

孙永刚, 孟雪峰, 荀学义, 等. 2014. 温度平流在沙尘暴和大风天气预报中的差异分析. 气象, 40(11):1302-1307.

温度平流在沙尘暴和大风天气预报中的差异分析^{*}

孙永刚 孟雪峰 荀学义 袁慧敏 仲夏

内蒙古自治区气象台, 呼和浩特 010051

提 要: 针对内蒙古沙尘暴天气中大气层结稳定度问题, 选取了内蒙古强沙尘暴、大风(以大风为主部分地区伴有扬沙天气)两种天气过程, 对冷空气活动的温度平流空间分布特征进行对比分析。分析结果表明: 沙尘暴、大风天气都有较强的冷平流活动, 但强冷平流的垂直分布明显不同, 其对大气层结稳定度、温度垂直廓线、垂直运动分布有明显影响。沙尘暴天气强冷平流中心位于较高的 700~600 hPa 层次, 其与近地层弱冷平流叠加, 形成高低层温度平流差异, 使得垂直气温直减率加大并保持这一趋势, 形成有利于沙尘暴发生的深厚不稳定层结条件, 在低层扰动的触发下形成干对流风暴, 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, 混合层是能量交换的一个平衡态; 大风天气强冷平流中心位于较低的 850 hPa 以下层次, 不利于形成不稳定层结条件。沙尘暴扬起的高度就是混合层厚度, 比强冷平流中心位置高出 150 hPa 左右, 强度达到 $-45 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的强冷平流中心在 700~600 hPa 层次时, 混合层厚度可达到 500 hPa 以上层次, 这一强度的沙尘暴天气可以影响到我国江南沿海地区。

关键词: 温度平流, 沙尘暴, 大气层结, 混合层

中图分类号: P404, P458

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.11.002

Difference Analysis of Temperature Advection in Severe Sandstorm and Strong Wind Prediction

SUN Yonggang MENG Xuefeng XUN Xueyi YUAN Huimin ZHONG Xia

Inner Mongolia Autonomous Region Meteorological Observatory, Hohhot 010051

Abstract: Based on two processes of the severe sandstorm and the strong wind with dust, this study on spatial distribution characteristics of temperature advection aims at the atmospheric stratification in Inner Mongolia. The results show that during the sandstorm and high wind processes cold advections are stronger than normal, but have different vertical distribution characteristics. The strong cold advections have significant impacts on atmospheric stratification stabilities, vertical temperature profiles and vertical movements. The center of the strong cold advection exists in the higher layer from 700 hPa to 600 hPa, overlapping the weak cold advection in the near-surface layer, forming temperature advection differences between higher and lower levels, and increasing vertical temperature lapse rate, which is favorable for the formation of the deep unstable stratification in the sandstorm processes. After the unstable energy is released in the process of the dry convective windstorm formation, the atmosphere stratification tends to become neutral or mixed layer, where the energy exchange is in an equilibrium state. In high wind process, strong cold advection center is located in the lower level of 850 hPa, which is not conducive to the formation of unstable stratification. The mixing layer height is consistent with the sandstorm height, whose location is about 150 hPa higher than the strong cold advection center, when the strong cold advection center ($-45 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) is in the 700—600 hPa level and the thickness of the mixing layer gets to 500 hPa or higher. This sandstorm weather process with such intensity can influence the south of the Yangtze River and the

* 国家自然科学基金项目(41365003 和 41265004)共同资助

2014 年 3 月 21 日收稿; 2014 年 5 月 4 日收修定稿

第一作者: 孙永刚, 主要从事内蒙古灾害性天气研究与预报. Email: sunyonggang5522@163.com

coastal areas of China.

Key words: temperature advection, sandstorm, atmospheric stratification, mixing layer

引 言

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。每年春季我国西北地区在特定的气候背景和天气形势下,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。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,学者们从观测分析研究(张强等,2004;岳平等,2008a;2008b)、天气气候特征统计分析(Gamo,1996;叶笃正等,2000;周秀骥等,2002;钱正安等,2002;尹晓惠,2009)、成因分析与预报技术(胡隐樵等,1996a;孙永刚等,2009;张金艳等,2010;贺哲,2012)、数值模拟与远程传输(王介民等,1990;左洪超等,1992;张亚妮等,2013;姜学恭等,2014)、沙尘暴期间高空、地面气象要素变化特征分析(胡隐樵等,1996b;胡泽勇等,2002)、沙尘粒子的物理化学特性(王伏村等,2012)、生态环境和气候效应以及辐射强迫(胡隐樵等,1990;张霁琛等,1994)等领域开展了深入研究。

大气层结条件是沙尘暴形成的重要影响因素之一。Carlson等(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(850~500 hPa)维持一等熵混合层。Pauley等(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。Takemi(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。王式功等(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。姜学恭等(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削弱白天的层结不稳定性度 and 夜间的层结稳定性度。孙永刚等(2011)对内蒙古一次强沙尘暴过程综合观测分析表

明,混合层可能是沙尘暴干对流能量释放的一个平衡态,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。因此,沙尘暴发生时深厚混合层形成的原因和条件是什么?在沙尘暴预报中是否可以对沙尘扬起高度进行定量预报?很有必要进行深入的研究。

本文针对沙尘暴天气的大气层结问题,选取了内蒙古强沙尘暴天气过程、大风天气过程(以大风为主部分地区伴有扬沙天气)若干次进行对比分析。对强沙尘暴过程中温度平流对大气层结的影响,混合层形成的原因和条件进行分析,希望揭示内蒙古高原上在同样的大风天气中,为什么有时形成强沙尘暴而有时不会出现明显的沙尘天气,为沙尘暴落区预报提高技术支撑和指标依据。

1 沙尘暴与大风天气中温度平流分布差异

沙尘暴天气是强冷空气活动造成的,在沙尘暴天气过程中温度平流不仅存在并具有明显的分布特征,统计分析结果表明,600 hPa 强冷平流中心控制区与沙尘暴发生区域关系密切。强冷空气活动通常会形成大风、沙尘暴天气,但是两者并非一定同时发生,有时会出现以大风为主的天气,局部地区可能伴有扬沙天气,春季也是如此。为什么同样的大风天气,有时出现沙尘暴而有时没有沙尘暴?我们从温度平流分布的角度对两种天气进行对比分析。2005年4月19日14—20时内蒙古中部地区出现大风,部分地区伴有扬沙天气,强冷平流中心在较低的850 hPa 层,冷平流强度较强,中心达到 $-40 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$,700 hPa 以上各层次冷平流明显偏弱,中心只有 $-20 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。2010年3月19日沙尘暴天气中强冷平流中心位于较高的600 hPa 层次。

为了更清楚地分析大风、沙尘暴天气中温度平流的垂直分布特征,我们对温度平流场制作过冷平流中心的经向和纬向剖面图(图1)。在沙尘暴天气中,冷平流中心强度达到 $-50 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$,中心位于660 hPa 的较高位置,冷平流中心及其前部与近地层之间等值线密集,表明其存在较大的温度平流差异,最大温度平流差达到 $20 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$,温

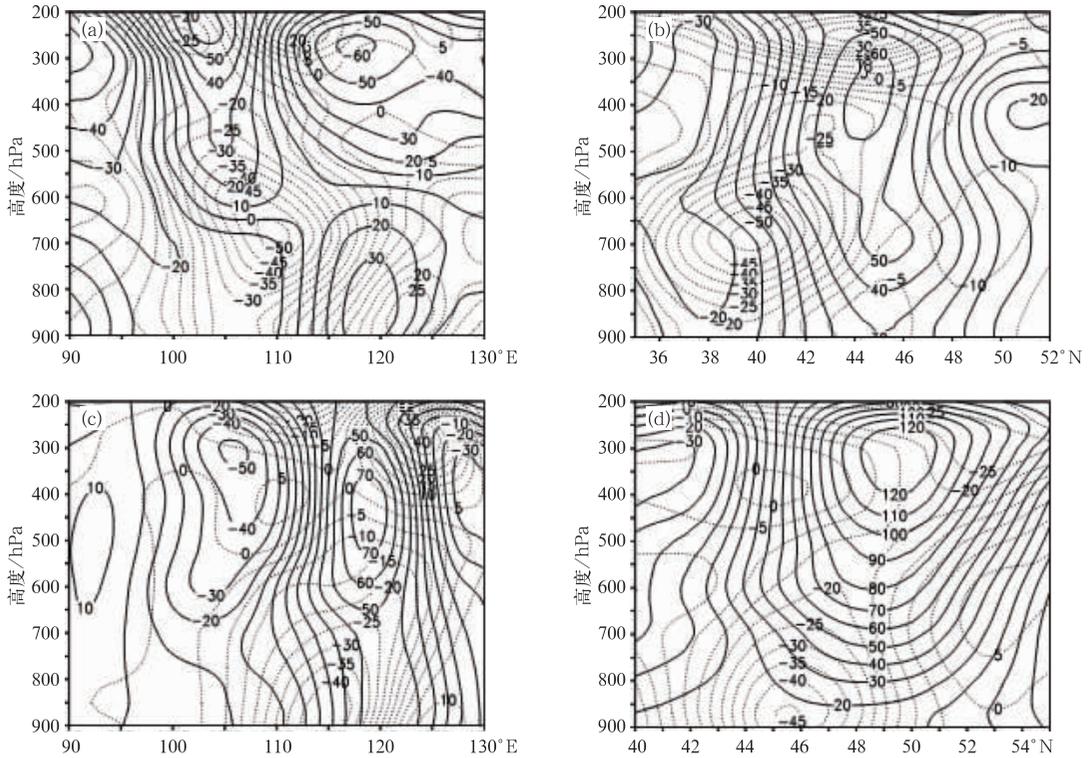


图 1 2010 年 3 月 19 日 14 时沿 41°N(a)、110°E(b)和 2005 年 4 月 13 日 14 时沿 45°N(c)、115°E(d)温度平流(点线,单位: $10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)和涡度(实线,单位: 10^{-5} s^{-1})剖面图

Fig.1 The vertical cross section of temperature advection (dotted lines, unit: $10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) and vorticity (solid lines, unit: 10^{-5} s^{-1}) along 41°N (a), 110°E (b) for 14:00 BT 19 March 2010 and along 45°N (c), 115°E (d) for 14:00 BT 13 April 2005

度平流差异大值区域可达 5~10 经纬度。大风天气中,冷平流中心强度较强,但中心位于 850 hPa 以下的较低位置,冷平流中心基本位于近地层,与近地层之间没有明显的温度平流差异。可见,大风、沙尘暴两类天气温度平流的垂直分布特征差异明显。

普查了 19730401、19740423、19760420、19790411、19800418、20010406、20020406、20060309、20100319 共 9 次典型强沙尘暴天气过程和 20030410、20040504、20050413、20070503、20100403 共 5 次大风(无沙尘暴)天气过程,强冷平流中心垂直分布见表 1。9 次强沙尘暴天气过程,强冷平流中心都位于 700 hPa

表 1 强冷平流中心垂直分布表

Table 1 The vertical distribution of the strong cold advection centers

层次/hPa	强沙尘暴天气/次	大风天气(无沙尘暴)/次
500	1	
600	5	
700	3	
800		1
850		4

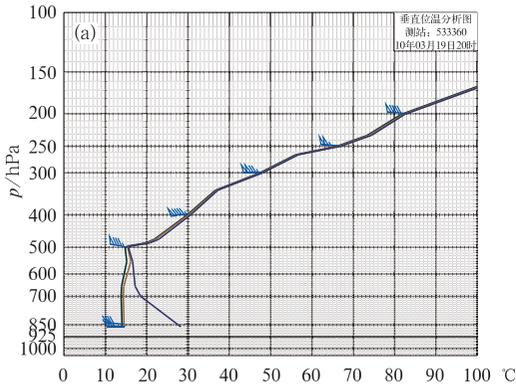
以上的较高位置,5 次大风天气过程,强冷平流中心都位于 850 hPa 以下的较低位置。可见这样特征具有普遍性,对沙尘暴预报意义重大。

2 温度平流垂直分布差异对大气层结的影响

2.1 大气层结稳定度

大气层结稳定性是沙尘暴形成的重要因素,是沙尘暴预报的关键。相关研究表明,边界层内形成深厚的混合层,其厚度有时可达到 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。但在预报中我们常常会发现沙尘暴天气发生前并没有深厚的混合层形成,更多的深厚混合层是与沙尘暴天气同时发生的。在沙尘暴天气中,温度平流垂直分布差异直接影响大气层结稳定性,对流层 700~500 hPa 强冷平流中心的作用,其下层至近地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,形成沙尘暴发生的不稳定层结条件。在低层扰动的触发下形成干对流风暴,产生沙尘暴天气,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,混合层是能量交换的一个平衡态。因此,700~500 hPa 较高的强冷平流中心与其下层的温度平流差异是形成干对流沙尘暴和深厚混合层的根本原因。



从 2010 年 3 月 19 日 20 时强冷平流中心高度与形成的沙尘暴混合层厚度对比分析(图 2),可见,强冷平流中心高度为 650 hPa,其形成的不稳定层结在 650 hPa 以下层,但在能量释放后形成较强干对流,在惯性作用下,其可以突破 650 hPa 达到 500 hPa,在 500 hPa 以下形成混合层,强冷平流中心高度越高,混合层越深厚。因此,通过强冷平流中心高度可以对混合层厚度做出基本的判断和预报。

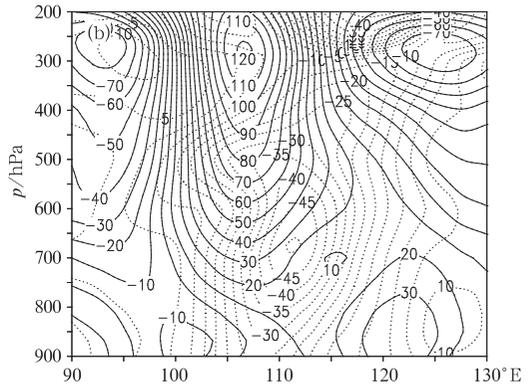


图 2 2010 年 3 月 19 日 20 时(a)乌拉特中旗(53336 站) θ (左)、 θ_{se} (中)、 θ_e (右)垂直分布廓线图
和(b)沿 40°N 温度平流(点线,单位: $10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)、涡度(实线,单位: 10^{-5} s^{-1})剖面图

Fig. 2 The vertical distribution profile of θ (left), θ_{se} (middle), θ_e (right) in Urad Middle Banner (53336) (a) and the vertical cross section of temperature advection (dotted lines, unit: $10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) and vorticity (solid lines, unit: 10^{-5} s^{-1}) along 40°N (b) at 20:00 BT 19 March 2010

2.2 温度垂直廓线

为了进一步说明其影响,对比 2010 年 3 月 19 日沙尘暴与 2010 年 4 月 3 日大风天气过程代表站的温度垂直廓线。从 2010 年 4 月 3 日大风中心代表站二连浩特(53068 站)(图 3a 和 3b)温度垂直廓线可见,08 时大风前,850 hPa 以下存在明显逆温层,地面温度较低,露点线与温度线距离大,整层干燥。20 时大风后,混合层较低达到 730 hPa,整层保持干燥。相比 2010 年 3 月 19 日沙尘暴中心代表站乌拉特中旗(53336 站)(图 3c 和 3d),08 时沙尘暴前,没有逆温层,地面温度较高,低层干燥。20 时大风后,混合层深厚,达到 500 hPa,低层保持干燥。可见,两者主要差别在于,沙尘暴天气发生前地面温度较高,逆温层弱,在较高的冷平流中心作用下,形成了深厚的混合层,是形成沙尘暴的主要原因。而大风天气发生前地面温度较低,有明显的逆温层,冷平流中心较低,不利于形成深厚的混合层,形成大风天气但不利于沙尘在混合层中扬起。

2.3 垂直运动

比较强冷平流中心位置的高低对两类天气发生时的垂直运动的影响可见,2010 年 4 月 3 日 14 时大风天气过程中,大风区($104^\circ \sim 115^\circ \text{E}$)以下沉气流为主,中心强度达 $60 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,上升运动很弱且在 800 hPa 层以下,不利于沙尘扬起(图 4a)。2010 年 3 月 19 日 14 时沙尘暴天气过程中,沙尘暴区域($102^\circ \sim 112^\circ \text{E}$)同样以下沉气流为主,中心强度达 $80 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,但是在下沉区中存在一支较强的上升运动气流,中心强度达 $-20 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,达到 700 hPa 层以上且与上层的上升运动区打通,在下沉气流背景中这支深厚的上升气流有利于沙尘的扬起(图 4b)。

3 沙尘扬起高度及落区分析

沙尘暴天气中沙尘扬起的高度就是混合层高度,通过探空曲线通常可以分析出混合层顶的逆温

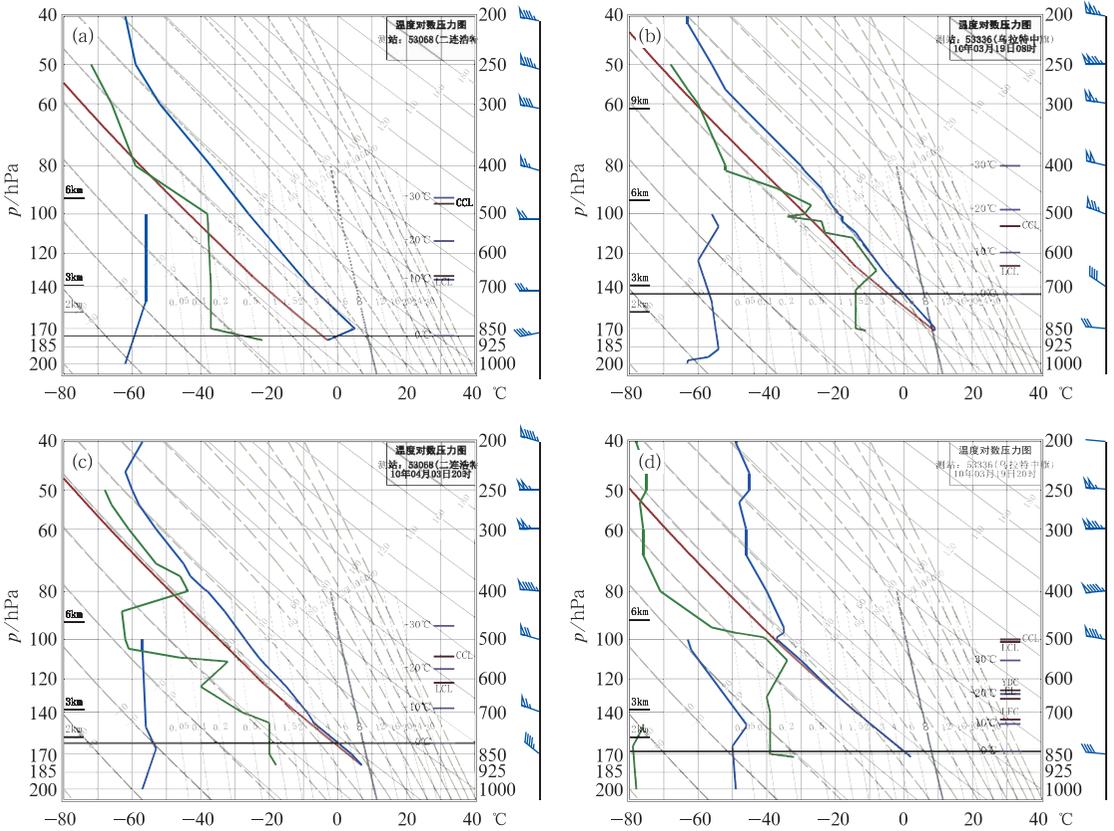


图3 2010年4月3日二连浩特(53068)08时(a)、20时(c)和2010年3月19日
 乌拉特中旗(53336)08时(b)、20时(d)温度对数压力图
 Fig. 3 The T-log p at Erenhot Station (53068) at 08:00 (a), 20:00 (c) BT 3 April 2010
 and at Uras Middle Banner Station (53336) at 08:00 (b), 20:00 (d) BT 19 March 2010

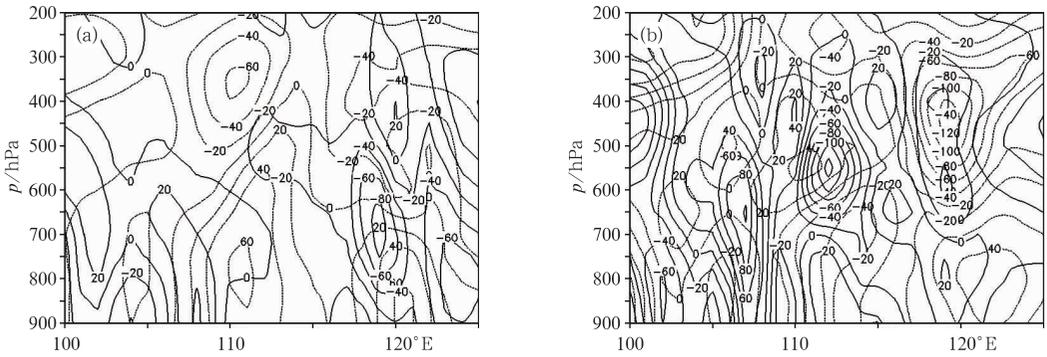


图4 2010年4月3日14时沿44°N(a)和2010年3月19日14时沿41°N(b)垂直速度
 (实线,单位:10⁻² Pa · s⁻¹)和涡度(点线,单位:10⁻⁵ s⁻¹)剖面图
 Fig. 4 The vertical cross section of vertical velocity (solid lines, unit: 10⁻² Pa · s⁻¹) and vorticity
 (dotted lines, unit: 10⁻⁵ s⁻¹) along 44°N (a) at 14:00 BT 3 April 2010
 and along 41°N (b) at 14:00 BT 19 March 2010

层存在,这是扬起的沙尘顶层受太阳辐射作用升温所致,沙尘可以受系统上升气流携带达到更高的平流层,但其浓度要小很多。对强沙尘暴天气统计表明,内蒙古高原上强沙尘暴的混合层厚度达到 600

hPa 以上,其东南下通常可以影响到我国江南沿海地区。即中心值达到 $-45 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的强冷平流中心位置达到 700 hPa 以上,就可以形成强沙尘暴并能够影响到我国江南沿海地区。

沙尘暴落区的预报指标是 700 hPa 强度达到 $-30 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的强冷平流影响地区,强冷平流中心与近地层冷平流差达到 $-15 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,可以确定为沙尘暴发生区域。以上两个指标达到 -45×10^{-3} 和 $-25 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上时,影响区域可以确定为强沙尘暴发生区域。该预报指标在内蒙古沙尘暴预报中应用效果很好,当然,沙尘暴预报还要综合考虑地面积雪等其他因素。

4 结 论

(1) 沙尘暴、大风天气都有较强的冷平流活动,通常中心强度达到 $-40 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,但强冷平流的垂直分布明显不同。沙尘暴天气强冷平流中心位于较高的 700~600 hPa 层次,大风天气强冷平流中心位于较低的 850 hPa 以下层次。强冷平流中心位置高低,对层结稳定度、温度垂直廓线、垂直运动的分布产生影响,对产生沙尘暴和大风天气起到重要作用。

(2) 沙尘暴天气强冷平流中心位于较高的 700~600 hPa 层次,其与近地层弱冷平流叠加,形成高低层温度平流差异,使得垂直气温直减率加大并保持这一趋势,形成有利于沙尘暴发生的深厚不稳定层结条件,在低层扰动的触发下形成干对流风暴,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,混合层是能量交换的一个平衡态。

(3) 沙尘暴扬起的高度就是混合层厚度,比强冷平流中心位置高出 150 hPa 左右,中心强度达到 $-45 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 强冷平流中心在 700~600 hPa 层次时,混合层厚度可达到 500 hPa 以上层次,这一强度的沙尘暴天气可以影响到我国江南沿海地区。

(4) 沙尘暴强度的预报指标当 700 hPa 强冷平流中心强度达到 $-30 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,强冷平流中心与近地层冷平流差达到 $-15 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上时,影响地区可形成沙尘暴天气;当以上两个指标分别达到 -45×10^{-3} 和 $-25 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上时,可形成强沙尘暴天气。

参 考 文 献

贺哲. 2012. 2006 年 3 月末河南一次沙尘暴过程的天气成因分析. 气象, 38(8): 38-48.

胡隐樵, 光田宁. 1996a. 沙尘暴发展与干飏线—黑风暴形成机理的分析. 高原气象, 15(2): 178-185.

胡隐樵, 光田宁. 1996b. 强沙尘暴微气象特征和局地触发机制. 大气科学, 21(5): 1582-1589.

胡隐樵, 奇跃进, 杨选利. 1990. 河西戈壁(化音)小气候和热量平衡特

征的初步分析. 高原气象, 9(2): 113-119.

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. 大气科学, 26(1): 1-8.

姜学恭, 陈受钧, 云静波. 2014. 基于 CALIPSO 资料的沙尘暴过程沙尘垂直结构特征分析. 气象, 40(3): 269-279.

姜学恭, 沈建国. 2006. 内蒙古两类持续型沙尘暴的天气特征. 气候与环境研究, 11(6): 702-711.

钱正安, 蔡英, 刘景涛. 2004. 中国北方沙尘暴研究若干进展. 干旱区资源与环境, 18(S1): 1-7.

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. 中国沙漠, 22(2): 106-111.

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. 气象, 35(3): 87-93.

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. 气候与环境研究, 16(6): 742-752.

王伏村, 许东蓓, 王宝鉴, 等. 2012. 河西走廊一次特强沙尘暴的热力动力特征分析. 气象, 38(8): 56-65.

王介民, 刘晓虎, 祁永强. 1990. 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, 9(2): 120-129.

王式功, 杨德保. 1995. 我国西北地区黑风暴的成因和对策. 中国沙漠, 15(1): 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. 地理学报, 55(5): 513-521.

岳平, 牛生杰, 张强. 2008a. 民勤一次沙尘暴的观测分析. 高原气象, 27(2): 401-407.

岳平, 牛生杰, 张强, 等. 2008b. 春季晴日蒙古高原半干旱荒漠草原地边界层结构的一次观测研究. 高原气象, 27(4): 757-763.

尹晓惠. 2009. 我国沙尘天气研究的最新进展与展望. 中国沙漠, 29(4): 728-733.

张霁琛, 陈家宜, 林雪兰, 等. 1994. 绿洲和戈壁近地层大气湍流结构. 高原气象, 13(3): 68-75.

张金艳, 李勇, 蔡艺宁, 等. 2010. 2006 年春季我国沙尘天气特征及成因分析. 气象, 36(1): 61-67.

张强, 卫国安, 侯平. 2004. 初夏敦煌戈壁大气边界层结构特征的一次观测研究. 高原气象, 23(5): 587-59.

张亚妮, 张碧辉, 宗志平, 等. 2013. 影响北京的一例沙尘天气过程的起沙沉降及输送路径分析. 气象, 39(7): 113-124.

周秀骥, 徐祥德, 颜鹏. 2002. 2000 年春季沙尘暴动力学特征. 中国科学(D辑), 32(4): 327-334.

左洪超, 胡隐樵. 1992. 黑河试验区沙漠和戈壁的总体输送系数. 高原气象, 11(4): 371-380.

Carlson T N, Prospero J M. 1972. The large-scale movement of Saharan air outbreak over the northern equatorial Atlantic. J Appl Meteor, 11: 283-297.

Gamo M. 1996. Thickness of dry convection and large-scale subsidence above deserts. Boundary Layer Meteor, 79: 265-278.

Pauley P M, Baker N L, Barker E H. 1996. An observational study of the "interstate 5" dust storm case. Bull Amer Meteor Soc, 77: 693-719.

Takemi T. 1999. Structure and evolution of a severe squall line over the arid region in northwest China. Mon Wea Rev, 127: 1301-1309.