全包裹一个云块的表面特征，因此造成了对同一云块不能准确识别，导致风矢计算误差增大。为验证我们的猜想，我们在保持搜索范围不变的情况下，将匹配像素块边长以 4 个像素递增的速度，以 20×20 ， 24×24 ， 28×28 ， 32×32 ， 34×34 为匹配像素块，分别绘制纬度 26 度，经度分别是 52，53，54，57，58（度）处的风矢图。

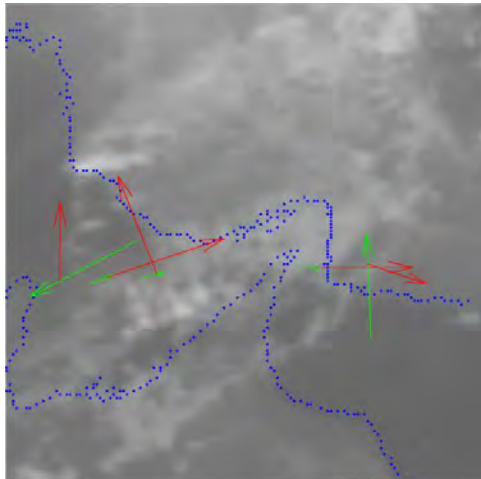


图 8a 追踪模块的像素大小为 16×16

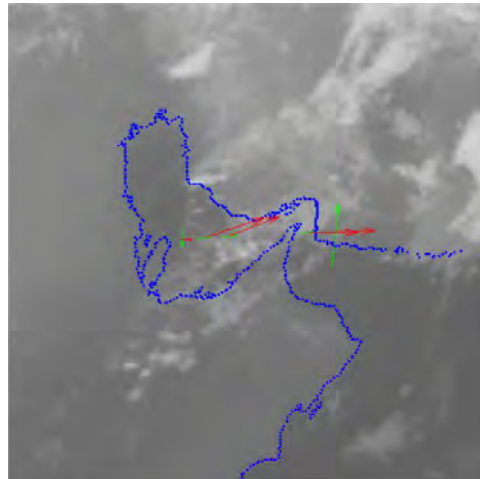


图 8b 追踪模块的像素大小为 20×20

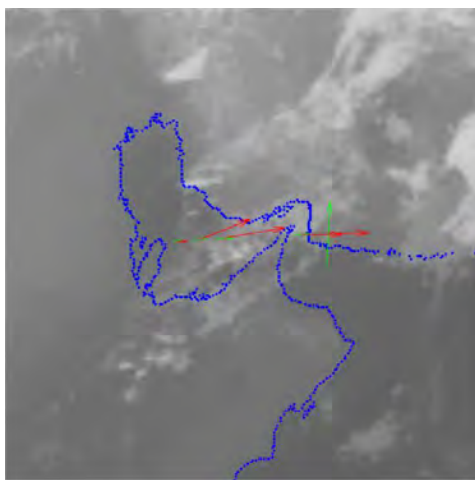


图 8c 追踪模块的像素大小为 24×24

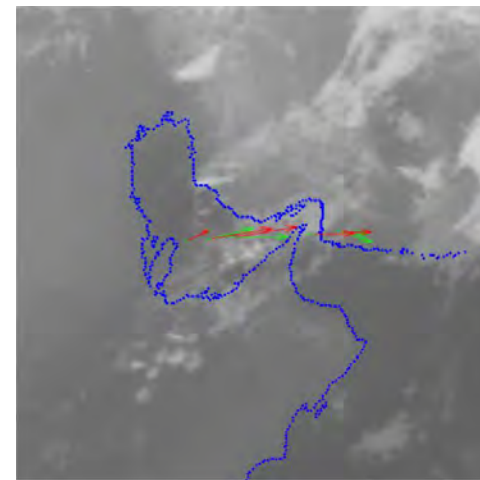


图 8d 追踪模块的像素大小为 28×28

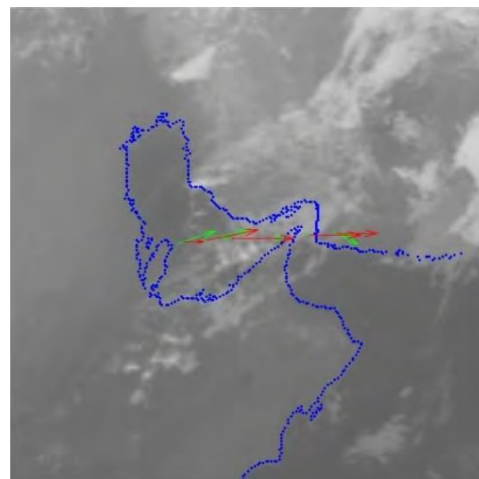
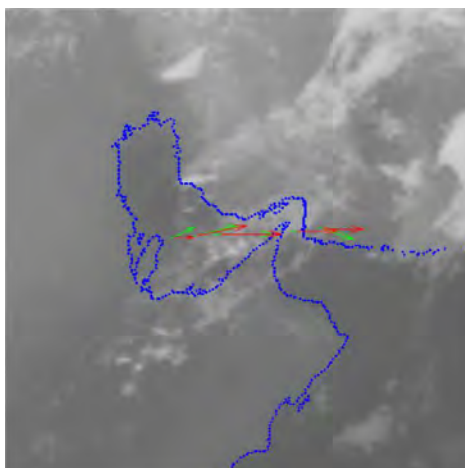


图 8e 追踪模块的像素大小为 32*32 图 8f 追踪模块的像素大小为 36*36
 图 8 追踪模块不同像素大小下，20:30 和 21:00 两个时刻的风矢对比图（红色为 21:00 的风矢，绿色为 20:30 的风矢）

从图 5 可以明显看到随着搜索窗口的增大，20:30 与 21:00 点风矢的相关性明显增加。且同一纬度各个点风矢的连贯性也明显增加，证实了我们的猜想。

七、自适应算法

由 6.5 知，第二问题中限定的匹配窗口以及搜索窗口均不是最佳的，因此如何根据云图情况自适应的确定窗口大小以及搜索范围，在很大程度上将会影响风矢计算的精度。

7.1 基于数据搜索的自适应窗口大小选择

对于上一问中限定的匹配窗口大小和搜索范围，只有效果不好的感性认识，但是对于选择合适的匹配窗口大小和搜索范围却没有依据，需要对匹配窗口大小和搜索范围的选择趋势有所了解。考虑到在指定经纬度内云块所在位置整数经纬点数量巨大，我们从三个典型区域选取了 34 个样本点，对其采用不同匹配窗口大小和搜索范围，统计所用时间以及通过质量控制后保留的风矢数量。

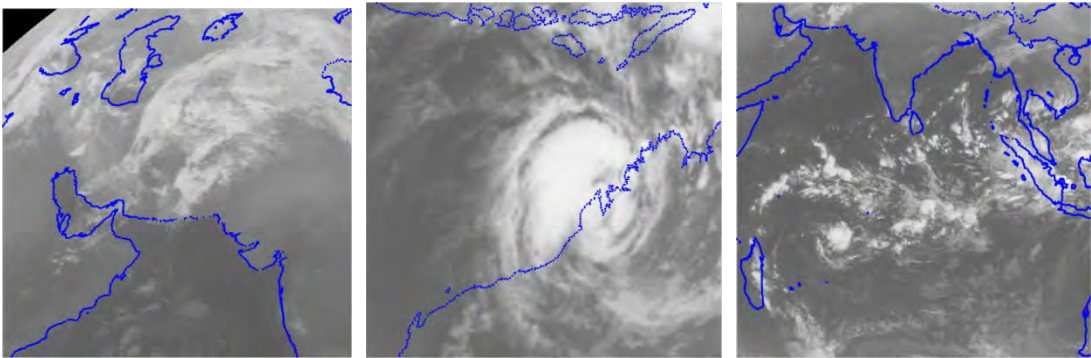


图 9a 云块移动速度方向稳定 图 9b 云块呈旋涡状分布变化 图 9c 云块散乱形变大
 图 9 三个典型的云系示意图

匹配窗口大小从 10 以 2 为间隔递增到 40，搜索范围由 20 以 8 为间隔递增到 92，得到通过质量控制后风矢的保留率为

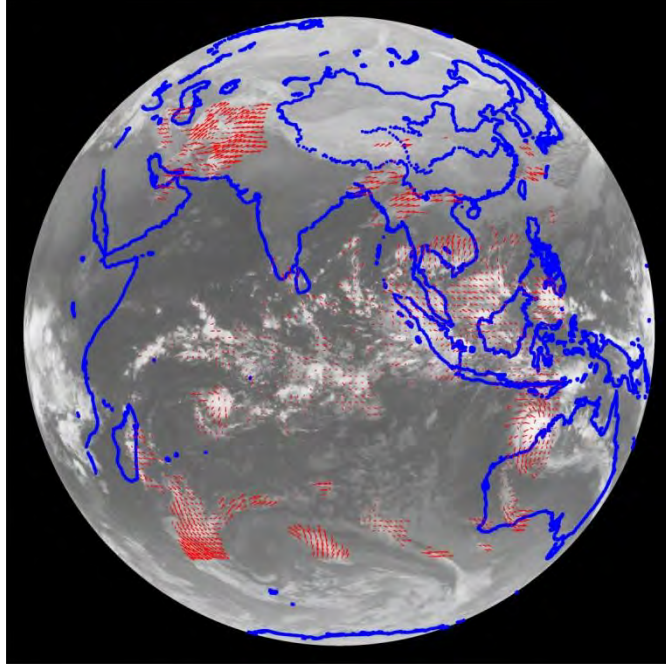
表五 匹配窗口和搜索范围大小不同时，计算的风矢保留率

匹配窗口 搜索范围	10	12	14	16	18	20	22	24
20	0.323529	0.382353	0.411765	0.470588	—	—	—	—
28	0.352941	0.411765	0.5	0.441176	0.5	0.5	0.617647	0.676471
36	0.382353	0.382353	0.470588	0.5	0.5	0.5	0.529412	0.558824
44	0.352941	0.382353	0.441176	0.470588	0.5	0.529412	0.558824	0.558824
52	0.264706	0.352941	0.411765	0.411765	0.470588	0.5	0.558824	0.558824
60	0.205882	0.352941	0.411765	0.411765	0.411765	0.470588	0.558824	0.558824
68	0.176471	0.323529	0.411765	0.382353	0.411765	0.470588	0.558824	0.558824
76	0.176471	0.382353	0.411765	0.382353	0.411765	0.470588	0.558824	0.558824
84	0.205882	0.382353	0.411765	0.382353	0.411765	0.470588	0.558824	0.558824

92	0.205882	0.352941	0.382353	0.382353	0.411765	0.470588	0.558824	0.558824
匹配窗口 搜索范围	26	28	30	32	34	36	38	40
20	-	-	-	-	-	-	-	-
28	-	-	-	-	-	-	-	-
36	0.558824	0.558824	0.617647	0.705882	-	-	-	-
44	0.617647	0.617647	0.558824	0.647059	0.705882	0.705882	0.676471	0.735294
52	0.588235	0.588235	0.558824	0.647059	0.705882	0.764706	0.735294	0.735294
60	0.588235	0.588235	0.558824	0.647059	0.705882	0.764706	0.735294	0.735294
68	0.588235	0.588235	0.558824	0.647059	0.705882	0.764706	0.735294	0.735294
76	0.588235	0.588235	0.558824	0.647059	0.705882	0.764706	0.735294	0.735294
84	0.588235	0.588235	0.558824	0.647059	0.705882	0.764706	0.735294	0.735294
92	0.588235	0.588235	0.558824	0.647059	0.705882	0.764706	0.735294	0.735294
94	-	-	0.588235	0.588235	0.558824	0.647059	0.705882	-

通过读表，可以看出随着匹配窗口的增大，云块匹配越有效，同时随着搜索范围的扩大，风矢通过质量控制的几率下降。结合对云块图像匹配过程的分析，我们对此的解释是，当匹配窗口增大，窗口所在云块内包含的特征量也变多，和刚性变化的云块之间的交叉相关系数能保持在较大数值水平；另外，依据文献（综述）可知，追踪图像块大，误追踪的概率小，但是求出的风速偏小，匹配窗口不能一味增大；当搜索范围超过云块实际移动的范围，其继续增大只会加重搜索负担，同时增大出错的几率。所以，选择较大的匹配窗口与满足云块移动极值的搜索范围是取得良好效果和运行速度的前提，同时需要保守得往大方向估计移动极值。

为此定义了综合评价指标 $R = \text{通过质量控制后风矢数} / \text{匹配后总的风矢数} + k \cdot 1 / \text{运行时间}$ 。图像间隔为半个小时，留给计算的时间相对充裕，因此决定时间重要性的权重 k 定为 0.05。选取采样点，由程序选择的结果为匹配大小为 32，搜索范围为 40，同时在程序中设定规则，搜索范围至少为匹配窗口的两倍，即 64。按照这对参数对所有要求范围内的云块点进行匹配，质量控制，剔除零矢量，得到风矢图如下。



以上自适应算法的思想是基于数据匹配，虽然有较好的效果，但是计算量巨大。并且由于评价像素选择窗口的数据点是随机选取的，且取的是平均值，因此可能造成无法针对不同的云块选择不同的搜索窗口的缺点，并且以此方法找到的窗口也不一定为全局最优。同时该算法在计算风矢前用于选取搜索窗口的计算开销较大。因此我们又提出了基于统计参数的自适应算法。

7.2 基于统计参数的自适应算法

7.2.1 基于云块纹理的自适应窗口大小算法

针对以上缺陷，又提出一种根据当前云块自适应选择窗口大小的算法。由直观印象可知，在灰度矩阵中有云处灰度值较大，从图像上看即有云处较陆地，海洋处更白，从而其灰度均值较大。此外，纹理明显的云较纹理均匀的云更易精确测定。因此，在选择窗口的时候应以尽量大的框，框住能够识别云块的纹理部分，增大成功识别的几率。而云块的纹理明显与否即云块信息量的多寡，可使用灰度矩阵的熵值来评价，信息量越大，熵值越大。又因为熵与方差呈正相关关系，且标准差与均值有相同的量纲，因此我们选择利用像素窗口的方差与均值构造评价函数，以此来选出窗口大小 l 的最优值。

令 G 代表当前云块的匹配窗口的像素块。 $E(G)$ 为像素块方阵元素的灰度均值， $S(G)$ 为像素块方阵元素灰度的标准差。自适应搜索窗口大小即使：

$$\max f(l) = aE(G) + bS(G) \quad (36)$$

a, b 为参数系数。根据第二问可知， 16×16 像素的窗口对风矢计算结果并不理想，因此 l 选取 16 以下的值无意义，即取 $16 \leq l \leq 48$ 为 l 的约束。

根据(36)式选择问题二中所求的点进行迭代求解，令 $a=b=1$ ，计算得到 $l=28$ 。对比 7.1 中所用基于数据的算法，利用 (30) 式在不同点可以搜索到不同的 l ，具有更好的适应性。

7.2.2 搜索范围的自适应整定

利用 (36) 式可以得到匹配像素块的大小，搜索像素块的大小需要另行确定。若要能准确计算风矢，那么搜索区域内必须能够包含相对于上一时刻已经移动的

云块。因此，搜索范围选取不能太小，否则无法完整框住已经移动的云块。而过大的搜索范围会使得计算量程指数级数增加。因此合理的确定搜索范围也是准确计算风矢的关键。由于只要搜索范围内包含已移动的云块，就存在识别出该云块的可能。而云块移动的像素与其速度密切相关，并且对于大多数云块，其速度具有连贯性，认为不存在速度大小以及方向的突变。因此，可以根据上一时刻云块移动的速度大小（即风矢大小）估计当前搜索范围的像素大小。

$$d=\frac{2\times3.6v}{5}+l\tag{37}$$

分母中的 5km 为星下点分辨率，该处灰度矩阵对应地球球面距离为最小值，保证其余各处按照（37）式计算搜索范围能够框住运动云块。由（37）式参考问题二中在 28×28 搜索块下 20:30 的速度，计算 21:00 时刻的搜索范围。

表六 搜索范围的自适应整定结果

速度（米/秒）	7.1457	14.188	18.57	17.664	12.012
搜索范围	39	49	55	54	46

表七 基于统计参数的自适应算法的计算结果

纬度	经度	角度（北顺）	速度（米/秒）	压强（毫巴）
25.943	51.987	64.713	7.1457	950.26
25.957	52.928	83.678	21.591	804.98
25.97	53.92	83.478	21.251	798.1
25.957	56.949	92.373	14.138	688.87
25.974	57.942	92.321	10.449	761.95

对比表七与表四可以看出，使用自适应算法得到风矢角度明显好于 16×16 的固定匹配像素。

八、计算非零风矢所在的等压面

temp3.mat 为一个三维向量，在取定行坐标与列坐标后，以 36 个离散的等压面与温度值关对应系作图如图 7。

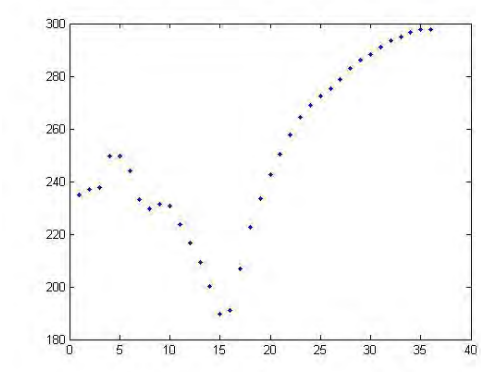


图 10a 北纬 88.314 东经 45

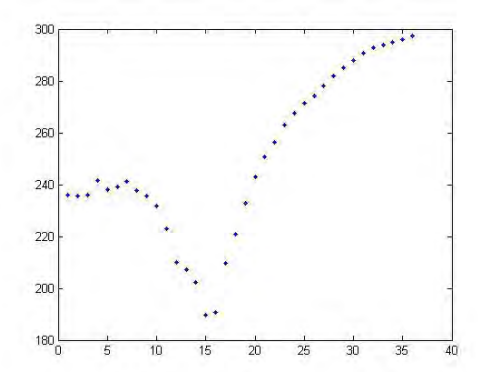


图 10b 北纬 88.314 东经 104

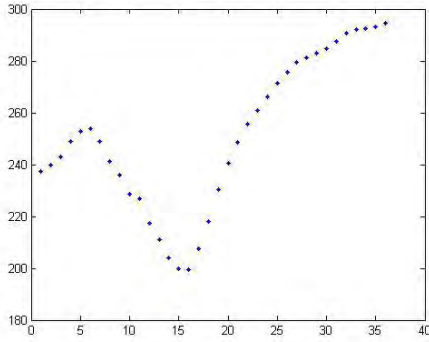


图 10c 南纬 30.375 东经 45

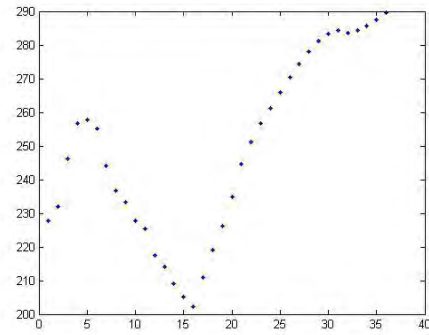


图 10d 南纬 30.375 东经 104.063

可见，虽然几幅图取点的位置相距较远，但温度值对气压的变化呈现相同的趋势。同时由假设 5 可知，云层主要位于 100hpa~950Pha 的气压范围内。在此区间内，温度对压强表现为单调递增的关系。因此非零风矢所在等压面的高度值可通过两点的插值来确定。由直线的点斜式可知：

$$\frac{temp_2 - temp_1}{press_2 - press_1} = \frac{temp - temp_1}{press - press_1} \quad (38)$$

其中 press 是待求云块出等压面压强，temp_2, temp_1, press_2, press_1 分别为差值点相邻的温度与压强。式中 temp 可以由云块风矢所在灰度矩阵点灰度查表直接得到。因此，通过 (38) 即可直接算出云块对应的等压面。具体的计算结果见表 4。

九、模型的评价与改进

本文在视场坐标变换处理上使用空间曲面方程组，避免求解复杂的三角方程，在保证精度的条件下，大大减少了运算量。在问题二中风矢计算上采用的模型能够快速准确的计算出风矢的大小以及方向，完成题中对于指定点参数的计算。在问题三种，本文提出两张自适应算法，分别从数据挖掘以及图像特征的角度对云块计算参数——搜索块以及搜索区域边长进行了计算，结果表明参数计算效果良好。

但限于时间关系，以上模型均在涉及像素计算的过程均以方阵计算，由此可能无法求的最优的像素匹配矩形块以及搜索范围矩形块。其次，自适应的第二个算法中仅仅选择统计参数构造评价函数，未充挖掘云块的图像特征。

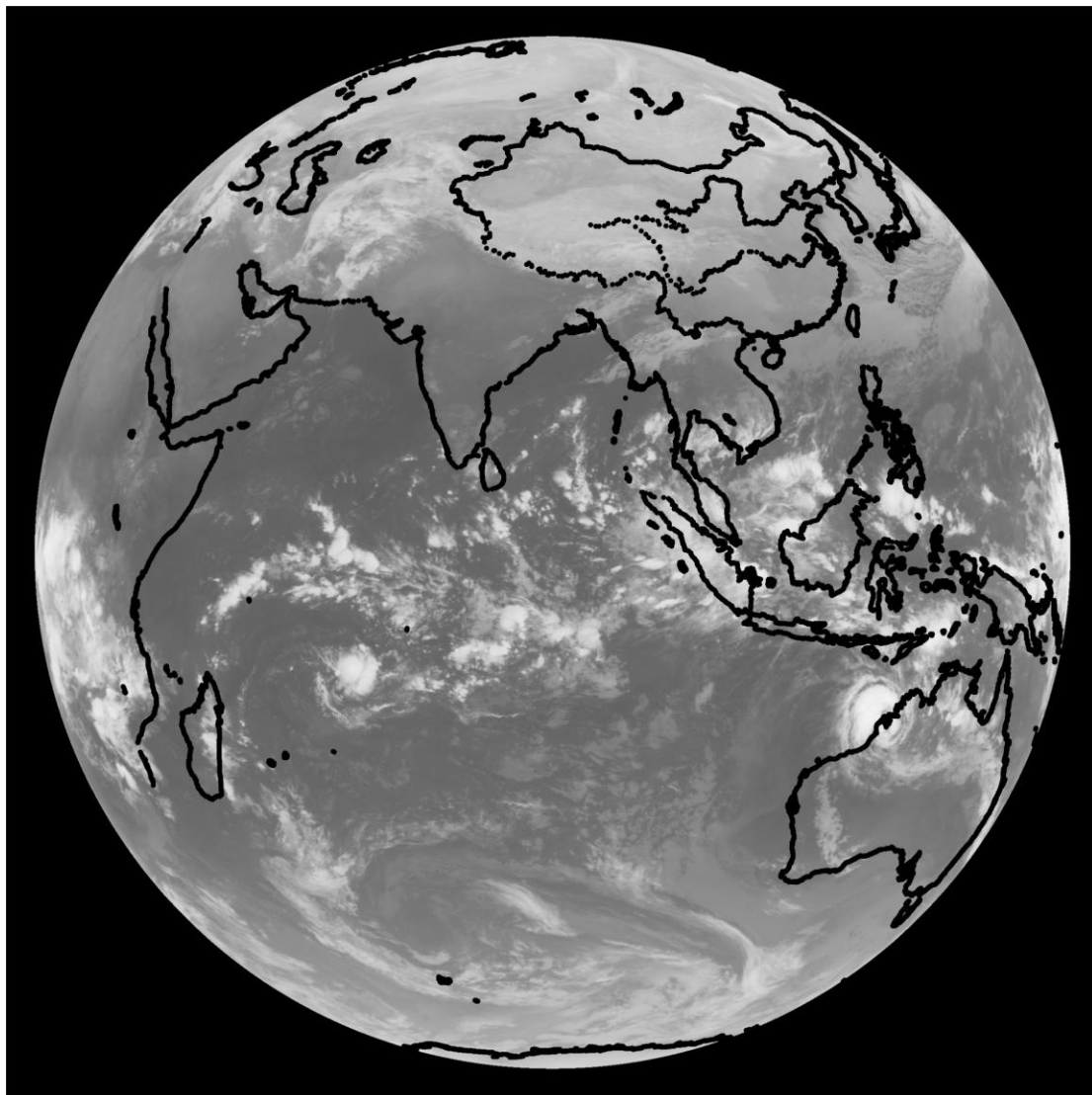
参考文献

- [1]. 龙智勇，石汉青，黄思训，利用卫星云图反演云导风的新思路，物理学报，第 60 卷第五期：1-6，2011。
- [2]. 朱平，TCFM 技术及其在云导风中的应用研究，南京信息工程大学，2007。
- [3]. 白洁，王洪庆，陶祖钰，GMS 卫星红外云图云迹风的反演，北京大学学报（自然科学版），第 33 卷第 1 期：85-92，1997。
- [4]. 王晓蕾，杜智涛，云图纹理特征参数提取方法和分析，气象水文海洋仪器，第三期：39-42，2006。
- [5]. 刘峰，刘娟，李萍，林智基，于 MATLAB 实现 3 种气象数据的读取和绘图，

- 广东气象, 第 29 卷第 4 期: 22-26, 2007。
- [6]. 许健民, 张其松, 王大昌, 樊昌尧, 云迹风计算中的两个几何问题, 应用气象学报, 第 8 卷第 1 期: 11-18, 1997。
- [7]. 许健民, 张其松, 卫星风推导和应用综述, 应用气象学报, 第 17 卷 5 期: 574-580, 2006。
- [8]. 陈金辉, MATLAB 在绘制气象图上的应用, 中国科技信息, 第 24 期: 27, 2005。
- [9]. TOmassini M, KellyGand Saunders R., Use and impact of satellite atmospheric motion winds on ECMWF analyses and forecasts. EUMETSAtf/ECMWF Research RePort No.6, 1997.

附录一

问题一



附录 2

问题二

