

文章编号:1000-694X(2006)03-0370-05

# 一次夏季强沙尘暴形成机理的综合分析

岳 平<sup>1,2</sup>, 牛生杰<sup>1</sup>, 王连喜<sup>3</sup>, 杨有林<sup>3</sup>

(1. 南京信息工程大学 大气物理与大气环境实验室, 江苏 南京 210044; 2. 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; 3. 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 宁夏 银川 750002)

摘 要: 利用沙尘暴发生前夕酒泉基准站的探空资料、沙尘暴发生前后地面自动站观测资料和有关台站的常规观测资料对 2004 年 7 月 12 日出现在我国内蒙古西部和河西走廊西端的一次沙尘暴天气过程, 从大气层结稳定度、地形因素对沙尘暴影响的机理以及下垫面性质等方面进行了分析, 并对天气现象发生时地面气象要素和地温的变化进行了研究。结果表明: ①大气层结的不稳定起了激发作用; ②该地区特殊的地形条件所造成的“狭管效应”起到了加强作用; ③沙尘暴爆发前风速迅速增大, 为起沙提供了动力条件; ④气压和相对湿度在沙尘暴发生前夕和沙尘暴过程的中后期有明显扰动, 沙尘暴结束后温度、气压、相对湿度和地面等气象要素有显著性突变。

关键词: 沙尘暴; 稳定度; 狭管效应; 气象要素突变

中图分类号: P445.4 文献标识码: A

沙尘暴是我国西北地区春季频繁发生的一种自然灾害性天气, 强沙尘暴造成的直接和间接危害往往不亚于暴雨或台风等灾害性天气。国内从 20 世纪 70 年代开始沙尘暴方面的研究工作。1979 年和 1995 年, 徐国昌等<sup>[1]</sup>和王式功等<sup>[2]</sup>人先后做了我国沙尘暴个例分析; 1998 年李宗义等<sup>[3]</sup>对同年 4 月发生在我国北方的一次强沙尘暴天气的中尺度环流形势进行了分析; 牛生杰等<sup>[4,5]</sup>对宁夏贺兰山地区沙尘暴发生频次进行了分析并在该地区沙尘气溶胶的光学厚度及质量浓度等方面做了大量科研工作; 2000 年叶笃正等<sup>[6]</sup>对我国华北沙尘天气成因进行了分析, 并提出了治理对策; 钱正安等<sup>[7]</sup>最近对中国北方沙尘天气研究现状进行了评述; 2003 年石广玉等<sup>[8]</sup>提出了沙尘暴研究中的若干科学问题, 并对国内外近期开展的比较系统的研究计划和项目进行了简要介绍。最近在一批重大项目的支持下, 科研人员在沙尘暴研究方面做了卓有成效的工作, 并取得了丰硕的成果<sup>[9~14]</sup>。

从天气系统方面分析, 造成我国西北地区春季沙尘暴的主要天气系统有: ①冷锋活动, 此期是我国西北地区冷锋活动最为频繁的季节, 强冷锋过境后都会产生很强的变压梯度, 由此产生瞬时变压强风, 并在大风所经之地, 往往导致沙尘暴的产生。②低空东风急流, 沙尘暴天气出现前期, 青藏高原东部低空常出现大幅度增温, 促使高原东北部低涡发展, 若在蒙古高原东南部同时有高压系统发展, 则可导致甘肃河西走廊地区低空东风急流的形成。这是巴丹吉林和腾格里沙漠、甘肃河西走廊至河套西部地

区发生大范围强沙尘暴的重要条件。③中小尺度系统, 天气尺度背景下, 冷锋前暖气团中往往伴有剧烈变化的中小尺度天气系统的发展。从对我国春季强沙尘暴天气的分析结果看, 与之相伴随的特强沙尘暴中心区, 总是与中小尺度系统相联系, 这表明中小尺度系统对局部强或特强沙尘暴的发生发展起着至关重要的作用。另外, 根据天气图分析, 西伯利亚地区是冬春季节冷空气暴发的源地。历史上由于冷空气源地不同而又相应的有不同路径入侵甘肃, 即西方路径、西北路径和北方路径。河西走廊西部(酒泉市)沙尘暴移动路径以西方路径和西北路径为主。

国外在引发沙尘暴的天气系统及其特点等方面的研究起步较早。Hankin<sup>[14]</sup>于 1921 年首先对印度的“*Andhi*”型沙尘暴的上升和下沉气流进行了分析。20 世纪 80 年代以来的研究更加深入, Brazel<sup>[15]</sup>对 1965—1980 年期间发生在美国亚利桑那州的沙尘暴天气类型做了详细分析并把该州多年来发生沙尘暴的天气系统分为四类: ①锋面系统; ②雷暴和对流; ③热带扰动; ④上部低涡或切断低涡。Pauley 等<sup>[16]</sup>对美国加利福尼亚一谷地处的一次沙尘暴事件研究之后指出, 高空急流、锋面次级环流和边界层过程等与沙尘暴有着密切关系, 动量由对流层上部向下输送, 促使锋的形成, 并导致动量在对流层低空积聚, 从而促进边界层过程发展, 使地表风力增强, 强地表风速对沙尘暴的爆发提供必要的动力条件。

2004 年 7 月 12 日强沙尘暴引发的机制是高空切变线, 这与我国西北地区春季发生的强沙尘暴天

气形势明显不同;与春季相比,这次沙尘暴的移动路径极为罕见,即自东北向西南的移动方向。本文从天气系统的演变、大气层结稳定性、地形因素和下垫面性质对沙尘暴影响的机理、天气现象发生前后地面气象要素和地温的细微变化及其相互作用等方面进行了分析,以期为今后研究和预测我国西北地区的沙尘暴提供参考依据。

1 资料来源

本文使用的高空资料为中国气象局配置的新型L波段探空雷达所测得的2004年7月12日20时的探空资料,这次探空在沙尘暴发生前2h内,因而,获取的资料能够较好的反映沙尘暴爆发前大气层结中各种气象要素的变化情况。所使用的地面资料是酒泉基准站自动气象站每分钟的资料和周边基准或基本站的地面常规观测资料,部分取自中国气象局布设的自动气象站沙尘暴监测系统资料。因此,所有资料具有很好的可靠性和较高的时间分辨率。

2 天气分析

2.1 天气概况

2004年7月12日内蒙古和甘肃西部共6个测站出现了沙尘暴天气现象。根据当日08时和20时探空资料及T213数值预报,结合地面天气现象发生时间,运用等速外推法在图1中给出了7月12日08时、14时和17时3个时次的高空切变位置。7月12日15时43分和17时39分,内蒙古西部的额济纳旗和拐子湖先后出现了沙尘暴天气现象,瞬间最大风速分别为 $9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,最小能见度均为700 m。当日19时23分到13日0时10分,甘肃西部的鼎新、金塔、酒泉和玉门镇地面测站相继出现了沙尘暴天气现象(表1)。

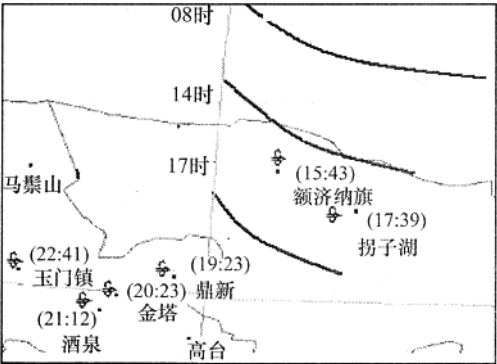


图1 2004年7月12日出现沙尘暴的测站  
Fig.1 Stations having observed sand-dust  
storm on July 12th, 2004

表1 2004年7月12日各测站沙尘暴天气实况  
Tab.1 Real sand-dust storm regime at different  
stations on July 12th, 2004

站号	站名	天气现象	起止时间	瞬间最大风速	最小能见度/m
				$/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	
52267	额济纳旗	沙尘暴	15:43~16:20	9	700
52378	拐子湖	沙尘暴	17:39~18:15	11	700
52446	鼎新	强沙尘暴	19:23~20:50	16.7	200
52447	金塔	强沙尘暴	20:23~21:37	17	200
52533	酒泉	沙尘暴	21:12~22:38	9	600
52436	玉门镇	沙尘暴	22:41~0:10	13.5	800

这次沙尘暴天气与春季本地区发生的沙尘暴相比,天气系统较弱。从地面到高空,水平风速均较春季小,但是仍然形成了沙尘墙。一方面是由于前期降水少,另一方面是因为黑河流域下游大面积小麦已收割,致使耕地裸露,表层干燥疏松,使得起沙的域值风速降低。根据文献[11],产生沙尘暴的域值风速在 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。显然这次天气过程从动力、热力以及下垫面物理性质都有利于形成沙尘暴。

2.2 天气系统演变及沙尘暴移动路径

当天08时500 hPa为“两槽一脊”,在贝加尔湖西部为一低槽,从东北、华北中部一直西伸到甘肃东部是东北—西南走向的低压槽区,两槽之间为高压脊。在高压脊的内部,贝加尔湖西以东地区有高度为584位什米的闭合等高线区,新疆、甘肃中西部和内蒙古西部及青藏高原北部为同样高度的高值区。在这两个高值区之间,位于内蒙古西部的额济纳旗和拐子湖东北有一条弱的切变线,相应的地面气压场呈现东高西低分布。从内蒙古中部和甘肃中部地面为高压区,随着贝加尔湖西北部冷槽的东移,位于其以东地区500 hPa高空584闭合等高线逐渐南压减弱,地面气压加大;新疆东部、甘肃和内蒙古西部为热低压区,随着时间推移,地表温度不断上升,热低压得到进一步发展。因此,额济纳旗和拐子湖一线地面风速逐渐加大,产生沙尘暴。之后向东南方向移动,入侵了酒泉地区东部地带,并造成了历史同期罕见的沙尘墙(图2)。同时,值得一提的是此次沙尘暴发生的天气过程,高空环流非常特殊,从实况场分析可以知道,天气区位于高空脊控制范围之内;另外,不同于以往强冷空气入侵时发生的沙尘暴天气过程,由于高空水平风比较小,因而动量下传的作用相当弱。

3 大气层结不稳定度的分析

根据2004年7月12日20时酒泉探空资料绘制的该站温度—对数压力图( $T-\ln P$ )可知(图3),不



图 2 “7.12”酒泉市肃州区西北出现的沙尘墙  
Fig. 2 Sand-dust wall in sand-dust storm occurring  
in northwest Suzhou district of Jiuquan  
city on July 12th, 2004

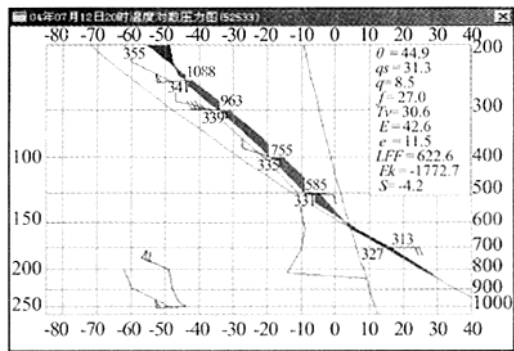


图 3 2004 年 7 月 12 日 20 时酒泉站  $T$ - $\ln P$  图  
Fig. 3  $T$ - $\ln P$  chart at Jiuquan station  
on 20:00 July 12th, 2004

稳定能量( $E$ )为  $42.6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,沙氏稳定度指数( $S$ )为  $-4.2$ ,表明大气层结处于极不稳定状态;另外,在  $500 \text{ hPa}$  以下大气层均为偏东风,高层为西风,在  $500 \text{ hPa}$  附近存在辐散和弱的风切变。 $500 \text{ hPa}$  以下高空东风风速随高度的降低逐渐增大,近地层风速为  $5 \sim 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。同时, $500 \text{ hPa}$  等压面上的辐散有利于低层大气辐合的进一步加强,从而促使垂直运动加聚,为地表起沙(尘)提供必要的动力条件。

4 地形的作用

酒泉市位于狭长的河西走廊的最西端,西边被塔克拉玛干大沙漠和库姆塔格沙漠围绕,北有马鬃山,东接巴丹吉林沙漠,南依祁连山脉。境内分布着大片的戈壁,气候干燥、降雨少、蒸发大,属典型的温带大陆性气候。内部又有两个沙尘暴中心,东片的鼎新、金塔和酒泉测站,西片的安西和敦煌盆地。由于南北两侧的祁连山和马鬃山构成了一条“狭管”,当偏北冷空气中心和地面高压中心东移到内蒙古西部地带时,沙尘暴中心和酒泉市境内的安敦盆地同时

为热低压,因此由于“狭管效应”,使风力明显加大,又因境内外有大片的戈壁或沙漠能够提供丰富的沙源。“7.12”沙尘暴的形成与当地特殊的地理地形条件和下垫面性质有着密不可分的关系,这一点可以直观地从表 1 中的风速和能见度的变化中看到。在沙尘暴的爆发源地,风速明显小于鼎新和金塔测站,最小能见度额济纳旗和拐子湖均为  $700 \text{ m}$ ,而酒泉市境内的鼎新和金塔两测站均为  $200 \text{ m}$ 。

5 沙尘过境期间及其前后地面气象要素响应

5.1 地面气温和湿度的响应

图 4 是自动站所记录的每分钟气温和相对湿度的变化曲线。酒泉站 21 时 12 分出现了沙尘暴,地面气温在前期及沙尘暴发生的前一段时间维持较高状态而且变化不大,到了 21 时 25 分则开始缓慢递减;在沙尘暴结束后的 20min 内,气温出现呈折角式骤然下降,降温幅度达  $2.5^\circ\text{C}$ 。大气相对湿度在沙尘暴爆发前及沙尘暴天气过程的前一段时间都比较小,并且呈现波动式缓慢下降趋势;中后期(从 22 时 06 分开始)呈现波动递增趋势;几乎在气温出现折角式下降的同时,湿度出现折角式显著增加,空气湿度迅速增大了  $5\%$ 。表明沙尘暴爆发前大气的干热状态有利于沙尘暴天气的发生和发展,而当天气现象维持一段时间后,大气状态的调整向着天气现象逐渐减弱或消亡的方向发展。

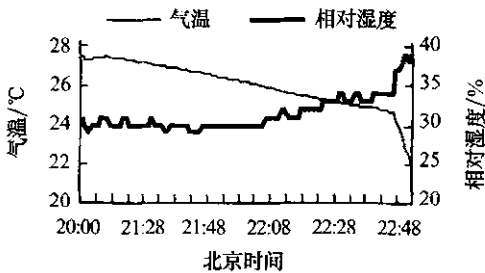


图 4 酒泉基准站自动气象站记录的 2004 年 7 月 12 日  
气温和相对湿度的变化

Fig. 4 Variation of temperature and relative humidity  
recorded by automatic weather station of Jiuquan  
base station on 20:00 of July 12th, 2004

5.2 地温对沙尘暴的响应及其与气温的关系

图 5 是自动站记录的每分钟  $0 \text{ cm}$ 、 $5 \text{ cm}$  地温和地面气温变化曲线。可以看到, $0 \text{ cm}$ 、 $5 \text{ cm}$  地温和地面气温的变化趋势非常一致。气温的递减率最大, $0 \text{ cm}$  地温次之, $5 \text{ cm}$  地温最小;在 21 时 44 分之

前,0 cm 曲线位于 5 cm 曲线上方,21 时 44~48 分两条地温线相互重合,到了 21 时 48 分之后,0 cm 地温线位于 5 cm 地温线的下方;气温线始终在两条地温线的下方。同时可以看到,在 22 时 45 分,地温几乎同时出现了迅速下降,地温在沙尘暴结束后约 7 min 时出现了类似气温的迅速递减,约 3~5 min 后气温急剧降低。从中可以得知,前期直接受到太阳辐射加热作用使 0 cm 地温比 5 cm 地温偏高,同时两项地温均比气温高,地表热量通量对 5 cm 深度以下土壤和大气同时具有加热作用;沙尘暴天气的后期,地表与 5 cm 深度以下土壤之间的加热作用出现了与前期反向作用,但对大气仍然起到热源的作用;地温的突降先于气温,这是因为地表长波辐射是大气尤其是低层大气的主要直接热源,所以地温的突变必然导致气温的突变,但这个响应需要一定的时间,即气温的突变落后于地温。

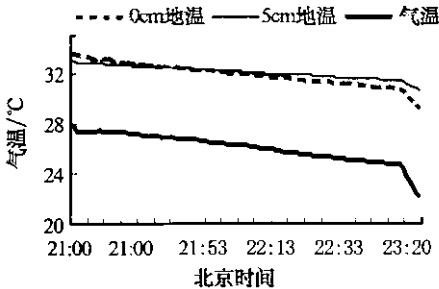


图 5 酒泉基准站自动气象站记录的 2004 年 7 月 12 日  
气温和 0 cm, 5 cm 地温变化

Fig. 5 Variation of air temperature, geotemperature at 0 cm and 5 cm recorded by automatic weather station of Jiuquan base station on 20:00 of July 12th, 2004

5.3 地面气压对沙尘暴的响应

图 6 是自动站所记录的每分钟地面气压在沙尘暴过境前后的变化情况。可以看到,沙尘暴发生前地面气压较低,而且有小幅波动;当沙尘暴爆发的时候,

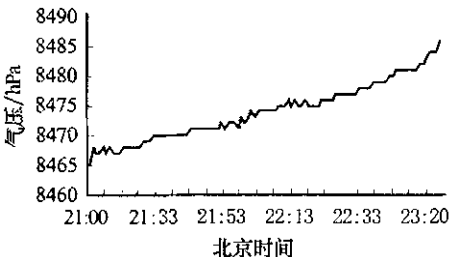


图 6 酒泉基准站自动气象站记录的  
2004 年 7 月 12 日气压的变化

Fig. 6 Variation of pressure recorded by automatic weather station of Jiuquan base station on 20:00 of July 12th, 2004  
万方数据

候,地面气压迅速增大;到中后期再次出现波动调整,同时不断加压;在沙尘暴结束后的 20 min 时间内地面气压迅速上升,  $\Delta P = 1.7$  hPa。表明前期受低气压控制,经过第一次波动调整气压迅速加大,为沙尘暴的爆发提供了动力条件;第二次波动调整使得地面气压进一步增大,伴随沙尘暴过境,地面从低气压控制转换到受高压控制。

5.4 风速的变化

图 7 是酒泉基准站自动气象站记录到的沙尘暴天气现象发生前后测站的风速的演变实况。可以看到,在沙尘暴发生前风速很小,但在沙尘暴发生前的 10 min 内,风速迅速增大到  $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,达到这次天气过程中本站的最大值。风速的急速增大为起沙提供了必要的动力条件。其迅速增大的原因主要有两个方面:一是本站气压的增大,气压梯度加大;二是本地特殊的地理地形构成的“狭管效应”所致。在整个沙尘暴天气过程当中,风速呈波动式减小。在沙尘暴结束前的 10 min,风速只有  $2 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,很难再将地面的沙尘夹卷到空中,随之空气中的沙尘逐渐沉降,能见度转好。

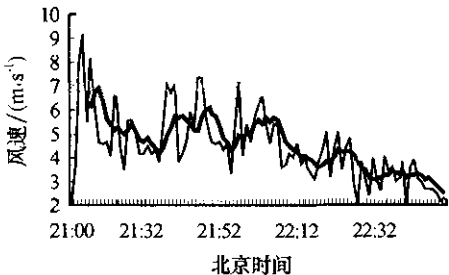


图 7 酒泉基准站自动气象站记录到的  
2004 年 7 月 12 日风速的变化

Fig. 7 Variation of wind velocity recorded by automatic weather station of Jiuquan base station on 20:00 of July 12th, 2004

6 小结

通过对这次沙尘暴天气的系统分析,得出了如下结论:

(1) 酒泉市属于我国沙尘暴的多发区,但在 7 月发生如此强的沙尘暴,而且出现了沙尘墙,在同期历史并不多见。当地历史上出现的沙尘暴多数由于受西北或西方路径冷空气入侵而产生,故移动路径自西向东推进,但此次沙尘暴移动路径为自东向西方向。

(2) 沙尘暴发生前期,低层大气尤其是地表附近大气为干热状态,有利于沙尘暴天气的发生和发展;随着时间推移,大气低层向冷湿状态转变,天气

现象消失。

(3) 酒泉市特殊的地形和地理位置构成的“狭管效应”,对这次沙尘暴天气的发展和加强起到了关键作用。

(4) 沙尘暴发生前,地面受低气压控制,经过波动调整,地面加压为沙尘暴提供了必要的动力条件;过程的中后期气压再次发生波动调整,地面处于高气压控制。

(5) 0 cm、5 cm 地温和地面气温的变化趋势非常一致,地表对低层大气的加热作用非常显著,下垫面热力作用造成大气层结不稳定,从而对激发这次天气过程起到重要作用。沙尘暴结束后,地温的急剧下降比气温发生的早。

(6) 在沙尘暴爆发前夕及沙尘暴发展的中后期,气压先于相对湿度约 10 min 出现扰动现象,前者的扰动与风力密切相连,后者的扰动与温度关系更为密切。这种扰动有利于大气进行能量的传递和交换,短时间的扰动越大,能量交换越快,越有利于天气现象的发生和发展。

参考文献 (References):

[1] 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.  
[2] 王式功,辛春兰. 我国西北地区“94.4”沙尘暴成因探讨[J]. 中国沙漠,1995,15(14):332—338.  
[3] 李宗义,蔡玉琴,张静. 一次强沙尘暴天气的大尺度环流分

[J]. 甘肃气象,1998,16(4):35—37.  
[4] 牛生杰,孙继明,桑建人. 贺兰山地区沙尘暴发生次数的变化趋势[J]. 中国沙漠,2000,20(1):55—58.  
[5] 牛生杰,孙继明,陈跃,等. 贺兰山地区春季沙尘气溶胶质量浓度的观测研究[J]. 高原气象,2001,20(3):82—87.  
[6] 叶笃正,丑纪范,刘纪远,等. 关于我国华北地区沙尘天气的成因与治理对策[J]. 地理学报,2000,55(5):513—521.  
[7] 钱正安,宋敏红,李万元. 近 50 年中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J]. 中国沙漠,2002,22(2):106—111.  
[8] 石广玉,赵思雄. 沙尘暴研究中的若干科学问题[J]. 大气科学,2003,27(4):591—603.  
[9] 周秀骥,徐祥德,颜鹏,等. 2000 年春季沙尘暴动力学特征[J]. 中国科学(D 辑),2002,32(4):327—334.  
[10] 周自江,王锡稳. 西北地区东部群发性沙尘暴序列的建立与分析[J]. 地理学报,2002,57(4):437—442.  
[11] 牛生杰,章澄昌. 贺兰山地区沙尘暴沙尘起动和垂直输送物理因子的综合研究[J]. 气象学报,2002,60(2):194—204.  
[12] 李耀辉. 近年来我国沙尘暴研究的新进展[J]. 中国沙漠,2004,24(5):1—7.  
[13] 陶健红,王劲松,冯建英. 螺旋度在一次强沙尘暴天气分析中的应用[J]. 中国沙漠,2004,24(1):83—87.  
[14] Hankin E H. On dust raising winds and descending currents [J]. *Indian Met. Memoirs*,1921,22(VI):210—213.  
[15] Brazel A J, Nicking W C. The relationship of weather types to dust storm generation in Arizona[J]. *Climatology*, 1986,3(3):255—275.  
[16] Pauley P M, Baker N L, Barker E H. An observational study of the “Inter-state 5” dust storm case[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,1996,77(4):693—720.

Comprehensive Researches on a Special Dust Storm in Summer

YUE Ping<sup>1,2</sup>, NIU Sheng-jie<sup>1</sup>, WANG Lian-xi<sup>3</sup>, YANG You-lin<sup>3</sup>

(1.Laboratory of Atmospheric Physics and Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2.Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province, Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China; 3.Ningxia Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Yinchuan 750002, China)

**Abstract:** According to the upper-air sounding radar data before sandstorm breaking out, the automatic meteorological observing data during sandstorm process in Jiuquan base station and the conventional observing data in other stations, we analyzed a case of weather events occurred in the west Mongolia and Jiuquan area of Gansu Province on July 12th, 2004. The stability of atmosphere, the mechanism of local terrain influencing sandstorm, and the characters of underlying Earth surface, as well as the variations of ground meteorological elements and ground temperature in event process have been studied. The result showed that (1) the instable atmospheric stratification played triggering role, (2) the “canalization” resulted from the special local terrain made intensifying action, (3) the rapidly increasing wind provided favorable dynamical condition. The atmospheric pressure and relative humidity obviously fluctuated in the prophase, the midterm and the later stages of sandstorm, further more, the ground surface metrological elements such as atmospheric temperature and pressure, relative humidity and underlying surface characters had abruptly changed after the event.

**Key words:** 沙尘暴; degree of stability; canalization; abrupt change of meteorological elements