

“4. 24”河西走廊中部特强沙尘暴天气特征分析及预报方法研究

郭萍萍^{1,2}, 殷雪莲², 刘秀兰³, 刘德菊²

(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. 甘肃省张掖市气象局, 甘肃 张掖 734000; 3. 甘肃省临泽县气象局, 甘肃 临泽 734200)

摘 要

对发生在河西走廊中部 2010 年 4 月 24 日的特强沙尘暴天气过程进行了天气成因分析, 结果表明: 这次强沙尘暴是西北路径的强冷空气引发的锋后偏西大风沙尘暴天气过程。从 500hpa 环流形势看, “4. 24”强沙尘暴天气发生在欧亚中高纬地区由纬向环流向经向环流调整过程中。沙尘暴发生前乌拉尔山脊强烈发展, 极地冷空气沿强偏北气流不断在西西伯利亚堆积, 形成深厚的低压槽。强冷空气沿偏北气流向南爆发是引发这次强沙尘暴天气过程的大尺度触发系统; 高、低空急流是沙尘暴发生的重要动力条件。700hpa 河西走廊等高线与等温线呈垂直配置, 大气斜压性进一步增强, 有利于高空风动量下传; 地面热低压的发展加大了冷锋前后的气压梯度和温度梯度, 使地面风速进一步加强; 前期持续增温为沙尘暴的发生提供了有力的热力不稳定条件; 干暖区的存在对沙尘暴的发生提供了丰富的沙源并对沙尘暴的发生以及落区有很好的指示性; 下暖上冷的不稳定大气层结, 使冷锋入侵时, 触发不稳定能量的释放, 更加剧了强沙尘暴的发展。

“4. 24”强沙尘暴天气过程发生在冷湿的大背景下, 就其原因总结为以下几点: (1) 河西多戈壁沙漠分布, 春季植被稀少, 进入四月后, 气温回升, 地面开始解冻。“4. 24”强沙尘暴发生前三天气温猛增, 使地表面干土层加厚且处于松散状态, 为此次沙尘暴的发生提供了有力的物质条件; (2) 短期强大风天气是导致此次强沙尘暴天气出现的关键因素。西西伯利亚低槽东移形成的斜压性很强的高空锋区和地面强气压梯度带、河西走廊暖干区的形成和维持为地面出现大风提供了很好的动力条件和热力条件; (3) “4. 24”特强沙尘暴过程冷锋过境时正值晴天后, 气温日变化的影响加剧了大风、沙尘暴的强度。

应用 1969—2004 年河西走廊中部大风沙尘暴个例资料及 1986—2004 年数值预报资料, 应用诊断预报和统计预报方法, 总结归纳出了不同天气形势下大风沙尘暴短期 24h 预报指标和预报方程。同时, 针对大风沙尘暴过程前 6 小时高空、地面特征量及本地气象要素值的跃变具有很好的指示性, 订正和补充了短时预报指标。在业务使用中, 预报效果良好。

关键词：河西走廊中部；大风沙尘暴；预报方法

引言

近四十年来，河西走廊大风沙尘暴天气发生频率呈减少趋势^[1-2]，但特强沙尘暴天气时有发生，对生态环境、工农业生产及人民生活等危害严重。很多学者对国内及河西走廊地区沙尘暴成因及其灾害做了大量有成效的工作，得出了诸多科研成果^[3-6]。在这些科研成果的基础上，探讨和研究此类灾害性天气的预报方法很有必要，以便在今后的大风沙尘暴过程来临前更准确地做出预报，提高精细化预报服务能力，为防灾减灾提供决策依据。

2010年4月24日，西北地区的新疆、青海、甘肃、内蒙、宁夏等地发生了一次近年来罕见的大范围强沙尘暴天气过程，河西走廊遭受强沙尘暴侵袭，致使酒泉、民勤等地的最小能见度降至零米，走廊中部的张掖市，最小能见度也仅为3米，出现了罕见的黑风天气。这是继2000年“4.12”黑风天气以后历年中，西北地区持续时间最长、强度最强、影响范围最广、危害最严重的一次强沙尘暴天气过程。大风沙尘天气给当地工农业生产、交通运输及人民生活带来了极大的危害，且由大风沙尘暴引起的火灾、沙尘暴天气后的暴雪低温冻害天气使经济损失更加严重。

2010年入春以后，甘肃省河西地区气温偏低，降水偏多，在这样的气候背景下，发生如此强的沙尘暴天气过程为近年来罕见。本文对此次强沙尘暴天气的高空环流特点、地面影响系统、冷锋前后本站气象要素反映等方面进行了分析，并通过对历史大风沙尘暴资料的统计分析，确立了此类灾害性天气的预报指标与预报方程，旨在对其做出准确的预报预警。

1 沙尘暴天气概况

2010年4月24日08时左右，新疆东移南下的冷空气进入河西西部，敦煌首先出现浮尘天气，随后冷空气在东移过程中迅速加强，并倒灌进入南疆和柴达木盆地，河西走廊出现区域性强沙尘暴天气，极大风力达8-10级，酒泉、民勤还出现了能见度为0m的“黑风”。此后，沙尘暴区向走廊东部、柴达木盆地南缘及内蒙北部继续扩展，到25日凌晨，沙尘暴区移至宁夏北部，然后逐渐减弱。沙尘暴天气过后，大部分地方都出现了降水及降温，尤其是河西走廊中部沿祁连山地区出现了暴雪，最大积雪深度达到了36cm。

“4.24”强沙尘暴天气造成了巨大的经济损失，仅河西走廊中部，大风强沙尘暴天气引发火灾13起，造成一人死亡，强沙尘暴天气后的暴雪低温冻害天气，对农牧业生产更是雪上加霜，据统计，共造成经济损失达2亿多元。

2 高空环流特点

2010年4月中旬后期，欧亚中高纬环流呈弱的一脊一槽型。60°E的乌拉尔山附近有

一高压脊，而在 70°E 至 105°E 为一东北—西南向的低槽，西北地区处在西西北气流中。进入 4 月下旬，中高纬环流从弱的一脊一槽型逐渐转为两脊一槽型。脊区分别位于巴尔喀什湖以北的西西伯利亚地区以及我国东北至远东西部一带，高空槽位于乌拉尔山以西。4 月 22 日，位于黑海东侧的暖平流发展，从而促使乌拉尔山高压脊快速发展，形成闭合高压中心。冷空气在西西伯利亚堆积，形成深厚的低压槽和强锋区。23 日，乌山脊继续发展并向北扩展，其北端已伸至新地岛附近，环流经向度加大，脊前的偏北风随之加强，西北地区处在脊前的西北气流中。23 日 20 时，西西伯利亚低槽加强东移南压，其槽底分裂一小横槽入侵我国北疆国境线。24 日 08 时，500hpa（图 1）横槽转竖与北部东移的西西伯利亚低槽连为一体，在中西伯利亚至南疆形成一狭长深厚的低压槽，槽前后 ΔH_{24} 北正南负，中心值达 -13gpm ，有 -40°C 冷中心配合，低槽底部在天山至河西走廊西部形成一支风速大于 20 m/s 的强西风带。至此，欧亚中高纬地区完成了一次由纬向环流向经向环流调整过程^[7]，“4.24”强沙尘暴天气就是发生在环流调整过程中。对应在 700hpa 上， $50^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 之间，存在一支风速大于 16 m/s 的低空急流，从新疆东北部到河西西部有 4 条等温线。24 日 20 时，这支低空急流的风速普遍增大到 $22\sim 24\text{ m/s}$ ，河西走廊中西部等高线与等温线呈垂直配置，大气斜压性进一步增强^[8]，随后高空锋区及强风带进一步影响甘肃河西以东地区。25 日 08 时以后，低槽减弱东移至河套地区，大风沙尘暴天气逐渐结束。

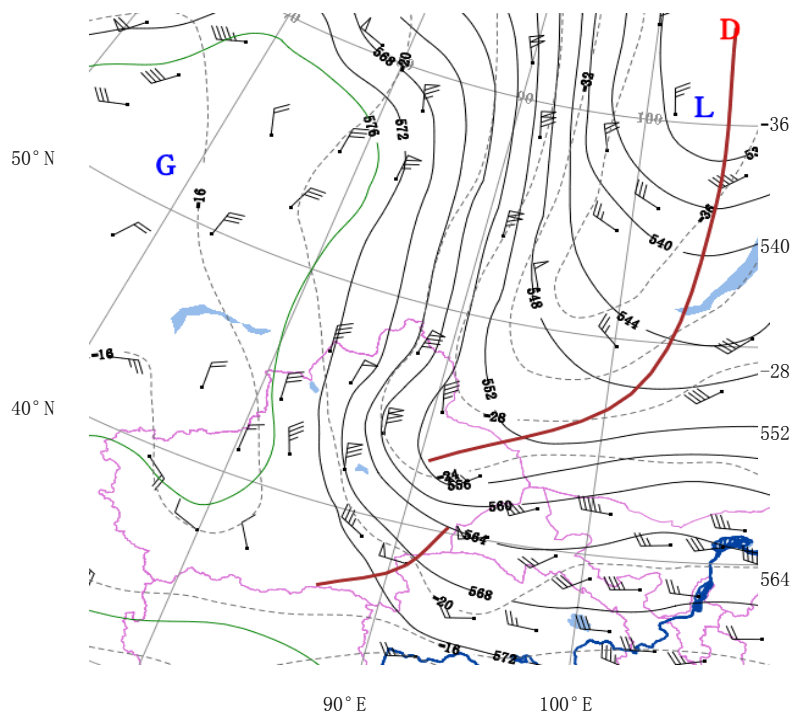


图 1 2010 年 4 月 24 日 08 时 500hpa 高度场

(实线为等高线, 虚线为等温线)

Fig.1 The 500hpa height field at 08:00 24 April, 2010

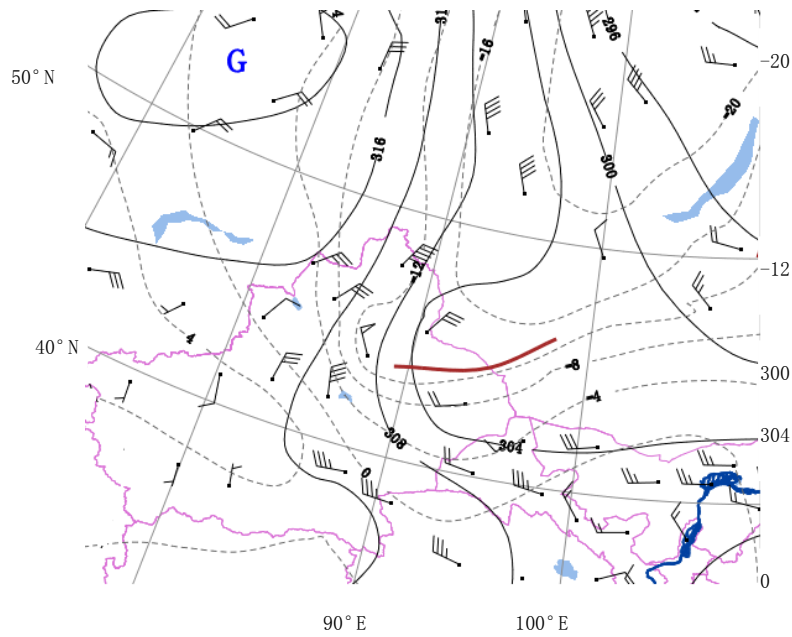


图2 2010年4月24日08时700hpa高度场

(实线为等高线, 虚线为等温线)

Fig.2 The 700hpa height field at 08:00 24 April, 2010

3 地面环流形势及影响系统

4月22日,乌山脊开始加强北伸时,新地岛以北的冷空气沿乌山脊前的西北气流南下并逐渐加强,促使西西伯利亚冷高压形成并东移。23日17时,冷高压东移加强,中心值达1041hpa,其前部的冷锋进入北疆国境线。24日凌晨,冷锋迅速东南下翻越天山至51581站,冷锋前后气压梯度开始增大。24日08时,冷锋在东移中进入内蒙古西部的热低压,猛烈加强,直冲河西走廊^[9],敦煌出现浮尘天气, ΔP_3 达4.1hpa,锋后北疆的部分地方出现大风沙尘暴天气,哈密、巴里塘、伊吾还出现了雨夹雪天气。另一股冷空气倒灌进入南疆盆地,与翻越天山东麓下沉到南疆东部的冷空气合并后东移,并迅速影响柴达木盆地,使青海大部分地方出现大风沙尘暴天气。14时,锋面到达酒泉,锋前张掖以东大部均在低压中,中心值达1004hpa,张掖 ΔP_3 为-2.9hpa。随后,冷锋继续东移,强沙尘暴自西向东席卷河西走廊中部,张掖于16时27分出现了能见度仅为3m的特强沙尘暴。17时,冷锋移至张掖和武威之间,锋前低压移至武威以东,中心值降低到1000hpa,冷锋前后 ΔP_3 差增强到8.2hpa。至20时 ΔP_3 差再度增强到9.0hpa,形成了一强气压梯度带^[10],变压梯度产生的变压风使地面风速加强,民勤于19时09分和20时,两度出现“黑风”。25日凌晨,冷

高压及冷锋进入河套地区后减弱东移，大风沙尘暴天气逐渐结束，强冷空气使大部分地方沙尘暴后出现了降水。冷锋移动路径及沙尘暴区域见图 3。

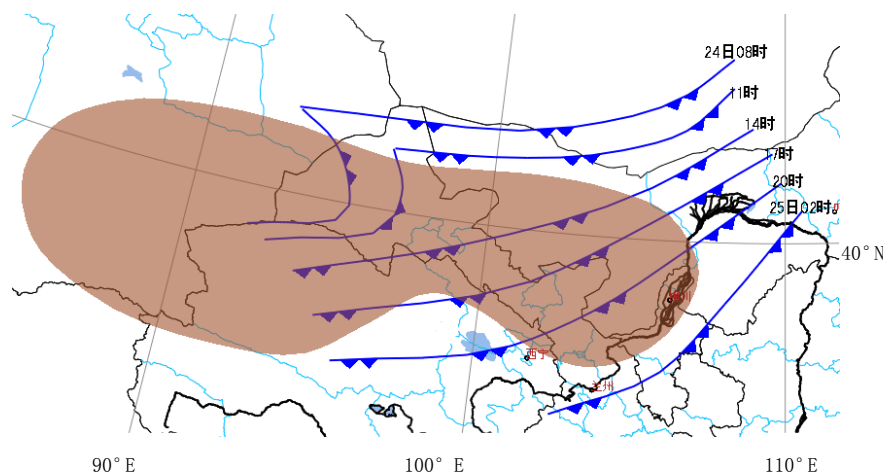


图 3 冷锋移动路径及沙尘暴区域

Fig.3 The cold front path and the dust storm area on April 24, 2010

4 干暖区与不稳定能量的释放

据有关研究，河西走廊春季沙尘暴发生在露点温度为 -10°C 的等值线所包围的干区中^[9]，分析“4.24”沙尘暴期间湿度的分布可以看出，22-23 日河西走廊湿度均较低，23 日敦煌西部到酒泉均在露点温度 $\leq -15^{\circ}\text{C}$ 的干中心内，24 日 14 时河西中东部露点温度均 $\leq -10^{\circ}\text{C}$ 。干区的存在是此次特强沙尘暴发生的重要条件。此外，从沙尘暴发生前期 21 日 14 时~24 日 14 时，河西大部分地区温度一直呈上升趋势。前期升温降压和晴朗干燥的天气为沙尘暴的形成积蓄了热能^[9,11]。从张掖本站地面至高空各层温度变化（图略）也可以看出，21 日到 23 日整层都在持续增温，低层增温幅度高于高层，大气不断地积蓄热能。24 日 08 时 500hpa 开始降温，低层仍然增温，因而在河西中部形成了下暖上冷的不稳定大气层结^[9]。因此，锋前的局地热力不稳定因素^[10]使冷锋过境时，高空强风动量下传，触发不稳定能量释放，地面风速加大。

5 沙尘暴发生前后本站要素分析

24 日张掖本站气压从 10 时后开始下降，到 15 时 13 分达到最低值 845.8hpa，说明热低压在本区爆发性发展。分析冷锋过境前后压、温、湿自记曲线（图 4）可看出，在大风沙尘暴出现前后 20 分钟内，气温明显下降，气压上升。当冷锋在 16 时 20 分到达张掖时，瞬间极大风速达到 22.1m/s，20 分钟气温下降了 6.2°C ，气压上升了 1.4hpa，能见度也急剧下降至 3m，气象要素发生了跳跃性的变化。冷锋过境时，正处在一日中最高气温出现的时段（日最高气温为 19.8°C ，出现在 14 时 08 分），下垫面迅速升温，近地层空气受热也

快，使得大气层结变得极不稳定^[12]。同时，冷锋入侵，水平温度梯度增大，使热成风加速并加强了大气的斜压性，从而加大了地转偏差风，更加剧了强沙尘暴的发展^[10]。

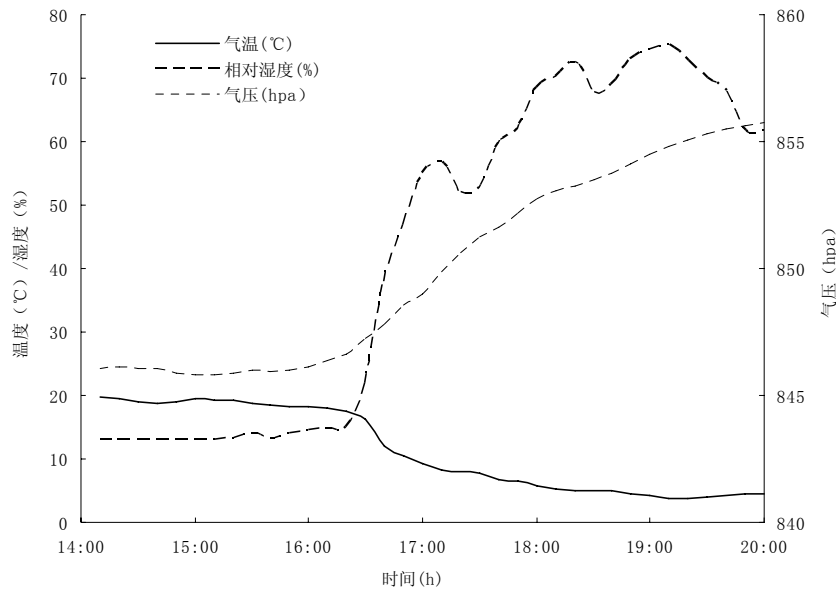


图 4 2010 年 4 月 24 日张掖站气温、本站气压、相对湿度时间曲线

Fig.4 The time curve of temperature, site pressure, relative humidity
in Zhangye on April 24, 2010

6 引发大风沙尘暴的天气形势及短期预报（24h）

河西走廊是我国沙尘暴多发的地区之一，也是沙尘暴的主要受灾区。尤其是春夏大风沙尘暴天气给农业经济发展带来的危害程度更严重。因此，提高大风沙尘暴天气的预报预警水平，减轻沙尘暴的危害程度是一项非常有必要的工作。丁荣^[13]等在研究了河西走廊中部近 45a 来大风沙尘暴环流形势后，总结出影响河西走廊中部产生区域性大风沙尘暴的天气形势主要有三个类型：冷锋后偏西大风（冷锋型）、强锋区下偏西大风（动量下传型）、地面蒙古冷高压底部的偏东大风（地面冷高压型）。我们应用 1969—2004 年河西走廊中部大风沙尘暴个例资料及 1986-2004 年数值预报资料，确立了河西走廊中部在不同天气形势背景下，大风沙尘暴天气短期预报指标，并建立了大风沙尘暴与预报指标的逐步回归预报方程。

6.1 冷锋后偏西大风（冷锋型）

- (1) 起始条件 W：预报日 14 时地面图上有锋面存在，并且满足以下四个条件之一即可：
 - i：北疆最大海平面气压与本站海平面气压的差值 $\geq 13\text{hpa}$ ，并且酒泉到张掖不能有小高压存在；

ii: 锋面前后最大正负 ΔP_{24} 的绝对值和 $\geq 10\text{hpa}$;

iii: 在河西走廊中部附近有 $\Delta P_3 \geq 2.0\text{hpa}$ 与 $\Delta P_3 \leq -3.0\text{hpa}$ 的中心值配合;

iv: 44 区至河西西部 $36^\circ \sim 47^\circ \text{N}$ 、 $85^\circ \sim 103^\circ \text{E}$ 有热低压存在。

(2) X_1 : 预报日欧洲中心 48 小时数值预报图上, 在 $35^\circ \sim 45^\circ \text{N}$, $95^\circ \sim 120^\circ \text{E}$ 范围内的槽线 (包括横槽) ≥ 5 条, 并在 $40^\circ \sim 65^\circ \text{N}$, 90°E 以西近于南北向的脊线 ≥ 3 条, 张掖处在槽前底部的偏西或西西南气流中。

(3) X_2 : 预报日 08 时 500hpa 图上, 满足以下两个条件之一即可:

i: $40^\circ \sim 55^\circ \text{N}$, $65^\circ \sim 80^\circ \text{E}$ 范围内, EN-SW 走向的槽线 ≥ 8 条, 槽后风速 $\geq 20\text{m/s}$ 的站 ≥ 7 个。新疆到河西西部处在脊中, 南疆 $\Delta H_{24} \leq -10\text{gpm}$ 。(若最大正变高中心在 $35^\circ \sim 40^\circ \text{N}$ 、 $75^\circ \sim 80^\circ \text{E}$ 范围内, 则南疆 $\Delta H_{24} \leq -15\text{gpm}$)。

ii: $45^\circ \sim 55^\circ \text{N}$ 、 $80^\circ \sim 95^\circ \text{E}$ 若有经向度较大的低压槽, 则不要求 ΔH_{24} 大小。

(4) X_3 : 预报日 08 时 700hpa 上, $38^\circ \sim 50^\circ \text{N}$, $75^\circ \sim 90^\circ \text{E}$ 范围内, 等温线呈 NE-SW 走向, 且 ≥ 3 条, $T_{\text{乌鲁木齐}} - T_{\text{张掖}} \leq -13^\circ \text{C}$ 。

(5) X_4 : 预报日在日本地面气压场形势预报图上, $35^\circ \sim 43^\circ \text{N}$ 、 $95^\circ \sim 110^\circ \text{E}$ 范围内低压中心的闭合线 ≥ 3 条, 且气压中心值 $\leq 1000\text{hpa}$ 。

(6) X_5 : 预报日 08 时地面图上, $38^\circ \sim 50^\circ \text{N}$ 、 $80^\circ \sim 90^\circ \text{E}$ 范围内有冷锋, 且锋后 $\Delta P_{24} \geq 3.0\text{hpa}$, $\Delta P_3 \geq 5.0\text{hpa}$ 。

(7) X_6 : 预报日 08 时 500hpa 上, $35^\circ \sim 45^\circ \text{N}$ 、 $85^\circ \sim 105^\circ \text{E}$ 范围内满足以下两个条件之一即可:

i: T-lnp 图上 $si \leq -0.9$ 或 $k \geq 26$ 的站大于等于 2 个;

ii: 14-15 时云图上有较明显的对流小云团移向本站。

符合条件的预报因子取值为 1, 否则取值为 0。

建立的预报方程为:

$$Y = W(0.23X_1 + 0.26X_2 + 0.28X_3 + 0.16X_4 + 0.18X_5 + 0.26X_6)$$

Y 的临界值取为 0.93

当 $Y \geq 0.93$ 时, 预报次日有区域性大风和沙尘暴发生; 当 $0.67 \leq Y \leq 0.93$ 时, 预报次日有区域性大风而无沙尘暴发生。

通过对张掖市 1969-2004 年沙尘暴个例统计, 出现此类区域性大风沙尘暴天气历史拟合率为 95%, 2005-2009 年预报准确率为 80%。

6.2 强锋区下偏西大风(动量下传型)

(1) 起始条件 W: 预报日 08 时 500hpa 图上, 在 $35^{\circ} \sim 65^{\circ} \text{ N}$, $65 \sim 105^{\circ} \text{ E}$ 范围内有宽广脊区, 脊线位置在 $37^{\circ} \sim 65^{\circ} \text{ N}$, $85^{\circ} \sim 100^{\circ} \text{ E}$, 并且在 $40^{\circ} \sim 47^{\circ} \text{ N}$, $75^{\circ} \sim 100^{\circ} \text{ E}$ 有 $\geq 20 \text{ m/s}$ 的高空强风速带, 同时在 28 区有 $\Delta H_{24} \geq 8 \text{ gpm}$ 站点存在, 51 区与 55° N 以南的最大温差 $\geq 20^{\circ} \text{ C}$ 。

(2) X_1 : 预报日欧洲中心 500hpa48 小时数值预报图上, $37^{\circ} \sim 70^{\circ} \text{ N}$, 95° E 在脊中, 脊线 ≥ 5 条, 张掖处在脊前或横槽底部的强西北气流中。

(3) X_2 : 预报日 08 时 700hpa 图上, 脊线位置同 500hpa, 对应的暖中心温度与 55° N 以南最大温差 $\geq 18^{\circ} \text{ C}$ 。

(4) X_3 : 预报日 14 时地面图上, 敦煌到酒泉有热低压存在, 低压中心海平面气压 $\leq 1030 \text{ hpa}$, $\Delta P_{24} \leq -6.0 \text{ hpa}$, $\Delta P_3 \leq -3.0 \text{ hpa}$, $\Delta T_{24} \geq 4.0^{\circ} \text{ C}$ 。张掖或山丹的 $\Delta P_3 \leq -3.0 \text{ hpa}$, $T_{14} \geq 10.0^{\circ} \text{ C}$, 同时托勒、野牛沟、祁连、门源四站中 $\Delta P_3 \leq -3.0 \text{ hpa}$ 的站数 ≥ 2 个。

符合条件的预报因子取值为 1, 否则取值为 0。

建立的预报方程为: $Y = W(0.28X_1 + 0.33X_2 + 0.36X_3 + 0.16X_4)$

Y 的临界值为 0.85

当 $Y \geq 0.85$ 时, 预报次日有区域性大风沙尘暴发生; 当 $0.8 \leq Y < 0.85$ 时, 预报次日有区域性大风而无沙尘暴发生。

通过对张掖市 1969-2004 年沙尘暴个例统计, 出现此类区域性大风沙尘暴天气历史拟合率为 96%, 2005-2009 年预报准确率为 82%。

6.3 地面蒙古冷高压底部的偏东大风(地面冷高压型)

统计发现, 河西走廊中部出现偏东大风的几率相对较少, 历史上没有出现由偏东大风引起的区域性沙尘暴天气。出现偏东大风的预报指标如下:

(1) 预报日当地面冷高压中心位于 $45 \sim 52^{\circ} \text{ N}$, $95 \sim 105^{\circ} \text{ E}$ 范围内时, 有利于次日出现偏东大风。

(2) 预报日 08 时地面图上, 冷高压中心 2 月 $\geq 1050 \text{ hpa}$, 3 月 $\geq 1040 \text{ hpa}$, 4 月 $\geq 1035 \text{ hpa}$, 同时南疆东部到敦煌有热低压规律东移, 低压中心值 $\leq 1000 \text{ hpa}$ 。

当条件满足时, 预报次日张掖市有 ≥ 5 级的偏东大风出现, 否则无。山丹出现的几率最大, 其次为张掖。

7 大风沙尘暴短时临近预报 (6h)

刘开福等^[14]对黑风暴天气系统的发展作了研究后指出, 强沙尘暴过程前 6h 左右天气尺度系统发展最强, 高空、地面特征量及本地气象要素值都有剧烈变化, 以此总结出了河西走廊东部沙尘暴天气的短时预报规则。由于河西走廊地形地貌以及气候相似, 出现大风沙尘暴天气的形势也相似, 故在此规则基础上, 通过统计 1969—2006 年张掖市区域性大风沙尘暴个例资料, 订正得出了河西走廊中部大风沙尘暴短时预报指标。

(1) X_1 : 08 时地面图上强冷锋位于内蒙古西北部至河西走廊西部一线, 锋后 51 区为 $+\Delta P_3$ 区, 锋前 52 区为 $-\Delta P_3$ 区, 冷锋前后最大 ΔP_3 差值 $\leq -10\text{hpa}$ 。

(2) X_2 : 08 时 500hpa 上, 高空低槽位于新疆东北部地区, 槽后 $\Delta H_{24} \geq 10\text{ gpm}$, 槽前 $\Delta H_{24} \leq -6\text{ gpm}$, 槽附近冷中心强度 $\leq -30^\circ\text{C}$ 。

(3) X_3 : 08 时 700hpa 上, $T_{\text{乌鲁木齐}} - T_{\text{张掖}} \leq -13^\circ\text{C}$, 500hpa 槽附近 $\Delta T_{24} \leq -8^\circ\text{C}$ 。

(4) X_4 : 08 时 (或 11 时或 14 时) 张掖 $\Delta P_{24} \leq -4.0\text{hpa}$, $\Delta T_{24} \geq 1.5^\circ\text{C}$, 二者的绝对值和 ≥ 6.5 , 并且本站气压 $\leq 846.0\text{hpa}$, 气温 $\geq 18.0^\circ\text{C}$ 。

以上四项指标都符合, 则预报午后到夜间有黑风天气; 符合其中 3 项指标而另一项基本符合时, 则预报午后到夜间有强沙尘暴天气; 符合其中 2 项, 另 2 项基本符合, 则预报午后到夜间有一般沙尘暴天气。经在 2008 至 2010 年春季的使用, 对强沙尘暴天气有较强的预测预警能力。

8 小结

8.1 沙尘暴多发生于干冷气候背景条件下^[15, 16], 在“4.24”强沙尘暴天气过程发生前期, 河西地区降水与历年同期相比偏多, 气温偏低, 能出现如此范围大、强度强的沙尘暴天气就其原因总结为以下几点:

(1) 河西多戈壁沙漠分布, 春季植被稀少, 进入四月后, 气温回升, 地面开始解冻。虽然 2010 年 3 月到 4 月中旬, 河西地区降水偏多, 但“4.24”特强沙尘暴发生前三天气温猛增, 使地表面干土层加厚且处于松散状态, 为此次沙尘暴的发生提供了有力的物质条件。

(2) 短期强大风天气是导致此次强沙尘暴天气出现的关键因素。西西伯利亚低槽东移形成的斜压性很强的高空锋区和地面强气压梯度带、河西走廊暖干区的形成和维持为地面

出现大风提供了很好的动力条件和热力条件。

(3) “4.24”特强沙尘暴过程冷锋过境时正值晴天午后,气温日变化的影响加剧了大风、沙尘暴的强度。

8.2 做好短期 24h 预报是预防沙尘暴天气灾害的关键,我们利用常规天气资料和数值预报产品,应用诊断预报和统计预报方法,总结出河西走廊中部在不同天气形势下大风沙尘暴短期诊断预报指标和预报方程,在业务运行中,预报效果良好。

大风沙尘暴过程前 6 小时高空、地面特征量及本地气象要素值的跃变具有很好的指示性,因此应将预报的重点放在短时时效上,提高减灾效益。

参考文献

- [1] 陈锦,李东庆,喻光明.近 40 年来西北地区沙尘暴日数时空分布及变化趋势[J].近 40 年来西北地区沙尘暴日数时空分布及变化趋势,2008,42(4):659-664.
- [2] 张瑞军,何清,孔丹,等.近几年国内沙尘暴研究的初步评述[J].干旱气象,2007,25(3):88-94.
- [3] 徐国昌.强沙尘暴天气过程中的若干问题思考[J].干旱气象,2008,26(2):9-11.
- [4] 岳虎,王锡稳,李耀辉.甘肃强沙尘暴个例分析研究[M].北京:气象出版社,2003,9.
- [5] 程鹏,李光林,刘抗,等.河西走廊一次区域性大风强沙尘暴天气诊断[J].干旱气象,2009,27(3):245-249.
- [6] 王伏村,张德玉,郝志毅,等.河西走廊一次夏季强沙尘暴的影响系统分析[J].干旱气象,2009,27(3):239-244.
- [7] 徐建芬,孙兰东,许东蓓,等.西北地区一次斜压槽引发的强沙尘暴研究[J].干旱气象,2001,19(2):40-44.
- [8] 樊利强.2010 年 4 月大气环流和天气分析[J].气象,2010,36(7):174-179.
- [9] 徐建芬,陶健红,杨民,等.2000 年 4 月 12 日特强沙尘暴天气分析[J].气象,27(6):22-26.
- [10] 钱莉,杨晓玲,杨永龙.河西走廊东部“2000.4.12”与“2001.4.8”强沙尘暴、寒潮天气成因对比分析[J].青海气象,2003(2):8-12.
- [11] 赵俊荣,刘振新.准噶尔盆地南缘一次强沙尘暴成因分析[J].干旱气象,2009,27(4):362-366.
- [12] 钟海玲,李栋梁,魏丽.中国北方沙尘暴的异常及其对青藏高原地面感热的响应[J].中国沙漠,2005,25(6):891-896.
- [13] 丁荣,张德玉,梁俊宁,等.甘肃河西走廊中部近 45a 来大风沙尘暴气候背景分析[J].中国沙漠,2006,26(5):792-796.
- [14] 刘开福,陈雷.黑风暴前 6 小时的天气系统跃变[J].甘肃气象,2001,19(2):45-47.
- [15] 冯起,苏志珠,金会军.塔里木河流域 12 ka BP 以来沙漠演化与气候变化研究[J].中国科学(D 辑),1999,29(增刊 1):87-96.
- [16] 戴雪荣,李吉均,俞立中,等.末次间冰期甘肃沙尘暴演化历史的黄土记录分析[J].地理学报,1999,54(5):445-453.