

# 2000年6月4日沙尘暴过境时敦煌地面 气象要素及地表能量平衡特征的变化\*

胡泽勇<sup>1)</sup> 黄荣辉<sup>2)</sup> 卫国安<sup>1)</sup> 高洪春<sup>1)</sup>

1) (中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

2) (中国科学院大气物理研究所, 北京 100080)

P4 A

**摘要** 利用在敦煌进行的“我国典型干旱区陆-气相互作用试验”观测资料, 分析了2000年6月4日在我国西北所发生的沙尘暴过境时的地面气象要素的变化以及地表能量平衡变异特征。结果表明, 在沙尘暴过境时地面水平风风向经历了从稳定到多次调整, 再到稳定, 最后崩溃的演变。风向调整时, 风速减弱, 而调整之后, 风速加大, 同时伴有强烈的上升气流。沙尘暴天气来临前, 地面空气呈干热状态, 处于低气压控制之下; 而在沙尘暴过境时和过境后, 地面空气显得相对湿冷, 地面气压急剧上升, 并处于高压控制之下。沙尘暴过境前后, 地表的能量平衡关系遭到破坏, 净辐射大幅减少, 地气间的感热和潜热输送变弱, 土壤全天向上释放热量。

**关键词:** 沙尘暴; 气象要素; 能量平衡; 甘肃

## 1 引言

沙尘暴是指强风从地面卷起大量沙尘, 使水平能见度小于1 000 m 的灾害性天气现象<sup>[1]</sup>, 对于瞬间风速 $\geq 25 \text{ m s}^{-1}$ 、能见度 $\leq 50 \text{ m}$ 的强沙尘暴天气称为黑风暴<sup>[2]</sup>。1993年5月5日发生在我国西北的强沙尘暴(简称“93.5.5”黑风暴)给当地的工农业生产和人民生命财产造成了重大损失。之后, 我国于1993年召开了首次沙尘暴天气研讨会, 开始对沙尘暴天气做系统的研究。许多作者对历史上的一些强沙尘暴个例进行了天气学分析、卫星云图分析和数值模拟研究<sup>[3~7]</sup>, 提出了沙尘暴发生发展的若干事实和预报着眼点及方法。在沙尘暴形成发展的原因和机制研究方面, 除了强调冷空气入侵的大尺度环流背景外, 指出它具有锋前 $\gamma$ 中尺度的干飚线性质<sup>[8]</sup>, 总结出强风、强热力不稳定和沙源是形成沙尘暴的三个必备条件<sup>[3]</sup>, 还有人认为青藏高原的刚壁阻挡和地形的狭管效应<sup>[7]</sup>及久寒无雨土质疏松<sup>[4]</sup>可能影响沙尘暴的形成。此外, 还有作者对沙尘暴天气过程<sup>[9]</sup>及沙尘暴的时空分布特征<sup>[10]</sup>进行了分析。

我国西北地区的河西走廊、宁夏以及塔里木盆地的南缘是沙尘暴的多发区, 每年均要出现数次不同强度沙尘暴。2000年春季, 由于北方干旱和大气不稳定, 扬沙和沙尘暴天气屡屡肆虐我国西北、东北西南部和华北北部, 我国东部一些城市也受到不同程度

2001-08-20收到, 2001-09-10收到修改稿

\* 国家重点基础研究发展规划项目 G1998040906 和中国科学院创新领域前沿项目 210037 共同资助

的影响,对这些地区的生产和人民生活、交通运输造成了不利影响,有些较强的沙尘暴造成了较大的经济损失和人员伤亡。由于沙尘暴天气的频繁出现和影响范围扩大,使沙尘暴问题又一次成为公众和学术界瞩目的焦点。

2000年6月4日,位于河西走廊西端、塔里木盆地的下风口、党河下游的敦煌地区受到一次强沙尘暴的袭击,虽未造成人员伤亡,但使敦煌市12个乡镇的小麦、棉花、瓜果、塑料大棚、林果等受到不同程度的损失,直接经济损失达1578万元<sup>[1]</sup>。沙尘暴过境时,正值国家重点基础研究发展规划项目“我国重大气候和天气灾害形成机理和预测理论的研究”重大观测子项目“我国西北干旱区陆-气相互作用观测试验”加强观测期(5月25日至6月17日)在敦煌进行。根据我们当时的亲身体验,沙尘暴来临前,天气格外晴朗,而且感觉非常干热。下午,开始起风,而且逐渐加大,天空出现卷云。20:30左右,在我们从观测场地返回住地的短短十几分钟时间内,狂风裹着黄沙铺天盖地突然而至,空气中到处弥漫着浓烈的沙土气息。当时,目测的最低能见度不到100 m。由于风速太大,而且夹杂着沙石,观测场地的系留气球被撕成碎片,部分室外观测仪器表面的油漆涂层被打磨掉,露出了里面的金属色。值得庆幸的是,这次试验的大多数观测仪器经受住了狂风的袭击,并采集到了这次沙尘暴过境前后地面气象要素场和地表能量平衡各分量的数据。在测站稀少的沙漠戈壁地区,这份观测资料是非常宝贵的。本文利用这些观测资料对6月4日敦煌沙尘暴过境时地面气象要素和地表能量平衡各分量的演变过程及其特征进行了分析,研究沙尘暴过境时的地面气象要素的变化以及地表能量平衡特征的变化,这对研究沙尘暴发生机理及其对天气气候的影响是有帮助的。

## 2 地面气象要素的响应

加强观测实验期间,在敦煌境内自东至西一线15 km内选取了三个观测站点,它们分别是:代表敦煌绿洲下垫面的可移动自动气象站(40°09'N, 94°41'E,位于敦煌气象站内,新型可移动自动气象站,自带超声湍流观测)、代表绿洲与戈壁之间过渡带下垫面的自动气象站(40°11'N, 94°35'E)和代表戈壁下垫面的中心站(40°10'N, 94°31'E,设有微气象观测塔站和超声湍流观测系统)。6月4日沙尘暴过境时,除设在戈壁站的超声湍流观测系统在沙尘暴过境后1 h由于供电中断而停止观测以外,其他观测仪器由于使用自备电源而未受影响,因而,取得了一套沙尘暴过境前后较完整的地面连续观测资料。以下分别对各气象要素时间演变作一分析。

### 2.1 地面水平风场在沙尘暴过境前后的变化

6月4日沙尘暴在敦煌过境时,天空出现狂风大作,沙尘飞扬的天气。图1是架设在绿洲与戈壁之间的过渡带上的自动气象站记录到的地面水平风场在沙尘暴过境前后的时间演变实况。可以看到:自6月2日上午9:20至6月4日上午10:20两天多的时间内,地面水平风风向进入了一个稳定少变的阶段,基本上盛行东北风,风速逐渐增大,达到 $4\sim 7\text{ m s}^{-1}$ 的水平。此后,在沙尘暴来临前,地面水平风风向经过了3次调整:第一次调整发生在6月4日上午10:50,属于快速阶梯性调整,风向由东北跳至东南偏南;第二次调整发生在6月4日中午12:50至下午17:40,属于慢速振荡调整,风向由

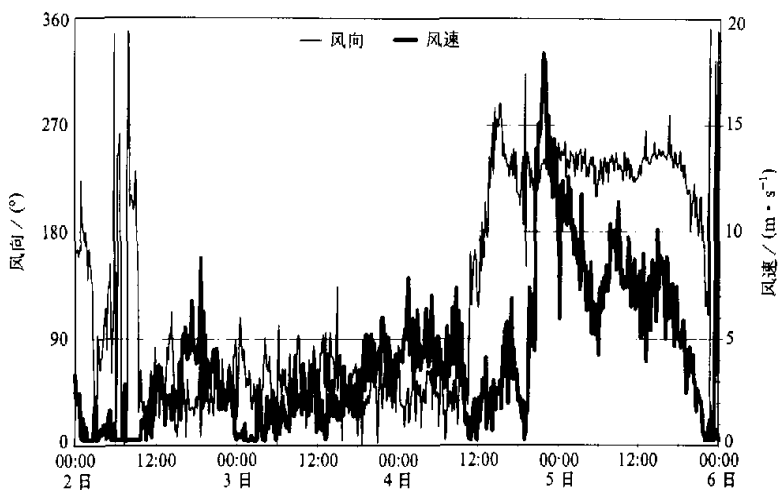


图1 敦煌绿洲与戈壁之间过渡带上的自动气象站所记录到的 2000 年 6 月 4 日沙尘暴过境前后地面水平风场的时间演变实况

东南偏南转向西南偏西,再由西南偏西转向西南偏南;第三次调整发生在 6 月 4 日傍晚 19:00 左右,属于快速振荡调整,风向围绕西南偏南方向成 90 度的快速振荡。上述三次风向调整期间风速有减小趋势,甚至出现短时的静风现象,而在每次风向调整之后的稳定期,风速有加大趋势,直至第三次调整后发生沙尘暴过境时的强风天气。经过 3 次调整,地面水平风风向从 6 月 4 日傍晚 19:30 至 6 月 5 日傍晚 19:00,又进入一个稳定少变的阶段,基本维持在西南偏南的方向上。这期间从 6 月 4 日下午 19:30 至沙尘暴前缘过境的 6 月 4 日晚 20:30,风速由静风跳至  $5\sim 6\text{ m s}^{-1}$  的水平,并保持了 1 h 左右,随后风速突然急增,10 min 内风速的最大增幅达  $9.43\text{ m s}^{-1}$  之多,至 6 月 4 日晚 21:40 达到  $18.36\text{ m s}^{-1}$  的极大值,而且  $16\text{ m s}^{-1}$  以上的强风持续了 40 min 左右。之后,随着这次沙尘暴的过境,风速逐渐减弱,虽然在 6 月 5 日上午和下午又出现过两次大风天气,但风速的总体变化趋势在逐渐减小。从 6 月 5 日晚 19:00 以后,地面水平风风向的稳定结构崩溃,并出现为期半天的静风天气。因此,沙尘暴过境时天气特点是地面风急剧增强。

## 2.2 地面附近垂直速度在沙尘暴过境前后的响应

图 2 是架设在敦煌绿洲内的新型可移动自动气象站的超声风速仪(距离地面约 5.6 m)所记录到的地面垂直风速度在沙尘暴过境前后的时间演变实况。可以看到:6 月 4 日上午,地面有微弱的下沉气流,至午前 11:00 转为较弱的上升运动,这与地面风风向的第一次调整时间相对应;随后,上升气流逐渐加大到 13:30 的  $21.25\text{ cm s}^{-1}$ ;从 6 月 4 日的 14:00 至 15:20,上升运动减弱并处于一个低值期,这次减弱则发生在地面风风向的第二次调整阶段;之后,到 6 月 4 日 19:50,上升运动加强,在 15:50 达到一个较高的峰值,达到  $21.68\text{ cm s}^{-1}$ ;从 6 月 4 日 20:00 开始,地面空气上升运动急速增大,至 21:10 达到  $52.89\text{ cm s}^{-1}$  的高值,这出现在地面风风向第三次调整 1 h 后;从 6 月 4 日

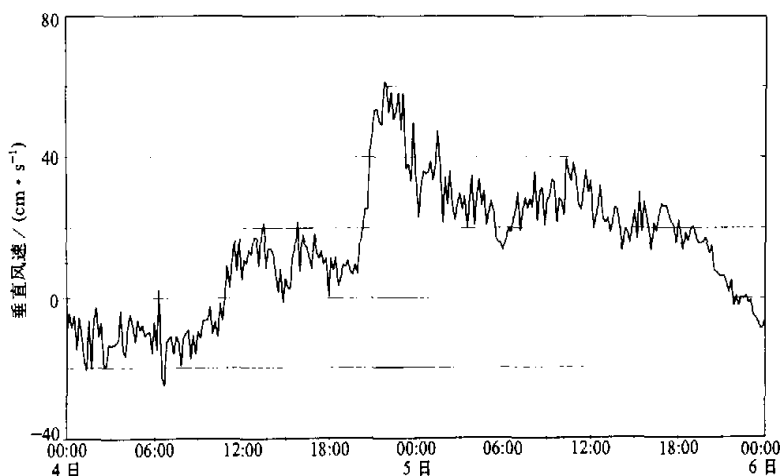


图2 敦煌绿洲内的新型可移动自动气象站的超声风速仪(距离地面约5.6 m)所记录到的地面垂直风速在2000年6月4日沙尘暴过境前后随时间的演变实况

21:10至23:10的2 h里,上升运动一直保持在 $50\sim 60\text{ cm s}^{-1}$ 的高值期,最大值可达到 $61.4\text{ cm s}^{-1}$ ,出现在21:50;从6月4日23:20至6月5日21:30,上升运动随时间逐渐减小,在6月5日上午6:00前后出现过一个低谷,这与当时出现的阵性降雨产生的向下拖拽流有关。

将图1的地面水平风风速曲线与图2的地面垂直风风速曲线做一对比分析,可看出两者有着明显的正相关关系:沙尘暴过境前后,地面水平风风速小时,上升气流也弱;而地面水平风风速加大时,上升运动加强,特别是沙尘暴前缘过境后的地面水平风极大风速区与地面垂直上升流的极大区完全对应。这说明了强风将地面沙尘卷入大气,并由强上升气流将沙尘带入高空而形成沙尘暴天气。

### 2.3 地面温、湿场在沙尘暴过境前后的响应

图3是自动气象站记录到的地面气温和空气相对湿度在沙尘暴过境前后的时间演变实况。沙尘暴天气来临前的6月3日和6月4日白天气温较高,最高气温分别达到了 $36.26^\circ\text{C}$ 和 $34.26^\circ\text{C}$ ,且6月4日的气温日较差只有 $13.74^\circ\text{C}$ ,比同期平均值小。这期间空气较干,沙尘暴过境前,相对湿度只有15.6%,地面空气处于暖干的状态,这对起沙、扬尘极为有利;6月4日20:30沙尘暴前缘过境时,气温呈折角式急剧下降,空气湿度增大,在过境后的10 min内,气温下降了 $3.22^\circ\text{C}$ ,相对湿度却增大了4.42%;之后,气温持续快速下降,而相对湿度逐渐增大;6月5日上午,在出现了一次降雨过程后,气温又一次明显下降,而相对湿度则急速增大,6月5日白天,气温达到 $13^\circ\text{C}$ 左右,相对湿度则稳定在80%左右,空气进入相对冷湿状态;6月5日晚至6月6日晨,气温继续下降,相对湿度继续上升,最低气温达到 $7.98^\circ\text{C}$ ,最大相对湿度达到99.36%。至此,此次沙尘暴在地面气温和相对湿度的反应才基本结束。

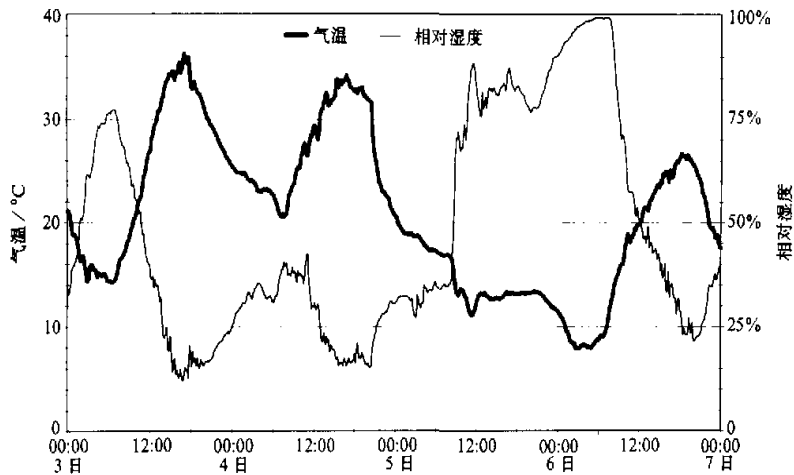


图 3 敦煌绿洲与戈壁之间的过渡带上的自动气象站所记录到的地面气温和空气相对湿度在 2000 年 6 月 4 日沙尘暴过境前后的时间演变实况

2.4 地面气压在沙尘暴过境前后的响应

图 4 是自动气象站所记录到的地面气压在沙尘暴过境前后的时间演变实况。可以看到: 沙尘暴天气来临前, 地面受低气压控制, 6 月 4 日下午 18:40 气压达到最低值, 为 873.5 hPa; 之后, 由于沙尘暴过境, 气压猛增, 10 分钟内气压增幅最大值 1.2 hPa 出现在 6 月 4 日晚上的 22:50~23:00 之间, 沙尘暴前缘过境后的 30 分钟左右出现了振幅 0.4 hPa 的气压脉动变化; 从 6 月 5 日 11:40 起, 气压增大趋势基本停止, 变得稳定少变, 地面开始受高气压控制。因此, 伴随着沙尘暴过境, 地面从受低气压控制到受高气压控制, 气压增大了 14 hPa 左右。

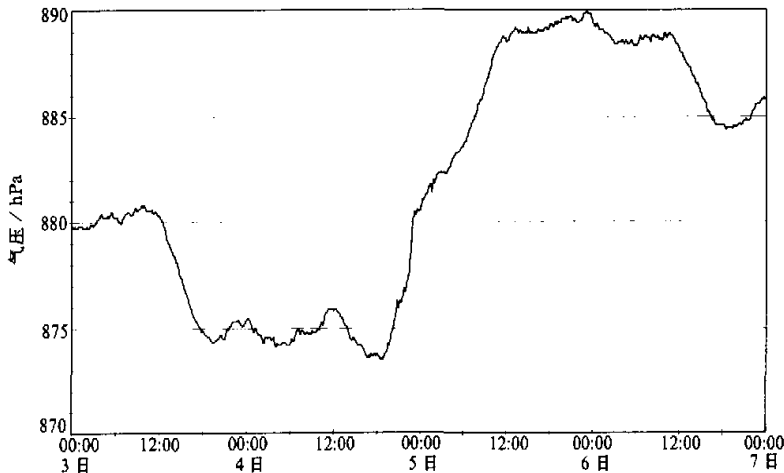


图 4 敦煌绿洲与戈壁之间的过渡带上的自动气象站所记录到的地面气压在 2000 年 6 月 4 日沙尘暴过境前后的时间演变实况

### 3 地表能量平衡特征

#### 3.1 地表净辐射

沈志宝和魏丽<sup>[12]</sup>利用 HEIFE 地面辐射资料和卫星遥感资料定量估算了沙尘的辐射效应。本研究利用在敦煌设立的可移动自动气象站所测得的净辐射量来分析在沙尘暴过境前后地表净辐射的变化。由于太阳短波辐射和地表长波辐射与太阳高度角有密切关系, 因此, 本研究只能由 6 月 4 日 12:00~16:00 沙尘暴来临时、6 月 5 日 12:00~16:00 沙尘暴影响时与 6 月 6 日 12:00~16:00 沙尘暴已完全过境之后的净辐射相比。图 5 是 6 月 4 日至 6 月 6 日可移动自动气象站测得的净辐射日变化曲线。可以看到: 在 6 月 6 日沙尘暴已完全过境之后, 在敦煌戈壁地区净辐射量为  $403 \sim 556 \text{ W m}^{-2}$ , 最大值为  $556 \text{ W m}^{-2}$ ; 在 6 月 4 日沙尘暴来临前夕, 净辐射量为  $158 \sim 358 \text{ W m}^{-2}$ ; 而 6 月 5 日正当沙尘暴过境时, 净辐射量只有  $13 \sim 124 \text{ W m}^{-2}$ 。这说明了沙尘暴到来时, 由于大气中沙尘含量大, 使得大量太阳短波辐射被散射和反射回太空, 致使达到地表的太阳短波辐射明显减弱, 从而使净辐射大幅度减少。因此, 沙尘暴不仅严重影响能见度, 而且还严重影响到达地表的太阳辐射, 从而影响到天气气候。

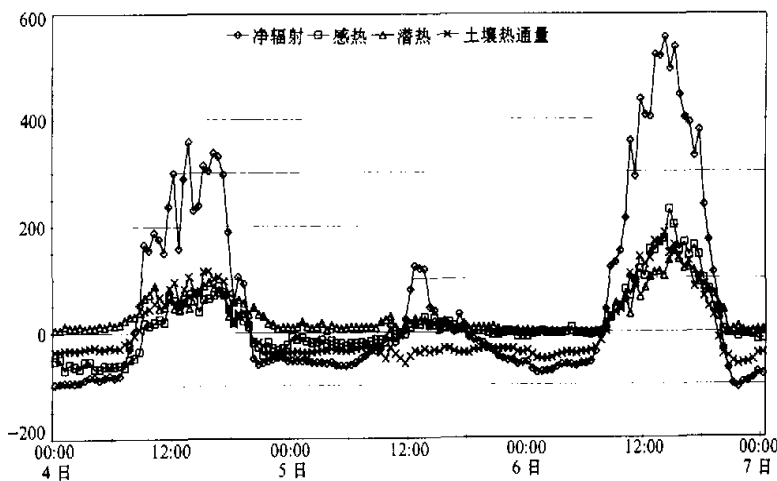


图5 敦煌绿洲内的可移动自动气象站的净辐射、感热、潜热和 5 cm 深土壤热通量在 2000 年 6 月 4 日的日变化曲线。单位:  $\text{W m}^{-2}$

#### 3.2 地表附近的感热和潜热输送及土壤热通量

利用本试验在敦煌的可移动自动气象站超声湍流观测仪所测出的空气温度、比湿和垂直风速脉动  $T'$ 、 $q'$  和  $w'$ , 并根据涡旋相关法<sup>[13]</sup>, 计算出地-气之间的感热 ( $H_s$ ) 和潜热 ( $H_l$ ) 输送, 有关计算公式如下:

$$H_s = \rho c_{p,d} (\overline{w'T'} + 0.84 \overline{T'w'q'}), \quad (1)$$

$$H_l = L \rho \overline{w'q'}, \quad (2)$$

上述两式中,  $\rho$  是空气密度,  $c_{p,d}$  是干空气定压比热,  $L$  是水的汽化潜热。图 5 还给出了利用上式计算的 6 月 4 日至 6 月 6 日感热、潜热日变化曲线和测得的 5 cm 深土壤热通量日变化曲线。从图中可以看到: 6 月 4 日, 感热和潜热较小, 最大值分别只有  $87 \text{ W m}^{-2}$  和  $95 \text{ W m}^{-2}$ , 5 cm 深处的土壤最大向下热通量约  $116 \text{ W m}^{-2}$ ; 6 月 5 日受沙尘影响, 土壤热通量全天向上, 最大值为  $59 \text{ W m}^{-2}$ , 而最大感热和潜热通量只有  $26 \text{ W m}^{-2}$  和  $29 \text{ W m}^{-2}$ , 地表能量收支出现不平衡, 存在  $120 \text{ W m}^{-2}$  左右的盈余, 这可能是由于能量平流所致, 关于这一点有待进一步研究; 6 月 6 日感热和潜热有大幅增长, 最大值达到  $230 \text{ W m}^{-2}$  和  $151 \text{ W m}^{-2}$  的水平, 土壤向下热通量最大值为  $186 \text{ W m}^{-2}$ 。因此, 由于沙尘大大削弱到达地表的太阳短波辐射, 从而影响到地表对大气的感热和潜热输送。

## 4 结论和讨论

通过对“我国西北干旱区陆-气相互作用观测试验”在敦煌所观测到的 2000 年 6 月 4 日沙尘暴过境前后的地面气象要素和地表能量平衡变化特征的分析, 得到如下结论:

(1) 沙尘暴天气过境前后, 地面水平风风向经历了从稳定到多次调整, 再到稳定, 最后崩溃的演变, 风向调整时, 风速减弱, 而调整之后, 风速加大, 直至出现沙尘暴过境时的强风天气, 这使得大量沙尘卷入大气。沙尘暴过境时, 不仅伴随有大风天气, 而且还有很强的上升运动, 这有利于将沙尘带入高空。沙尘暴天气来临前夕, 地面空气呈干热状态, 处于低气压控制之下, 这有利于把大量沙尘扬起, 而在沙尘暴过境时和过境后, 地面空气显得相对湿冷, 地面气压急剧上升, 并处于高压控制之下。

(2) 沙尘暴来临与过境时, 由于空气沙尘含量大, 致使到达地表的太阳短波辐射大大减弱, 从而使净辐射量大幅度减少; 与此同时, 受沙尘的影响, 感热和潜热输送都较小。沙尘暴过境时, 土壤全天向上输送热量, 但量级较小。

从以上观测结果可看到, 地面风长时间稳定维持, 空气干燥伏热, 地面受低压控制, 也许是沙尘暴早期预测的前兆因子。

## 参 考 文 献

- 1 中央气象局, 地面气象观测规范, 北京: 气象出版社, 1979.
- 2 Chuo, H., *Gust Fronts in Niger*, Tenki, 1994, 41.
- 3 钱正安、贺慧霞、瞿章、陈敏连, 我国西北地区沙尘暴的分级标准和个例谱及其统计特征, 中国沙尘暴研究, 北京: 气象出版社, 1997, 1~10.
- 4 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与预报, 中国沙尘暴研究, 北京: 气象出版社, 1997, 44~51.
- 5 江吉喜, 一次特大沙尘暴成因的卫星云图分析, 应用气象学报, 1995, 6(2), 177~184.
- 6 焦彦军、钱正安、陈玉春等, “93.5.5”特强沙尘暴的数值预报研究, 中国沙尘暴研究, 北京: 气象出版社, 1997, 121~127.
- 7 焦彦军、钱正安, “93.5.5”特强沙尘暴成因的数值模拟研究, 中国沙尘暴研究, 北京: 气象出版社, 1997, 134~141.
- 8 胡隐樵、光田宁, 强沙尘暴发展与干绝线—黑风暴形成的一个机理分析, 高原气象, 1996, 15(2), 178~185.
- 9 徐国昌、陈敏连、吴国雄, 甘肃省“4.22”特大沙尘暴分析, 气象学报, 1979, 37(4), 26~35.

- 10 徐启运、胡敬松, 我国西北地区沙尘暴天气的时空分布特征分析, 中国沙尘暴研究, 北京: 气象出版社, 1997, 11~15.
- 11 柴金明、王斌银, 沙尘暴袭击敦煌——直接经济损失达1578万元, 甘肃日报, 2000年6月6日, 第一版.
- 12 沈志宝、魏丽, 我国西北大气沙尘气溶胶的辐射效应, 大气科学, 2000, 24(4), 541~548.
- 13 王介民、刘小虎、祁永强, 应用涡旋相关方法对戈壁地区湍流输送特征的初步研究, 高原气象, 1990, 9(2), 120~129.

## Variations of Surface Atmospheric Variables and Energy Budget during a Sandstorm Passing Dunhuang on June 6 of 2000

Hu Zeyong<sup>1)</sup>, Huang Ronghui<sup>2)</sup>, Wei Guoan<sup>1)</sup> and Gao Hongchun<sup>1)</sup>

1) (*Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

2) (*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

**Abstract** An intensive observation period (IOP) of "The Experiment of Air-Land Interaction in Typical Arid Area of China" was carried out in Dunhuang area of Northwest China from May to June of 2000. Based on the experiment dataset investigation, the characteristics of surface atmospheric variables and energy budget were analyzed during a sandstorm. The results showed that the wind direction experienced difference phases during the sandstorm. The wind speed decreased at adjust phases but increased at stable phases and with strong upward airflow. The air was hot and dry with low pressure before the sandstorm, but cold and wet with high pressure during the sandstorm. The surface net radiation was low due to high density of sand particles in the air. The surface sensible and latent heat flux became weak. The soil transferred heat from deep layer to the surface the whole day and night time during the sandstorm.

**Key words:** sandstorm; atmospheric variables; energy budget; Gansu Province