

孙永刚, 孟雪峰, 赵毅勇, 等. 2011. 内蒙古一次强沙尘暴过程综合观测分析 [J]. 气候与环境研究, 16 (6): 742–752. Sun Yonggang, Meng Xuefeng, Zhao Yiyong, et al. 2011. Composite observations and analysis of a severe dust storm in Inner Mongolia [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (6): 742–752.

内蒙古一次强沙尘暴过程综合观测分析

孙永刚¹ 孟雪峰¹ 赵毅勇² 云静波¹

¹ 内蒙古气象台, 呼和浩特 010051

² 内蒙古大气探测技术保障中心, 呼和浩特 010051

摘 要 利用高空、地面常规观测资料和内蒙古沙尘暴监测站的沙尘暴器测资料, 对2010年3月19~20日一次强沙尘暴天气过程进行了综合观测分析。结果表明: 本次沙尘暴发生前, 大气层结稳定并不利于对流的发展。但在700 hPa至500 hPa的强冷平流与850 hPa以下层次的平流差异有利于温度垂直递减率增大, 强冷平流的作用使其中心以下层次形成热力不稳定层结, 是沙尘暴发生的有利层结条件。当干对流风暴发生并形成沙尘暴天气时, 不稳定能量释放, 使该层大气趋于中性层结即混合层, 混合层可能是其间的一个平衡态。对流层中低层冷平流的强度、位置和层次, 一定程度上影响着混合层的厚度和沙尘暴的强度。过程中混合层以下气层温度下降的较快, 加之沙尘暴顶层短波辐射有增温效果, 在混合层顶(约500 hPa处)出现逆温盖。强冷空气活动是引发沙尘暴天气的主要原因, 沙尘暴天气的发生伴随着地面剧烈降温, 相对湿度骤降, 气压涌升, 地面风速直接影响沙尘暴强度。可吸入颗粒物(PM₁₀)浓度能更加精细的反映和描述沙尘暴强度的变化。粒子散射系数的变化趋势和PM₁₀浓度的变化趋势非常一致, 沙尘暴阶段, 散射系数基本在1000 Mm⁻¹以上, 达到强沙尘暴强度阶段, 散射系数基本在2000 Mm⁻¹以上。

关键词 沙尘暴 PM₁₀ 粒子散射系数 观测

文章编号 1006-9585 (2011) 06-0742-11 **中图分类号** P458 **文献标识码** A

Composite Observations and Analysis of a Severe Dust Storm in Inner Mongolia

SUN Yonggang¹, MENG Xuefeng¹, ZHAO Yiyong², and YUN Jingbo¹

¹ Inner Mongolia Meteorological Observatory, Hohhot 010051

² Inner Mongolia Atmospheric Sounding Technology Support Center, Hohhot 010051

Abstract Using the upper-air and surface observation data and sandstorm instrumental data of Inner Mongolian sandstorm monitoring stations, a severe sandstorm which lasted in the period from 19 Jan to 20 Jan 2010 was observed and analyzed. The result show that: Before the occurrence of this sandstorm, the stability of atmosphere was not conducive to the development of convection. However, the difference advection between from 700 hPa to 500 hPa and below 850 hPa was favorable for the increasing of temperature lapse rate. The strong cold advection caused a thermal convective instability which formed at the levels below its center and was favorable for the sandstorm burst. When dry-convective storm started and led to a sandstorm, the instable energy was released, which made the layer of the atmosphere tends to be a neutral stratification, namely the mixed layer. This layer may be an equilibrium state during the whole process. To some extent, the strength, location, and level of the cold advection in the

收稿日期 2010-06-03 收到, 2011-07-12 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 0765001

作者简介 孙永刚, 男, 1967年出生, 高级工程师, 主要从事天气预报和灾害研究。E-mail: sunyonggang5522@yahoo.com.cn

middle and lower troposphere influenced the thickness of the mixed layer and the intensity of the sandstorm. During the process, due to both of the quick droppings of the temperature in the layers below the mixed layer and the heating effect of short-wave radiation at the top of sandstorm, there formed a temperature inversion cap at the top of the mixed layer (about 500 hPa). The strong cold air activity was the main reason for sandstorm occurrence which accompanied by the sharp dropping of land surface temperature and relative humidity, as well as by the rising of air pressure. The surface wind speed directly affected the strength of sandstorm. PM10 (inhalable particle matter) value can reflect and describe the change of the sandstorm intensity in a better level. The change trend of the particle's scattering coefficient was highly consistent with PM10 value; During the sandstorm, the scattering coefficient was generally above 1000 Mm^{-1} ; while the sandstorm being a strong one, it was mainly above 2000 Mm^{-1} .

Key words sandstorm, PM10, particle scattering coefficient, observation

1 引言

每年春季我国西北地区在特定的气候背景和天气势下,受冷锋造成的强风作用,土壤中大量尘粒被卷入空中而导致沙尘暴的爆发(周秀骥等, 2002)。沙尘暴是一种发生在干旱、半干旱地区危害严重的灾害性天气,其对工农业生产、交通运输、人民财产和身体健康等方面危害严重。正是由于沙尘暴灾害的严重性和频发性,越来越受到科学家和全社会的广泛关注(叶笃正等, 2000; 钱正安等, 2002)。目前针对沙尘暴的研究主要集中在天气气候特征的统计分析、数值模拟与远程传输、遥感监测、沙尘暴期间高空、地面气象要素变化特征分析、沙尘粒子的物理化学特性、生态环境和气候效应以及辐射强迫等领域。对沙尘天气的观测分析研究始终是研究热点之一(尹晓惠, 2009),胡隐樵和光田宁(1996)分析了强沙尘暴的微气象特征和各辐射分量特征,并结合强沙尘暴和干飚线的形成和发展机制建立了一个干飚线发展的物理模型。胡泽勇等(2002)利用在敦煌进行的“我国典型干旱区陆一气相互作用试验”观测资料,分析了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。近些年,能见度仪、太阳光度计、粒子散射系数(NEP)、可吸入颗粒物(PM10)等先进器测工具已经成功应用到沙尘天气监测规范研究和业务工作中,应用这些基础数据对沙尘暴开展综合观测和深入研究是很有必要的。

大气层结条件是沙尘暴形成的重要影响因素之一。王式功和扬德保(1995)对西北地区强沙尘暴过程的研究发现,在强沙尘暴出现之前往往

在大气低层形成不稳定层结,为旺盛干对流的产生创造了有利条件。钱正安等(2004)给出的强沙尘暴天气模型把不稳定层结作为一个重要特征。Taklkemi(1999)在研究“9355”黑风暴过程中发现,在黑风暴出现之前,地面加热导致对流层低层形成了深厚的混合层,由于混合层明显减小了抬升气块所需的能量,使得冷锋前地面辐合触发了强干对流和黑风暴。Pauley et al.(1996)研究影响美国加州的强沙尘暴过程中也发现在强沙尘暴出现前形成了等熵混合层。Carlson and Prospero(1972)对撒哈拉地区沙尘暴过程的研究发现,在沙尘暴传输过程中,沙尘层(850 hPa至500 hPa)维持一等熵混合层。姜学恭和沈建国(2006)对内蒙古地区两种不同类型沙尘暴过程的大气层结特征进行了对比分析表明,沙尘气溶胶的辐射强迫效应同时消弱白天的层结不稳定性度 and 夜间的层结稳定度。可见,地面加热导致大气层结稳定度的降低,并为沙尘暴的提供了有利的条件。在强沙尘暴出现前、后以及维持阶段大气究竟表现为哪种层结形态?则有必要进行进一步的研究。

2010年3月19日新疆南部、青海东北部、甘肃南部、内蒙古中西部、陕西北部、宁夏、山西、河北中西部等地区出现了大范围的沙尘暴天气,20日沙尘蔓延数千公里抵达中国东部和南方地区,甚至浮尘天气还影响至台湾和日本。是近几年我国发生的强度最强、影响范围最大的强沙尘暴天气之一。本文利用内蒙古沙尘暴监测站的PM10等先进器测资料结合大气常规观测资料,对本次强沙尘暴天气过程进行综合观测分析,比较系统的揭示强沙尘天气过程中各气象要素垂直分布特征、沙尘监测PM10、NEP值的变化特征,

深入分析了大气稳定度及混合层厚度变化特征,揭示了强冷平流对混合层厚度的影响,为进一步认识沙尘暴发生机理和解决预报问题提供一点借鉴。

2 天气过程概况

本次强沙尘暴天气过程出现在西部冷高压越过阿尔泰山脉,爆发性东移南下(西路冷空气),东部低压系统稳定少动,地面气压梯度剧增的时段。与大多数强沙尘暴天气过程出现在蒙古气旋强烈发展阶段不同,地面低压系统位置偏南(42°N),没有爆发性发展。2010年3月17日20时(北京时间,下同)500 hPa 高空欧亚大陆呈二槽一脊型(图略),东亚大槽位于 $120^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$, $80^{\circ}\text{E}\sim 90^{\circ}\text{E}$ 为一高脊, $50^{\circ}\text{E}\sim 60^{\circ}\text{E}$ 为一槽区,其前部有一斜压短波槽分裂出来位于 70°E 。18日08时至20时,斜压短波槽东移发展,温度线加密,地面对应在咸海、里海形成冷高压并加强东移,在阿尔泰—天山山脉堆积。19日08时500 hPa 斜压短波槽东移至贝加尔湖以南,700 hPa、850 hPa 对应强冷平流。19日08时至20日02时,冷高压越过阿尔泰山脉,爆发性东移南下,地面气压梯度剧增,前部冷锋侵入内蒙古中西部地区。期间,在11时,内蒙古西部地区开始出现扬沙天气。14

时,内蒙古阿拉善盟、巴彦淖尔市北部、鄂尔多斯市、包头市、呼和浩特市、乌兰察布市和锡林郭勒盟西南部产生大范围扬沙天气,阿拉善盟东部、巴彦淖尔市地区出现沙尘暴,海力素水平能见度下降到100 m。17时至20时,冷高压爆发性东移,地面气压梯度剧增阶段(朱日和至巴音毛道站的气压差由08时的120 hPa增至175 hPa),沙尘暴区域扩大到阿拉善盟东部、巴彦淖尔市、鄂尔多斯市、包头市、呼和浩特市、乌兰察布市和锡林郭勒盟西南部。其中巴彦淖尔市北部、包头市北部最强(水平能见度下降到200 m以下),海力素19日17时出现了黑风暴(能见度0 m),最大瞬时风速达到 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。20日02时后,东部低压系统东移南退减弱,其锢囚锋区在内蒙古中部地区形成降雪,沙尘天气减弱消失。随后,沙尘区向我国东南部蔓延。图1为19日20时海平面气压和强沙尘暴(能见度小于500 m)区域,强沙尘暴主要发生在内蒙古中部偏北地区。

3 高空气象要素演变特征

为了深入了解沙尘暴内部的气象要素及垂直分布特征,选择乌拉特中旗53336(出现强沙尘暴)和东胜53543(出现沙尘暴)为代表站进行

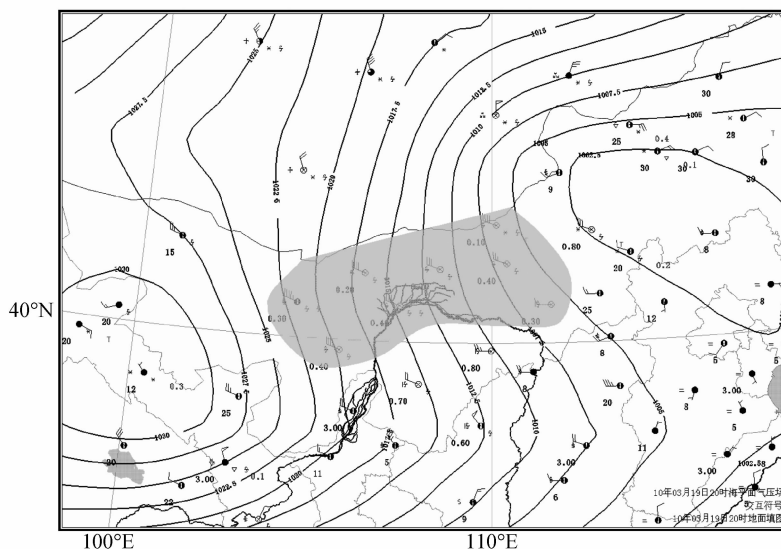


图1 2010年3月19日20时海平面气压和强沙尘暴(阴影,能见度小于500 m)区域图

Fig. 1 Sea-level pressure and windstorm area (shaded) (visibility is less than 500 m) at 2000 LST 19 Mar 2010

分析。

3.1 气温演变特征

图 2a 给出了乌拉特中旗 (53336) 探空站 19 日 08 时 (沙尘暴发生前)、19 日 20 时 (沙尘暴发生中)、20 日 08 时 (沙尘暴发生后) 3 个时次的大气层结温度。沙尘暴发生前 (19 日 08 时), 对流层中低层气温较高, 地面气温为 9°C 。此时气柱中温度垂直递减率较小, 并不利于对流的发展, 但此时受高空斜压槽的影响在对流层中低层形成强冷平流 (见图 3), 在沙尘暴出现前的一段时间中 700 hPa 至 500 hPa 维持强的冷平流, 850 hPa 以下冷平流很弱, 平流差异有利于温度垂直递减率增大, 使大气层结向有利于对流运动发展的方向演变, 为沙尘暴的发生、发展提供了热力条件。另外, 在 200 hPa 存在超低温现象, 加之对流层低层气温较高, 超低温现象的存在使得垂直方向的温度梯度增大, 也有利于对流的发展。200 hPa 超低温配合着高空冷空气下沉逆温层, 在沙尘暴爆发之前储存了大量的不稳定能量 (400 hPa 至 200 hPa 层结不稳定)。到 19 日 20 时强沙尘暴发生, 200 hPa 超低温明显减弱, 使垂直方向温度梯度减小, 不稳定能量释放。对流层中低层气温下降明显, 500 hPa 降温 18°C 最强, 与温度平流作用有直接关系, 500 hPa 以下气层的层结曲线很直, 基本与干绝热线平行。沙尘暴过境期间由于大气中的大量沙尘粒子使得太阳短波辐射大量被散射和反射回太空, 致使到达地面的太阳短波辐射明显减少, 而在沙尘暴顶层短波辐射有增温效果, 图 2a 中也可以看出 500 hPa 以下气层温度下降的较快, 因此在约 500 hPa 处出现逆温层。同时说明, 本次强沙尘暴扬起的沙尘已经到达 500 hPa 的高度。

3.2 湿度演变特征

由图 2b 中可看出, 在沙尘暴发生前, 500 hPa 以下整层大气湿度较大, 以 600 hPa 至 700 hPa 湿度最大, 比湿达 $3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 这是由于 700 hPa 槽区有云系覆盖所致。近地层受暖湿气流影响大气湿度也较大, 比湿达 $1.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。随着高空槽后冷空气的侵入, 一方面, 侵入的强冷空气形成下沉增干; 另一方面, 动量下传形成的强风卷起干燥沙尘粒子将大气中的水汽吸附, 使大气迅速变得非常干燥。19 日 20 时沙尘暴发生时,

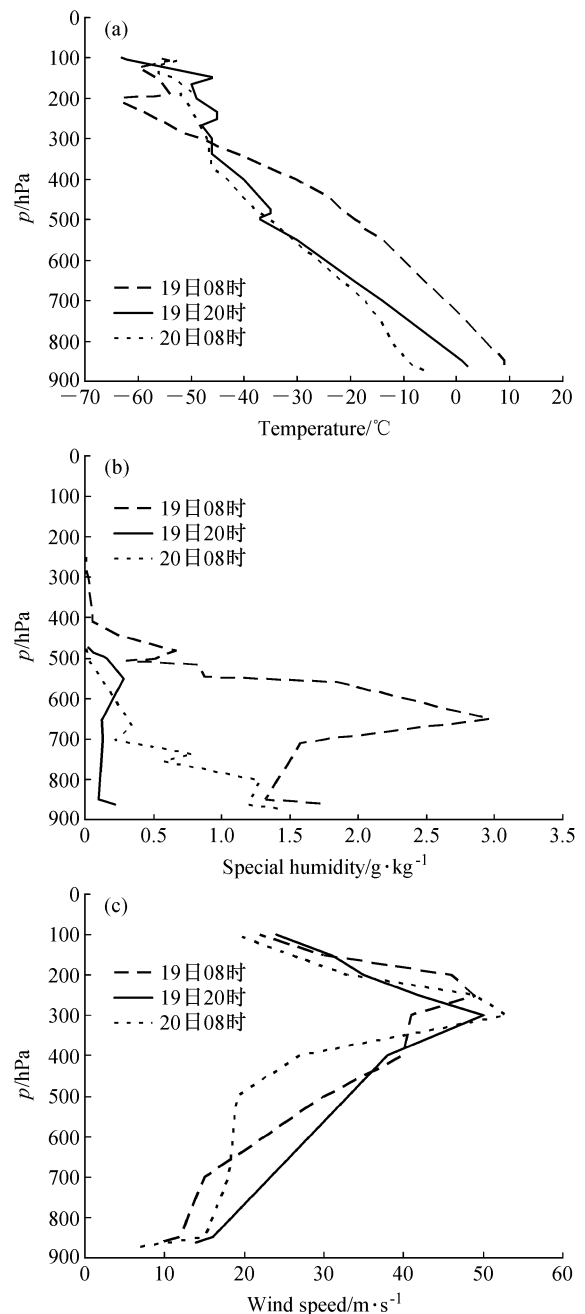


图2 乌拉特中旗 (53336) 19 日 08 时、20 时、20 日 08 时
(a) 大气层结温度、(b) 比湿、(c) 风速

Fig. 2 The atmospheric stratification (a) temperature, (b) special humidity, and (c) wind speed profile at Wulatezhongqi station at 0800 LST 19, 2000 LST 19, and 0800 LST 20 Mar 2010

整层大气非常干燥, 近地层的比湿仅为 $0.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。可见近地层的干急流是沙尘暴天气的重要特性之一。到后期, 由于锢囚锋区的影响产生了微量降雪, 抑制了沙尘暴天气的持续, 近地层

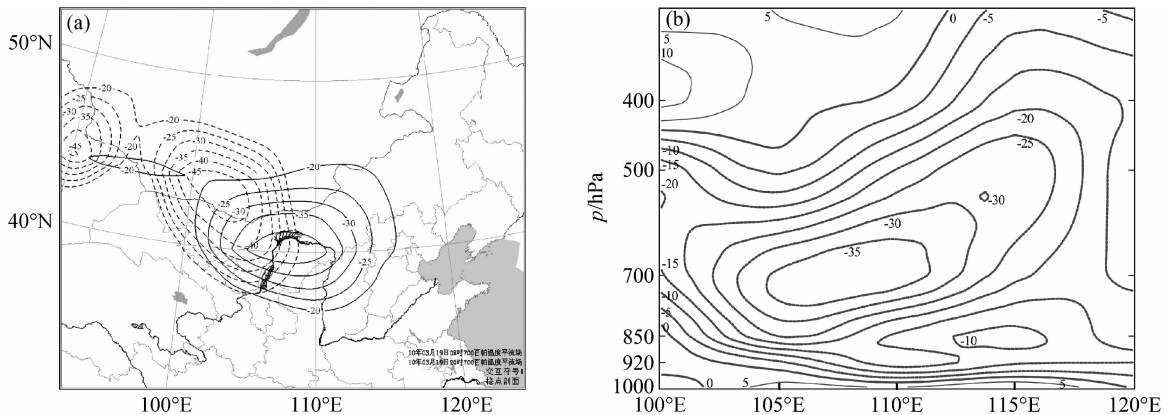


图3 (a) 2010年3月19日08时(虚线)和20时(实线)温度平流(单位: $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)叠加图; (b) 19日20时沿 41°N 温度平流(单位: $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)剖面图

Fig. 3 (a) Temperature advection ($10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) at 0800 LST (dotted) and 2000 LST (solid) 19 Mar 2010; (b) cross section of temperature advection ($10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) along 41°N at 2000 LST 19 Mar 2010

的比湿增大到 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

3.3 风速演变特征

图2c表明,在近地层,沙尘暴天气发生前,地面风速较小为 $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,沙尘暴发生时增加到 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,沙尘暴结束后,地面风速减小到 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,这个过程主要是由于冷锋过境前后地面气压梯度的稳剧变化所造成的。同时,从高空风廓线可以看出,在沙尘暴天气过程中,300 hPa附近高空风速维持高值,保持在 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强风速,这支高空急流的存在和维持为强沙尘暴的发生提供了动量。同时垂直风廓线表明,沙尘暴天气发生前,在400~700 hPa范围内风廓线梯度较大(基本呈一条直线)。19日20时的风廓线显示,当高空冷槽接过测站上空时,上层动量下传使700 hPa等压面风速增加到了 $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,比08时的风速增加了 $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,值得注意的是,此时400~850 hPa的垂直风廓线基本呈一条直线,说明该层的风切变均匀,动量下传效果显著。同时地面气压梯度加大,促使近地层风速进一步增加,成为沙尘暴形成的重要动力条件。沙尘暴结束后,400~700 hPa风速明显减小,对流层中低层风廓线梯度减小,动量下传作用受到抑制。地面气压梯度减小,地面风速明显减小,起沙的动力条件减弱,沙尘暴天气消失。

3.4 大气层结稳定度特征

采用位温(θ)、假相当位温(θ_{sc})与饱和假相当位温(θ_c)的垂直分布表征分析大气层结稳

定度。它们的公式为:

$$\theta = T(1000/p)^{R/c_p},$$

$$\theta_{sc} = \theta_{\text{exp}} \left[\frac{L}{c_p} \frac{q}{T_1} \right],$$

$$\theta_c = \theta_{\text{exp}} \left[\frac{L}{c_p} \frac{q_s}{T_1} \right],$$

其中, T 为气温, p 为气压, R 为常数, c_p 为干空气比定压热容, L 为凝结潜热, q 为比湿, q_s 为饱和比湿, T_1 为抬升凝结高度处温度。

图4是乌拉特中旗(53336)探空站2010年3月19日08时、20时、20日08时和东胜(53543)探空站19日20时探空资料的 θ 、 θ_{sc} 、 θ_c 垂直分布廓线。根据图4a可知,19日08时乌拉特中旗站的地面温度较高,饱和假相当位温达到 46°C ,随气压迅速减小, θ 、 θ_{sc} 线在700 hPa高度层以下距离接近,而 θ_{sc} 、 θ_c 之间距离非常大,表明低层大气较为干燥。500 hPa等压面高度层以下 θ 、 θ_{sc} 随高度递增,大气层结处于稳定状态。280~450 hPa的 θ 、 θ_{sc} 线几乎垂直于横坐标轴,说明大气层结处于不稳定状态,有利于高空动量下传。沙尘暴发生时,19日20时(图4b)对流层中低层 θ 、 θ_{sc} 、 θ_c 值明显下降,尤其时500 hPa。500 hPa高度层以下 θ 、 θ_{sc} 线几乎重合,而 θ_{sc} 、 θ_c 之间距离非常大,表明低层大气极为干燥, θ 、 θ_{sc} 线几乎垂直于横坐标轴,说明大气层结处于不稳定状态。此时边界层内形成了深厚的混合层,其厚度达到500 hPa等压面高度。深厚的混合层是深厚

干对流和强沙尘暴产生的主要原因。深厚混合层对沙尘暴的意义在于混合层的中性层结有利于深厚对流的产生。同样由于缺乏水汽, 干旱环境中往往具有很高的自由对流高度 (Gamo, 1996), 不利于对流发展。在中性层结层中, 抬升气块不需要能量。因此, 深厚混合层将有利于深厚对流的产生 (Gamo, 1996)。Gamo (1996) 的统计揭示了干旱高原混合层的重要特征: 在全球干旱、半干旱高原地区, 春、夏季混合层高度常可达到海平面上 4~6 km。就本次过程而言, 沙尘暴发生前并没有混合层存在, 而当沙尘暴发生时其混合层厚度达到 500 hPa 等压面高度, 与 Gamo (1996) 的统计结论一致。本次过程中深厚混合层的形成, 一方面有太阳辐射日变化的原因, 另一

方面值得注意的是, 对流层 500~700 hPa 强冷平流的作用。图 3a 给出了 700 hPa 层次 19 日 08 时和 20 时冷平流影响区域, 乌拉特中旗 53336 在其主要影响区域中。图 3b 给出了经过 41°N 的温度平流垂直剖面图, 可以分析出, 强冷平流中心在 500~700 hPa 层次上, 850 hPa 以下层冷平流明显要弱得多。正是由于高低层这种温度平流差异, 使得垂直气温直减率加大并保持这一趋势, 使强冷平流中心以下层次形成热力不稳定层结, 即在近地面层形成超绝热层 ($\partial\theta/\partial z < 0$), 是沙尘暴发生的有利层结条件。在低层扰动的触发下形成干对流风暴, 产生沙尘暴天气, 干对流的产生和沙尘的卷入使能量交换不稳定能量释放, 使该层大气趋于中性层结即混合层。混合层可能是在高

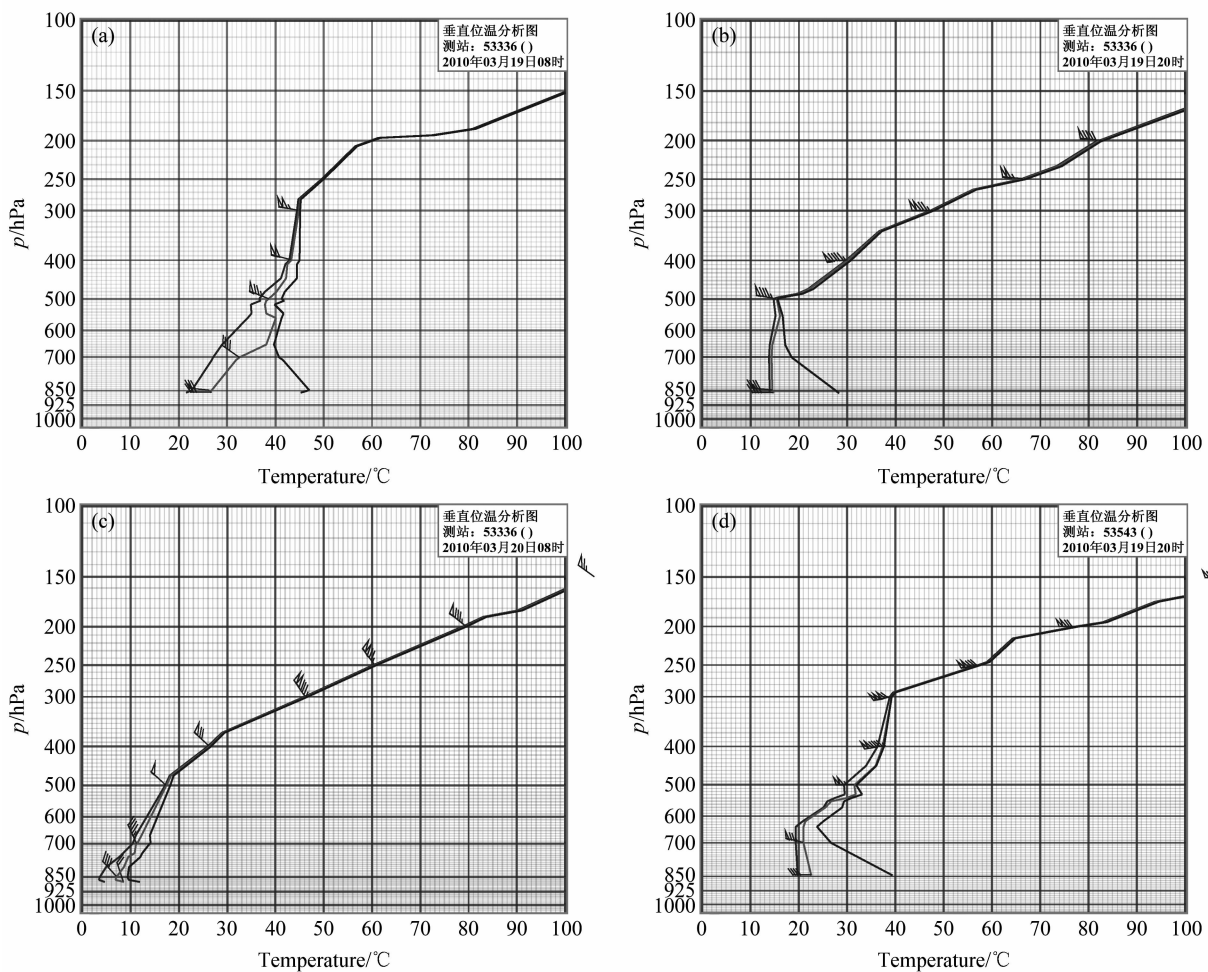


图4 乌拉特中旗 (53336) 5月19日 (a) 08时、(b) 20时、(c) 20日08时和 (d) 东胜 (53543) 19日20时的 θ (左线)、 θ_{se} (中线)、 θ_e (右线) 垂直分布廓线图 (单位: °C)

Fig. 4 The profile of θ (left line), θ_{se} (middle line), and θ_e (right line) at Wulatezhong Qi station at (a) 0800 LST 19 Mar, (b) 2000 LST 19 Mar, and (d) at Dongsheng station at 2000 LST 19 Mar

低层温度平流差异形成热力不稳定和干对流（沙尘暴）产生不稳定能量释放之间的一个平衡态。对比受冷平流影响较弱的东胜站（图 4d），其形成的混合层相对较浅，在 640 hPa 高度上。可见，沙尘暴过程中，强冷平流的强度、位置和层次，一定程度上影响着混合层的厚度，进而影响沙尘暴的强度和沙尘扬起的高度，是沙尘暴强度的重要判定因素。20 日 08 时（图 4c）地面饱和和假相当位温为 12°C ，地面温度下降， θ 、 θ_{sc} 、 θ_{c} 线在 700 hPa 高度层以下距离接近，表明受降水影响低层大气变得湿润，且整层大气较为稳定。

4 地面气象要素演变特征

4.1 地面温、压、湿特征

选择乌拉特中旗（53336）为代表站制作地面要素三线图（见图 5）。图中可见，在沙尘暴来临之前，受地面倒槽低压控制，从 18 日 20 时至 19 日 11 时地面气压有波动，并且气压一直处于低压状态。19 日 14 时之后，地面低压移出本站，冷高压移近，形成西高东低形势，在气压梯度作用下出现大风，沙尘暴发生，地面气压保持快速上升趋势，至 20 日 02 时 12 小时气压上升了 18 hPa（图 5）。地面气温的演变正好相反，从 18 日 20 时至 19 日 11 时地面气温有波动，并且一直处于高温状态，19 日 14 时之后，受冷高压侵入的影响，地面气温持续下降。沙尘暴发生时，露点线明显

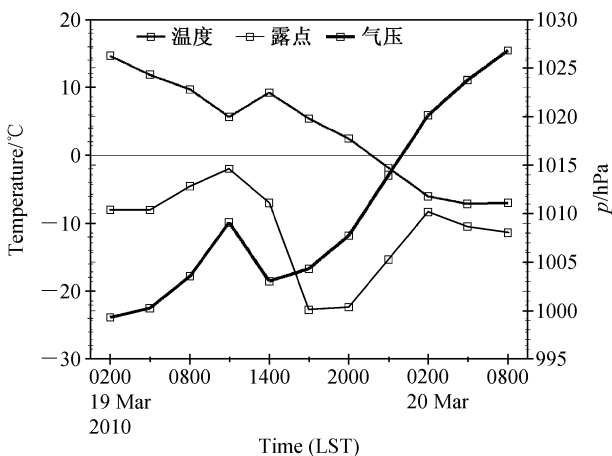


图 5 乌拉特中旗（53336）地面气象要素演变图

Fig. 5 The temporal changes of surface weather elements at Wulatezhong Qi station

远离温度线，表明此时地面非常干燥。20 日 02 时，出现飘雪天气，露点线靠近温度线，沙尘暴天气受到抑制。

4.2 地面微气象要素特征与沙尘暴强度的关系

为了详细的分析沙尘暴天气发生过程中地面气象要素演变特征，利用朱日和（53276）基准气候站 20 m 的微梯度塔观测资料。该梯度塔在 1 m、2 m、4 m、10 m 和 20 m 的 5 层上分别布设温度、湿度和风速速的观测仪器，风向观测高度在 1 m、4 m、20 m 的 3 层。本文以 2 m 高度处的温度和相对湿度、4 m 高度处的风向风速进行分析，数据时间间隔为 5 分钟。

本次过程中朱日和站出现沙尘暴天气，常规观测的最小能见度为 800 m，较乌拉特中旗出现的强沙尘暴其发生时间短强度弱，但精细的观测资料更有利于深入分析沙尘暴强度与地面气象要素之间的关系。

沙尘暴发生前 19 日 08 时至 12 时，朱日和站受地面气旋前部暖区和中心低气压影响，4 m 高度处偏南风转为西北风，风速由 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 逐步加大到 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ （图 6a）。能见度在 20000 m 左右为高值，PM10 浓度保持低值（图 6b），接近于本站春季晴空情况下的值，即 $300 \sim 400 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间。2 m 气温持续升高达到当日的最值 12.5°C （图 6c），升高了 7.5°C ，对沙尘暴的干对流发生有利。相对湿度在 30% 至 40% 之间。

沙尘暴发生期间 19 日 12 时至 20 时，本站在西高东低的形势下，受强气压梯度区影响，维持西北风，风速急剧增强达到 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，其后虽然风速逐渐减小，但维持较高值（ $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上）约 4 个小时（图 6a）。随着风速急剧增强，VIS（器测能见度）急剧减小，14 时降至 290 m，相应 PM10 浓度值迅速增长，14 时达到 $6500 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ （图 6b），到达扬沙天气标准，与地面观测一致（此时测站能见度 3000 m，出现扬沙天气现象），随后 15 分钟内 PM10 浓度急剧增大超过了 $22000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。根据对内蒙古沙尘暴强度与 PM10 浓度的统计结论，PM10 浓度 $\geq 7000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 就可以达到强沙尘暴标准（孙永刚，2009），因此可以判断朱日和站出现了强沙尘暴天气，正好出现在两次常规观测之间（常规观测只出现了沙尘暴天气，能见度 800 m）。大风速与 PM10 浓度高值对

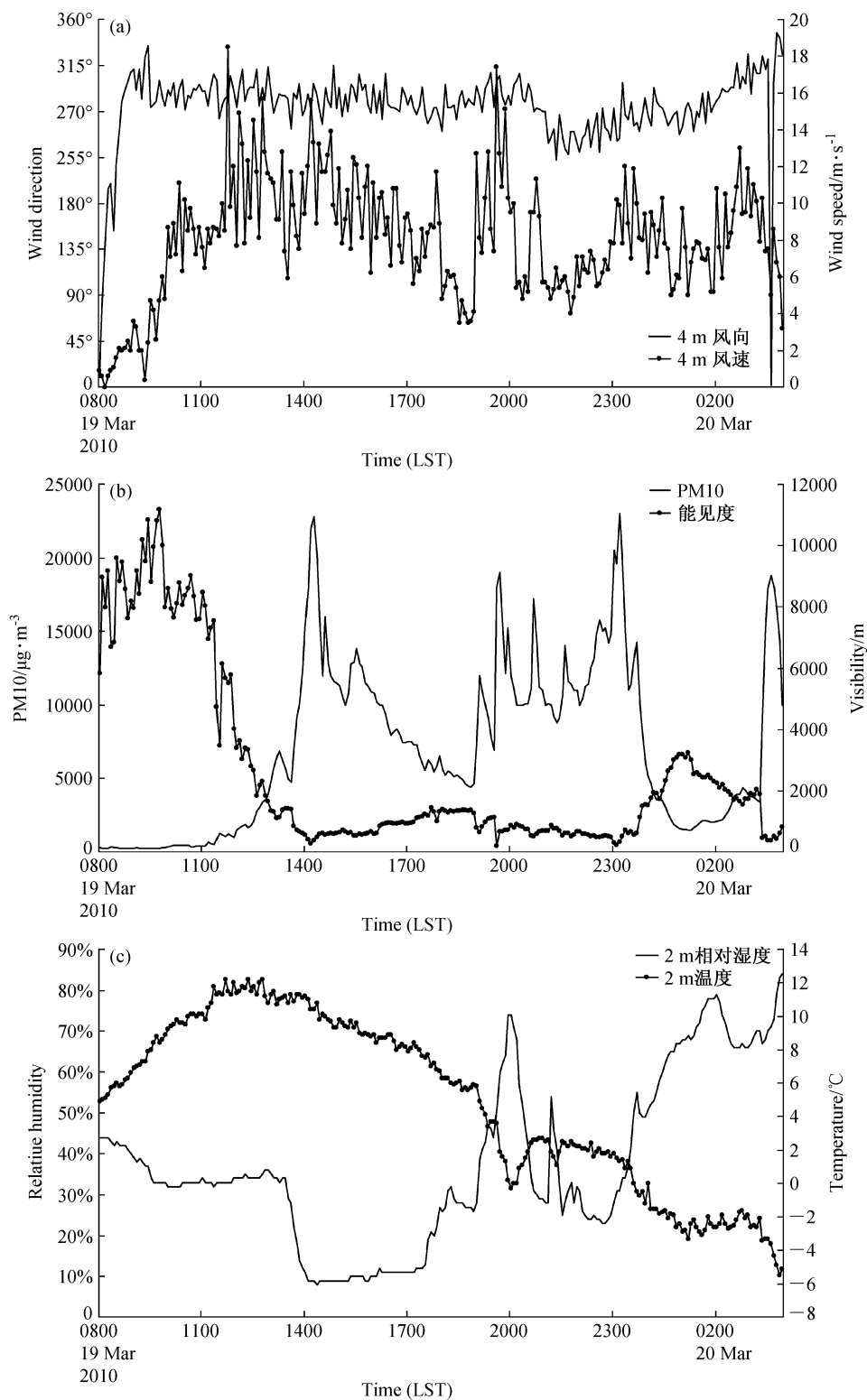


图6 2010年3月19日08时至20日04时 (a) 4 m 风向和4 m 风速、(b) PM10 浓度和能见度、(c) 2 m 相对湿度和2 m 温度变化曲线图

Fig. 6 The temporal changes of weather elements from 0800 LST to 0400 LST 20 Mar 2010: (a) Wind speed and direction at 4 m; (b) PM10 and visibility; (c) relative humidity and temperature at 2 m

应, 相关较好, PM10 峰值出现 (沙尘暴发生) 较最大风速出现晚了约 2 小时, 这可能对应着起沙过程所需时间。从 2 m 温度和相对湿度变化来看 (图 6c), 伴随强风的维持, 气温持续下降, 表明强冷空气的侵入直接影响地面大风和沙尘暴的形成。强沙尘暴发生时相对湿度骤降到 10% 左右, 其曲线呈凹字形, 表明大气中沙尘粒子浓度 (沙尘暴强度) 达到一定程度时, 会使大气的相对湿度明显下降。

19 日 20 时以后, 本站受地面气旋北部副冷锋 (锢囚峰) 的影响, 出现了飘雪伴有沙尘的天气现象。4 m 风速再度加大到 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 6a)。相应 PM10 浓度又出现一峰值达到 $20000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (图 6b), 由于降雪的影响其 PM10 浓度可能有较大的误差, VIS 保持较低水平。相对湿度达到 75% (图 6c), 气温出现快速下降达到零下, 这与此时本站出现飘雪天气有关。此后 19 日 20 时, PM10 浓度再次出现一峰值达到 $20000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上, 相对湿度较低, 以沙尘天气为主, 同样受降雪影响 PM10 浓度可能偏大。后期转为降雪天气, 相对湿度保持高值, 沙尘暴受到抑制。

可见本次沙尘暴过程间歇性明显, 强沙尘暴维持时间较短, 风速、PM10 观测出现多个峰值, PM10 观测受降雪影响误差会增大。前期为单纯的沙尘暴天气, 后期出现了沙尘暴和吹雪交替混合出现的天气, 天气现象较为复杂。

4.3 地面粒子散射系数 (NEP) 特征

粒子散射系数 (NEP) 是利用澳大利亚 Ecotech 公司生产的 M9003 型积分式浊度计对气溶胶的散射系数进行连续观测, 获得大气中颗粒物的散射特性。本文选取了东胜站的 NEP 观测数据, 为了更好的反应粒子散射系数与沙尘暴强度的关系, 制作了东胜站 NEP 与 PM10 的演变图 (图 7) 进行分析。

从图 7 可以看到, 粒子散射系数的变化趋势和 PM10 浓度的非常一致, 从 19 日 08 时开始粒子散射系数逐步增大。到 19 日 17 时本站出现扬沙天气, 散射系数为 810 Mm^{-1} ; 19 日 20 时和 23 时本站出现沙尘暴天气, 散射系数分别为 2300 Mm^{-1} 和 1530 Mm^{-1} 。另外, 根据 PM10 浓度判断, 本站从 19 日 17 时 30 分至 23 时 00 分达到沙尘暴强度, 这一阶段, 散射系数基本在 1000 Mm^{-1} 以上; 而达到强沙尘暴强度的时段, 散射系数基本在 2000 Mm^{-1} 以上。

5 小结

(1) 通过分析探空站的大气垂直廓线和地面气象要素发现, 在本次沙尘暴发生前, 气柱中温度垂直递减率较小, 并不利于对流的发展。但 700 hPa 至 500 hPa 的强冷平流与 850 hPa 以下冷平流较弱的平流差异有利于温度垂直递减率增大, 为

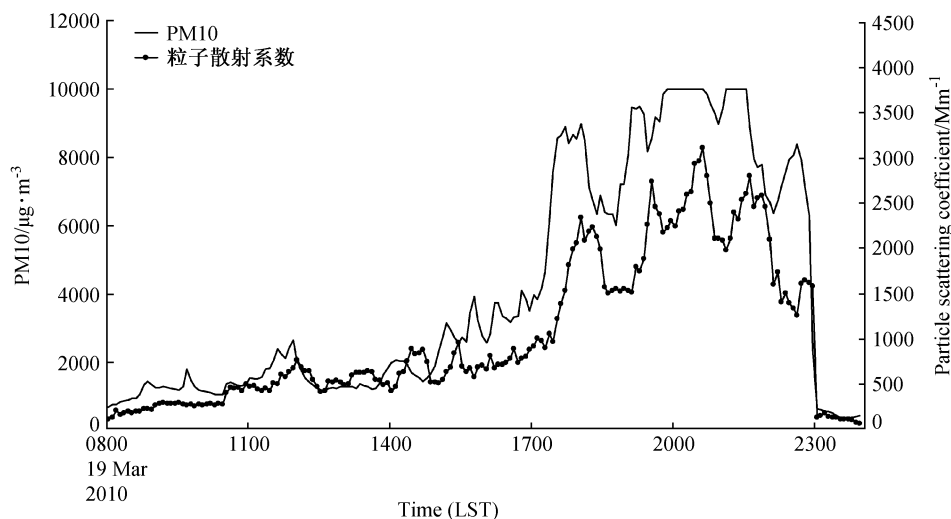


图 7 2010 年 3 月 19 日 08 时至 20 日 00 时东胜站 (53543) PM10 浓度、粒子散射系数变化曲线

Fig. 7 The temporal changes of PM10 and particle scattering from 0800 LST to 0000 LST 20 Mar 2010

沙尘暴的发生、发展提供了热力条件。沙尘暴发生时, 500 hPa 以下气层温度下降的较快, 沙尘暴顶层短波辐射有增温效果, 在约 500hPa 处出现逆温层。干燥的沙尘粒子将大气中的水汽吸附, 使大气迅速变得非常干燥, 近地层形成干急流是其重要特性之一。

(2) 分析位温 (θ)、假相当位温 (θ_{se}) 与饱和假相当位温 (θ_e) 的垂直分布曲线发现, 本次沙尘暴发生时具有厚混合层的形成。对流层 500~700 hPa 强冷平流的作用使得强冷平流中心以下层次形成热力不稳定层结, 即层形成超绝热层 ($\partial\theta/\partial z < 0$), 是沙尘暴发生的有利层结条件。在低层扰动的触发下形成干对流风暴, 产生沙尘暴天气, 干对流的产生和沙尘的卷入使能量交换不稳定能量释放, 使该层大气趋于中性层结即混合层。混合层可能是在高低层温度平流差异形成热力不稳定和干对流 (沙尘暴) 产生不稳定能量释放之间的一个平衡态。可见对流层中低层冷平流的强度、位置和层次, 一定程度上影响着混合层的厚度和沙尘暴的强度。

(3) 通过对本次沙尘暴过程地面微气象要素和沙尘暴检测资料的分析, 可以更详细的了解沙尘暴强度和气象要素的演变细节。本次沙尘暴天气是发生在剧烈降温, 相对湿度骤降到 10% 左右, 西北风加强并持续的时段中。在整个过程中, 沙尘暴强度随时间的变化较大, 与风速的相关较好, 阵风的波动变化影响了沙尘暴强度的波动变化。

(4) 对粒子散射系数的观测分析表明: 本次过程中东胜站的粒子散射系数变化趋势和 PM10 浓度的非常一致, 沙尘暴强度时, 散射系数基本达到 1000 Mm^{-1} 以上; 强沙尘暴强度时, 散射系数基本在 2000 Mm^{-1} 以上。

参考文献 (References)

Carlson T N, Prospero J M. 1972. The large-scale movement of Saharan air outbreak over the northern equatorial Atlantic [J]. J. Appl. Meteor., 11: 283-297.
Gamo M. 1996. Thickness of dry convection and large-scale subsidence above deserts [J]. Bound.-Layer Meteor., 79: 265-278.
胡隐樵, 光田宁. 1996. 强沙尘暴微气象特征和局地触发机制

[J]. 大气科学, 21 (5): 1582-1589. Hu Yinqiao, Guang Tian-ning. 1996. Micrometeorological characteristics and local triggering mechanism of strong dust storm [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 21 (5): 1582-1589.
胡泽勇, 黄荣辉, 卫国安. 2002. 2000 年 6 月 4 日沙尘暴过程过境时敦煌地面气象要素及地表能量平衡特征变化 [J]. 大气科学, 26 (1): 1-8. Hu Zeyong, Huang Ronghui, Wei Guoan. 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 Chinese), 26 (1): 1-8.
姜学恭, 沈建国. 2006. 内蒙古两类持续型沙尘暴的天气特征 [J]. 气候与环境研究, 11 (6): 702-711. Jiang Xuegong, Shen Janguo. 2006. The characteristic of weather factors in two types of sustained dust storm in Inner Mongolia [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (6): 702-711
Pauley P M, Baker N L, Barker E H. 1996. An observational study of the "interstate 5" dust storm case [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77: 693-719.
钱正安, 宋敏红, 李万元. 2002. 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, 22 (2): 106-111. Qian Zheng'an, Shong Minghong, Li Wanyuan. 2002. Analyses on distributive variation and forecast of sand-dust storms in recent 50 years in North China [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 22 (2): 106-111.
钱正安, 蔡英, 刘景涛. 2004. 中国北方沙尘暴研究若干进展 [J]. 干旱区资源与环境, 18 (S1): 1-7. Qian Zheng'an, Cai Ying, Liu Jingtao. 2004. Some advances in dust storm researches in northern China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese), 18 (S1): 1-7.
孙永刚, 孟雪峰, 宋桂英. 2009. 基于定量监测的沙尘暴定量预报方法研究 [J]. 气象, 35 (3): 87-93. Sun Yonggang, Meng Xuefeng, Song Guiying. 2009. Sand storm quantitative forecast method based on quantitative monitoring [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 35 (3): 87-93.
Takemi T. 1999. Structure and evolution of a severe squall line over the arid region in northwest China [J]. Mon. Wea. Rev., 127: 1301-1309.
王式功, 扬德保. 1995. 我国西北地区黑风暴的成因和对策 [J]. 中国沙漠, 15: 19-30. Wang Shigong, Yang Debao. 1995. Study on the formative causes and countermeasures of the catastrophic sandstorm occurred in Northwest China [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 15: 19-30.
叶笃正, 丑纪范, 刘纪远. 2000. 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, 55 (5): 513-521. Ye Duzheng,

- Chou Jifan, Liu Jiuyan. 2000. Causes of sand-stormy weather in northern China and contral measures [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 55 (5): 51–521.
- 尹晓惠. 2009. 我国沙尘天气研究的最新进展与展望 [J]. *中国沙漠*, 29 (4): 728–733. Yin Xiaohui. 2009. Progress and prospect of research on sand-dust weather in China [J]. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 29 (4): 728–733.
- 周秀骥, 徐祥德, 颜鹏. 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 Xiuji, Xu Xiangde, Yan Peng. 2002. Dynamic characteristics of spring sandstorms in 2000? [J]. *Science in China (Ser. D)* (in Chinese), 32 (4): 327–334.