

任金声 董立清

(国家气象中心,北京 100081)

## 提 要

应用三维风场,借助计算气块路径的方法,对一次沙暴天气引起的浮尘飘移,进行了逆向追踪计算,得出了浮尘源地的位置和浮尘飘移的三维空间路径。经与天气实况对比,两者基本相符。这对于预测大气中污染物的飘移和确定污染源的位置,具有实际意义。

**关键词:** 浮尘源地 · 三维路径 计算

## 引言

多年来,国内外一些学者,在对暴雨、大气污染等的分析中,常采用流线分析或计算水汽通量等方法,分析水气的来源、污染源的位置,以及气团属性的变化等。但上述方法仅是对气流水平运动的一种定性判断,并不能给出空气质点在空间中运动的瞬时位置。本文试图应用内插实测三维网格点上的风场,计算垂直速度求取气块三维运动轨迹的方法,对1990年4月25日北京地区出现的一次浮尘天气,进行计算分析。拟从三维空间的角度,定量描述浮尘飘移的轨迹(路径),并确定其源地。

## 1 基本原理和公式

已知各不同时刻三维空间网格点的风场。假定气块在各不同时刻的位置是  $P_r$  ( $\tau = 0, 1, \dots, N$ ), 由于  $P_r$  的位置一般不在网格点上,其位置须借助如下插值公式<sup>[1]</sup>确定。

$$A_{i+\mu_1, j+\mu_2, k+\mu_3}^r = \left[ 1 + \frac{\mu_1}{2} (\nabla_\lambda + \mu_1 \nabla_\lambda^2) \right] \cdot \left[ 1 + \frac{\mu_2}{2} (\nabla_\varphi + \mu_2 \nabla_\varphi^2) \right] \cdot \left[ 1 + \frac{\mu_3}{2} (\nabla_p + \mu_3 \nabla_p^2) \right] A_{i, j, k}^r \quad (1)$$

其中  $\mu_1 = u \cdot \Delta t / \Delta \lambda \cdot \cos \varphi$

$\mu_2 = v \cdot \Delta t / \Delta \varphi \cdot a$

$$\mu_3 = \omega \cdot \Delta t / \Delta p$$

$$\nabla_\lambda = A_{i+1, j, k} - A_{i-1, j, k}$$

$$\nabla_\lambda^2 = A_{i+1, j, k} + A_{i-1, j, k} - 2A_{i, j, k}$$

$\nabla_\varphi, \nabla_\varphi^2, \nabla_p, \nabla_p^2$  类同。

$\Delta \lambda, \Delta \varphi$  分别为经、纬度网格距。 $\Delta p$  是  $p$  方向分层时两相邻等压面气压差。 $a$  是平均地球半径。 $a_u$  是气块运动的加速度在  $\lambda$  方向的分量。

假设气块在移动的过程中加速度不变,则气块由位置  $P_r$  经  $\Delta t$  时间后移至  $P_{r+1}$  的无因次位移诸分量为:

$$\left. \begin{aligned} \mu_\lambda &= \frac{1}{2} (u^{(\tau)} + u^{(\tau+1)}) \cdot \Delta t / \Delta \lambda \cdot \cos \varphi \\ \mu_\varphi &= \frac{1}{2} (v^{(\tau)} + v^{(\tau+1)}) \cdot \Delta t / \Delta \varphi \cdot a \\ \mu_p &= \frac{1}{2} (\omega^{(\tau)} + \omega^{(\tau+1)}) \cdot \Delta t / \Delta p \end{aligned} \right\} (2)$$

不难看出,若知道了  $P_{r+1}$  的位置,由式(1)可求出  $u^{(\tau+1)}$  等,则式(2)可求解。下面用近似的方法求  $P_{r+1}$  的坐标位置。

设在  $\tau$  时刻,  $P_r$  的坐标是  $(i + \mu_1, j + \mu_2, k + \mu_3)$ , 按式(1)求出  $P_r$  的  $u, v, \omega$  并分别记为  $u^{(\tau)}, v^{(\tau)}, \omega^{(\tau)}$ 。气块经  $\Delta t$  后的无因次位移诸分量记为

$$\mu_{\lambda 0} = u^{(\tau)} \cdot \Delta t / \Delta \lambda \cdot \cos \varphi$$

$$\mu_{\varphi_0} = v^{(\tau)} \cdot \Delta t / \Delta \varphi \cdot a$$

$$\mu_{p_0} = \omega^{(\tau)} \cdot \Delta t / \Delta p$$

则  $(i + \mu_1 + \mu_{\lambda_0}, j + \mu_2 + \mu_{\varphi_0}, k + \mu_3 + \mu_{p_0})$  为点  $P_{\tau+1}$  的坐标位置的零级近似。

将  $P_{\tau+1}$  的零级近似坐标和  $\tau+1$  时刻的风场代入式(1), 求出该点的风速值, 分别记为  $u^{(\tau+1)}, v^{(\tau+1)}$  和  $\omega^{(\tau+1)}$ , 代入式(2), 求出其位移诸分量分别记为  $\mu_{\lambda_1}, \mu_{\varphi_1}, \mu_{p_1}$ 。则  $(i + \mu_1 + \mu_{\lambda_1}, j + \mu_2 + \mu_{\varphi_1}, k + \mu_3 + \mu_{p_1})$  为点  $P_{\tau+1}$  的坐标位置的一级近似。继续做下去可求出2级、3级近似……。重复以上步骤, 可求出各个时刻的气块位置, 联起来就是所要求的气块路径。

## 2 资料的处理方法

### 2.1 坐标及范围

采用  $1^\circ \times 1^\circ$  球面网格坐标系, 范围取  $31^\circ-50^\circ\text{N}$ ,  $101^\circ-140^\circ\text{E}$  共800格点。每个测站选取1000、850、700、500、300、200、100hPa 7个层次的常规风资料。

### 2.2 客观分析

首先将各探空站的原始风场资料进行  $u, v$  分量分解, 用三角形插值法(有的称有限元法)内插到网格点上作为预备场, 然后采用逐步订正法对预备场进行扫描订正, 得到各层的网格点  $u, v$  资料。

### 2.3 用运动学方法计算垂直速度

#### 2.3.1 散度用差分法计算

$$D = \frac{1}{a \cos \varphi} \left[ \frac{\nabla_{\lambda} u}{2 \Delta \lambda} + \frac{\nabla_{\varphi} (v \cos \varphi)}{2 \Delta \varphi} \right] \quad (3)$$

#### 2.3.2 垂直速度用订正法计算

$$\omega_{K'} = \sum_{K'=K}^6 \bar{D}_{K'} \cdot \Delta p_{K'} + \omega_s - \frac{p_s - p_K}{p_s - p_1} \omega_1 \quad (4)$$

其中  $\omega_1 = \sum_{K'=1}^6 \bar{D}_{K'} \cdot \Delta p_{K'} + \omega_s$ ,  $\omega_s$  为地面垂直速度, 在平坦地面且不计摩擦的情况下,  $\omega_s = 0$ 。否则, 用下面的方法进行计算。

#### 2.3.3 地面垂直速度的计算

地面垂直速度包括地面较大地形的起伏和边界层摩擦辐合造成的垂直速度两部分,

即

$$\omega_s = \omega_h + \omega_m$$

其中  $\omega_h = -\rho_0 g v_0 \cdot \nabla h$

$$= -\rho_0 g \left( \frac{u_0}{a \cos \varphi} \frac{\partial h}{\partial \lambda} + \frac{v_0}{a} \frac{\partial h}{\partial \varphi} \right) \quad (5)$$

是由于地形强迫抬升造成的垂直速度。 $\frac{\partial h}{\partial \lambda}$  和  $\frac{\partial h}{\partial \varphi}$  分别是地形高度在  $\lambda$  和  $\varphi$  方向上的变化, 可根据地形等高线图, 读出各网格点上的值再进行差分计算。 $u_0$  和  $v_0$  是地面风  $v_0$  的分量, 它在网格点上的值可由等  $u$  线和等  $v$  线图内插读出。

$$\omega_m = -\rho_0 g \zeta_{850} \sqrt{\frac{k}{2f}} \cdot \sin 2\nu \quad (6)$$

是由于边界层摩擦辐合所造成的垂直速度。 $\rho_0$  是地面空气密度,  $\zeta_{850}$  是850hPa 的涡度,  $f$  是柯氏参数,  $k = 15 \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  是涡流系数,  $\nu = 22.5^\circ$  是地面等压线与实测风之间的夹角。

$\omega_s$  求出后代入式(4), 对  $\omega_{K'}$  做最后订正。但是, 由于地形垂直速度  $\omega_h$  随高度衰减很快<sup>[2]</sup>, 故只对1000和850hPa层进行订正, 850hPa以上各层仍假定  $\omega_h = 0$ 。

### 2.4 计算各等压面网格点上的值

将以上7个标准层网格点上的  $u, v$  和  $\omega$  值, 通过拉格朗日插值公式分别求出900, 800, 600, 400hPa各等压面网格点上相应的值。

例如求900hPa的  $u$  值。取3点插值, 可用1000, 850, 700hPa 3层上的  $u$  值进行插值计算。设900hPa为  $p$ , 700, 850, 1000hPa分别为  $p_1, p_2, p_3$ , 相应的  $u$  值为  $u_1, u_2, u_3$ 。则拉格朗日插值公式为

$$u = u_1 \frac{(\ln p - \ln p_2)(\ln p - \ln p_3)}{(\ln p_1 - \ln p_2)(\ln p_1 - \ln p_3)} + u_2 \frac{(\ln p - \ln p_1)(\ln p - \ln p_3)}{(\ln p_2 - \ln p_1)(\ln p_2 - \ln p_3)} + u_3 \frac{(\ln p - \ln p_1)(\ln p - \ln p_2)}{(\ln p_3 - \ln p_1)(\ln p_3 - \ln p_2)} \quad (7)$$

代入式(7), 即可求出900hPa各网格点的  $u$

值。同理,用式(7)可分别计算出900,800,600和400hPa各层网格点上的 $u, v, \omega$ 值。这样,就最终建立了一个从1000hPa至100hPa由10层网格组成的三维风场数据。当然,如果考虑地形影响,还应包括建立地面各网格点的地形高度和地面风场数据。

### 3 计算浮尘的源地及其飘移路径

1990年4月24日下午,内蒙的西部和中部出现了沙暴天气(图1)。沙尘在气流运动的作用下,被卷上天空,随着高空气流向远处飘移。大约24小时以后,即25日下午,北京出现了遮天蔽日的浮尘天气<sup>[3]</sup>。

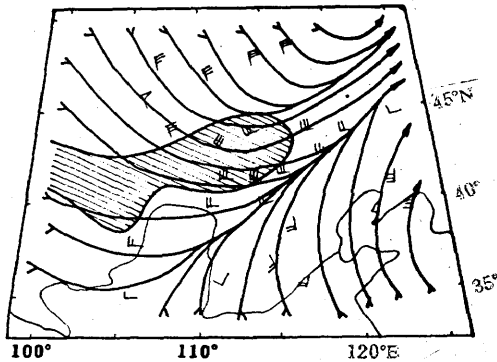


图1 1990年4月24日06时  
地面流线图  
(斜线为沙暴天气区)

对这次沙暴天气造成的浮尘飘移,采用上述的计算方法,以北京为起点,逆浮尘的飘移路径,计算各不同时刻浮尘的位置(后向轨迹),并确定其源地。

资料取自国家气象中心要素库,时间取自1990年4月24日00时(世界时,下同)至26日12时,用上述资料处理方法,构造6个时次的10层网格三维风场数据以及地面格点的地形高度和地面风场数据。计算时 $\Delta t$ 取12小时,北京1000hPa的 $\omega$ 值用初始时刻地面3小时变压代替,气块位置取一级近似。其计算结果如表1。

表1 计算浮尘后向轨迹的位置

25日12时	25日00时	24日12时
116.5°E	114.1°E	110.8°E
39.8°N	41.8°N	42.3°N
1000.0hPa	818.3hPa	883.1hPa

计算的浮尘后向轨迹及其源地参见图2。

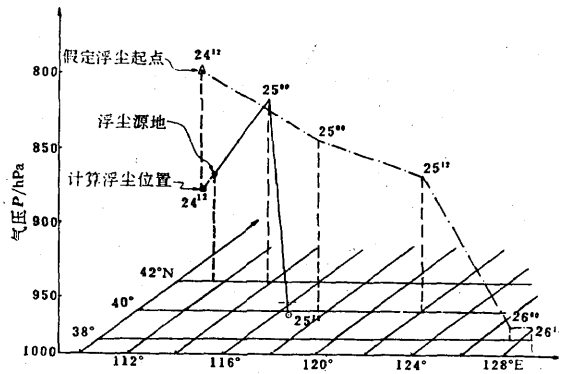


图2 计算的浮尘路径图

实线:浮尘后向轨迹  
点划线:浮尘前向轨迹

## 4 分析

### 4.1 判断浮尘源地

计算结果表明,25日12时到达北京地区上空的浮尘,25日00时位于内蒙化德(41.9°N, 114.0°E)附近地区818.3hPa的空中。该站此时及以前9个小时并无沙暴或扬沙天气出现,故可判断此点并非影响北京的浮尘源地。计算的24日12时的浮尘位置,位于内蒙满都拉庙(42.5°N, 110.1°E)附近地区。此时该站的本站气压为867hPa,低于计算的883.1hPa,说明计算的浮尘位置在地面之下(图2),这显然是不合理的。毫无疑问,被追踪的浮尘应当位于地面之上,其坐标可由图2中 $p=867$ hPa(满都拉庙的本站气压)与计算的浮尘后向轨迹曲线内插近似求出,为42.3°N, 111.2°E, 867hPa,大约位于满都拉庙的东南方,正处于24日06时至12时出现于内蒙中部和西部地区的大片沙暴天气区域之内。在

此期间,满都拉庙本站亦连续出现了明显的沙暴天气,06和09时地面并伴随有一2.9和-1.8hPa的三小时负变压;12时850、700、500hPa的垂直速度由00时的-4、-13、-21分别增至-12、-37、-35( $10^{-4}$ hPa·s $^{-1}$ ),表明该地区附近对流层中低层存在着明显的上升运动。因此,可以判定满都拉庙附近地区就是飘移到北京地区浮尘的源地。

#### 4.2 浮尘飘移路径分析

为了减少因地形影响造成的计算误差,现以计算的24日12时的浮尘位置为原点,假定该地面的沙尘已被垂直输送到800hPa的高度。然后以此为起点,沿着浮尘的向前飘移进行计算(前向轨迹),结果如表2。

表2 计算浮尘前向轨迹的位置

	24日 12时	25日 00时	25日 12时	26日 00时	26日 12时
$\lambda(^{\circ}\text{E})$	110.8	117.9	122.2	127.2	129.0
$\varphi(^{\circ}\text{N})$	42.3	39.9	39.4	38.3	37.4
p(hPa)	800.0	846.2	868.5	971.1	971.1

现分析浮尘的飘移路径(图2):浮尘由源地(起点)沿着高空西北气流向东南方向移动,由于气流的下沉作用,飘移高度逐渐下降。25日00时移到河北的唐山附近846.2hPa的空中。12时到达了辽东半岛的大连东北方。之后,浮尘进入高压区,下沉速度增大,浮尘迅速下降,于26日00时飘移至朝鲜半岛的汉城东北方大约90km处的971.1hPa的空中。以后移速减慢,继续向日本海西南部的方向移去(见图3)。在这条路径上,唐山站、汉城站分别于25日09时、26日00时观测到了天空上的浮尘。另外,26日00—06时,除汉城外,朝鲜半岛的木浦、釜山等站以及日本海上的松岛、西乡等岛屿站亦都先后观测到了天空上的浮尘。上述观测事实表明,24日午后发生于中蒙边境和内蒙中部的沙暴天气所引起的浮尘40小时以后便飘移到了朝鲜半岛。

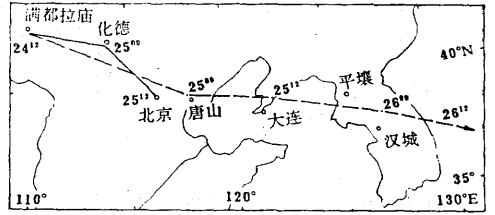


图3 计算的浮尘平面轨迹图

实线:浮尘后向轨迹

虚线:浮尘前向轨迹

比较浮尘的后向轨迹和前向轨迹(图3),差异明显。其原因除上述的地形影响及起始点不同外,更主要的还是由于高低层风速、风向不同造成的。仅以风的 $u$ 分量来说,从北京、化德至满都拉庙的后向轨迹,其 $u$ 值分别为3、5、7、7.7 $m\cdot s^{-1}$ 左右。而由满都拉庙至唐山仅12小时的前向轨迹, $u$ 值分别为12.7、12.0 $m\cdot s^{-1}$ 左右。后者远远大于前者,故而前、后向轨迹的差异显而易见。

#### 5 结论

5.1 用上述方法计算的浮尘前向轨迹、后向轨迹以及源地位置与天气实况检验分析结果相比,两者基本相符。由于该方法既考虑了空气的水平运动,又考虑了空气的垂直运动,因此,所描述的空气质点在三维空间中的运动轨迹,比用二维空间对大气运动的定性分析更加接近实际。

5.2 “北京的浮尘源地是内蒙的满都拉庙附近地区”是根据一个天气个例计算分析得出的结论。如果将多个天气实例进行计算分析,必能得出影响北京地区的浮尘源地的大致地理分布,这对有的放矢地建造防护林、净化北京地区的环境有一定的指导意义。

5.3 上述的计算方法是在假定空气质点运动的加速度不变的条件下导出的,这在实际大气中很难完全满足。特别当天气形势调整,空气质点的运动发生剧烈变化时,其计算结果可能会有较大误差,所以该方法更加适用

于风速变化不大的情况。对上述不足克服的办法之一是缩小  $\Delta t$ , 使之逼近假设条件。例如可把探空站每天2次观测增加至4次、6次, 甚至更多次, 这样可能会得到较高的计算精度。这种办法在诸如台风试验、暴雨试验以及大气污染观测等期间, 是不难实现的。

致谢: 本文得到了廖洞贤先生的热情指导

## 参考文献

- 1 廖洞贤, 王两铭. 数值天气预报及其应用. 北京: 气象出版社, 1986, 138—140.
- 2 朱乾根等. 天气学原理和方法. 北京: 气象出版社, 1981, 498—499.
- 3 董立清. 全国气温偏低, 北方降水偏多. 气象, 1990, 16(7): 58—61.

# Calculations on a Source of Floating-Dust and Its Three-Dimensional Path

Ren Jinsheng

Dong Liqing

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

## Abstract

With the three-dimensional wind fields and calculation on the path of an air parcel, the floating-dust shift caused by a sandstorm was tracked in opposite direction. The position of the floating-dust source and its three-dimensional path are determined. The result is consistent with the weather reports. It could be applied practically in determining the source of pollutants in the atmosphere.

**Key words:** dust source three-dimensional path calculation and analysis