

# 我国中东部一次大范围霾天气的分析

饶晓琴 李 峰 周宁芳 杨克明

(国家气象中心,北京 100081)

**提 要:** 利用空气污染资料、常规气象观测资料和 NCEP 再分析资料,对 2007 年 2 月 5 日我国中东部大范围霾天气进行了综合分析。结果表明:前倾槽结构和逆温层结为霾的形成提供了有利条件;800hPa 以下层垂直速度、涡度和散度的绝对值较小,是霾维持的动力因子。大气混合层高度的变化对霾的生消有很好指示作用,霾天混合层高度北高南低分布,致使南方比北方更易出现严重霾天气。此外,要素对比结果表明,霾的相对湿度比雾低,温度露点差比雾大,逆温强度比雾弱,大气混合层高度比雾高,这些可为霾的预报提供参考依据。

**关键词:** 霾 前倾槽 逆温层 混合层高度

## Analysis of a Large-scale Haze over Middle and Eastern China

Rao Xiaoqin Li Feng Zhou Ningfang Yang Keming

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

**Abstract:** A large-scale haze process that happened on Feb. 5, 2007 over middle and eastern China was analyzed based on the air pollution index, conventional observation data, and NCEP reanalyzed data. The results show that both the forward-tilling trough and the temperature inversion are favorable condition for the haze formation. The absolute values of vorticity, divergence and vertical velocity below 800hPa are all quite smaller, which favorites to the persistence of haze. The variation of air mixing height is a good indication to the formation and disappearance of the haze. The mixing layer height appears higher in North China than that in South China during the haze periods, which makes it easier to form heavy hazy weather in South China. In addition, it was found that the relative humidity is lower, the difference between air temperature and dew temperature is higher, the intensity of air temperature inversion is weaker and the mixing layer height is higher in the haze periods than in the fog periods, which can provide some helpful clew for haze forecasting.

**Key Words:** haze forward trough inversion layer mixing height

## 引 言

霾是指悬浮在空中,肉眼无法分辨的大量微小尘粒、烟粒或盐粒的集合体,使空气混浊,水平能见度降至 10km 以下的一种天气现象<sup>[1]</sup>。霾散射波长较长的可见光较多,呈黄色或橙灰色。1995—1999 年国际合作科研计划——印度洋实验(INDOEX)发现,每年 12 月至次年 4 月亚洲南部上空常出现约 3km 厚、面积达  $900 \times 10^4 \text{ km}^2$  棕色污染尘霾,命名为亚洲棕色云(Asian Brown Clouds)<sup>[2]</sup>。近年来,在欧洲和美洲也发现类似尘霾,国际上将这种现象统称为大气棕色云(Atmospheric Brown Clouds)。我国也发现 4 个明显的霾多发区:黄淮海地区、长江三角洲、四川盆地和珠江三角洲<sup>[3]</sup>。

霾的出现使能见度变差,影响交通运输,还导致空气质量下降,诱发呼吸道疾病。近年来,随着国民经济和城市化进程的快速发展,工业耗煤量、废气排放量、建筑工地扬尘量和机动车拥有量等不断增加,都市霾天气急剧增多<sup>[4-5]</sup>,已成为城市主要灾害之一,引起社会和公众广泛关注。国外学者对霾的研究较早<sup>[6]</sup>,而我国却起步于近几年,广东一些学者在霾的天气气候特征、霾与雾的区分等方面取得了一些开拓性的研究成果<sup>[4,7-8]</sup>,但研究范围仅局限于华南,针对我国其他地区霾的研究开展甚少。本文对 2007 年 2 月 5 日我国中东部出现的一次大范围霾天气过程进行天气动力学分析,试图探讨霾发生、发展和消亡的物理成因;并与雾进行对比分析,找出雾霾转化过程相关物理量场的变化规律,可为霾的预报提供一些参考依据。

## 1 霾天气过程概述

### 1.1 霾和空气污染监测分析

2007 年 2 月 5 日我国中东部出现了一

次大范围霾天气过程。5 日 08 时,中东部地区出现大片轻雾,只有 8 站为霾。之后,随着日间气温上升和人类活动增多,雾逐渐消散,而霾开始增多。到了 11 时,霾发展达最强,北起北京、南至广东、广西共 73 站出现了霾,影响范围波及 17 个省市,其中鄂西北、赣北、粤南出现了成片能见度小于 5km 的重度霾。此后,霾站数逐渐减少,14 时为 50 站,17 时 39 站,20 时仅 30 站。

导致霾天气的是大气中的气溶胶颗粒,因此霾的形成与污染物排放密切相关。国家环保总局 2 月 5 日重点城市空气质量日报结果表明,出现霾城市北京、石家庄、郑州、杭州、南昌以及受霾影响城市天津、太原、南京、武汉、长沙、广州的空气污染指数均在 100~200 之间,属轻微或轻度污染,首要污染物多为可吸入颗粒物,由此可见,本次出现的霾天气确实是一次区域性的空气污染事件。

### 1.2 灰霾天气的环流特征

大气对污染物的扩散能力取决于高低空环流形势配置。从 2 月 5 日 08 时霾发生前 500hPa 图(图略)上可看出,欧亚中高纬环流呈两槽一脊纬向型,两个平浅长波槽分别位于欧洲东部和亚洲东部,两槽之间是宽广的弱脊,脊前盛行西北偏西气流,冷空气势力弱。东亚槽北段位于贝加尔湖以东,南段在我国黄河下游地区。本次霾天气产生在南段东亚槽中,该高度槽明显落后于温度槽,槽后暖平流使高空冷空气势力减弱。850hPa 位于东北地区到黄河中下游一带的低压与温度脊相伴,促使该低槽减弱并移速缓慢,对应在地面图上,弱冷锋位于东北到华北一线,冷锋前后的日本海高压和蒙古冷高压势力相当,呈对峙形势。我国中东部处在气压梯度小、水平风速弱的两高之间均压场或高压边缘区域中,不利于污染物水平扩散。由于低槽和地面冷锋东移受日本海高压阻挡,而高层槽

沿较强西风东移速度快,导致 500hPa 上的东亚槽比 700hPa 超前 2~3 个经度,形成了前倾槽结构,有效抑制了槽前低层大气的上升运动,限制污染物的垂直扩散,为霾的形成提供了有利环流背景条件。

## 2 霾的气象要素特征

### 2.1 地面气压、风速和湿度特征

从 2 月 5 日 11 时霾(73 站)的海平面气压和 10m 风速的变化曲线(图 1a)可见,海平面气压均在 1016~1024hPa 范围变化,气压

值低,梯度小。弱气压梯度决定了水平风速也较小,其中 69 站的风速在  $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以下,仅 4 站达到  $3\sim 4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这样,大气的水平扩散能力弱,不利于污染物向外输送,大量污染物在原地堆集便形成了霾。

从 2 月 5 日 11 时霾(73 站)的相对湿度和温度露点差的变化(图 1b)来看,霾的相对湿度  $\leq 65\%$ ,普遍较低,温度露点差则较大,达  $6^\circ\text{C}$  以上。在  $30^\circ\text{N}$  以北地区,由于空气较干燥,其湿度条件比南方差,霾天相对湿度均在  $60\%$  以下,温度露点差在  $8^\circ\text{C}$  以上。由此可见,霾由干尘粒构成,其要求的空气湿度条件较低。

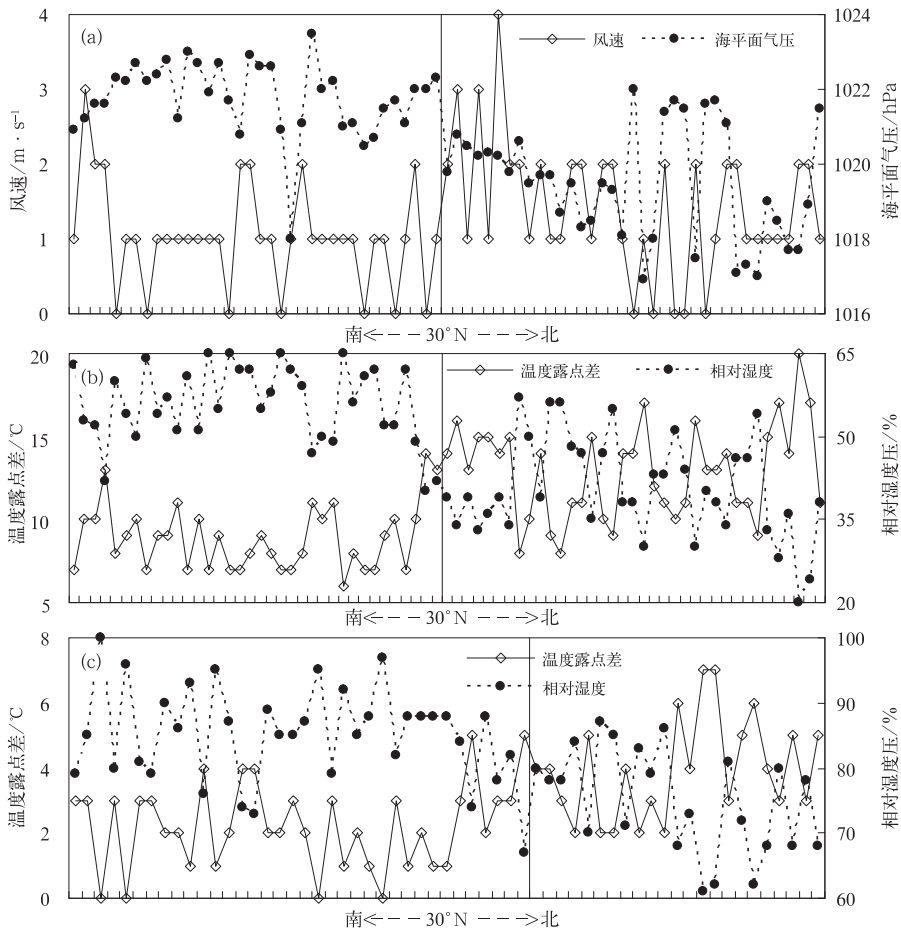


图 1 2007 年 2 月 5 日雾、霾天气的地面气象要素特征

(a)11 时霾的海平面气压和 10m 风速 (b)11 时霾的相对湿度和温度露点差 (c)08 时轻雾的相对湿度和温度露点差(横坐标代表从南到北的站点序列,中间竖线为  $30^\circ\text{N}$  位置)

霾和轻雾在观测中容易混淆,而且二者在一定条件下能相互转化。在这次霾过程中就有 59 个站发生了雾转霾相变,分析这些站 5 日 08 时为轻雾时的海平面气压和 10m 风速(图略)发现,都是弱气压场并且水平风速小,与霾无明显差异。由于雾是由水滴或吸湿性质粒构成的,空气湿度大,相对湿度普遍在 70% 以上,北方个别站稍低;温度露点差多在 5℃ 以下,北方个别站在 7℃ 以下(图 1c)。可见,湿度确实是区分雾和霾的重要判据之一。需要说明的是,本文从实测资料得到的区分雾霾的相对湿度阈值比吴兑<sup>[7-8]</sup>从理论推出的 80% 标准要低,不排除有少数台站将霾测成雾。因南北方湿度的气候差异,观测员在观测雾和霾时应用的湿度标准不同,且普遍定得偏低,所以急需制定一个科学的统一标准。

## 2.2 大气温度层结特征

大量研究结果<sup>[9-10]</sup>表明,近地层出现逆温有利于雾霾的形成。图 2a、b、c 分别为 2 月 5 日 08 时和 20 时南阳、北京、郑州出现雾或霾时的温度探空曲线。由图可见,南阳 08 时、20

时均出现了轻雾,这两个时刻其近地层都存在明显逆温,最大逆温层顶位于 925hPa 附近,较低,有利于水汽在边界层内聚集形成雾;08 时逆温强度比 20 时强,逆温强度越强,大气越稳定,越有利于雾的维持。与南阳不同,郑州 08 时出现轻雾,11 时转为霾,20 时霾维持。郑州 08 时近地层也出现逆温,最大逆温层顶也在 925hPa 附近;到 20 时其 925hPa 以下温度层结转为近中性,上、下层温差小,大气湍流交换和热力对流的弱,不利于污染物扩散,因此霾持续。北京 08 时出现霾时,近地层也出现了逆温,最大逆温层顶也在 925hPa 附近,污染物无法向上输送,只得在下部聚集,造成空气质量恶化和能见度下降。20 时北京大气层结转为不稳定,湍流交换和热力对流加强,污染物扩散稀释,霾的维持机制遭破坏,迅速消散。08 时南阳、北京和郑州最大逆温层顶都在 925hPa 附近,但北京出现霾的逆温强度明显比南阳和郑州出现雾时弱。由此可知,雾霾出现时在近地层通常都存在逆温层,最大逆温层顶在 925hPa 附近,有利于水汽和污染物堆积,致使雾霾形成。霾的逆温强度明显比雾弱,有时甚至为近中性层结。

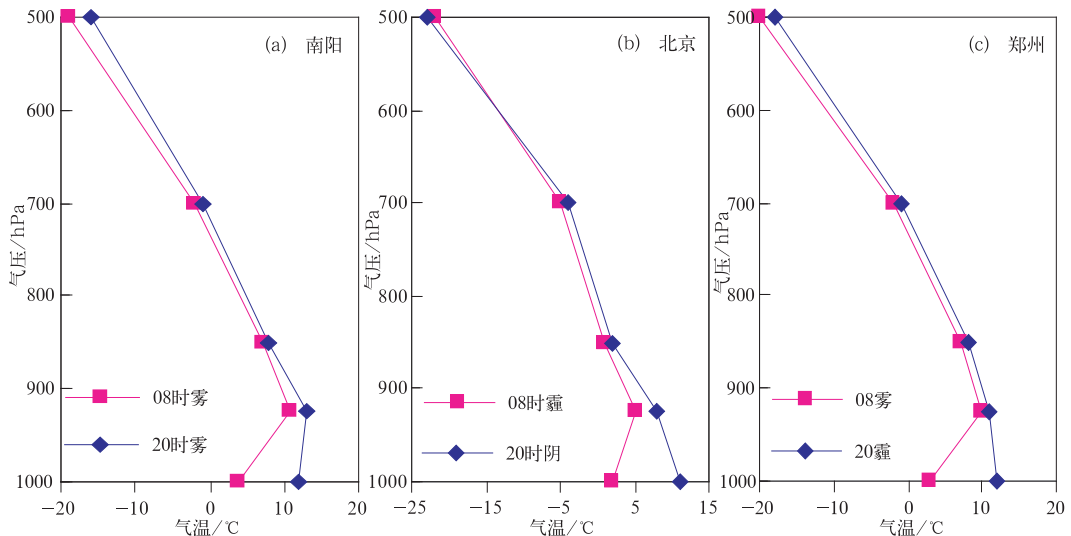


图 2 2007 年 2 月 5 日南阳(a)、北京(b)、郑州(c)雾或霾的温度探空曲线

### 3 霾天气物理量诊断分析

#### 3.1 混合层高度计算方法及结果分析

混合层高度表征污染物在垂直方向被热力对流与动力湍流输送所能达到的高度,是影响污染物扩散的重要参数。当混合层高度较低时,污染物在垂直方向的混合受到限制,易造成较高浓度的污染。计算混合层高度常用方法为罗氏法,它是 Nozaki 等人 1973 年提出的一种利用地面气象资料估算混合层高度的方法<sup>[11]</sup>。该方法考虑到大气混合层是由热力和动力湍流共同作用的结果,且边界层上部大气运动常与地面气象要素之间存在着相互联系和反馈作用,因此可以利用地面气象参数来估算混合层高度。计算公式如下:

$$h = \frac{121}{6}(6 - P)(T - T_d) + \frac{0.169P(U_z + 0.257)}{12f \ln(Z/Z_0)}$$

其中, $h$  为混合层高度, $T - T_d$  为温度露点差; $P$  为 Pasquill 稳定度级别<sup>[12]</sup>; $U_z$  为高度  $Z$  处的平均风速; $Z_0$  为地表粗糙度; $f$  为地转参数。

罗氏法优点在于不需要高空观测资料,而计算结果又能满足一定的精度要求,因此

在科研中被广泛应用<sup>[13]</sup>。

图 3 是应用罗氏法计算的 2 月 5 日 08 时和 11 时的混合层高度,由图可见,08 时,雾的混合层高度普遍在 1km 以下,最低只有几十米,出现在  $30^\circ\text{N}$  以南的较低纬度。混合层高度越低,越有利于低层水汽积聚,促进雾的形成和发展。台湾省台南站 08 时混合层高度超过 1.5km,这与该站地面风速较大 ( $4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 有关,风速大,动力湍流强,导致混合层高度抬升,水汽向上扩散稀释,若没有外部水汽补充,雾层向上伸展到一定高度就会减弱消散。11 时,霾取代了雾,其混合层高度普遍比 08 时高,多在 1km 以上,最低为 300 多米,也出现在  $30^\circ\text{N}$  以南地区。霾天南北方混合层高度差异非常明显, $30^\circ\text{N}$  以北地区多在 1km 以上,而  $30^\circ\text{N}$  以南地区多在 1km 以下。在污染排放量相等条件下,混合层高度越低,大气扩散能力越差,污染物浓度就越高,霾也越严重,这可能是南方比北方更容易出现严重霾天气的原因。对同等强度霾天气而言,污染排放量低的地区,其混合层必须限制在较低的高度,才有利于污染物聚集,形成霾;而污染排放量高的地区,混合层即使伸展较高,混合层内污染物仍能维持较高浓度,霾持续。

为了解雾霾转化的物理过程,分析了 2 月 4 日 17 时至 2 月 5 日 14 时南昌持续出现

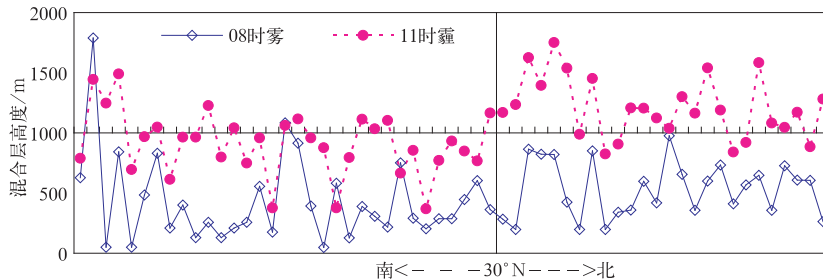


图 3 2 月 5 日 08 时和 11 时雾霾天气混合层高度的比较

横坐标、中间竖线意义同图 1

的霾—雾—霾天气(图 4)。由图 4 可见,在地面持续恒定小风速( $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )时,南昌霾天混合层高度比雾天高。2月4日17时,地面风速小,污染物水平扩散弱;混合层高度又较低(1km附近),限制了污染物向高层输送,南昌出现霾。之后,尽管人类活动减少,污染排放也逐渐减少,但日落后,气温降低,大气湍流交换减弱,混合层高度逐渐降低,导致污染物仍保持较高浓度;23时,混合层高度降至最低,霾天气持续。到5日02时,混合层高度仍保持最低,但夜间地表强烈的辐射降温,使积聚在近地面的水汽很快达饱和

(温度露点差降到 $5^{\circ}\text{C}$ ),大气中的霾粒子迅速吸湿增长,形成雾滴。低混合层和高湿度稳定维持,使轻雾一直持续到08时。之后,太阳辐射增强,气温回升,大气热力对流加强,混合层高度升高,但同时人类活动逐渐增多,污染排放量增大,这样,随着空气湿度减小(温度露点差增大),雾滴逐渐脱水变成霾粒子,11时转为霾。此后,随着气温继续升高和地面风速增大,大气热力和动力湍流作用加强,混合层高度大幅抬升,霾向高空发展,强度明显减弱,14时以后霾消散。由此可见,大气混合层高度的变化对霾的生消有很好的指示作用。

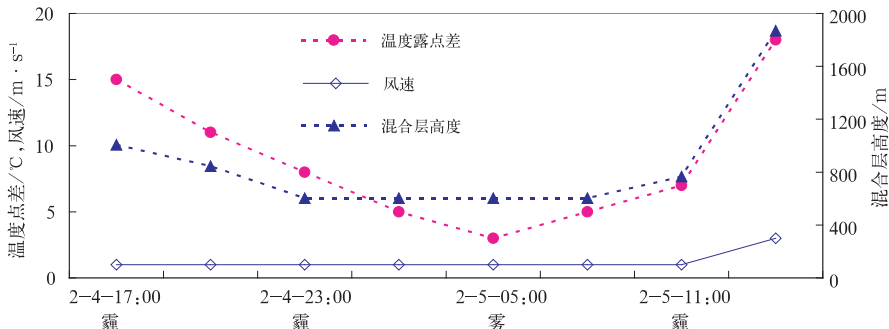


图 4 2月4~5日南昌雾霾天气的风速、温度露点差和混合层高度

### 3.2 霾发展、维持和减弱的物理机制

为探讨霾发展、维持和减弱的机理,利用2月5日14时NCEP  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 再分析资料,穿过霾多发区沿 $111^{\circ}\text{E}$ 作垂直速度、涡度和散度的垂直剖面(图5)。可以看到,霾区800hPa以下层垂直速度、涡度和散度有正有负,但绝对值均较小,垂直速度、涡度和散度中心最大绝对值分别为 $0.2\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $2.0\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 和 $2.0\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 。康志明<sup>[14]</sup>等人的研究表明大雾产生时的垂直速度、涡度和散度也较弱。这说明大气动力湍流交换能力弱,有利于雾霾天气维持。以下就不同地区分析霾发展、维持和减弱的动力机制。在山西南部( $36.5^{\circ}\text{N}$ 附近),800hPa以下层为

正辐散和弱正涡度,它们对垂直运动的作用相反,700hPa以下层为一致的下沉气流,抑制了近地层污染物的垂直扩散,所以这里的霾稳定维持。在河南中部( $34.5^{\circ}\text{N}$ 附近),800hPa以下层为弱下沉运动,并对应负涡度和正散度区,负涡度和正散度作用于流场促进下沉运动增强,阻止了近地层污染物向上扩散,导致该地污染物浓度升高,霾加强,范围扩大。在湖北北部( $32^{\circ}\text{N}$ 附近),800hPa以下层为弱上升运动,900hPa以下是极弱的负涡度,其值几乎为0,动力作用十分小,850hPa以下层为负散度,有利于上升运动加强,混合层高度升高,污染物向上扩散稀释,地面能见度增大,霾强度减弱。在湖北北部800hPa以上层是一致的下沉运动区,它抑制

了下层上升运动的发展,使污染物向上扩散的高度受到限制,仍保持较高污染浓度,霾天气维持。在湖南南部(27.5°N附近),600hPa以下层为一致的下沉运动,925hPa以下为正涡度和负散度,它们的动力作用均促使上升运动发展,混合层高度抬升,霾层向上伸展,故强度减弱、范围缩小。因此,下沉运动、负涡度和正散度是霾发展的动力因子;上升运动、正涡度和负散度是其减弱的动力因子。

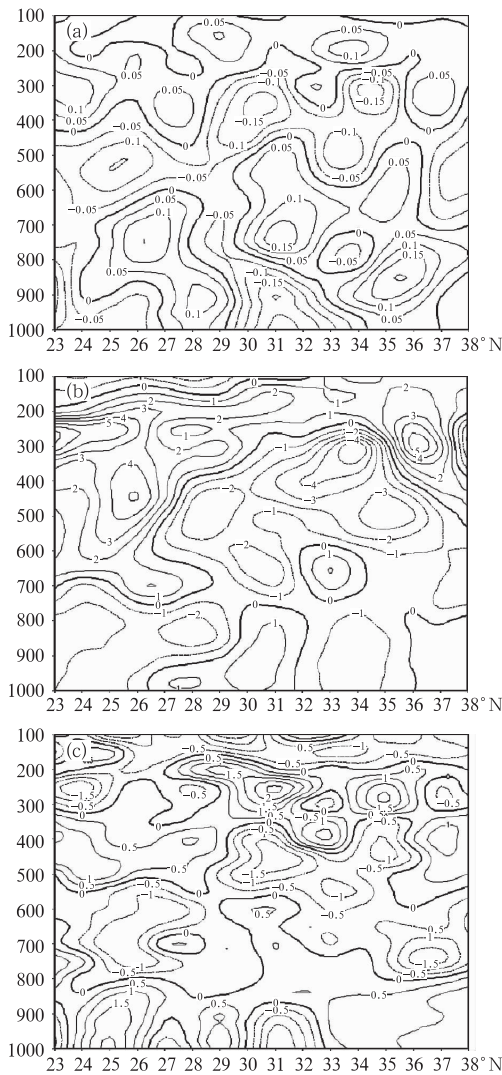


图 5 2007 年 2 月 5 日 111°E 霾区垂直速度(a,单位:Pa·s<sup>-1</sup>)、涡度(b,单位:10<sup>-5</sup>s<sup>-1</sup>)和散度(c,单位:10<sup>-5</sup>s<sup>-1</sup>)的垂直剖面

垂直速度、涡度和散度的共同作用造成了霾的发展、维持和减弱。

#### 4 小结与讨论

(1) 产生雾、霾的天气背景通常较为相似,并且雾和霾在一定条件下可相互转化,因此霾与雾的区别在霾的预报中至关重要。气象要素对比结果表明,除霾的相对湿度比雾低外,温度露点差比雾大,逆温强度比雾弱,大气混合层高度比雾高,这些可为霾的预报提供参考依据。

(2) 霾天南北方大气混合层高度差异明显,30°N 以北地区多在 1km 以上,而 30°N 以南地区多在 1km 以下。在污染排放量相等条件下,混合层高度越低,大气扩散能力越差,污染物浓度就越高,霾也越严重,这可能是南方比北方更容易出现严重霾天气的原因。大气混合层高度的变化对霾的生成有很好的指示作用。

(3) 霾区 800hPa 以下层垂直速度、涡度和散度的绝对值均较小,大气动力湍流交换弱,有利于霾维持。下沉运动、负涡度和正散度的作用促使霾加强,而上升运动、正涡度和负散度的作用则促使霾减弱。

(4) 此次霾天气的概念模型可用图 6 表示:高空环流平直、冷空气势力弱、地面均压场、气压梯度小,为霾的形成提供了有利的环

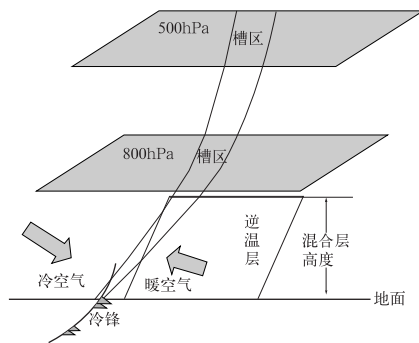


图 6 2007 年 2 月 5 日霾过程的天气学模型示意图

流背景;移动缓慢的弱冷锋是霾发展、维持的重要影响系统。由于对流层中层低槽移动快,低层移动慢,形成了前倾槽,有效抑制了槽前低层大气的上升运动。地面至 850hPa 温度层结出现逆温,阻止污染物垂直输送,使大气中的颗粒物在混合层内堆积,形成霾,并通过弱的水平风场缓慢向外扩散,从而造成区域性的空气污染。

### 参考文献

- [1] 《大气科学辞典》编委会. 大气科学辞典[M]. 北京:气象出版社,1994:408.
- [2] RAMANATHAN V, CRUTZEN P J, MITRA A P, et al. The Indian Ocean Experiment and the Asian Brown Cloud[J]. *Current Science*, 2002, 83: 947-955.
- [3] 张保安, 钱公望. 中国灰霾历史渊源和现状分析[J]. *环境与可持续发展*, 2007, 1: 56-58.
- [4] 刘爱军, 杜尧东, 王惠英. 广州灰霾天气的气候特征分析[J]. *气象*, 2004, 30(12): 68-71.
- [5] 柴发合, 陈义珍, 文毅, 等. 区域大气污染物总量控制技术 with 示范研究[J]. *环境科学研究*, 2006, 19(4): 163-171.
- [6] Schichtel B. A., Husar R. B., Falke S. R., et al. Haze trends over the United States, 1980 - 1995 [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35: 5205-5210.
- [7] 吴兑. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论[J]. *气象*, 2005, 31(4): 3-7.
- [8] 吴兑. 再论都市霾与雾的区别[J]. *气象*, 2006, 32(4): 9-15.
- [9] 徐怀刚, 邓北胜, 周小刚, 等. 雾对城市边界层和城市环境的影响[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(增刊): 170-176.
- [10] 范绍佳, 王安宇, 樊琦, 等. 珠江三角洲大气边界层概念模型的建立及其应用[J]. *热带气象学报*, 2005, 21(3): 286-292.
- [11] 马福建. 用常规地面气象资料估算大气混合层高度的一种方法[J]. *环境科学*, 1990, 5(1): 11-14.
- [12] 国家技术监督局, 国家环境保护局. 中华人民共和国国家标准(GB/T13201-91), 制定地方大气污染物排放标准的技术方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992: 15-18, 附录 B, 附录 E.
- [13] 程水源, 席德立. 关于确定大气混合层高度的几种方法[J]. *环境科学进展*, 1997, 5(4): 63-67.
- [14] 康志明, 尤红, 郭文华, 等. 2004 年冬季华北平原持续性大雾天气的诊断分析[J]. *气象*, 2005, 31(12): 51-56.