第45卷 第1期　　气 象 学 报　　Vol. 45, No. 1
1987 年 2 月　　ACTA METEOROLOGICA SINICA　　Feb., 1987

我国大气污染物远距离传输的估计
I：轨迹分析*

盛裴轩　毛节泰**

（北京大学地球物理系）

提　　要

根据 1979 年 1,4,7 和 10 月的 1500 m高度的测风资料，利用二维流场，计算了通过北京、西安、兰州等 10 个城市空气块的轨迹。依据轨迹及其终点的分布讨论了不同季节对上述这些城市有影响的污染物的来向及以这些城市为源地的污染物的远距离输送问题。

一、引　　言

酸性雨是当前国际上呼声最高的环境问题之一。其表现为大范围降水的酸度增加，并造成对生态环境的有害影响。对酸性雨的化学成份分析表明，酸度的增加和雨水样品中硫酸根和硝酸根离子的增多有明显的关系，从而推断酸性雨是由于人类活动排放大量有害物质的结果[1]。

目前对酸性雨形成的了解可概述如下：从自然源和人工源排放的大量污染气体，尤其是燃烧过程中排放的二氧化硫和氮氧化合物，经过大气中的扩散和传输，其间经历了一系列复杂的化学反应过程，最终被氧化为各种致酸物质。这些被氧化了的二次污染物一部分经干清除过程直接沉积到地面，一部分则通过成云和降水过程落到地面，这就是酸性雨。由于这种化学转化和清除过程需要一定的时间，从源排出的污染物可在大气中停留1—2天，而被输送到离源上千公里的范围。因此它是一种远距离输送的问题。

污染物远距离输送的路径，主要取决于空气的运动。若假设污染物在混合层内已达到均匀混合，则可取混合层中部的风场作为参考，计算气块的运动轨迹，从而估计排放的污染物的去向和影响本地区污染物的来向。但这种等压面（或等高面）上的风场是否能反映气块实际运动的轨迹，是有很多疑问的。最主要的问题是没有考虑垂直运动。也有人提出利用等熵面的轨迹[2]。在干绝热的条件下，气块是沿着等熵面运动的，但在出现凝结和降水时，这一条件就不满足了。近年来开始利用数值预报输出的流场来计算气块运动的轨迹，它可以同时考虑其水平和垂直方向的运动，因此是一种较好的方法。问题是要求计算机的容量较大，一般不易做到。虽然等压面（或等高面）轨迹有其局限性，但它的方法简单，便于使用。而且对绝大多数没有激烈天气过程的地区，垂直运动的影响相对来讲是较小的。因此可以指望在对长时间平均的过程中，得出有一定代表意义的结果[3]。

* 本文于 1985 年 2 月 7 日收到，1985年 7 月 30 日收到修改稿（教育部科研基金资助的课题）。

** 张杰、段振武做为毕业论文参加了部分工作。

1972 年 Rodhe[4] 曾提出一个二维(850 hPa 等压面)模式研究北欧长年平均的二氧化硫污染。此模式简单而且结论明确。Bolin和 Persson[5], Fisher[5,6]等都在这方面做了许多工作。本文参考 Rodhe 的工作,并考虑到我国现有气象资料,采用 1500 m 的高空风记录计算了国内几个大城市所排放的污染物月平均扩散范围,并估计了对某些城市产生污染的远距离源的地理位置。这些都是依据大量轨迹端点、终点的分布所得到的统计结果。

二、模式与计算方法

假设在混合层中大气污染物的浓度及其在单位面积上的沉降量与离源的距离成反比,并且自身的衰减呈指数形式。当污染物的输送是各向同性时,有

$$d(r)=\frac{C}{r}e^{-r/r_0} \tag{1}$$

式中 r 是离源的距离;$r_0=vT$ 是一个决定衰减率的特征距离,v 和 T 分别是污染物的平均输送速度和在大气中的停留时间;C 是与源强有关的常数。$d(r)$就是距离 r 处单位面积上的沉降量。

实际上气流对污染物的输送是各向异性的,且停留时间 T 也与各方向的干、湿清除机制有关。为此把源的周围自正北方向开始,顺时针分成八个45°的扇形。第 i 方向上距离 r 处单位面积上的沉降量为

$$d_i(r)=\frac{C_i}{r}e^{-r/r_{0i}}$$

假定单位时间内的排放量 M 等于单位时间内总的沉降量,则在各向同性条件下有

$$M=\int_0^\infty 2\pi r d(r)dr$$

考虑到各向异性,设 f_i 是第 i 个扇形内轨迹终点出现的百分率,则在此扇形内的排放量为

$$M_i=M\cdot f_i=2\pi C_i r_{0i}/8$$

得 $C_i=4f_iM/\pi r_{0i}$,故

$$d_i(r)=\frac{4f_iM}{\pi r_{0i}}\frac{1}{r}e^{-r/r_{0i}} \tag{2}$$

(2)式即可用来计算 i 方向 r 距离处单位面积单位时间内的沉降量。

为了计算污染物的输送轨迹,首先在全国及我国毗邻地区均匀地选定有测风资料的台站共 65 个。采用海拔 1500 m处的风。对位于 1500 m 以上的高原台站,则用离地面 1000 m左右的风速代替。网格范围为 2200×2800 km^2,格距 200 km。用权重插值法定出网格点上风速的两个分量。令(x_i,y_i)和(x,y)分别是测站和格点的坐标,则测站和格点的距离

$$l_i=[(x_i-x)^2+(y_i-y)^2]^{1/2}$$

权重插值方程为

$$S=\sum_{i=1}^{n}\frac{W_i}{\sum_{j=1}^{n}W_j}\cdot S_i$$

式中 $W_i=\frac{1}{1+l_i^2}$ 是权重；S_i 是相应测站的风速分量。为便于计算，在每个网格点周围均匀地选取 4 个台站，因此 $n=4$。

根据格点上风速的两个分量，可再次运用权重插值法得到网格内部任一点上的风速，并进而计算气块的轨迹。

目前测风站的两次观测间隔为 12 h。为提高计算精度，用相邻两次观测的资料线性内插得间隔为 2 h 的轨迹点上的风速，使计算的气块运动轨迹连续而光滑。图 1 是 6 个城市冬季的气块轨迹。

三、计算结果

我们计算了北京、上海、兰州、广州、武汉等 10 大城市 1979 年 1,4,7,和 10 月污染物的来向和去向，以代表四季的平均情况。

1．城市污染物的远距离输送

以城市为源地，计算得到了不同时段(12,24,36,48,64,72 h)气块轨迹的终点。根据这些点在源地各方向出现的频率画出玫瑰图。它可大致反映污染物在各个方向上分布的趋势。图 2 是 24 h 的轨迹终点玫瑰图。其它时段的图虽稍有不同，但基本趋势一致。

由于风速大污染物稀释快，风速小污染物不易扩散。为综合考虑风速及输送方向两者对污染物浓度的影响，采用(2)式计算城市周围污染物的可能沉降量，并画出等值线分布。计算中假定月排放量皆为 10^{10} 单位，停留时间为 24 h，以便对各城市和不同季节进行比较。等值线上所标数值的单位为 m^{-2}月$^{-1}$。

根据等值线分布图，可把所计算的城市分成三种类型：

1) 兰州和重庆是一种类型。因为地形影响，排放出的污染物大多停留在本地区及附近，局地的浓度很大。兰州的大气污染物主要向西输送，重庆主要向西北方向输送，估计



图 1　1979年1月15—18日07时气块轨迹图(1:15日,2:16日,3:17日,4:18日)

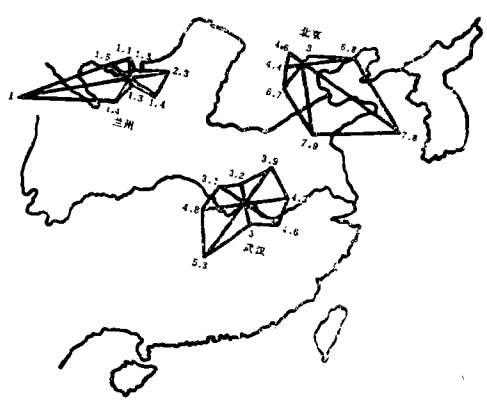


图 2　轨迹终点玫瑰图(1月)
(矢径长度表示频率，数字表示该方向的平均速度)

会影响到成都。图 3 为重庆的等值线分布图。

2) 北京和呼和浩特是另一种类型。这两个城市位于北方。春、秋、冬季常吹西风或西北风，污染物主要向东及东南方向输送。夏季则不同，几乎是各向同性扩散的(图 4)。

3) 西安及武汉位于我国中部。它们全年平均的等值线分布有相似之处，但各季度的分布则不同(图略)。西安在四个季节基本上是各向同性扩散的，而武汉的 4，7，10 月是向着三个不同方向输送的。

为表示大气污染物随时间扩散状况，定义特征尺度为 $\bar{r}$。在以 $\bar{r}$ 为半径的圆(圆心是该时段轨迹端点的中心)中包含了 50%的轨迹终点。我们计算了兰州、重庆、西安、武汉四个城市 7 月及 10 月的 $\bar{r}$-t 曲线(图 5)。由图可见，兰州、重庆的曲线平缓，说明污染物随时间稀释很慢，而西安和武汉则扩散得快一些。

东北地区是我国重工业集中的地区之一，本应着重研究。但因邻近地区的探空资料不全，台站又少，计算轨迹的误差大，所以难以讨论东北三省污染物远距离输送问题。广州临近南海，海洋上台站稀少，计算结果也只能用作参考。

2. 远距离源对大气污染的可能影响

这是污染物的来向问题。我们计算了到达城市的空气块在前 72 h 内的轨迹，并据此统计了不同时段时各方向轨迹频率 f_i。为讨论问题方便，不妨假设每个扇形区域内离城市等距离处存在一个同等强度排放量的虚源。仍利用方程(2)式计算，则此式中 $d_i(r)$ 就表示了第 i 个扇形内排放源对城市在单位时间单位面积上污染物的可能沉降量，f_i 为一个月内该方向的空气团到达城市的频率。计算中假设虚源离城市 400 km，污染物停留时间为 24 h。根据互易性，f_i 可以采用前 24 h 各扇形内的轨迹端点频率 f_i' 的数值。根据算出的 $d_i(r)$ 值，求得各方向所占的百分比，就可以比较来自各方向污染物对该城市可能

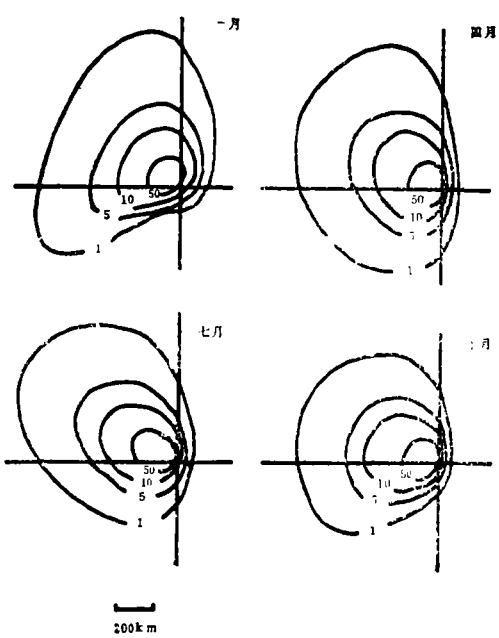


图 3 重庆的可能沉降量等值线分布图

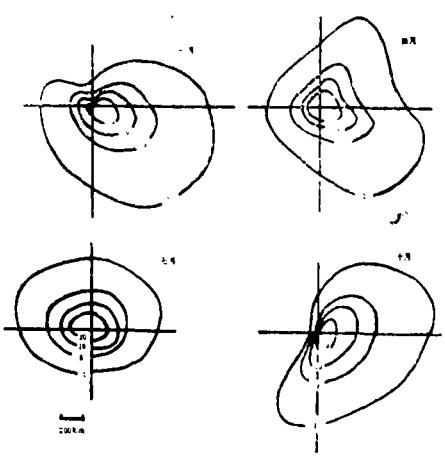


图 4 北京的可能沉降量等值线分布图

影响的大小。表 1 列出了 10 个城市不同季节远距离污染物来向的分布。从表中可以看到，在 10 月和 1 月秋冬季节，由于大多数城市上空是西北气流控制，远方的污染物主要来自西北方向。4 月和 7 月的春夏季节则不同，位于北方的城市，如北京、西安、呼和浩特等仍以西北方向为主，但此方向所占的比重已有下降，而其它城市则变化较大。

表 1　不同季节时各方向污染物对城市的影响（%）

城市 \ 月份 \ 来向[1]	1	2	3	4	5	6	7	8	城市 \ 月份 \ 来向[1]	1	2	3	4	5	6	7	8
北京	1	7.1	2.3	1.6	0	0	16.0	**55.2**	17.8	太原	1	4.4	1.5	2.6	0	2.9	16.2	**54.6**	17.8
	4	5.5	0	0.1	11.2	9.5	13.2	**37.7**	22.8		4	7.3	2.1	0	13.5	8.4	15.2	28.5	25.0
	7	13.1	6.9	3.8	4.4	10.3	15.7	32.8	13.0		7	11.7	12.2	4.8	3.0	7.6	11.3	21.6	**27.8**
	10	9.6	0	0	1.5	3.1	18.7	**41.4**	25.7		10	11.7	0	2.8	0.1	6.8	13.5	**39.5**	25.8
郑州	1	5.1	1.5	0	1.5	1.7	16.9	**49.5**	23.8	呼和浩特	1	8.1	3.3	0	0	0.9	11.6	**59.1**	16.7
	4	4.3	3.6	0	14.7	9.8	17.8	23.3	**26.5**		4	14.7	2.3	1.6	5.8	3.8	11.3	**43.6**	16.9
	7	7.8	8.8	8.1	2.5	12.5	14.6	**24.5**	20.9		7	16.6	9.5	8.1	3.1	3.1	10.0	32.3	17.3
	10	15.7	5.3	1	0.7	1.3	5.2	**37.6**	33.2		10	10.3	0	0	1.7	6.6	16.7	**40.7**	24.0
上海	1	1.6	0	0	0	1.6	29.1	**45.9**	21.8	兰州	1	14.8	0	0	0	0	1.7	43.7	39.8
	4	6.3	0	3.7	7.4	7.1	25.5	12.8	**37.2**		4	3.4	0	4.4	1.7	2.2	0	10.9	**77.4**
	7	3.2	3.4	8.3	7.9	1.4	**47.3**	26.9	6.6		7	**42.3**	7.4	0.9	0	0	0	22.9	26.5
	10	16.0	10.6	1.3	0	0	5.4	26.3	**40.4**		10	11.4	0	1.8	1.8	0	0	32.6	**52.4**
武汉	1	6.5	1.1	0	5.4	4.3	19.0	31.2	**32.0**	广州	1	14.8	0.1	0	1.2	21.6	**47.9**	17.9	2.5
	4	15.7	4.3	1.7	5.0	16.4	13.0	17.3	**26.6**		4	11.4	2.4	2.5	16.4	22.1	**35.5**	7.2	2.8
	7	1.9	7.4	7.1	3.4	15.4	**40.3**	21.2	3.3		7	13.6	3.1	3.8	13.2	23.9	**33.7**	2.3	1.4
	10	29.1	6.6	0.1	0	0	5.0	16.4	**42.8**		10	**90.3**	6.3	0	0	0	0	0	2.9
西安	1	3.2	3.2	1.6	2.3	0.2	8.1	**43.4**	**41.0**	重庆	1	25.4	18.3	0	5.9	19.3	0.2	3.3	**27.6**
	4	0.2	3.3	0.8	18.8	4.8	6.2	19.6	**46.3**		4	**31.9**	8.9	5.5	**30.4**	10.2	0.9	0	12.2
	7	15.3	3.6	5.8	14.8	4.9	7.3	17.2	**31.3**		7	21.0	7.3	6.8	25.8	**31.5**	0.7	0.1	6.7
	10	19.2	0	2.3	7.6	0.3	1.0	31.1	**38.3**		10	**38.2**	18.2	13.3	4.1	1.9	0	0	24.2

[1] 污染物的来向数值是指由正北方向起，顺时针旋转所分的 8 个扇形的顺序。

根据以上结果，为减少污染物远距离输送对城市的影响，在城市毗邻地区建设工矿企业时，应考虑选取在影响较小的方向。

四、讨　　论

这个远距离传输模式是根据气块的轨迹做的，计算量较大。为了探讨能否用单站的 1500 m 高空风风向频率代表气块来向的频率，我们对六个城市作了对比。图 6 是北京、广州、兰州的对比图。

比较后发现，北京（除 7 月）、上海的风向和气块来向基本一致；广州也基本一致，但极大值角度错开 45°；武汉 7 月的一致，而 1 月 4 月偏离较大。西安、兰州则气块轨迹的来向频率和风向频率极大值完全不符。据分析，这两个城市周围地区风速常偏小，而风向的变化却很大，气块的轨迹往往旋转而与单站风向有很大的偏离。从图 1 的轨迹曲线也可

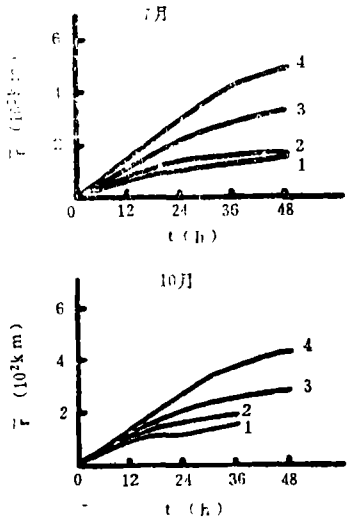


图 5 特征长度 $\bar{r}$ 随时间的变化
(1:兰州,2:重庆,3:西安,4:武汉)

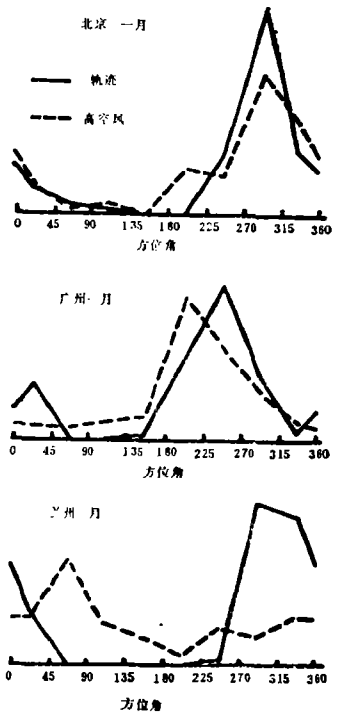


图 6 风向频率和气块轨迹的来向频率对比图

以看出这一趋势。

大气污染物在远距离传输的过程中还伴随有化学转化和干、湿清除,其中降水的清除作用尤为重要,它极大地影响着污染物在大气中的停留时间。本文仅初步讨论了污染物远距离输送的轨迹问题,拟将进一步研究干、湿清除的影响。

参 考 文 献

[1] 鹤田治雄,大气污染物的长距离输送,变质及除去过程,天気,28,803—822,1981。

[2] Davis, W. E., and L. L. Wendell, Some effects of isentropic vertical motion simulation in a regional scale quasilagrangian air quality model, BNWL-2100 PT 3, Battelle Pacific Northest Laboratories, Richland, Wash., 1977.

[3] Rao, S. T. et al., A comparative study of two trajectory models of long-range transport, *JAPCA*, **33**, 32—41, 1983.

[4] Rodhe, H., Study of the sulfur budget of the atmosphere over Norther Europe, *Tellus*, **24**, 128—138, 1972.

[5] Bolin, B., and C. Persson, Regional dispersion and deposition of atmospheric pollutants over Western Europe, *Tellus*, **27**, 281—310, 1975.

[6] Fisher, B. E. A., The long-range transport of sulphur dioxide, *Atmos. Environ.*, **9**, 1063—1070, 1975.

[7] Fisher, B. E. A., The calculation of long term sulphur deposition in Europe, *Atmos. Environ.*, **12**, 489—501, 1978.

THE ESTIMATION OF THE LONG-RANGE TRANSPORT OF AIR POLLUTANTS IN CHINA——I. TRAJECTORY ANALYSIS

Sheng Peixuan Mao Jietai

(Department of Geophysics, Peking University)

Abstract

The trajectories of air parcels through the ten big cities of China (Beijing, Xian and so on) have been computed using the data of wind fields on 1500m elevation. Based on these trajectories and the end points of trajectories, it is estimated that the impact due to long-rang transport of pollutants from the city sources and these cities would be influenced by the surrounding distant sources in different seasons. An advantage of the statistical trajectory model is expected that the error of the individual trajectories tends to be averaged out in the long run.