

民勤大气边界层特征与沙尘天气的气候学关系研究

李岩瑛^{1,2} 张强¹ 薛新玲³ 王荣基³

(1 中国气象局兰州干旱气象研究所 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃兰州 730020 ;

2 甘肃省武威市气象局, 甘肃武威 733000 ;

3 民勤县气象站, 甘肃民勤 733300)

摘 要

为了更好地理解西北干旱区大气混合层(ML)厚度的变化特征及其对当地沙尘气候形成的影响, 我们利用民勤 2006~2008 年 3~6 月逐日 08 时和 20 时探空资料、降水和日最高气温, 计算和分析了最大混合层厚度、逆温层特征和垂直风场及其对沙尘气候形成的影响。结果表明民勤沙尘天气的大气边界层有显著的昼夜变化, 白天厚、逆温强而多; 沙尘天气的最大混合层厚度在 2600 米左右, 介于无降水与有降水天气之间; 扬沙主要由锋面中的冷空气引起, 而沙尘暴主要有低层风场的剧烈扰动和 500m 以上高层冷锋入侵引起。沙尘暴发生前近地面风场有明显的扰动, 沙尘暴发生时在 500hPa 以下其垂直方向上有明显的螺旋式辐合上升运动, 白天较强; 而浮尘呈下沉运动, 风速较小。能见度小于 100 米的强沙尘暴白天风速小较稳定。

关键词: 民勤 沙尘 最大混合层厚度 逆温层特征 垂直风场

Study On Relationship between Atmosphere boundary layer Characteristics and Sand-dust Weather

Climatology in MinQin. LI Yan-ying^{1,2} ZHANG Qiang¹ XUE Xin-ling³ WANG Rong-ji³ (1 Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster, Lanzhou Arid Institute of meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020 ; 2 Wuwei meteorological bureau in GanSu province, Gansu Wuwei 733000 ; 3 Minqin Meteorological Station, Minqin Gansu 733300)

Abstract : To better understand the features of distribution and variation of the atmospheric mixed layer depth(hereafter ML) and the impact of the deep ML on the sand-dust climate over Northwest China(NWC), in this paper, the maximum ML thickness, inversion layer characteristics, vertical wind field and the impact of their on the NWC sand-dust climate formation have been calculated and analyzed, utilizing the daily observed sounding data at 08h and 20h, precipitations and maximum temperatures in Minqin from May to June in 2006-2008. The main conclusions are that atmospheric boundary characteristics have obvious day-night change: the ML depths are deeper, inversion layers are stronger and more in daytime ; the maximum ML thickness of sand-dust is about 2600m, between no precipitation and record precipitation; the flying dust mainly has resulted from cold front, but sandstorm mainly has resulted from strong wind disturbance in lower atmosphere and cold front above 500m

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 “黄土高原陆面过程观测试验研究”(40830957) 和 “十一五” 国家科技支撑计划重点项目第四课题 “省级沙尘暴遥感监测预警评估与服务应用示范” 共同资助

作者简介: 李岩瑛 (1970.3—), 甘肃武威人, 理学博士, 主要从事天气预报及研究工作. E-mail: lyyqxj@163.com

in upper atmosphere; before day of sandstorm, the wind are obvious disturbance near surface, when occurring sandstorm, there are obvious spiral-convergent vertical air flows below 500hPa, which are stronger in daytime; but when occurring floating dust, there are sink air flows below 500hPa, whose wind speeds are relatively weak. The strong sandstorms of minimum visibilities less than 100m have relatively weak wind speeds, and more stable stratifications in daytime.

Key words : Minqin ; Sand-dust ; Maximum ML depth ; inversion layer characteristics ; Vertical wind field

引 言

甘肃省民勤县是我国沙尘天气发生最为频繁的地区之一,春季3~6月是沙尘天气爆发最多最强的季节,其境内的沙尘天气常常随西风气流传输到我国北方乃至更远的地方^[1-3]。沙尘也是造成春季空气污染最主要的影响因子,据民勤县2006-2008年3-6月统计,沙尘暴发生当天,出现五级重度污染的概率为81.8%,如2006年4月10日民勤出现黑风时的首要污染物Pm10浓度高达2.57mg/m³。曾庆存等^[4-6]通过对起沙的阵风边界层结构研究发现东亚春季冷锋后的强风及其伴随的系统下沉气流和叠加其上的阵风,都对当地起沙十分有利。大风期间,无论是平均流、阵风和湍流脉动,至少在120m 高度以下,主要都有西风 and 北风动量下传,感热上传。平均流和阵风在动量传送上起相当大的作用,进而得出阵风对起沙量的贡献效率最高。强沙尘暴的发生具有“准干飚线”特征^[7-9];以往研究观测发现西北干旱区荒漠晴天经常超厚大气边界层,最大混合层厚度达5km以上^[10];张强^[11]认为沙尘暴天气的风沙大气边界层的观测是有重要意义的,其特殊性主要表现在对大气边界层两个特殊的强迫上:①强的干对流活动引起的宏观垂直运动对边界层结构的强迫作用和对输送过程的贡献。②大气边界层内超常沙尘分布对辐射过程的强迫作用,这可能会对沙尘暴发生有重要物理意义,但过去对沙尘天气大气边界层研究并不多。最大混合层厚度对西北干旱气候有一定的影响,厚度越大,降水减少,气温越高,气候越干旱^[12]。本文主要从最大混合层高度入手,重点研究沙尘发生前后其边界层的厚度、逆温层及其风场结构,为沙尘暴的短期及短时临近预报提供帮助。

着重以甘肃省民勤站为例,应用地面到高空 100hPa 高度、气压、风场、温度和露点温度等探空资料,研究沙尘多发时段春夏季 3~6 月沙尘天气下近地面层大气的最大混合层厚度(ML)、逆温层厚度和强度等边界层特征,得出沙尘天气的起沙机制和强度预报成因。

1 探空资料及观测场地介绍

所用的探空资料均来自测风雷达观测,其观测精度如下表 1, L 波段测风雷达的观测精度和范围远远高于 701 二次测风雷达的, L 波段高空探测系统所反映出的测高偏差随探测高度的增加而不断变大^[13],因而应用民勤站 2006 年以来的观测资料较能准确地反映大气边界层情况。

表 1 1971~2009 年民勤探空资料所用测风雷达及其观测精度说明

Tab1e 1 Observation accuracy of anemometer radar used by sounding data of Minqin Station during 1971~2009

探测系统	59-701 系统	L 波段系统
资料时段	1971.1-2005.12	2006.1-2009.12
雷达型号	701 二次测风雷达	GFE(L)1 型二次测风雷达
探测仪器型号	GZZ2-1 型探空仪	GTS1 型探空仪
测距精度	80 米	20 米
测角精度	0.150	0.080
测温范围	-75~+40℃	-90~+50℃
测温精度	2℃	0.2℃
测压范围	1050~10hPa	1060~5hPa
测压精度	10hPa	2hPa(500hPa 高度以下) 1hPa(500hPa 高度以上)
测湿范围	15~100%	0~100%
测湿精度	10%	5%(-25℃以上) 10%(-25℃以下)
露点温度精度	精度由温度和相对湿度决定	精度由温度和相对湿度决定
测风风向精度	≤50(风速>25m/s) ≤100(风速<25m/s)	≤2.50(风速>10m/s) ≤50(风速<10m/s)
测风风速精度	≤1m/s(风速<10m/s) ≤10%(风速>10m/s)	≤1m/s(地面-100hPa) ≤10%(100hPa-5hPa)

民勤探空观测场地位于北纬 38°38′，东经 103°05′，海拔高度 1367.5m，距民勤县城以北 2km 处。地形特征是沙漠绿洲，土壤性质以沙土为主，在其周围 0.5km 内以居民区为主，其西和北方 0.5~1.0km 内有农田，1~5km 内除东部有农田和沙漠外，其它方向以农田和居民区为主；5~10km 内除东部有沙漠，南部有居民区外，均为农田覆盖；10~20km 除东、北方有沙漠外，其它均为农田。观测点（观测场中心距地 1.5 米高处）周围最大遮蔽物和人为障碍物仰角在西南方为 6.1°。雷达天线四周障碍物仰角除方位在 30°NNE 处最大达 10°外，其余 100°~10°不足 3°。

气候状况：甘肃省民勤县属温带大陆性干旱气候区，冬冷夏热、干旱少雨、日照充足、蒸发量大、风大沙多、灾害性天气频繁。1971-2000 年年平均气温为 8.3℃，年总降水量平均为 113.0mm，年总蒸发量平均为 2623.0mm，年总日照时数平均为 3073.5h。灾害性天气主要有干旱、大风、沙尘暴、干热风、霜冻等。干旱每年都不同程度发生，最长连续无降水日数达 194d，日极端最高气温达 41.1℃，日极端最低气温达 -26.8℃，一日最大降水量 48.0mm。

2 最大混合层厚度计算方法及影响因子分析

本文主要利用 T-Log P 图法计算民勤站逐日的最大 ML 厚度，其作法如下：由逐日 08：

00 的温压等探空资料，在 T—Log P 图上点绘出温度层结曲线 S_1M （图 1）。随着日出后太阳辐射及地面受热加强，低层大气的湍流交换加强，气层的不稳定度加大，午后达最大。故再由当日午后的地面最高气温 $T_{\max}$ 和气压点 Z_{21} ，沿干绝热线上升，绘状态曲线 S_2N ，它与层结曲线 S_1M 相交于 C 点。它表示午后地面附近最不稳定时的空气块，在抬升到 C 点高度后，已与该气块的环境温度相等，它除依靠惯性略再稍许抬升外，已不再具有进一步抬升的浮力，因而 C 点即是该日的最大 ML 高度。

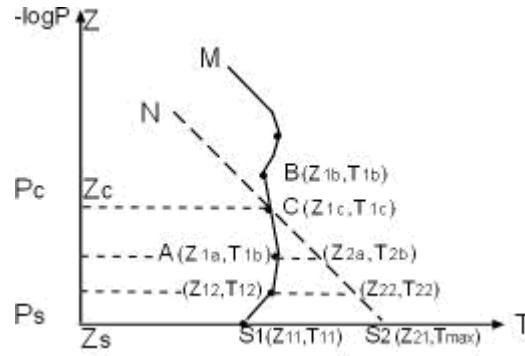


图 1 T-Log P 图方法求混合层厚度示意图

Fig1. Schematic diagram for the T-Log P diagram calculating ML thickness

T-LogP 图方法原需手工点绘图，为适应本文多年相关月数百天的批量个例计算的需要，这里采用王式功等^[14]快捷的计算机算法。

因图 1 中 C 是 07：00 层结曲线 S_1M 和午后状态曲线 S_2N 的交点，而 S_2N 和 S_1M 曲线中的 AB 段都是直线，则 C 点既满足通过 A (Z_{1a}, T_{1a}) 及 B (Z_{1b}, T_{1b}) 两点的“两点式”直线方程：

$$Z - Z_{1a} = (T - T_{1a}) \times \frac{Z_{1a} - Z_{1b}}{T_{1a} - T_{1b}} \quad (1)$$

同时，C 点也满足通过 S_2 ($Z_{21}, T_{\max}$) 点，其斜率 $K = -1/rd = -100^\circ\text{C}/0.976\text{m}$ 的“点斜式”直线方程：

$$Z - Z_{21} = -\frac{100}{0.976} \times (T - T_{\max}) \quad (2)$$

上两式中令 $X = \frac{Z_{1a} - Z_{1b}}{T_{1a} - T_{1b}}$ ， $Y = \frac{100}{0.976}$ ，从数学角度，由 (1) 和 (2) 式两元一次

方程联立，用代入法求解该方程组，得出 $T = \frac{Z_{21} - Z_{1a} + T_{1a}X + T_{\max}Y}{X + Y}$ (3)

再将 (3) 式代入 (2) 式, 即得出最大混合层厚度 $Z-Z_{2i}$, 从而得到待求的 Z_{ic} 的高度。

那么计算机如何“找”层结曲线中的 AB 线段, 也即找到 A、B 两点呢? 可由下而上依次将层结曲线上每个节点的高度值 $Z_{11}, Z_{12}, \dots, Z_{1i}$ 分别代入 (2) 式中, 求得干绝热线上对相应高度上的温度值 $T_{21}, T_{22}, \dots, T_{2i}$, 再分别与层结曲线上同高度的温度值 $T_{11}, T_{12}, \dots, T_{1i}$ 相比较, 若两曲线上同高度点 Z_{1i} 及 Z_{2i} 的温度 $T_{2i} > T_{1i}$, 表明在该高度, 干绝热线仍在层结曲线的右边, 还未与层结曲线相交, 则继续重复上述代入及比较过程; 若在 $Z_{1(i+1)}$ 高度, $T_{2(i+1)} < T_{1(i+1)}$, 表明这时干绝热线已在层结曲线之左, 已经相交了, 则点 $(Z_{1(i+1)}, T_{1(i+1)})$ 就是层结曲线上的 B 点, 而其下的 (Z_{1i}, T_{1i}) 即是待求的 A 点。这样, 即可编程计算了。

通过分别用手工点绘图法和计算机算法, 对比了民勤站 1979 年 7 月三个不同晴雨日(晴天、小雨及暴雨日)ML 厚度的计算结果, 结果表明无论是晴天, 还是雨天, 该两种算法的厚度仅差 2~3hPa, 按所在高度层的单位气压高度差估算, 约差 20m 左右(即 1%的误差), 这对本文的统计结果影响不大。相反, 计算机算法却有快捷省时的明显优点。夜间最大 ML 厚度用 20 时的温压等探空资料, 其它与白天相同。

3 最大混合层厚度特征对比

3.1 不同天气下的大气边界层特征

通过计算 2006 年至 2008 年 3~6 月逐日最大混合层厚度, 得出不同天气条件下的平均最大混合层厚度, 如下图 2:

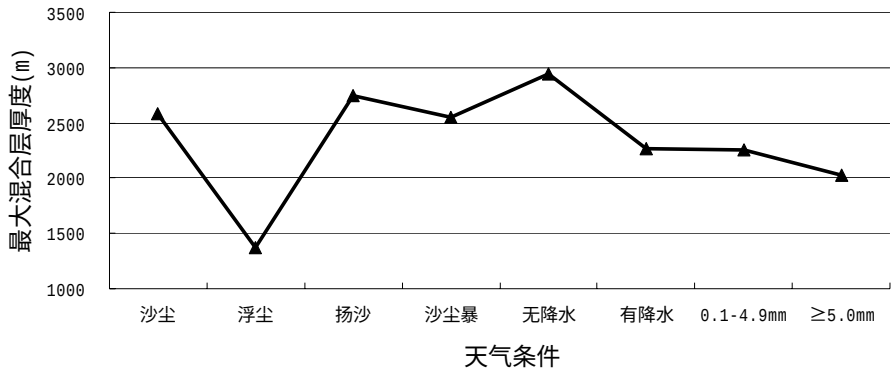


图 2 不同天气条件下的最大混合层厚度变化

Fig2. variations of ML thickness(m) among different weather days in Minqin

从上图中分析看出, 沙尘天气比降水天气的最大混合层厚度高 400 m 左右, 在沙尘天气中, 浮尘厚度最低不足 1400 m, 扬沙最高在 2500~2700 m 之间; 在降水分析中随着降雨量的增大, 最大混合层厚度减小。总之, 无降水时最高在 3000 m 附近, 沙尘天气次之在 2600

m 左右，有降水时最低在 2200 m 左右。

3.2 沙尘与晴天大气边界层的对比分析

严格按照晴天标准：总云量 ≤ 3 成，且没有积雨云，有效能见度 $\geq 10\text{km}$ ，两分钟平均风速 $\leq 5\text{m/s}$ ，经 2006~2008 年 3~6 月逐小时记录进行统计得出 11 个晴天日，分别计算它们的最大混合层高度并与沙尘暴日数进行对比得出 3~4 月沙尘暴的最大混合层高度略高于晴天的，但 5~6 月晴天的迅速升高，6 月比沙尘暴的高出 1500m 以上（如图 3）。

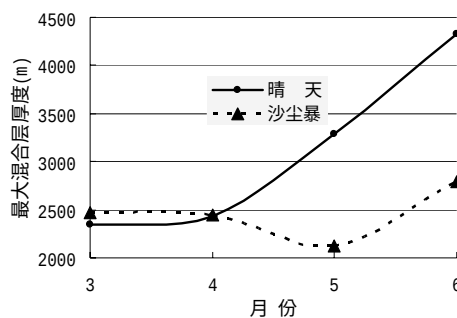


图 3 沙尘暴与晴天的最大混合层厚度对比图

Fig3.Comparison of ML thicknesses(m) between sandstorm and clear days in Minqin

3.3 沙尘暴发生前后的大气边界层特征

进一步对 21 个沙尘暴天气个例在其发生前、发生时和发生后等三种情况下的大气边界层特征进行对比分析，得出在沙尘暴发生前一天最大混合层厚度较高在 3000m 以上，4 月较高接近 4000m，当沙尘暴发生时最大混合层厚度迅速降低在 2500m 以下，沙尘暴结束后最大混合层厚度除 5 月显著升高外，其它变化不大（如图 4）。

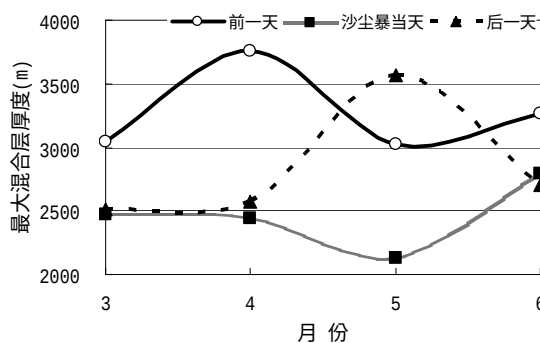


图 4 沙尘暴发生前、发生时和发生后的最大混合层厚度对比图

Fig4.Comparison of ML thicknesses(m) among days of in advance, occurring and after sandstorm in Minqin

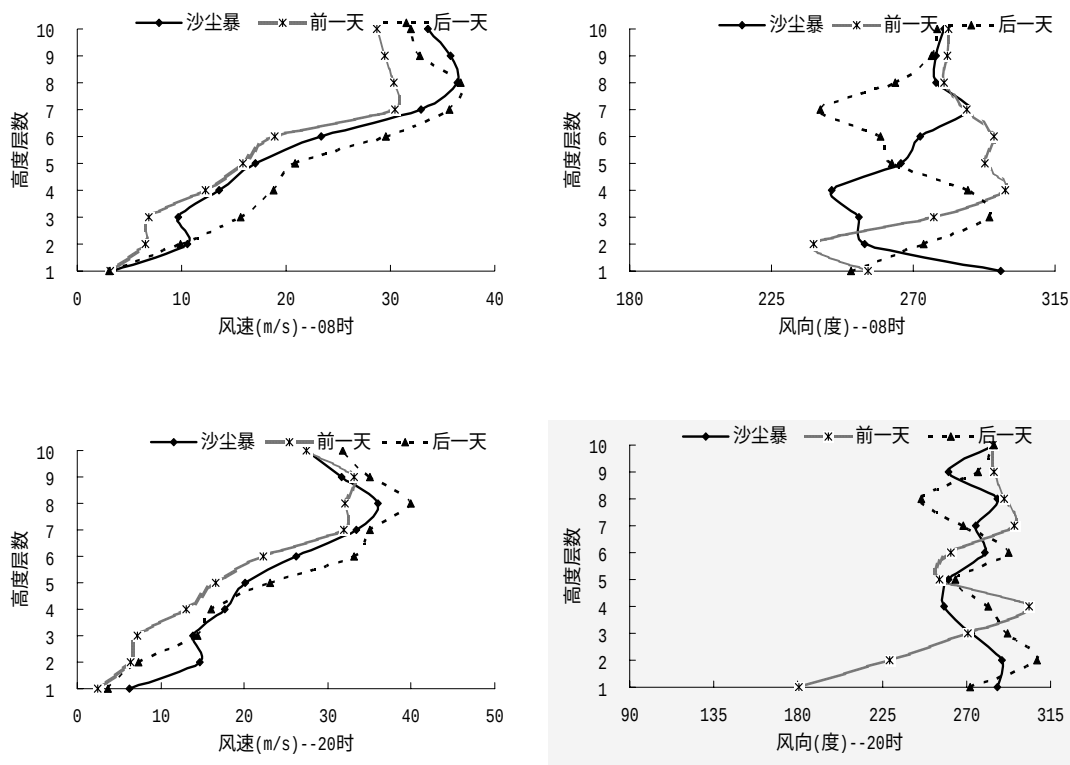


图 5 沙尘暴发生前、发生时和发生后的 10 层垂直风场结构

Fig5. Structure of 10 layers' vertical wind fields among days of in advance, occurring and after sandstorm in Minqin

如图 5，沙尘暴发生前，近地面 800-600hPa 附近风速迅速增大，有明显的扰动，地面至 800hPa 风向逆转有辐合上升运动；沙尘暴发生时风速继续增大，风向逆转幅度加大，辐合上升运动达最强；沙尘暴发生后，风速扰动消失，近地面风向顺转呈下沉运动。08 时比 20 时沙尘暴风速小，但风向逆转幅度大，上升运动较强。

4 沙尘天气下的逆温层变化特征

根据逆温性质，我们把逆温分为辐射、锋面辐射、锋面、扰动和下沉五种^[15]，逐日计算大气边界层内（最大混合层高度以下）逆温层的频次、厚度和强度，得出表 2：

表 2 2006-2008 年春季 3-6 月 08 时（20 时）平均逆温层的频率、厚度与强度特征

Table 2 Mean inversion layer characteristics of frequencies, thicknesses and strengths at 08h (20h) from

May to June of 2006~2008 in Minqin

逆温性质	月平均频率(次)	起始高度 (m)	终止高度 (m)	厚度 (m)	强度(°C/km)
锋面辐射	3	0	174	149	33.7
辐射	18 (2)	0 (0)	204(95)	204(95)	25.6(17.9)
扰动	2	108	255	147	34.8
下沉	15(1)	550(1969)	739(2199)	189(230)	18.6(7.3)
锋面	4(0)	455(1849)	574(2167)	119(319)	28.5(9.2)

白天（08 时）出现频率最多的是辐射逆温、其次是下沉逆温，最少的是扰动逆温；出

现高度上从低到高分别为锋面辐射、辐射、扰动、锋面和下沉逆温；强度从强到弱分别为扰动、锋面辐射、锋面、辐射和下沉逆温，近地面层 500m 以下较强。

昼夜变化：夜间（20 时）较白天频率显著减少，强度减弱，无锋面辐射和扰动逆温；近地层逆温层出现高度较低，厚度较小，但夜间中高层（1000 米以上）逆温层出现高度较高，厚度较大，辐射逆温最强。

进一步对沙尘天气，分扬沙、沙尘暴和浮尘进行对比分析，如图 5：

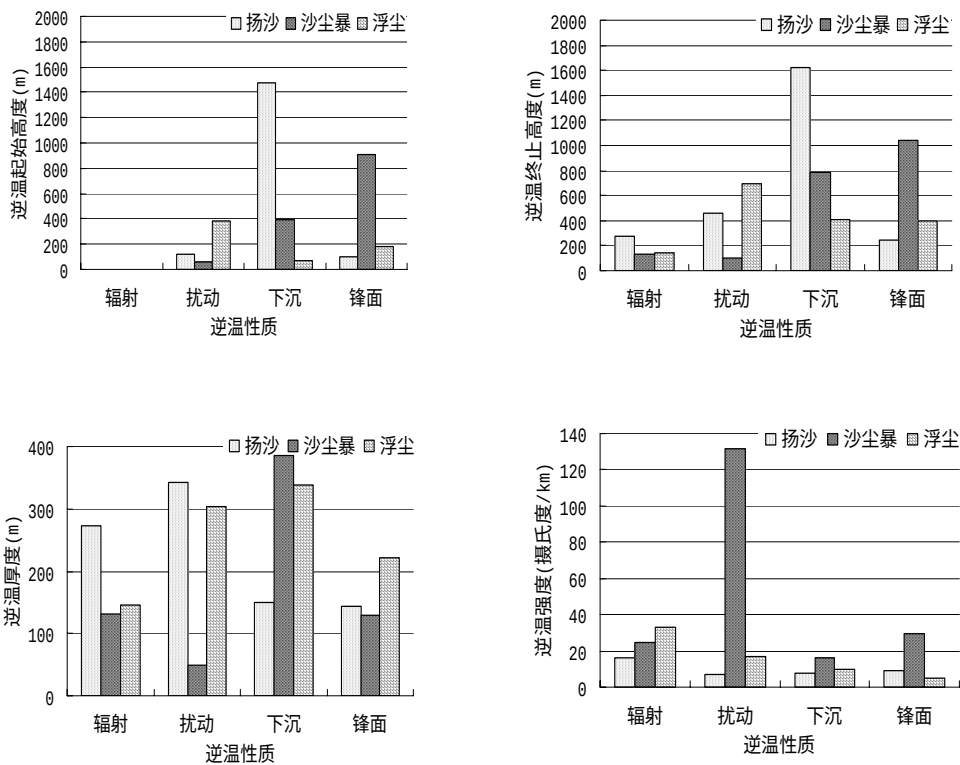


图 6 2006-2008 年春季 3-6 月 08 时（20 时）沙尘平均逆温层的厚度与强度特征

Fig6.Sand-dust mean inversion layer characteristics of heights, thicknesses and strengths at 08h (20h) from May to June of 2006~2008 in Minqin

从图 6 看出，逆温层的起止高度中扬沙的下沉逆温较高，其次是沙尘暴的锋面逆温和下沉逆温；逆温厚度中沙尘暴的下沉逆温较大，其次是扬沙的扰动逆温和浮尘的下沉逆温，沙尘暴的扰动逆温厚度较小；逆温强度中沙尘暴的扰动逆温显著较强，其次是浮尘的辐射逆温和沙尘暴的锋面逆温。

夜间（20 时）扬沙的辐射和下沉逆温较白天（08 时）强，但沙尘暴强度明显减弱，浮尘夜间无逆温出现。

沙尘天气中扬沙、沙尘暴和浮尘分别以锋面辐射逆温、扰动逆温和辐射逆温最强，其中辐射逆温浮尘最强，其它均是沙尘暴最强，这说明造成扬沙天气的主要影响因子是锋面带来的冷空气，而沙尘暴是由风场的剧烈扰动引起，其冷空气强度最强，浮尘天气较稳定，无上述变化。

5 沙尘天气的风场垂直结构特征

5.1 不同沙尘天气的风场垂直结构特征

计算沙尘天气的地面、850、700、600、500、400、300、250、200、150 和 100hPa 之间 10 层垂直风场结构，其中沙尘暴共 21 个例，扬沙 34 个例和浮尘 4 个例。得出沙尘暴、扬沙和浮尘的 10 层平均气压分别为 859、799、638、536、448、356、268、220、170 和 119hPa，在图 7 中分别用 1 到 10 层表示：

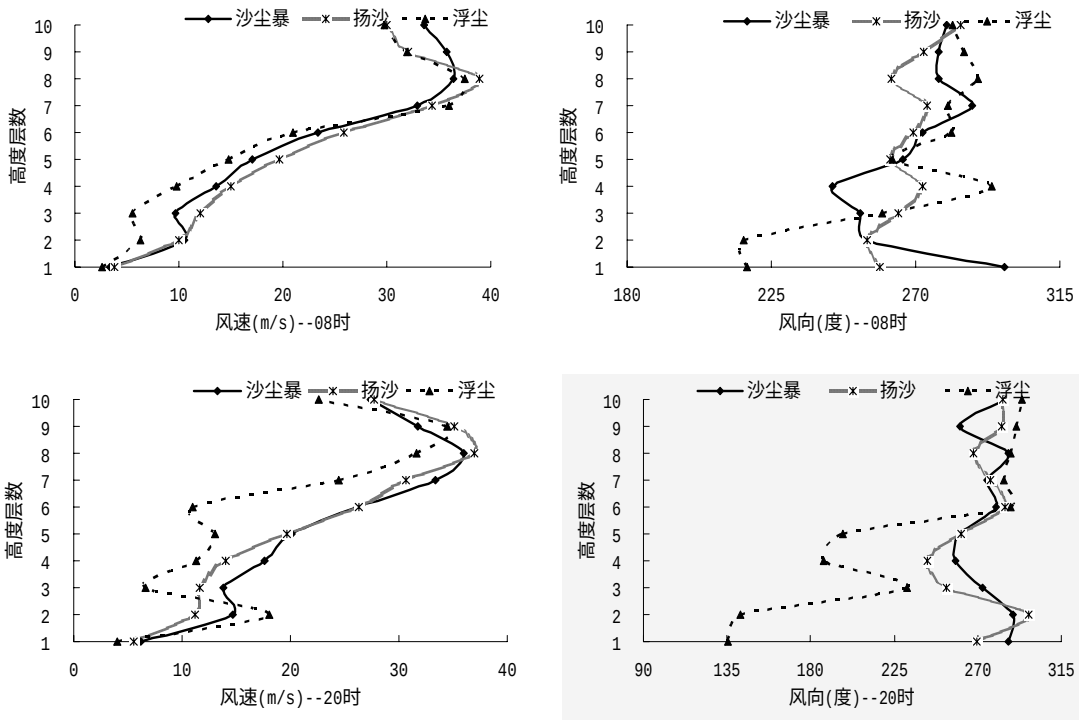


图 7 不同沙尘天气的 10 层垂直风场结构

Fig7. Structure of 10 layers' vertical wind field for different sand-dust days in Minqin

从垂直风速看，白天 08 时随高度升高，风速增大，扬沙风速较大，浮尘较小；夜间 20 时沙尘暴风速较大，但 800hPa 附近浮尘风速最大达 18M/S，浮尘在 400hPa 以下呈波动式增大，500hPa 以下夜间风速较大。

从风向看白天 08 时，沙尘暴近地面 800hPa 以下风向由西北风变为西南风，呈逆时针旋转，幅度较大，以上各层呈顺-逆交替进行，幅度较小；而扬沙 500hPa 以下呈顺时针旋

转，以上各层呈顺-逆交替进行，幅度较小；浮尘近地面 800hPa 以下无明显变化，800hPa-500hPa 呈顺时针旋转，500hPa-400hPa 呈逆时针旋转，幅度较大，400hPa 以上呈顺时针旋转，幅度较小。夜间 20 时，沙尘暴 450hPa 以下风向由西北风变为西南西风，呈逆时针旋转，幅度较小，450hPa 以上略呈顺时针旋转，幅度很小；而扬沙 800hPa 以下呈顺时针旋转，800hPa-500hPa 呈逆时针旋转，500hPa-400hPa 呈顺时针旋转，幅度较大，400hPa 以上无明显变化；浮尘 638hPa 以下呈顺时针旋转，幅度较大，638-536 hPa 以下呈逆时针旋转、536-356hPa 呈顺时针旋转，幅度较大，356hPa 以上无明显变化。

从上述分析中得出垂直风速随高度呈增大趋势，其中白天 08 时扬沙风速较大，夜间 20 时沙尘暴风速较大，浮尘风速较小；风向中，500hPa 以下沙尘暴呈逆时针旋转，浮尘呈顺时针旋转，幅度均较大，扬沙幅度较小；这说明沙尘暴发生时在 500hPa 以下其垂直方向上有明显的螺旋式辐合上升运动，白天强，夜间弱；而浮尘呈下沉运动，风速较小。这与李岩瑛^[16]分析的水平螺旋度影响沙尘强度的结果一致。

5.2 强沙尘暴的风场垂直结构日变化

特强沙尘暴往往造成五级以上重度污染，风速大灾情重。我们进一步对民勤站 5 个最小能见度在 100 米以下的强沙尘暴个例风场结构进行分析(如图 8)，得出白天 08 时 450hPa 以下风速有明显的扰动，但风速明显小于夜间，风向顺转层结稳定，而夜间 20 时风速大风向逆转呈辐合上升运动。这和上述一般沙尘暴 08 时和 20 时风向都逆转完全不同，说明在强沙尘暴发生时往往得有能量的积累。

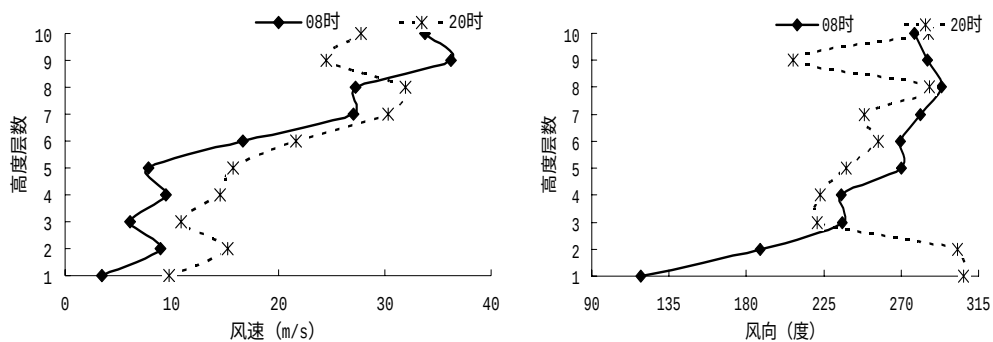


图 8 最小能见度在 100 米以下强沙尘暴的 10 层垂直风场结构日变化

Fig7. Day-night variation of 10 layers' vertical wind field Structure for strong sandstorms whose minimum visibilities less than 100m in Minqin

6 讨论与结论

T-LOGP 方法计算大气边界层厚度其局限性有两个：一是依赖探空观测资料，必须有规定层和特性层资料，二是由于日最高气温的出现远远滞后于 08 时探空资料，在实际预报时必须用日最高气温的预测值，因而日最大混合层厚度与实际值有误差。

1、沙尘天气下的最大混合层厚度介于无降水和有降水之间，在 2600 m 左右，浮尘厚度最低不足 1400 m，沙尘暴最高在 2600-2700 m 之间，日最高气温是影响最大混合层厚度的主要因子，二者呈线性正相关。

2、春季逆温层中出现最多的是辐射逆温和下沉逆温，但强度较强的是扰动逆温和锋面辐射逆温，其中 500 m 以下近地层中以辐射、锋面辐射和扰动为主，扰动较强，而 500 m 以上中高层以下沉和锋面逆温为主，锋面较强，低层强、高层弱。

3、沙尘天气中扬沙、沙尘暴和浮尘分别以锋面辐射逆温、扰动逆温和辐射逆温为主，其中沙尘暴中扰动逆温强度最强为 $131.3^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ，这说明造成扬沙天气的主要影响因子是锋面带来的冷空气，而沙尘暴是由风场的剧烈扰动引起。沙尘暴逆温强度最强，说明在沙尘暴发生时近地面层入侵的冷空气最强。沙尘暴的发生主要有低层的强扰动气流和 500m 以上锋面带来的冷空气引起的。

4、昼夜变化中：白天逆温明显多于夜间，逆温层厚度 500 m 以下白天明显大于夜间，但 500 m 以上夜间较大；白天逆温较强，但扬沙天气夜间较强，下沉逆温最强；扬沙白天较厚，但沙尘暴夜间锋面逆温较厚。

5、沙尘暴发生前近地面风场有明显的扰动，辐合上升运动增加；沙尘暴发生时在 500hPa 以下其垂直方向上有明显的螺旋式辐合上升运动，白天强，旋转幅度较大，夜间弱；而浮尘呈下沉运动，风速较小。强沙尘暴白天风速小较稳定，而夜间风速大，辐合上升运动加强。

参考文献(references)：

- [1]. 李岩瑛, 杨晓玲, 王式功. 河西走廊东部近 50a 沙尘暴成因、危害及防御对策, 中国沙漠, 2002, 22 (3), 283~286.
- [2]. 王式功, 王金艳, 周自江等. 中国沙尘天气的区域特征, 地理学报, 2003, 58(2): 193~200.
- [3]. 赵兴梁. 甘肃特大沙尘暴的危害与对策. 中国沙漠, 1993, 13(3): 1~5.
- [4]. 曾庆存, 胡 非, 程雪玲等. 大气边界层阵风扬尘机理, 气候与环境研究, 2007, 12 (3): 251-255.
- [5]. 程雪玲, 曾庆存, 胡非, 彭珍. 大气边界层强风的阵性和相干结构, 气候与环境研究, 2007, 12 (3): 227-243.
- [6]. 曾庆存, 程雪玲, 胡非. 大气边界层非常定下沉急流和阵风的起沙机理, 气候与环境研究, 2007, 12 (3): 244~250.
- [7]. 胡隐樵, 光田宁. 强沙尘暴发展与干飚线——黑风暴形成机理的分析[J]. 高原气象, 1996, 15 (2): 178 - 185.
- [8]. 胡隐樵, 光田宁. 强沙尘暴微气象特征和局地触发机制[J], 大气科学, 1996, 21 (5): 1582 - 1589.
- [9]. 张强, 王胜, 特强沙尘暴(黑风)的形成及其效应, 中国沙漠, 2005, 25(5), 675-681
- [10]. 张强, 卫国安, 侯平. 初夏敦煌荒漠戈壁大气边界层结构特征的一次观测研究[J]. 高原气象, 2004, 23 (6): 587 - 597.
- [11]. 张强, 大气边界层气象学研究综述, 干旱气象, 2003, 21 (3): 74-78.
- [12]. 李岩瑛, 钱正安, 薛新玲等, 西北干旱区夏半年深厚的混合层与干旱气候形成, 高原气象, 2009 年 2 月, 28 (1): 46-54.
- [13]. 王荣基, 李君, L 波段高空气象探测系统气压、高度观测数据分析, 气象科技, 2009, 37(1): 106-109.
- [14]. 王式功等, 城市空气污染预报研究, 兰州: 兰州大学出版社, 2002, 11: 93-101.
- [15]. 朱乾根、林锦瑞、寿绍文编著, 天气学原理和方法, 北京: 气象出版社, 1981, 3.
- [16]. 李岩瑛, 张强, 李耀辉等, 水平螺旋度与沙尘暴的动力学关系研究, 地球物理学报, 2008 年 5 月, 51 (3): 692-703.

作者简介：李岩瑛(1970-),女,甘肃武威人,高级工程师,理学博士,主要从事天气气候预报研究.发表论文 30 余篇.

致谢：本文的民勤探空资料由甘肃省民勤县气象局协助完成,在此表示感谢.