

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.

# 基于 CALIPSO 资料的沙尘暴过程沙尘 垂直结构特征分析<sup>\* 1</sup>

姜学恭<sup>1</sup> 陈受钧<sup>2</sup> 云静波<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 内蒙古自治区气象台, 呼和浩特 010051

<sup>2</sup> 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871

**提 要:** 综合利用 CALIPSO 星载激光雷达探测资料和 MM5 数值模拟结果, 对 2010 年 3 月 19—22 日强沙尘暴过程不同阶段沙尘垂直分布特征及其动力、热力结构进行了初步分析, 结果发现: 在沙尘暴成熟阶段, 沙尘层分布于 2~9 km (850~250 hPa) 的几乎整个对流层中, 冷锋前抬升和锋后下沉导致的旺盛垂直混合使沙尘呈现相对均匀的垂直分布。在沙尘扩展及远距离传输阶段, 沙尘层明显分为两层, 分别位于对流层低层 (700 hPa 以下) 和对流层中高层 (600~300 hPa)。在沙尘暴各个阶段, 弱风速垂直切变和弱位温、相当位温垂直变化始终与沙尘层配合, 显示沙尘层维持中性混合层, 而两个沙尘层之间则为强风速垂直切变及位温、相当位温锋区。另外, 沙尘暴发展过程中, 高空急流、位涡、比湿等要素均表明出明显的对流顶折叠和高空位涡下传, 且在对流顶较高的区域, 沙尘向上的扩展也较高, 反之则较低。需要指出, 在沙尘暴扩展和远距离传输阶段, 在 40°N 附近, 7~9 km 沿纬向一线, 均出现一小范围孤立沙尘区位于平流层中 (或平流层附近), 表明沙尘暴过程中能够产生沙尘的对流层—平流层输送, 并在平流层中形成持续性的沙尘传输带。这可以成为沙尘气溶胶对流层—平流层输送及其在平流层中传输的一个直接的监测证据。

**关键词:** 沙尘暴, 沙尘, 垂直结构, CALIPSO 资料

**中图分类号:** P44

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.03.002

## Analysis on Characteristics of Vertical Structure of Sand and Dust During Dust Storm Process Based on CALIPSO Data

JIANG Xuegong<sup>1</sup> CHEN Shoujun<sup>2</sup> YUN Jingbo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Inner Mongolia Autonomous Regional Meteorological Observatory, Hohhot 010051

<sup>2</sup> Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

**Abstract:** By using CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) data and MM5 numerical simulation output data, the characteristics of vertical structure of dusty layers and its accompanying dynamic and thermal structure in a severe dust storm which occurred in North China from 19 to 22 March 2010 were studied. The results show that in the mature period of dust storm, the dusty layer distributes almost in the whole troposphere from 2 to 9 km. The vertical mixture caused by the cold frontal uplifting and the sinking after the front induces an uniform distribution of dust particles. After that, during the long distance transportation period of dust, the dusty layer is separated to two layers clearly, located at the lower troposphere (below 700 hPa) and the middle upper troposphere (from 600 to 300 hPa) respectively. In each stage of the dust storm process, the weak vertical change of wind speed, potential and equivalent potential temperature are closely coordinated with the dusty layers, which indicates that the neutral mixed layer maintains in the dusty layer. Between the two dusty layers, the frontal region of

\* 国家自然科学基金项目 (41365003 和 40965005) 共同资助

2013 年 2 月 17 日收稿; 2013 年 9 月 29 日收修定稿

第一作者: 姜学恭, 主要从事数值模拟及沙尘暴研究. Email: jiangxuegong@aliyun.com

potential and equivalent potential temperature appear. Meanwhile, the evident tropopause fold and obvious declining of large potential vorticity appear. According to it, when the tropopause sustains at a higher altitude, the dusty layers are expanded to a higher altitude as well. Otherwise, the dusty layers are lower. It should be noted that in the dust long distance transportation stage, a banding area located at 40°N from 7 km to 9 km appears in the stratosphere, indicating that in this dust storm process, parts of the dust particles are transported from troposphere to stratosphere. And it also forms a persistent dust transportation belt in the stratosphere, so it can be regarded as an observational evidence to prove the troposphere-stratosphere transportation of dust aerosol and the transmission of dust aerosol in stratosphere.

**Key words:** dust storm, dust particles, vertical structure, CALIPSO data

## 引 言

东亚沙尘暴形成于东亚和我国北方沙漠与荒漠化地区,通过沙尘远距离输送对我国大部地区、东亚和西太平洋等地产生严重影响。近年来,研究者对沙尘暴的形成和影响开展了广泛的研究,王伏村等(2012)对河西走廊一次特强沙尘暴过程进行了天气学诊断分析,揭示了地面热通量、动量通量及锋生作用等对沙尘暴发生发展的影响。王丽娟等(2011)对2009年一次强沙尘暴过程的影响系统、沙尘气溶胶浓度特征进行了分析,并研究了沙尘暴过程起沙、远距离传输等特征。郭本军等(2008)利用中韩沙尘暴合作项目的脉冲激光雷达探测资料对2008年一次沙尘暴过程中大连市的沙尘气溶胶垂直分布特征进行了初步分析。郭锐等(2009)则研究探讨了利用MODIS资料进行沙尘暴判识的方法。这些研究对揭示沙尘暴形成机理,指导沙尘暴预报及进行沙尘暴影响的评估等具有一定的指导意义。

沙尘暴过程不仅是大气运动和演变的过程,也是大气与沙尘粒子相互作用的过程。因此,研究沙尘暴发生发展机理及其影响,需要全面地掌握沙尘暴过程中沙尘的运动和演变状态。目前,尽管各类天气监测手段能够对大气运动过程进行较详尽的刻画,但对于沙尘暴过程中沙尘的运动和演变却难以进行全面揭示。例如,沙尘天气的地面观测只能给出地面水平能见度,沙尘气溶胶观测只能给出地面附近沙尘粒子的浓度、大小和类型等特征,卫星遥感则只能给出沙尘层顶部的特征,或整个沙尘层的光学厚度,但对于大气中沙尘的垂直分布特征却难以描绘。这也成为制约深入揭示沙尘暴形成、传输机理的重要因素。

云-气溶胶激光雷达和红外探路者卫星观测

(Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations, CALIPSO)是由NOAA为主开展的结合了激光雷达探测器和红外、可见光成像器的综合卫星观测,能够对全球范围内云、气溶胶的垂直结构和特征进行探测。利用该资料提供的沙尘暴过程中不同阶段的沙尘垂直分布特征,无疑有助于深入揭示沙尘暴发生、演变特征和规律。为此,本文拟针对2010年3月19—22日我国北方一次强沙尘暴过程,利用CALIPSO资料,并结合中尺度模式MM5模拟结果,对沙尘暴不同阶段大气中沙尘垂直分布特征及其动力、热力结构特征进行分析,以期更深入地揭示沙尘暴的发生规律。

## 1 天气过程概述

2010年3月19—20日强沙尘暴过程是一次典型的冷锋型沙尘暴过程。其影响地区包括西北地区大部、内蒙古中西部、华北及东北地区,并在内蒙古达到最强。

从形势场演变来看,3月18日12时(世界时,下同),欧亚大陆维持两槽一脊,欧洲大陆与太平洋西岸为大槽,乌拉尔山地区为高脊,我国北方大部地区受脊前西北气流控制。地面图上,冷高压位于阿尔泰山以西,萨彦岭山地背风坡则有低压形成。19日00时,乌拉尔山高脊向北加强,导致槽前西北气流增强,同时,700 hPa在蒙古国中部形成东北—西南向横槽,引导冷空气向东南方向移动。地面冷锋越过萨彦岭山地,推进至内蒙古西部,并在蒙古南部、内蒙古西部及甘肃北部引发沙尘暴。19日12时(图1),高空横槽自西北向东南方向南压,700 hPa锋区推进至内蒙古中部,等温线和等高线接近垂直,冷平流强盛。地面图上,随着冷高压南压,地面大风大幅增强,平均风力达 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,沙

尘暴天气范围明显增大,海力素出现黑风暴,本次过程沙尘暴也达到最强。20日00时,高空横槽加强并转竖,向东偏南方向移动,推进至东北—华北一线,槽区强冷平流继续维持。地面冷锋则进一步向东偏南方向推进,扬沙和浮尘天气扩展至山西、河北和山东等地。20日12时,高空槽移至朝鲜半岛,并完全转竖,同时,温度槽逼近高度槽,斜压性逐渐减

弱。地面图上,冷锋明显减弱,冷高压南压趋势增强,受高空气流引导,地面低压转向北偏东方向快速移动。沙尘(浮尘)天气则出现在山东、东海及朝鲜半岛等地。21日00时,高度槽闭合形成低涡,斜压性进一步削弱。地面冷高压明显减弱,浮尘天气则扩展至东海东部、日本岛等地。

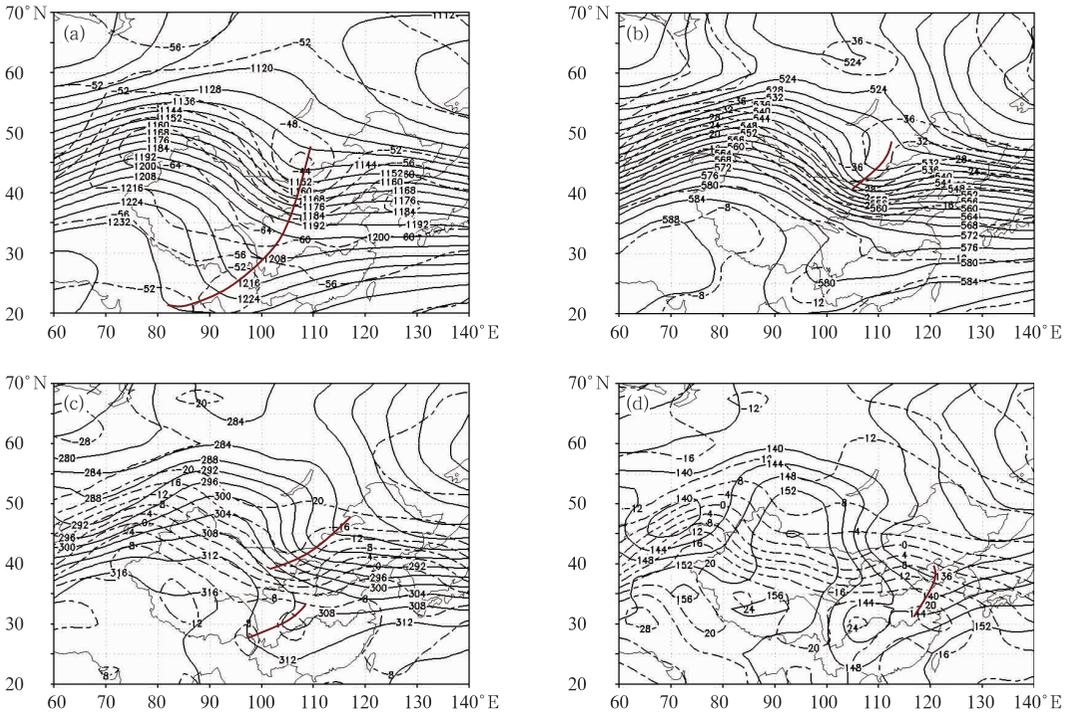


图1 2010年3月19日12时200 hPa(a)、500 hPa(b)、700 hPa(c)和800 hPa(d)位势高度(实线,单位:dagpm)和温度(虚线,单位:℃)(粗实线为槽线)

Fig. 1 The potential height (unit: dagpm) and temperature (unit: °C) at (a) 200 hPa, (b) 500 hPa, (c) 700 hPa, and (d) 850 hPa at 12:00 UTC 19 March 2010

## 2 模式和方案

模拟采用中尺模式 MM5。MM5 多用于对流层天气过程的预报和模拟,但国内外一些研究也利用 MM5 对对流层—平流层输送进行模拟研究,如 Ravetta 等(1999)利用 MM5 成功地模拟了一次对流层顶折叠事件,模拟的对流顶附近的风场、温度场与观测结果较为吻合。杨健等(2003)利用 MM5 对 2000 年春季一次切断低压引发的对流层—平流层交换过程进行了成功的模拟研究。

模拟采用两重网格嵌套,粗网格格点数  $110 \times$

90,中心( $53^{\circ}\text{N}$ 、 $114^{\circ}\text{E}$ ),格距 45 km,细网格格点数  $193 \times 112$ ,格距 15 km,模式层顶 200 hPa,垂直方向为  $32\sigma$  层。采用 Blackadar 高分辨率行星边界层方案和云辐射方案。模式背景场为每日 4 次的  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  NCEP 再分析资料,模拟时段为 2010 年 3 月 19 日 00 时至 22 日 00 时,模拟时间 72 h。

图 2 为 2010 年 3 月 19 日 18 时 NCEP 再分析(实线)及 MM5 模拟(虚线)500 hPa 高度和温度,可以看到,模拟的 500 hPa 低槽位置、强度等与实况较为吻合,特别是  $39^{\circ}\text{N}$  附近的低槽。模拟的 500 hPa 温度槽的位置、强度也与 NCEP 分析场也较为一致。只是在  $57^{\circ}\text{N}$ 、 $125^{\circ}\text{E}$  及  $36^{\circ}\text{N}$ 、 $98^{\circ}\text{E}$  等外围区域

出现一定的模拟偏差。总的来说,模式成功模拟了

天气系统的发展演变过程。

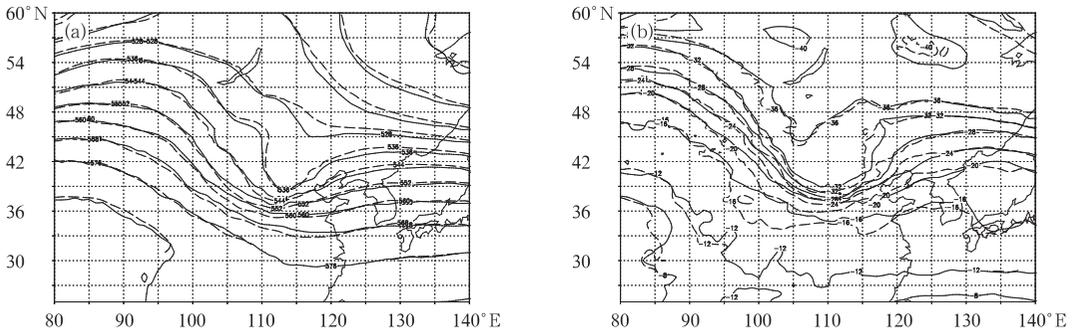


图2 2010年3月19日18时NCEP再分析(实线)及MM5模拟(虚线)500 hPa高度场(a,单位:dagpm,间隔8)和温度场(b,单位:°C,间隔4)

Fig.2 The NCEP reanalysis (solid lines) and modeling (dashed lines) potential height (a, unit: dagpm) and temperature (b, unit: °C) at 500 hPa at 18:00 UTC 19 March 2010

### 3 结果分析

#### 3.1 沙尘暴成熟阶段

携带激光雷达的CALIPSO卫星沿极地轨道运行,即沿经圈过南北两极的轨道对大气进行监测,因此,雷达监测的时间和区域与本次沙尘暴过程所关注的时间和区域并不完全一致。为此,考虑监测的区域并结合本次沙尘暴发生和演变过程,选择2010年3月19日19时、20日18时及21日18时3个时间点雷达监测资料,分别代表沙尘暴不同阶段进行分析。

图3a为CALIPSO的星载激光雷达监测的大气气溶胶类型及其垂直分布,图3b为图3a的局部放大图(下同,并略去原图),图3c为卫星运行轨迹(<http://www-calipso.larc.nasa.gov/>),为了更清楚地看到沙尘垂直分布。可以看到,在 $31^{\circ}\sim 37^{\circ}\text{N}$ 、 $103.8^{\circ}\sim 105.5^{\circ}\text{E}$ ,沙尘区位于 $2\sim 9.5\text{ km}$ 之间,在 $37^{\circ}\text{N}$ 以北, $37^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $105.5^{\circ}\sim 106.5^{\circ}\text{E}$ 范围内,沙尘区位于地面 $2\sim 4\text{ km}$ 的对流层低层,另外,在 $39.3^{\circ}\text{N}$ , $6\sim 7\text{ km}$ 附近有一小范围孤立沙尘区存在。

前文分析表明,本次沙尘暴过程于3月19日12时前后发展成熟并达到最强,19日18时,沙尘暴略向东南方向扩展,但强度较之前6h变化不大,因此,19日19时大体上可以代表沙尘暴成熟阶段。从图4地面图及雷达监测带位置来看,地面低压、高压连线为东南—西北向,监测带大致位于地面冷锋

后部。高空则位于冷槽后部,由于锋区位于 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 之间,呈东西方向,因此,监测带大致垂直穿过高空锋区。

图5为沿图3雷达监测带的垂直剖面图。结合图4可以看到,地面冷锋南支大致位于 $31^{\circ}\text{N}$ 附近,因此,图5a中 $31^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$ 间上升区位于冷锋锋前,下沉区位于冷锋后;而 $35^{\circ}\sim 37^{\circ}\text{N}$ 附近明显有副冷锋存在。对比位势高度,可以看到 $31^{\circ}\sim 37^{\circ}\text{N}$ 、 $103.8^{\circ}\sim 105.5^{\circ}\text{E}$ , $2\sim 9.5\text{ km}$ 范围内的沙尘区,对应于 $700\sim 300\text{ hPa}$ 的整个对流层,锋前、锋后(副冷锋前、锋后),即上升运动区和下沉运动区沙尘浓度差异并不明显。这可能由于冷锋前后上升、下沉运动导致的旺盛垂直混合所致。

另外,在 $37^{\circ}\text{N}$ 以北, $37^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $105.5^{\circ}\sim 106.5^{\circ}\text{E}$ , $2\sim 4\text{ km}$ 高度的沙尘区,对应于 $600\text{ hPa}$ 以下, $700\text{ hPa}$ 为中心的对流层低层。结合图4可以看到,该区域位于地面高压东侧,冷锋为自西偏北向东偏南推进,因此风速明显强于前述向南扩展的一支。向东扩展的沙尘主要位于 $700\text{ hPa}$ ,而向南扩展的沙尘则散步于几乎在整个对流层。其可能形成原因是:冷锋东支所处的 $37^{\circ}\sim 43^{\circ}\text{N}$ 间为西风急流区,由于与强盛西风气流配合,沙尘尚未形成进一步上扬即被西风气流吹走,因此向下游扩展明显,但沙尘垂直上扬不高;而与南支冷锋配合的西风气流较弱,因此沙尘在锋面抬升作用下产生明显的扬尘。

大气位涡源位于极地平流层中,中高纬度低槽、低涡等天气系统的发展加深,伴随高空急流的下落和对流层顶的折叠,常常形成极地平流层高位涡向

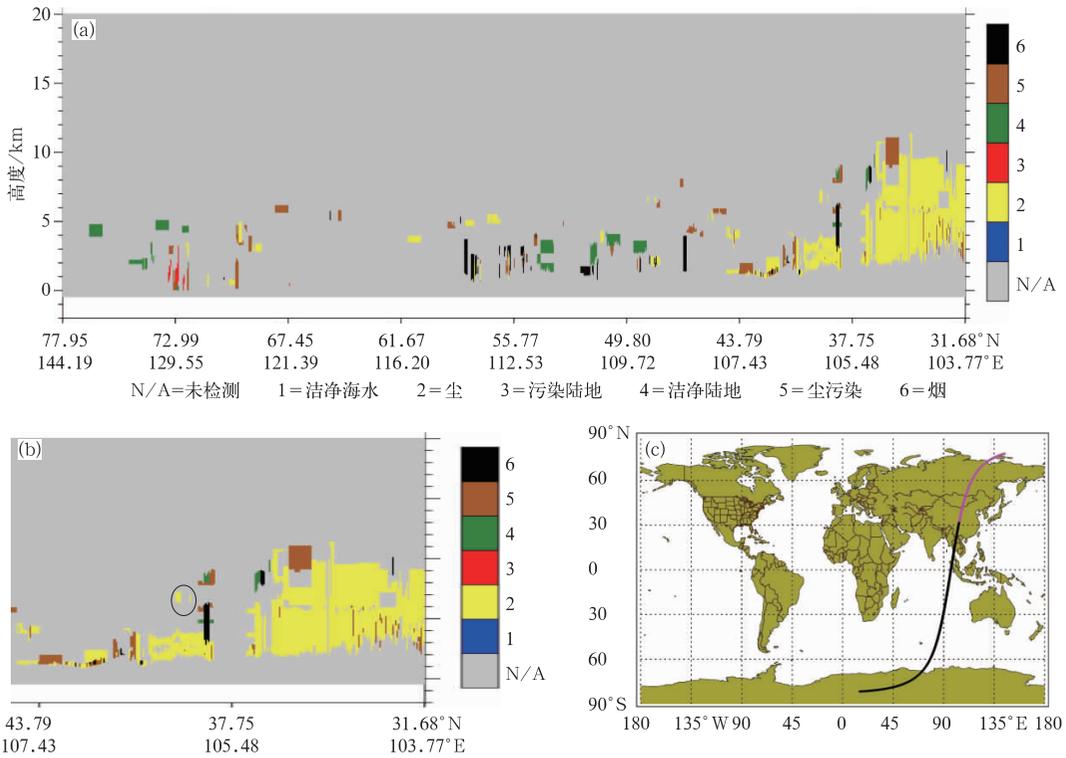


图 3 2010 年 3 月 19 日 19 时 CALIPSO 监测的气溶胶分类和垂直分布(a,b)及卫星运行轨迹(c)  
 Fig. 3 The types and vertical distribution of aerosols (a, b) and the satellite trajectory (c) monitoring by CALIPSO at 19:00 UTC 19 March 2010

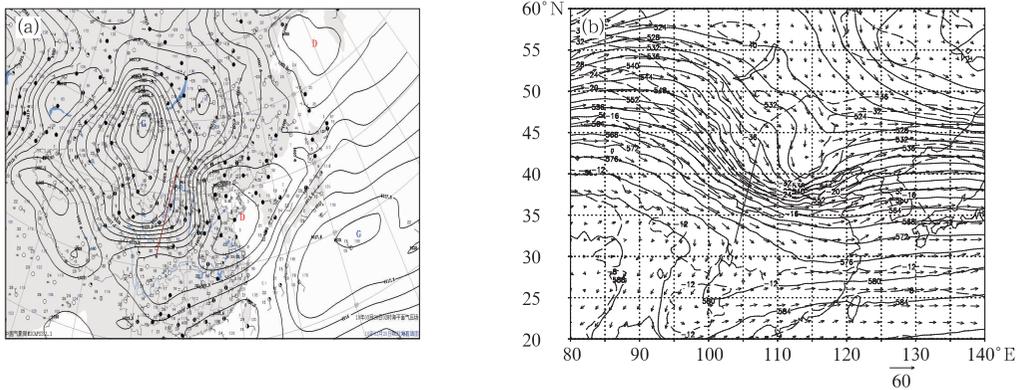


图 4 2010 年 3 月 19 日 18 时地面天气图(a)及 500 hPa 高度场(单位: dagpm)和水平流场(b)  
 (图中实线为雷达监测带)  
 Fig. 4 The surface weather chart (a) and the potential height and flow field at 500 hPa (b) at 18:00 UTC 19 March 2010  
 (The solid straight lines represent the radar monitoring belt)

南、向下的传输,相关研究将位涡为 2 PVU 定义为对流层顶(Andreas et al, 2003)。从图 5b 位涡垂直分布来看,在沙尘主要分布区的 37.5°N 以南,位涡均小于 1 PVU,表明沙尘位于对流层中;而在 37.5°N 以北,对流顶出现了明显的下落,在 37.8°~39.8°N 间下落至 500 hPa(5500 gpm 左右),并与自北向南的倾

斜下沉气流伴随。可见,在对流顶较高的区域,上升运动和垂直混合扩展的高度较高,沙尘区出现的高度也较高(9.5 km, 300 hPa)。而在对流顶明显下落的区域,主体沙尘的高度较低(4 km, 600 hPa)。

需要指出,如前文所述 39.3°N 附近,6~7 km 的微小孤立沙尘区,图 5b 显示该位置对流顶已下落

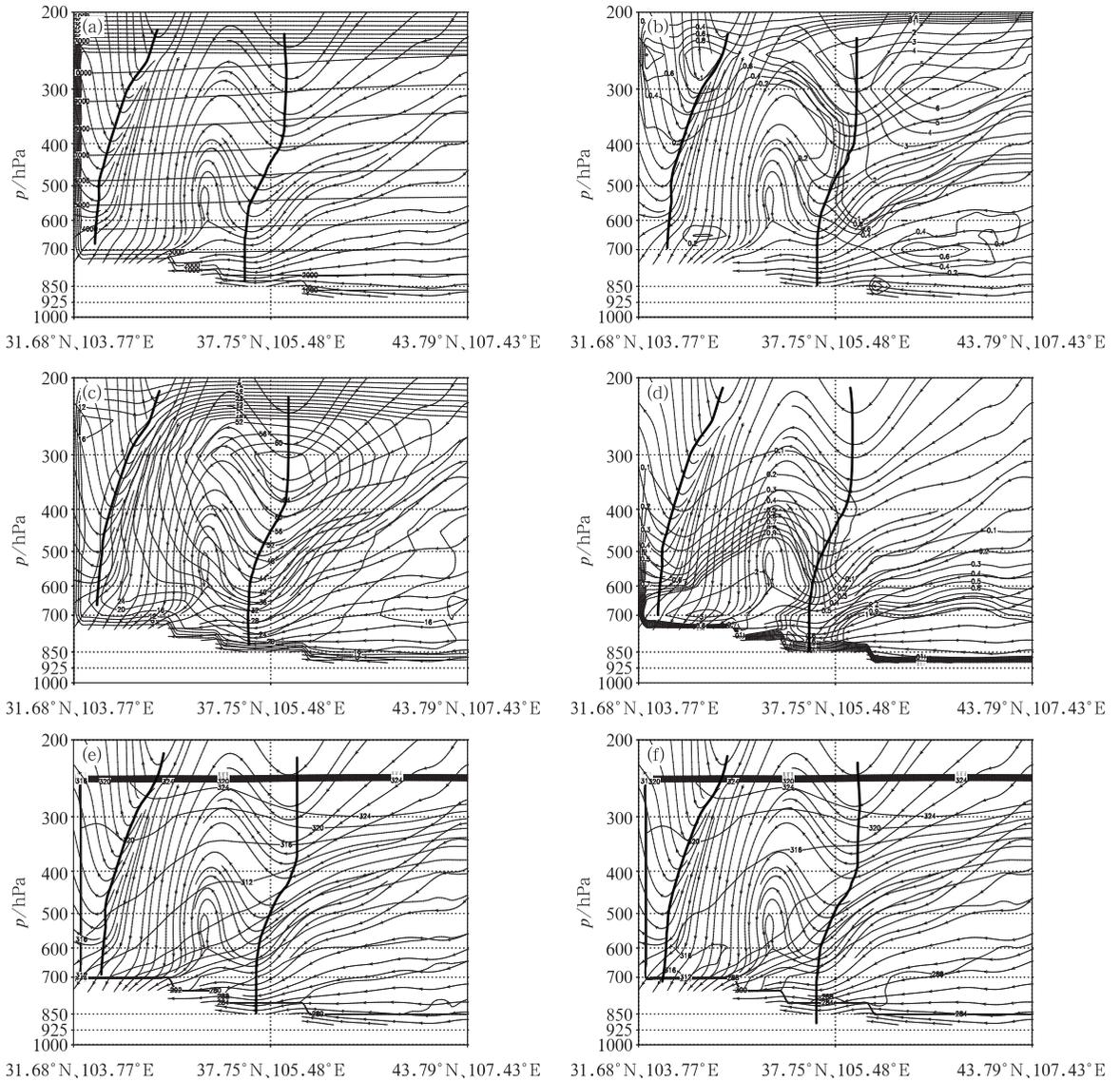


图5 2010年3月19日19时MM5模拟的沿雷达监测带的垂直剖面图

(流场为沿剖面水平风与 $W \times 100$ 合成)

- (a) 位势高度(单位: gpm), (b) 位涡(单位: PVU), (c) 全风速(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  
(d) 混合比(单位:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), (e) 位温(单位: K), (f) 相当位温(单位: K)

Fig. 5 The MM5 modeling cross sections along the radar monitoring at 19:00 UTC 19 March 2010, the stream lines are composited by the horizontal wind and  $W \times 100$

- (a) potential height (unit: gpm), (b) potential vorticity (unit: PVU), (c) horizontal wind speed (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  
(d) mixing ratio (unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), (e) potential temperature (unit: K), (f) equivalent temperature (unit: K)

至500 hPa(5500 gpm左右),可见,该沙尘区位于平流层中,这表明之前曾经发生了沙尘气溶胶的对流层—平流层输送。对于沙尘气溶胶的对流层—平流层输送问题,目前国内外开展的研究尚不是很多, Li等(2012)利用SAGE II气溶胶观测资料通过气候学统计对比,初步验证了东亚沙尘气溶胶在平流层中传输的现象。姜学恭等(2012)利用数值模拟方法对

东亚沙尘气溶胶的对流层—平流层输送问题开展了一些探索性分析研究,但总的来说,对于沙尘气溶胶对流层—平流层输送及沙尘在平流层中的传输还缺乏基于天气监测的直接证据。而上述基于雷达监测的沙尘区位于平流层中的现象,说明本次沙尘暴过程中确实有沙尘在平流层中传输,这无疑是沙尘气溶胶对流层—平流层输送及其在平流层中传输的一

个直接监测证据。考虑到该剖面图为准经向剖面,垂直于剖面的主体气流为自画面流出的偏西气流,因此该孤立沙尘区表明有一自西向东的沙尘传输带位于平流层低层(450 hPa)。

全风速和比湿的垂直分布可以进一步说明对流顶的下落。首先,从图 5c 全风速垂直分布可以看到,在  $37.5^{\circ}\text{N}$  以北,高空急流出现了明显的下落,  $64\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的急流核位于 350 hPa(常态大气急流位于 250 hPa 左右)。从其位置来看,该区域较图 5b 中 2 PVU 高位涡的下落区略偏南,表明急流下落的动力作用是对流顶折叠和高空位涡下传的驱动因素(姜学恭等,2012)。从比湿分布可以看到(图 5d),与 2 PVU 的对流顶下落区相对应,对流顶下落区的比湿均较小,在  $PV>1$  PVU 区域,比湿基本上小于  $0.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,表明该区域为源自平流层的干燥空气,这符合平流层大气的基本特征(一些研究利用比湿大小界定对流层和平流层, Galani et al, 2003)。

另外,从图 5c 还可看到,在  $37.5^{\circ}\text{N}$  以南较均匀地散布于整个对流层中的沙尘区( $4\sim 9\text{ km}$ ,  $300\sim 600\text{ hPa}$ ),以及  $37.5^{\circ}\text{N}$  以北 600 hPa 以下的沙尘区,风速垂直切变均很小。图 5e 和 5f 位温、相当位温垂直分布则显示,  $37.5^{\circ}\text{N}$  以南  $300\sim 600\text{ hPa}$ ,及  $37.5^{\circ}\text{N}$  以北 600 hPa 以下的沙尘区,位温、相当位温垂直变化小于  $1\sim 1.5\text{ K}\cdot\text{km}^{-1}$ (相关研究将位温垂直变化小于  $1.5\text{ K}\cdot\text{km}^{-1}$  界定为中性层结, Anthes et al, 1978)。一些研究表明(Carlson et al, 1980, Chen et al, 1995, 姜学恭等,2006),在沙尘暴形成及沙尘远距离传输过程中,沙尘层往往与中性混合层相伴。这一方面源于沙尘暴发生时(冷锋触发)的旺盛垂直混合,另一方面,沙尘气溶胶的辐

射强迫则是另一原因。沙尘气溶胶的存在,一方面阻挡地面接收太阳短波辐射,其自身又释放长波辐射加热大气,从而削弱了常态大气白天由于地面加热导致的不稳定趋势(夜间则相反,削弱地面冷却导致的稳定趋势),使大气层结趋向中性(姜学恭,2006)。本次过程中,沙尘层的层结呈现中性特征,而其弱风速垂直变化,更直观地反映了大气旺盛垂直混合的状态特征。可见,上述监测事实可以成为沙尘层与中性混合层相伴的另一直接证据。

### 3.2 沙尘暴扩展阶段

24 h 后,3月20日18时(图 6a),锋后高压已沿西北—东南向推进至华东地区(中心  $33^{\circ}\text{N}$ ),锋前低压则沿西南—东北向移至日本北部(中心  $42^{\circ}\text{N}$ 、 $130^{\circ}\text{E}$ ),地面沙尘区已扩展至黄海以东地区。高空槽移至朝鲜半岛以东,日本岛以西(图 6b)。雷达监测带位于地面低压后部,高空则位于槽后,横穿槽后西北气流区(与高空槽的位置关系和上节情形相近,但略滞后)。可见,雷达监测大体上横穿沙尘向东的输送带。

从沙尘垂直分布来看(图 7),与之前相似的是沙尘主体依然分布在  $31.3^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$  一带,并向东推进,与之前不同的是沙尘层明显分为两层,一层位于 2.5 km 到地面的对流层低层,一层位于 5~10 km 的对流层中高层,之间为无沙尘区。同时,同样在  $40.3^{\circ}\text{N}$ 、 $120^{\circ}\text{E}$  附近 8~9 km 存在孤立的沙尘区。可见,沙尘垂直分布体现了沙尘传输的连续性及其变化。

从图 8a 剖面图流场可以看到,  $40^{\circ}\text{N}$  以南为自北向南的下沉气流,与图 7 沙尘区配合。另外,

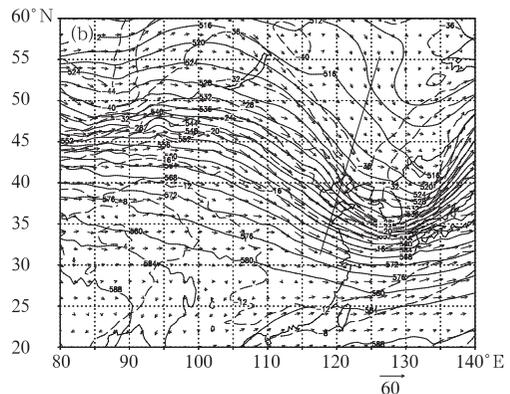
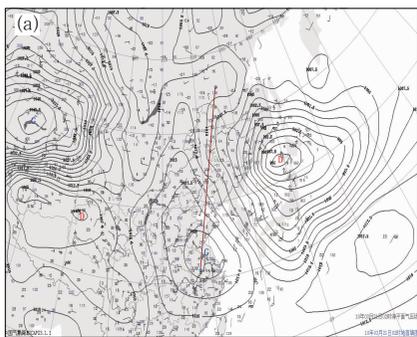


图 6 与图 4 相似,但时间为 2010 年 3 月 20 日 18 时

Fig. 6 Similar to Fig. 4 but at 18:00 UTC 20 March 2010

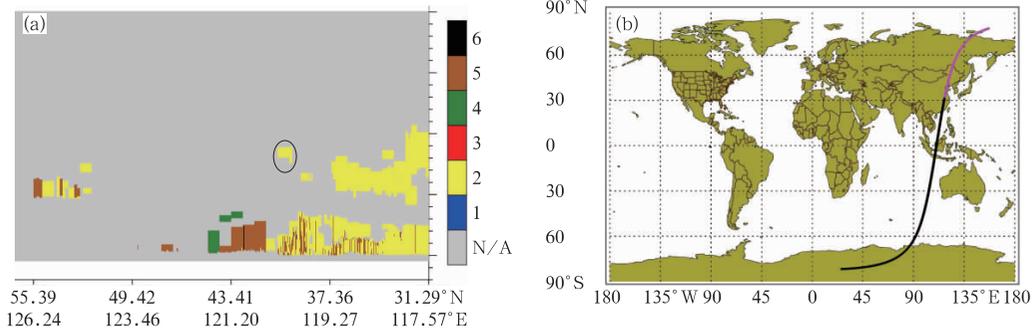


图7 与图3相似,但时间为2010年3月20日18时

Fig. 7 Similar to Fig. 3 but at 18:00 UTC 20 March 2010

32°N附近存在一明显的垂直环流,南侧为上升支。对比图7沙尘分布可以看到,32°N以南与垂直环流上升支对应的区域,沙尘区分布于7~10 km,而其北侧为5~7.5 km。可见,受垂直环流上升支的驱动,沙尘层高度明显高于其北侧。

从图8b位涡来看,以37°N为界,其南侧无明显位涡下传,其北侧则形成明显高位涡下传。与偏北下沉气流配合,代表对流顶的2 PVU下落到500 hPa以下,位于38°~41°N一带。而沙尘垂直分布显示37°N以南为沙尘主要分布区,北侧则较少。可见,与3.1节讨论的类似,在对流顶较高的区域,沙尘区向上扩展也越高。另外,在40.3°N、120.2°E,8~9 km为孤立沙尘区,范围较之前24 h有所扩大,位涡剖面图显示该位置位涡值为5 PVU[2 PVU已下落至500 hPa以下,对应高度5.5 km(图8a)]。可见,该沙尘区已深入平流层中。从沙尘传输的持续性来看,其显然与之前39.3°N的孤立沙尘区来自同一沙尘传输带,且范围增大。

全风速和比湿垂直分布同样验证了对流顶的下落。图8c中,52 m·s<sup>-1</sup>高空急流核已下落至400 hPa,且37°N同样位于2 PVU高位涡下落区的南侧,与上节讨论的情况一致。从比湿来看(图8d),沿偏北下沉气流,0.1 g·kg<sup>-1</sup>等值线已向南向下扩展至37°N,600 hPa以下,与2 PVU区对应的比湿均维持在0.05 g·kg<sup>-1</sup>以下。可见,全风速和比湿进一步验证了对流顶下落的事实。

从风速、位温、相当位温分布来看。图8c中,在31°~37°N,550~250 hPa高度(5~10 km)间,与沙尘区对应的风速垂直切变很小,同样,在对流层低层31°~40°N,750 hPa到地面,与沙尘区对应的风速垂直切变也很小。而在这两层之间,则为风速垂直切变大值区。从位温、相当位温来看,在31°~

37°N,550~250 hPa高度(5~10 km)间,及31°~40°N,2.5 km高度(750 hPa)以下,位温、相当位温垂直切变均很小,而两层之间,则为明显的位温、相当位温锋区。可见,沙尘层为中性混合层,而非沙尘区为非中性层结。这无疑成为沙尘层与中性层结配合这一事实的一个反证。

### 3.3 沙尘远距离传输阶段

再之后24 h,即2010年3月21日18时(图9),系统继续向东推进,地面低压已沿东北方向移至鄂霍次克海,地面沙尘区则基本消失,因此,该阶段为沙尘远距离传输阶段。雷达监测带同样位于地面冷高压中心至低压后部一线,500 hPa高空槽后方。雷达监测带与系统的相对位置总体上与之前类似。

从沙尘垂直分布来看(图10),与之前类似,沙尘层明显分为两层,分别位于31°~37°N、130°~133°E,4~9 km,以及30°~40°N,1.5 km以下。与之前不同的是,1.5 km以下对流层低层沙尘已大为减弱。相应地面图上观测到沙尘天气的测站也很少。在40°N,8~9 km间,依然存在孤立的沙尘区,范围较之前24 h进一步扩大。从沙尘传输的持续性来看,该沙尘区应该来自上节讨论的同一纬度(40°N)沙尘传输区。

从剖面流场来看(图11),雷达监测带总体仍为偏北下沉气流,且强度较之前明显偏强。与沙尘区配合同样为下沉运动区。从位涡分布来看,43°N附近350 hPa以上存在2 PVU的位涡高值区。对于40°N,8~10 km附近的孤立沙尘区,其大约位于350~250 hPa间(图11a),对应的位涡值约为1 PVU左右。因此,该区域接近但并不在平流层中。考虑到该孤立沙尘区与之前的孤立沙尘区基本位于相同的高度和纬度,且具有相似的形态特征,从

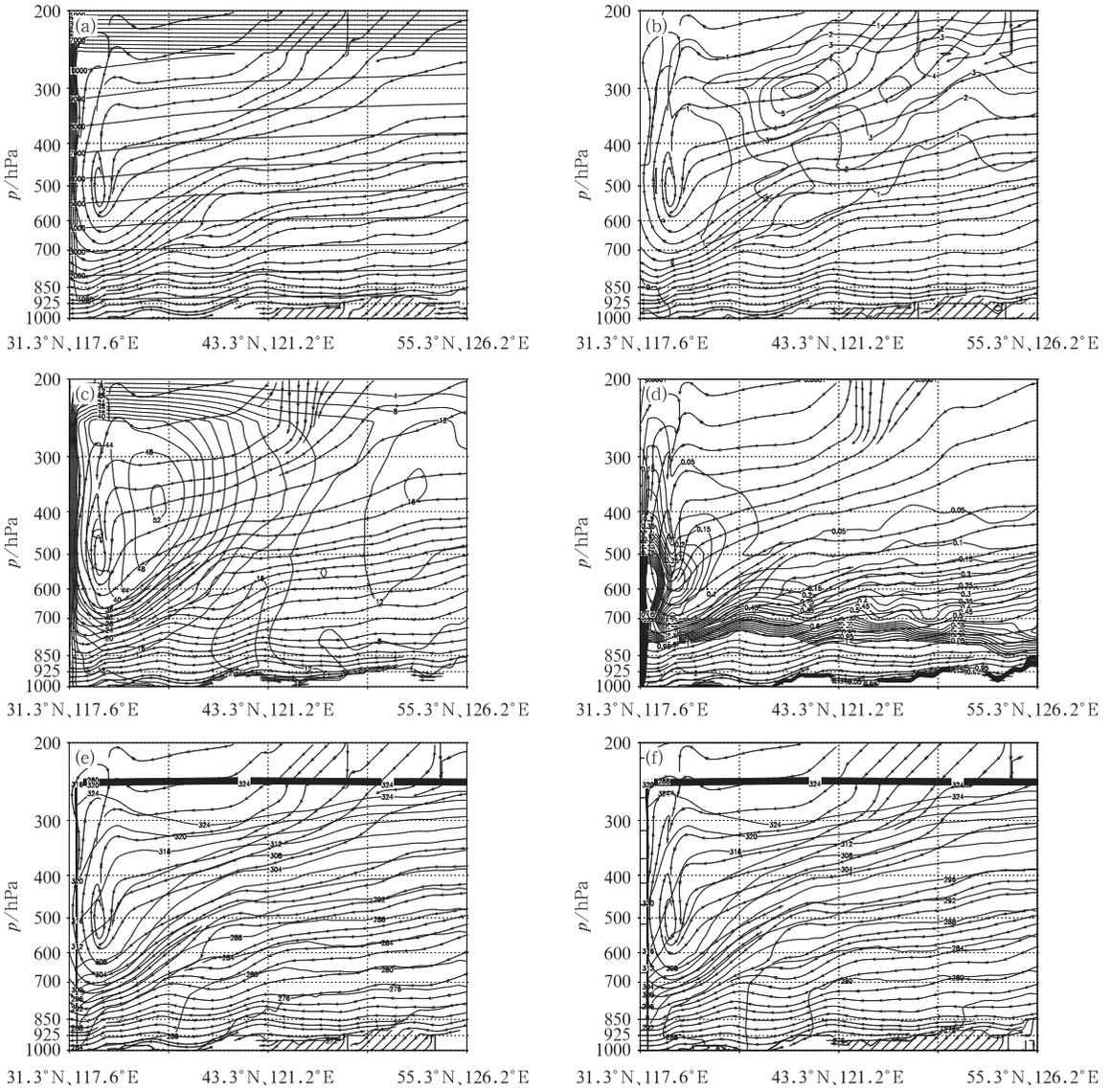


图 8 与图 5 相似, 但时间为 2010 年 3 月 20 日 18 时  
 Fig. 8 Similar to Fig. 5 but at 18:00 UTC 20 March 2010

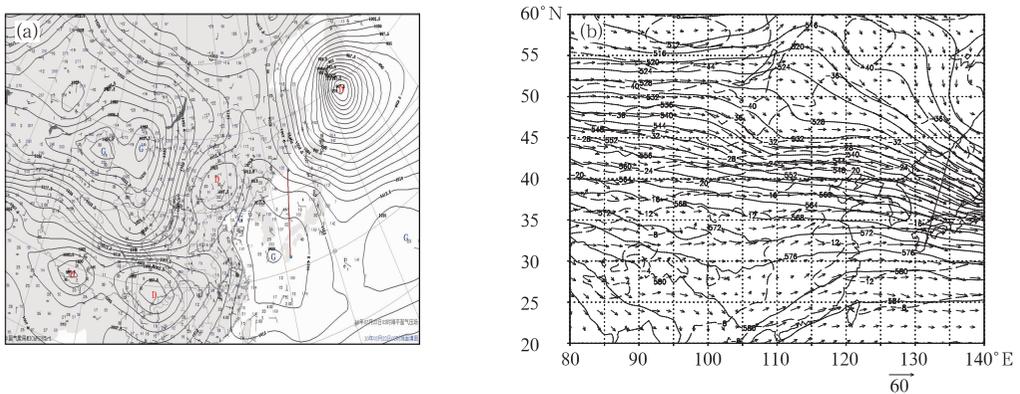


图 9 与图 4 相似, 但时间为 2010 年 3 月 21 日 18 时  
 Fig. 9 Similar to Fig. 4 but at 18:00 UTC 21 March 2010

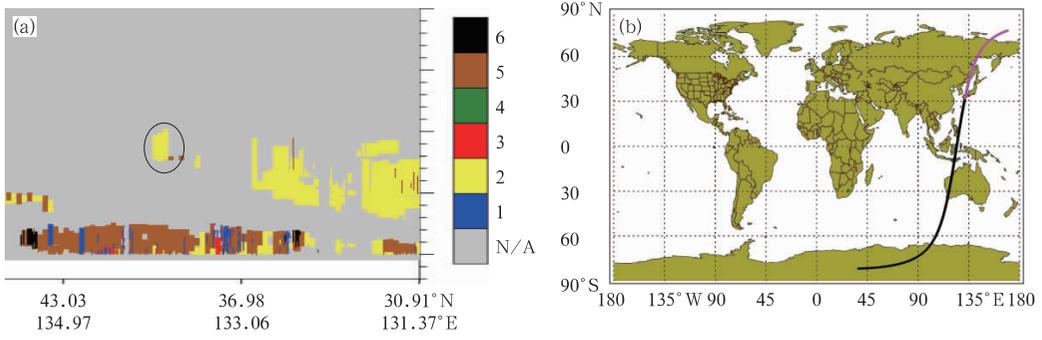


图 10 与图 3 相似,但时间为 2010 年 3 月 21 日 17 时  
 Fig. 10 Similar to Fig. 3 but at 17:00 UTC 21 March 2010

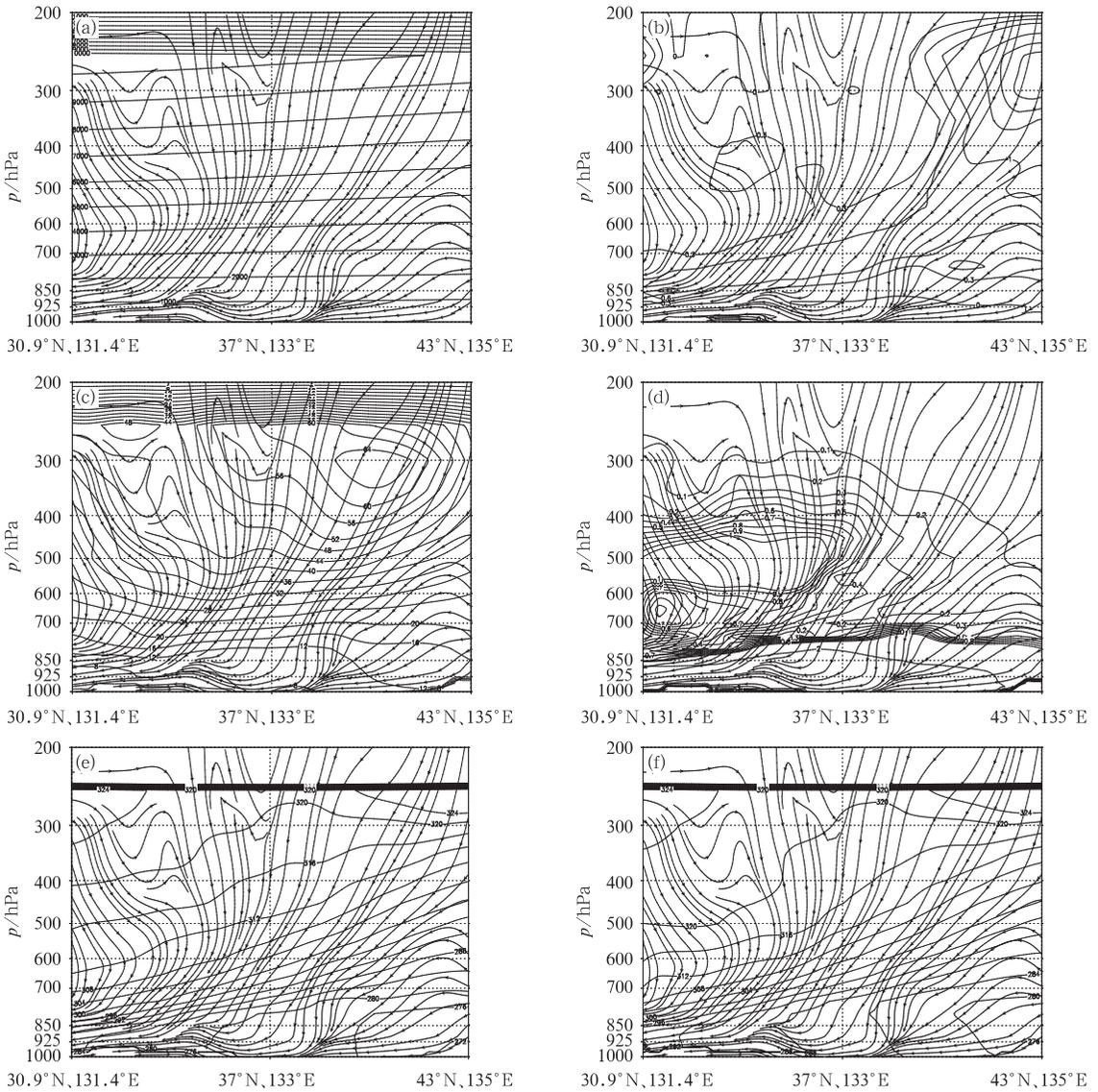


图 11 与图 5 相似,但时间为 2010 年 3 月 21 日 17 时  
 Fig. 11 Similar to Fig. 5 but at 17:00 UTC 21 March 2010

沙尘传输的连续性分析,该沙尘应该来自之前的平流层中的孤立沙尘区。其不位于平流层中,可能是

由于沙尘在偏北气流作用下逐渐脱离平流层所致。急流、比湿与位涡揭示的对流顶下落的情况与

之前类似,不再赘述。需要说明的是,40°N,8~10 km 高度(250~350 hPa)的孤立沙尘区,与之对应的比湿 $<0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,更接近平流层的大气特征,显示尽管其脱离平流层,但仍保留着一些平流层大气特征。这进一步表明其与之前的孤立沙尘区的同源性。

沙尘区风速垂直切变也与之之前类似,对于31°~37°N,4~9 km 高度(600~300 hPa)对流层中高层沙尘区,及31°~40°N,1.5~2 km 以下的对流层低层沙尘区,与之对应的风垂直切变均很小。从位温、相当位温分布来看,31°~37°N,4~9 km 高度(600~300 hPa)沙尘区,及31°~40°N,1.5 km 以下沙尘区,与之对应的位温、相当位温垂直变化均很小,而两者之间同样为位温和相当位温梯度较大的锋区,与3.1节讨论的情形相似。可见,在本次沙尘暴过程各个阶段,在对流层中高层、对流层低层的沙尘层中,风垂直切变、层结和湿度等要素特征均显示其与中性混合层相伴,而这种动力、热力结构特征显然具有普遍性。

## 4 结 论

综合利用 CALIPSO 星载激光雷达探测资料和 MM5 数值模拟结果,对2010年3月19—22日影响我国北方的大范围强沙尘暴过程不同阶段沙尘垂直分布特征及其动力、热力结构进行了初步分析,结果发现。

(1) 在沙尘暴发展成熟阶段,沙尘层分布于2~9 km(850~250 hPa)的几乎整个对流层中,冷锋前抬升和锋后下沉并未导致沙尘垂直分布的明显差异,反而是锋面前后旺盛垂直混合使沙尘呈现相对均匀的垂直分布。

(2) 在沙尘暴扩展及远距离传输阶段,沙尘层明显分为两层,大体上分别位于700 hPa 以下的对流层低层和600~300 hPa 的对流层中高层。。

(3) 在沙尘暴过程各个阶段,弱风速垂直切变和弱位温、相当位温垂直变化均与沙尘层密切配合,沙尘层的这种动力、热力结构特点表明与沙尘层伴随的为中性混合层;而两沙尘层之间则为高风速垂直切变及位温、相当位温锋区。

(4) 在沙尘暴发展过程中,高空急流、位涡、比湿等要素的垂直变化均表明在高空槽后部与急流下

落相伴,出现明显的对流顶折叠和高空位涡下传。在对流顶较高的区域,主体沙尘区向上的扩展也较高,反之则较低。

(5) 在本次沙尘暴各个阶段,在40°N,7~9 km 沿纬向一线,均出现一小范围孤立沙尘区位于平流层中(或平流层附近),表明我国北方沙尘暴过程中能够产生沙尘的对流层—平流层输送,并能够在平流层中形成持续性的沙尘传输带。这可以成为沙尘气溶胶对流层—平流层输送及其在平流层中传输的一个直接的监测证据。

## 参考文献

- 郭本军,刘莉,黄丹萍,等.2008.激光雷达对一次沙尘天气探测与分析.气象,34(5):52-57.
- 郭妮,蔡迪花,韩兰英,等.2009. MODIS 沙尘暴判识方法与业务系统.气象,35(1):102-107.
- 姜学恭,陈受钧,顾润源,等.2012.沙尘暴过程中沙尘对流层—平流层输送的数值模拟初步分析.气象学报,70(6):1223-1234.
- 姜学恭,沈建国.2006.内蒙古两类持续性沙尘暴的天气特征.气候与环境研究,11(6):702-712.
- 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):950-959.
- 王丽娟,赵琳娜,寿绍文,等.2011.2009年4月北方一次强沙尘暴过程的特征分析和数值模拟.气象,37(3):309-317.
- 杨健,吕达仁.2003.东亚地区一次切断低压引起的平流层、对流层交换数值模拟研究.大气科学,27(6):1031-1044.
- Andreas S, Heini W, Paul J, et al.2003. A new perspective of Stratosphere-Troposphere Exchange. doi: 10. 1175/BAMS-84-11-1565.
- Anthes R A, Warner T T. 1978. Development of hydrodynamics models for air pollution and mesometeorological studies. Mon Wea Rev,106(81):1045-1078.
- Carlson T N, Benjamin S G. 1980. Radiative heating rates for Saharan dust. J Atmos Sci,37:193-213.
- Chen S J, Kuo Y H, et al. 1995. The effect of dust radiative heating on low-level frontogenesis. J Atmos Sci,52(9):1414-1420.
- Li Chengcai, Shu Hailong, Qinghong Zhang. 2012. Evidence of East Asia dust aerosols transported to the stratosphere. In prepared, Private communication.
- Galani E, Balis D, Zanis P, et al. 2003. Observations of stratosphere-to-troposphere transport events over the eastern Mediterranean using a ground-based lidar system. J Geophys Res, 108(D12). doi:10. 1029/2002JD002596.
- Ravetta F, Ancellet G, Kowol S J, et al. 1999. Ozone temperature and wind field measurements in a tropopause fold: Comparison with a mesoscale model simulation. Mon Wea Rev, 127(11): 2641-2653.