

东北亚地区污染物输送的等熵轨迹分析 ——周边国家对中国的影^{*}响

盛裴轩 毛节奏

(北京大学地球物理系, 暴雨监测与预报国家重点实验室, 北京, 100871)

摘 要

利用等熵轨迹模式研究了中国北方和邻国几个大城市排放的污染物的输送趋势。计算了1992-1994年期间1, 4, 7和10月的每天两次轨迹, 并以这些城市为目标, 对其前向或后向轨迹线上每30min的轨迹点作统计, 画出等熵轨迹概率分布图。这些图形表明, 等熵轨迹的概率分布能很好地反映污染物的中、远程输送且有明显的季节变化。就前向轨迹区而言, 在除夏季外的其它季节里, 蒙古乌兰巴托的轨迹区能覆盖到中国华北, 俄罗斯的赤塔也能影响到中国东北的大兴安岭地区。而平壤和汉城的前向轨迹区在夏季可向北伸展到中国。

关键词: 远距离输送, 等熵轨迹, 东北亚。

1 引 言

大气污染物的输送是无国界的。中国东北、华北地区和俄罗斯、朝鲜、蒙古接壤, 隔海和韩国、日本相望, 在这些国家和地区之间污染物的远距离输送一直是有关国家十分重视的问题。

探讨污染物的远距离输送, 寻找可能的源或汇, 常用的一种方法是计算作为污染物载体的空气块的运行轨迹, 即拉格朗日模式。拉格朗日模式比较简单, 便于利用几天甚至几年的气象资料计算轨迹, 并依据大量轨迹进行综合分析, 作出直观而清晰的输送的图象, 得到对一个区域的宏观的总体看法。轨迹计算的方法有多种。早期是用等压面轨迹法, 在500hPa, 700hPa或850hPa等压面风场的背景下进行计算, 其优点是简单易做, 不足是未考虑垂直气流的影响, 而且在海拔超过1500m以上的地区, 850hPa等压面轨迹就没有意义了。近些年来, 三维地形坐标系因为能较好地反映气块空间运动轨迹, 在酸雨来源^[1-2]和沙尘暴源地^[3]的探讨中都已显示了它的实用价值。

等熵面轨迹是从另一个角度研究气块的运动路径。因为在干绝热过程中气块的熵不变, 等熵面轨迹可以真实地反映气块的三维运动路径, 故曾被广泛应用到沙尘暴的研究中, 例如Merrill^[4]讨论了亚洲大陆沙尘向北太平洋的输送。对于涉及到云雾降水的过程, 因不满足等熵条件, 计算的轨迹与真实的路径将会有差异, 但在大气污染物远距离输送过

* 初稿时间: 1996年6月27日; 修改稿时间: 1996年12月16日。

资助课题: 国家八五攻关项目85-912-01-02专题。

程中,大多数情况下仍可认为接近等熵过程。Haagenson^[5]就研究过锋面雷暴云系中等熵轨迹与降水酸度的关系, Merrill^[6]配合大气/海洋化学实验(AEROCE),曾计算过大西洋沿岸几个地点的等熵气流概率分布,以探讨污染物的可能来源。

等熵轨迹即是气流在等熵面上的运行路径,等熵面即等位温面。位温 θ 的计算公式是:

$$\theta = T \left(\frac{1000}{P} \right)^{0.286} \quad (1)$$

上式中 T 是压强 P 处的温度。等熵面轨迹的基本假设是认为大气做干绝热运动。若空气块有非绝热热量输入和相变潜热时,气块就会穿过等熵面,因此等熵轨迹在贴地面气层及有大片降水的区域是不合适的。根据大气热力学理论,在降水区应该用假相当位温或假湿球位温,因为它们在干、湿绝热过程中都是保守的。假相当位温 θ_{sc} 可表示成

$$\theta_{sc} = \theta \exp\left(\frac{L_v r_s}{c_{pd} T}\right) \quad (2)$$

式中 L_v 是汽化热, c_{pd} 是干空气定压比热,当饱和混合比 $r_s = 0$ 时, $\theta_{sc} = \theta$ 。

θ_{sc} 等值面的缺点是在空间可能出现折叠,因它不是高度的单调递增函数,在这样的面上计算轨迹有很多困难,所以目前尚未见到这方面的工作。另一方面,锋面的冷区中或高度较高处的等相当位温面,因水汽含量少,与等位温面类似,因此一般只做等位温面分析。用等位温面轨迹讨论雨区中的气块运动将会产生误差,但若是研究降水较少的东北亚地区,并且是对某个季节的大量轨迹进行统计,则轨迹的总体行为对该季节还是有代表性的。

本文拟用等熵轨迹研究中国北方及相邻国家的几个大城市上空气流在不同季节的总体趋势,探讨这些城市排放的污染物对中国可能产生的影响。

2 等熵轨迹的计算

等熵轨迹的计算分两个步骤:首先,确定所计算区域内三维空间的气流及位温分布。第二步,在等位温面上求轨迹。

在自由大气中,位温通常是高度的单调递增函数。但在贴地面气层中,有可能出现超绝热减温率,使位温随高度不变甚至减少。为了避免等位温面在近地层处与地面相交太陡及在强的地面加热条件下等位温面折叠,破坏垂直单调性,作者采用了混合坐标系,即上层用等熵面坐标,低层用 σ -地形坐标系,

$$\sigma = \frac{P - P_{\text{top}}}{P^*}, \quad P^* = P_{\text{sur}} - P_{\text{top}} \quad (3)$$

$P_{\text{sur}}, P_{\text{top}}$ 分别是地面及顶层的气压, $P_{\text{top}} = 100\text{hPa}$,由地面向上取2层,即 $\sigma = 1$ 及 $\sigma = 0.96$ 。令等位温面在向地面延伸时与 $\sigma = 0.96$ 的曲面相交。 $\sigma = 0.96$ 的面在地表以上150-300m,这样既反映了边界层内的流动,又考虑了地形的影响。大气中有无数等熵面,计算轨迹只能在有限的等熵面上进行,选择的标准是:

- (1) 必须能代表对污染物的中远程输送起作用的气流场的特点;
- (2) 必须能大致符合绝热条件。

由于大气中主要天气现象在对流层下部比较显著,所以等熵面不能取得太高;而近地面层又有非绝热过程,故也不能取得太低。从污染物输送的角度看,3000m以上多偏西风,轨迹走向几乎都是由西向东可凭经验估计,100–300m以下的风只对局地污染有意义,因此选择适宜的等位温面就成了计算等熵轨迹的关键。区域内各地的气温和海拔高度差别较大,具有不同的位温值,难以在同一个等位温面上计算各地的等熵轨迹。故本文规定在各个目标点的不同位温面 $\theta + \Delta\theta$ 上计算轨迹,其中 θ 是各目标点在 $\sigma = 0.96$ 面上的位温值,增量 $\Delta\theta$ 选为3K或6K,当位温面接地时令气块沿 $\sigma = 0.96$ 面上的气流运行。上述做法的优点是,照顾到各目标点不同的位温值,并且避免了位温面迅速接地导致的困难,位温面 $\theta + \Delta\theta$ 可对应于上边界层或自由大气低层中的等熵面。

气象资料取自于全球的常规高空及地面观测资料。以1992–1994年的1月、4月、7月和10月分别代表冬、春、夏和秋季。在台站稠密的亚洲大陆及日本列岛上,精度是可以满足的,但在海洋及荒漠地区,台站稀少,将会给计算造成误差。每天两次即12h间隔的高空气象观测资料是目前最易得到的,也是计算大量长距离轨迹时方便和可靠的资料。

为研究中国北方与相邻国家之间污染物输送情况,计算区域以 45°N , 120°E 为中心,包括华北、东北、俄罗斯的部分远东地区、蒙古、朝鲜以及韩国和日本。选择国内外部分城市为目标点,分季节每天两次计算各目标点在等熵面上后向(来向)和前向(去向)48h的轨迹,以讨论污染物的输送方向。每个目标点在一个月内有50–62条轨迹,若每30min在图上标出一个轨迹点,则每条轨迹上有96个轨迹点,该目标点周围就有4800–5952个轨迹点。利用统计方法可计算这三年期间每个网格内轨迹点数占总点数的百分比,即轨迹点在各网格内出现的概率。再以最大概率的格点为中心,积分得到拥有12.5%,25%,50%及75%轨迹点的区域,它表明了气块到达(或离开)该目标点的占优势的路径方向和停留时间较长的区域。为便于讨论各个目标点轨迹分布的一般规律,以24h为界分成两段处理。

图1即以北京为例说明上述的计算方法。1993年4月4日及7日(图1a), $\sigma = 0.96$ 面上的位温值分别是274K及278K, $\Delta\theta$ 选为3K,故分别在 $\theta = 277\text{K}$ 及 281K 位温面上计算48h的后向轨迹,皆以30min间隔的轨迹点表示(有些点因太密似连成了实线)。图1b则是1993年4月全月每天两次的后向轨迹。根据这些轨迹点分别计算,得到0–24h和24–48h的概率分布(图1c, d)。等值线上标明轨迹点出现的概率(%),由外向内依次是包含有75%,50%和25%的轨迹点的区域(12.5%的区域因较小而省略),图1d中,概率为0.30(%)的等值线里包含75%的轨迹点,0.79(%)的等值线里包含50%的轨迹点,以此类推。分成0–24h及24–48h两段处理后,其中0–24h的轨迹点多在近处且以该目标点为中心;而24–48h的轨迹点的中心偏离目标点,具有长距离输送的意义,且各季节特点不同。故本文主要讨论24–48h的轨迹点的概率分布。

有些作者(如Merrill^[6]和Poirot等^[7])统计的是等熵轨迹在网格内停留时间的概率分布,他们在图上标的是6h间隔的轨迹点,需逐段计算轨迹连线(折线)在各网格内经过的时间,工作量较大。作者统计的是30min间隔的轨迹点,每格内轨迹点的多少与停留时间成正比,意思相近,但计算就简便多了。

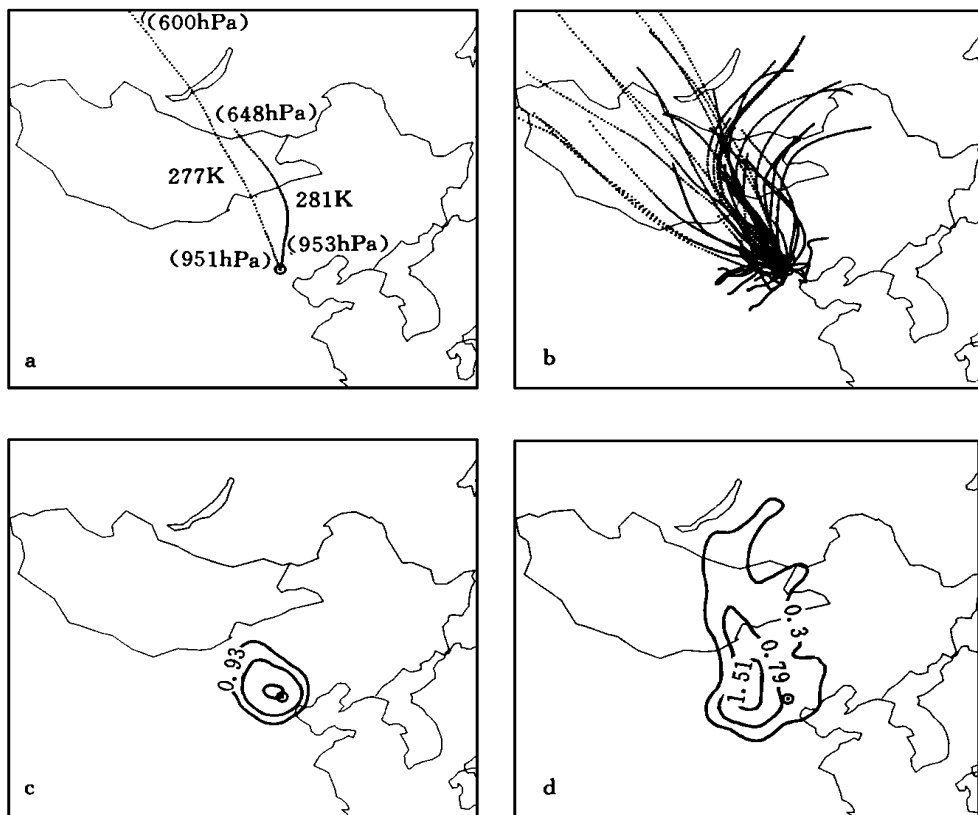


图1 等熵轨迹概率分布的计算

(a. 1993年4月4日和4月7日08时后向轨迹; b. 1993年4月的后向轨迹;
c. 0—24h 轨迹概率分布; d. 24—48h 轨迹概率分布。代表北京)

各个城市的计算结果分别列于图2至图6, $\Delta\theta = 3\text{K}$ 。应该指出, 影响一个地区降水酸度的原因是复杂的和多方面的。云中气溶胶不仅来自周围地区的远距离输送, 还来自当地的人为排放物及下垫面, 云下过程对降水化学成分的贡献在城市地区更不可忽略, 中国北方地区因为云下碱性气溶胶的中和作用, 一些大城市虽然 SO_2 和 NO_x 浓度很高却并无酸雨, 就是例证。由于本文仅从气象学的角度讨论污染物的输送趋势, 不涉及各地方排放量的多寡以及各种化学成分, 所以不具体讨论各地酸沉降的来源和分布。

3 等熵轨迹的分布

3.1 轨迹概率分布的季节特点

3.1.1 中国境内

选取了经济较发达的北方几个城市如北京、沈阳、哈尔滨及大连等, 具体分析其48h内的前向及后向轨迹形态。由于它们处在大致相同的环流形势下, 各个季节的轨迹形态有

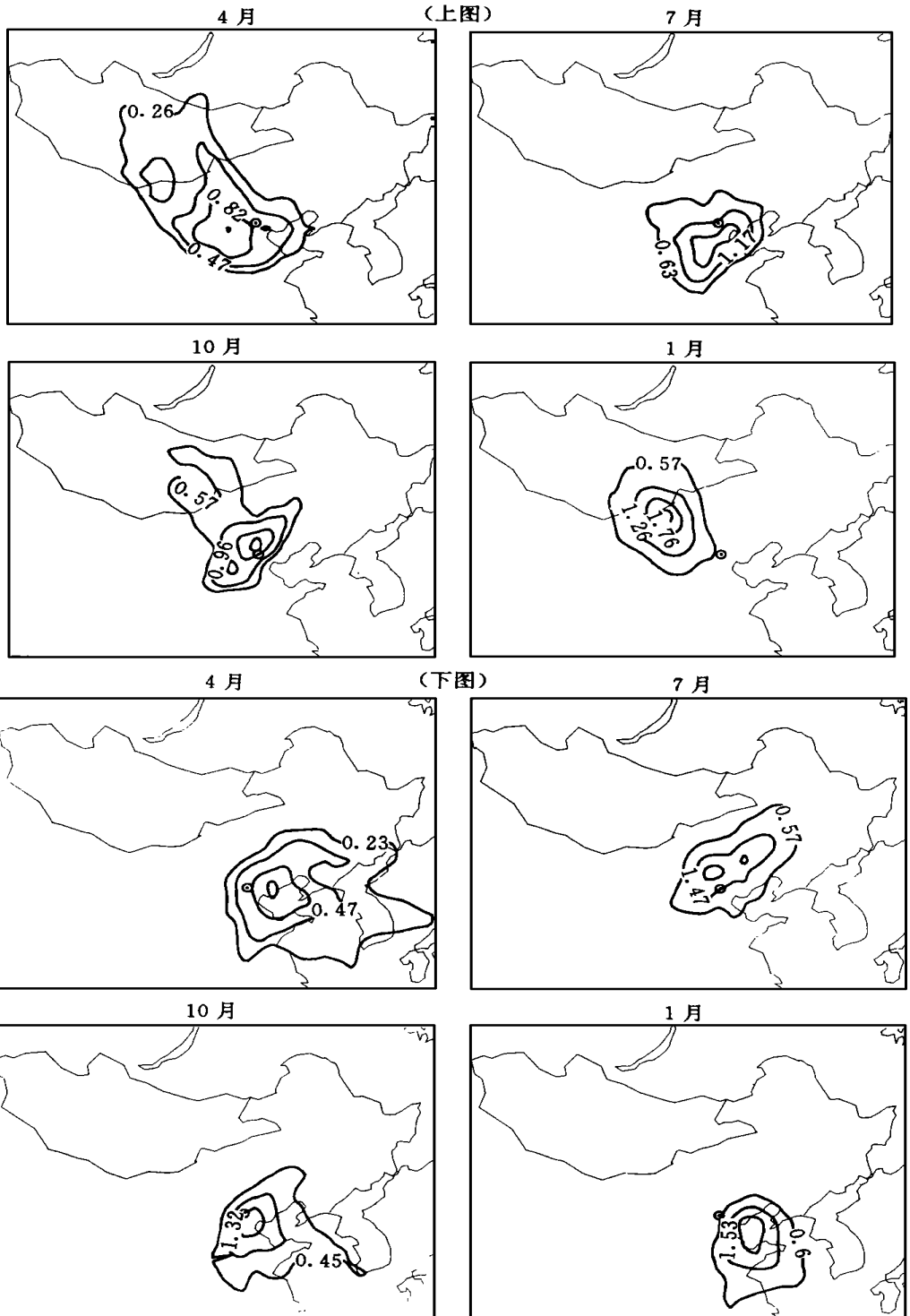


图2 北京()在不同月份的等熵轨迹概率分布
 (上图为来向, 下图为去向, 数字表示月份)

类似的特点, 因此本文仅以北京为例。

分析北京的前向和后向24—48h 轨迹的概率分布(图2), 其4月和10月有相似之处, 等熵轨迹中的绝大部分(50%的轨迹点)来自西北或西南偏西, 春季华北常有西北大风, 故轨迹区向西北方向延伸到蒙古中部。相应地, 北京地区排放的污染物在此期间主要是向东南方向(图2), 集中在东部, 临近渤海湾。1月则处于冬季, 在西北气流的控制下, 轨迹集中且速度较快, 反映在图上, 轨迹点所占的区域比较小且中心偏离北京。7月的轨迹概率分布图自西南到东北, 比较有特点, 这与夏季副热带高压北移, 华北平原受中心位于印度北部的强大热低压控制, 北京常处于偏南气流影响下有关。此期间风速较小, 长距离输送的影响不大。

3. 1. 2 周边国家对中国的影响

3. 1. 2. 1 蒙古

蒙古首都乌兰巴托是该国最大的城市, 集中了全国大部分的工厂和企业, 目前只有它排放的工业污染物有可能影响到中国。由图3可见, 除7月份以外, 其它3个月的轨迹区都已到了中国境内, 以4月份最为突出, 24—48h 前向轨迹区的中心在中国境内, 分布在二连浩

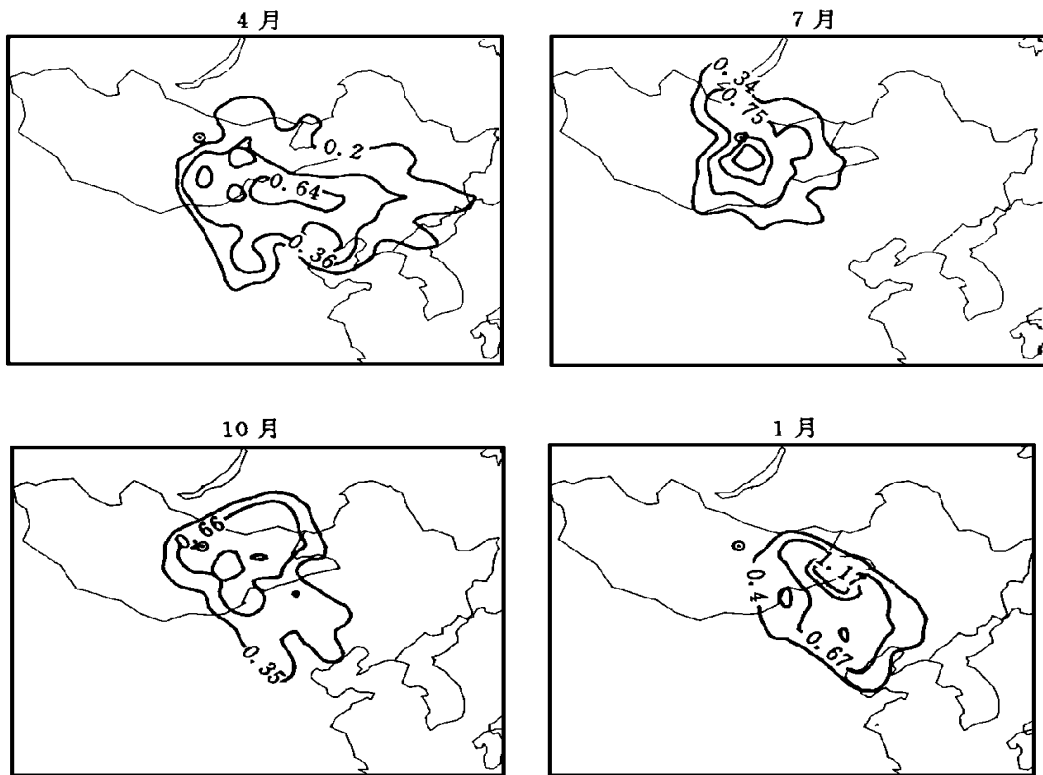


图3 乌兰巴托()在不同月份的前向等熵轨迹概率分布

特至白城一带。春季是风沙严重侵袭华北的季节,二连东南是浑达善克沙地,据文献[3]分析,乌兰巴托经二连到北京恰是北京风沙来源的东路,一般比由西路(新疆、甘肃)来的沙尘暴弱且时间短。秋季和冬季乌兰巴托经常处于蒙古高压控制下,除寒潮爆发时伴随西北大风的天气以外,前向轨迹的密集区仍在蒙古境内,对中国有影响,但不大。

3.1.2.2 朝鲜半岛和日本

朝鲜半岛紧邻中国东北,又处于天气系统移动的下游,故与东北、华北关系密切。所选择的汉城、平壤两城市,因其地理位置接近,所以两城市轨迹的基本形态也相似。汉城及其附近地区拥有全国25%的人口、32%的机动车及40%以上的工业生产,是朝鲜半岛上SO₂排放量最多的地区,但是因平壤和中国东北更接近,所以图4给出了平壤的轨迹分布。

分析平壤的前向轨迹可以看出,7月和10月,平壤的前向轨迹区覆盖范围主要是在朝鲜半岛内,但往东北和西南方向延伸,中国吉林、辽宁的部分地区和山东半岛西部处于平壤的影响之下。由于日本南部处于朝鲜半岛的下风方向,日本的九州、四国和本州南部常处于汉城的前向轨迹区内,特别是1月和4月,常有西北大风自东亚大陆吹来,使这种趋势

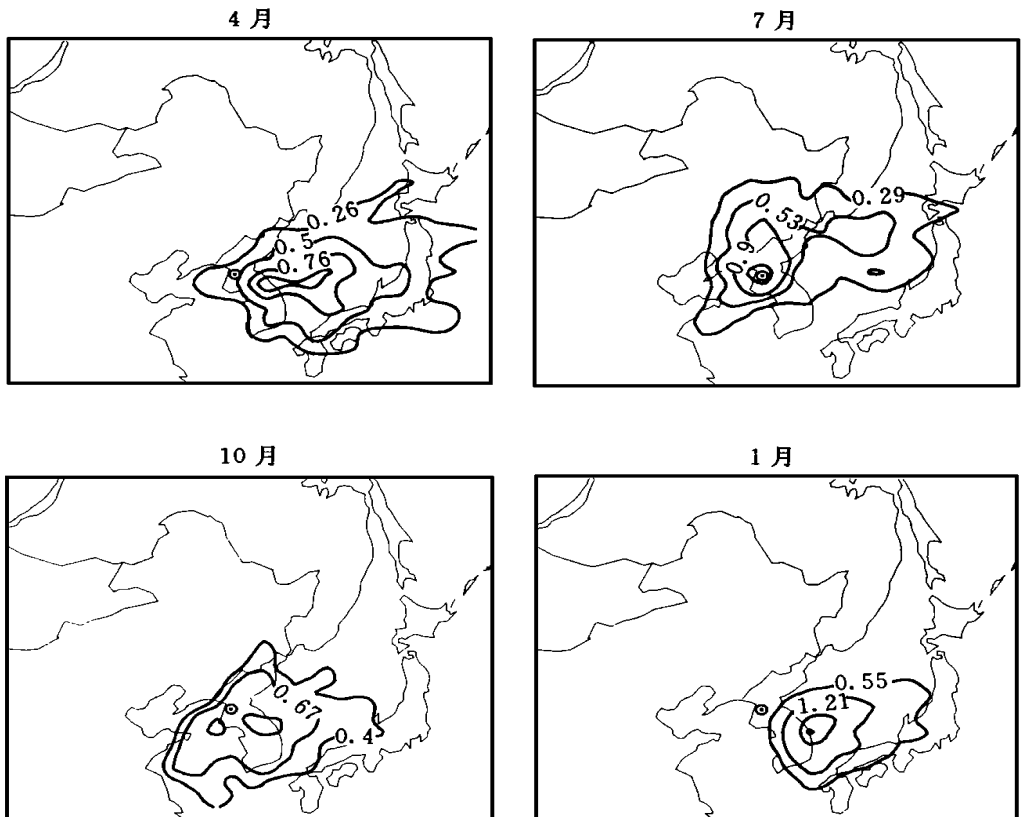


图4 平壤()在不同月份的前向等熵轨迹概率分布

更明显。

东京区、大阪区和名古屋区是日本最重要的工业区,那里集中了约全国一半的人口,这些地区与中国地理位置比较接近。根据计算,反映东京和大阪区排放污染趋势的前向轨迹区方向均向东,不影响亚洲大陆,此处不再讨论。

3.1.2.3 俄罗斯

(1) 哈巴罗夫斯克是与中国黑龙江省相邻的边境城市。根据作者计算,无论是该城市的前向轨迹区还是后向轨迹区都与中国关系不大,仅能影响边境附近地区。它的前向轨迹区(图5)除覆盖其东部的俄罗斯领土外,还越过鞑靼海峡影响到萨哈林岛南部和日本的北部。

(2) 赤塔位于贝加尔湖东南部,是俄罗斯在西伯利亚的一个重要城市。依据等熵轨迹概率图的分析(图6),它的前向轨迹区能达到中国东北的大兴安岭地区,其中7月的影响较小,4月的覆盖区较大,深入东北的中部。

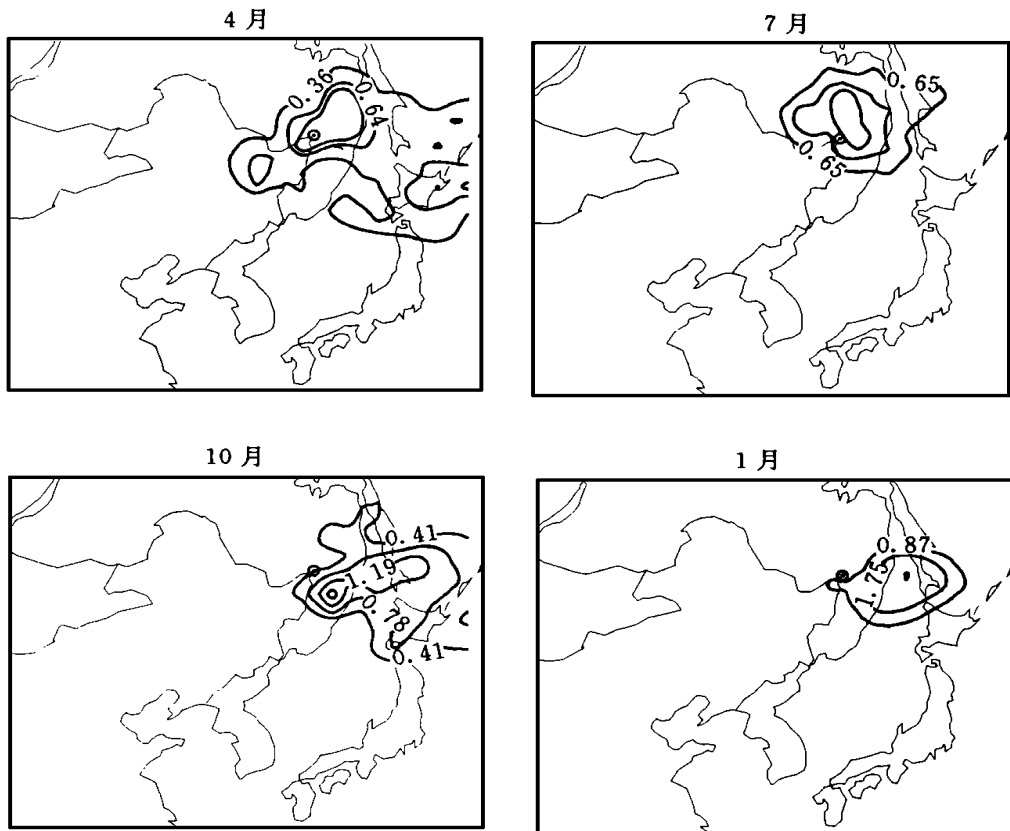


图5 哈巴罗夫斯克()在不同月份的前向等熵轨迹概率分布

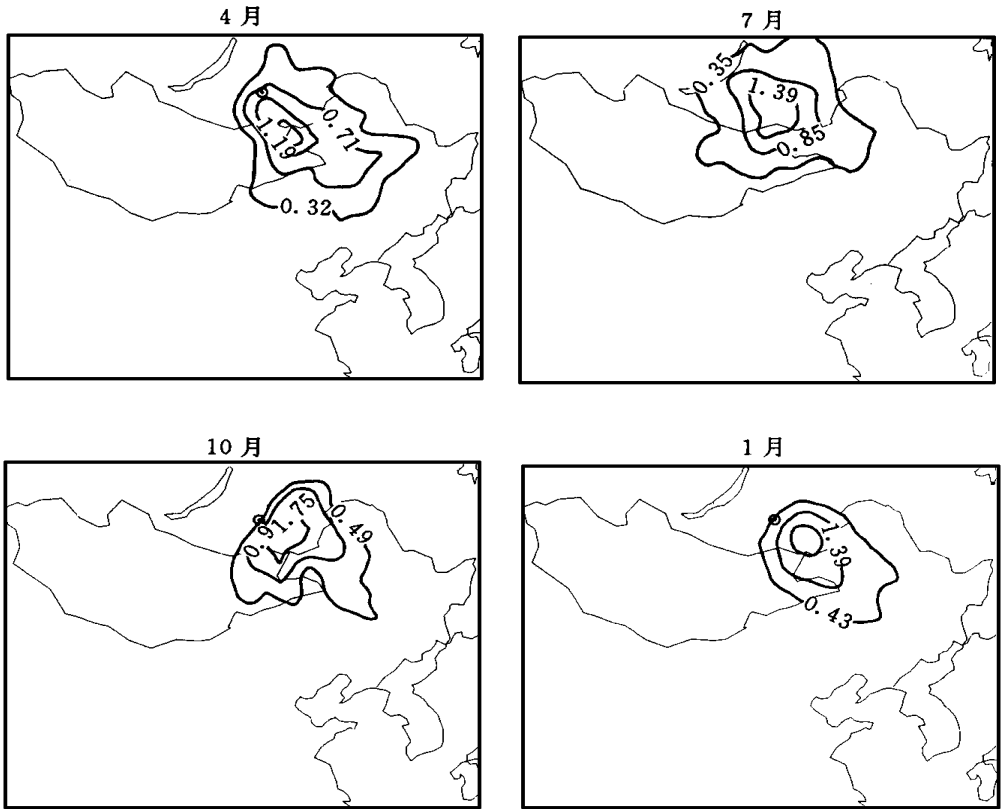


图6 赤塔()在不同月份的前向等熵轨迹概率分布

3.2 典型天气的等熵轨迹

这一节讨论在有低压或冷锋等天气系统过境时的等熵轨迹。作为例子,选择了1993年4月20—23日的东北低压过程和1993年7月9—12日的冷锋降雨过程。

东北低压是中国气旋中发展最为强大的一种,一年四季均可出现,而以4、5两月的活动最为频繁。东北低压能引起内蒙古、东北等地大范围的大风、风沙、雷暴及强烈降水天气。

这次较强的东北低压是蒙古气旋于4月21日20时移入东北后形成的,中心气压低达990hPa。22—23日停留少动,23日20时以后气旋移到海上。因它是从蒙古移来,空气比较干燥,初期无降水。22日开始在大兴安岭以东以及辽宁、山东、京津等环渤海地区出现了降水,最大日降水量为27mm。4月21日00时低压中心在大兴安岭北端,图7中12个网格点上48h的轨迹呈现出逆时针转向,与区域内各城市4月的等熵轨迹概率分布的一般形态(图2—6)有所不同。

每年7、8月是华北雨季,冷锋活动频繁。1993年7月9—12日即是一例,这期间华北和东北都有连续性降水。由于等位温面不适用于雨区,图8的轨迹仅作参考。但可以看出,这次

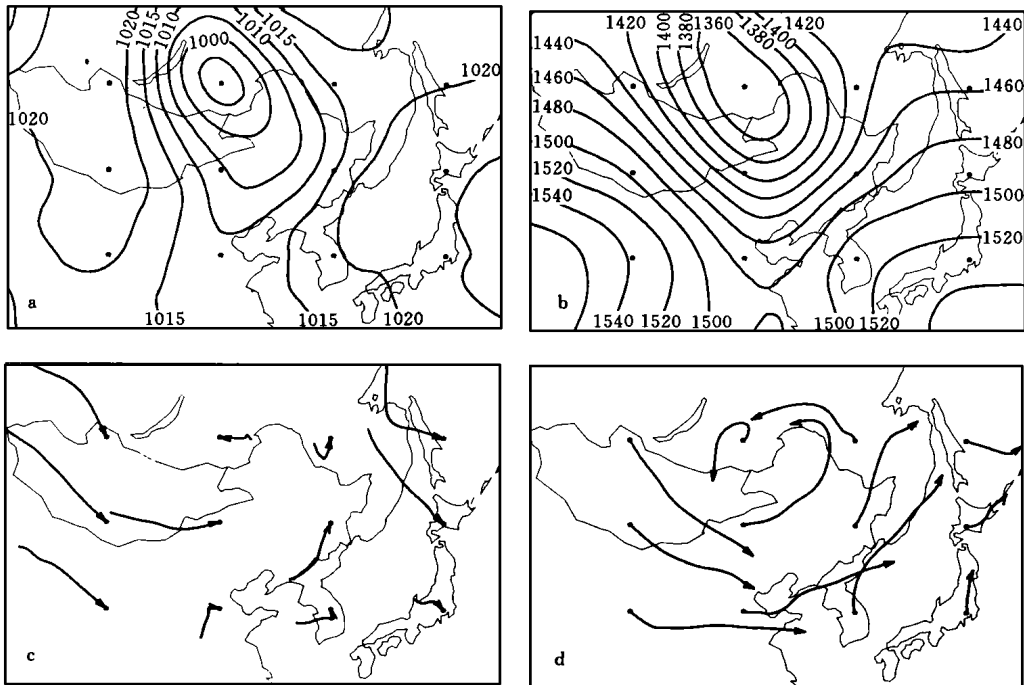


图7 1993年4月21日08时的等熵轨迹分布
(a. 海平面气压场图; b. 850hPa形势图; c. 48h 后向轨迹; d. 48h 前向轨迹)

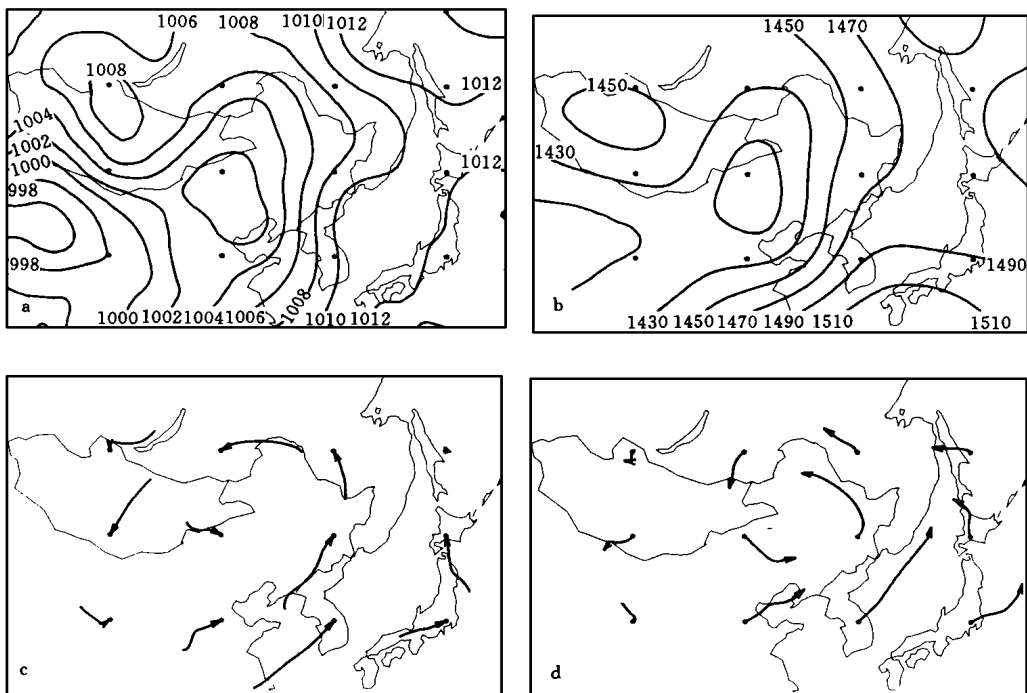


图8 1993年7月10日08时的海平面气压场和850hPa 形势图及等熵轨迹分布(说明同图6)

天气过程与上述的东北低压过程具有相似的轨迹走向,都呈现出明显的逆时针走向。

4 讨论

4.1 两种求轨迹方法的比较

为检验等熵轨迹方法的可靠性,用三维轨迹模式计算了同样的目标点,比较了它们的轨迹个例和概率分布。图9是1993年7月10日08时12个网格点上48h的前向等熵轨迹和三维轨迹(粗线)。等熵轨迹的位温增量选取3K, 6K, 10K和15K,三维轨迹是在地形追随坐标系^[2]中计算的,相应的起始高度分别取地表以上500m, 1000m, 2000m和3000m。从图上可以看出,虽然位温增量和起始高度的选择带有主观性,但这两种方法得到的轨迹的水平投影大多一致。因此,用等熵轨迹概率分布或三维轨迹概率分布讨论污染物的输送趋势都是具有代表性的。

4.2 不同等位温面上的轨迹

不同数值的等位温面反映了不同的高度,位温越大,高度越高,所以在不同等位温面上计算的轨迹可以代表不同高度气块的运行路径。根据计算,不同等熵面上的轨迹虽有差异,但是位温增量分别为3K和6K所得到的这两层轨迹的差异并不大,而位温增量为10K

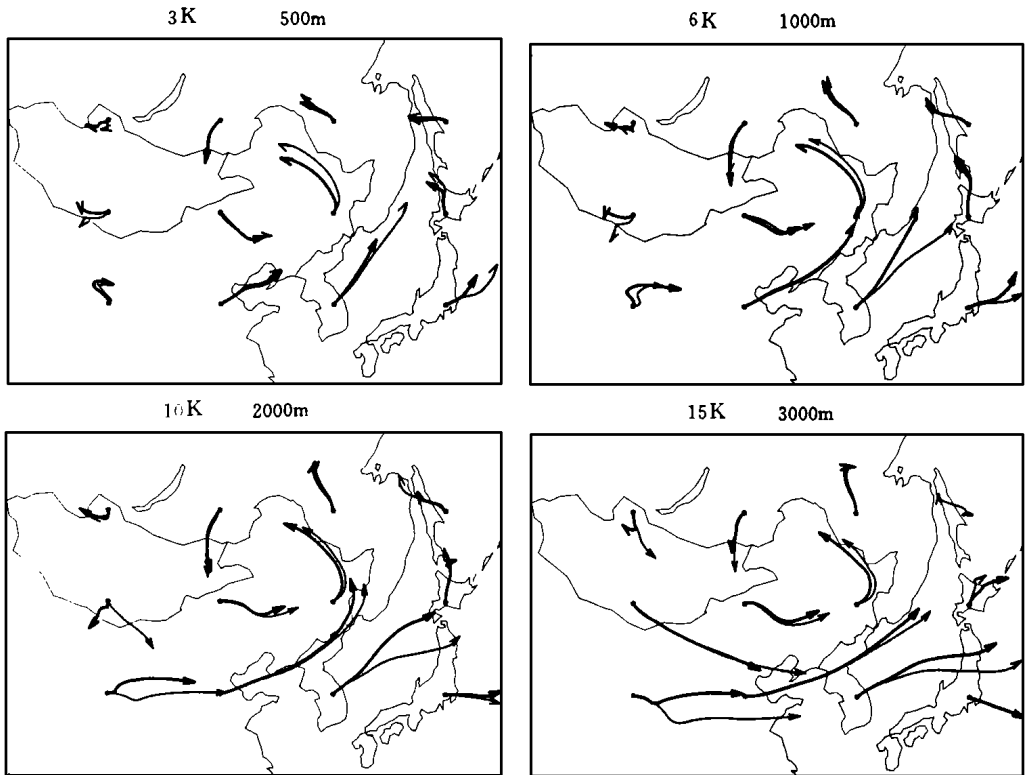


图9 1993年7月10日08时不同高度的前向48h等熵轨迹和三维轨迹(粗线)的比较
(图上数字标明位温增量 $\Delta\theta$ 和离地面高度)

以上的等熵面上的轨迹则大多具有由西北指向东南的趋势,反映了高空偏西气流的影响,从图9也可看出这一点。

4.3 观测时间间隔的影响

据朱艳秋等^[8]论证,采用观测间隔为3h 以内的气象资料计算轨迹能给出相对准确的计算结果,而12h 间隔则不合适。但在远距离输送的计算中,不可能进行这种专门的高密度的观测,只能利用常规的12h 的观测资料。为此,作者曾试图用 MM4输出的每3h 的气象场补充两次观测中间的气象资料的不足,但发现预报48h 后的气象场与实况的差别不容忽视,因此放弃了这种打算。仍使用常规的每日两次的观测资料做计算,中间过程由内插解决。

为了比较观测时间间隔对轨迹计算的影响,采用1993年5月每日两次的气象观测资料为初始场,以 MM4中尺度模式计算出48h 的预报输出场作为假设的气象场,分别计算了3h 和12h 两种时间间隔的轨迹。比较任何一天的这两种轨迹,都可以发现有些站很接近,几乎重合,有些站却差别很大。但对这一个月中的所有24—48h 的轨迹进行统计并画出概率分布图后,两者的基本趋势是一致的,特别是轨迹概率为1.0(%)的区域所在的位置几乎相同。例如北京(图10a, b)、平壤(图10c, d)的分布形态就很相似,而大阪和赤塔

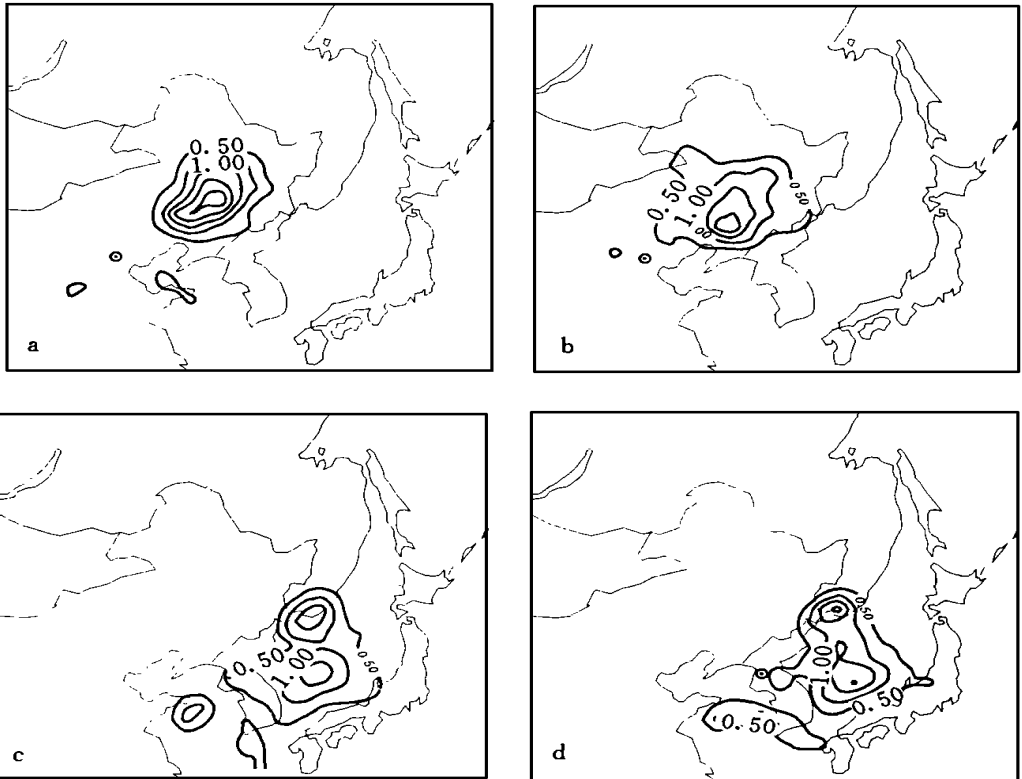


图10 1993年5月不同时间间隔的前向等熵轨迹分布

(a. 北京, 间隔3h; b. 北京, 间隔12h; c. 平壤, 间隔3h; d. 平壤, 间隔12h)

态差别就较大。从高空站网的分布来看,区域的中部特别是中国境内的高空台站密集,保证了资料的质量,两种轨迹的计算结果吻合较好。日本周围的海洋,蒙古和俄罗斯的西伯利亚地区台站都较稀少,客观分析的精度较低,对轨迹计算有不利影响。

5 结 论

综合上述讨论,可以得到以下几点结论:

(1) 等熵轨迹概率分布可以清楚地显示出影响某个地区的污染物的可能来源,以及该地区的污染物可能影响的范围。根据1992—1994年的 3_a 期间不同月份气象资料计算的大量轨迹进行的统计,发现各个城市的轨迹概率分布有明显的季节变化,这些变化和当时的环流形势相吻合。

(2) 各个城市基本上是0—24h 轨迹(包括前向和后向轨迹)概率分布的中心,即局地污染是最重要的。

4月份,大部分城市24—48h 的等熵轨迹区最大,且自西北向东南方向,例如中国东北重要的工业城市沈阳和大连,在偏西气流作用下,前向轨迹区都覆盖朝鲜半岛北部,排放的污染物可能影响到该地区。但是,西北气流控制下一般风速较大,污染物易被稀释,浓度一般不大。

7月份,各城市的轨迹区范围都比较小,主要是本地区或附近地区的影响。

(3) 在周边国家中,中国北方近邻蒙古首都乌兰巴托的影响最大,除7月外,其前向轨迹区深入中国华北地区。俄罗斯虽也在中国北方,但从所讨论的两个城市来看,只有赤塔排放的污染物可输送到中国大兴安岭地区。平壤和汉城的前向轨迹区在7月份有部分向北和向西南延伸到中国境内,它的影响不容忽视。

参考文献

- [1] 王玮等. 衡山地区酸性降水来源和成因的研究. 环境科学学报, 1992, 12 (1): 48- 57.
- [2] 盛裴轩等. 华南地区春季冷锋云系中污染物的输送. 环境科学学报, 1992, 12 (1): 16- 27.
- [3] Sheng Peixuan, et al. Trajectory analyses of the duststorms over East Asia. Acta Meteor Sinica, 1994, 8(2): 236- 246.
- [4] Merrill J T. Modeling long-range transport using trajectory techniques. Paleoclimatology and Paleometeorology: Modern and Past Pattern of Global Atmospheric Transport, NATO ASI Series, 1989. 207- 225.
- [5] Haagenson P L, et al. A relationship between acid precipitation and three-dimensional transport associated with synoptic-scale cyclones. J Climate Appl Meteor, 1985, 24 (9): 967- 976.
- [6] Merrill J T. Isentropic airflow probability analysis. J Geophys Res, 1994, 99 (D12): 25881- 25889.
- [7] Poirot R L and Wishinski P R. Visibility, sulfate and air mass history associated with the summertime aerosol in Northern Vermont. Atmos Environ, 1986, 20: 1457- 1469.
- [8] 朱艳秋, 廖润贤. 三维空气质点轨迹的计算. 应用气象学报, 1992, 3 (3): 328- 333.

THE ISENTROPIC TRAJECTORY ANALYSES ON TRANSPORT OF POLLUTANTS IN NORTHEAST ASIA —INFLUENCE ON CHINA FROM NEIGHBORING COUNTRIES

Sheng Peixuan Mao Jietai

(Department of Geophysics, Laboratory for Severe

Storm Research, Peking University, Beijing, 100871)

Abstract

The transport of air pollutants from cities in the north of China and neighboring countries is researched by using isentropic trajectory model. The trajectories are calculated twice daily for some larger cities in January, April, July and October for the period of 1992–1994. The statistical method has been used to deal with trajectory dots at intervals of 30 minutes for the forward and backward trajectories during 0–24h and 24–48h. The probability distribution diagrams of trajectory can show clearly the ensemble properties of isentropic trajectories for each city and the dominant transport directions of pollutants. Those possess notable seasonal variations. The forward trajectory areas of China of the Ulaan Baatar in Mongolia can spread over north of China, and those of the Chita in Russia can spread over the northeast areas of China except summer. In July the forward trajectory of Pyongyang and Seoul can extend within the boundaries of China.

Key words: Transport of air pollutants, Isentropic trajectory, Northeast Asia.