

## 对流层大气运动的 Lagrange 方法及应用\*

成新喜 陆汉城 周祖刚 范红军

(空军气象学院, 南京 211101)

### 提 要

该文对对流层中轨迹法的应用进行了试验研究. 结果表明, 对流层中等熵面上轨迹法应用效果最好, 同时通过对物质线轨迹积分的改进, 即在积分过程中不断加入新的点以保持物质线上点的密度, 使轨迹法能够利用现有的资料分辨率, 更细致的描述大气环流的演变. 利用轨迹法分析了 1991 年江淮梅雨期 7 月 1~7 日过程的水汽输送, 表明此次过程江淮地区的水汽输送主要来源于孟加拉湾及南海, 且强度以前者较大.

关键词: 轨迹法 等熵面 水汽输送

### 引 言

Lagrange 轨迹计算作为一种传统的物理和化学分析方法, 一直为人们所利用. 近年来利用轨迹法研究大气环流的演变以其独特的优越性愈来愈受到人们的重视. 与 Euler 法相比, Lagrange 法不仅可以追踪空气质点从而研究物质的输送, 而且可以通过物质线的积分演变来研究系统的非线性变化规律, 即它能更精确的确定物质扩散的源汇及输送过程.

Danielsin<sup>[1]</sup>1974 年曾指出, 由于大气熵近似守恒, 等熵面轨迹的计算与实际大气比较接近, 尤其在平流层. 其他有关轨迹法的应用也作了不少工作, 但基本上都是在平流层进行计算的. 等压面轨迹法的应用如 Palm e<sup>[2]</sup>以及黄伟等<sup>[3]</sup>用等压面轨迹积分研究了冷空气的活动; 朱艳秋等<sup>[4]</sup>对等压面轨迹的精度进行了分析, 指出只有当时间采样为 3h 时, 才可以较好的描述质点轨迹. 由以上讨论及回顾可见, 轨迹法的应用主要集中在平流层, 而对流层中轨迹法的应用, 尤其是在有降水发生时, 即非保守大气中的应用, 以及对流层中轨迹法在各种坐标系中的应用效果的比较等一系列问题还有待进一步研究. 另外, 目前只能用时空离散资料来求得轨迹, 这样的轨迹在用到物质线的演变分析时, 对系统的一些细微结构的变化不能很好地描述. 为了解决这个问题, 本文将采用 Norton<sup>[5]</sup>及 Waugh<sup>[6]</sup>的方案对物质线积分法进行改进试验.

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 49875009).  
1998-05-22 收到, 1998-10-20 收到修改稿.

## 1 轨迹法应用及改进试验

### 1.1 计算方法

(1) 资料转换 本文采用的资料是1991年7月1~5日逐日02:00、08:00及20:00(UTC,下同)7层等压面 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 网格资料.为了进行不同坐标系中轨迹法应用试验,需将等压面资料转换到等熵面(或 $\theta_s$ 面)上,其中 $\theta_s$ 是为了考虑水汽的影响而引入的湿位温.转换分3步:先将7层等压面资料利用3次样条插值转换到19层等压面上,再计算出每个格点的干、湿位温,然后以位温为插值变量,求出15层等 $\theta_d$ 、 $\theta_s$ 面的资料,完成等压面向等熵面资料的转换.

(2) 积分方程 二维坐标面轨迹积分方程为:

$$x = x_0 + u_0 \Delta t \quad (1)$$

$$y = y_0 + v_0 \Delta t$$

其中 $x_0$ 、 $y_0$ 为初始点坐标, $u_0$ 、 $v_0$ 为积分初始时刻该点的速度, $\Delta t$ 为积分步长, $x$ 、 $y$ 为下一时刻质点坐标.

(3) 积分方案 采用四阶Runga-Kutta时间积分方案,即:

$$x_{n+1} = x_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (2)$$

其中: $k_1 = u(x_n, t_n) \Delta t$ ,  $k_2 = u(x_n + k_1/2, t_n + \Delta t/2) \Delta t$ ,  $k_3 = u(x_n + k_2/2, t_n + \Delta t/2) \Delta t$ ,  $k_4 = u(x_n + k_3, t_n + \Delta t) \Delta t$ .式中 $x_n$ 、 $u(x_n, t_n)$ 为 $t_n$ 时刻质点的坐标及风场, $x_{n+1}$ 为下一时刻质点的坐标, $y$ 方向的轨迹积分亦做相同的处理.

(4) 资料拟合 为了求得任意初始点下一时刻的位置,首先需求得该点的速度场的值,本文采用 $(x, y, t)$ 空间中该点附近 $4 \times 4 \times 4$ 网格体资料来拟合该点的风场值,共64个观测值,分别用20个拟合函数 $f(1, x, y, t, xy, xt, yt, x^2, y^2, t^2, xyt, xy^2, xt^2, x^2y, x^2t, y^2t, x^3, y^3, t^3)$ 在一个三次多项式的条件下求网格体内任意点资料,按照Dixon(1972)<sup>[7]</sup>的方案求解.

$$\text{即: } z_i(x, y, t) = a_1 f_{1i} + a_2 f_{2i} + \dots + a_{20} f_{20i} \quad (i = 1, 2, \dots, 64) \quad (3)$$

系数由网格体格点观测值矢量 $\vec{h} = \vec{h}(h_1, h_2, \dots, h_{64})$ 用正交矩阵法求得.其他时空任意点的资料也用资料拟合来求.

(5) 稳定性控制 为了使计算稳定, $\Delta t$ 应满足在每一个积分步长内,空气微团走过的路程不大于两个空间格距 $ds$ ,从而保证在 $\Delta t$ 时段内 $u, v$ 变化较小.

$$\text{即: } T_N \leq 1 + (T \cdot V_{\max}/ds) \quad DT = 1/T_N; \quad \Delta t = T/T_N \quad (4)$$

其中: $T$ 为观测资料时间间隔, $V_{\max}$ 是网格体内最大速度; $T_N$ 为某一观测时段 $T$ 内的积分步数, $DT$ 为单位时间积分步数, $\Delta t$ 为积分步长,在积分过程中自动控制.

### 1.2 轨迹法改进方案

物质线的轨迹积分是采用其上点的轨迹变化来代表物质线的演变<sup>[8]</sup>,由于资料分辨率的问题及物质线演变过程中形变的影响,不能很好地描述其变化的一些细微结构.为此,在物质线积分过程中给出其上相邻点之间一个临界距离 $dc$ ,当两点之间的距离在积

分过程中大于  $d_c$  时, 则在两点之间由线性插值插入一个新的点, 将该点也作为物质线上的点一起积分, 由此使物质线的演变得得到更好的描述。

需要指出的是  $d_c$  的选取要考虑到资料拟合方案的影响, 既不能太小而导致与拟合误差相混淆, 也不能太大而失去意义。

### 1.3 应用试验

对 1991 年 7 月 1~5 日江淮梅雨中的一次降水过程进行试验。首先利用逐日形势场(等压面位势场, 等  $\theta_t$ 、 $\theta_{sc}$  面位涡场)对环流形势有一个基本的了解, 然后在不同的坐标系下取不同的  $d_c$  值对物质线进行轨迹积分, 以此进行对流层中物质线的追踪及其对比试验。

#### (1) Euler 场形势

由逐日 500 hPa 等压面形势可见(图略), 1 日 08:00~2 日 14:00 全球有 5 波, 乌拉尔山、东亚均有较强的阻塞形势, 经向环流强, 乌拉尔山阻塞的经向伸展要比东亚强, 但其强度逐渐减弱, 而东亚阻塞强度维持; 2 日 20:00~4 日 02:00 全球有 5 波, 乌拉尔山经向度进一步减弱, 东亚继续维持; 4 日 08:00~5 日 08:00 全球有弱 5 波, 乌拉尔山阻塞减弱近于消散, 其附近经向度也急剧减小, 而东亚阻塞基本维持, 稳定少动, 强度稍有减弱。

逐日 IPV(等熵面位涡)图同样可以说明 1~5 日形势场的变化(图略)。1 日 08:00~2 日 14:00 全球有 5 个较显著的等 PV 线波动(全球场图略), 乌拉尔山有一强负位涡中心, 对应于阻塞高压中心, 东亚分别有强的正、负位涡中心, 对应于阻塞的高压中心及切断低压中心, 即乌拉尔山为孤立子型阻塞, 而东亚为偶极子型阻塞, 说明整个亚欧地区经向环流很强; 2 日 20:00~4 日 02:00 乌拉尔山附近强负位涡中心减弱东移, 对应阻塞强度减弱, 而东亚附近正负位涡中心强度维持较强, 阻塞形势继续维持; 4 日 08:00~5 日 08:00 乌拉尔山负位涡中心继续减弱东移, 中心线已消失, 东亚正负位涡中心强度稍有减弱。

由以上讨论可见, 1~5 日北半球亚欧地区总的环流形势为: 乌拉尔山较强的孤立子阻塞的逐渐减弱及东亚偶极子阻塞的基本维持过程。

#### (2) 物质线轨迹积分法的改进

①以纬圈为初始物质线 在等压面、等  $\theta_t$ 、 $\theta_{sc}$  面上以  $60^\circ\text{N}$  纬圈为初始物质线进行的轨迹积分, 即以纬圈上均匀分布的点为初始点进行轨迹积分, 代表该物质线的演变。初始物质线上相邻点之间的距离为一个格距(指平均格距, 1 格距 =  $1 \times 2.5 \times 110 \text{ km} = 2.75 \times 10^5 \text{ m}$ , 下同); 积分过程中根据不同的  $d_c$  值不断加入新的点以保持物质线上点的密度, 分别取  $d_c = 7$  格距及  $d_c$  取足够大(即不加入新的点)两种情况进行轨迹积分, 结果见图 1。

比较图 1a、b 之间的差别可以看出,  $d_c$  取足够大时, 物质线在整个积分过程中基本保持不动, 经向变化很小。在不同坐标系中虽有些微小差别, 但其经向变化均不大( $< 5$  个经度), 1 日 08:00~5 日 08:00 整个积分过程中都处于该范围以内, 乌拉尔山及东亚阻塞形势不明显。而取  $d_c = 7$  格距时, 等压面及等熵面物质线在积分到 2 日 08:00 时欧亚地区经向度就已经很明显了( $> 5$  个经度), 至 3 日 24:00、5 日 20:00 时经向度进一步增

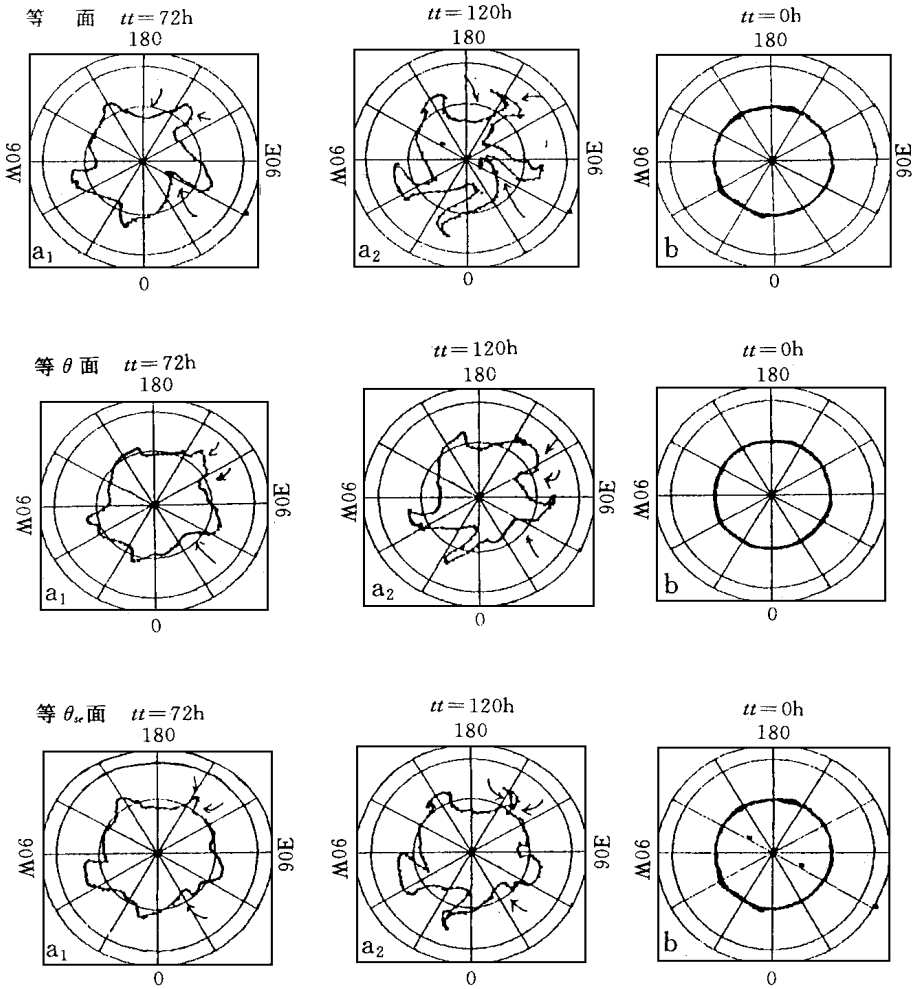


图1 1991年7月1~5日以60°N纬圈为初始物质线的轨迹积分  
( $tt$ 为积分时间, a.  $dc=7$ 格距 b.  $dc$ 取足够大)

大( $> 20$ 个经度), 且物质线发生裹卷, 这对应于乌拉尔山及东亚的阻塞形势.

②以等熵面等位涡线为初始物质线 取1日08:00 320 K等 $\theta_s$ 面上60°N附近 $PV = 12$ 单位(1单位= $10^{-7} m^2 \cdot K \cdot s^{-1} \cdot kg^{-1}$ , 下同)的等 $PV$ 线作为初始物质线进行轨迹积分, 分别取 $dc$ 取足够大、2、7、12个格距, 积分结果见图2, 同时计算了该系统在不同的积分过程中其水平投影面积 $A$ 的变化, 以此反映其强度的变化(图略).

$dc$ 取足够大时, $PV$ 线(位涡系统)基本不动, 1日08:00~5日08:00其纬向移动约5个纬度, 面积变化也很小, 期间虽有几个峰值, 但幅度小,  $\Delta A$ 约为0.001单位(1单位= $10^{14} m^2$ , 下同), 基本上保持不变; 取 $dc=2$ 格距( $dc=5.5 \times 10^5 m$ )时系统明显东移, 1日08:00~5日08:00纬向移动约15个纬度, 其 $A$ 变化先减小后增大, 呈对称分布, 在3日02:00达最小值,  $\Delta A$ 约0.1单位; 取 $dc=7$ 格距( $dc=7.75 \times 10^5 m$ )时系统变化与 $dc=2$

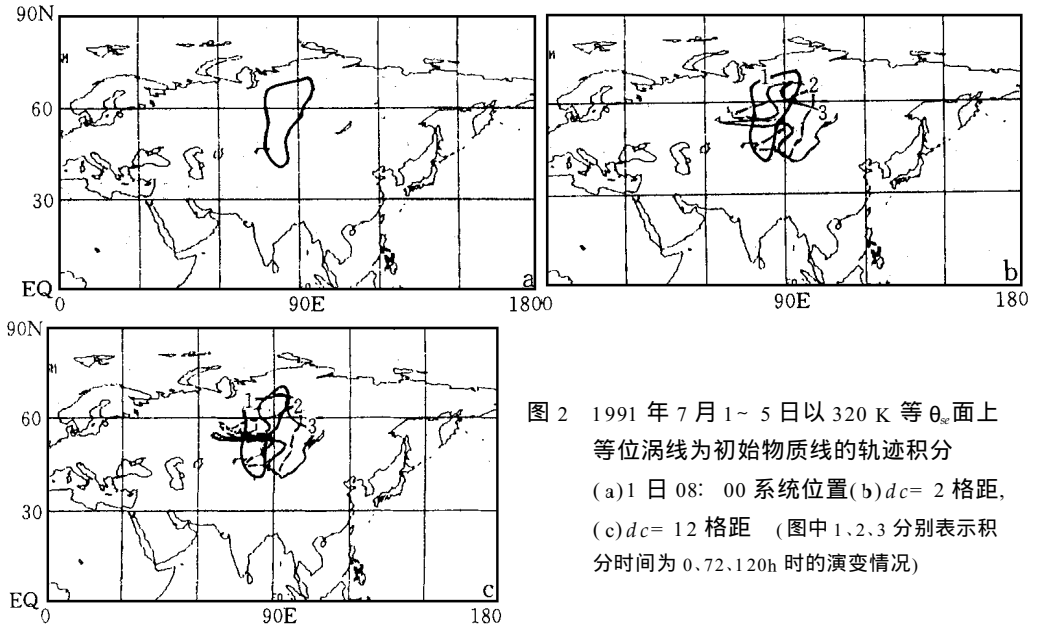


图2 1991年7月1~5日以320 K等 $\theta_e$ 面上等位涡线为初始物质线的轨迹积分  
(a)1日08:00系统位置(b) $d_c=2$ 格距,  
(c) $d_c=12$ 格距(图中1、2、3分别表示积分时间为0.72、120h时的演变情况)

格距基本相似: 取  $d_c=12$  格距 ( $d_c=1.32 \times 10^6 \text{m}$ ) 时, 系统在1日08:00~5日08:00明显东移(约15个纬度), 其  $A$  变化有两个峰值, 分布不对称;  $\Delta A$  达1.0单位; 320 K 逐日 IPV 图上, 该系统1日08:00位于  $60^\circ\text{N}$ 、 $90^\circ\text{E}$  附近, 3日08:00强度减弱东移至  $60^\circ\text{N}$ 、 $100^\circ\text{E}$  附近, 5日08:00  $130^\circ\text{E}$  其面积变化先减小后增大, 呈近似对称分布,  $\Delta A$  约0.5单位;

③分析与讨论 由以上分析比较可见,  $d_c$  值对轨迹积分的影响是比较大的, 当  $d_c$  取足够大即不保持物质线上点的密度时, 系统变化明显与逐日形势场不符, 主要是变化的范围、幅度太小, 不能反映环流形势及系统的演变; 在  $d_c$  取其它几个给定值时, 环流及系统的变化均与逐日形势场更接近,  $d_c=2$  和 7 时变化基本相似,  $d_c=12$  时, 位置变化相近, 面积(强度)变化差别较大。

$d_c=12$  及不加入新的点时物质线积分效果较差, 是因为在演变过程中, 其上点的密度变小, 导致一些系统变化没有被反映出来, 这也正是改进轨迹法的原因所在;  $d_c=2$ 、 $d_c=7$  时差别不大, 则是由于本文所用的资料拟合方案描述的是大尺度意义下的轨迹, 因而小尺度扰动不能反映出来. 只有选取适当的  $d_c$  值才能利用有限的资料分辨率, 在保证系统描述尽可能准确的前提下, 又滤掉了过小尺度的扰动, 尽量减少拟合误差的影响. 另外, 从面积  $A$  比较也同样可以说明  $d_c$  值的选取, 其结果与上述相同。

本文  $d_c$  值的选取试验是在初始物质线上的点具有一定密度(相邻点距离1格距)的前提下进行的. 这样就避免了物质线积分中由于误差而引起的过大非线性变化, 而这些变化于系统的描述是没有多大意义的。

### (3) 等压面与等 $\theta_e$ 面轨迹积分的比较

①由图1等压面和等  $\theta_e$  面的轨迹积分演变可见: 等压面上1日08:00沿纬圈分布的点, 在1日08:00~2日06:00全球有5波形成, 乌拉尔山及东亚物质线有经向变化,

但形变较小; 2 日 12: 00~ 3 日 08: 00 乌拉尔山及东亚附近物质线经向度均增加, 同时发生较大形变, 且局部发生裹卷(不可逆形变); 4 日 08: 00~ 5 日 08: 00 乌拉尔山东亚物质线经向度进一步增加, 局部发生严重扭曲变形, 即已无物质线可追寻.

② $\theta$ 面上 1 日 08: 00~ 2 日 14: 00 全球有 5 波形成, 乌拉尔山及东亚附近物质线有经向发展, 但形变较小; 2 日 20: 00~ 4 日 02: 00 全球有 5 波, 乌拉尔山东亚物质线经向度均有发展, 强度相当, 物质线有一定形变, 但可分辨; 4 日 08: 00~ 5 日 08: 00 全球有 5 波, 乌拉尔山东亚附近物质线经向度进一步增加, 即阻塞均有发展, 且乌拉尔山的经向度大于东亚的, 物质线发生裹卷, 局地不可分辨(乌拉尔山附近), 5 日 08: 00 以后物质线发生较大扭曲变形, 已不可追寻.

$\theta_{sc}$ 面上 1 日 08: 00~ 2 日 14: 00 有 5 波形成, 乌拉尔山及东亚物质线有经向发展, 但形变较小; 2 日 20: 00~ 4 日 02: 00 全球有 5 波, 乌拉尔山附近物质线经向度变化较慢, 基本上没有继续加深, 东亚附近物质线经向度进一步增大, 物质线有一定形变, 但可分辨; 4 日 08: 00~ 5 日 08: 00 全球有 5 波, 乌拉尔山附近经向度几乎无变化, 东亚附近物质线经向度不断发展, 物质线发生裹卷, 局地不可分辨(东亚附近), 5 日 08: 00 以后物质线发生较大扭曲变形, 已不可追寻.

③将等压面和等  $\theta$ 、 $\theta_{sc}$  轨迹积分结果与逐日  $IPV$  场进行比较可以看出: 等压面轨迹积分, 在 1~ 2 天内基本可以描述环流形势的演变, 但由于积分时间短, 其特征不明显, 尤其是在物质线积分演变时, 2 天的积分演变, 不能描述乌拉尔山阻塞的衰减. 其原因主要是实际大气中有穿越等压面的运动, 而且运动强度较大, 即等压面上物质线本身就是近似意义下的, 且近似程度较低, 尤其是在对流层中, 物质线只有 1~ 2 天可以追寻. 等  $\theta$  与等  $\theta_{sc}$  面在 3 天以内无太大差别, 均与 Euler 形势场相近, 而在 3~ 5 天的演变中, 等  $\theta$  面上物质线演变就与 Euler 场有较大差别, 上面的试验中同样不能描述乌拉尔山阻塞的衰减, 而  $\theta_{sc}$  面上物质线的演变则能较好的描述乌拉尔山阻塞的减弱及东亚阻塞的维持. 其原因也是由于穿越等熵面的运动引起的,  $\theta_{sc}$  由于考虑了水汽的影响, 近似程度更高, 因而其积分效果较好. 由此可见, 在对流层中上层,  $\theta$ 、 $\theta_{sc}$  面上在 3 天以内均有物质线可追寻, 且效果较好, 3~ 5 天仍有物质线可追寻, 只是局部发生不可分辨形变, 但等  $\theta$  面上的物质线演变已不能很好地描述大气环流的变化. 由以上讨论可见, 在 3 种坐标系中, 等  $\theta_{sc}$  面轨迹积分效果最好.

## 2 个例试验

为了检验轨迹法的应用效果, 利用轨迹积分法对 1991 年江淮梅雨期 7 月 1~ 7 日的降水过程的水汽输送进行诊断分析. 1991 年江淮暴雨与水汽的输送有着密切的关系, 丁一汇等<sup>[9]</sup>在对 1991 年江淮暴雨的总结研究中, 对水汽输送进行了研究; 谢齐强<sup>[10]</sup>研究了来自南海及孟加拉湾的水汽输送的多寡及环流背景, 得出了一些有意义的结果, 但均是采用 Euler 观点进行分析的, 而我们知道, 湿空气的混合比  $q$  是守恒量, 等熵面上的等  $q$  线是物质线, 因而可以用 Lagrange 法通过物质线轨迹积分来分析物质线的源汇分布及输送.

## 2.1 $q$ 场分布特征

为了说明 1991 年 7 月 1~7 日降水过程的水汽在垂直方向上的分布情况, 分别取  $\theta_{sc} = 300 \text{ K}$ 、 $320 \text{ K}$  等熵面  $q$  场来进行分析。

(1) 由  $320 \text{ K}$  等  $\theta_{sc}$  面 1 日 08: 00~7 日 20: 00  $q$  场可见(图略), 东半球赤道低纬地区为一范围很大的水汽大值区, 在该  $q$  大值中心的南北两侧, 各有一条  $q$  梯度较大的边缘区。在北半球该  $q$  梯度大值带由孟加拉湾附近一直向东北延伸到日本海附近后继续向东延伸, 其北侧为  $q$  低值区, 南侧为  $q$  高值区, 江淮流域基本上位于该梯度带上偏北侧附近。该梯度带在 1 日 08: 00~7 日 20: 00 只有较小的变化, 其位置 1 日 08: 00~6 日 08: 00 均为 SW-NE 走向, 6 日 20: 00 以后稍向东西向偏移, 强度在 2 日 08: 00 及 4 日 08: 00 增大, 以后基本维持并稍有减弱; 其南侧的  $q$  高值区强度也基本维持在  $22 \text{ g/kg}$  左右; 另一明显特征是, 该梯度带总的走向是 NE-SW 向, 但有一些小波动, 即在南海地区梯度带向南北方向偏转; 整个梯度带的走向与 SW 季风气流有关, 而南海地区梯度带的偏转则与副高西侧的 SE 气流有关。  $q$  梯度带南侧的大值区, 在  $60^\circ\text{E}$ 、 $90^\circ\text{E}$  附近有 3 个大值中心, 1 日 08: 00~7 日 20: 00 其位置强度变化较小。

(2)  $300 \text{ K}$  等  $\theta_{sc}$  面的  $q$  场特征与  $320 \text{ K}$  上基本相似, 不同的是北半球  $q$  梯度带强度更强, 基本走向更接近一致且偏向 SW-NE。

## 2.2 $q$ 系统的演变

(1) 为研究江淮地区水汽的分布、输送情况, 在等  $\theta_{sc}$  面  $q$  场江淮附近区域取几个较明显的  $q$  系统, 对其进行轨迹积分。图 3 给出了 1 日 08: 00  $320 \text{ K}$  等  $\theta_{sc}$  面上  $q = 18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  线所围的几个较明显的  $q$  系统在 1 日 08: 00~5 日 08: 00、5 日 08: 00~7 日 20: 00 的轨迹积分结果。由图 3 可见, 1 日 08: 00 几个大值系统分布呈 SW-NE 走向, 这与前面的  $q$  场分析结果一致, 1 日 08: 00~5 日 08: 00 几个系统均有较大的移动变化。  $90^\circ\text{E}$  附近的  $q$  系统 1 日 08: 00 在孟加拉湾附近有一  $q$  大值区向北伸展, 同时还有一部分向东伸展分成两部分, 一部分转向北, 另一部分继续向东扩展至我国南海附近处转向北, 到 5 日 08: 00 该系统已演变为一狭长的带状, 3 个  $q$  舌也更明显, 它们分别对应着由孟加拉湾向江淮地区的水汽输送; 1 日 08: 00 处于赤道以北  $120^\circ\sim 150^\circ\text{E}$  附近的  $q$  系统变化也较大, 主要是系统北部向 N、NE 再转向 E 伸展, 南部向西偏北伸展, 由该系统的移动及形变明

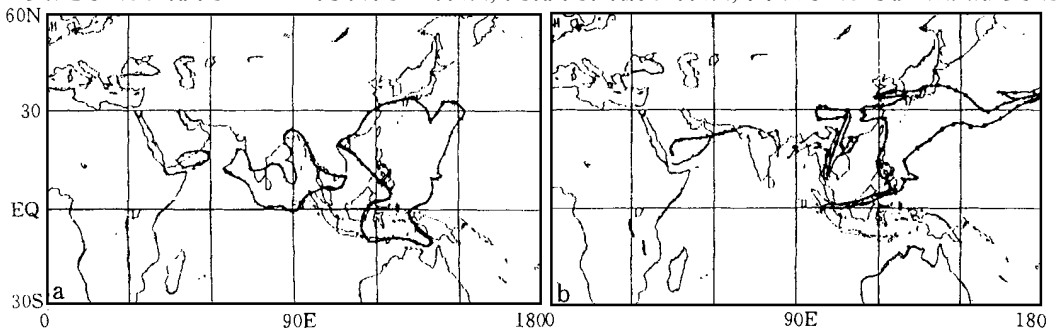


图 3 1991 年 7 月 1 日 08: 00~5 日 08: 00(a) 5 日 08: 00~7 日 20: 00(b)  $320 \text{ K}$  等熵面  $q$  系统轨迹积分结果( $q = 18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

显看出是由于西太平洋副高环流的作用, 北侧的部分在副高 NE 侧 SW、W 气流的输送下向 N、E 扩展移动, 南半部分在副高 SW 侧 SE 气流的作用下, 向西偏北方向移动与上游  $q$  系统向东伸展的部分在南海附近汇合后, 向北移动, 这对应于副高西南侧气流向西北方向输送水汽到南海, 与来自孟加拉湾的水汽汇合后再向江淮地区输送; 1 日 08: 00 位于阿拉伯海附近的  $q$  系统, 东西伸展, 南北压缩, 中心移至孟加拉湾附近. 另外由图 3 可见, 由孟加拉湾向江淮地区伸展的  $q$  舌强度大于南海地区向 NE 伸展的  $q$  舌. 同样, 由 5 日 08: 00~7 日 20: 00  $q=18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  线所围的几个主要系统的轨迹积分结果可见, 其演变过程基本一样, 只是系统更分散, 强度稍有减弱, 孟加拉湾附近的  $q$  系统已明显减弱, 但向江淮地区伸展的  $q$  舌还是孟加拉湾的比南海的强. 由  $q=20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  线的轨迹积分结果, 可以由  $q$  大值中心的移动更清楚的看出上述水汽的输送情况(图略).

(2) 同样可取 300 K 等  $\theta_{se}$  面上的等  $q$  线进行轨迹积分, 其演变与 320 K 基本相似.

### 2.3 空气质点对 $q$ 的输送

图 4 为 320 K 等熵面上 1 日 08:

00~5 日 08: 00 的轨迹积分结果. 由图 4 可见  $15^{\circ}\text{N}$  附近阿拉伯海至孟加拉湾为一致的西风气流, 到孟加拉湾后发生分支, 一部分向 NE 方向流向江淮地区, 另一部分向东到达南海地区, 与副高西南侧气流合并后移向江淮地区; 同时在  $90^{\circ}\text{E}$  附近有一股较强的越赤道气流, 向北移向孟加拉湾附近转向 NE 移向江淮流域, 这几股气流皆是由  $q$  大值区出发的, 携带了大量水汽向江淮地区输送;  $20^{\circ}\text{N}$  附近副高的环流也较明显, 其南侧的 SE 气流将水汽向 NW 输送, 与来自孟加拉湾的气流

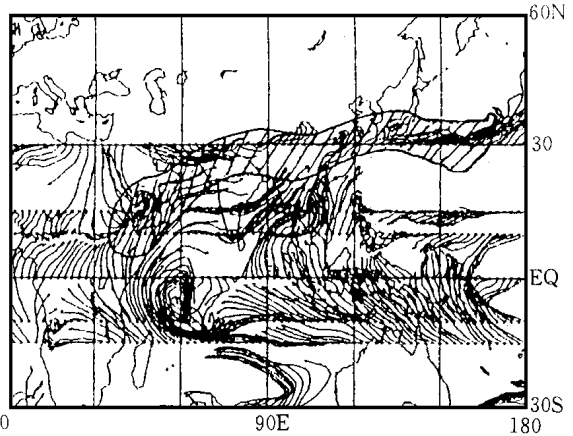


图 4 1991 年 7 月 1 日 08: 00~5 日 08: 00 320 K 等熵面上空气质点对  $q$  的输送(图中阴影部分为等熵面  $q$  场梯度大值带的平均位置)

输送在南海附近汇合; 另外, 在赤道附近  $60^{\circ}\text{E}$  处有一较强的反气旋高压环流, 该高压的存在加强了其北侧的西风气流, 从而加强了 SW 季风及阿拉伯海向孟加拉湾的水汽输送; 由图同样可以看出, 孟加拉湾向江淮流域输送水汽的气流要强于南海的气流. 5 日 08: 00~7 日 20: 00 的水汽输送路径与 1 日 08: 00~5 日 08: 00 基本相同, 只是强度减弱.

由 300 K 等  $\theta_{se}$  面上江淮附近空气质点在此期间内的轨迹积分结果(图略)可见水汽输送情况基本相同, 来自孟加拉湾和南海的气流携带了大量的水汽, 输送到江淮流域, 强度是前者大于后者.

由以上描述可见, 江淮地区的水汽主要来自孟加拉湾及南海. 南海的水汽来自孟加拉湾及副高 SW 侧的 SE 气流, 该气流由太平洋洋面上带来了大量水汽; 而孟加拉湾的水汽, 是由  $90^{\circ}\text{E}$  附近的强越赤道气流从洋面上带来了部分水汽, 另外部分水汽来自阿拉伯海, 以及赤道附近  $60^{\circ}\text{E}$  处高压环流北侧的气流. 孟加拉湾水汽源的维持与该高压的存在密切相关, 一方面高压的反气旋气流直接将赤道地区洋面上的水汽沿反气旋路径输送到



其北侧及孟加拉湾附近; 另一方面, 高压西侧的偏南气流在  $15^{\circ}\text{N}$  附近与北方南下的冷空气形成一强辐合中心, 由于高压北侧气流携带有大量水汽, 辐合后形成强位势不稳定, 条件适合时可发生对流活动, 在该地区形成一个水汽汇区, 而阿拉伯海向孟加拉湾的水汽输送正是源于此处, 这可能也是孟加拉湾水汽源地得以维持的原因之一。

为了进一步说明  $q$  的输送与其分布的关系, 将  $320\text{ K}$  等  $\theta_{se}$  面上 1 日 08: 00~ 5 日 08: 00 的逐日  $q$  场中, 北半球欧亚地区的  $q$  梯度带平均位置投影到图 4 上可见, 其中几股较强的输送水汽的气流流向与该梯度带的走向基本一致, 梯度带位于强气流中心的北侧, 两者有部分重合, 这更进一步证明了这几股气流皆携带了大量水汽, 是较强的水汽通道, 同样  $300\text{ K}$  上也存在相似的情形。

### 3 结论与讨论

(1) 在保持物质线初始点密度的前提下, 积分过程中对轨迹法进行改进, 即根据一临界值  $d_c$  不断加入新的点, 用分辨率有限的离散点资料较好地描述了物质线演变的细微结构, 在本次试验中取  $d_c = 7$  格距。

(2) 对流层中等压面物质线在两天以内可以追寻, 两天以上已无物质线可追寻; 对流层中  $\theta_s$  面物质线在 3~ 5 天内可追寻, 3 天以内两者应用效果相近, 3 天以上,  $\theta_{se}$  面轨迹法应用效果较好。

(3) 1991 年 7 月 1 日 08: 00~ 7 日 20: 00 期间江淮流域的水汽主要来自孟加拉湾和南海, 前者多于后者, 共有 3 股较明显的输送气流, 两股由孟加拉湾向 NE 到达江淮地区, 一股由南海向江淮地区输送水汽; 南海的水汽来自孟加拉湾向东的水汽输送分支与副高 SW 侧 SE 气流输送的水汽的汇合; 孟加拉湾的水汽来自阿拉伯海, 赤道高压北侧的水汽输送及  $90^{\circ}\text{E}$  处越赤道气流的水汽输送。

(4) 赤道附近处  $60^{\circ}\text{E}$  的高压环流对孟加拉湾水汽源的维持起了一定的作用。

### 参 考 文 献

- 1 Danniels in E F. Review of trajectory method. *Adv. Geophys.*, 1974, (19): 73~ 94.
- 2 Palme. On the three dimensional motion in an out-break polar air. *J. Meteor.*, 1950, 8: 25~ 39.
- 3 黄伟, 陶祖钰. 1991 年梅雨期中冷空气活动个例分析. *大气科学*, 1995, 19(3): 375~ 379.
- 4 朱艳秋, 廖洞贤. 三维空气质点轨迹的计算. *应用气象学报*, 1992, 3(3): 328~ 333.
- 5 Norton W A. Breaking Rossby waves in a model stratosphere diagnosed by a vortex-following coordinate system and a technique for advecting material contours. *J. Atmos. Sci.*, 1993, 51(4): 654~ 673.
- 6 Waugh D W. Contour advecting with surgery: a technique for investigating finescale structure in tracer transport. *J. Atmos. Sci.*, 1994, 51(4): 530~ 540.
- 7 Dixon. The global analysis of meteorological data using orthogonal polynomial base functions. *J. Atmos. Sci.*, 1972, 29(4): 75~ 94.
- 8 陆汉城. 保守大气运动的轨迹计算及应用. *空军气象学院学报*, 1995, 16(3): 15~ 26.
- 9 丁一汇. 九一年江淮特大暴雨研究. 北京: 气象出版社, 1993. 35~ 37.
- 10 谢齐强. 九一年江淮流域持续特大暴雨的水汽输送. *气象*, 1993, 4(10): 234~ 240.

## LAGRANGE METHOD USED IN ATMOSPHERIC MOTION OF STRATOSPHERE

Cheng Xinx i Lu Hancheng Zhou Zugang Fan Hongjun

(*Air Force Meteorological Institute, Nanjing 211101*)

### Abstract

The applying and modifying study on the Lagrange method is carried out . The results show that the Lagrange method on the isentropic surface gives the best effect, and the variation of the material contour can be studied more finely using the modified Lagrange method. Based on the experiments, the transport of the water vapor in the case during the period of Changjiang- Huaihe Basin Meiyu in July 1991 is diagnosed. The analyses show that the vapor is mainly transported from the South China Sea and the Bay of Bengal, and the latter is stronger.

**Key words:** Lagrange method Isentropic surface Water vapor transport