

丁建芳,牛生杰,岳平,等. 沙尘暴热力结构的个例研究[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(4): 555-562.

沙尘暴热力结构的个例研究

丁建芳¹, 牛生杰¹, 岳平¹, 赵光平², 王连喜²

(1. 南京信息工程大学 大气物理与大气环境重点实验室, 江苏 南京 210044;

2. 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 宁夏 银川 750002)

摘要:利用民勤站 L 波段探空雷达 2004 年 5 月 23—24 日的一次强沙尘暴过程加密探测资料, 从气象要素的垂直廓线和能量天气学两个方面, 分析了沙尘暴发生发展过程中大气层结及其演变特征。结果表明: 沙尘暴过境前, 500 hPa 以下的高空风速较小, 低层 800 hPa 以下基本为偏东气流, 中高层为偏西气流, 沙尘暴过境时近地层风速明显加大, 700 hPa 以下为西北气流, 高层为西南气流; 相对湿度在沙尘暴过境前, 高层明显高于低层, 而过境后, 整层大气的湿度明显增加, 且 800 hPa 附近出现逆湿现象, 沙尘暴过境前后整层大气相对湿度在垂直方向上的变化趋势基本一致。沙尘暴发生前, 近地层气温较高, 200 hPa 附近存在超低湿现象, 250 hPa 附近存在比较厚的下沉逆温层, 随着沙尘暴过境, 低层的气温显著下降, 近地层约 800 hPa 处出现逆温层, 而 250 hPa 处的逆温层逐渐减弱; 地面气象要素的变化为: 沙尘暴过境之前, 地面气压比较低, 温度较高, 风速也比较小, 而沙尘暴一到, 顿时气压升高, 风速猛增, 温度下降; 沙尘暴过境前, 500 hPa 以下处于对流不稳定, 过境期间饱和能差逐渐减小, 不稳定能量由高层向低层传递, 单站的垂直运动发展加剧; 沙尘天气结束后, 整层大气的结构基本稳定, 不稳定能量衰竭, 饱和能差进一步减小, 整层大气湿度有了较大的增加。

关键词:沙尘暴; 气象要素; 热力结构; 能量

中图分类号: P445.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2008)03-0555-08

A Case Study on the Thermal Structure of Sandstorms

DING Jian-fang¹, NIU Sheng-jie¹, YUE Ping¹, ZHAO Guang-ping², WANG Lian-xi²

(1. Key Laboratory of Atmospheric Physics and Atmospheric Environment, NUIST, Nanjing 210044, China;

2. Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention & Mitigation, Yinchuan 750002, China)

Abstract: In order to study the atmospheric stratification characteristics and the thermal structure of sandstorms, we performed an intensive observation during the passage of strong sandstorms process in Minqin, Gansu province from 23rd to 24th May 2004, by using the L-band radar sounding. The vertical profiles of meteorological elements and energy synoptic meteorology are used to analyze the characteristics of the atmospheric stratification and the evolutionary characteristics of the atmosphere during the development process of the sandstrom. The results are as follows: Before the sandstrom arrived at Minqin, the wind speed below 500 hPa was small, there was the easterly flow below the 800 hPa level and the westerly flow at the middle-upper level. When the sandstrom passed through Minqin, the wind speed increased apparently in the surface layer, below the 700 hPa level was the northwesterly flow and the southwesterly flow in the upper atmosphere. The high-layer relative humidity was higher than that of the low-layer atmosphere before the passage of the storm, however after the passage, the relative humidity increased obviously, and there was a humidity inversion phenomenon near 800 hPa. Around the passage the entire atmosphere had a vertically consistent trend of humidity. The surface temperature was higher before the passage, there was a super low temperature phenomenon near 200 hPa, and a thicker subsid-

收稿日期: 2007-04-10; 改回日期: 2007-06-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(4036500; 40575048); 科技部社会公益专项(2005DIB3J108); 江苏省气象灾害重点实验室资助项目(KLME05006)

作者简介: 丁建芳(1981—), 女, 山东青岛人, 硕士, 研究方向为气溶胶, dingjianfang2004@nuist.edu.cn.

ence inversion layer near 250 hPa, along with the passage of the sandstorm, the temperature in the lower level dropped markedly, the temperature inversion layer near 250 hPa gradually weakened and another temperature inversion layer occurred near 800 hPa. Before the passage, there were low pressure, high temperature and weak wind near the ground surface, when the storm arrived at Minqin, the pressure surged up, the wind speed rapidly increased, and the temperature dropped. The atmosphere was convectively below 500 hPa before the passage, during the saturation energy deficit reduced gradually, the unstable energy was transferred from upper layers to low layers, the development of vertical motion was intensified. After the passage, the whole atmosphere was stable, the unstable energy was used up, and the whole atmospheric humidity increased greatly.

Key words: sandstorms; meteorological factors; thermal structure; energy

0 引言

沙尘暴是一种中小尺度灾害性天气,与暴雨相比沙尘暴是一种干的浅对流天气,具备一般对流天气的特征,发生的物理机制相当复杂。一般认为,沙尘暴的发生应具备3个条件,即沙源、强风和不稳定大气。丰富的沙源是沙尘暴的物质基础;强风是动力条件;不稳定大气属于中小尺度的局地条件,有利于强对流的发生和发展。国外对沙尘暴的研究始于20世纪20年代,如Hankin^[1]、Sutton^[2]分别研究了“*Andhi*”型、“*Haboob*”型沙尘暴的特征;Jauregui^[3]系统研究了墨西哥城沙尘暴的时空分布;Bergam^[4]的研究表明,在全球范围内,沙尘暴主要的源地在北非的撒哈拉沙漠和中亚的戈壁;Ott等^[5]曾利用卫星和GATE资料对撒哈拉尘暴的爆发作过分析;Gillete等^[6]通过野外风洞试验和观测得出了沙尘粒子起动的摩擦速度与下垫面土壤的特性有着很大关系的结论;Mitsuta等^[7]对中国北方的沙尘暴个例进行了研究;Brazel等^[8]对美国亚利桑那州西南部15 a产生沙尘暴的天气形势进行了总结。

我国对沙尘暴的研究领域比较广泛,基本上都偏重于地理环境和大尺度天气形势的分析^[9-10]。如钱正安等^[11-12]、周自江等^[13]、刘景涛等^[14]和郑广芬等^[15]对比分析了沙尘暴的多发区和季节变化;胡文东等^[16]、吕梅等^[17]、李平等^[18]和路爽等^[19]对沙尘暴过程进行了天气学分析;程海霞等^[20]利用Micaps常规资料,对2000—2004年30~50°N之间的沙尘暴日与高空急流的关系进行了统计;许宝玉等^[21]等对历史上5次特强沙尘暴的环流形势进行分析;刘景涛等^[22]对中国北方特强沙尘暴的天气系统进行了分型研究;贺慧霞等^[23]等对沙尘暴的个例谱进行了研究。

沙尘暴作为发生在对流层低层的一种中小尺度灾害性天气,其生命史较短,仅凭每天早晚8点的两

次探空观测,很难捕捉到沙尘暴内部气象要素的分布及其变化特征。因此,对于沙尘暴内部的热力结构,研究还很少^[24]。目前有关沙尘暴发生发展过程中气象要素演变特征方面的研究的主要侧重于沙尘暴过境之前和过境之后地面要素的水平分布及变化,对于沙尘暴内部的热力垂直结构研究很少。本文利用加密探空资料,深入分析了沙尘暴发生发展过程中大气层结及其演变特征,初步揭示了沙尘暴内部的热力结构。

本文选取的是2004年5月23—24日发生在甘肃民勤的一次强沙尘暴个例。甘肃河西走廊是我国沙尘暴的多发区,民勤县又是河西走廊沙尘暴的重点发生区,该县地处巴丹吉林和腾格里两大沙漠的接壤地带,位于河西走廊东北部荒漠区,气候特征干旱少雨,平均年降水量115 mm,最少只有45 mm(1964年),年蒸发量高达2 640 mm,地下水位10~20 m;沙多风大,年平均最大风速大于等于17 m/s,大风天气25.5 d;沙尘暴频繁,20世纪90年代年平均沙尘暴天气12.3 d,扬沙天气33.0 d。

1 资料来源

本文使用的是中国气象局配置的新型L波段探空雷达所测得的2004年5月23日和24日的规定时次和加密探空资料,探空时间分别为23日19时15分(Ⅰ)、23时02分(Ⅱ)和24日02时02分(Ⅲ)、07时16分(Ⅳ)。据气象观测,该次沙尘暴发生时间为2004年5月23日20时40分至24日04时15分,从沙尘暴路径图(图1)上可以看出,民勤站23日23时和24日02时两次加密探空实际上探测的是沙尘暴内部的大气层结。因此,利用该资料能较好地分析沙尘暴过境前后尤其是沙尘暴内部的大气层结状况及其演变。

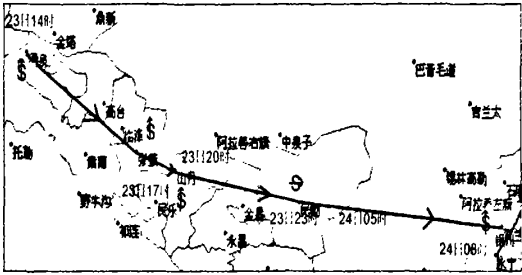


图 1 2004 年 5 月 23 号和 5 月 24 号沙尘移动路径
Fig. 1 Path of the sandstorm from 23rd to 24th May 2004

2 天气概况

2004 年 5 月 23 日 14 时地面蒙古气旋强烈发展,位于蒙古中部(101°E,47°N)的中心气压降到 990 hPa(图略),冷锋在经过拐子湖、张掖到都兰一线,民勤还处在锋前,东南风 4 m/s;23 日 20 时冷锋到达民勤,转为 2 m/s 的西北风;从 20 h 的探空图上可以看出,民勤站处在 500 hPa 槽前上升气流区,700 hPa 有风速切变,有利于气流抬升,为沙尘暴的发生提供了动力条件;另外 500 hPa 有冷空气从新疆东移南下,对应 500 hPa 上 -16 ℃ 的冷中心,而底层 850 hPa 为暖气团控制,上下两层温差达 39 ℃,上冷下暖,热力条件较好;民勤站探空图上低层温度露点差为 31 ℃,沙氏指数为 1.2,为对流不

稳定。在这种形势下 23 日 23 时,民勤出现强沙尘暴,风速增大到 10 m/s,3 h 内降温 8 ℃,3 h 内气压升高 2.6 hPa,能见度由 30 000 m 降为 300 m。强沙尘暴一直持续到第二天凌晨,达 8 h 之久,24 日 04 时 15 分—05 时 20 分沙尘强度减弱为扬沙天气。地面冷锋过境后,从 24 日 07 时 43 分开始,民勤站出现小雨天气。

3 风的垂直结构特征

图 2 为沙尘过境期间 I、II、III、IV 4 个时次探空观测到的风垂直廓线。由风速廓线可以看出,在近地层,地面冷锋系统过境前夕,风速从 2 m/s 增加到了 14 m/s,冷锋过境后,风速逐渐减小,这主要是由于冷锋过境前后地面气压梯度的急剧变化所造成的。同时,200 hPa 附近高空风速分别为 30 m/s,30 m/s,37 m/s 和 38 m/s,此处存在一高空急流并且随着时间的推移风速加大。沙尘暴来临之前(I),低层 800 hPa 以下基本为偏东气流,中高层为偏西气流,200 hPa 风速为 30 m/s,中低层风速尤其是 500 hPa 等压面以下的高空风较小;在 200 ~ 400 hPa 范围内风廓线梯度较大。沙尘暴过境时(II、III)的风廓线显示:700 hPa 以下为西北气流,高层为西南气流,低层风速由 2 m/s 增加至 17 m/s,风速的变化比较大。当高空冷槽接近测站

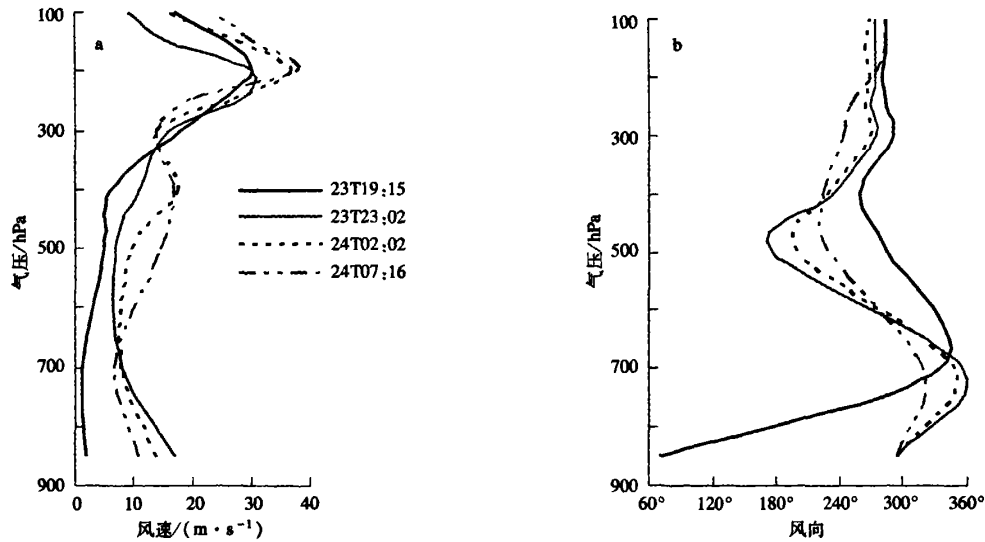


图 2 民勤 4 次探空风速(a)、风向(b)垂直廓线
Fig. 2 The four vertical profiles of(a) wind velocity and(b) wind direction in the intensive observation in Minqin from 23rd to 24th May 2004

上空时,200 hPa 等压面风速增加到了 38 m/s,比 19 时 15 分的风速增加了 8 m/s。上层大量动量的下传使 500 hPa 等压面以下的风速显著增大,同时地面冷锋的逼近造成地面气压梯度加大,近地层风速进一步增加,为起沙过程提供了必要的动力条件。但是强沙尘暴过境后(Ⅳ),地面处在高压的控制之下,此时低层存在着由西北气流向西南气流的转变。气压梯度很小,地面风速明显减小,起沙的动力条件减弱,沙尘暴天气逐渐消失。

4 沙尘暴发生时热力参数的垂直分布

4.1 温度分布

图 3 所示为民勤 4 次探空的气温廓线。从图 3 可以看出,4 个时段获得的大气层温度差异主要表现在 200 hPa 附近和地面至 500 hPa 之间。整体的变化趋势是:沙尘暴发生前,近地层气温较高,为 29℃,同时图中在 200 hPa 附近存在超低温现象,加之地面气温较高,超低温现象的存在使得垂直方向的温度梯度增大,从而有利于对流的发展。由于 200 hPa 的超低温以及民勤此时处于高压中心的这种配置,导致 250 hPa 处形成比较厚的下沉逆温层,该下沉逆温层在沙尘暴爆发之前储存了大量的不稳定能量,当爆发沙尘暴时又阻碍了不稳定能量的释

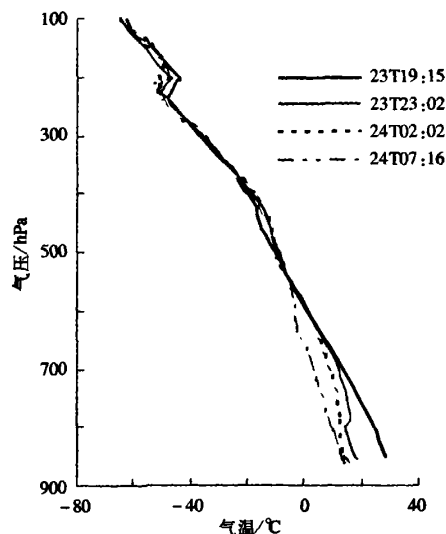


图 3 民勤 4 次探空的气温廓线

Fig. 3 The four vertical profiles of temperature in the intensive observation in Minqin from 23rd to 24th May 2004

放,从而使该次沙尘暴天气持续长达 8 h 之久。随着时间的推移,200 hPa 附近曲线弯向低温方向的折角逐渐变小,低层的气温也显著下降,使垂直方向温度梯度减小,大气在垂直方向上的运动减弱,同时 250 hPa 处的逆温层也逐渐减弱,不稳定能量减少,沙尘暴天气逐渐消失。沙尘暴过境期间由于大气中的大量沙尘粒子使得太阳短波辐射大量被散射和反射回太空,致使到达地面的太阳短波辐射明显减少,而且图 3 中也可以看出 800 hPa 以下与地面接近的气层温度下降的较快,因此在沙尘暴过境时近地层约 800 hPa 处出现逆温层。

4.2 湿度参量的垂直分布

图 4 为相对湿度的垂直廓线,4 个时段垂直方向上总体的变化趋势为:在 500 hPa、400 hPa 和 200 hPa 附近均有明显的湿度扰动,沙尘暴发生前期(Ⅰ),整层大气尤其是 700 hPa 以下近地层十分干燥,温度露点差为 25℃,高空湿度相对较高些。随着时间的推移,整层大气的湿度不断增加,但沙尘暴发生过程中中低层湿度增加明显于高层,从图 5 的露点温度差廓线可以看出沙尘暴过境时(Ⅱ) 200 hPa 等压面对应高度处的温度露点差已经达到

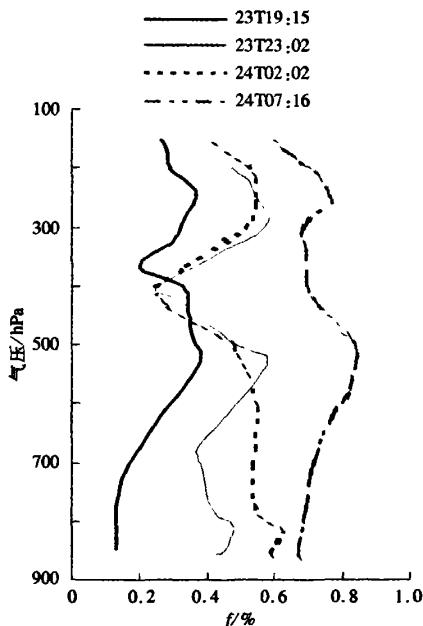


图 4 民勤四次探空的相对湿度垂直廓线

Fig. 4 The four vertical profiles of relative humidity in the intensive observation in Minqin from 23rd to 24th May 2004

6℃,高空槽及其后的西北气流在逼近测站的过程中,使对流层低层的温度降低的同时也输送了部分水汽,在水汽向下输送的过程中,时次(Ⅲ)的探空曲线反映出300 hPa等压面以上温度露点差大约为5℃左右,所在高度大气接近饱和状态;高空槽过境后(Ⅳ),对流层中低层温度露点差普遍减小,500 hPa由过境时的6.0℃减小至2.3℃,可认为大气已经达到饱和状态;结合当时的天气形势可见,沙尘暴期间,南支槽比较活跃,来自孟加拉湾的水汽沿槽前向北输送,高压东南侧中低层湿度明显增加,此时四川盆地附近为一西南涡,其北侧的东南气流使暖湿空气向北延伸,700 hPa高度层上,甘肃南部在冷锋过境前,温度露点差稍有减少,水汽含量略有增加,冷锋过境后,湿度明显降低,空气相对湿度增大明显。沙尘暴过境前后整层大气相对湿度在垂直方向上的变化趋势基本一致。所不同的是沙尘暴过境后,整层大气的湿度明显增加,500 hPa处增加最大,达到80%以上。

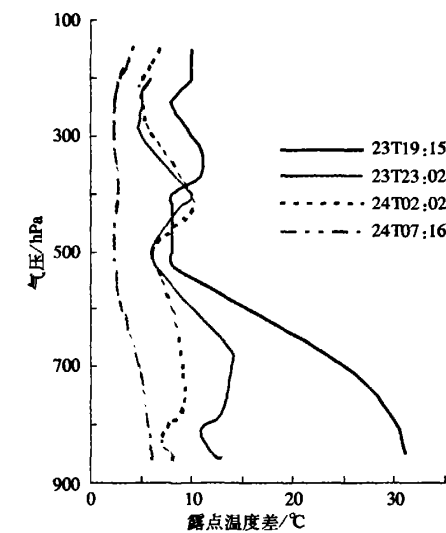


图5 民勤4次探空的露点温度差廓线
Fig. 5 The four vertical profiles of depression of the dew-point in the intensive observation in Minqin from 23rd to 24th May 2004

4.3 比湿的垂直分布

图6是通过4次探空得到的比湿垂直分布廓线。从这4个时次的廓线图可以看出:沙尘暴发生前后比湿的整体变化趋势为随高度的上升而减小,这与对流层内水汽含量随高度的变化趋势是一致的,沙尘暴过境之前低层大气比较干燥,850 hPa附

近的比湿为3.8 g/kg,沙尘暴过境时水汽量不断增加,湿度增加,沙尘暴发生之后,800 hPa附近出现一个逆湿现象,可能是因为当时在800 hPa附近有一逆湿层,逆湿层的稳定结构阻碍了热量及水汽的垂直交换,水汽含量随高度的分布受温度垂直分布、对流运动、湍流交换等多重因素的影响,因此这种情况可能只是该次沙尘暴过程的一个特征。

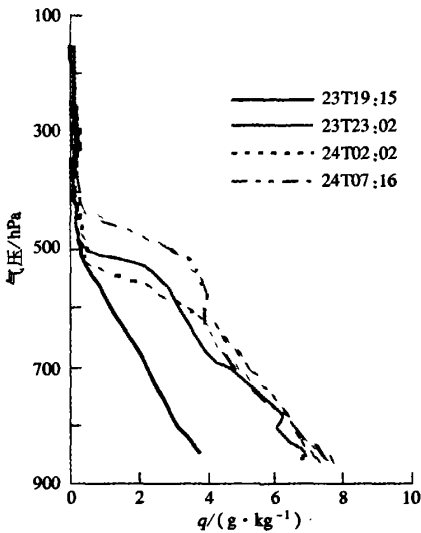


图6 民勤四次探空的比湿垂直廓线
Fig. 6 The four vertical profiles of specific humidity in the intensive observation in Minqin from 23rd to 24th May 2004

5 沙尘暴期间地面气象要素的基本特征

5.1 民勤站气压

沙尘暴来临之前,3 h变压一直处于负值,说明地面气压比较低,并且气压一直处于降低状态,23日20时沙尘暴发生之前20 min,地面气压开始上升,23日20时至23日23时3 h气压上升3.3 hPa(图7),此后随着沙尘暴天气的发生,3 h变压一直维持正变压状态,但是伴随沙尘暴天气的减弱,地面气压增加幅度逐渐减小。

5.2 民勤站气温

沙尘暴爆发之前地面气温的总体趋势是(图8):爆发之前气温不断升高,地面比较干燥,至爆发前4 h气温高达31.1℃,此后爆发沙尘暴,以后气温不断下降,至爆发后1 h气温降至13.7℃,沙尘暴天气完全结束,此后气温又慢慢回升。

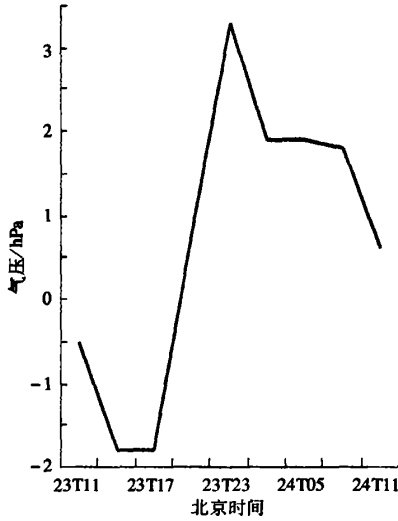


图 7 民勤站 3 h 变压随时间变化

Fig. 7 Temporal evolution of 3-h surface pressure change in Minqin from 23rd to 24th May 2004

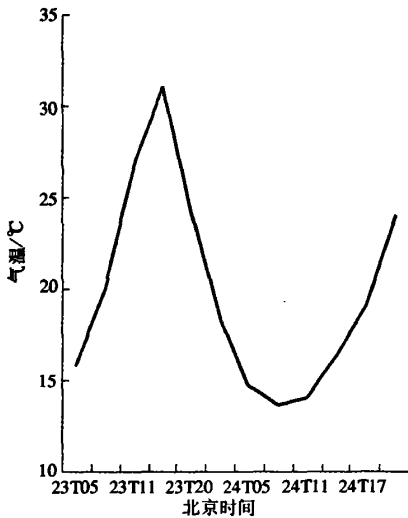


图 8 民勤站气温随时间变化

Fig. 8 The temporal variation of surface temperature in Minqin from 23rd to 24th May 2004

5.3 民勤站地面风向风速

沙尘暴爆发之前,近地面风速较小,基本在 3 m/s 左右,沙尘暴爆发后,地面风速直线增加,沙尘暴期间基本维持在 10 m/s,此后随着沙尘暴天气的减弱,风速逐渐减小。图 9 中可以看出,沙尘暴过程中,风速变化的同时风向也在不断进行调整,沙尘暴过境前后风向的调整都比较大,但在沙尘暴发生过程中,风速较稳定,风向也较稳定,一直是东南风。

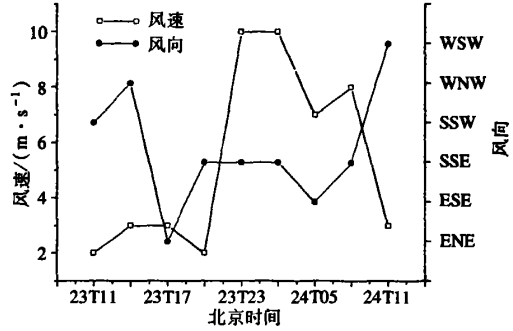


图 9 民勤站风向风速变化

Fig. 9 Temporal evolution of surface wind direction and velocity from 23rd to 24th May 2004

6 能量和稳定度分析

沙尘暴天气属于浅对流天气,存在着能量的积聚和释放。本文引入总温度、饱和总温度、干空气总温度的概念。

总温度 T_t 可以反映总能量的大小,其计算公式为:

$$T_t = T + 10Z + 2.5q + 5 \times 10^{-4}V_3^2. \quad (1)$$

饱和总温度 T_s 是指在气压、温度不变的条件下,空气达到饱和时的总温度,其表达式为:

$$T_s = T + 10Z + 2.5q_s + 5 \times 10^{-4}V_3^2. \quad (2)$$

如果空气中的湿度很小,忽略潜热项,得到干空气的总温度 T_D 。

$$T_D = T + 10Z, \quad (3)$$

$$T_t = T_s - T_i. \quad (4)$$

其中: Z 为位势高度,单位为 dagpm; V_3 为全风速^[25]; q 为比湿, q_s 为饱和比湿,单位均为 g/kg; T 为实际温度,单位为 K 或者℃;定义 T_s 和 T_t 曲线之间的距离为饱和能差 T_i ^[26]。

分别计算了民勤站 I、II、III、IV 4 个时次的总温度(T_t)、饱和总温度(T_s)和干空气总温度(T_D),并绘制了廓线(图 10)。

从图 10a 可知,23 日 19 时 15 分,500 hPa 以下, $\frac{\partial T_t}{\partial Z} < 0$ 存在对流不稳定, T_D 和 T_t 廓线间隔较小, T_t 和 T_s 相距较远,850 hPa 饱和能差较大,为 64.2℃,反映当时该站空气较干燥,同时 T_D 在 600 hPa 以下几乎垂直于横坐标轴,表明大气层处于超绝热状态,这种热力状态下的大气边界层在天气尺度气流的作用下产生的巨大温度梯度,不仅能使水平方向上的风力显著加大,还能够在垂直方向

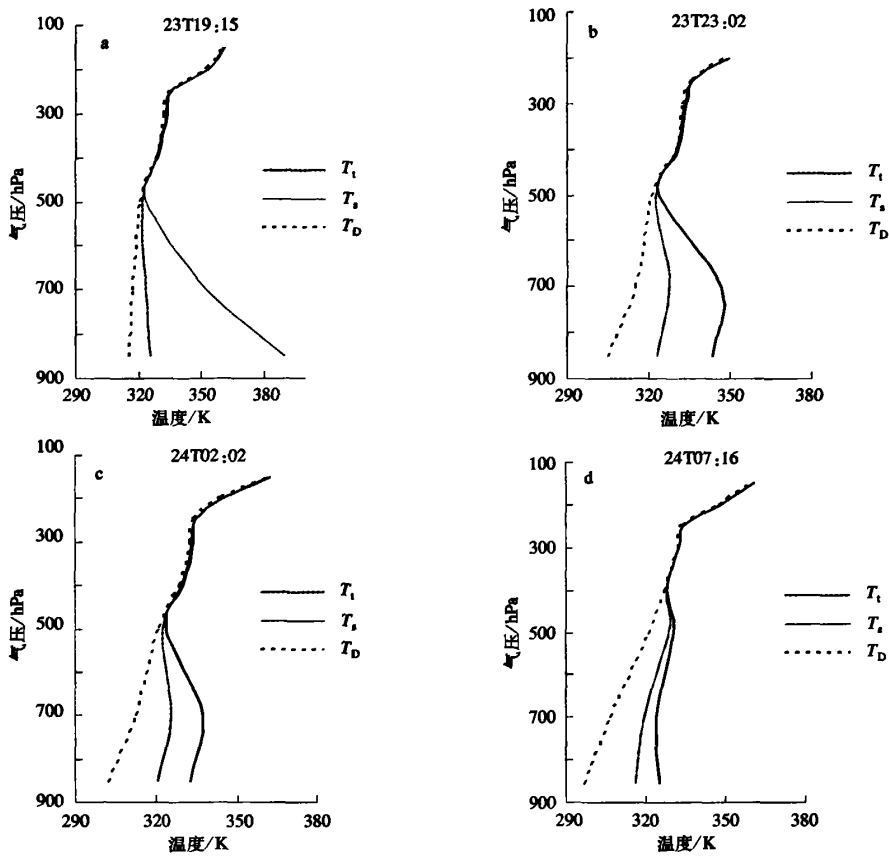


图 10 民勤 4 次探空总温度廓线图

Fig. 10 The four vertical profiles of total temperature in the intensive observation in Minqin from 23rd to 24th May 2004

上激发对流,从而诱发沙尘暴天气。

图 10b 和 10c 是 23 日 23 时 02 分和 24 日 02 时 02 分沙尘暴过境时的总温度铅直能量廓线图,从两幅图中可以看出,沙尘暴期间,总温度廓线的变化趋势向着不利于沙尘暴维持的方向进行,图中可以看出,500 hPa 以下, T_D 和 T_t 廓线间隔加大, T_t 和 T_s 廓线逐渐靠近,850 hPa 饱和能差分别为 20.9 °C 和 12.6 °C,饱和能差急剧减小,表明随着时间的推移,大气当中的水汽在不断增多,700 hPa 以上 $\frac{\partial T_t}{\partial Z} <$

0,大气仍处于对流不稳定状态,700 hPa 以下该层大气已经处于对流稳定状态,表明不稳定能量由高层向低层释放,这种潜在不稳定能量的释放加剧了单站垂直运动的发展。

图 10d 是 24 日 07 时 16 分沙尘天气结束后的总温度铅直廓线,可以发现 500 hPa 以下整层大气几乎处于稳定状态,不稳定能量衰竭,而且 T_t 和 T_s

廓线进一步靠近,850 hPa 饱和能差为 9.23 °C,表明整层大气湿度比过境前有了很大的增加,从 07 时 43 分开始,该站出现了小雨天气,雨量为 1.3 mm。

另外,从图 10a、b、c3 幅图中可以看出:沙尘暴过境前和过境时 3 种总温度廓线的变化主要表现在 500 hPa 以下,而图 10d 中沙尘暴过境后 3 者的变化高度向上延伸到 400 hPa,这种差异说明沙尘暴对大气层结的影响高度主要在 500 hPa 以下。

7 小结

(1)4 个时刻 200 hPa 附近均存在高空急流,风速都比较大,沙尘暴过境前中低层风速尤其是 500 hPa 等压面以下的高空风速极小;上层大量动量的下传使 500 hPa 等压面以下的风速显著增大,同时地面冷锋的逼近造成地面气压梯度加大,近地层风速进一步增加,沙尘暴过境后地面风速明显减小。整个沙尘暴期间,高层气流基本为偏西气流,低

层气流出现转变,由过境前的偏东气流转为沙尘暴发生期间的西北气流,而过境后低层西北气流转为西南气流。

(2) 200 hPa 附近存在低温层,低层温度比较高,这种温度梯度的存在促使对流发展旺盛,但随着时间的推移,这种温度差异逐渐减小,对流减弱。

(3) 沙尘暴过境前,高层相对湿度高于低层,沙尘暴发生期间,垂直方向上高层不断有水汽向低层输送,水平方向上又存在水汽的平流输送,两方面因素导致沙尘暴过境后,整层大气的相对湿度明显增加,但是过境前后整层大气相对湿度在垂直方向上的变化趋势基本一致;垂直方向上比湿随高度的上升而减小,水平方向上,沙尘暴过境和过境后的比湿明显高于过境前,过境后伴随 800 hPa 附近逆温层的存在出现逆湿现象。

(4) 沙尘暴过境前,500 hPa 以下为对流不稳定, T_D 和 T_i 廓线间隔较小, T_i 和 T_s 相距较大,饱和能差为 64.2 °C,空气比较干燥;沙尘暴期间,总温度廓线变化向着不利于沙尘暴维持的方向进行,500 hPa 以下 T_D 和 T_i 廓线间隔加大, T_i 和 T_s 廓线逐渐靠近,饱和能差急剧减小至 20.9 °C,过境后继续减小至 12.6 °C,大气中水汽不断增多,不稳定能量由高层向低层释放,单站的垂直运动发展加剧;沙尘天气结束后,整层大气几乎处于稳定状态,不稳定能量衰竭,而且 T_i 和 T_s 廓线进一步靠近,饱和能差较小,整层大气湿度有了很大的增加。

(5) 沙尘暴过境之前地面气压较低,温度较高,风速也比较小,而沙尘暴一到,气压升高,温度降低,风速迅速增大,风向也发生了变化。

(6) 沙尘暴过境前和过境时 3 种总温度廓线的变化主要表现在 500 hPa 以下,而过境后 3 者的变化高度向上延伸到 400 hPa,说明沙尘暴对大气层结的影响高度主要在 500 hPa 以下。

参考文献:

- [1] Hankin E H. On dust raising winds and descending currents[J]. India Meteorological Memoirs, 1921, 22: 210-213.
- [2] Sutton L J. Haboobs[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1925, 51: 25-30.
- [3] Jauregui E. The dust storms of Mexico City[J]. Int J Climatol, 1989, 9(2): 169-180.
- [4] Bergam E G. Encyclopedia of Earth System Science[M]. San Diego: Academic Press, 1992, 171-192.
- [5] Ott S T, Ott A. Analysis of a Trans-Atlantic Saharan dust outbreak based on satellite and GATE data[J]. Mon Wea Rev, 1991, 119(8): 1832-1850.
- [6] Gillette D A, Adams J, Endo A, et al. Threshold velocities for input of soil particles in the air by desert soils[J]. J Geophys Res, 1980, 85(c10): 5621-5630.
- [7] Mitsuta Y, Hayashi T, Takemi T. Two severe local storms as observed in the arid area of northwest China[J]. J Meteor Soc Japan, 1995, 73(6): 1269-1284.
- [8] Brazel A J, Nicking W C. The relationship of weather types to dust storm generation in Arizona[J]. J Climatol, 1986, 6(3): 255-275.
- [9] 徐国昌, 陈敏连, 吴国雄. 甘肃省“4.22”特大沙尘暴分析[J]. 气象学报, 1979, 37(4): 26-35.
- [10] 胡隐樵, 光田宇. 强沙尘暴发展和飚线-黑风形成的一种机理分析[J]. 高原气象, 1996, 15(2): 178-185.
- [11] 钱正安, 宋敏红, 李万元. 近 50 年来中国北方沙尘暴的分布和变化趋势分析[J]. 中国沙漠, 2002, 21(2): 106-111.
- [12] 钱正安, 贺慧霞, 覃章, 等. 我国西北地区沙尘暴的分级标准、个例谱及其统计特征[M]//方宗义. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997: 1-10.
- [13] 周自江, 王锡稳, 牛若芸. 近 47 年中国沙尘暴和扬沙天气[J]. 中国沙漠, 1999, 19(4): 354-358.
- [14] 刘景涛, 郑明倩. 内蒙古中西部强和特强沙尘暴的气候学特征[J]. 高原气象, 2003, 22(1): 51-64.
- [15] 郑广芬, 赵光平. 宁夏春季沙尘暴气候趋势及成因分析[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(6): 410-415.
- [16] 胡文东, 纪晓玲. 2001 年 4 月 8 日宁夏强沙尘暴天气中尺度系统分析[J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(6): 791-798.
- [17] 吕梅, 濮江平. 2000 年两次沙尘暴天气过程的分析研究[J]. 气象科学, 2002, 22(2): 211-216.
- [18] 李平, 侯明全. 近 40 a 陕西沙尘暴天气分析[J]. 气象科学, 2004, 24(3): 320-324.
- [19] 路爽, 张菁. 沈阳地区沙尘天气分析[J]. 气象科学, 2004, 24(1): 113-119.
- [20] 程海霞, 丁治英. 沙尘暴天气的高空急流统计特征及动力学分析[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(6): 806-814.
- [21] 许宝玉, 钱正安, 焦彦军. 西北地区五次特强沙尘暴前期形势和要素场的综合分析 with 预报[M]//方宗义. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997: 44-51.
- [22] 刘景涛, 钱正安, 姜学恭, 等. 中国北方特强沙尘暴的天气系统分型研究[J]. 高原气象, 2004, 23(4): 540-547.
- [23] 贺慧霞, 钱正安, 覃章. 我国西北地区部分沙尘暴个例谱[J]. 大气情报, 1993, 30(4): 14-18.
- [24] 牛生杰, 丁建芳, 岳平. 沙尘暴热力动力结构的初步研究[C]//首届江苏省青年科学家年会论文集. 南京: 江苏省科学技术学会, 2006: 449-455.
- [25] 陆中汉, 陆长荣, 王婉馨. 实用气象手册[M]. 上海: 上海辞书出版社, 1982: 386-387.
- [26] 雷雨顺. 能量天气学概述[M]. 武汉: 湖北气象局气象科学研究所, 1978: 67.