

内蒙古两类持续型沙尘暴的天气特征

姜学恭¹ 沈建国²

1 内蒙古自治区气象台 呼和浩特 010051

2 内蒙古自治区气象局 呼和浩特 010051

摘要 利用观测资料对内蒙古地区两种不同类型的持续型沙尘暴过程进行了对比分析,结果表明:天气系统的稳定少动是这两类沙尘暴在同一地区长时间持续的共同原因。在这2次过程沙尘暴的持续期,大气层结的日变化受到不同程度削弱。主要原因是沙尘气溶胶的辐射反馈效应。在冷锋型沙尘暴过程的持续期,地面风速出现的明显日变化加强了沙尘暴强度的日变化。而在高压底部型沙尘暴过程中,暖平流和中尺度低压辐合抬升产生的对流进一步削弱了层结日变化。这一因素以及期间地面风速的相对稳定使沙尘暴强度未发生明显改变。

关键词 沙尘暴 层结 气旋冷锋

文章编号 1006-9585 (2006) 06-0702-11 **中图分类号** P445 **文献标识码** A

The Characteristic of Weather Factors in Two Types of Sustained Dust Storm in Inner Mongolia

JIANG Xue-Gong¹ and Shen Jan-Guo²

1 Inner Mongolia Meteorological Observatory, Huhhot 010051

2 Inner Mongolia Meteorological Bureau, Huhhot 010051

Abstract By using the observational data, a comparative study on the weather characteristic within the maintaining period of two different types of dust storm was conducted. The result shows that in these two cases the dust storms sustained for two or three days. It is due to the weather influence systems stood or moved slowly. The diurnal change of stratification was minimized in two different degrees. The common reason was the radiation of dust aerosol. In the Cyclone typical case, the intensity of dust storm exhibited an obvious diurnal change owing to the diurnal change of the strength of surface wind speed. In High Bottom case (the dust storm appeared at the bottom of the surface high), the meso-low (under 700 hPa) conducted a key influence on the dust storm through its induced ascending motion. It also contributed to the sustaining of mixed layer. Meanwhile, the surface wind speed also did not changed in the sustaining period of dust storm. And so in the High Bottom case the dust storm maintained with same intensity for more than two days.

Key words dust storm, weather characteristic, atmospheric stratification

1 引言

近些年,沙尘暴的频繁发生引起了世人的广泛关注,研究者对沙尘天气的发生机理、沙尘天

气频繁发生的原因以及沙尘天气的数值预报等进行了深入的研究^[1~5]。在沙尘暴的发生发展过程中,层结条件是一个重要的影响因素。王式功等^[6]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,

收稿日期 2005-02-22 收到, 2006-06-20 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40565003 和科技部社会公益研究专项 2005DIB3J108

作者简介 姜学恭,男,1969年出生,硕士,高级工程师,主要从事数值模拟及沙尘暴研究。E-mail: jiangxuegong@yahoo.com.cn

为旺盛干对流的产生创造了有利条件。钱正安等^[7]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。Takemi^[8]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 等^[9]研究影响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。可见,地面加热导致大气层结稳定度的降低,并为沙尘暴的爆发提供了有利的条件。在强沙尘暴出现之前大气究竟更多地表现为哪种层结形态?则有必要进行进一步的研究。

在沙尘暴发展和维持过程中的层结特点也是一个值得关注的因素。Carlson 等^[10]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(850~500 hPa)维持一等熵混合层。Chen 等^[11]通过数值研究发现,沙尘气溶胶的辐射强迫能够在沙尘层中产生一等熵混合层。而在国内,对于沙尘暴维持阶段的大气层结特征还未特别关注。

大风也对沙尘暴的形成和强度具有重要影响。地面大风导致了沙尘的起尘。人们对导致沙尘起尘的临界地面风速进行了较多的研究。Helgren 等^[12]对撒哈拉沙漠西部沙尘暴过程的分析发现,与起尘过程相关联的平均地面风速为 $10.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而单站的变化范围在 $6.5 \sim 13.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间。然而,对沙尘暴维持阶段的地面大风特点同样很少研究。本文拟对内蒙古地区 2 种不同类型的持续型沙尘暴过程进行对比分析,通过揭示沙尘暴形成和维持阶段的特点进而揭示沙尘暴形成和维持的一些规律。

能够引发沙尘暴的天气系统有多种类型^[13]。其中,中尺度系统主要为干飚线,这类沙尘暴维持时间较短。在天气尺度系统中,冷锋和气旋是最为常见的,气旋型维持时间相对较长。由于气旋型沙尘暴主要出现在气旋冷锋后部^[14],所以冷锋和气旋型沙尘暴具有一定的相似性。另一类维持时间较长的是高压底部偏东风型沙尘暴^[14],虽然出现次数较少,但其天气学特点与常见的冷锋和气旋型具有显著差异。因此,本文选取具有普遍意义的气旋型(2002 年 4 月

6~8 日)以及比较特殊的高压底部偏东风型(1994 年 4 月 6~8 日)为例进行持续性沙尘暴特征的对比研究。

2 气旋冷锋型沙尘暴过程

2.1 环流演变及沙尘暴维持原因

2002 年 4 月 6~8 日沙尘暴过程是一次由蒙古气旋强烈发展引发的强沙尘暴过程,沙尘天气出现内蒙古中西部及东部偏南地区、宁夏、山西、河北北部、辽宁、吉林及黑龙江南部,沙尘暴主要出现在内蒙古中部偏北地区(图略)。4 月 5 日 08 时(北京时,下同),蒙古气旋在阿尔泰—萨彦岭山地东侧形成。23 时,气旋东移加强,气旋冷锋侵入内蒙古引发沙尘天气。6 日 08 时后,气旋强烈发展并在内蒙古中部偏北地区导致强沙尘暴。6 日 20 时,气旋进一步加强,中心位于(48°N , 120°E),而高空槽快速加深并形成切断,之后气旋移速明显变慢,沙尘暴在内蒙古中部偏北地区持续。7 日 20 时后,随着气旋减弱并快速东移,内蒙古中部偏北地区的沙尘天气也逐渐减弱停止。在这次过程中,二连浩特的沙尘天气持续达 2 天之久(6 日 02 时至 8 日 02 时)。

在蒙古气旋型沙尘暴过程中,沙尘天气在同一地点能够维持近 2 天是不多见的。从 4 月 6~7 日平均的海平面气压场(图 1a)可以看到在沙尘天气持续期间气旋中心位于(48°N , 120°E)附近,而沙尘天气发生区域(内蒙古中部偏北地区二连浩特附近)始终位于气旋冷锋后部等压线密集区,这一区域往往对应地面大风区,因而具备了持续引发沙尘天气的条件。从环流演变来看,系统发展使高空槽不断加深,在 300 hPa 以下形成了几乎贯穿整个对流层的切断低涡,这样深厚的系统显然其移速变慢。另外,低涡的移动明显呈现非匀速状态。从 5 日 20 时至 6 日 20 时,700 hPa 的切断低涡中心从(50°N , 107°E)移至(48°N , 119°E),东移 12 个经度;而从 6 日 20 时至 7 日 20 时,低涡中心从(48°N , 119°E)移至(47°N , 123°E),仅东移 4 个经度;之后从 7 日 20 时至 8 日 20 时,低涡中心从(47°N , 123°E)移至(47°N , 130°E),东移 7 个经度。在沙尘天气的发生时段(6 日 02 时至 8 日 02 时)系统移动速

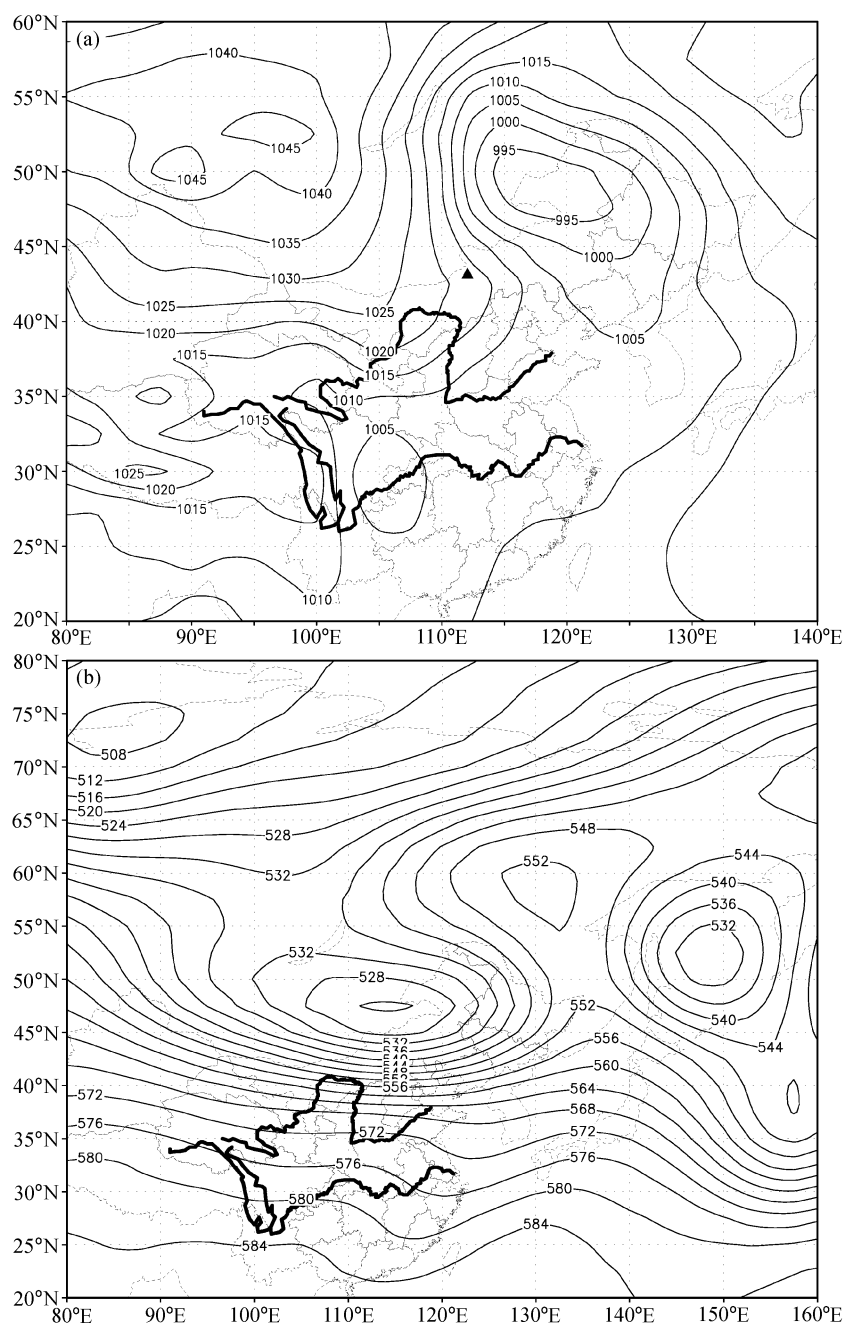


图1 2002年4月6~7日平均的(a)海平面气压场和(b)500 hPa位势高度场(三角为二连浩特)

Fig. 1 The average (a) sea level pressure field and (b) geopotential height at 500 hPa from April 6 to April 7, 2002. The black triangle represents Erenhot station

度是相对较缓慢的。这就导致内蒙古中部偏北地区始终为冷锋后西北气流控制。而系统移动缓慢与高空环流特点有着密切联系。在6日14时形成切断低涡不久,在500 hPa到250 hPa间低涡下游的高压形成类似与阻塞形势的“阻塞”高压(图1b,由于持续时间较短,所以不是严格意义上的

阻塞形势),这一“阻塞”形势持续至7日02时,之后逐渐减弱崩溃,系统移动又逐渐加快。可见,沙尘天气在内蒙古中部偏北地区持续的原因主要是系统旺盛发展,在整个对流层形成深厚的低值系统,导致移动变缓;同时,在对流层中上层形成了类似于“阻塞”的上下游配置,进一步使系

统移动变慢。由于内蒙古中部偏北地区能够提供丰富的沙源, 在长时间受气旋冷锋后部强的西北气流控制的情况下, 产生持续的起沙从而使沙尘天气持续。

2.2 气旋冷锋与地面大风

图 2 为 2002 年 4 月 5~8 日内蒙古中部二连浩特地面气象要素演变。可以看到在 5 日 20~23 时冷锋过境 (出现气压上升、温度下降、风速增大、风向由西南转为西北)。之后至 6 日 08 时, 上述气象要素的变化最为剧烈, 表明为主体冷锋经过。而 6 日 08 之后沙尘天气 2 天多的持续期特征表现为 (仅 7 日 02~05 时能见度大于 10 km): 温度和气压维持, 风向为一致的西北风。从能见度的变化可以看到, 沙尘天气强度在持续期出现明显的波动, 与其他地面气象要素对比, 地面风速的变化与能见度的变化几乎是同步的: 呈现严格的反位相关系, 当风速增大时, 能见度减小, 反之能见度增大。在沙尘天气这一持续期, 由于天气系统的影响是相对稳定的, 因此, 在这种情况下, 沙尘天气强度与地面风速的关系变得更为单纯了。

另外在沙尘天气持续期能见度和地面风速的

波动也可以视为日变化: 在白天地面风速增大, 能见度降低, 沙尘暴增强; 夜间地面风速减小, 能见度增大, 沙尘暴减弱。这一现象揭示了沙尘暴强度演变的一些深层原因, 首先, 地面加热日变化导致的层结日变化对沙尘暴强度具有直接的影响; 此外, 层结日变化表现为日间混合层, 而混合层有利于高空动量下传乃至地面风速增大^[14], 因而迫使沙尘暴表现出明显的日变化。

2.3 层结特征

图 3 为 5 日 08 时至 8 日 08 时二连浩特位温和比湿廓线。图中可以看出: 首先, 在沙尘暴发生前、发展及维持阶段均未出现严格的不稳定层结。其次, 在沙尘暴出现前 (5 日 08~20 时), 早晨为逆温稳定层, 傍晚为地面加热形成的混合层, 表现出明显层结日变化, 这是常态大气的普遍规律。而沙尘暴出现之后的层结特征明显有别于这一规律。在 6 日 08 时至 7 日 20 时沙尘暴加强和持续期间, 混合层始终维持, 即在 6 日 08 时和 7 日 08 时本应出现逆温稳定层的早晨也出现了混合层, 这一事实表明混合层与沙尘暴之间有着一定的伴随关系 (尽管在整个持续期, 混合层表现出一定的高度日变化: 在早晨, 混合层高度在 800 hPa

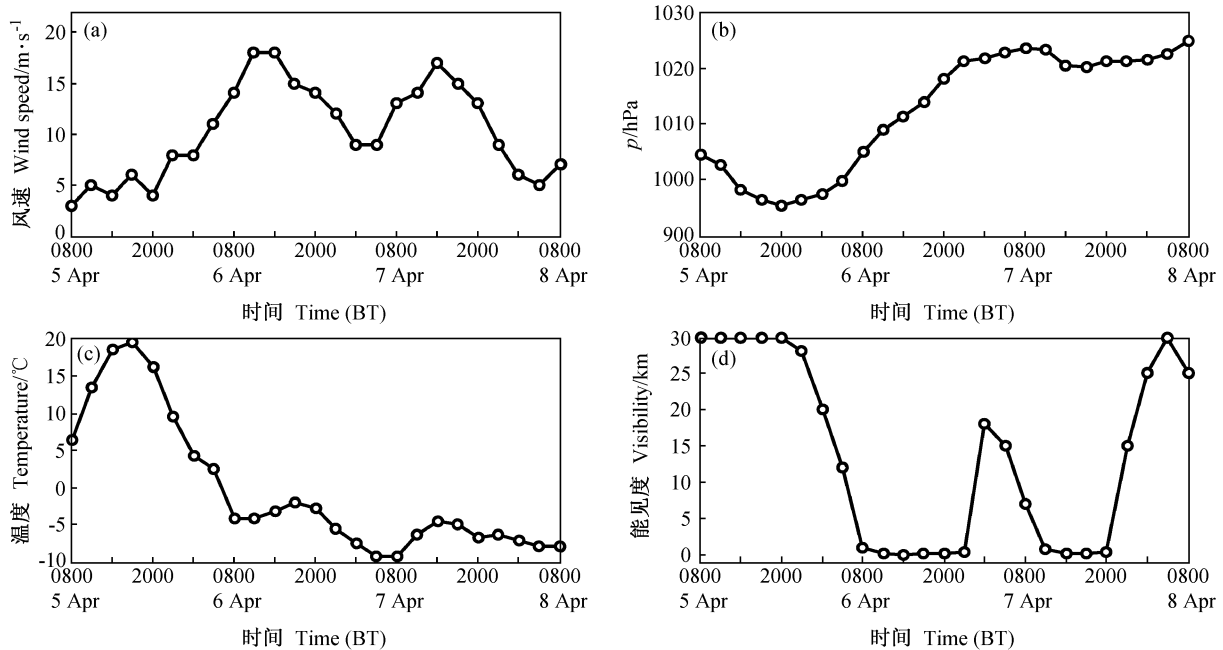


图 2 2002 年 4 月 5~8 日二连浩特地面气象要素演变: (a) 风速; (b) 气压; (c) 温度; (d) 水平能见度

Fig. 2 The temporal changes of surface weather elements at Erenhot station from April 5 to 8, 2002: (a) surface wind speed; (b) pressure; (c) temperature; (d) visibility

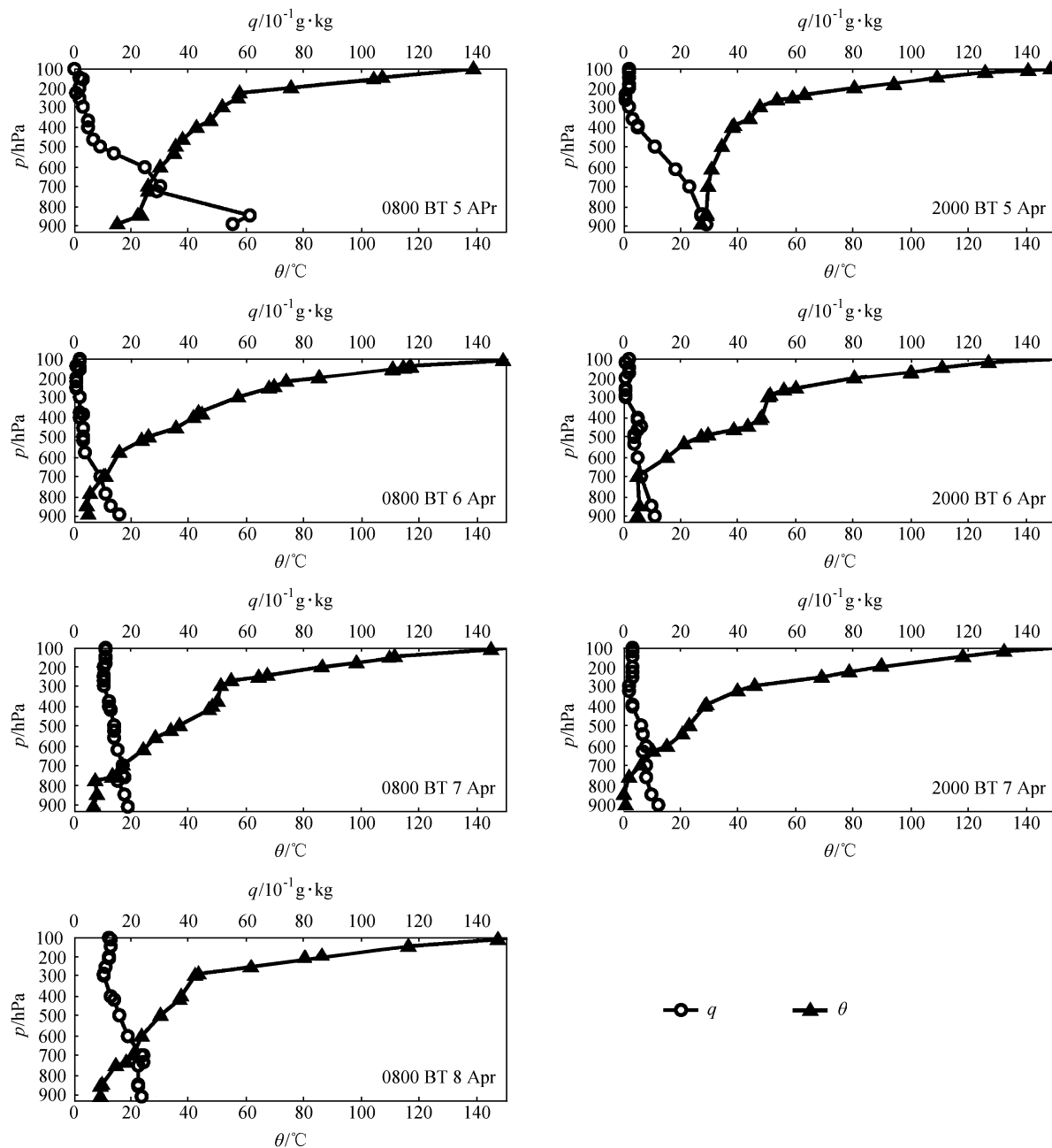
图3 2002年4月5日~8日二连浩特位温(θ)和比湿(q)廓线

Fig. 3 The temperature and special humidity profile at Erenhot station from April 5 to 8, 2002

左右,到傍晚,混合层抬高至700 hPa左右)。同时,沙尘暴强度与混合层的高度表现出相同的变化趋势:在傍晚混合层高度较高时,沙尘暴强度较强,反之强度则较弱。

在沙尘暴发生前,混合层无疑是有利于沙尘暴发生的层结条件^[8,14],但这种关系导致的结果是混合层将先于沙尘暴减弱。在沙尘暴持续期间

出现的混合层与沙尘暴密切伴随的现象(7日20时~8日08时),则表明在沙尘暴形成的同时,产生了一种使混合层维持的机制。而这一机制是存在的,那就是沙尘气溶胶的辐射强迫。Carson等^[15]研究表明,在白天,对于海洋或沙漠下垫面,沙尘气溶胶都将减小向下到达地面的辐射通量,同时增加对大气的加热,从而对大气层结施

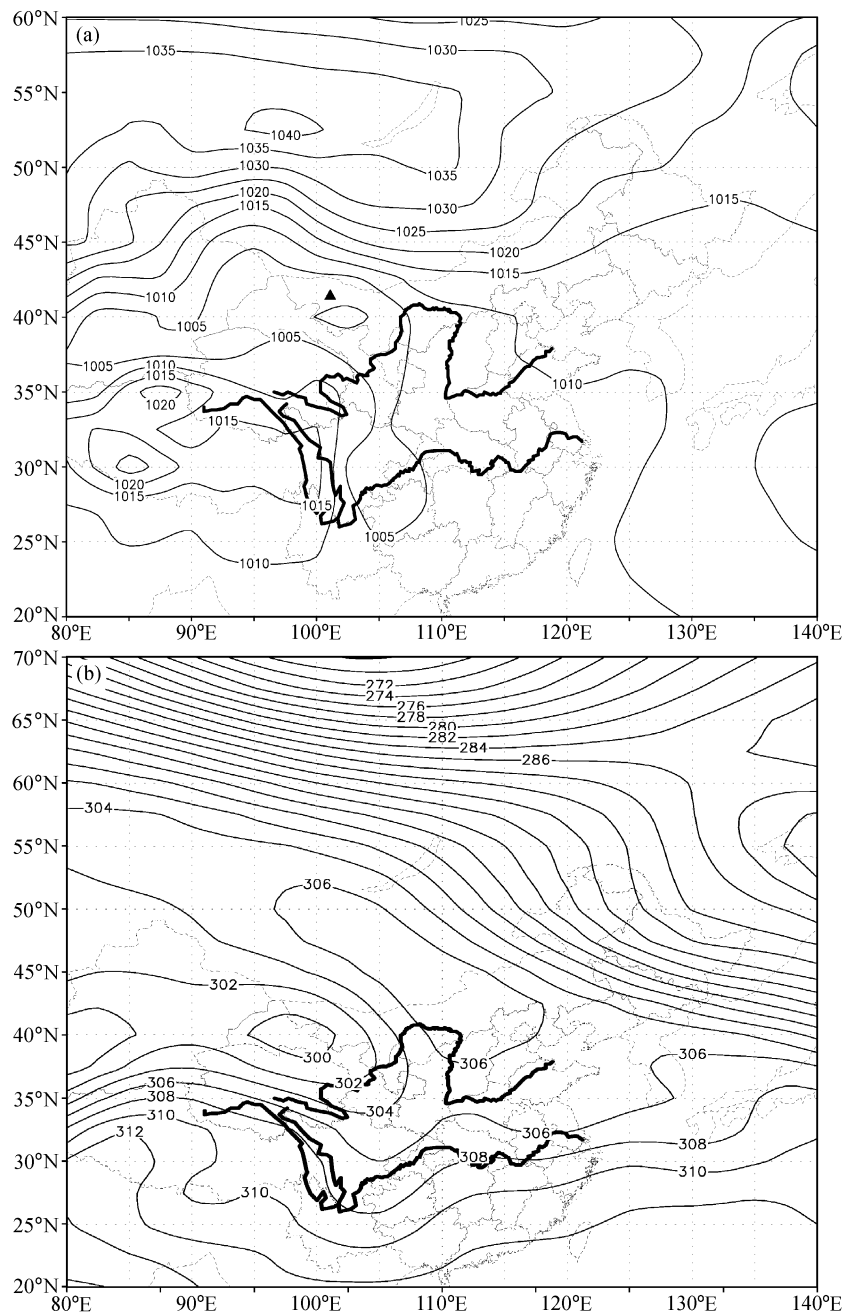


图4 1994年4月6~8日平均的 (a) 海平面气压场 (单位: hPa, 三角代表额济纳旗), (b) 700 hPa 位势高度场 (单位: dagpm)
Fig. 4 The average (a) sea level pressure field (units: hPa, the black triangle represents Ejinaqi station) and (b) geopotential height at 700 hPa (units: dagpm) from April 6 to 8, 1994

加一种稳定化的影响 (stabilizing effect)。同样的道理, 在夜间沙尘气溶胶将减小地面向上释放的辐射通量 (同时将增加大气向上的辐射冷却), 导致的结果是减小夜间逆温稳定的程度。综合来看, 沙尘的辐射强迫将削弱大气层结日变化。对于类似本次过程这样的沙尘暴过程而言, 这一机制显

然有利于混合层的维持。

3 高压底部型

3.1 环流演变及沙尘暴维持原因

1994年4月6~8日高压底部偏东风型沙尘暴

是一种出现次数较少的沙尘暴天气型^[13] (图 4)。4 月 5 日 20 时, 蒙古冷高压位于 (80°E , 54°N) 附近, 之后向东缓慢移动, 其南侧为东西向平直而宽阔的锋区, 而在 40°N 附近有暖倒槽自南向北发展, 从而在地面冷高压与暖倒槽之间的带状区域 ($40\sim 45^{\circ}\text{N}$, $90\sim 115^{\circ}\text{E}$) 形成具有较强气压梯度的准静止锋。期间内蒙古西部偏北地区出现强沙尘暴 (本次过程出现站点较少, 仅在内蒙古西部偏北地区 2~3 个测站出现沙尘天气)。之后直到 8 日 20 时, 由于冷高压移动缓慢, 准静止锋得以稳定维持, 导致在一个狭小区域内沙尘暴一直持续。8 日 20 时后, 暖空气势力减弱, 冷高压加强南下, 准静止锋崩溃导致沙尘暴逐渐减弱停止。

本次过程总的环流特点是在中纬度 ($50\sim 65^{\circ}\text{N}$) 维持一宽广的东西向平直锋区, 而冷空气只在其北侧自西向东移动, 因此使得准静止锋区在 6 到 8 日间能够稳定维持 (图 4a)。在地面准静止锋南侧暖平流导致地面倒槽向北旺盛发展, 从而使得内蒙古西部始终位于地面倒槽顶部。这一低值系统在对流层低层 (700 hPa 以下) 多数时间

表现为中尺度低压形态 (图 4b)。在其下游东北侧是同样由于暖平流导致的沿西北—东南方向伸展的高脊, 该高脊的位置在 6 日 08 时~7 日 08 时之间几乎没有任何变化, 只是到 8 日 08 时才转竖并略有东移。而沙尘天气主要发生在 6 日 14 时至 8 日 08 时。可见, 本次过程沙尘暴在内蒙古西部的持续主要是因为中纬度平直的纬向型环流使得冷空气难以南下形成对准静止锋区的破坏, 同时, 暖平流导致地面倒槽的发展及其下游高脊的稳定维持也为沙尘暴发生提供了动力条件。

3.2 地面风速

本次过程中在整个沙尘暴形成和维持期间, 主导地面风为稳定的偏东风, 这是与常见的沙尘暴天气完全不同的。从图 5 可以看出沙尘暴发生及维持阶段 700 hPa 以下为偏东风, 与沙尘暴区处于中尺度低压的北部是一致的。从内蒙古西部发生强沙尘暴的额济纳旗可以看出 (图 6), 在沙尘暴维持阶段, 出现气压上升、温度下降, 与地面图上锋区的缓慢南压对应。而地面风速演变表现为: 7 日 08 时前沙尘暴发展阶段 (未达到最

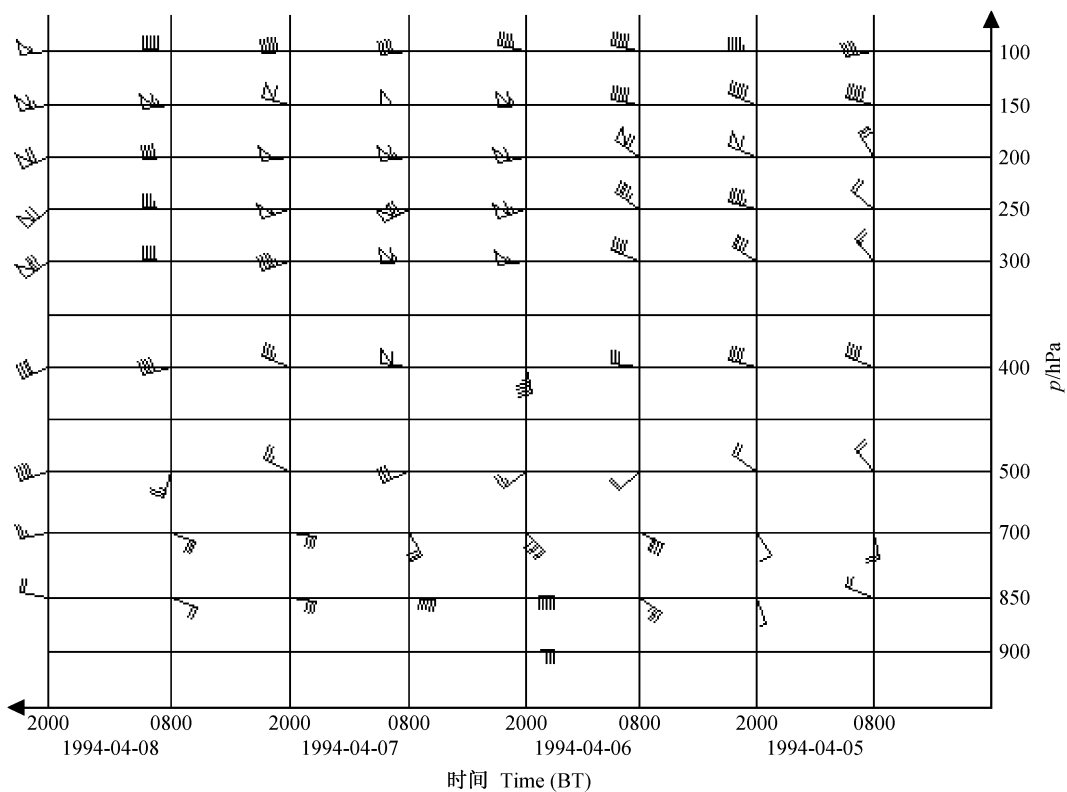


图 5 1994 年 4 月 5~8 日额济纳旗高空测风时间变化

Fig. 5 The temporal variation of aloft wind at Ejin Qi station from April 5 to 8, 1994

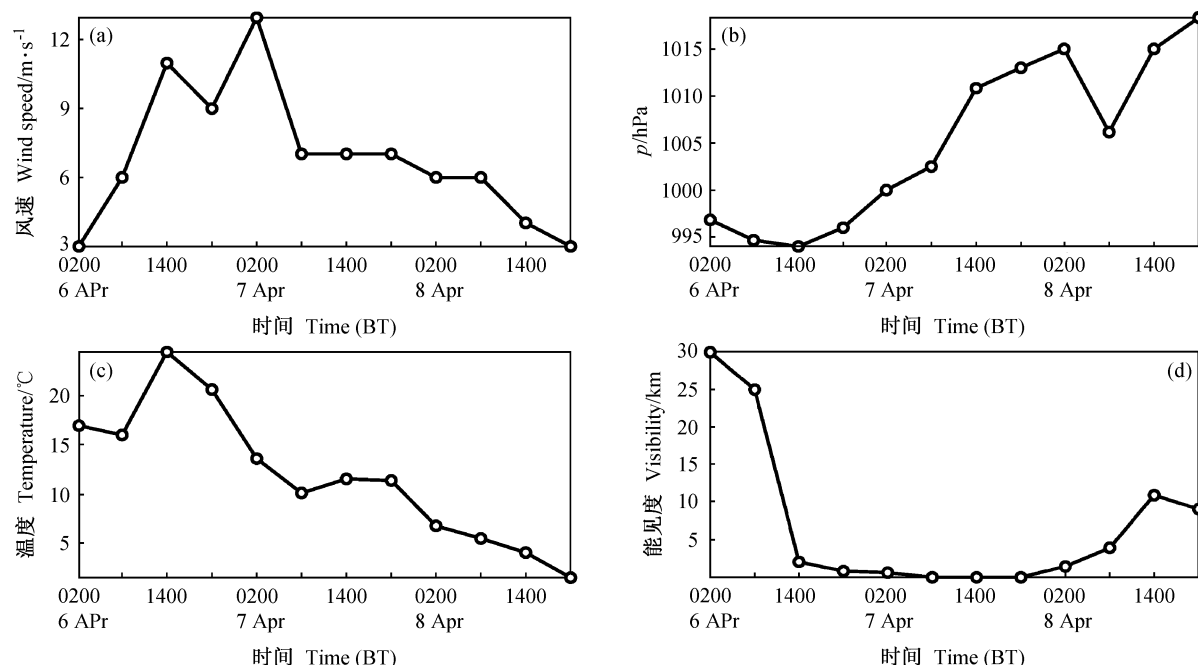


图6 1994年4月6~8日额济纳旗地面气象要素演变: (a) 风速; (b) 气压; (c) 温度; (d) 水平能见度

Fig. 6 The temporal changes of surface weather elements at Ejin Qi station from April 6 to 8, 1994; (a) surface wind speed; (b) pressure; (c) temperature; (d) visibility

强), 地面风速明显增强 ($13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$); 之后在沙尘暴持续增强阶段, 地面风速反而大幅减小, 以至在沙尘暴维持阶段, 地面风速仅维持在 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。整个过程并未表现出沙尘暴强度与地面风速大小的相关关系, 这是一般沙尘暴过程中不常见的。

地面大风是沙尘暴的重要影响因素, 但两者的关系似乎应该从不同的层面考虑。首先, 地面风是沙尘起动的动力因素, 在这一层面, 地面大风是沙尘暴发生的必要条件, 即沙尘暴的发生需要地面风速大于临界风速。其次, 当地面风速大于临界风速时, 地面风速继续增大固然可能导致沙尘暴增强; 但从本次过程的观测事实可以看到, 沙尘暴的增强和强沙尘暴的出现并不一定需要地面风速的增大, 即地面风速增大并不是强沙尘暴出现的必要条件。这也是容易理解的, 因为沙尘暴受到多种因素的影响, 在沙尘顺利实现起动之后, 其进一步增强可以通过其他影响因素的贡献来实现。这与天气影响系统的不同特点有关, 在本次过程中, 沙尘在 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速条件下^[12]实现起动后, 对流层低层的辐合抬升显然可以使强沙尘暴在较长的时间内维持。

3.3 层结特征

图7为1994年4月5~8日额济纳旗位温和比湿廓线。与前一过程类似, 在沙尘暴出现前及发展、维持阶段, 同样未出现严格的不稳定层结。同时, 在6日20时至8日08时, 沙尘暴持续的同时, 混合层也是一直维持的。但这2次过程还是存在三点明显的不同: 首先, 本次过程混合层高度较低(图中显示, 从地面到850 hPa位温和比湿几乎为常数, 显示混合的程度是非常强的), 在850 hPa左右, 而前一过程为700 hPa; 其次, 在沙尘暴持续期间, 本次过程层结日变化明显弱于前一过程。另外, 从图6还可看出这一阶段沙尘暴强度未发生明显的日变化, 而前一过程沙尘暴日变化是明显的。

本次过程中混合层高度低于前一过程, 主要原因是本次过程的影响系统比较浅薄, 仅仅存在于700 hPa以下, 此外也不能排除地形与混合层平流的共同影响^[16~18]: 当气流方向为下坡方向, 则下游地区的混合层高度将被抬高, 与上节沙尘扩展方向为下坡过程不同, 本次过程低层气流基本为上坡过程。而本次过程层结日变化小于前一过程, 是因为本次过程导致混合层维持的因素不

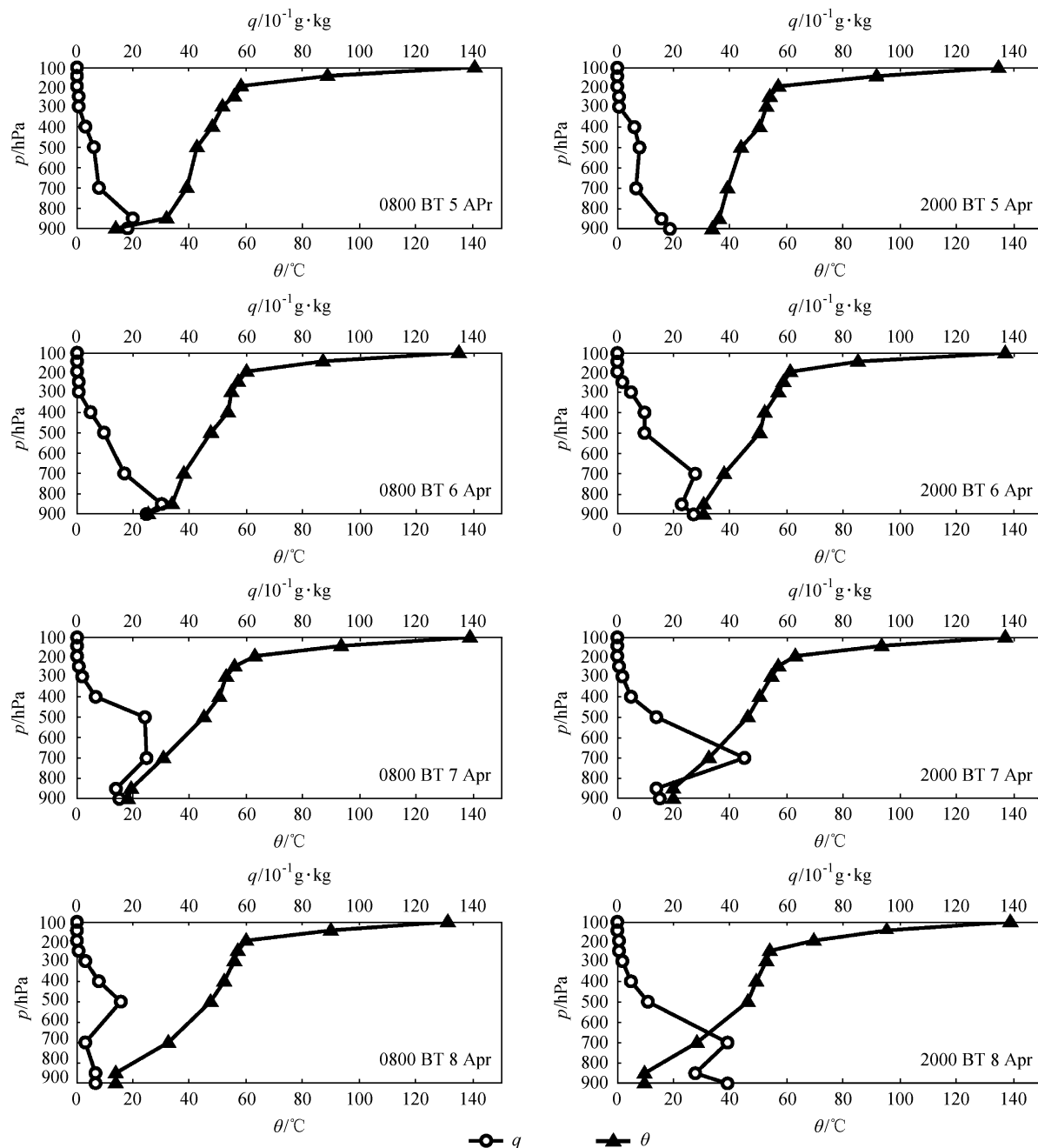


图7 1994年4月5~8日额济纳旗位温(θ)和比湿(q)廓线

Fig. 7 The temperature and special humidity profile at Ejina Qi station from April 5 to 8, 1994

仅包括沙尘气溶胶的辐射强迫,同时,地面倒槽的旺盛发展必然与对流层低层的暖平流对应,而对流层低层中尺度低压的存在将导致辐合上升,这两种因素都将有利于垂直对流的产生,进而使大气层结形态表现为混合层形态。因此,本次过程存在两种使混合层维持的机制。而前一过程中只存在前一种使混合层维持的机制,这是因为该

过程中沙尘暴区位于气旋冷锋之后,为下沉运动区(诊断分析表明前一过程沙尘暴区为下沉区,而本次过程为上升区,图略),下沉运动显然不能使混合层维持。

本次过程沙尘暴强度未发生明显日变化的原因是影响沙尘暴的因素都没有日变化,这里最主要是暖平流及中尺度低压产生的辐合抬升是相对

稳定的, 另外, 对沙尘暴具有重要影响的地面风速保持稳定, 其大小既大于临界风速, 而又未出现波动, 因此, 不会对沙尘暴强度造成影响。另外, 影响沙尘暴的层结因素也未出现日变化。这些因素共同作用使沙尘暴强度未出现日变化。而前一过程影响沙尘暴强度的因素不包含辐合抬升, 尽管层结因素的日变化受到部分削弱, 但对沙尘暴强度具有重要影响的地面风速却呈现明显的日变化, 从而导致沙尘暴强度出现与其几乎同步的日变化。这一现象也说明在影响沙尘暴强度的其他因素保持相对稳定的情况下, 地面风速与沙尘暴强度的同步变化突显出了它们之间较为纯粹的相关关系。

4 结论

本文利用观测资料对内蒙古地区两种不同类型沙尘暴过程进行了对比分析, 结果表明:

(1) 在蒙古气旋型沙尘暴过程中蒙古气旋表现出不均匀的移速, 在其缓慢移动期间沙源区始终位于气旋冷锋后部强西北气流控制的区域, 从而导致沙尘暴在这一地区持续。而导致其移速缓慢的原因是系统的旺盛发展以及形成了类似“阻塞”的上下游配置。

(2) 在高压底部型沙尘暴过程中, 平直的纬向型环流为准静止锋区和沙尘暴的维持提供了适宜的条件; 同时, 暖平流导致地面倒槽和对流层低层中尺度低压旺盛发展为沙尘暴发生提供了动力条件。

(3) 在两类沙尘暴过程的持续期, 常态大气条件下的层结日变化受到不同程度的削弱。它们共同的影响因素是沙尘气溶胶的辐射强迫效应。这一强迫将同时削弱白天的层结不稳定性及夜间的层结稳定度。

(4) 在冷锋型沙尘暴过程的持续期, 层结日变化被削弱的程度较小, 同时, 地面风速出现很强的日变化, 从而导致沙尘暴呈现与地面风速一致的强度日变化。

(5) 在高压底部型沙尘暴过程中, 层结日变化基本被消除。这是因为暖平流和中尺度低压产生的辐合上升和对流对大气施加了另外一种使混合层维持的机制。

(6) 在高压底部型沙尘暴的持续期, 影响沙尘暴强度的一些因素, 包括地面风速、辐合抬升及层结均未发生明显变化, 因而沙尘暴强度也未发生明显变化。

参考文献 (References)

- [1] 吴晓京, 郑新江, 李小龙, 等. 东亚春季沙尘天气的卫星云图特征分析和分型. 气候与环境研究, 2004, **9** (1): 1~13
Wu Xiaojing, Zheng Xinjiang, Li Xiaolong, et al. The analysis and classification of the satellite cloud picture characteristic on eastern Asia dusty weather. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (1): 1~13
- [2] 孙建华, 赵琳娜, 赵思雄. 一个适用于我国北方的沙尘暴天气数值预测系统及其应用试验. 气候与环境研究, 2003, **8** (2): 125~142
Sun Jianhua, Zhao Linna, Zhao Sixiong. An integrated numerical modeling system of dust storm suitable to north china and its applications. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8** (2): 125~142
- [3] 邵亚平. 沙尘天气的数值预报. 气候与环境研究, 2004, **9** (1): 127~138
Shao Yaping. The numerical prediction of dusty weather. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (1): 127~138
- [4] 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** (1): 14~23
Zheng Xinjiang, Yang Yiwen, Li Yun. The analysis on some characteristic of dusty weather in Beijing. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (1): 14~23
- [5] 刘景涛, 郑新江, 康玲, 等. 蒙古气旋爆发性发展导致的强沙尘暴个例研究. 气候与环境研究, 2003, **8** (2): 218~229
Liu Jingtao, Zheng Xinjiang, Kang Ling et al. A case study of a severe dust storm resulted from a explosive Mongolia cyclone. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8** (2): 218~229
- [6] 王式功, 杨德保. 我国西北地区黑风暴的成因和对策. 中国沙漠, 1995, **15**: 19~30
Wang Shigong, Yang Debao. The cause and countermeasure on the black storm of North-West China. *Chinese Desert* (in Chinese), 1995, **15**: 19~30
- [7] 钱正安, 蔡英, 刘景涛. 中国北方沙尘暴研究若干问题. 沙尘暴学术研讨会文集. 台湾: 台湾蒙藏委员会出版, 2002. 63~76
Qian Zheng'an, Cai Ying, Liu Jingtao. Some advances in

- dust storm research in northern China. *The Workshop Corpus on Dust Storm Research* (in Chinese). Taiwan: The Taiwan Mongolia-Tibet Committee Press, 2002. 63~76
- [8] Takemi T. Structure and evolution of a severe squall line over the arid region in northwest China. *Mon. Wea. Rev.*, 1999, **127**: 1301~1309
- [9] Pauley P M, Baker N L, Barker E H. An observational study of the "interstate 5" dust storm case. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**: 693~719
- [10] Carlson T N, Prospero J M. The large-scale movement of Saharan air outbreak over the northern equatorial Atlantic. *J. Appl. Meteor.*, 1972, **11**: 283~297
- [11] Chen S J, Kuo Y H. The effect of dust radiative heating on low-level frontogenesis. *J. Atmos. Sci.*, 1995, **52**: 1414~1420
- [12] Helgren D M, Prospero J M. Wind velocities associated with dust deflation events in the western Sahara. *J. Appl. Meteor.*, 1987, **26**: 1147~1151
- [13] 刘景涛, 钱正安, 姜学恭, 等. 中国北方特强沙尘暴的天气系统类型分析. 高原气象, 2004, **23** (4): 540~548
Liu Jingtao, Qian Zhengan, Jiang Xuegong, et al. The analysis of the classification on the weather systems causing the severe dust storm in north China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (4): 540~548
- [14] 姜学恭, 沈建国, 刘景涛, 等. 导致一例强沙尘暴的若干天气因素的观测和模拟研究. 气象学报, 2003, **61** (5): 606~620
Jiang Xuegong, Shen Jianguo, Liu Jingtao, et al. Observational and numerical simulation study of some weather factors leading a severe dust storm. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (5): 606~620
- [15] Carlson T N, Benjamin S G. Radiative heating rates for Saharan dust. *J. Atmos. Sci.*, 1980, **37**: 193~213
- [16] Stull R B. 边界层气象学导论. 见: 徐静琦, 杨殿荣 译. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1991. 1~457
Stull R B. *The Introduction of the Boundary Meteorology* (in Chinese). Xu Jingqi, Yang Dianrong translation. Qingdao: Qingdao Ocean Institute Press, 1991. 1~457
- [17] Arritt R W, Wilczak J M, Young G M. Observations and numerical modeling of an elevated mixed layer. *Mon. Wea. Rev.*, 1992, **120**: 2869~2880
- [18] Carlson T N, Benjamin S G, Forbes G S. Elevated mixed layer in the regional severe storm environment: Conceptual model and case studies. *Mon. Wea. Rev.*, 1983, **111**: 1453~1473