

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):911-922.

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^{*}

张亚妮 张碧辉 宗志平 吴 英

国家气象中心,北京 100081

提 要: 本文选取 2012 年 4 月 27—28 日影响北京的一次沙尘天气过程进行分析,发现在本次过程中,沙源地区的沙尘暴主要发生在地面冷锋和 500 hPa 槽后,在近地层强烈的感热加热与中低层冷平流的共同作用下,形成了不稳定层结及深厚的混合层,最高可达 600 hPa,是沙尘天气能够影响下游地区的重要条件。本文还通过分析等熵混合层厚度变化及其平流过程来追踪沙尘天气的输送路径和定位沉降地,发现本次过程有两种传输路径,一种是沿辽宁北部向东而后转向东北方向,主要沿等熵混合层平流向下游移动,之后随着等熵混合层的接地沉降到近地层,该路径影响高度较高;另一种是沿辽宁南部向东南方向移动,混合层平流较清楚,但沉降时与东北路径明显不同,在辽东半岛东部地面辐散气流及下沉运动的作用下发生沉降,并随冷锋后冷高压南侧的东风回流向西输送影响北京地区。另外,由于混合层之上的稳定层明显下压,使沙尘输送高度偏低。运用 HYSPLIT 模式模拟的前、后向轨迹证实了上述两种输送路径,表明北京的扬沙天气是由东风回流造成的。

关键词: 沙尘天气, 气旋, 冷锋, 混合层平流, 东风回流, 感热加热

中图分类号: P458

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.07.012

Analysis on Sand Entrainment and Deposition and Transportation Pathways of One Sand-Dust Process in Beijing

ZHANG Yani ZHANG Bihui ZONG Zhiping WU Ying

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: The sand and dust weather that affected Beijing on 27—28 April 2012 is studied. The finding suggests that the sandstorm in sand source area happens mainly behind the cold front and the 500-hPa trough, where, because of the strong surface sensible heating and the cold advection in middle and lower troposphere, the deep mixed layer or even the unstable stratification forms and can reach up to 600 hPa, and such instability of stratification is an important condition for the sandstorm to affect the downstream area. Moreover, based on the analysis of the variation of the mixed-layer thickness and its advective process we also study the transportation pathways and locate the deposition area of the sandstorm. It is found that there are two transportation pathways. One extends eastwards along the northern part of Liaoning Province and then turns to northeast with a higher height. Dust particles move downstream with the advection of the mixed layer. Afterwards, with the decreasing height of the mixed layer, the deposition occurs and sand particles reach the surface. The other extends southeastwards along the south of Liaoning Province. At the stage of transportation, the advection of the mixed layer is clear, but the mechanism of the deposition is different from the former one. The deposition occurs due to the descent in lower troposphere and the surface divergence. Afterwards, along the easterlies on the south side of the cold

* 国家自然科学基金青年基金项目(41205031)资助

2013 年 1 月 24 日收稿; 2013 年 5 月 26 日收修定稿

第一作者:张亚妮,主要从事中、短期天气预报业务和研究工作. Email: Zhangyn@cma.gov.cn

anticyclone behind the cold front, the sand particles are transported westwards to Beijing. In addition, the latter path is lower than the former because the stable layer which lies above the mixed layer descends obviously. Based on HYSPLIT model the backward and forward trajectories are computed. It proves the above two transportation pathways, showing that it is the easterly return-flow that results in the sand-dust event in Beijing.

Key words: sand and dust weather, cyclone, cold front, mixed layer advection, easterly return-flow, sensible heating

引 言

沙尘天气是在特定的地理环境和下垫面条件下发生的一种危害大的灾害性天气(王式功等,2000),其引发的气候学效应对人类生存环境和社会经济活动均能造成影响,是不可忽视的大气和生态环境问题之一(王式功等,1999)。近年来,人们对我国沙尘天气气候规律的统计研究较为广泛(邱新法等,2001;钱正安等,2002;周自江等,2002;王式功等,2003;王存忠等,2009a;2009b;2010;冯永忠等,2010),这些研究为预报员预报沙尘天气提供了有利的背景知识。王式功等(2003)利用1954—2000年中国338个站沙尘资料着重研究了我国沙尘天气的区域特征,指出不同类型沙尘天气的空间分布范围不尽相同。王存忠等(2009a)对1958—2007年中国沙尘暴时间序列进行小波分析,揭示了中国沙尘暴多时间尺度的复杂结构和总体变化趋势。另外,针对典型沙尘暴天气过程的天气学和动力学特征分析研究(杨晓玲等,2005;岳平等,2006;2007;张志刚等,2007;彭艳等,2009;王丽娟等,2011;王伏村等,2012)为预报员认识和预报沙尘天气积累了宝贵的经验。

目前在预报实践中,预报员通过分析气候背景、下垫面前期的降水情况、热力状况以及影响系统等,结合预报经验能够比较准确地预报沙源区出现的沙尘天气。而对远离沙源区的由远距离输送引起的沙尘天气,预报难度很大,预报准确率低,预报员很难基于环流形势及天气系统的演变来准确判断沙尘粒子将被输送到何处,并在何处发生沉降。虽然业务沙尘模式提供了沙尘浓度的预报结果,由于其空报率高,实际应用价值有限。在沙尘粒子远距离输送研究方面,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。周秀骥等(2002)研究

2000年春季影响北京地区沙尘暴天气过程时计算了2000年3和4月8次沙尘暴后向轨迹,指出影响北京的沙尘天气在1000 m上空主要呈西北偏北、西北和偏西3个主体输送方向。岳平等(2008)估算了浑善达克沙地春季沙尘暴期间沙粒的输送距离。

2012年4月29日北京遭遇了一场严重污染,空气质量达到重度污染级别(刘一,2012)。此次污染恰逢“五一”小长假,影响严重,给人们出行带来不便。这次影响北京的沙尘输送轨迹不同于常规路径(周秀骥等,2002),预报难度增大,为了更好地认识本次过程,积累预报经验,有必要对本次过程进行详细分析研究。

1 所用资料及沙尘过程概况

本文所用资料为2012年4月26—30日全国673个基准站地面观测资料及NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料。在本次沙尘天气过程中,由于北京54511站是以霾的形式记录的,只考虑基本站不能显示出沙尘天气对北京的影响,因此,文中也用到密云(54416)和延庆站(54406)的观测资料。另外,本文中所用时间均为北京时。

2012年4月26日,在蒙古国东南部有蒙古气旋生成发展并向东北方向移,受蒙古气旋及冷锋的影响,沙尘天气最先于4月26日白天在蒙古国西部、内蒙古西部以及甘肃等地出现,26日夜间,随着热力条件变差,沙尘天气减弱。4月27日14时,蒙古气旋东移北抬至内蒙古东北部和东北地区西北部,内蒙古浑善达克沙地恰好处于气旋西南部及冷锋后部大的气压梯度区;另一方面,恰逢中午前后,热力混合作用使动量下传,对地面风力的增大起到增幅作用。在热力、动力和丰富沙源这3个因素的共同作用下,内蒙古中部出现了沙尘暴或强沙尘暴(图1a),这是北京浮尘天气最主要的沙尘粒子来源。因而,本文主要分析研究27日后沙尘粒子的起

沙沉降机理及输送路径,为非源地沙尘天气预报提供线索和依据。

从沙尘范围图(图 1a)可以看出,本次沙尘天气过程影响到了东北地区东部、河北北部及京津地区。图 1b 是 4 月 27 日 14 时起出现沙尘天气的起始日期分布,图中清楚显示出沙尘天气发生的先后顺序:内蒙古中部—内蒙古东南部—东北地区东部—京津

地区,这为界定北京地区浮尘粒子来源提供了依据。4 月 28 日上午,在东北地区东部出现了大范围的浮尘天气,28 日下午天津出现浮尘,直到 29 日 11 时,北京才观测到浮尘天气,事实上,北京出现沙尘天气比观测到的时间要早,从 28 日夜间至 29 日早晨,北京的观测记录均是霾或雾。

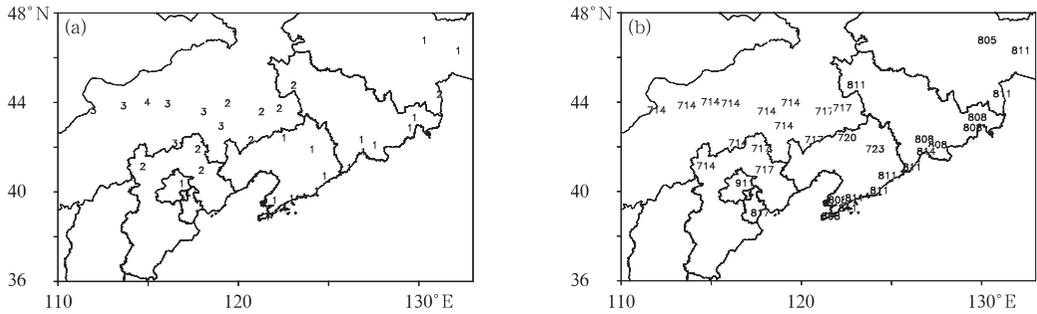


图 1 2012 年 4 月 27 日 14 时至 29 日 23 时(a)沙尘天气分布图(1~4 分别代表浮尘、扬沙、沙尘暴和强沙尘暴)和(b)出现沙尘天气的起始日期(811 表示 28 日 11 时)

Fig. 1 (a) Distributions and (b) the beginning date of the sand and dust weather

from 14:00 BT 27 to 23:00 BT 29 April 2012

(1 and 2 denote dust and blowing sand, 3 and 4 denote sandstorm and severe sandstorm; 811 denotes 11:00 BT 28 April)

2 起沙阶段成因分析

沙尘天气过程主要包括起沙、输送和沉降,每一阶段对准确预报沙尘天气落区均至关重要,掌握其与主要天气系统间的对应关系及内在规律,是我们提高预报准确率的重要一步。对预报此次北京的沙尘天气来说,首先要考虑的是在内蒙古浑善达克沙地能不能起沙,其次是能不能影响北京,是以哪种路径、哪种形式影响北京。下面首先探讨起沙的主要原因。

2.1 主要影响系统

图 2a 和 2b 是 4 月 27 日 08 和 14 时地面 2 m 假相当位温(θ_{sc})、10 m 风场和海平面气压水平分布,从 θ_{sc} 梯度大值区和地面风场的辐合区可以清晰地判断 14 时地面冷锋的具体位置,即位于辽宁东部和吉林东部,锋面后部冷空气侵入明显。27 日 14 时前后,在 120°E 以西的浑善达克沙地出现了沙尘暴或强沙尘暴(图 1),沙尘暴区基本位于气旋后部气压梯度密集区和大风区。从 27 日 08 和 14 时

500 hPa 风场与高度场的分布看(图略),500 hPa 槽区从 117°E 附近东移至 120°E,沙尘区基本位于 500 hPa 槽后,槽前上升运动对发生沙尘暴所起的作用较小,这恰好为热力作用的有利发挥提供了条件。

2.2 锋后近地层感热加热加强

大气热力状况的变化与非绝热加热及冷暖平流过程紧密相关,当对流层中层出现明显的冷平流且近地层非绝热加热显著时,容易形成不稳定层结。由沙源区(42°~44°N、113°~118°E)区域平均感热通量和潜热通量之和随时间的变化(图略)看出,近地层非绝热加热在 4 月 27 日 14 时达 $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上,而 26 日和 28—29 日 14 时不足 $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。进一步分析发现这主要是由感热通量的变化引起的(图 3),感热通量在 27 日 14 时约为 $350 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,明显强于 26 日和 28—29 日 14 时的感热通量($200 \sim 250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)。地表感热加热的增强,有利于不稳定层结的形成。

影响感热通量的两个主要因素分别是近地层风力和地表温度与近地层气温差(王丽娟等,2012)。

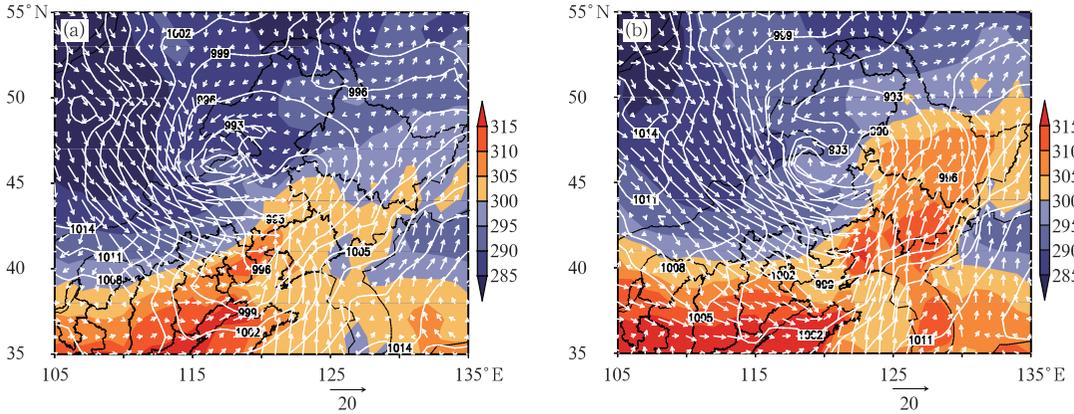


图 2 2012 年 4 月 27 日 08 时(a)和 14 时(b)2 m θ_{se} (阴影,单位:K)、10 m 风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和海平面气压(单位:hPa)场的水平分布

Fig. 2 Distributions of 2 m θ_{se} (shaded, unit: K), 10 m wind (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and sea-level pressure (unit: hPa) at (a) 08:00 BT and (b) 14:00 BT 27 April 2012

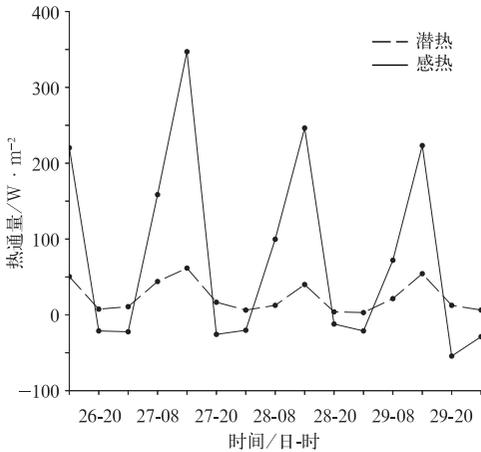


图 3 2012 年 4 月 26 日 14 时至 30 日 02 时区域平均($42^{\circ} \sim 44^{\circ} \text{N}$, $113^{\circ} \sim 118^{\circ} \text{E}$)的地表潜热通量和感热通量(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)随时间的变化

Fig. 3 Evolutions of mean latent heat flux and sensible heat flux (unit: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) at surface averaged over Hunshandake sandland ($42^{\circ} \sim 44^{\circ} \text{N}$, $113^{\circ} \sim 118^{\circ} \text{E}$)

图 4a 给出了沙源区($42^{\circ} \sim 44^{\circ} \text{N}$, $113^{\circ} \sim 118^{\circ} \text{E}$)区域平均的 2 m 气温、地表温度与 2 m 气温差及 10 m 风速随时间的变化,27 日气温降低,锋面过境后有冷空气入侵。受冷空气影响,10 m 风在 27 日 08 时显著增大,14 时继续增强至约 $21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,达 27 日前后几天的最大值,这与感热通量在 27 日 14 时达最大相一致。因此,27 日锋面过境、冷空气入侵及气压梯度加大引起的近地层风力增大(图 4a)是影响

地表感热通量增强的主要因素。另外,地表温度与 2 m 气温差(图 4a)仅表现出清楚的日变化,受冷空气的影响较小,因此对感热通量的贡献小。但是在气旋发展、锋面过境及风速增强这样的天气尺度背景下,由于午后太阳辐射增强,地表温度与 2 m 气温差达最大,其日变化是午后感热通量显著增强的主要原因。

午后感热加热增强,近地层气温升高,热力引起的垂直混合加强,湍流运动的发展有利于高层动量下传,使近地层风继续增大。这就是为什么气压梯度于 27 日 08 时达最大(图 4b),14 时开始减小,而 10 m 风却在 14 时达最强的原因。

2.3 锋后中低层冷平流增强

图 5 是 600、700 及 850 hPa 温度平流和位温随时间的变化。在 850 hPa,冷平流于 27 日 08 时达最强(图 5a),但温度却在 14 时有小幅回升,于 28 日 02 时达到最小值(图 5b)。因为沙源区海拔高度大约为 1000 m 左右,850 hPa 接近近地层,受地面非绝热加热的影响最显著,午后太阳辐射增强,气温略有回升,之后在 28 时 02 时,随着地面冷却的增强,温度降到最低值。700 和 600 hPa 温度的降低与冷平流紧密相关,27 日 02 和 08 时冷平流较强,其温度在 14 时降至最低(图 5b),这种中层降温、低层加热的结构非常有利于不稳定层结的形成。图 6 给出了 4 月 27 日 14 时位温和垂直速度沿 43°N 的垂直剖面,在沙尘区存在非常清楚的不稳定层结,并伴有明显的上升运

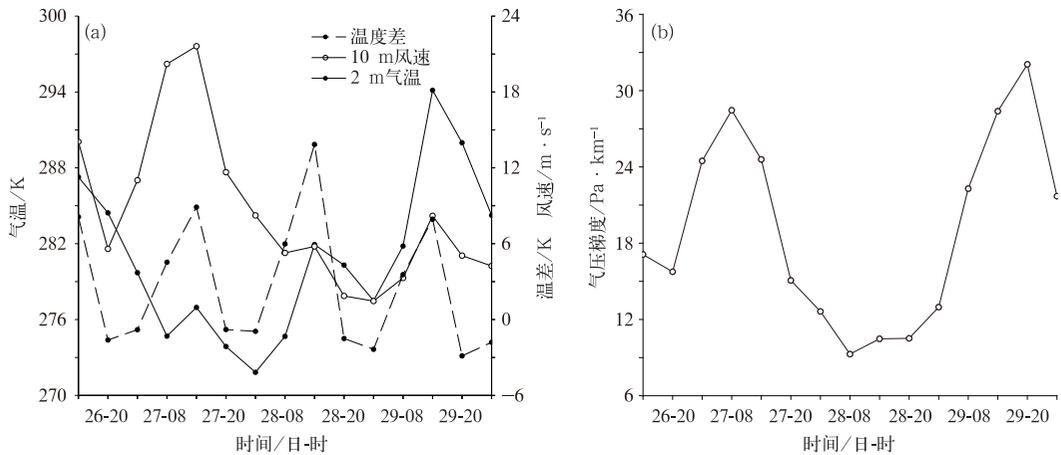


图 4 2012 年 4 月 26 日 14 时至 30 日 02 时区域平均(42°~44°N,113°~118°E)的(a)2 m 气温(单位:K)、地表温度与 2 m 气温之差(单位:K)、10 m 风场(单位:m · s⁻¹) 及(b)水平海平面气压梯度(单位:Pa · km⁻¹)随时间的变化

Fig. 4 Evolutions of (a) mean 2 m temperature (unit: K), the temperature difference between surface and 2 m temperature (unit: K), 10 m wind (unit: m · s⁻¹) and (b) horizontal gradient of sea-level pressure (unit: Pa · km⁻¹) averaged over Hunshandake sandland (42°-44°N, 113°-118°E)

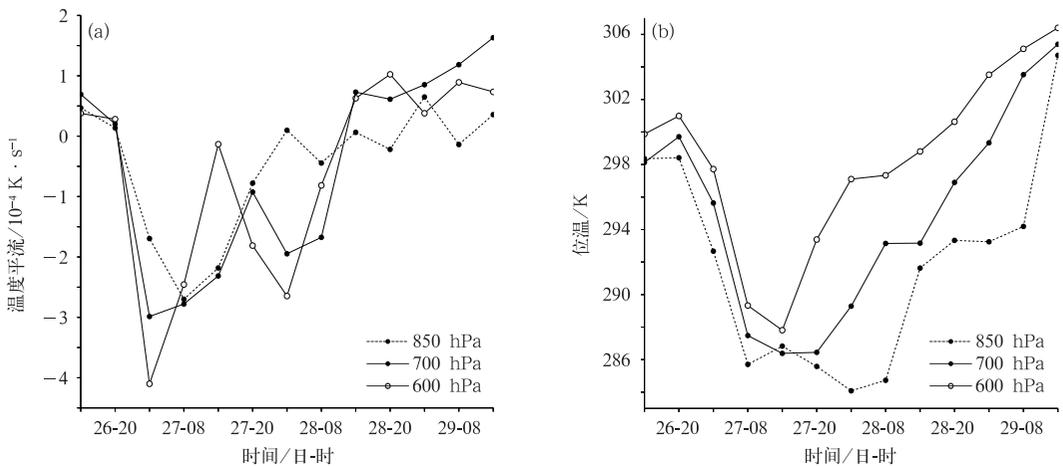


图 5 2012 年 4 月 26 日 14 时至 29 日 14 时不同等压面上区域平均(42°~44°N,113°~118°E)的(a)温度平流(单位:10⁻⁴ K · s⁻¹)和(b)位温(单位:K)随时间的变化

Fig. 5 Evolutions of (a) mean temperature advection (unit: 10⁻⁴ K · s⁻¹) and (b) potential temperature (unit: K) averaged over Hunshandake sandland (42°-44°N, 113°-118°E)

动,有利于沙尘上扬并向下游远距离输送。

3 沙尘输送及沉降

沙源地不稳定的热力层结为沙尘粒子在垂直方向的充分混合并向上输送到较高高度提供有利条件,使沙粒随高空气流向下游输送成为可能。那么,沙尘粒子将以哪种路径、哪种形式向下游输送? 它

与天气系统的演变有什么内在联系? 如果研究清楚了这些问题,就为预报员预报由远距离输送引起的沙尘天气提供了很好的依据。下面就以本次沙尘天气过程为例进行深入的分析研究。

3.1 东北输送路径和混合层接地沉降

混合层是在地面行星边界层中形成的中性层结,在干燥环境下有利于深对流的产生(Takemi,

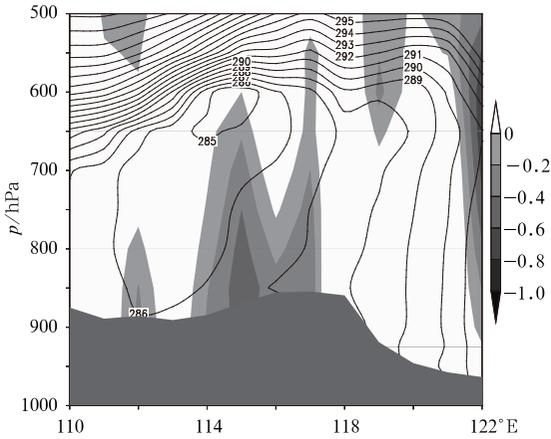


图 6 2012 年 4 月 27 日 14 时位温(单位:K)和垂直速度(阴影,单位:Pa·s⁻¹)沿 43°N 的垂直剖面

Fig. 6 Vertical cross sections of potential temperature (unit: K) and vertical velocity ω (shaded, unit: Pa·s⁻¹) at 43°N at 14:00 BT 27 April 2012

Carlson 等(1972)的研究指出,在沙尘的传输过程中沙尘层将维持一等熵层,那么,我们是否可以根据混合层的变化及平流移动情况去追踪沙尘的移动? Anthes 等(1978)将混合层定义为 $\partial\theta_v/\partial z < 1.5 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$ 其中, θ_v 为虚温。对混合层高度的严格确定不能仅仅依靠(虚)位温,而需要结合比湿进行判断,混合层顶是地面以上位温和比湿急剧增大的高度(Mahrt, 1976; 姜学恭等, 2003)。本文根据 Anthes 等(1978)的定义用虚位温进行计算,并求取了近似等熵的等熵层厚度,从地面向上计算到 500 hPa,且取第一个 $\partial\theta_v/\partial z < 1.5 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$ 的厚度层进行讨论。日间由于热力和动力因素的共同影响,等熵层位于边界层下层,即通常讲的混合层。夜间辐射冷却增强,近地层出现稳定层,由于平流作用,在稳定层之上形成的近似等熵的等熵层,与边界层内的混合层有所不同,通常称之为高架混合层,文中为了统一,均称之为混合层。

1999),可将沙尘粒子向高空输送。沙尘暴发生时,往往伴随出现深厚的等熵混合层(姜学恭等,2004)。

从探空曲线(图 7)可以看出沙尘天气发生前后混合层的变化情况,在内蒙古东南部的赤峰站,4月

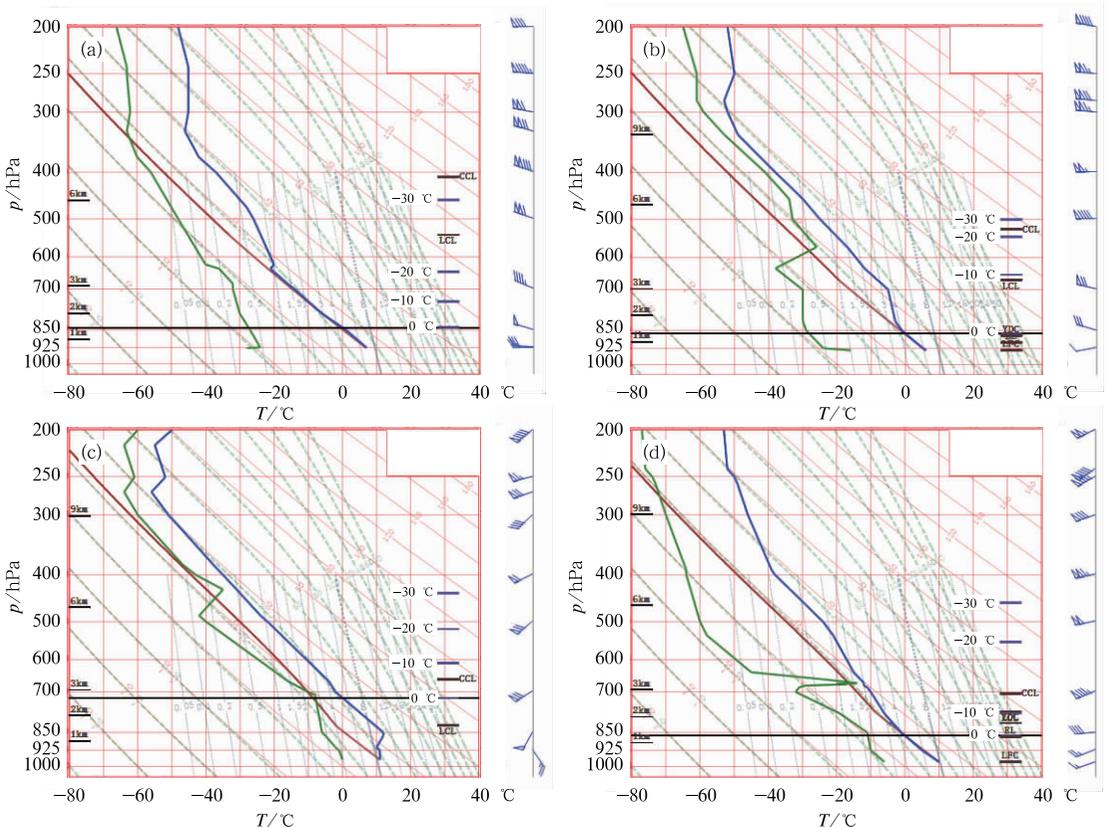


图 7 2012 年 4 月 27 日 20 时(a,c)和 28 日 08 时(b,d)赤峰(a,b)和延吉(c,d)的探空曲线

Fig. 7 The radiosounding in Chifeng (a, b) and Yanji (c, d) at 20:00 BT 27 (a, c) and 08:00 BT 28 (b, d) April 2012

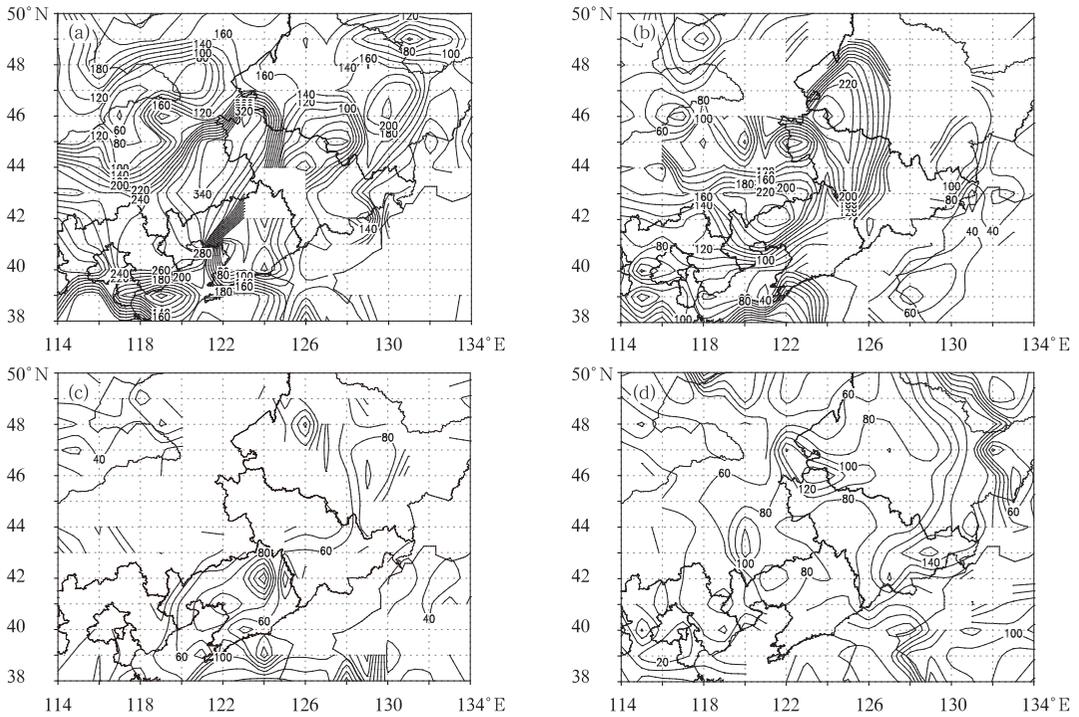


图 8 2012 年 4 月 27 日 14(a)和 20 时(b)、28 日 02(c)和 08 时(d)混合层厚度 (两个等压面之间的厚度差,单位:hPa)的水平分布

Fig. 8 Mixed-layer thickness (the thickness difference between two isobaric pressures, unit: hPa) at (a) 14:00 BT and (b) 20:00 BT 27 April, and (c) 02:00 BT and (d) 08:00 BT 28 April 2012

27 日 20 时(图 7a)混合层可达 700 hPa 以上,28 日 08 时(图 7b)明显减弱。在吉林东部的延吉站,在沙尘发生前的 27 日 20 时(图 7c)无混合层存在,而在 28 日 08 时(图 7d)出现明显混合层,可达 850 hPa 附近。为了更清楚地了解混合层的变化情况,图 8 给出的是沙尘天气发生期间不同观测时次混合层厚度的水平分布,27 日 14 时在内蒙古浑善达克沙地和科尔沁沙地存在两个混合层厚度中心。位于 $(43^{\circ}\text{N}, 115^{\circ}\text{E})$ 附近的厚度中心远离锋面,主要与地面加热增强有关,与该地区发生的(强)沙尘暴相伴。内蒙古东南部的厚度中心位于锋区之后,除了具有日变化的热力因素影响外,也与气旋发展、锋面过境的影响有关,27 日 14 时(图 8a)混合层厚度大于 28 日 14 时(图略,约 240 hPa)就说明了这一点。与冷锋相伴的等熵混合层将会随冷锋向下游移动,Arriitt 等(1992)认为混合层空气可以通过平流影响下游地区从图 8 可以看到向下游移动的等熵层引起的下游混合层厚度的变化。27 日 20 时混合层厚度中心从内蒙古东南部移到了内蒙古与辽宁的交界处(图 8b),28 日 02 时进一步向东南方向移动,并分成

两个中心,一个位于辽宁北部,另一个位于辽东湾附近(图 8c)。之后,辽宁北部的厚度中心向东北方向移动,于 28 日 08 时位于吉林东部(称为东北路径);而辽东湾附近的厚度中心并没有向下游平流的迹象,28 日 08 时辽东半岛无明显混合层(东南路径),在其上游辽西地区混合层厚度增强,这是日间热力作用增强引起的混合层的日变化,与混合层的平流无关(图 8d)。上述混合层厚度向东北、东南方向平流的移动路径,是否与沙尘的输送路径、沉降地区有一定关联? 沙尘分别在吉林东部与辽东半岛发生沉降,其机理有何不同?

从 $\partial\theta_v/\partial z$ 沿东北路径(图 9e 中 AB 线)的垂直分布(图 9)发现,27 日 14 时在内蒙古中部与东南部存在不稳定层,混合层厚度可达 650 hPa 附近,在充分混合下沙尘粒子可以上升到该层甚至更高。27 日 20 时,辐射冷却开始加强,西部高原上的混合层顶降低,而下游地区则出现了明显的混合层,这是混合层平流的结果(姜学恭等,2003),到了 28 日 02 时,混合层进一步东移,由于夜间地面辐射冷却很强,近地面出现显著的稳定层,从而使平流东移的混

合层悬空,28日08时,随着地面加热的增强,低层稳定层结被破坏,混合层加强并与地面接通。混合层的这种向下游平流、悬空及接地的过程与本次沙

尘天气的移动路径及沉降地(图1)较为一致。在沙源地深厚的混合层内,沙尘粒子浓度垂直变化小,接近均匀分布,并沿混合层向下游平流,夜间混合层强

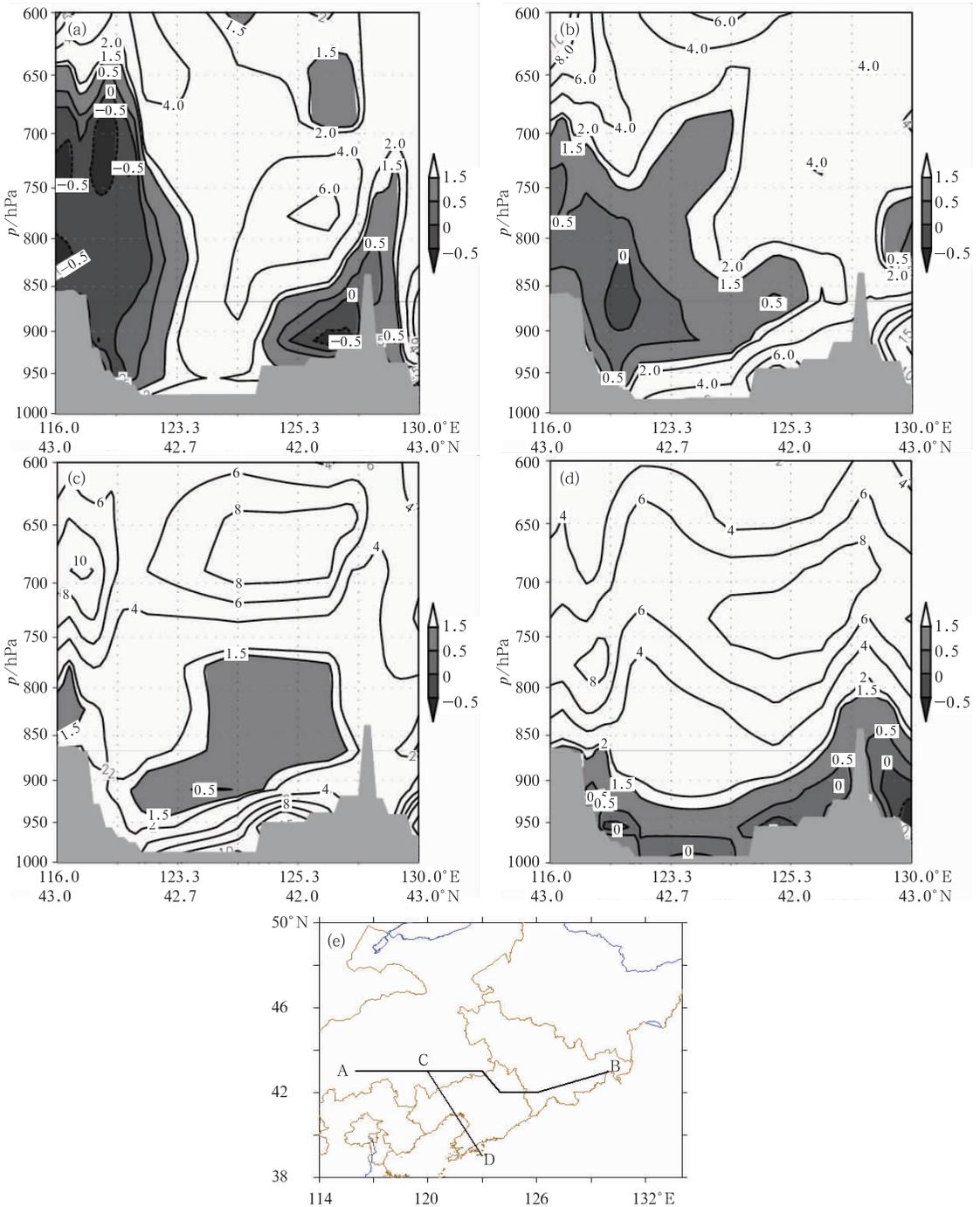


图9 2012年4月27日14(a)和20时(b)、28日02(c)和08时(d) $\partial\theta_v/\partial z$ (单位: $K \cdot km^{-1}$)沿AB(e)的垂直剖面

(图9e中AB线和CD线表示 $\partial\theta_v/\partial z$ 的垂直剖面图所在位置)

Fig.9 Vertical cross sections of $\partial\theta_v/\partial z$ (unit: $K \cdot km^{-1}$) along AB at (a) 14:00 BT and (b) 20:00 BT 27 April, and (c) 02:00 BT and (d) 08:00 BT 28 April 2012 (AB is shown in Fig. 9e)

度的减弱,悬浮其中的粒子直径将减小,浓度减弱,最后随着混合层与地面接通,出现沙尘沉降。

3.2 东南输送路径和动力沉降

混合层厚度的水平分布(图 8)显示沿东南路径混合层平流不明显,与东北路径有所不同,那么,辽东半岛东部的沙尘天气又是如何形成的? 图 10 给出了 $\partial\theta_v/\partial z$ 沿东南路径(图 9e 中 CD 线)的垂直分布,从 27 日 14—20 时(图 10a 和 10b),虚位温的垂直梯度小于 $1.5 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$ 的区域明显东扩南移,混合层向下游平流比较清楚,同时随着夜间辐射冷却

增强、近地面稳定层的加强使混合层悬空。28 日 02 时(图 10c),尽管混合层厚度进一步减小,但仍能看到混合层向下游的平流($1.5 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$ 等值线由 122°E 东移至 122.5°E),这为沙尘粒子向下游输送提供了较为直观的判断依据。28 日 08 时(图 10d)混合层接地但明显西退,这是西北部地形较高处混合层日变化的结果,与平流作用无关,此时无法根据混合层平流变化来定位沙尘沉降地,那么,沙尘粒子又是通过什么机制发生沉降的?

另外,我们看到从 27 日 20 时起,混合层以上的稳定层开始增强并向低层和下游扩展,28 日 08 时

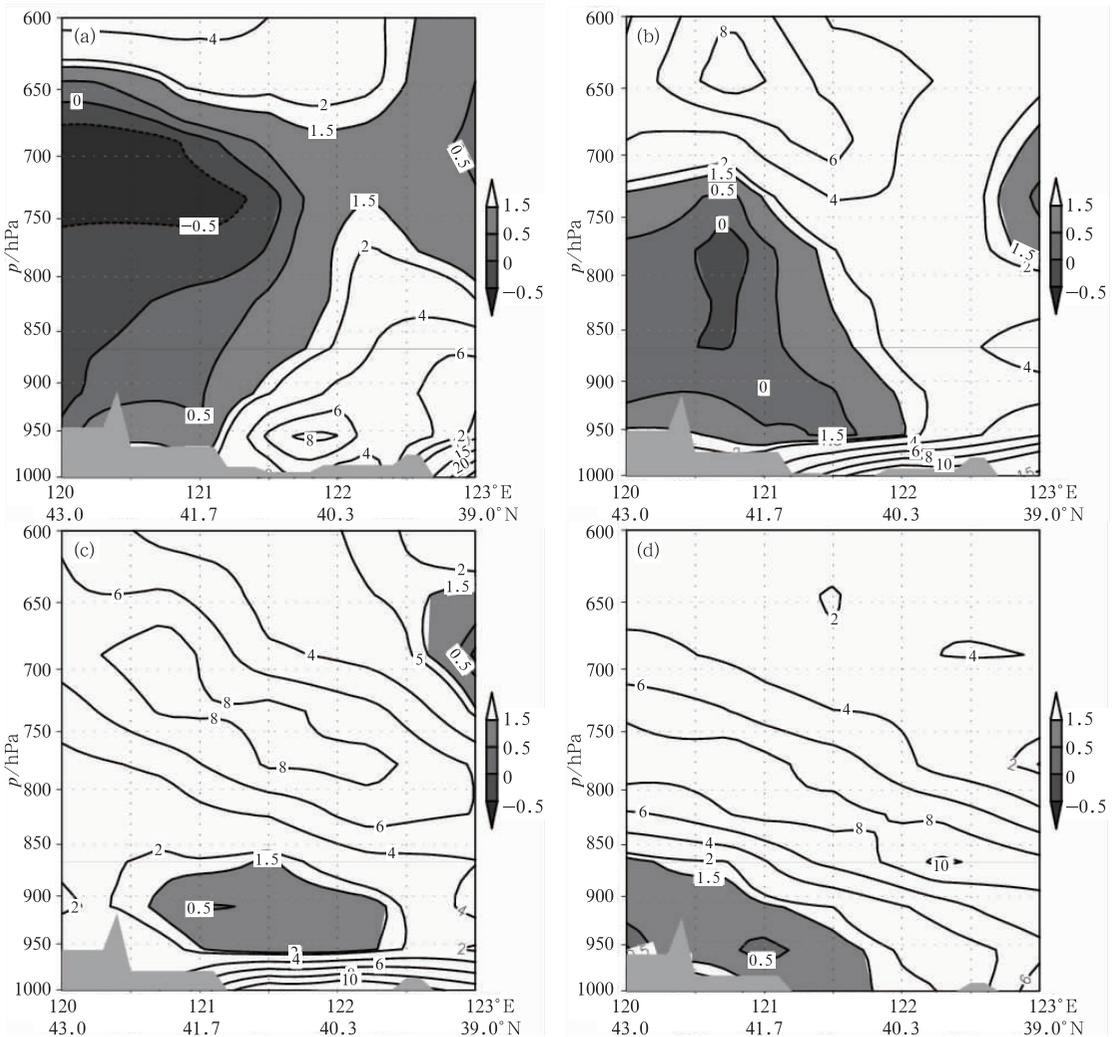


图 10 2012 年 4 月 27 日 14(a)和 20 时(b)、28 日 02(c)和 08 时(d) $\partial\theta_v/\partial z$ (单位: $^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$)沿 CD(图 9e)的垂直剖面

Fig. 10 Vertical cross sections of $\partial\theta_v/\partial z$ (unit: $^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$) along CD at (a) 14:00 BT and (b) 20:00 BT 27 April, and (c) 02:00 BT and (d) 08:00 BT 28 April 2012 (CD is shown in Fig. 9e)

稳定层高度达最低。由于稳定层中沙尘浓度随高度指数减小,其随高度迅速减小(Barenblatt et al, 1974),因而沙尘粒子基本分布在混合层与稳定层之间的范围内,大约位于 850 hPa 以下,较东北路径偏低,且其沉降方式与东北路径有所不同。

28 日 08 时,随着地面冷锋进一步东移,锋后冷空气出现分流,一部分沿东北路径向北汇入气旋内部,使气旋发生锢囚;另一部分沿东南路径南侵,在

冷锋尾部后面为低层反气旋所控制,渤海中部出现东风回流,辽东半岛东部恰好位于分流区(图 11a),地面辐散清楚(图略),且位于 850 hPa 锋区后部(图略),有明显的下沉运动(图 11b),这些均提供了有利的动力条件,有可能使沿混合层平流输送到锋区后部的沙尘粒子发生沉降。当沉降发生后,沙尘粒子处于低层东风回流的控制下(图 11a),使其在低层向西输送从而影响京津地区。

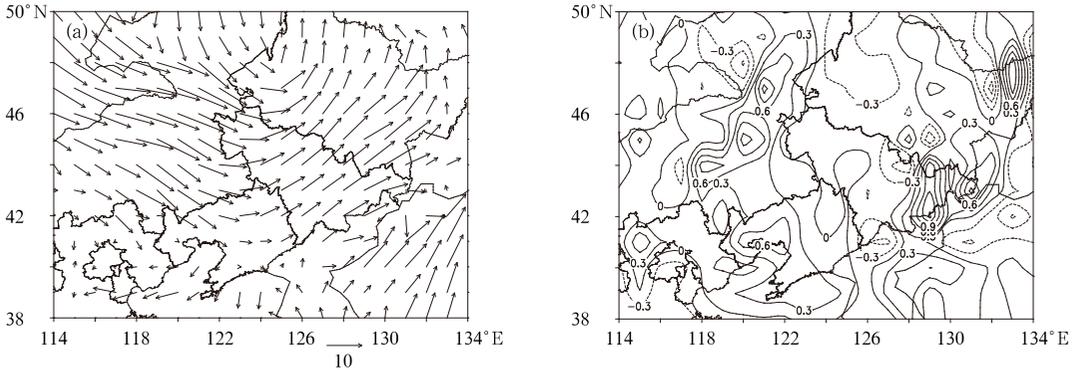


图 11 2012 年 4 月 28 日 08 时 10 m 风场(a,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和 850 hPa 垂直速度(b,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 11 Distributions of (a) 10 m wind (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and (b) vertical velocity (unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) at 850 hPa at 08:00 BT 28 April 2012

4 轨迹模拟

轨迹方法是分析污染物输送路径的一种简单直观的方法,为了验证上述影响北京的沙尘输送路径,本文运用美国国家海洋大气局(NOAA)研发的 HYSPLIT 模式来计算前、后向轨迹对其进行模拟。HYSPLIT 模型可模拟空气块轨迹,污染物扩散和沉降,还包括大气化学转化、沙尘暴起沙等模块。得益于其良好的兼容性和可靠性,HYSPLIT 在业务和科研上均得到广泛应用,模拟时间从几个小时到 14 天(Draxler et al, 1998; Rousseau et al, 2006; McGowan et al, 2008)。在沙尘输送研究中,HYSPLIT 可用于分析不同沙源地对目标区域的影响,也可以分析特定沙源地对不同区域的影响。Escudero 等利用 HYSPLIT 模拟分析了北非不同沙源地对伊比利亚半岛 PM_{10} 浓度的贡献(Escudero et al, 2006)。McGowan 等(2008)基于 HYSPLIT 前向轨迹模拟总结澳大利亚艾尔湖附近沙源地的沙尘轨迹的气候平均季节分布。

前向轨迹对起始时间点和地点非常敏感,选取时要有明确的针对性。在这里,为了考查沙源地沙尘天气对下游的影响路径,我们选取沙源区沙尘暴发生最集中的时刻为起始时间(4 月 27 日 14 时),且选取内蒙古中部不同纬度为起始地点进行计算。图 12 给出了在(42.5°N、115°E)、(43°N、115°E)和(44°N、115°E)处计算的起始高度分别为 2300、1800 和 800 m 的前向轨迹,发现在内蒙古中部 43°N,低层轨迹走向为东南方向,高层表现为先向东南然后转为向西的回流方向(图 12b);在 43°N 以北,从低层到高层轨迹走向均是东北方向(图 12c);而在 43°N 以南,不同高度表现为不同的路径,3000 m 以下为回流轨迹(图 12a),3100 m 以上转为东北方向(图略)。由于 3100 m(约 570 hPa)位于 600 hPa 以上的稳定层中(图 6),沙尘浓度随高度迅速减小,因此,暂不考虑该高度以上气流对下游的影响。另外,从轨迹的高度-时间剖面图上可以看出,东北方向的输送路径明显高于回流输送路径,与前面的分析基本一致。

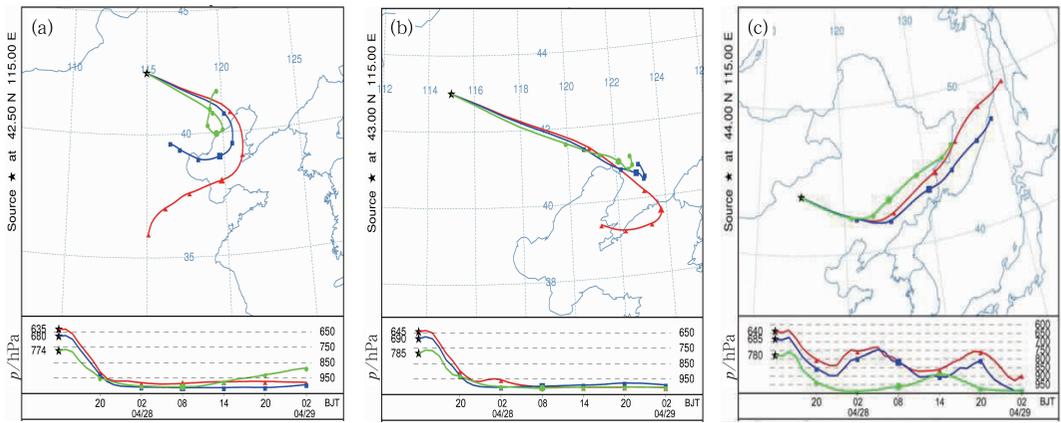


图 12 2012 年 4 月 27 日 14 时计算的起始高度分别为 2300(红色)、1800(蓝色)和 800 m(绿色)的前向轨迹

(a) 42.5°N, 115°E, (b) 43°N, 115°E, (c) 44°N, 115°E

Fig. 12 Forward trajectory at (a) (42.5°N, 115°E), (b) (43°N, 115°E) and (c) (44°N, 115°E) with starting time at 14:00 BT 27 April 2012 and with initial height of 2300 m (red), 1800 m (blue) and 800 m (green)

对影响北京地区的沙尘来源,利用后向轨迹进行了模拟。图 13 给出了由 4 月 29 日 08 时计算的起始高度为 200 m 的后向轨迹,计算时间为 24 h,可以清楚地看出沙尘粒子是向东南输送,而后在渤海转为向西移动,最后影响到京津地区,该路径的总体走向与前面的诊断分析基本一致。从轨迹的高度分布看,4 月 27 日 14 时左右,轨迹高度位于 650 hPa 附近,到 28 日 02 时位于近地层,比在辽东半岛观测到的扬沙天气稍早一些,可能与计算到的

轨迹偏西有关。总体看来,北京的扬沙天气基本上可以确定是由东风回流造成的。

5 结论与讨论

本文选取 2012 年 4 月 27—28 日影响北京的一次沙尘天气过程进行分析,主要通过探讨大气层结情况,对起沙机制、输送路径和沉降方式进行了较为深入的分析研究,得出了以下主要结论:

本次过程中,沙源地区的沙尘暴主要出现在地面冷锋和 500 hPa 槽后。由于近地层感热加热显著,削弱了冷锋后冷空气的影响,使近地层气温升高。同时,中低层冷平流的作用使近低层以上出现明显降温,这种下层升温上层降温的结果有利于形成不稳定层结,其最高可达 600 hPa,是沙尘天气能够影响下游地区的重要条件。

本文通过研究混合层厚度变化及其平流过程追踪沙尘天气的输送路径和定位沉降地,发现本次过程有两种传输路径。一种是沿辽宁北部向东而后转向东北方向,主要随混合层平流向下游移动,之后随着混合层的接地发生沉降,该路径影响高度较高。另一种是沿辽宁南部向东南方向移动,输送阶段混合层平流较清楚,但沉降时与东北路径明显不同,在辽东半岛东部地面辐散气流及下沉运动的作用下发生沉降,并随冷锋后冷高压南侧的东风向西输送影

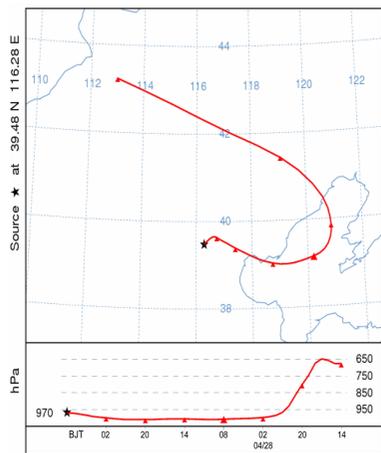


图 13 2012 年 4 月 29 日 08 时计算的起始高度为 200 m 的后向轨迹

Fig. 13 Backward trajectory with ending time at 08:00 BT 29 April 2012 and with initial height of 200 m

响北京地区。另外,由于混合层之上的稳定层明显下压,使沙尘输送高度偏低。利用 HYSPLIT 模式计算的前、后向轨迹也证实了上述两种输送路径。

参考文献

- 冯永忠,刘强,李永平,等. 2010. 近 55 年来中国西北地区沙尘暴发生时空特征分析. 西北农林科技大学学报, 38(5):188-192.
- 姜学恭,沈建国,胡英华. 2004. 沙尘暴过程中的混合层特征. 干旱区资源与环境, 18(1):63-71.
- 姜学恭,沈建国,刘景涛,等. 2003. 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, 61(5):606-620.
- 刘一. 2012. 2012 年 3—5 月 T639、ECMWF 及日本模式中期预报性能检验. 气象, 38(8):1017-1022.
- 彭艳,王钊,许新田. 2009. 西北地区一次大范围沙尘天气环流动力特征分析. 中国沙漠, 29(4):766-772.
- 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.
- 邱新法,曾燕,缪启龙. 2001. 我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径. 地理学报, 56(3):316-322.
- 王存忠,牛生杰,王兰宁. 2009a. 50 年来中国沙尘暴的多时间尺度变化特征. 大气科学学报, 32(4):507-512.
- 王存忠,牛生杰,周悦. 2009b. 中国风蚀起沙研究进展. 气象, 35(11):107-116.
- 王存忠,牛生杰,王兰宁. 2010. 中国 50a 来沙尘暴变化特征. 中国沙漠, 30(4):933-939.
- 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.
- 王丽娟,左洪超,陈继伟,等. 2012. 遥感估算绿洲-沙漠下垫面地表温度及感热通量. 高原气象, 31(3):646-656.
- 王式功,董光荣,陈惠忠,等. 2000. 沙尘暴研究进展. 中国沙漠, 20(4):349-356.
- 王式功,王金艳,周自江,等. 2003. 中国沙尘天气的区域特征. 地理学报, 58(2):193-200.
- 王式功,杨民,祁斌,等. 1999. 甘肃河西沙尘暴对兰州市空气污染的影响. 中国沙漠, 19(4):354-358.
- 杨晓玲,丁文魁,钱利,等. 2005. 一次区域性大风沙尘暴天气成因分析. 中国沙漠, 25(5):702-705.
- 岳平,牛生杰,刘晓云. 2008. 浑善达克沙地春季沙尘暴期间沙尘启动及传输特性研究. 中国沙漠, 28(2):227-230.
- 岳平,牛生杰,王连喜,等. 2006. 一次夏季强沙尘暴形成机理的综合分析. 中国沙漠, 26(3):370-374.
- 岳平,牛生杰,张强. 2007. 民勤一次沙尘暴天气过程的稳定度分析. 中国沙漠, 27(4):668-671.
- 张志刚,赵琳娜,矫梅燕,等. 2007. 一次引发强沙尘天气的快速发展蒙古气旋的诊断分析. 气象, 33(5):27-35.
- 周秀骥,徐祥德,颜鹏,等. 2002. 2000 年春季沙尘暴动力学特征. 中国科学 地球科学, 32(4):327-334.
- 周自江,王锡稳,牛若芸. 2002. 近 47 年中国沙尘暴气候特征研究. 应用气象学报, 13(2):193-200.
- Anthes R A, Warner T T. 1978. Development of hydrodynamics models for air pollution and other mesometeorological studies. Mon Wea Rev, 106(8):1045-1078.
- Arritt R W, Wilczak J M, Young G M. 1992. Observations and numerical modeling of an elevated mixed layer. Mon Wea Rev, 120(12):2869-2870.
- Barenblatt G I, Goltsyn G S. 1974. Local structure of mature dust storms. J Atmos Sci, 31(7):1917-1933.
- Carlson T N, Prospero J M. 1972. The large-scale movement of Saharan air outbreak over the northern equatorial Atlantic. J Appl Meteor, 11(2):283-297.
- Draxler R R, Hess G D. 1998. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition. Aust Meteor Mag, 47(4):295-308.
- Escudero M, Stein A, Draxler R R, et al. 2006. Determination of the contribution of northern Africa dust source areas to PM₁₀ concentrations over the central Iberian Peninsula using the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model (HYSPLIT) model. J Geophys Res, 111(D6):D06210.
- Mahrt L. 1976. Mixed layer moisture structure. Mon Wea Rev, 104(11):1403-1407.
- McGowan H, Clark A. 2008. Identification of dust transport pathways from Lake Eyre, Australia using Hysplit Atmos Environ, 42(29):6915-6925.
- Rousseau D D, Schevin P, Duzer D, et al. 2006. New evidence of long distance pollen transport to southern Greenland in late spring. Rev Palaeobot Palyno, 141(3-4):277-286.
- Takemi T. 1999. Structure and evolution of a severe squall line over the arid region in northwest China. Mon Wea Rev, 127(6):1301-1309.