

凌肖露, 张镭, 郭维栋, 等. 2010. 沙尘气溶胶对半干旱区微气象学特征影响的初步研究 [J]. 气候与环境研究, 15 (3): 279–288.
Ling Xiaolu, Zhang Lei, Guo Weidong, et al. 2010. A preliminary study of the impacts of dust aerosols on micrometeorological characteristics in semi-arid area of China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (3): 279–288.

沙尘气溶胶对半干旱区微气象学特征影响的初步研究

凌肖露¹ 张镭¹ 郭维栋² 张仁健³

1 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

2 南京大学气候与全球变化研究院, 南京大学大气科学学院, 南京 210093

3 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029

摘要 沙尘气溶胶通过改变地表—大气间的短波及长波辐射从而对地气间热量传输产生影响, 进而影响到地表能量收支平衡以及近地面层气象要素的分布。半干旱区是我国干旱化表现最为剧烈的地区, 也是沙尘暴频发地区和主要源区之一。本文利用吉林通榆半干旱区国际协调强化观测计划基准站 2006 年 4~6 月近地层微气象、地表辐射通量和沙尘气溶胶浓度观测资料, 对比分析了该地区在典型沙尘暴天气、扬沙天气和晴朗天气等不同天气状况下近地层各气象要素、地表能量平衡及辐射收支的变化特征。结果表明, 沙尘气溶胶对半干旱地区地面微气象学特征及辐射收支具有明显的影响, 且表现出不同于干旱区的若干特性: 半干旱区沙尘天气下的平均风速比晴天高约 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 而相对湿度则降低了约 35%。相对而言, 气温和浅层地温的变化对沙尘的影响响应较弱。半干旱区在沙尘天气时地表净辐射小于晴天, 感热/潜热通量分别约占净辐射的 55% 和 30%, 分别远大于/远小于晴天时的情形。该地区气溶胶质量浓度与日均感热、相对湿度、潜热等要素具有明显的相关, 相关系数分别高达 0.70、-0.75 和 -0.62。相比之下, 干旱区沙尘天气时的感热通量要小于晴天时的值, 而且气象要素的响应更加剧烈。

关键词 沙尘气溶胶 半干旱区 微气象学 辐射收支

文章编号 1006-9585 (2010) 03-0279-10 **中图分类号** P404 **文献标识码** A

A Preliminary Study of the Impacts of Dust Aerosols on Micrometeorological Characteristics in Semi-arid Area of China

LING Xiaolu¹, ZHANG Lei¹, GUO Weidong², and ZHANG Renjian³

1 Key Laboratory of Semi-Arid Climate Change, Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 Institute for Climate and Global Change Research, College of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

3 Key Laboratory of Regional Climate - Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Dust aerosols have distinct impacts on the energy balance of the land surface by adjusting short wave/long wave radiative processes, and thereby affect the meteorological elements over the near surface. In turn, the im-

收稿日期 2009-02-06 收到, 2010-01-24 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目群 KZCX2-YW-Q11-03 和国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400501

作者简介 凌肖露, 女, 1986 年出生, 硕士研究生, 主要从事气溶胶辐射效应的研究。E-mail: lingxl08@lzu.cn

通讯作者 郭维栋, E-mail: guowd@nju.edu.cn

pacts are reflected by modifying the heat transfer processes between the land surface and the atmosphere. The semi-arid area is known as the most typical region characterized by the remarkable aridity trend. It is also the region in which sandstorm events occur frequently and is regarded as one of the main sources of sandstorms. The enhanced observational meteorological data, radiative fluxes, and concentration of dust aerosols collected from the Tongyu station, one of the international Coordinated Enhanced Observing Period (CEOP) reference sites in the semi-arid region of China from April to June 2006 are used to investigate the differences of meteorological elements and energy budget in this area under different weather conditions, namely, clear days, light storm days, and sand storm days. The results indicate that in the semi-arid area, dust aerosols have significant influences on the meteorological elements and energy balance of the land surface, which is different from the impacts in the arid areas in some aspects. In the semi-arid area, a higher wind speed is identified in the duststorm period than that in clear days, while atmosphere relative humidity is lower in dust days. The land surface receives less net radiation during the duststorm period, as well as the latent/sensible heat fluxes. The correlations between aerosol concentration and daily mean sensible heat flux, relative humidity, and latent heat flux are significant. During the daytime, the daily mean air temperature responds to sandstorm more significantly, while 2-cm ground temperature responds more significantly at night. It is meaningful that the sensible heat flux is less during duststorm events in the semi-arid area, which is different from the case in the arid region.

Key words dust aerosol, semi-arid region, micrometeorology, radiation budget

1 引言

全球干旱荒漠地区（包括沙漠、干旱和半干旱草地）占陆地面积的 1/4，我国干旱和半干旱地区约占国土面积的 40%（胡隐樵和张强，2001）。我国西北部、华北在 20 世纪 70 年代末期发生了由湿向干的趋势转换（周秀骥等，2002），而近 50 年的干旱化进程中，东北中部和华北北部的干旱和半干旱边界呈波动式东移，而华北南部和陕西南部的半干旱边界也呈波动式南扩（马柱国和符淙斌，2005）。符淙斌等（2006）指出北方干旱化是人类长期活动导致的短期效应和长期效应并存、全球尺度影响和区域影响并存的结果，使干旱化成为全球变化科学中一个具有典型意义的研究课题。

沙尘气溶胶是构成北方干旱化区域影响的一个因子。我国沙尘天气多发区主要位于与北方沙漠及沙漠化土地相联系的极干旱、干旱和半干旱区内（张高英等，2004；王式功等，2006）。20 世纪 50～90 年代，随着我国北方地区强和特强沙尘暴发生频数增多、频率加快、间隔变短、强度增大（丁瑞强等，2003；陆均天等，2003），我国已有不少学者致力于研究沙尘气溶胶对气候的

影响。沈志宝和文军（1994）指出，沙尘大气使白天地面净辐射能收入减小，使夜间地面净辐射能支出减小。王玉洁等（2006）指出，沙尘气溶胶明显改变云的物理特性，使云滴变小，减弱云的净辐射强迫，抑制了云的冷却效应。魏丽和沈志宝（1998）的分析结果表明，大气沙尘会导致地气系统后向散射增大，即增大了行星反照率。胡泽勇等（2002）分析得到沙尘暴过境前后敦煌地区地表温、压、湿、风均有明显响应，且地表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。

然而，由于对沙尘光学特性及控制这些特性演变的诸多大气过程认识欠缺，目前对沙尘气溶胶气候影响的评估也存在很大不确定性（Tegen and Fung, 1994; Sokolik and Toon, 1996; IPCC, 2007），同时大多数学者的研究针对全球范围或者干旱地区，对半干旱地区研究较少，且对沙尘气溶胶引起的相应气象条件变化的研究也不多见。事实上，在干旱化进程中，干旱区腹地的干旱状况及其伴随的生态学特征相对来说处于一种稳定状态，而在我国东北—西南走向的半干旱带作为气候和生态系统的过渡带，表现出突变性、敏感性和可恢复性的特征（符淙斌和叶笃正，1995；符淙斌和温刚，2002），其对气候变化的响

应也更加强烈。基于此, 本文拟利用半干旱区地面微气象学特征量和沙尘气溶胶资料, 具体分析沙尘气溶胶对该地区地面能量平衡及对大气中各气象要素的影响, 进而分析沙尘气溶胶对沙尘源区和沙尘作用区影响的不同。

2 资料来源和数据处理

2.1 资料来源

本文所用的微气象学观测资料来自位于吉林省白城市通榆县内的通榆气候与环境综合观测站(44°25'N, 122°52'E), 海拔 184 m。该站处于我国东北半干旱地区(吴锦奎等, 2006), 年平均降水量为 404 mm。自 2002 年 10 月以来, 该观测站一直进行近地层气象梯度、土壤温湿度、地表辐射平衡以及地表一大气间热量、水分以及 CO₂ 通量的长期连续观测。目前, 通榆站已是国际协调强化观测计划(CEOP)的地面基准站(reference site)之一, 参与 CEOP 在全球范围内的资料交换和共享(刘辉志等, 2004)。

通榆站在相隔 10 km 的退化草地和农田两个观测点进行对比观测。每个测点都建立了一个 20 m 近地面层气象观测塔, 塔上安装了 5 层(2、4、8、12、17 m)风速温度和湿度传感器以及 1 层风向传感器。地面观测包括地面温度气压和雨量; 辐射观测包括向上、向下太阳辐射及向上、向下长波辐射; 辐射仪器在农田和退化草地下垫面分别安装于 2.0 m 和 3.0 m 高度上。该地区非生长季(即干季)为每年 10 月至次年 3 月, 雨季集中在每年 6~9 月。本文通榆站的观测资料来自退化草地观测点(草的高度平均不到 10 cm, 冬季小于 5 cm), 时间分辨率均为 30 min。

本文研究所用的气溶胶浓度的观测数据取样点在草地中, 比地面高出 3 m。自 2006 年 4 月 14 日至 6 月 23 日每天用高纤维金属材料的空气采样器以 5 L·min⁻¹的速度和直径为 46.2 mm 的石英过滤器对动力学直径≤2.5 μm 的粒子(PM_{2.5})进行采集(Zhang et al., 2008)。每个样品有 24 时次, 即从 08 时至次日 08 时的取样周期。气溶胶的质量浓度利用灵敏度为 1 μg 电子微量天平进行测量。称量的精度为空白滤膜<10 μg, 而滤膜样品<20 μg。

2.2 数据处理

本文的研究时段为有气溶胶浓度观测的 2006 年 4 月 14 日至 6 月 23 日。首先, 根据气溶胶质量浓度对逐日天气状况进行分级, 分别选择典型的沙尘天气、扬沙天气和晴朗天气各 3 天, 通过算术平均求出 3 种天气状况下各近地层气象要素的分布, 以减少用单日天气要素带来的偶然性和特殊性, 进而通过对地表微气象学特征量和辐射通量的日变化进行对比分析, 定性地得到沙尘气溶胶对半干旱地区的影响。

此外, 为了定量描述沙尘含量对各量的影响程度, 计算了逐日气溶胶质量浓度与各气象要素及辐射收支分量的相关系数, 得到气溶胶的质量浓度与各要素的相关性。同时考虑到诸次沙尘暴事件起止时间的不确定性, 把每日分成 4 个时段, 分别为 0:00~5:30(北京时间, 下同), 6:00~11:30, 12:00~17:30, 18:00~23:30。

为了进一步检验上述分析结果, 还选择了研究期内一次典型的沙尘事件(由于通榆站 4~5 月期间近地层微气象学观测缺测较多, 本文选择 2006 年 6 月 3~10 日进行个例分析), 从日变化的角度分析沙尘过程造成的微气象学特征量和辐射收支变化。

3 不同天气状况下各气象要素及辐射收支的对比分析

3.1 天气分类

按 PM_{2.5} 日均质量浓度[详见 Zhang et al. (2008)], 可以挑出不同程度沙尘含量的典型天气进行分析。如前所述, 由于通榆站 4~5 月期间近地层微气象学观测缺测较多, 本文按照上述标准选择 2006 年 5 月底以后观测到的 9 次沙尘暴事件中的 3 日作为沙尘暴天气, 选择日均质量浓度低于无沙尘日平均质量浓度(111.65±63.37 μg·m⁻³)的 3 日作为晴天。基于沙尘暴前后易发生扬沙天气的事实, 同时考虑日均气溶胶质量浓度的实际值, 挑选 3 日定义为扬沙天气(见表 1)。挑选出的沙尘、扬沙和晴朗天气的平均浓度分别为 384.59 μg·m⁻³、237.23 μg·m⁻³ 和 57.44 μg·m⁻³。同时, 选择邻近天气对比可以削弱不同天气过程对

表 1 2006 年 3 种典型天气
Table 1 Three typical weather conditions in 2006

日期	PM _{2.5} 浓度/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	天气类型	日期	PM _{2.5} 浓度/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	天气类型	日期	PM _{2.5} 浓度/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	天气类型
6 月 6 日	442.04	沙尘	6 月 7 日	288.91	扬沙	6 月 20 日	59.04	晴朗
5 月 29 日	363.02	沙尘	6 月 4 日	239.49	扬沙	6 月 11 日	57.41	晴朗
6 月 5 日	348.73	沙尘	6 月 12 日	183.30	扬沙	6 月 19 日	55.88	晴朗

地面气象要素及辐射收支产生的影响,使结论的可信度加强。

3.2 地面气象要素的差别

沙尘粒子悬浮于大气中,必然会对地面气象要素产生一定的影响。从图 1a 可知,沙尘、扬沙和晴朗天气下的风速日变化形势一致,在 9:00–18:00 时间段维持较高的风速值。整体上看,晴朗天气风速明显小于扬沙和沙尘天气,其与扬沙天气的日均差值基本维持在 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,与沙尘天气的差值也达到 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,分别占晴朗天气 9:00–18:00 时段平均风速的 70% 和 48%。从 9:00 开始沙尘、扬沙天气风速分别急增至 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,并维持此大风速震荡直至 18:00。因此,在半干旱地区,大风为沙尘暴提供了动力条件,但同时扬沙天气的风速明显高于沙尘天气,可见

风速变化不仅与沙尘含量有关,还和地表摩擦、天气形势等因素有很大的关系。

在图 1b 中一个有趣的现象是平均地面气温的变化趋势在白天和夜间截然相反:白天 (7:00–21:00),沙尘含量越高,地面气温值越高,沙尘天气与晴朗天气的平均差值维持在 5°C 左右;而夜间则表现为沙尘含量越低,地面气温值越高,晴朗天气与沙尘天气的夜间气温差不小于 2°C ,最高可达 5°C 。这意味着沙尘天气的地面气温日变化幅度比晴天剧烈得多。沙尘气溶胶是通过短波辐射和长波辐射的共同作用对地表气温产生影响的,其具体影响机制值得进一步研究。

2 cm 地温的变化与气温变化有所不同 (图 1c),晴天与沙尘天气的 2 cm 地温呈平行的变化趋势,平均振幅差达 2°C 左右。自 16:00 以后的

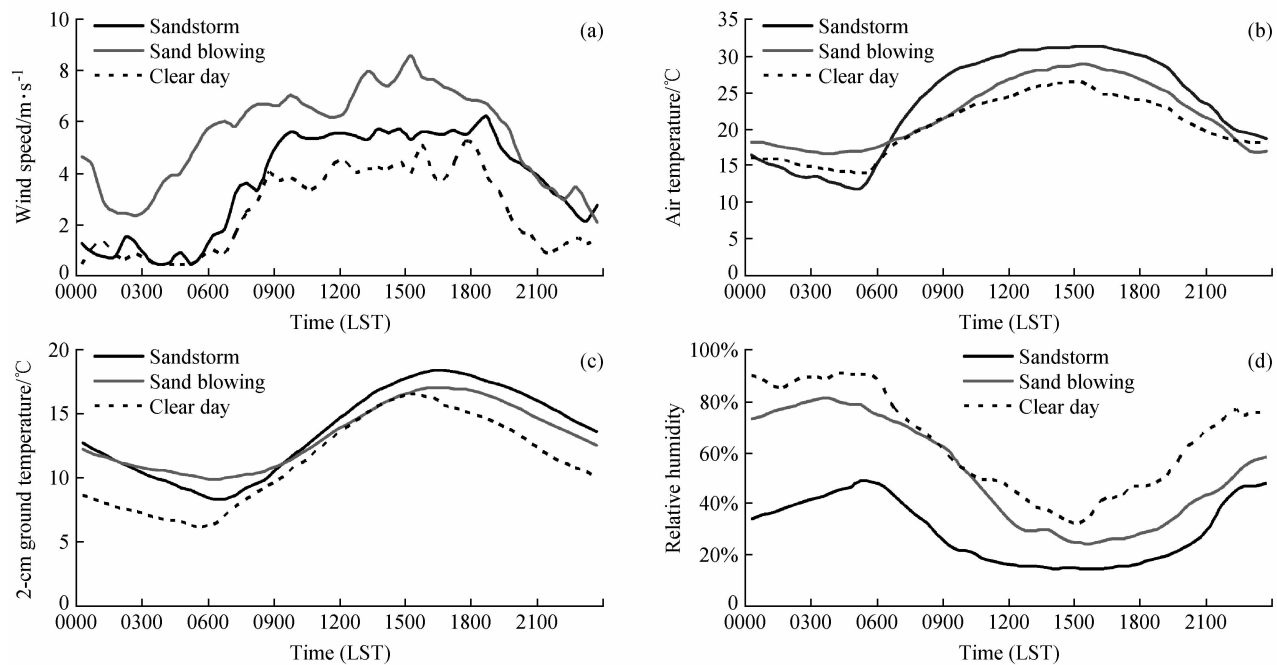


图 1 通榆站 2006 年 4~6 月 3 种典型天气状况下地面微气象学特征量的日变化对比: (a) 平均风速; (b) 气温; (c) 2 cm 地温; (d) 相对湿度

Fig. 1 The diurnal variations of meteorological factors at Tongyu station under three typical weather conditions: (a) Wind speed; (b) air temperature; (c) 2-cm ground temperature; (d) relative humidity

夜间沙尘含量越高, 2 cm 地温值越高, 但白天这种趋势有所减弱, 这或许是由于沙尘气溶胶主要是通过影响长波辐射从而影响地温变化的。

图 1d 中, 3 种天气的相对湿度呈相同的日变化趋势, 但沙尘天气时的相对湿度明显低于晴天, 平均振幅差高达 35% 左右, 扬沙天气与晴天的平均相对湿度差也达 15% 左右。可见半干旱地区较低的相对湿度为沙尘天气的发生提供了局地沙尘源条件, 根据 Zhang et al. (2008) 的分析, 局地源是主要的。

3.3 地面能量收支的差异

太阳辐射是地球大气中各种现象和所有物理过程的基本源动力, 也是地面热源 (汇) 的一个重要分量, 因此太阳辐射的变化必然会造成地面各气象要素产生相应的变化。沙尘气溶胶通过改变地表—大气间的短波及长波辐射传输过程, 势必对地气间热量传输产生影响, 进而影响到地表能量收支平衡。

从图 2a 可见, 半干旱地区 3 种典型天气状况下, 地面净辐射通量均呈现明显的单峰态分布, 且白天 (6:00–19:00) 晴天的净辐射通量明显高于沙尘天气, 其峰值比沙尘天气高约 $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由此推断沙尘气溶胶白天主要通过影响短波辐射进而影响地面的能量收支, 即: 沙尘气溶胶悬浮于大气中, 削减了到达地面的太阳直接辐射, 造成地面净辐射收入减小。相比之下, 夜间净辐射的差异并不明显。当然, 地面净辐射与当日云分布、沙尘气溶胶分布的垂直高度也有一定的关系, 本文暂不作讨论。

作为地表能量平衡的另一个重要环节, 感热、潜热也占据着重要的地位。就全球范围来看, 被地表吸收的太阳辐射能有大约 60% 以感热和潜热的形式向近地层大气释放。感热和潜热通量直接影响着大气边界层的动力结构, 并且决定了近地面层和大气边界层的温度/湿度廓线和稳定度。此外, 感热和潜热通量也是造成低空对流层能量富集的主要机制。因此, 感热通量和潜热通量对于理解地气相互作用的过程和机制起着非常重要的作用。

综合图 2b 和 2c 对比分析可以看到, 半干旱地区 4~6 月感热通量和潜热通量在同一个量级上, 二者的日变化均呈现一致的单峰态, 但随着

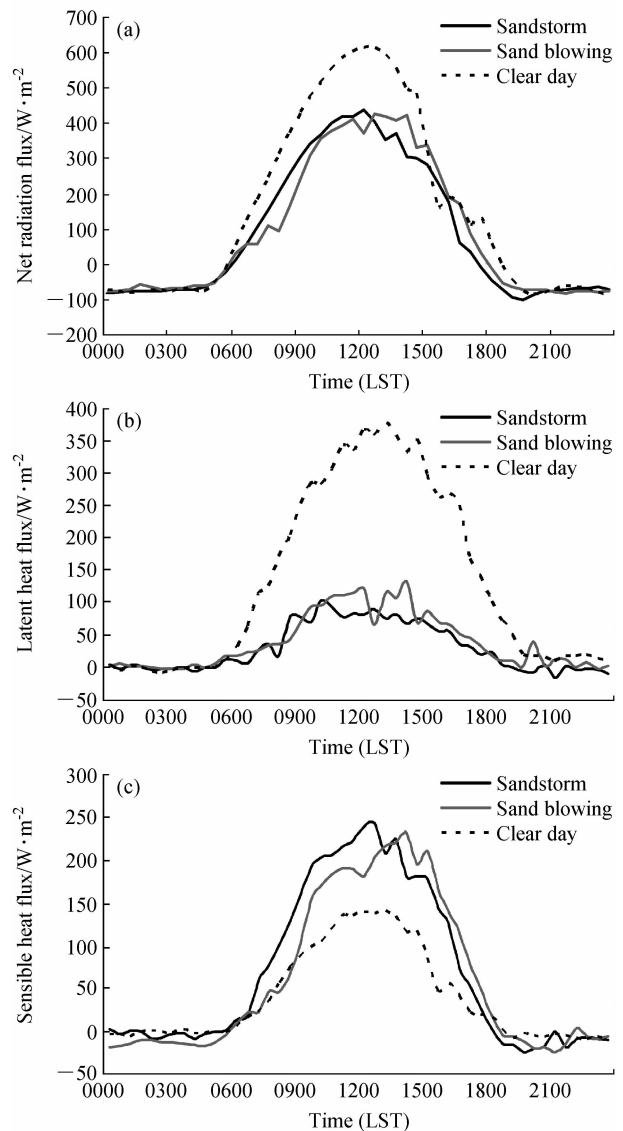


图 2 通榆站 2006 年 4~6 月 3 种典型天气状况下地表能量平衡各分量的日变化对比: (a) 净辐射通量; (b) 潜热通量; (c) 感热通量

Fig. 2 The diurnal variations of the land surface energy budget at Tongyu station under three typical weather conditions; (a) Net radiation flux; (b) latent heat flux; (c) sensible heat flux

天气状况的不同, 潜热通量的变化明显比感热通量剧烈得多。具体而言, 晴天的潜热通量在白天明显高于沙尘天气的情形, 其峰值差最大可达 $250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 且沙尘含量越高, 潜热通量值越小。晴天潜热通量峰值占净辐射通量的比例维持在 60% 左右, 而扬沙、沙尘天气的潜热通量占净辐射的比重分别维持在 25% 和 30% 左右。因此推测沙尘天气时地表水分蒸发所产生的潜热释放非常少, 这可能与前期土壤水分含量偏低有较大关系。

与此同时,晴天的感热通量则明显低于沙尘天气,其峰值差最高可达 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,且沙尘含量越高,地面感热通量值越高。可见半干旱地区沙尘天气下的日间地表温度总是远大于气温,能量从地面传输到大气中,且沙尘含量越大,能量从地面传输到大气的越多。沙尘天气感热通量占净辐射通量的比重维持在 55% 左右,而扬沙、晴朗天气下此比重分别维持在 45% 和 25% 左右。需要指出,这种情况在夜间并不明显。这一结果表明,半干旱地区沙尘天气时感热通量占能量分配的主导地位,而晴天时的潜热通量的比重高于感热通量。

4 气溶胶质量浓度和各气象要素及辐射收支的相关性

4.1 数据处理

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,沙尘气溶胶质量浓度在一天的不同时段对气象要素的影响不同。加之已有的沙尘气溶胶质量浓度资料为日平均值,直接分析每日平均气溶胶浓度和各微气象学特征量的关系并不能很好地反映两者之间的相关性,同时考虑到沙尘暴发生的起始时间不确定,本文以太阳高度角和地面稳定度的分布为依据把每日分成了 4 个时段(同上)。利用分别求相关的方法,一来可以具体分析气溶胶粒子的浓度在哪个时段对气象要素和辐射收支的影响最大,二来可以在起始时间不确定的情况下通过其相关性的的大小大致确定沙尘暴发生的时段。

第一时段 0:00–5:30,几乎没有太阳短波辐射,主要是地气系统的长波辐射影响辐射收支和各气象要素,这个时段可以主要分析沙尘气溶胶对

长波辐射的影响。第二时段 6:00–11:30,太阳高度角逐渐增大,地表接收的太阳短波辐射逐渐增加,地面辐射收支和各气象要素随着短波辐射产生相应变化,可以主要分析其对短波辐射的影响。第三时段 12:00–17:30 比第二时段的太阳短波辐射逐渐减少,可以和第二时段进行对比。第四时段为 18:00–23:30。6 月,此时段前期短波辐射有一定影响,后期则主要是长波辐射影响,通过这个时段分析沙尘暴对长短板综合作用的影响。

4.2 相关分析

从表 2 可以明显看出气溶胶质量浓度和各微气象学特征量有明显的相关性,且在不同时段相关性也有所不同。

分时段看,日间地面气温、相对湿度、潜热通量、感热通量均对沙尘含量有很好的响应,且沙尘含量越高,地面气温与感热通量值越高,而相对湿度与潜热通量值越低,其相关系数分别为 0.62、0.60、-0.67 和 -0.59。夜间 2 cm 地温与沙尘含量响应较强,即沙尘含量越高,2 cm 地温值越高,其相关系数达 0.62,这很可能是因为沙尘气溶胶是通过影响长波辐射进而影响 2 cm 地温的,因为夜间高浓度的沙尘气溶胶反射回地面长波辐射,同时也以自身的温度向地面辐射长波辐射,使得地温升高。相关系数在第一、四时段很多未通过检验,而在第二、三时段均通过检验,由此可以推断沙尘含量对地面微气象学特征量及辐射收支的影响主要产生在太阳短波辐射主导时段(2 cm 地温除外),而在夜间的影响相对较小。

从日均值看,沙尘气溶胶质量浓度与日均风速、地面气温呈一定的正相关,而与 2 cm 地温、感热通量的相关性更强,相关系数分别达到 0.59、0.70。气溶胶质量浓度与日均相对湿度、潜热通量

表 2 通榆站 2006 年 6 月气溶胶质量浓度和地面微气象学特征量及辐射通量的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between aerosol concentration and the land surface micrometeorological factors as well as the surface fluxes at Tongyu station in Jun 2006

	地面风速	气温	相对湿度	2 cm 地温	潜热通量	感热通量
0:00–5:30	—	—	-0.661**	0.521*	—	—
6:00–11:30	0.467*	0.619**	-0.642**	0.482*	-0.552**	0.598**
12:00–17:30	0.477*	0.582**	-0.669**	0.456*	-0.585**	0.595**
18:00–23:30	-0.585**	—	-0.630**	0.617**	-0.529*	—
日平均	0.455*	0.519*	-0.754**	0.592**	-0.620**	0.704**

** 表示通过 0.01 的显著性检验,* 表示通过 0.05 的显著性检验。

呈显著负相关, 相关系数分别为 -0.75 、 -0.62 。

值得注意的是, 平均风速和沙尘含量的相关关系在白天和夜间迥异, 这或许源于沙尘含量还同时与风频、风向及沙尘源等多种复杂因素有关。

5 典型天气个例分析

为进一步分析沙尘气溶胶对某一次天气过程的具体影响, 我们挑选一个典型沙尘天气过程进行研究。

5.1 天气实况

通过分析通榆站 6 月日均沙尘气溶胶质量浓度的逐日变化发现, 自 6 月 3~10 日有沙尘浓度的剧烈变化过程, 其日均气溶胶质量浓度自 6 月 3 日的 $130.24 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 迅速增长到 6 月 6 日的 $442.04 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 而后迅速衰减至 6 月 10 日的 $44.26 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。6 月 3 日, 空气中存在一些浮尘, 随着时间演变, 空气中的沙尘粒子浓度急剧增加, 6 月 5 日和 7 日产生沙尘暴过程, 其后减弱为扬沙天气, 空气中的沙尘粒子逐渐沉降, 因 6 月 10 日有降水产生 (6 月 9 日已有零星降水), 空气中的气溶胶粒子迅速减少。本节以一天为一个周期来讨论这次强沙尘过程中各个气象要素随时间的演变特征。

5.2 地面气象要素的变化

由图 3 可以看到, 随着日均沙尘含量的不同, 地面微气象学特征量响应显著。在沙尘暴发生以前, 风速经过两次调整: 第一次调整在 6 月 3~4 日, 6 月 3 日午后风速急增至 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 其后风速在 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右直至 6 月 4 日; 第二次调整在 6 月 5 日, 此期间最大风速仅为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 风速调整减弱, 这为随后发生的沙尘天气提供了较好的地表沙尘源。沙尘暴发生期间, 风速突然急增, 在 6 月 7 日 18:00 达到最大值 $10.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 在 6 月 8 日 15:00 也达到 $9.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的极值。6 月 7 日和 8 日风速超过 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的时段分别为 10:00–20:00 和 12:00–18:00, 分别占全天的 42% 和 25%。沙尘暴发生后, 风速呈阶梯式逐渐调整减弱。因此, 沙尘暴发生前期风速调整减弱为其后风速急增提供了基础, 也为沙尘暴的发生提供较好的地表沙尘源, 期间的大风速则为沙尘暴提供动力条件 (图 3a)。

结合图 3b、3c 和 3e 进行对比分析, 整个天气过程中, 气温和 2 cm 地温呈同向变化, 而两者与相对湿度则呈明显的反向变化。沙尘暴发生前期, 气温和 2 cm 地温呈明显增加的趋势, 至沙尘发生时, 于 6 月 5 日 16:00 和 6 月 6 日 12:30 分别达到最大地温值 19.3°C 和最大气温值 32.9°C , 其后气温和 2 cm 地温均缓慢地振荡减小, 可见沙尘含量对地面气温及 2 cm 地温增温的贡献很大, 且地温响应早于气温。气温的变化趋势与相对湿度呈明显的反相位, 沙尘发生前期, 相对湿度很大, 6 月 4 日最大相对湿度高达 96.0%, 其后相对湿度迅速减小, 6 月 5 日和 6 日的最大相对湿度分别仅为 57.1% 和 46.5%, 其后相对湿度呈缓慢振荡式慢慢回升直至 6 月 10 日最大相对湿度为 96.2%。这说明沙尘含量与湿度呈反向变化, 较低的相对湿度为沙尘暴的发生提供了较好的地表沙尘源。纵观整个沙尘过程, 空气由冷湿变为暖干再恢复至冷湿状态。

图 3d 中, 6 月 3~4 日地表气压由 991 hPa 迅速降至 983 hPa, 随后气压降低趋势有所缓解并稍有回升, 自 6 月 5 日 0:00 至 6 日 11:00, 气压在 984 hPa 附近振动变化, 其后气压继续降低至 6 月 7 日 14:30 的 973 hPa, 此后震荡调整并有所回升。整个沙尘的剧烈变化周期涵盖在气压的降低趋势中, 可见低气压是此次天气过程的主导因素之一。本次天气过程过后, 气压有所回升。

5.3 地面辐射收支和能量平衡的变化

图 4 中可见, 整个天气过程中地表辐射收支总量对沙尘含量的响应并不显著。从图 4a 可见, 通榆站地面净辐射呈现出由少到多的变化趋势, 但扬沙、沙尘天气的地面净辐射通量值相差并不大, 最大值为 $440 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 其后逐渐增加到 $480 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右。从 6 月 9 日起, 天气逐渐晴好, 地面净辐射通量显著增高, 最大值达到 $497.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

从地表热通量的变化看, 6 月 3 日的潜热通量值很小 (图 4b), 表明此时地面水分含量很少, 地面干燥, 这为后期的沙尘浓度增加提供了本土沙尘源的条件。整个天气周期中地面潜热都维持相对很小的数值, 直至 6 月 9 日产生降水后, 潜热通量才有了显著增高。相比而言, 沙尘事件发生前, 感热通量较小。而在沙尘事件期间, 地面感热通量维持较高的数值。气溶胶的质量浓度越

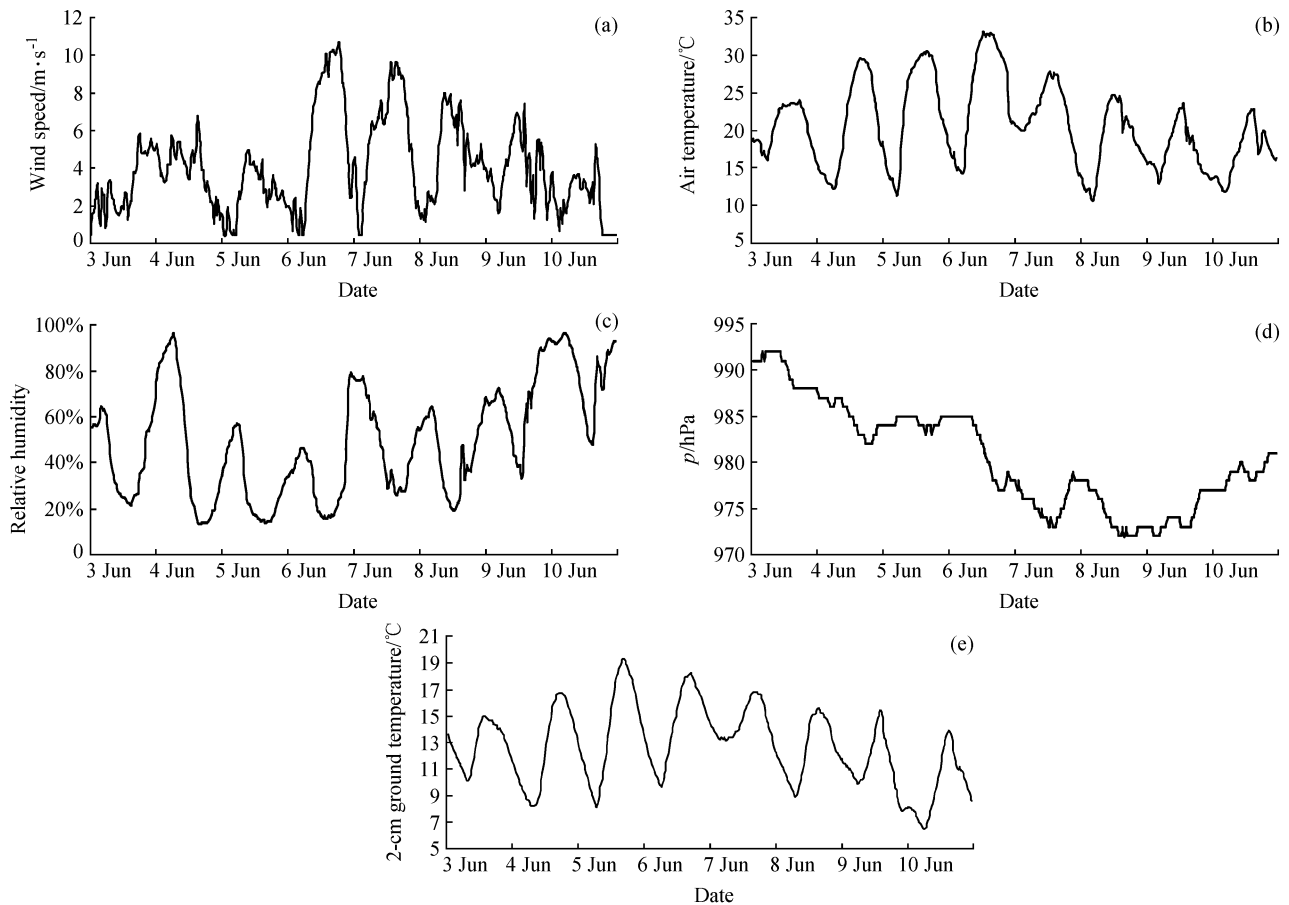


图3 通榆站 2006 年 6 月 3~10 日地面微气象学特征量的逐日变化: (a) 风速; (b) 气温; (c) 相对湿度; (d) 气压; (e) 2 cm 地温
Fig. 3 Variations of micrometeorological factors at Tongyu station from 3 Jun to 10 Jun 2006: (a) Wind speed; (b) air temperature; (c) relative humidity; (d) air pressure; (e) 2-cm ground temperature

小,地面感热通量越少,这个关系和 2 cm 地温的变化一致(图 4c)。

6 结论和讨论

通过对不同天气类型的对比以及个例分析的结果,初步得到以下结论:

(1) 半干旱地区,沙尘天气地面日均风速比晴朗天气高约 48%,而相对湿度则低约 35%。地面气温和 2 cm 地温对沙尘气溶胶的响应都较弱,沙尘气溶胶对 2 cm 地温的影响主要在夜间,而对地面气温的影响在白天和夜间截然相反,其影响机制有待进一步研究。

(2) 受沙尘天气的影响,由于沙尘含量较大,致使半干旱区地面接受的净辐射通量远小于晴朗天气,最大净辐射差约 $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。沙尘天气、

晴朗天气中最大感热/潜热通量约分别占净辐射通量的 55% / 30%、25% / 60%,可见沙尘天气感热通量占支配地位,而晴朗天气潜热通量占的比重高于沙尘天气。

(3) 气溶胶质量浓度与日均 2 cm 地温、感热通量呈明显正相关,与相对湿度、潜热通量呈明显负相关,相关系数分别为 0.59、0.70、-0.75、-0.62。除了 2 cm 地温在夜间响应更明显外,其他研究因素均在日间响应较大。

(4) 沙尘天气过境前,风速二次调整减弱,大气呈干热状态,气压降低;过境时,地面风速突然急增,气压继续降低,气温上升,相对湿度降低,地面净辐射通量和潜热通量维持较低数值,感热通量较高;过境后,相对湿度增高,气温降低,气压回升,地面大气相对湿冷,处于相对高压控制下,净辐射通量和潜热通量显著增大,感

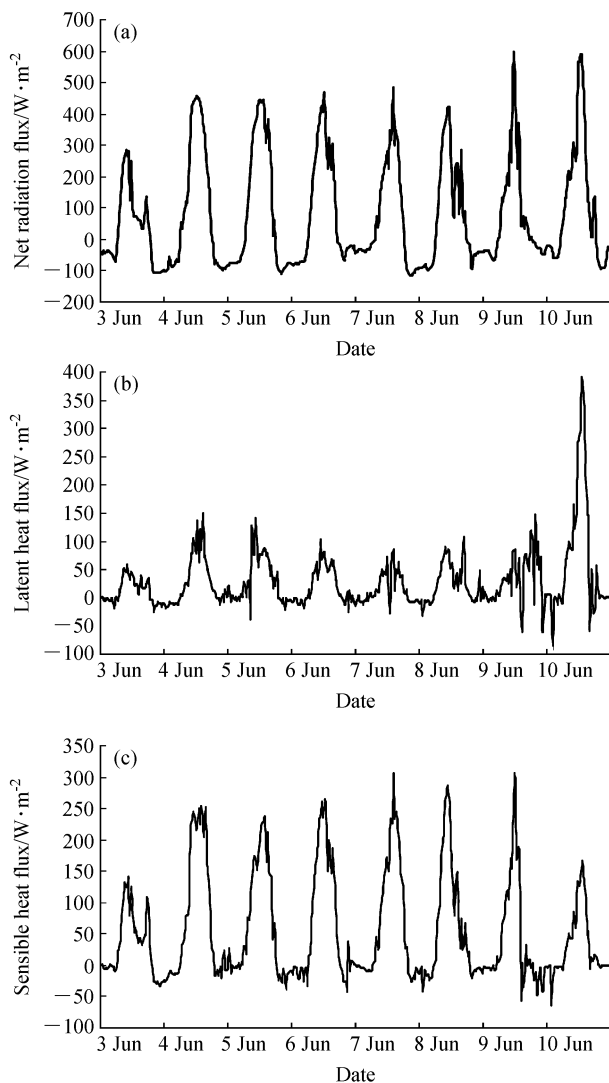


图4 通榆站2006年6月3~10日地面辐射收支量的逐日变化: (a) 净辐射通量; (b) 潜热通量; (c) 感热通量

Fig. 4 Variations of the surface fluxes at Tongyu station from 3 Jun to 10 Jun 2006: (a) Net radiation flux; (b) latent heat flux; (c) sensible heat flux

热通量明显减少。

与胡泽勇等(2002)的研究相比,沙尘暴过境时干旱、半干旱区的微气象学响应特征大多一致,只是干旱区的响应更加强烈。有趣的是,两者感热的响应颇有不同,干旱区感热减弱而半干旱区感热增强。对这种差异的一个初步推断是由于干旱区沙尘源充足,大气中沙尘粒子浓度往往高于半干旱区,故其微气象学的响应比半干旱区强烈。一般情况下,晴天的干旱区感热输送远大于潜热输送,地气热容量相差很大,沙尘粒子从

地面卷起悬浮于大气中导致气温升高,同时沙尘粒子削弱了到达地面的短波辐射,造成地表温度减小,进而地气温差减小,感热输送减弱;相比较而言,半干旱区地表水分含量较干旱区高,晴天时半干旱区潜热和感热输送比例相当。沙尘暴发生时,地表土壤湿度减小,地面热容量减小,使地面升温快于大气,地气温差增大,感热增强。

需要指出的是,本文所采用的资料由于没有沙尘发生的起止时间,容易将其影响平均、弱化。此外,这一工作还有待于应用更长时段的观测资料加以深化。同时,在今后的工作中结合物理模型对本文提出的一些推论进行相关的机理检验也是必要的。

参考文献 (References)

- 丁瑞强, 王式功, 尚可政, 等. 2003. 近 45 a 我国沙尘暴和扬沙天气变化趋势和突变分析 [J]. 中国沙漠, 23 (5): 306-310.
- Ding Ruiqiang, Wang Shigong, Shang Kezheng, et al. 2003. Analyses of sandstorm and sand-blowing weather trend and jump in China in recent 45 years [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 23 (5): 306-310.
- 符淙斌, 温刚. 2002. 中国北方干旱化的几个问题 [J]. 气候与环境研究, 7 (1): 22-29. Fu Congbin, Wen Gang. 2002. Several issues on aridification in the northern China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 7 (1): 22-29.
- 符淙斌, 叶笃正. 1995. 全球变化和我国未来的生存环境 [J]. 大气科学, 19 (1): 117-126. Fu Congbin, Ye Duzheng. 1995. Global change and the future trend of ecological environment evolution in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 19 (1): 17-126.
- 符淙斌, 延晓冬, 郭维栋. 2006. 北方干旱化与人类适应 [J]. 自然科学进展, 16 (10): 1216-1223. Fu Congbin, Yan Xiaodong, Guo Weidong. 2006. Aridification in the northern China and human adaptation [J]. Progress in Natural Science (in Chinese), 16 (10): 1216-1223.
- 胡隐樵, 张强. 2001. 开展干旱环境动力学研究的若干问题 [J]. 地球科学进展, 16 (1): 18-23. Hu Yinqiao, Zhang Qiang. 2001. Some issues of arid environment dynamics [J]. Advance in Earth Sciences (in Chinese), 16 (1): 18-23.
- 胡泽勇, 黄荣辉, 卫国安, 等. 2002. 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 [J]. 大气科学, 26 (1): 1-8. Hu Zeyong, Huang Ronghui, Wei Guoan, et al. 2002. Variations of surface atmospheric variables and energy budget during a sandstorm passing Dunhuang on June 6 of 2000 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chi-

- nese), 26 (1): 1-8.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 996pp.
- 刘辉志, 董文杰, 符淙斌, 等. 2004. 半干旱地区吉林通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测实验 [J]. 气候与环境研究, 9 (2): 378-389. Liu Huizhi, Dong Wenjie, Fu Congbin, et al. 2004. The long term field experiment on aridification and the ordered human activity in semi-arid area at Tongyu, Northeast China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (2): 378-389.
- 陆均天, 邹旭恺, 王锦贵, 等. 2003. 近 3 年我国沙尘天气较频繁发生的原因分析 [J]. 气候与环境研究, 8 (1): 107-113. Lu Juntian, Zou Xukai, Wang Jingui, et al. 2003. Analyses of the causes for frequent dust weather occurred in China during the last three years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (1): 107-113.
- 马柱国, 符淙斌. 2005. 中国干旱和半干旱带的 10 年际演变特征 [J]. 地球物理学报, 48 (3): 519-525. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2005. Decadal variations of arid and semi-arid boundary in China [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 48 (3): 519-525.
- Sokolik I N, Toon O B. 1996. Direct radiative forcing by anthropogenic airborne mineral aerosols [J]. Nature, 381 (20): 681-683.
- 沈志宝, 文军. 1994. 沙漠地区春季的大气混浊度及沙尘大气对地面辐射平衡的影响 [J]. 高原气象, 13 (3): 330-338. Shen Zhibao, Wen Jun. 1994. The atmospheric turbidity and the influence of the dust atmosphere on the surface radiation balance in desert in region spring [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 13 (3): 330-338.
- Tegen I, Fung I. 1994. Modeling of mineral dust in the atmosphere: Sources, transport and optical thickness [J]. J. Geophys. Res., 99 (D101): 22897-22914.
- 王式功, 王金艳, 周自江, 等. 2006. 中国沙尘天气的区域特征 [J]. 地理学报, 58 (2): 193-200. Wang Shigong, Wang Jinyan, Zhou Zijiang, et al. 2006. Regional characteristics of dust events in China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (2): 193-200.
- 王玉洁, 黄建平, 王天河. 2006. 一次沙尘暴过程中沙尘气溶胶对云物理量和辐射强迫的影响 [J]. 干旱气象, 24 (3): 14-18. Wang Yujie, Huang Jianping, Wang Tianhe. 2006. The influences of dust aerosols on cloud properties and radiative forcing in a sandstorm weather process [J]. Arid Meteorology (in Chinese), 24 (3): 14-18.
- 魏丽, 沈志宝. 1998. 大气沙尘辐射特性的卫星测量分析 [J]. 高原气象, 17 (4): 347-354. Wei Li, Shen Zhibao. 1998. The radiative characteristics of atmospheric dust observed from satellite [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 17 (4): 347-354.
- 吴锦奎, 丁永建, 沈永平, 等. 2006. 黑河中游间作灌溉农田的能量平衡 [J]. 冰川冻土, 28 (3): 443-449. Wu Jinkui, Ding Yongjian, Shen Yongping, et al. 2006. Energy balance in the irrigational intercropping field in the middle reaches of Heihe River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 28 (3): 443-449.
- Zhang Renjian, Fu Congbin, Han Zhiwei, et al. 2008. Characteristic of chemical composition of PM_{2.5} in Tongyu, semi-arid region in Northeast China in spring period [J]. Adv. Atmos. Sci., 25 (6): 922-931.
- 张高英, 赵思雄, 孙建华. 2004. 近年来强沙尘暴天气气候特征的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 9 (1): 101-115. Zhang Gaoying, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2004. Analysis of climatological characteristics of severe dust storms in recent years in the northern China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (1): 101-115.
- 周秀骥, 徐祥德, 颜鹏, 等. 2002. 2000 年春季沙尘暴动力学特征 [J]. 中国科学 (D 辑), 32 (4): 327-334. Zhou Xiujie, Xu Xiangde, Yan Peng, et al. 2002. The dynamical characteristics of the sand-storm of spring in 2000 [J]. Science in China (Ser. D), 32 (4): 327-334.