

河西走廊一次强沙尘暴过程的干侵入分析

王伏村^{1,2}, 邵 亮³, 郭良才⁴, 付有智², 张 悦⁵

(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. 甘肃省兰州市气象局, 甘肃 兰州 730020;
4. 甘肃省酒泉市气象局, 甘肃 酒泉 735000; 5. 甘肃省高台县气象局, 甘肃 高台 734300)

摘 要:使用 NCEP(1°×1°每天 4 次的再分析资料对 2006 年 4 月 9~10 日发生在甘肃省河西走廊的一次强沙尘暴天气进行了诊断分析。结果表明:这次强沙尘暴天气有明显的干侵入特征, 对流层中高层高位势涡度, 干空气在西北气流引导下, 沿等熵面入侵到边界层; 干侵入使对流层低层产生高位涡扰动、锋面气旋环流加强、低空急流形成、边界层辐合增强, 从而引发了这次强沙尘暴天气。

关键词:强沙尘暴; 干侵入; 位势涡度; 低空急流; 辐合

中图分类号: P445⁺. 4

文献标识码: A

引 言

沙尘暴是一种危害严重的天气现象, 国内外学者对其天气系统及成因进行了大量研究。汤绪等对甘肃河西走廊春季沙尘暴与低空急流的关系作了研究^[1], 低空急流的位置及强度可作为沙尘暴强度及沙尘暴发生和影响区的预报指标。赵琳娜等对高层位涡下传使中低层气旋快速发展在强沙尘暴中的作用进行了诊断分析^[2]。王锡稳等对 2003 年 7 月 20 日甘肃河西走廊一次历史上少见的区域性夏季沙尘暴天气进行了分析^[3], 研究发现沙尘暴爆发前散度场呈低层辐合高层辐散状态, 沙尘暴发生在最大垂直速度出现以后, 同时水平螺旋度对夏季沙尘暴预报有较好的指示意义。屠妮妮等研究了温度平流在引发强沙尘暴的蒙古气旋中的作用^[4]。王雁鹏等利用非静力中尺度气象预报模式 MM5 和三维欧拉型区域空气质量模式 CAM_x 建起一套完整的空气质量模拟系统^[5], 该模式对沙尘传输和沙尘浓度分布有较好的模拟能力。张瑞军等从沙尘暴的成因、特征、输送、影响和防治等方面总结了近年来国内的研究进展^[6]。

干侵入 (dry intrusion) 是指从对流层顶附近下沉至低层的干空气, 它可以用相对湿度场或位涡

场来表征^[7]。干侵入具有高位势涡度和低湿 2 个特征^[8]。干侵入是来自对流层顶折叠区域的高 PV 气流, 对温带气旋的发展起着有利的促进作用^[9]。国内干侵入主要用于暴雨物理机制研究^[10-12], 近来在沙尘暴天气分析中也逐步得到应用^[13-14]。本文对 2006 年 4 月 9~10 日发生在甘肃河西走廊的一次强沙尘暴天气干侵入特征及作用机制进行了分析, 进一步加深对大风、沙尘暴天气发生机理的认识。

1 天气过程概述

1.1 天气实况及灾害

2006 年 4 月 9~10 日甘肃省河西走廊出现大范围大风、沙尘暴天气, 其中鼎新、金塔、高台、临泽、张掖、民勤、山丹出现强沙尘暴, 瞬间极大风速 28.9 m/s, 最低能见度 100 m, 沙尘持续时间长达 24 h。据调查, 这次灾害天气给工农业生产造成巨大损失, 严重影响了交通运输。仅张掖市因大风沙尘暴造成的经济损失达 3 106 万元, 其中损坏日光温室大棚 10 818 座、蔬菜塑料拱棚 1 198 座、制种玉米大田地膜和洋芋地膜共 4 385.4 hm², 另外大风还造成局部火灾灾情。

收稿日期: 2008 - 03 - 28; 改回日期: 2008 - 05 - 05

基金项目: 国家自然科学基金项目“新一代天气雷达测量沙尘暴的能力和 method 研究”(40475011)、甘肃省气象局科研项目(2006 - 02)“甘肃夏季沙尘暴预报方法研究”、中国气象局兰州干旱气象研究所干旱气象科学研究基金项目 (AM200713) 共同资助

作者简介: 王伏村 (1969 -), 男, 甘肃临泽县人, 工程师, 主要从事天气预报及天气雷达应用研究。

1.2 天气形势及影响系统

2006年4月9日,08时500 hPa高空图上,乌拉尔山高压脊强烈发展,其前部低压槽槽线在巴尔喀什湖一线,槽后至槽底急流呈“L”型,急流风速 $>20\text{ m/s}$,温度槽落后于高度槽,槽前等温线与等高线交角明显,斜压性很强,有利于低压槽加深南压;08时700 hPa高空图上,槽线比500 hPa偏南2个纬距,低压槽随高度向后倾斜,但倾斜不大,槽线附近等温线密集,冷空气很强,槽后西北风速 $>16\text{ m/s}$;08时地面图上,地面冷锋在天山北侧,冷高压中心气压达1 034 hPa。4月10日,08时500 hPa高空图上,低压槽槽线已南压到酒泉西部,槽后急流风速 $>35\text{ m/s}$;08时700 hPa图上等温线密集带在张掖一线,锋后急流风速 $>20\text{ m/s}$;08时地面图上,地面冷锋过民勤、永昌站,锋后3 h变压最大值达+6.4 hPa。

2 沙尘暴过程中的干侵入特征

2.1 干侵入在等熵面上的特征

2.1.1 等熵面上的气流特征

图1(a, b, c)是2006年4月9日20时至10日20时295 K等熵面上气流矢量和位势涡度演变图,无资料区域为等熵面与地形相截处。等熵面上气流能较好地反映对流层中上部到边界层的干侵入特征。从图1(a)9日20时等熵面图上可以看出,7 000 gpm以上的急流下滑到6 000 gpm分为2支,一支向东转为西南急流,一支穿越等位势高度面继续东南下滑到2 000 gpm以下,急流前部东侧到达 96°E ,南部到达 41°N ,这时马鬃山站已出现大风、扬沙天气;10日02时(图略),2 000 gpm等位势高度线向东南突出明显,急流前部东侧到达 100°E ,南部到达 40°N ,风速加大到 16 m/s 以上,这时鼎新、金塔、酒泉出现大风、沙尘暴天气;10日08时图1(b)上,对流层中部风速加大,2 000 gpm以下急流前部东侧到达 103°E ,南部到达 39°N ,风速加大到 20 m/s 以上,民勤出现大风、沙尘暴天气,河西先前出现沙尘暴天气的各站沙尘暴进一步加强;10日20时图1(c)上,2 000 gpm以下急流前部东侧到达 105°E ,南部到达 37°N ,3 000~4 000 gpm位势高度之间的气流风速已明显减弱,地面上河西走廊除中东部还维持弱沙尘暴天气外,河西走廊西部已转为浮尘天气。

以上分析说明,从对流层中上部下滑到2 000 gpm等位势高度以下的急流前部从时间上和空间上与沙尘暴天气爆发对应较好,急流前部的风速加大

和减小与沙尘暴天气增强和减弱相联系。

2.1.2 等熵面上的位涡特征

等熵位涡的密集带表示对流层顶的位置,它也是对流层顶的断裂带^[12]。绝热无摩擦大气等熵位涡守恒,并且沿等熵面作二维运动^[15]。图1(a, b, c)中阴影区为位势涡度 $>1\text{ PVU}$ 的区域($1\text{ PVU} = 10^{-6}\text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$)。图1(a)9日20时等熵面图上, $>1\text{ PVU}$ 位涡的区域主要集中在 46°N 以北,6 000 gpm以上,随下滑气流,有一细带状 $>1\text{ PVU}$ 区域下伸到3 000 gpm,45 $^{\circ}\text{N}$ 位置。10日02时(图略),对流层中高层 $>1\text{ PVU}$ 位涡的区域继续东移南压,随下滑气流传播的高位涡区下伸到2 000 gpm以下,向南伸到 42°N 附近,此时,地面沙尘暴爆发。10日08时图1(b)上,对流层中高层 $>1\text{ PVU}$ 位涡的区域继续南压到 42°N ,随下滑气流传播的高位涡下伸到1 000 gpm,向南伸到 40°N 附近,并且区域扩大,这时地面沙尘暴强度增强,沙尘区域进一步扩大。10日20时图1(c)上,3 000 gpm以下已无 $>1\text{ PVU}$ 的位涡扰动,这时地面沙尘暴强度明显减弱,河西走廊西部已转为浮尘天气,沙尘暴区域缩小。

以上分析说明,对流层中高层 $>1\text{ PVU}$ 位涡下传到2 000 gpm以下时,沙尘暴开始爆发;下传到1 000 gpm时,沙尘暴开始增强;3 000 gpm以下 $>1\text{ PVU}$ 的位涡扰动消失,沙尘暴开始减弱消失。

2.1.3 等熵面上的湿度场特征

干侵入的另一个特征就是对流层中高层低湿空气向边界层侵入。图1(d, e, f)是2006年4月9日20时至10日20时295 K等熵面上气流矢量和湿度场分布演变图,阴影区为相对湿度 $>50\%$ 的区域,有资料的空白区为相对湿度 $<50\%$ 的区域。图1(d)9日20时等熵面图上,对流层中上层相对干区较小,在西北气流的引导下,干区向对流层低层侵入,在 46°N 、 93°E 附近形成通往河西走廊的干空气通道缺口,底部到达3 000 gpm附近,3 000 gpm以下有相对湿度 $>50\%$ 的弱湿区。10日02时(图略),对流层中上层相对干区扩大,干空气通道宽度扩大,河西走廊西部上空的干空气侵入到边界层2 000 gpm以下到达地面,这时地面沙尘暴爆发,地面观测的空气相对湿度迅速减小。10日08时图1(e)上,干空气通道宽度进一步扩大,干空气侵入到河西走廊中东部,地面沙尘暴加强,初始发生沙尘暴的各站,地面相对湿度迅速减小,沙尘暴维持、增强的各站相对湿度保持低值。10日20时图1(f)上,河西

走廊西部上空 3 000 gpm 附近出现相对湿度 >50% 的相对湿区,增湿明显,云状从卷云转为高层云,云层开始加厚,但没出现降水(11日 05时开时降雪),这时地面河西走廊西部已转为浮尘天气,沙尘暴强度明显减弱,区域缩小。

以上分析说明,对流层相对湿度 <50%的干空气侵入到边界层 2 000 gpm 以下到达地面时,地面沙尘爆发,地面空气相对湿度迅速减小;沙尘暴维持、增强期间地面相对湿度保持低值;对流层低层出现相对湿度 >50%的湿区时,沙尘暴消失或开始减弱。

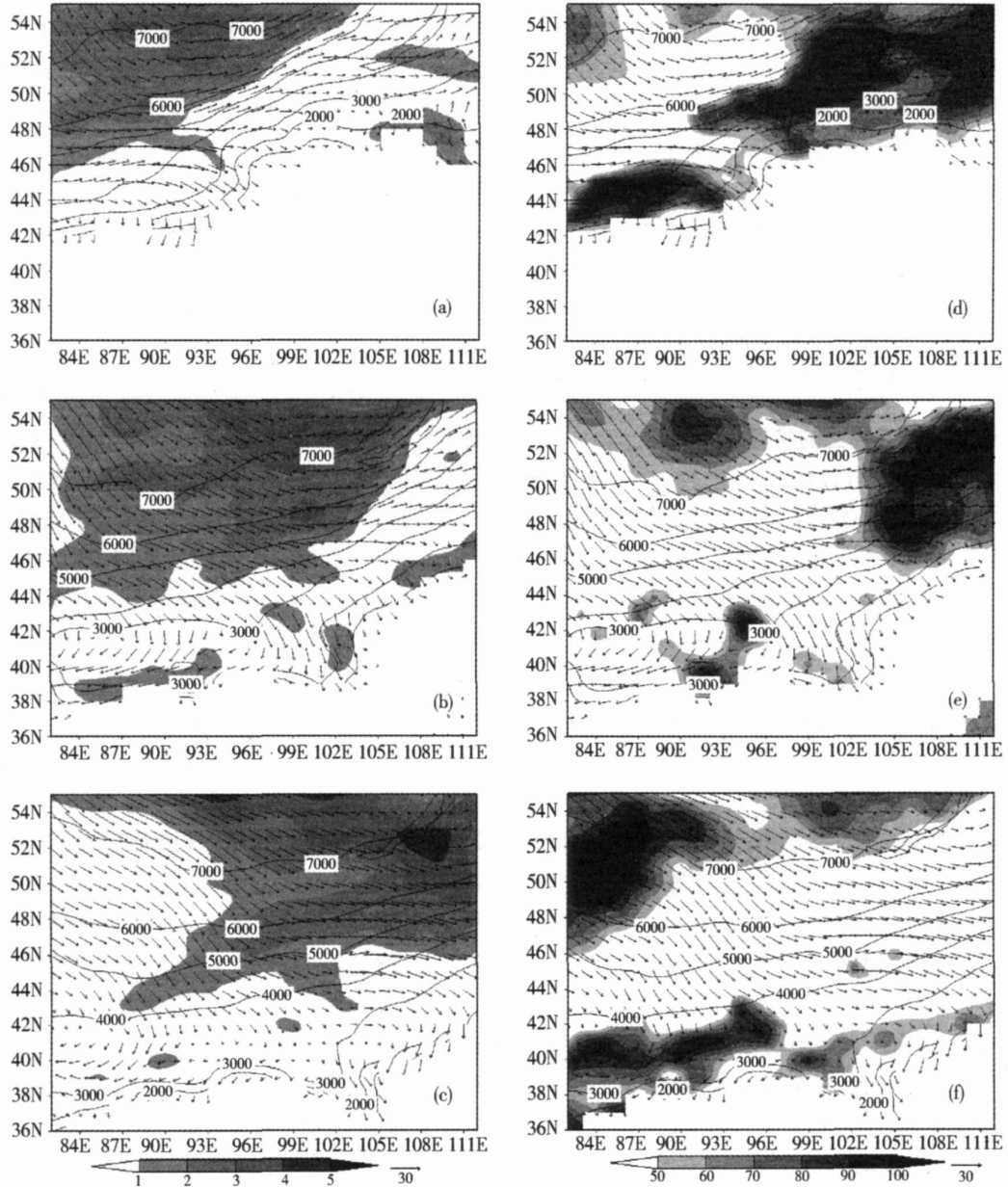


图 1 2006年 4月 9~10日 295 K等熵面上位势高度、风场、位涡、相对湿度叠加图

(a, b, c)为位势高度、风场、位涡叠加图,实线为位势高度,箭头为风矢,阴影为 >1 PVU的位涡;
 (d, e, f)为位势高度、风场、相对湿度叠加图,实线为位势高度,箭头为风矢,阴影为 >50%的相对湿度。
 无资料区为等熵面与地形交界处。(a), (d)9日 20BST; (b), (e)10日 08BST; (c), (f)10日 20BST

Fig 1 Geopotential height, wind, potential vorticity and relative humidity on the isentropic surface of =295 K from April 9 to 10, 2006

2.2 干侵入在等压坐标系中的剖面特征

图 2(a)、(b)是 2006 年 4 月 10 日 02 时和 08 时等压坐标系中位温、相对湿度、位涡沿 98 E、101 E 的垂直剖面。图 2(a) 上,对流层高层高位涡呈“漏斗”状,沿 295 K 附近等位温线密集带向下传播,向下延伸带相对较窄,800 hPa 在 43 N 附近出现 >1 PVU 的位涡扰动。对流层中高层高位涡区相对应也是相对湿度 < 20% 的特干区,相对湿度 < 40% 的狭窄带沿等位温线密集带一直向南伸展到 40 N 附近;在 800 hPa, 41 N 处出现相对湿度 <

20% 的特干区。图 2(b) 上, >1 PVU 的高位涡带加宽,继续沿 295 K 附近等位温线密集带向下向南传播;295 K 附近等位温线加密,向南爬伸到 39 N,等位温线密集带附近的湿度梯度也同时加大,800 hPa 上,相对湿度 < 40% 的干空气带伸到 38 N 附近,39 N 处出现相对湿度 < 20% 的特干区。以上分析可看出,在沙尘暴爆发和增强期间,有 >1 PVU 的高位涡从对流层高层沿等位温线密集带下滑,引起低层高位涡扰动,相伴高位涡下滑,相对湿度 < 40% 的干空气也侵入到低层沙尘暴发生区。

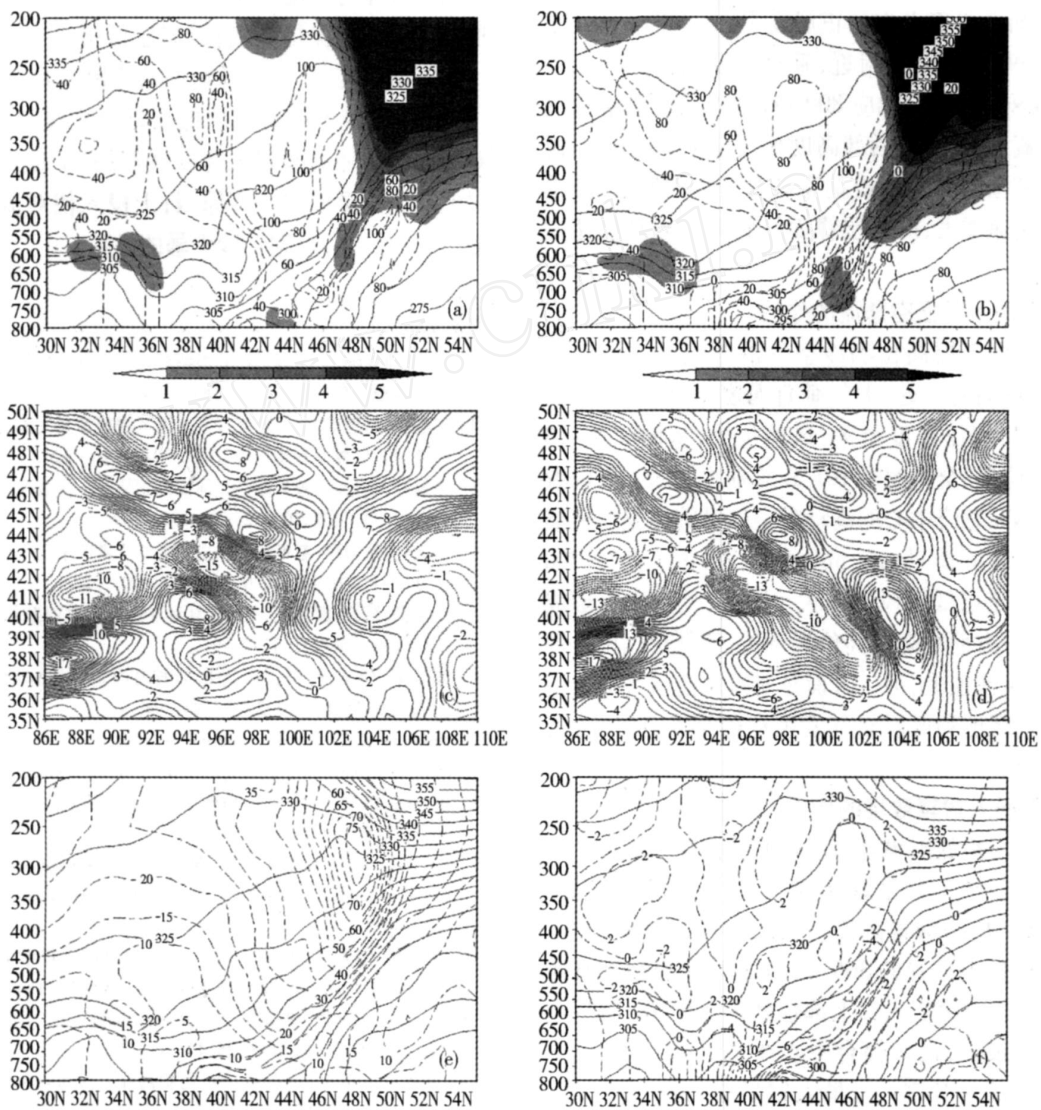


图 2 2006 年 4 月 9 ~ 10 日位温、位涡、相对湿度、全风速、散度垂直剖面图和 800 hPa 垂直度图 ((a), (b) 为位温、相对湿度、位涡剖面图 (沿 98 E, 101 E), 实线为位温, 虚线为相对湿度, 阴影为 >1 PVU 的位涡; (c), (d) 为 800 hPa 垂直度图; (e) 为位温、全风速剖面图 (沿 101 E), 实线为位温, 虚线为全风速; (f) 为位温、散度剖面图 (沿 98 E), 实线为位温, 虚线为散度。 (a), (c) 10 日 02BST; (b), (d), (e) 10 日 08BST; (f) 10 日 02BST)

Fig 2 The vertical cross sections of the potential temperature, potential vorticity, relative humidity, total velocity and divergence and 800 hPa vertical vorticity diagram from April 9 to 10, 2006

3 干侵入在沙尘暴天气中的作用

3.1 干侵入对锋面气旋环流的作用

在绝热无摩擦情况下,位势涡度守恒。按照倾斜涡度发展理论^[15],沿等熵面下滑的高位涡气块在等熵面陡立处,垂直涡度分量急剧增大,使锋面气旋迅速发展。赵琳娜等曾作了对流层高层位势涡度沿等熵面下滑对北方沙尘暴天气快速发展气旋作用的数值模拟研究^[2],研究表明高层位涡下滑到低层,对蒙古气旋有激发作用。图2(c)、(d)是2006年4月10日02时和08时800 hPa垂直涡度演变图,02~08时河西走廊上空的正涡度中心从40°N、101°E东移到39°N、104°E附近,垂直涡度从 $8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 增至 $14 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,相应800 hPa高度场(图略),气旋性环流加强,中心后部高度梯度增加20 gpm。说明高层高位势涡度沿陡立等熵面下滑到低层,使垂直涡度迅速增大,对低层锋面气旋环流起到快速发展作用。

3.2 干侵入对低空急流的作用

对流层高层高位涡冷空气沿等熵面下滑到低层,在等熵面陡立处,大气垂直涡度急剧增大,气旋环流加强,气压梯度增大,风速加大;从图2(e)10日08时位温、全风速沿101°E的垂直剖面上可以看出,300 hPa急流中心的高动量空气沿等位温线密集带向南、向下滑动,20 m/s的干冷空气抵达700 hPa,使对流层低层风速加大。因此,低空急流形成的原因,一方面是高层高位涡下传,使低层气旋性环流加强,风速加大;另一方面是对流层高层大动量空气下滑到低层和低层空气发生动量交换,低层大气运动加速。

3.3 干侵入对辐散场的作用

散度场呈低层辐合高层辐散结构有利于沙尘暴的发生^[3]。图2(f)是2006年4月10日02时位温、散度沿98°E的垂直剖面。从图中可以看出,在干侵入路径偏上位置的305~310 K等位温线处有倾斜向下的辐合带嵌入其上部辐散带下面,02时辐合辐散达到最强,最大辐合中心在800 hPa、40°N,中心值为 $-10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,最大辐散中心在700 hPa、39°N,中心值为 $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。这种对流层低层辐合辐散垂直结构配置,有利于对沙尘的抽吸作用。

4 结 语

(1)等熵面上气流、位涡及湿度场能很好地反映这次强沙尘暴过程中的干侵入特征。

(2)从对流层中上部下滑到2000 gpm等位势高度以下的急流前部从时间和空间上与沙尘暴天气爆发对应较好,急流前部的风速加大或减小与沙尘暴天气增强和减弱相联系。

(3)对流层中高层>1 PVU位涡下传到2000 gpm以下时,沙尘暴开始爆发;下传到1000 gpm以下时,沙尘暴开始增强;3000 gpm以下>1 PVU的位涡扰动消失,沙尘暴开始减弱消失。

(4)对流层相对湿度<50%的干空气侵入到边界层2000 gpm以下到达地面时,地面沙尘暴爆发,地面空气相对湿度迅速减小;沙尘暴维持、增强期间地面相对湿度保持低值;对流层低层出现相对湿度>50%的湿区时,沙尘暴消失或开始减弱。

(5)干侵入使对流层低层垂直涡度迅速增大,对锋面气旋环流起到快速发展作用;干侵入是对流层低空急流形成的主要原因;干侵入使对流层低层辐合辐散增强,有利于沙尘暴的发生。

参考文献:

- [1] 汤绪,俞亚勋,李耀辉,等. 甘肃河西走廊春季沙尘暴与低空急流[J]. 高原气象, 2004, 23(6): 840 - 846.
- [2] 赵琳娜,赵思雄. 引发北方沙尘暴天气快速发展气旋的数值模拟研究[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(1): 116 - 126.
- [3] 王锡稳,刘治国,黄玉霞,等. 河西走廊盛夏一次强沙尘暴天气综合分析[J]. 气象, 2006, 23(7): 102 - 109.
- [4] 屠妮妮,矫梅燕,赵琳娜,等. 引发强沙尘暴的蒙古气旋的动力特征分析[J]. 中国沙漠, 2007, 27(3): 520 - 527.
- [5] 王雁鹏,陈岩,殷惠民,等. 中国北方沙尘传输的数值模拟[J]. 干旱气象, 2007, 25(3): 1 - 9.
- [6] 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.
- [7] Browning K A. The dry intrusion perspective of extra-tropical cyclone development[J]. Meteor Appl, 1997(4): 317 - 324.
- [8] 于玉斌,姚秀萍. 干侵入的研究及其应用进展[J]. 气象学报, 2003, 61(6): 769 - 774.
- [9] Browning K A, Golding B W. Mesoscale aspects of a dry intrusion within a vigorous cyclone[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1995, 121: 463 - 493.
- [10] 阎凤霞,寿绍文,张艳玲,等. 一次江淮暴雨过程中干空气侵入的诊断分析[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(1): 117 - 124.
- [11] 杨贵名,毛冬艳,姚秀萍. “强降水和黄海气旋”中的干侵入分析[J]. 高原气象, 2006, 25(1): 16 - 28.
- [12] 姚秀萍,吴国雄,赵兵科,等. 与梅雨锋上低涡降水相伴的干侵入研究[J]. 中国科学(D辑), 2007, 37(3): 417 - 428.
- [13] 林良根,寿绍文,沈之林. 一次强沙尘暴过程中干空气侵入的数值模拟及诊断分析[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(3): 371 - 378.
- [14] 李戈,寿绍文,张广周,等. 河南一次沙尘天气过程干空气侵入的数值模拟及诊断分析[J]. 气象, 2007, 33(10): 28 - 36.
- [15] 吴国雄,蔡雅萍,唐晓青. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 387 - 405.

Dry Intrusion Analysis of a Strong Dust Storm in Hexi Corridor

WANG Fucun^{1,2}, SHAO Liang³, GUO Liangcai⁴, FU Youzhi², ZHANG Yue⁵

(1. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020, China; 2. Zhangye Meteorological Bureau of Gansu Province, Zhangye 734000, China; 3. Lanzhou Meteorological Bureau of Gansu Province, Lanzhou 730020, China; 4. Jiuquan Meteorological Bureau of Gansu Province, Jiuquan 735000, China; 5. Gaotai Meteorological Station of Gansu Province, Gaotai 734300, China)

Abstract: By using the reanalysis data of NCEP ($1^\circ \times 1^\circ$), the dry intrusion characteristic of a strong dust storm process occurred in the Hexi Corridor from April 9 to 10, 2006 was analyzed. The results show that the high potential vorticity, dry air from the upper level of troposphere extended downwards and southwards, which increased the vertical component of the vorticity on the steep iso-entropy plane and promoted the rapid development of the low level cyclone, resulted in a low level jet and the intensive convergence in the boundary layer.

Key words: strong dust storm; dry intrusion; potential vorticity; low level jet; convergence

(上接第 29 页)

Contrast Analysis of Environment Factors Influencing Microclimate of Mogao Grottoes

LI Hongshou^{1,2}, WANG Wanfu^{1,2}, ZHANG Guobin^{1,2}, QU Fei^{1,2}, ZHAN Hongtao^{1,2}

(1. The Conservation Institute of Dunhuang Academy, Dunhuang 736200, China; 2. Key Scientific Research Base of Conservation for Ancient Mural State Administration for Cultural Heritage, Dunhuang 736200, China)

Abstract: Based on the meteorological observations, the microclimate of Mogao Grottoes was analyzed from different temporal and spatial scales. Results show that the environment factors such as land form, water system and vegetation have some important influence on the microclimate there. The small landform structure of Mogao Grottoes and its water system have obvious influence on the wind speed, humidity, temperature and solar radiation. Comparing the monthly mean values of meteorological factors in the front and on the roof of Mogao Grottoes from April to December of 2005, the solar radiation, surface temperature and wind speed decreased 411.21 MJ/m^2 , 2.7°C and 3.7 m/s , respectively, and the relative humidity increased 9%, the monthly mean temperature range in the front of Mogao Grottoes was 0.9°C less than that of Gobi. But for air temperature, it was chiefly controlled by large scale factors. The air temperature daily range of Mogao Grottoes was 4.8°C less than that of Dunhuang in 2004. It's discovered that the environment elements of Mogao Grottoes formed more stable microclimate, and the stable microclimate was highly advantageous to the Mogao Grottoes cultural relic preservation. It was the main reason why Mogao Grottoes had been standing there for thousands years.

Key words: microclimate; water system; landform structure; contrast analysis