

北京地区一次强沙尘暴过程的大气边界层结构和湍流通量输送特征

彭 珍^{1,2} 刘熙明^{1,3} 洪钟祥¹ 王丙兰¹

1 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 江西省气象局, 南昌 330046

摘 要 利用中国科学院大气物理研究所北京 325 m 气象塔的风速和温度平均场观测资料和湍流资料, 以及北京市气象台地面常规气象资料和逐日08:00和20:00(北京时间)的探空资料, 分析了2002年3月18~22日沙尘暴过境前后北京城市边界层结构特征和湍流输送特征, 结果表明: 1) 在沙尘暴爆发前, 边界层中水平风速一直较小; 气温较高, 大气层结稳定, 在边界层上部有强大的逆温层。随着冷锋过境, 沙尘暴爆发, 边界层中水平风速和平均湍流速度急剧增强; 温度也突然变化, 先迅速增强后又持续下降, 逆温层迅速被破坏。2) 沙尘暴初期, 280 m 上为系统性上升气流, 而 47 和 120 m 则为系统性的下沉气流。随着沙尘暴爆发, 湍流动能、向下传输的动量以及向上传输的感热也迅速增大, 并且 120 m 高度的湍能、动量通量以及感热通量明显高于 47 和 280 m, 这与北京的局地环流有关。3) 本次沙尘暴过程中, 120 和 47 m 层的摩擦速度都明显超过了北京的临界摩擦速度, 表明局地起沙也是本次沙尘暴过程中北京沙尘的一个重要沙源。

关键词 北京 325 m 气象塔 沙尘暴 城市边界层 湍流通量 逆温层

文章编号 1006-9585 (2007) 03-0267-10 **中图分类号** X169 **文献标识码** A

Characteristics of Atmospheric Boundary-Layer Structure and Turbulent Flux Transfer during a Strong Dust Storm Weather Process over Beijing Area

PENG Zhen^{1,2}, LIU Xi-Ming^{1,3}, and HONG Zhong-Xiang¹, WANG Bing-Lan¹

1 *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *Jiangxi Meteorological Bureau, Nanchang 330046*

Abstract Based on the mean wind, temperature and humidity data and turbulent data observed at the Beijing 325 m Meteorological Tower, and the surface conventional meteorological data and sounding data collected at Beijing Meteorology Observatory, some characteristics of atmospheric boundary layer structure and turbulence transfer during the strong dust storm weather from 18 to 22 March 2002 was investigated. The results showed that, 1) before the dust storm broke out, the mean wind speed was very slow and the temperature was comparatively high. And strong inversion layers existed in the upper atmospheric boundary layer (ABL). While after the dust storm broke out, the wind speed increased sharply and the temperature changed greatly. The temperature increased sharply in

收稿日期 2007-04-05 收到, 2007-04-25 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40233030、40405004, 城市气象科学基金 UMRP200509 和国家财政部“西北地区土壤水分、沙尘暴监测研究”项目 (Y0101)

作者简介 彭珍, 女, 1979 年出生, 博士研究生, 主要从事大气边界层物理和大气湍流的研究。E-mail: zpeng@mail.lapc.ac.cn

advance, and then decreased continuously. Consequently the inversion layer was rapidly destroyed. 2) During the initial stages of the synoptic process, there were systematic upward flows at the 280 m height in the ABL, but systematic downward flows occurred at the heights of 47 m and 120 m during the synoptic process. The turbulence energy, the momentum transportation and the sensible heat transportation were increasing sharply. The turbulence energy and the fluxes of turbulent momentum and sensible heat collected at 120 m height was larger than those collected at the heights of 47 m and 280 m, perhaps which was caused by the local circumfluence of Beijing. 3) In this dust storm process, the friction velocities collected at 47 m and 120 m heights were larger than the critical friction velocity of Beijing, consequently we got the conclusion that the local dust emission is one of the important source of dust particles of Beijing in this synoptic process.

Key words Beijing 325 m Meteorological Tower, dust storm, urban boundary layer, turbulence flux, inversion layer

1 引言

沙尘天气是指强风从地面卷起大量沙尘,使空气混浊、大气能见度降到极低的一种天气现象。它是北非、中东、美国中西部、澳大利亚一些地区、俄罗斯的中亚地区以及我国西北和华北等干旱荒漠地区特有的一种灾害性天气。它直接影响人类的生存环境,危害极大。沙尘天气自古有之,但人们开始真正研究沙尘暴始于 20 世纪 20 年代初。1921 年, Hankin^[1] 对印度的“*Andhi*”型沙尘暴的上升和下沉气流进行了分析。之后, Idso 等^[2] 对发生在美国 Arizona 的强沙尘暴进行了描述,并对其中的温湿场进行了分析。Pauley 等^[3] 从沙尘外部输送条件、底层天气条件以及上层天气条件等方面对发生在美国加州圣华金峡谷 (San Joaquin Valley) 的强沙尘暴过程进行了比较详细的分析。此外利用数值模拟方法研究起沙率的方法也逐渐发展起来^[4~8]。

沙尘暴和扬沙天气具有显著的地域性,我国北方干旱、半干旱地区是沙尘暴和扬沙的易发区,其中西北地区是多发区。研究表明沙尘暴和扬沙天气具有显著的年代际变化,20 世纪 50 年代最多,60 年代减少,70 年代回升,80 年代又减少,90 年代继续减少并达到最小值,但 2000~2002 年又相对增多,总体呈波动减少的趋势^[9~16]。我国研究沙尘天气的工作起步较晚,1981 年,周明煜等^[17,18] 曾对北京地区一次沙尘暴的气溶胶特征进行了分析。90 年代以后,我国许多学者,从统计分析、数值模拟等方面对影响我国的沙尘暴天气进行了更深层次的研究。张仁健等^[19] 指出 2000~

2002 年我国北方沙尘天气凸显出频次高、持续时间长、强度大、影响范围广的新特征。Fan 等^[20] 指出:我国北方地区的沙尘频次与南极涛动指数有较好的负相关关系。周秀骥等^[21] 综合分析了 2000 年春季影响北京地区的沙尘暴天气过程,揭示了沙尘暴天气在起沙、扬沙、水平输送以及沉降过程中关键的动力学问题。Qian 等^[22] 详细讨论了我国沙尘暴的年季变化。Wang 等^[23] 根据天气类型、摩擦速度和土壤湿度 3 个控制因素设计了东亚地区起沙机制模型,发展了沙尘数值预报模式。

石广玉和赵思雄^[24] 详尽地回顾了沙尘暴研究的历史,并指出沙尘暴研究涉及到气象、水文、地质、地理、化学和遥感等多门学科。到目前为止,仍有大量的问题有待解决,如:沙尘暴的发生机制,沙尘暴的输送过程及其时空分布特征等等。除统计分析和数值模拟以外,典型个例分析也是沙尘暴研究的基本方法之一。王式功等^[25] 指出,我国西北地区易产生沙尘暴天气的主要天气系统有冷锋活动、河西走廊地区低空东风急流以及中尺度系统等;胡隐樵等^[26,27] 的研究结果表明,大尺度的天气形势(例如冷锋面或高空低压槽过境)、中尺度的干飚线以及局地热力不稳定三方面的相互作用,构成了黑风暴发生的物理机制。而胡泽勇等^[28] 的研究结果表明,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,调整之后,风速加大,同时伴有很强的上升气流;沙尘暴过境前,地面空气相对干热,过境后,地面相对湿冷。刘东升^[29] 指出沙粒的起动与边界层湍流运动及其类似冷空气锋面附近动力抬升以及地

面水平强风场的动力结构相关。姚文清^[30]利用北京 325 m 气象塔观测资料, 对 2001 年 3 月下旬北京地区的一次沙尘暴过程进行了较为细致的研究, 并得到了由于低空急流的影响, 120 m 高度的湍流通量和感热通量明显高于 47 m 和 280 m 高度的值, 城市边界层内存在很强的湍流动量通量由上向下输送的结论。

为了进一步了解强沙尘暴天气过程中城市大气边界层的湍流通量输送, 本文利用 2002 年 3 月 17~24 日北京气象台常规地面资料及 08:00 和 20:00(北京时间, 下同) 每天 2 次探空资料以及北京 325m 气象观测铁塔梯度观测资料和超声风速仪测量的湍流资料, 对 2002 年 3 月 18~22 日发生在我国的一次强沙尘暴过程的大气边界层结构和湍流通量输送特征进行更为细致的分析。气象塔梯度观测资料为 20 s 一次的自动观测, 垂直共有 15 层, 观测高度分别为离地面 8、15、32、47、63、80、103、120、140、160、180、200、240、280 和 320 m, 包括风速、温度和相对湿度的观测。湍流资料垂直共有 3 层, 分别位于 47、120 和 240 m, 所用观测仪器是中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室(LAPC)自行研制的新一代超声风速仪(UAT-1), 采样频率是 10 Hz。

2 沙尘暴过程的大气边界层结构特征

2.1 沙尘暴天气背景

本次沙尘暴过程主要起源于蒙古国中西部和内蒙古中西部地区, 随着冷锋向南、向东移动, 冷锋经过的上游沙漠及其周边地区都出现了沙尘暴和强沙尘暴^[31], 影响了我国西北、华北和东北的大片区域, 是近年来影响北京最严重的一次沙尘天气。从 2002 年 3 月 19 日开始, 受冷空气和蒙古气旋的影响, 有大片的黄沙在蒙古国生成, 随后该沙尘区向东偏南方向扩展并进入我国。20 日早晨沙尘区继续向偏东南方向扩展, 开始影响北京地区; 中午沙尘继续向东扩展, 覆盖了内蒙古中部和东部、河北大部, 严重影响了京津地区; 下午沙尘继续向东扩展, 范围继续扩大^[32,33]。

本次沙尘暴过程于北京时间 20 日凌晨 03:00

影响北京, 早晨北京下了泥雨, 10:00 左右沙尘从高空输送到地面, 11:00 左右, 整个天空变成桔黄色, 此时沙尘暴全面爆发, 直到 22 日 20:00 左右过境, 沙尘暴结束。整个沙尘暴期间北京的降尘量估计达到了 $5 \times 10^7 \text{ kg}^{[34]}$, 中国科学院大气物理研究所观测到的沙尘浓度高达 $12.06 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (观测时间为北京时间 10:50~15:30)^[19]。

2.2 沙尘暴过境前后大气边界层特征

图 1 分别是 19 日 20:00、20 日 08:00 和 20:00 北

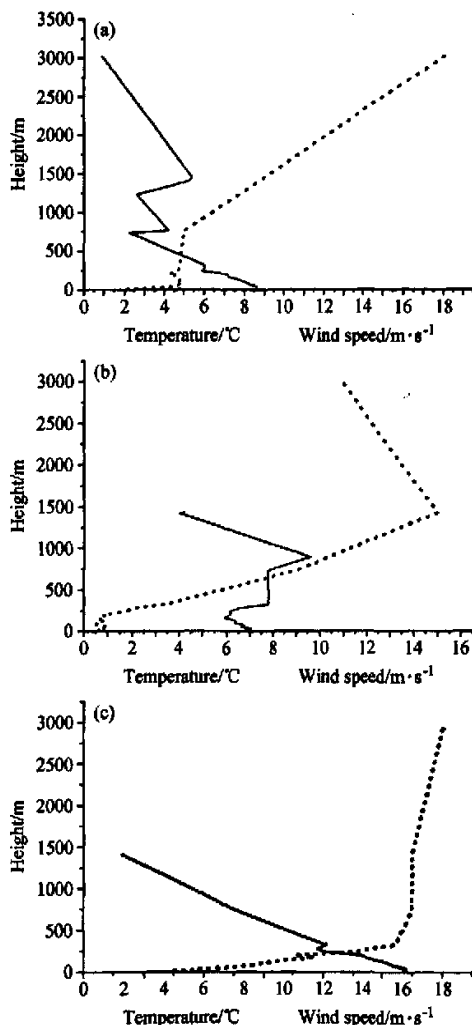


图 1 沙尘暴进入北京前后温度(实线)和风速(虚线)的垂直廓线: (a) 19 日 20:00; (b) 20 日 08:00; (c) 20 日 20:00

Fig.1 The profiles of temperature (solid line) and wind (dashed line) during the strong dust storm weather from Mar 19 to 20 2002; (a) 2000 LST 19 Mar; (b) 0800 LST 20 Mar; (c) 2000 LST 20 Mar

京市气象台所提供的温度和风速探空廓线。从温度廓线看出, 19 日 20:00 边界层中出现了两层逆温, 逆温层顶高度分别为 760 和 1 440 m, 对应的逆温层底高度分别为 720 和 1 220 m, 逆温强度分别为 0.5 和 $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ m})^{-1}$ 。随着冷空气的不断下沉, 20 日 08:00 (见图 1b), 即沙尘暴影响北京的前 2 h, 逆温层顶下降为 900 m, 而逆温层底下降为 200 m, 整个逆温层厚度达到 700 m, 逆温强度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ m})^{-1}$ 。20:00 逆温层完全被破坏, 此时边界层中的大气混合均匀。

从风速廓线看出, 19 日 20:00 在逆温层顶 (750 m) 以上, 风切变很大, 风速从 750 m 的 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增大到 3 000 m 的 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 在 2 250 m 的高度内风速增大了 $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。而在 750~30 m 高度风切变很小, 30 m 的风速值为 $4.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 在 720 m 高度范围内仅增加了 $0.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。表明此时近地层中湍流混合很强, 风速混合均匀, 但由于多层逆温的存在, 高空的动量不能有效下传, 为后面急流的出现储备了能量。20 日 08:00 在 1 300 m 高度上出现急流, 风速达到了 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从逆温层顶 (250 m) 到 1 300 m 之间, 风切变很大, 200 m 高度上的风速约为 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 而 1 300 m 的风速达到了 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风速增加幅度达到了 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。而在逆温层底 (200 m) 以下, 风速很小, 切变也很小。表明 20 日 08:00 时由于高架逆温的存在, 边界层上层出现了急流; 而在近地面的常通量层, 风速很小, 风切变也很小。20 日 20:00 由于逆温层完全被破坏, 高空动量能够快速有效地传到近地面, 近地层中的风切变较大, 湍流输送很强。

为了进一步了解沙尘暴进入北京前后近地面的风温变化特征, 本文还深入分析了北京 325 m 气象塔 2002 年 3 月 19 日 12:00~21 日 00:00 的梯度观测资料 (见图 2 和图 3)。

气象塔梯度观测资料的采样周期为 20 s, 在对资料进行了必要的质量控制后, 我们将所选资料按照 10 min 平均, 去除湍流随机脉动的影响。图 2 分别给出了沙尘暴爆发前后北京地区近地面风速和温度的高度-时间剖面, 为了清晰表明各高度上风温随时间的变化, 本文挑选 4 层资料绘制了图 3。

从温度来看, 沙尘暴爆发初期 (20 日 09:00

~11:00), 边界层低层大气中有一短暂的快速增温 (图 2), 尤其是在 09:00~10:00 增温最为迅速 (图 3); 之后随着冷空气南下, 边界层中温度随时间很快下降。这与姚文清^[30]的研究结论一致。除此之外, 在沙尘暴爆发前 4 h, 即 20 日 7:00~9:00, 160 m 以上出现一个逆温层 (图 2 和图 3); 之后随着沙尘暴爆发, 冷空气南下, 逆温层很快被破坏。

从风速来看, 10:00 开始边界层风速急剧增大 (图 2 和图 3), 其中 320 m 高度的最大风速由 20 日 8:00 左右的 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 急增到 12:00 左右的 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 4), 此后风速快速下降, 但是风速的数值还是很大, 整个沙尘暴期间, 320 m 高度的平均风速达到了 $13.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由图 2 还可以看到, 沙尘暴期间的风速脉动非常强, 表明此时边界层中存在极强的湍流交换。

综合以上对北京市气象局探空资料和北京 325 m 气象塔观测资料的分析, 可以得到: 随着沙尘暴的爆发, 边界层中风速存在由上至下的骤增现象, 并且在沙尘暴期间, 边界层中的风速一直很大。沙尘暴爆发前, 边界层中存在强逆温层结, 随着冷锋过境 (沙尘暴抵达北京), 近地层先迅速升温然后又突然降温, 逆温层结迅速被破坏。

2.3 沙尘暴过境前后地面气象要素变化概况

沙尘暴过境前后, 地面与近地层中的温度、风速和相对湿度的变化趋势非常相似。图 4 为北京市气象局提供的沙尘暴过境前后北京地面气温、风速和相对湿度随时间的演变情况。

从气温时间序列看出, 3 月 18 日 (沙尘暴爆发前) 白天气温较高, 最高温度达到了 $19.6\text{ }^{\circ}\text{C}$; 夜间大幅降温, 达到 $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。19 日夜间由于稳定层结的作用, 气温降低幅度较小。20 日 09:00~12:00 (沙尘暴爆发初期), 温度迅速升高 (3 h 增温 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$), 之后随着锋面过境, 冷空气南下, 平均气温持续降低, 这种降温趋势一直到沙尘暴过境以后才结束。

由风速时间序列看出, 沙尘暴爆发前地面风速一直较小, 仅为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 随着沙尘暴爆发, 风速急剧增大, 之后一直持续大风。其中沙尘暴爆发期间 (3 月 20 日 10:00~22 日 22:00) 地面平均风速达到了 $4.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

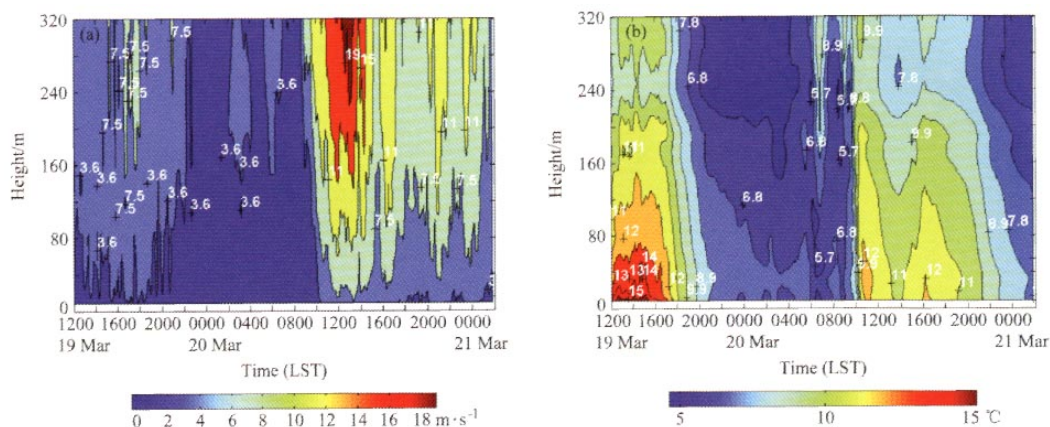


图2 沙尘暴过境前后 (a) 风速和 (b) 温度的时间-高度剖面

Fig. 2 Height-time section of (a) wind speed and (b) temperature

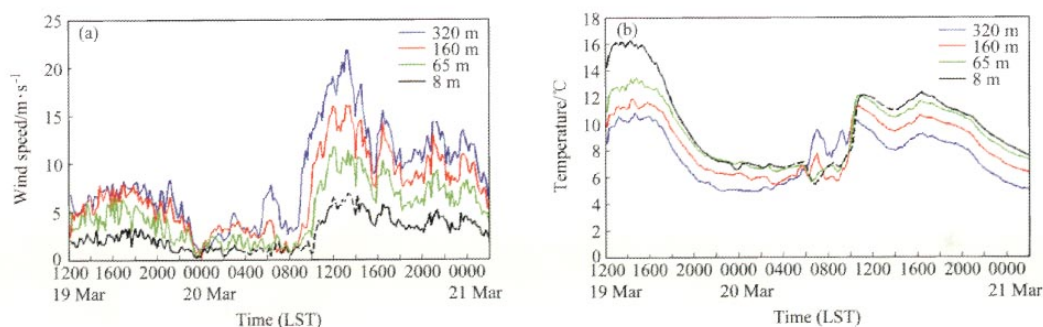


图3 沙尘暴过境前后不同高度上 (a) 风速和 (b) 温度随时间的变化

Fig. 3 The time series of (a) mean wind speed and (b) temperature

由相对湿度时间序列看出, 沙尘暴爆发前空气较为潮湿, 20 日凌晨最大相对湿度达到了 55% 左右; 但沙尘暴爆发以后, 冷锋带来了北方干冷空气, 因此相对湿度迅速降低, 至 20 日 12:00 时已降至 8.4%, 此后相对湿度一直很低。这与胡泽勇等^[28]的研究结论不同, 胡等研究的是沙尘源区的沙尘暴, 由于源区气温降低而使得相对湿度增大。

2.4 沙尘暴过境期间的湍流输送特征

在沙尘暴爆发过程中, 边界层湍流输送过程是研究起沙、扬沙、输运、降尘等物理机制中至关重要的一个环节, 本节利用气象塔 3 层超声资料, 分析了 2002 年 3 月 20 日这次沙尘暴过程过

境期间的边界层湍流输送特征。气象塔的 3 层超声风速仪分别架设在 47、120 和 280 m 高度上, 超声资料包括 u 、 v 、 w 以及温度测量, 采样频率为 10 Hz。利用这次沙尘暴期间的超声资料, 我们计算了过程期间的 30 min 平均垂直速度、湍流能量以及湍流通量等特征量。

图 5 给出了沙尘暴过境期间 3 层超声风速所测的平均垂直速度, 所取资料为原始超声资料的 30 min 平均。由图可见, 在 20 日 9:00~14:00 大风扬沙期间, 280 m 高度上的垂直气流表现为系统性上升气流, 而 47 和 120 m 则表现为系统性的下沉气流。结合图 1、2 和 3, 可以看到此时边界层中逆温层结逐渐破坏, 280 m 高度上存在一较

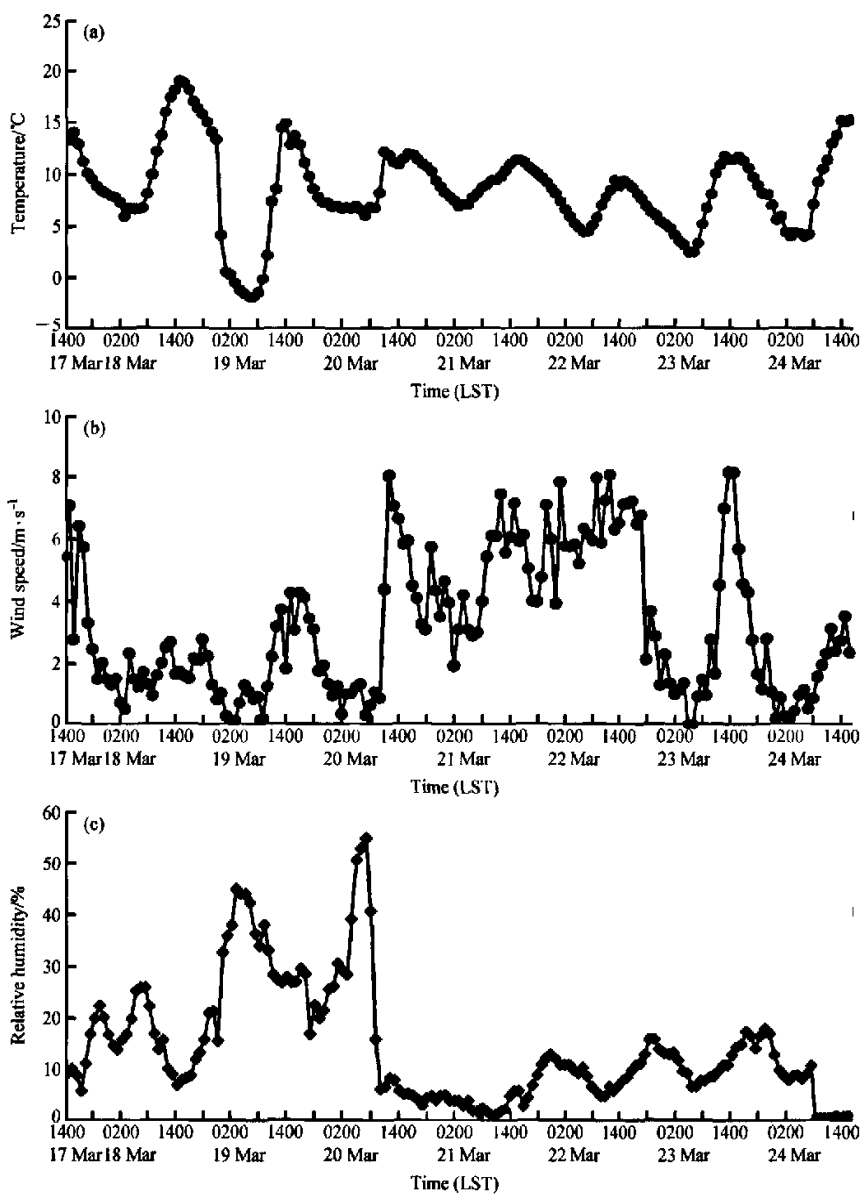


图4 尘暴期间 (a) 地面气温、(b) 风速和 (c) 相对湿度随时间的演变

Fig. 4 Variations of surface atmospheric variables during the strong dust storm: (a) temperature; (b) wind speed; (c) relative humidity

弱的逆温层, 导致气流分成了两支, 一支为上升气流, 将边界层中的沙尘运输到边界层以上的对流层, 而另一支则表现为下沉气流, 将边界层中的沙尘带到地面, 形成降尘。由图还可以看到, 在沙尘暴全面爆发后, 10:00~14:00, 280 m 上垂直速度最大达到了 $0.45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 与此同时 120 和 47 m 两层表现为明显的下沉气流, 下降速度达

到了 $-0.3 \sim -0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 这对沙尘的沉降是非常有利的。

图 6 给出了沙尘暴爆发期间边界层 30 min 平均湍流动能随时间的演变, 比较图 3 可知, 当平均风速大时, 对应的湍流动能也大, 反之亦然。表明平均风速最大的时候, 也就是湍流输送最为强烈的时候。但值得提出的是, 120 m 上的湍能

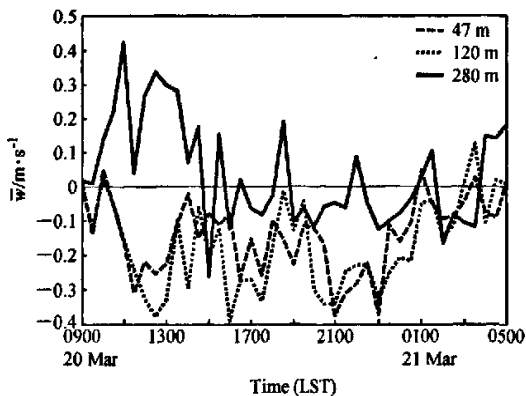


图 5 沙尘暴期间的 30 min 平均垂直速度 ($\bar{w}$)

Fig. 5 30-minute mean vertical velocity during the dust storm ($\bar{w}$)

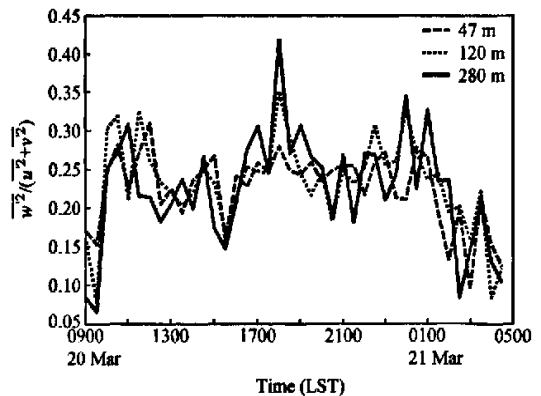


图 7 垂直方向与水平方向的湍能之比 ($\bar{w}^2/\bar{u}^2+\bar{v}^2$)

Fig. 7 Ratio of the vertical turbulence intensity with the horizontal turbulence intensity ($\bar{w}^2/\bar{u}^2+\bar{v}^2$)

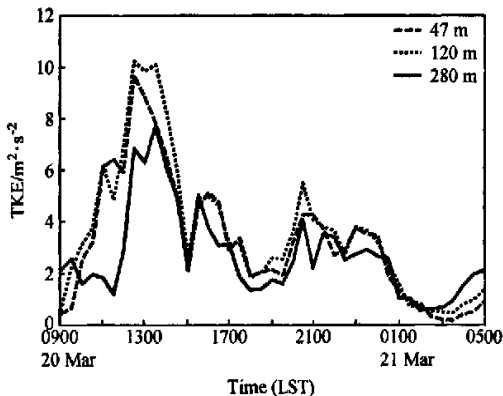


图 6 沙尘暴过境期间的 30 min 平均湍能 (TKE)

Fig. 6 30-minute mean turbulence kinetic energy (TKE) during the dust storm

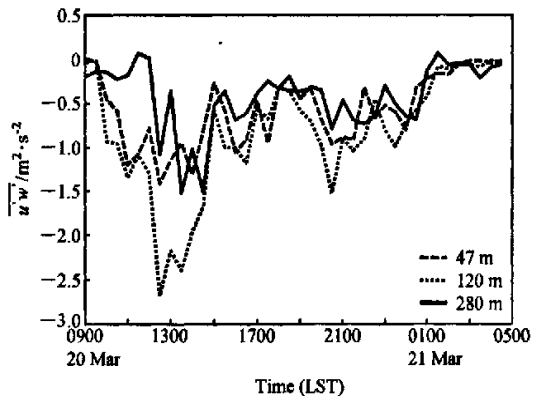


图 8 沙尘暴过境期间的垂直动量输送 ($\overline{uw}$)

Fig. 8 Momentum flux of the longitudinal velocity ($\overline{uw}$) during the dust storm

略大于 280 和 47 m 上的湍能, 并且沙尘暴爆发过程中气流并不是各向同性, 垂直方向的湍流动能总体是比较小的 (见图 7)。

图 8、9 和 10 分别给出了沙尘暴过境前后的垂直动量输送和感热输送随时间的演变, 所取资料为 30 min 平均。由图 8 可见, 沙尘暴爆发之前 (3 月 20 日 09:00 左右), 3 个高度上经向的动量 (u 方向) 输送 $\overline{uw}$ 的值都很小, 在零值附近振荡; 随着沙尘暴的爆发 (10:00 以后), 3 个高度上的 $\overline{uw}$ 迅速增大, 总体上是负值, 说明沙尘暴期间经向的动量是向下输送的, 且值非常大。其中 17:00 的时候 120 m 高度上的 $\overline{uw}$ 达到 $-1.55 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, 明显高于 47 和 280 m 上的动量输送,

这与 160 m 以上存在的弱逆温层结有关。

由图 9 可见, 沙尘暴期间侧向 (v 方向) 的垂直动量输送总体上是正值, 这与 u 方向不同, 而与 u 方向相似的是 120 m 向下传送的动量明显高于 280 和 47 m。

由图 10 可以看出沙尘暴期间的感热输送整体是上传的, 感热通量也是 120 m 明显高于 47 和 280 m。这与姚文清^[30]对 2001 年的 3 月沙尘暴过程的研究结论非常一致。因此我们猜测这可能与北京的局地环流有关。

图 11 给出了沙尘暴过境期间的摩擦速度 u_* 随时间的演变。由图可见, 在沙尘暴爆发之前, u_* 还非常小, 接近零值。随着沙尘暴的爆发, 各

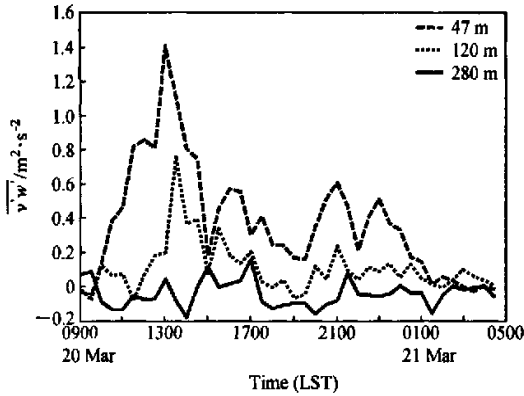
图9 沙尘暴过境期间的垂直动量输送 ($\overline{v'w'}$)

Fig. 9 Momentum flux of the lateral velocity during the dust storm

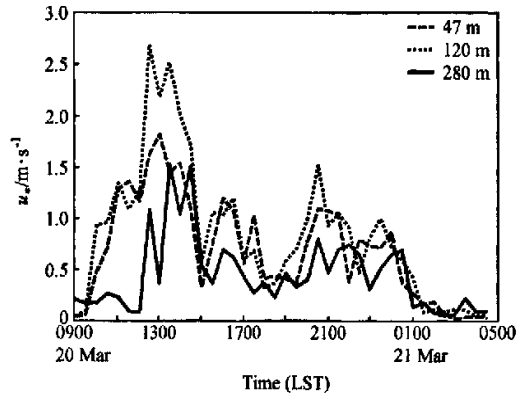
图11 沙尘暴期间摩擦速度 (u_*')

Fig. 11 Friction velocity during the dust storm

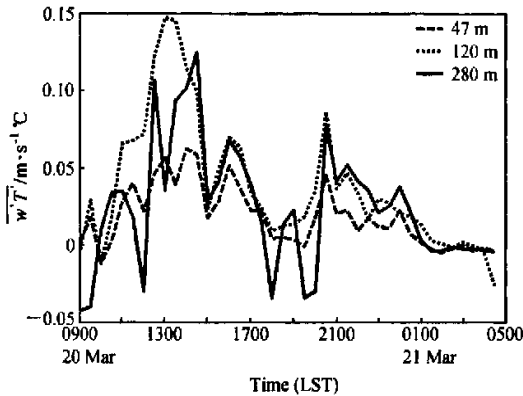
图10 沙尘暴过境期间的垂直感热输送 ($\overline{w'T'}$)

Fig. 10 Sensible heat flux ($\overline{w'T'}$) during the dust storm

层的摩擦速度迅速增大, 47 m 上的 u_* 升至 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 120 m 高度上达到了 $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 都超过了北京地区的起沙临界摩擦速度^[7] $1.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 由此说明此次沙尘暴过程中局地起沙也是北京沙尘的一个重要来源。

3 结论和讨论

研究沙尘暴天气的物理过程, 需从沙尘的起沙、输送和沉降 3 个过程来分析。本文利用气象塔平均场资料和超声资料, 以及北京市气象台地面常规气象资料和每日 08:00 和 20:00 的探空资料, 分析了 2002 年 3 月 18~22 日沙尘暴过境前后北京城市边界层结构特征和湍流输送特征, 并

得到如下结论:

(1) 沙尘暴爆发前, 边界层中的水平风速一直很小, 但是随着冷空气南下, 边界层中的风速急剧增大, 之后在整个沙尘暴过程中风速一直很大, 其中 320 m 上的最大风速达到了 $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。沙尘暴爆发前, 边界层中存在多层逆温结构, 随着沙尘暴的爆发, 温度突然变化, 先迅速增强然后又突然下降, 逆温结构迅速被破坏。

(2) 沙尘暴爆发前, 地面温度较高, 相对湿度较大, 风速较小, 空气较为稳定。而在沙尘暴爆发期间, 由于冷锋过境, 风速急剧增强, 温度和相对湿度则持续降低。

(3) 沙尘暴爆发初期, 280 m 高度上的垂直气流表现为系统性上升气流, 而 47 和 120 m 则表现为系统性的下沉气流。随着沙尘暴的爆发, 湍流动能迅速增大, 但由于各向异性, 垂直方向的动能小于水平方向。动量和感热的垂直输送也随着沙尘暴的爆发而迅速增大, 其中动量输送是下传的, 而感热输送是上传的。并且 120 m 的湍能、动量输送以及感热输送明显高于 47 和 280 m。本次沙尘暴过程中, 120 和 47 m 上的摩擦速度都超过了北京的临界摩擦速度, 表明局地起沙也是本次沙尘暴过程中北京降尘的一个重要沙源。

本次沙尘暴过程的分析研究为研究沙尘暴产生和发展的物理机制提供了一定的依据, 但由于本文仅针对 2002 年 3 月这次典型沙尘暴过程分析, 且由于数据资料有限 (仅有北京 325 m 气象塔资料和北京市局的 3 次探空资料以及地面常规

资料), 因此本文结论的普适性还有待验证。如果能够针对沙尘暴过程, 组织一次系统的探测试验, 这对进一步验证本文的结论及对沙尘暴过程中的起沙、输送和沉降等过程的物理机制研究都是非常有意义的。

致 谢 衷心感谢李爱国和罗卫东高级工程师在气象塔观测资料处理时的热情帮助。

参考文献 (References)

[1] Hankin E H. On dust raising winds and descending currents. *J. India Met. Memoirs*, 1921, 22, Part VI

[2] Idso S B, Ingram R S, Pritchard J M. An American haboob. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1972, 50: 930~935

[3] Pauley P M, Baker N L, Barker E H. An observational study of the "Interstate 5" dust storm case. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, 77: 693~720

[4] Shao Y P, Raupach M, Short D. Preliminary assessment of wind erosion patterns in the Murray-Darling Basin. *Aust. J. Soil Res.*, 1994, 34: 309~342

[5] Shao Y P, Leslie L M. Wind erosion prediction over Australian continent. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102 (D25): 30091~30105

[6] Marticorena B and Bergametti G. Modeling the atmospheric dust cycle. Part 2: Simulation of Saharan dust sources. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102 (D4): 4387~4401

[7] 赵琳娜. 沙尘(暴)发生发展的机理及起沙机制的数值模拟. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2002
Zhao Linna. The mechanism of sand storm occurrence and development and the numerical simulation of dust emission. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002

[8] 黄美元, 王自发. 东亚地区黄沙长距离输送模式的设计. *大气科学*, 1998, 22: 625~637
Huang Meiyuan, Wang Zifa. A model for long-range transport of yellow-sand in East Asia. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1998, 22: 625~637

[9] 钱正安, 宋敏红, 李万元. 近 50 年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析. *中国沙漠*, 2002, 22 (2): 106~111
Qian Zhenan, Song Minhong, Li Wanyuan. Analyses on distributive variation and forecast of sand-dust storms in recent 50 years in north China. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2002, 22 (2): 106~111

[10] 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 等. 关于我国华北沙尘天气的成因及治理对策. *地理学报*, 2001, 55 (5): 513~521
Ye Duzheng, Chou Jifan, Liu Jiyan, et al. Causes of sand-stormy weather in northern china and control meas-

ures. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2001, 55 (5): 513~521

[11] 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: 193~196
Wang Shigong, Wang Jinyan, Zhou Zijiang, et al. Regional characteristics of dust events in China. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2003, 58: 193~196

[12] 周自江. 近 45 年中国扬沙和沙尘暴天气. *第四纪研究*, 2001, 21: 9~17
Zhou Zijiang. Blowing-sand and sandstorm in China in recent 45 years. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 2001, 21: 9~17

[13] 周自江, 王锡疆, 牛若芸. 近 47 年中国沙尘暴气候特征研究. *应用气象学报*, 2002, 13: 193~200
Zhou Zijiang, Wang Xiwen, Niu Ruoyun. Climate characteristics of sandstorm in China in recent 47 years. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2002, 13: 193~200

[14] 周自江, 章国材. 中国北方的典型强沙尘暴事件 (1954~2002 年). *科学通报*, 2003, 48: 1224~1228
Zhou Zijiang, Zhang Guocai. Typical severe dust storms in northern China during 1954~2002. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2003, 48: 1224~1228

[15] 丁瑞强, 王式功, 尚可政, 等. 近 45a 我国沙尘暴和扬沙天气变化趋势和突变分析. *中国沙漠*, 2003, 23: 306~310
Ding Ruiqiang, Wang Shigong, Shang Kezheng, et al. Analyses of Sandstorm and Sand-blowing Weather Trend and Jump in China in Recent 45 Years. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2003, 23: 306~310

[16] 邱新法, 曾燕, 缪启龙. 我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径. *地理学报*, 2001, 56: 316~322
Qiu Xinfa, Zeng Yan, Miao Qilong. Temporal-spatial distribution as well as Tracks and Source Areas of Sand-Dust Storms in China. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2001, 56: 316~322

[17] 周明煜, 曲绍厚, 宋锡铭, 等. 北京地区尘暴过程的气溶胶特征. *科学通报*, 1981, 26 (10): 609~611
Zhou Mingyu, Qu Shaohou, Song Ximing, et al. Some properties of the aerosol during a dust storm over Beijing area. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1981, 26 (10): 609~611

[18] 周明煜, 曲绍厚, 宋锡铭, 等. 北京地区一次尘暴过程的气溶胶特征. *环境科学学报*, 1981, 1: 207~218
Zhou Mingyu, Qu Shaohou, Song Ximing, et al. Some properties of the aerosol during a dust storm over Beijing area. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese) 1981, 1: 207~218

[19] 张仁健, 韩志伟, 王明星, 等. 中国沙尘暴天气的新特征及其成因分析. *第四纪研究*, 2002, 22: 374~380
Zhang Renjian, Han Zhiwei, Wang Mingxing, et al. Dust

- storm weather in china; new characteristics and origins. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 2002, **22**: 374~380
- [20] Fan K and Wang H J. Antarctic oscillation and the dust weather frequency in North China. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**, L10201, doi: 10.1029/2004GL019465, 2004
- [21] 周秀骥, 徐祥德, 颜鹏, 等. 2000 年春季沙尘暴动力学特征. 中国科学 (D 辑), 2002, **32**: 327~334
Zhou Xiuji, Xu Xiangde, Yan Peng, et al. Dynamic characteristics of spring sandstorms in 2000. *Science in China* (Series D) (in Chinese), 2002, **32**: 327~334
- [22] Qian W H, Quan L S, Shi S Y. Variations of the dust storm in China and its climatic control. *J. Climate*, 2002, **15**: 1216~1229
- [23] Wang Z, Ueda H, Huang M. A deflation module for use in modeling long-range transport of yellow sand over East Asia. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105** (D22): 26947~26960.
- [24] 石广玉, 赵思雄. 沙尘暴研究中的若干科学问题. 大气科学, 2003, **27**: 591~606
Shi Guang yu, Zhao Sixiong. Several scientific issues of studies on the dust storms. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27**: 591~606
- [25] 王式功, 董光荣, 陈惠忠, 等. 沙尘暴研究的进展. 中国沙漠, 2000, **20** (4): 349~356
Wang Shigong, Dong Guangrong, Chen Huizhong. Advances in studying sand-dust storms of China. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2000, **20** (4): 349~356
- [26] 胡隐樵, 光田宁. 强沙尘暴微气象特征和局地触发机制. 大气科学, 1997, **21**: 581~589
Hu Yinqiao, Yasushi Mitsuta. Micrometeorological characteristics and local triggering mechanism of strong dust storm. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1997, **21**: 581~589
- [27] 胡隐樵, 光田宁. 强沙尘暴发展与干飚线——黑风暴形成的一个机理分析. 高原气象, 1996, **15** (2): 178~185
Hu Yinqiao, Yasushi Mitsuta. Development of the strong dust storm and dry squall line—a mechanism analysis on generating black storm. *Plateau meteorology* (in Chinese), 1996, **15** (2): 178~185
- [28] 胡泽勇, 黄荣辉, 卫国安, 等. 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. 大气科学, 2002, 1~8
Hu zeyong, Huang Ronghui, Wei guoan, et al. Variations of surface atmospheric variables and energy budget during a sandstorm passing Dunhuang on June 6 of 2000. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, 1~8
- [29] 刘东升. 中国的黄土堆积. 北京: 科学出版社, 1965
Liu Dongsheng. *Loess Accumulation*. Beijing: Science Press (in Chinese), 1965
- [30] 姚文清. 北京城市边界层低层湍流动力结构及其影响特征, 中国气象科学研究院与南京信息工程大学联招博士, 博士论文, 2005
Yao Wenqing. Characteristics of urban boundary lower layer turbulence dynamical structure and its effects in Beijing. Ph.D. dissertation (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences and Nanjing University of Information Science and Technology, 2005
- [31] 任阵海, 高庆先, 苏福庆, 等. 北京大气环境的区域特征与沙尘影响. 中国工程科学, 2003, **5**: 49~56
Ren Zhenhai, Gao Qingxian, Su Fuqing, et al. The regional characteristics of the atmospheric environment and the impact of duststorm in Beijing. *Engineering Science* (in Chinese), 2003, **5**: 49~56
- [32] 郑新江, 杨义文, 李云. 北京地区沙尘天气的某些特征分析. 气候与环境研究, 2004, **9**: 14~23
Zheng Xinjiang, Yang Yiwen, Li Yun. Some characteristics of dust storm weather affecting Beijing. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9**: 14~23
- [33] 孙建华, 赵琳娜, 赵思雄. 华北强沙尘暴的数值模拟及沙源分析. 气候与环境研究, 2004, **9**: 139~154
Sun Jianhua, Zhao Linna, Zhao Sixiong. A numerical simulation on severe dust storm events in North China and their dust sources. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9**: 139~154
- [34] <http://www.tqyb.cc/ArticleInfo.asp?ChannelID=08&Articleid=200212312086>