

河西走廊东部一次强沙尘暴天气过程的 动力特征诊断分析

张春燕^{1,2}, 钱莉^{1,2}, 李天江¹

¹甘肃省武威市气象局, 甘肃 武威

²中国气象局云雾物理环境重点实验室, 北京

收稿日期: 2021年12月26日; 录用日期: 2022年1月21日; 发布日期: 2022年1月28日

摘要

利用地面气象观测站逐时风向风速、海平面气压、加密自动站观测数据等, 对2018年4月4日河西走廊东部极端大风沙尘暴天气的影响系统及动力条件等方面进行了分析。结果表明: 乌拉尔山阻塞高压快速发展北抬, 脊前冷涡异常南压, 引导极地冷空气爆发性南下, 冷锋后大风及太阳辐射日变化是造成河西走廊东部强沙尘暴的主要原因。沙尘暴前期, 大气干热, 当冷空气侵入, 冷暖空气剧烈交换, 近地层出现不稳定层结, 产生热力对流; 深厚的辐合辐散区与高空槽、地面冷锋的配合有利于上升运动, 使沙尘扬起。随着高空急流的进入, 动力抽吸加强, 低槽前暖空气上升, 槽后冷空气下沉, 加剧大气斜压不稳定, 出现位能向动能转换; 高层动量、动能向下传递, 最终造成地面风场加大, 沙尘暴天气爆发。

关键词

河西走廊东部, 强沙尘暴, 高低空急流, 垂直动量传输, 热力对流

Diagnostic Analysis of Dynamic Characteristics of a Strong Sandstorm Weather Process in Eastern Hexi Corridor

Chunyan Zhang^{1,2}, Li Qian^{1,2}, Tianjiang Li¹

¹Wuwei Meteorological Bureau of Gansu Province, Wuwei Gansu

²Key Laboratory of Cloud Physical Environment, China Meteorological Administration, Beijing

Received: Dec. 26th, 2021; accepted: Jan. 21st, 2022; published: Jan. 28th, 2022

文章引用: 张春燕, 钱莉, 李天江. 河西走廊东部一次强沙尘暴天气过程的动力特征诊断分析[J]. 气候变化研究快报, 2022, 11(1): 98-108. DOI: 10.12677/ccrl.2022.111011

Abstract

Based on hourly wind direction and speed, sea level pressure and automatic observation data from ground meteorological stations, the influence system and dynamic conditions of extreme gale and sandstorm weather in the eastern Hexi Corridor on April 4, 2018 were analyzed. The results show that the strong sandstorm in the eastern Hexi Corridor is mainly caused by the rapid development of Ural blocking high and the abnormal southward pressure of cold vortex in front of the ridge, which leads the explosive southward movement of cold air in the polar region. In the early stage of sandstorm, the atmosphere is dry and hot. When the cold air invades, the cold and warm air exchanges violently, and unstable stratification occurs near the stratum, resulting in thermal convection. The cooperation of the deep convergence and divergence area with the upper trough and the surface cold front is conducive to the upward movement and the dust is raised up. With the entry of upper-level jet stream, dynamic suction is strengthened, warm air rises in front of the low trough, and cold air sinks behind the trough, which worsens atmospheric baroclinicity instability and leads to potential energy conversion to kinetic energy. The momentum and kinetic energy of the high level are transferred downward, and eventually the surface wind field increases and sandstorm weather breaks out.

Keywords

Eastern Hexi Corridor, Strong Sandstorm, High and Low Jet, Vertical Momentum Transfer, Thermal Convection

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

春季大风沙尘暴是甘肃主要的灾害性天气之一，可造成房屋倒塌、人员伤亡，交通、供电受阻或中断等灾害性事故，并污染城市环境[1]。河西走廊大风沙尘暴天气频发，以往众多学者对沙尘暴和大风之间的关系研究较多，沙尘暴和大风的形成受系统性天气、下垫面、地形及季节等因素影响，既有相似的地方，也有区别[2]。强冷空气活动通常会形成大风或沙尘暴天气，但两者并不一定同时发生[3]。低空急流是造成地表大风并扬沙起尘的直接原因，有学者认为形成低空急流的能量主要来源于高层大气的动量下传[4] [5]，即大气高层的动量通过某种过程向下传播，而使低层动量增加风速加大的过程。但目前的研究仅仅表象地认为动量下传是低空急流形成的机制之一，只是将动量下传作为一个概念来解释暴雨、沙尘暴等的形成原因[6]。目前，针对典型沙尘暴天气的分析表明，乌拉尔山低槽和西西伯利亚冷锋爆发性南压是引发西北地区沙尘暴的主要天气系统，锋后强冷平流和高空动量有效下传造成地面大风，引发沙尘暴[7] [8]。另有研究表明，沙尘暴的爆发不仅与低层环流密切相关，沙尘暴爆发也是高低空环流配合发展的结果[9] [10]。由此可见，动量下传机制对沙尘暴的发生发展起着至关重要的作用，因此本文选取2018年4月4日发生在甘肃河西走廊东部的一次强沙尘暴天气过程，通过对环流形势、动力条件、热力条件的分析，对沙尘暴发生发展的动量下传过程进行诊断分析，以期得到沙尘暴天气的动量下传机制，更好地为河西走廊东部大风、沙尘暴天气的精细化网格预报提供经验。

2. 资料来源

利用地面气象观测站逐时风向风速、海平面气压、加密自动站观测数据、4月3日20:00~4日20:00强沙尘暴爆发前后亚欧范围内探空、地面监测等数据,采用天气学诊断方法,从高低空急流、辐合辐散、稳定度、温度平流及垂直环流等动力条件方面对此次沙尘暴动量下传机制进行诊断分析,以期得到河西走廊东部强沙尘暴天气发生的动力条件特征。以下文字和图中描述的时间均为北京时。

3. 天气实况和环流形势

3.1. 天气实况

2018年4月3~5日,受西伯利亚强冷空气东移南压影响,河西走廊东部出现一次灾害性大风沙尘暴天气过程(表1)。此次天气过程灾害种类繁多,大风、强沙尘暴、降雪、寒潮、霜冻等天气相继出现,其中河西走廊东部民勤县、凉州区均出现了大风强沙尘暴天气,最小能见度仅为275 m。这次沙尘暴天气还波及到内蒙、青海的部分地方,但河西走廊东部最为严重。此时正值农作物播种、出芽阶段,极端大风寒潮天气造成直接经济损失620.21万元。

Table 1. Actual sand-dust weather in eastern Hexi Corridor on April 4, 2018

表 1. 2018年4月4日河西走廊东部沙尘天气实况

| 站名 | 平均最大风速 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 瞬间最大风速 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 最小能见度 m | 天气现象 | 沙尘持续时间 |
|----|--|--|---------|------|----------------------------|
| 凉州 | 15.6 (7 级) | 23.0 (9 级) | 257 | 强沙尘暴 | 10:56~11:11 |
| 民勤 | 13.0 (6 级) | 21.0 (9 级) | 356 | 强沙尘暴 | 11:54~12:01 13:23~13:35 |

3.2. 环流形势演变

3.2.1. 高空环流形势

在2018年4月3日08:00时500 hPa高空图上,欧亚中高纬度为两槽两脊型,乌拉尔山地区阻塞高压发展加强,其脊前泰梅尔半岛处极涡发展加深,巴尔喀什湖以北有一低槽维持,受槽底部西北气流影响,新疆至河西地区天气晴朗。3日20时乌拉尔山高压脊加强东移北抬,与极涡间气压梯度加大,偏北急流加强,极涡冷中心强度达 -44°C ,极涡中心的横槽转竖加强南压,高纬度冷空气沿偏北急流迅速补充到新疆西部。对应700 hPa巴尔喀什湖北部到新疆中部锋区加强,锋区两侧最大温差达 26°C ,西北急流南压到乌鲁木齐附近,风速达 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。3日20时至4日08时,500 hPa上冷涡位置不断南下,槽后冷空气不断堆积,700 hPa上锋区持续加强,西北急流南下到民勤附近,风速加强到 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此次大风强沙尘暴天气发生在乌拉尔山阻塞高压发展加强北抬,脊前冷涡异常南压的环流背景下,冷平流加压和高低空动量下传的共同作用使得河西走廊东部出现了大风强沙尘暴天气。

3.2.2. 地面影响系统

4月2日~4日冷空气在东欧平原持续积聚,冷高压中心为1043 hPa,3日夜间冷高压主体分裂冷空气并快速南下至河西走廊西部并增强至1048 hPa,新疆到河西走廊西部温压梯度加大。24日08时,酒泉-张掖一带地面锋生函数 >0 (图1(a)),即地面冷锋在河西走廊生成,冷锋附近斜压性大,有利于垂直环流的发展与能量交换,冷锋后张掖地区地面西北风达 $10\sim 12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,永昌风速达 $20.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 并伴有扬沙天

气, 有利于沙尘暴天气的开始。08:00~11:00, 地面冷锋继续加强并东移进入武威地区, 由于上午太阳辐射强烈, 位于甘肃中东部地面热低压加强, 热力作用加大了地面冷锋前后的气压梯度和温度梯度, 地面冷锋增强, 冷锋后 $10\sim 16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 西北风自西向东影响武威地区, 形成了凉州、民勤的强沙尘暴天气(图 1(b))。气温日变化造成冷锋移至河西走廊东部产生强烈锋生是造成此次强沙尘暴爆发的主要原因。

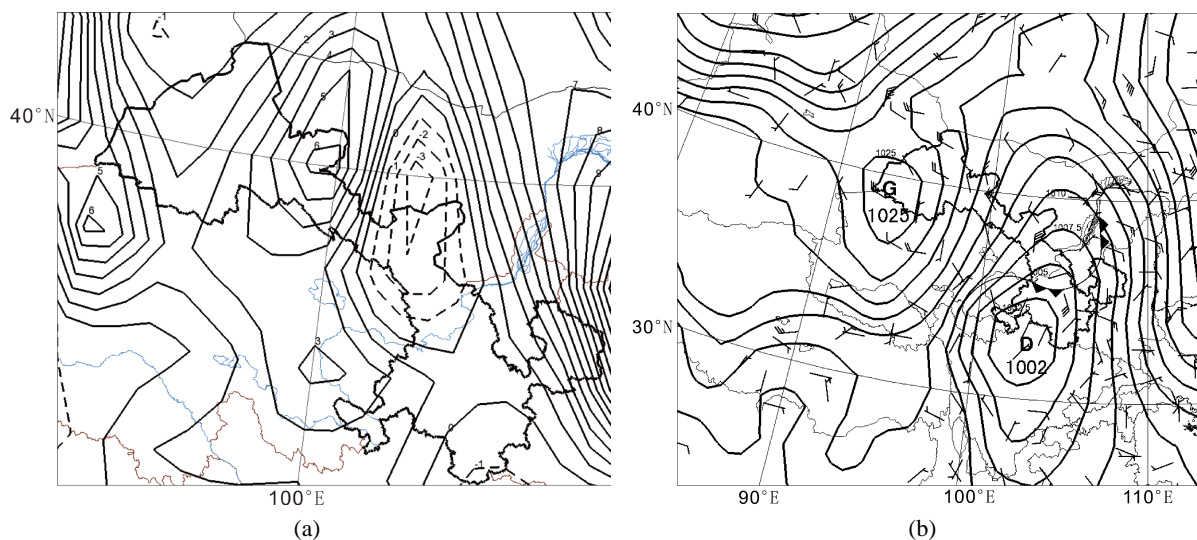


Figure 1. Ground front genesis function at 08:00 on April 4 (unit: $10^{-5}\text{ K}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) (a) and ground situation at 11:00 on April 4 (b)
图 1. 4月4日 08:00 地面锋生函数(单位: $10^{-5}\text{ K}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) (a)和4月4日 11:00 地面形势(b)

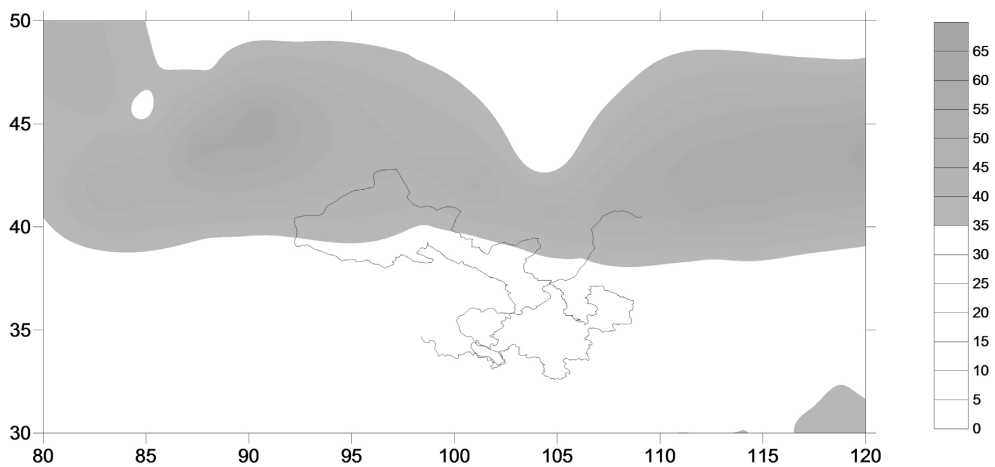
4. 动力特征诊断分析

4.1. 高、低空急流特征

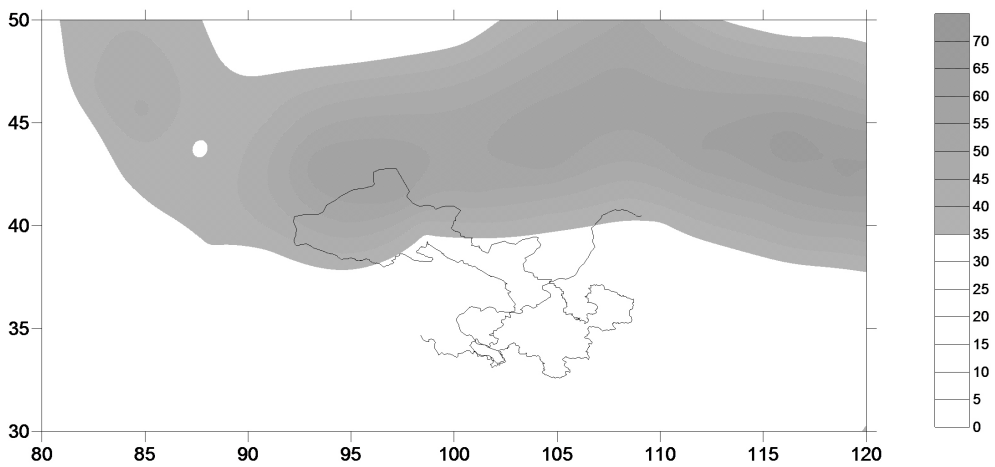
沙尘暴爆发时, 一般高空有强风区[11] [12], 大风下传造成动量下传, 卷起地面沙尘形成沙尘暴[13] [14] [15]。天气前期, 300 hPa 极锋急流中心位于 50°N 附近, 由于乌拉尔山高压脊和巴尔喀什湖以北低槽发展东移, 极锋锋区底部 $35\sim 45\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 急流不断东移南下至河西走廊西部(图 2(a)), 分析酒泉风速场时间-空间垂直剖面图, 2日夜间~3日白天, $36\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 急流位于 200~300 hPa, 随着时间推移, 动量向下传递, 急流向中低层延伸, 4日 08:00, 酒泉 500、700 hPa 出现西北风急流, 最大风速分别为 24 、 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 2(c)), 酒泉站出现 $13.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (平均最大风速)大风天气。4日 08:00, 300 hPa 极锋急流东移南压, 民勤位于急流区底部(图 2(b)), 3日 08:00~4日 05:00 高空急流中心在东移南压过程中减弱至 $34\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 但也存在动量下传, 4日 08:00~12:00 民勤 600~700 hPa 风速出现 $12\sim 16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的中低空急流(图 2(d)), 14:00 以后中低空急流移出民勤, 大风、沙尘暴天气结束。大风、沙尘暴天气出现在高空急流($\geq 35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 中低空急流($\geq 12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)附近。从酒泉和民勤的动量下传特征对比分析可知, 预报区越靠近高空急流核, 动量下传特征越明显, 近地层风速越大。

4.2. 辐合辐散

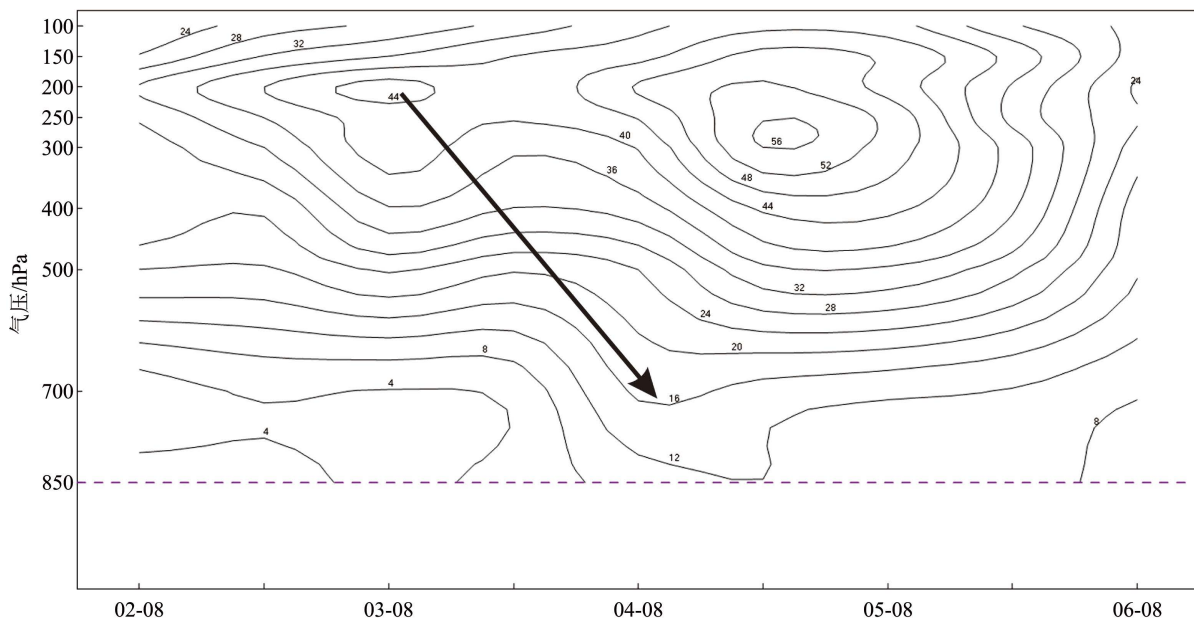
4月3日 20时, 民勤地区为整层的强辐合区, 3日 23点民勤-武威一线, 700 hPa 以下转为辐合区, 700~200 hPa 为辐散区, 4日 08时, 随着各层风速增大, 民勤地区出现深厚的辐合辐散运动, 500 hPa 以下为辐合区, 500~200 hPa 为辐散层, 500 hPa 为无辐散层, 辐合中心位于近地层, 中心强度达到 $15 \times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$, 低层强辐合, 高层强辐散, 有利于动力抽吸的上升运动(图 3)。此时, 深厚的辐合区位于高空槽强锋区和地面冷锋前部, 这种结构易于发生近地层大风和上升运动, 有利于地面起沙及向上输送形成沙尘暴。



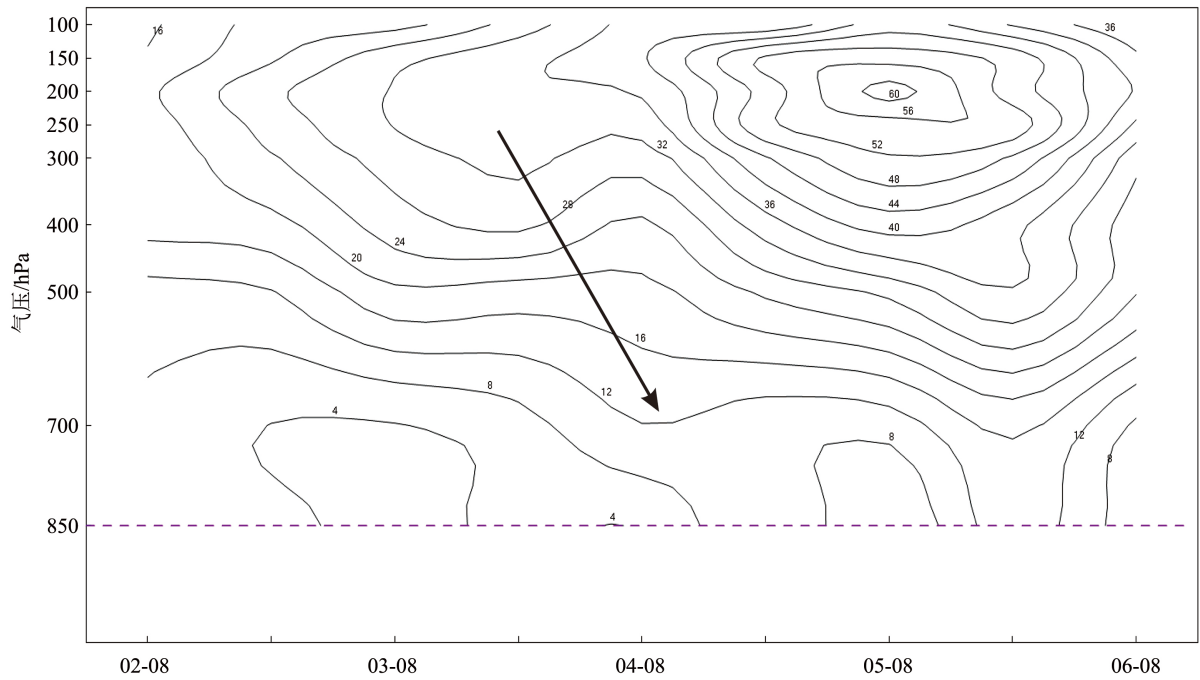
(a) 4月3日 20:00 300 hPa 高空急流



(b) 4月4日 08:00 300 hPa 高空急流



(c) 酒泉风速时间 - 空间剖面图



(d) 民勤风速时间 - 空间剖面图

Figure 2. Time-space profile characteristics of 300 hPa jet shadow in Hexi Corridor (unit: $m \cdot s^{-1}$) and wind speed field in Jiuquan and Minqin (unit: $m \cdot s^{-1}$)

图 2. 河西走廊 300 hPa 急流阴影(单位: $m \cdot s^{-1}$)及酒泉、民勤风速场(单位: $m \cdot s^{-1}$)时间 - 空间剖面特征

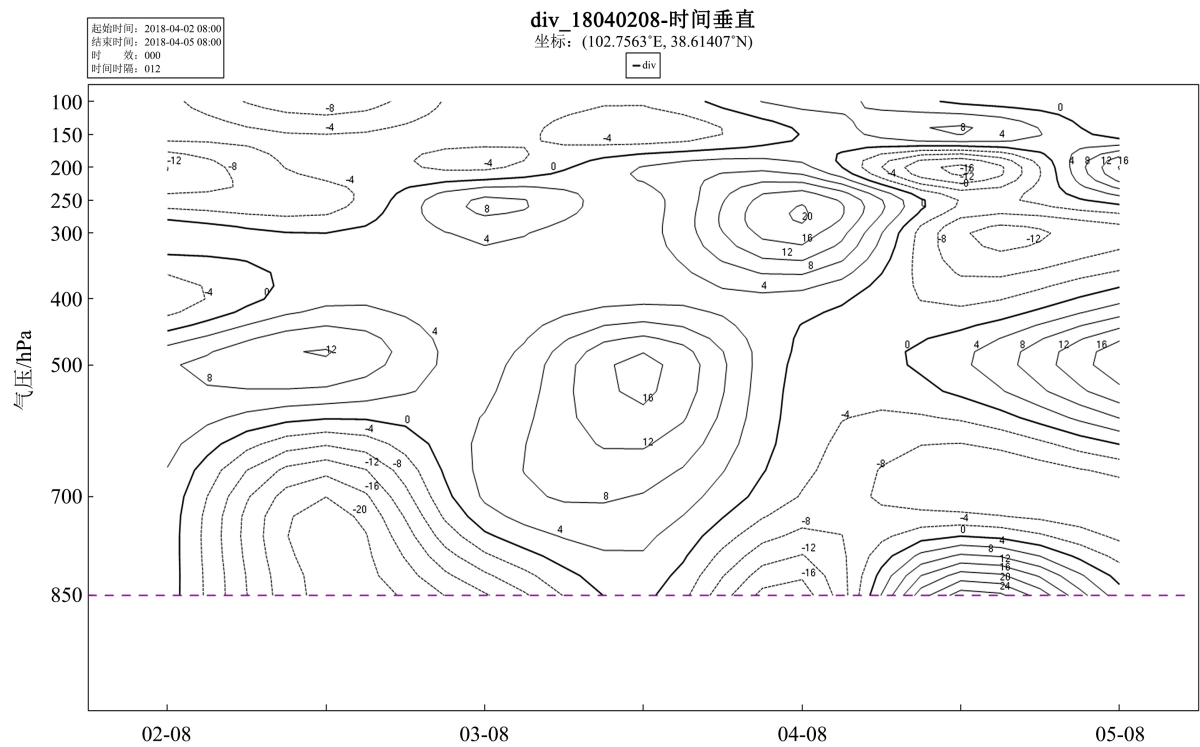


Figure 3. Characteristics of the time-space profile of Minqin divergence field ($10^{-5} s^{-1}$) from 08:00 to 08:00 on April 2, 2018

图 3. 2018 年 4 月 2 日 08:00~5 日 08:00 民勤散度场($10^{-5} s^{-1}$)时间 - 空间剖面图特征

4.3. 稳定度

根据 2018 年 4 月 3 日 20 时民勤站 V- θ 曲线分析(图 4), 在沙尘暴出现前, 上下层风垂直切变明显, 低层 850 hPa 为东南风, 700 hPa 以上为偏西风, 且上层风速大于低层风速, 有利于垂直运动的发展, 满足潜在的动力不稳定条件。850 hPa~700 hPa 位温 θ 与 θ_{se} 出现向左弯曲, 在此高度层大气层结为对流性不稳定层结。400~250 hPa 水汽饱和充足, 400 hPa 以下水汽不足, 呈现上层湿下层干的分布特征, 存在强的潜在不稳定。由 V- θ 曲线分析, 3 日 20 时民勤地区存在动力和对流性不稳定, 当有冷平流侵入, 则可释放能量, 产生强的垂直运动, 使高空动量下传, 增大低层风速, 加强沙尘暴的发展。

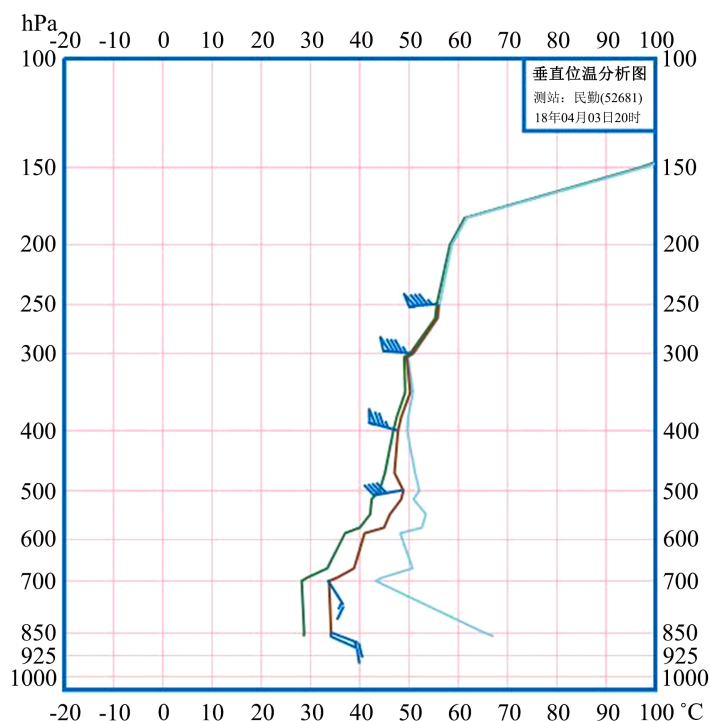


Figure 4. V- θ curve of Minqin at 20 o'clock on April 3
图 4. 4 月 3 日 20 时民勤 V- θ 曲线

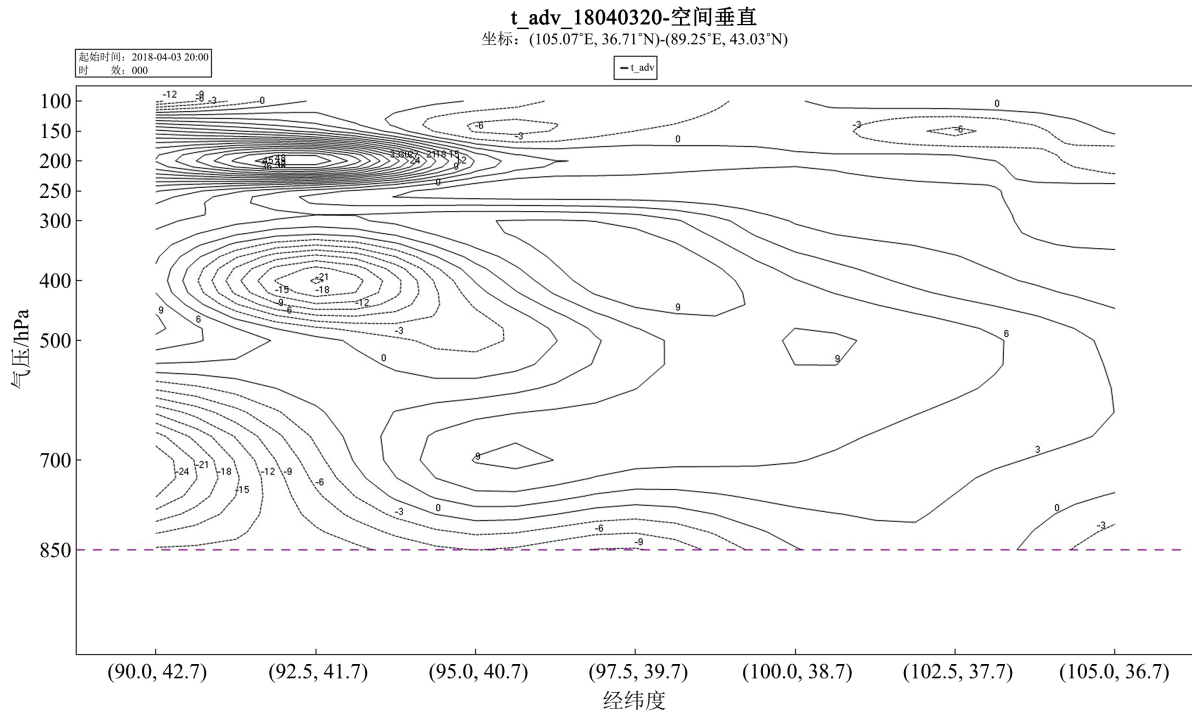
4.4. 温度平流及垂直环流

温度平流对天气系统的发展非常重要[16] [17] [18], 冷暖空气的垂直运动是大气能量转换的重要方式[19] [20], 因而对温度平流、垂直环流、垂直能量转换进行分析。定义单位截面铅直气柱中的动能 $K = \frac{1}{g} \int_0^p \frac{v^2}{2} dp$,

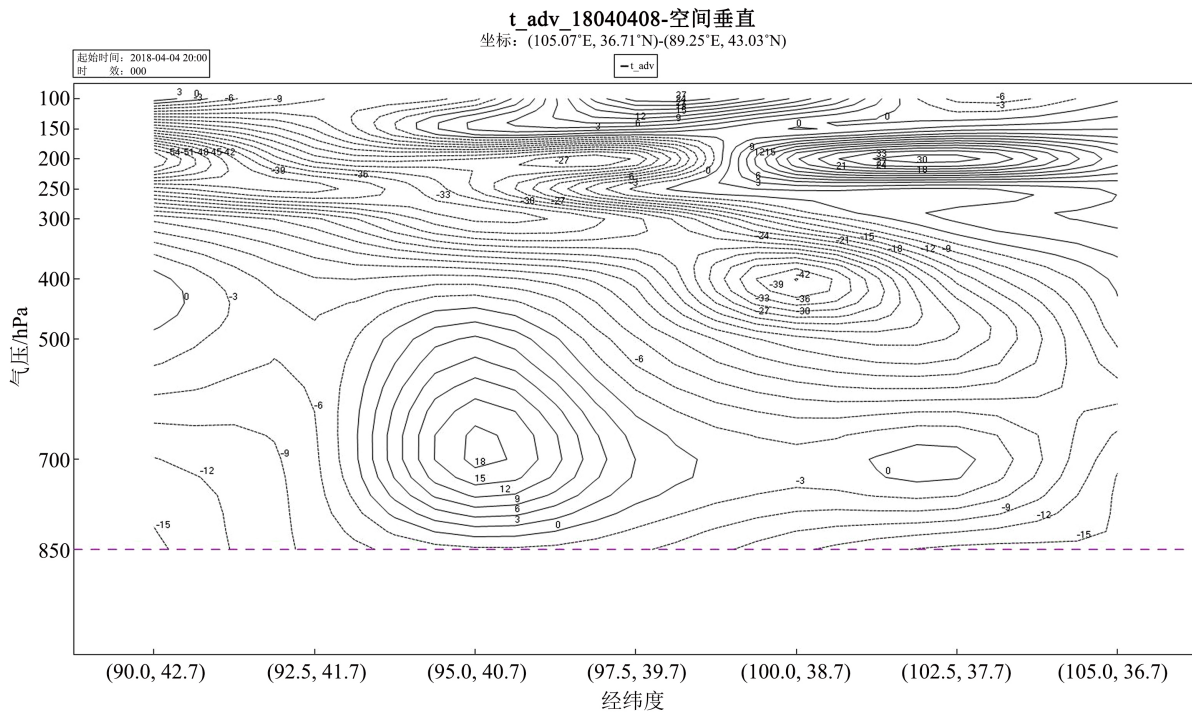
位能 $P = \frac{1}{g} \int_0^p c_p T dp$, 某纬向动能、位能为算数平均[21] [22] [23]。

沙尘暴前期, 河西走廊东部地区仅有弱的暖平流, 整层以下沉运动为主, 大气静稳。4 月 3 日夜间巴尔喀什湖冷槽东移南压, 河西走廊西部地区(92°~95°E)温度平流(图 5(a))和垂直运动加强(图 5(c)), 在 400 hPa 上有一条冷舌先开始侵入到河西走廊西部上空, 中心强度为 $21 \times 10^{-5} \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$, 造成河西西部地区上空冷暖空气交绥, 锋区加强, 中高层干冷空气开始扰动, 大气向不稳定状态发展。4 日 08 时, 河西走廊中部地区(95°~100°E), 500 hPa 至 200 hPa 为冷平流区, 近地面层至 500 hPa 为暖平流区(图 5(b)), 形成上冷下暖的不稳定层结, 冷空气下沉, 暖空气上升过程中, 平均位能减少, 平均动能增加, 出现位能向

动能的转换,同时冷空气下沉也将高空风下传,最终在河西走廊中部地区中层风速均 $>15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,地面出现 $18.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西北大风。河西走廊东部地区($100^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$),近地面层至 300 hPa 为深厚冷平流, $42\times 10^{-5}\text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ 冷平流中心位于 400 hPa ,整层大气为强烈的上升运动(图 5(d)),有利于沙尘上扬,出现沙暴天气。



(a) 2018年4月3日20时 tadv



(b) 2018年4月4日08时 tadv

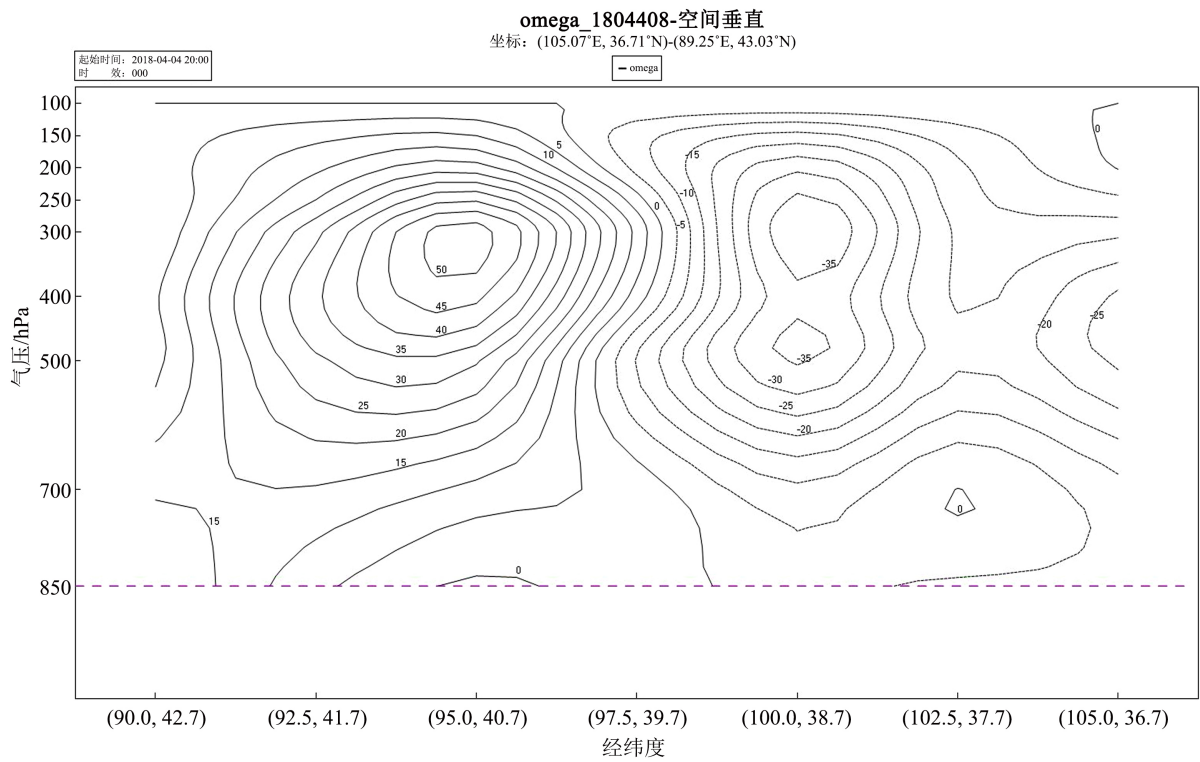
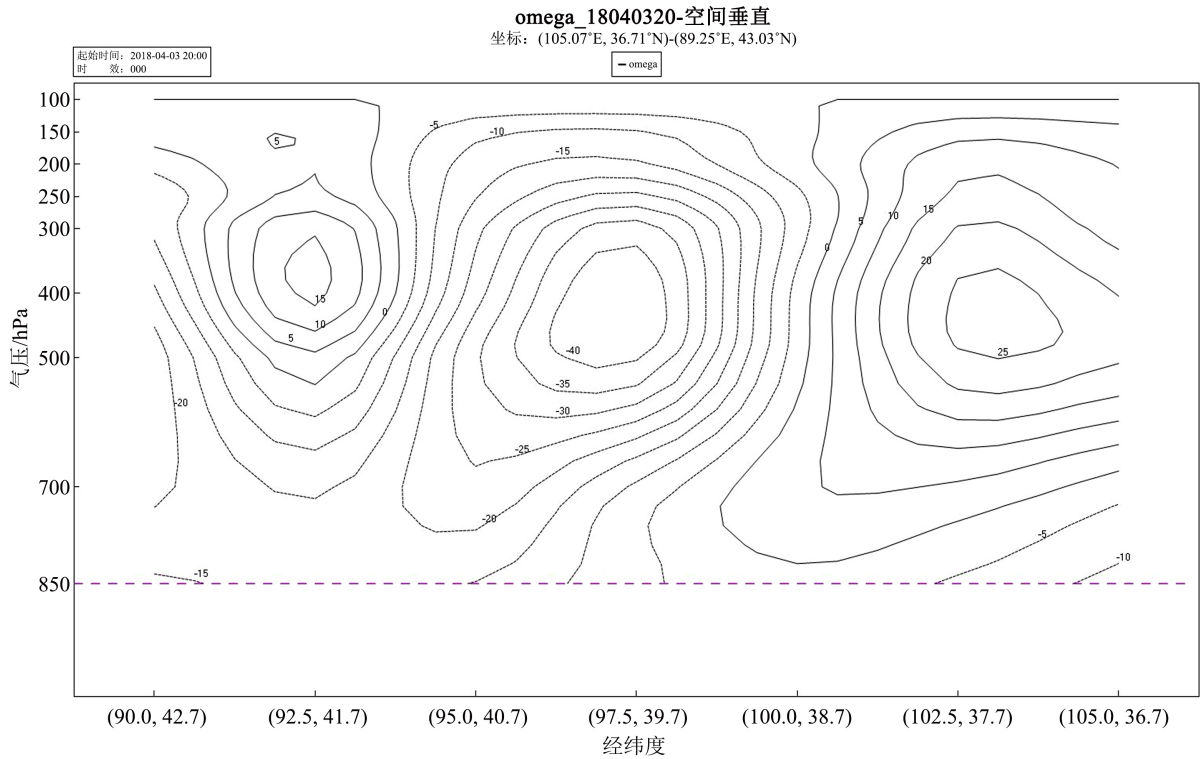


Figure 5. Temperature advection (unit: $10^{-5} \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$) and vertical velocity (unit: $10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) sections in Hexi Corridor
图 5. 河西走廊温度平流(单位: $10^{-5} \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$)、垂直速度(单位: $10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)剖面

此次天气过程,冷平流引导高空低槽、地面冷锋东移南压,冷暖空气交绥即有利于锋生又造成大气斜压不稳定。同时,冷空气下沉、暖空气上升运动,将位能转换成动能,且冷空气下沉时将高空动量下传至地面,使近地层风速加大,河西走廊东部强烈的上升运动将沙尘扬起,造成沙尘暴天气。

冷暖空气剧烈交换使近地层层结不稳定,激发热力对流,300 hPa 高空急流轴附近的辐合辐散提供了动力抽吸,加强垂直运动,地面附近沙尘不断被卷入空中并输送。同时,极锋急流快速东移南下过程中,位能转换为动能,风速加大,动量下传后强风速向中低层及近地层延伸,风速加强,最终造成河西走廊东部地区的强沙尘暴天气。

5. 结论

综上所述,2018年4月4日河西走廊东部强沙尘暴天气的环流及动力结构有以下几个主要特征:

1) 乌拉尔山阻塞高压快速发展北抬,脊前冷涡异常南压,引导极地冷空气爆发性南下,东欧平原冷高压分裂冷空气快速南下至河西走廊西部并增强,与甘肃中东部热低压间形成剧烈的气压梯度、变压梯度和地面冷锋,冷锋后大风及太阳辐射日变化是造成河西走廊东部强沙尘暴的主要原因。

2) 300 hPa 极锋急流是造成此次强沙尘暴的主要高空动力系统,沙尘暴出现在 $\geq 35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的强风速带内,通过动量下传,低空风速加强形成急流。大风沙尘区越靠近急流核,动量下传特征越明显。

3) 高低空急流轴附近大气的辐合辐散运动增强。高空辐散低层辐合的垂直结构,有利于动力抽吸,形成近地层大风和上升运动。

沙尘暴前期,大气干热,当冷空气侵入,冷暖空气剧烈交换,近地层出现不稳定层结,产生热力对流;深厚的辐合辐散区与高空槽、地面冷锋的配合有利于上升运动,使沙尘扬起。随着高空急流的进入,动力抽吸加强,低槽前暖空气上升,槽后冷空气下沉,加剧大气斜压不稳定,出现位能向动能转换;高层动量、动能向下传递,最终造成地面风场加大,沙尘暴天气爆发。

基金项目

西北区域人工影响天气能力建设项目研究试验项目“祁连山地形云人工增雨(雪)技术研究试验(C-II4)”资助。

参考文献

- [1] 杨先荣,王劲松,张锦泉,韦伯龙,刘洪,邓吉录. 高空急流带对甘肃沙尘暴强度的影响[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4): 1046-1051.
- [2] 于波,荆浩,孙继松,张文龙. 北京夏季一次罕见偏南大风天气的成因分析[J]. 高原气象, 2017, 36(6): 1674-1681.
- [3] 顾钧禧. 大气科学辞典[M]. 北京: 气象出版社, 1994: 154.
- [4] 张洪英,王英,赵敏芬,等. 低空冷式切变线引发区域性大暴雨成因分析[J]. 气象科技, 2010, 38(S1): 29-34.
- [5] Hacker, J.P., Mckendry, I.G. and Stull, R.B. (2001) Modeled Downward Transport of a Passive Tracer over Western North America during an Asian Dust Event in April 1998. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **40**, 1617-1628. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040%3C1617:MDTOAP%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040%3C1617:MDTOAP%3E2.0.CO;2)
- [6] Pauley, P.M., Baker, N.L. and Barker, E.H. (1996) An Observational Study of the “Interstate 5” Dust Storm Case. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77**, 693-720. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077%3C0693:AOSOTD%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077%3C0693:AOSOTD%3E2.0.CO;2)
- [7] 王敏忠,魏文寿,杨莲梅,李彦华,肖书君,艾力·买买提明. 塔里木盆地一次东灌型沙尘暴环流动力结构分析[J]. 中国沙漠, 2008, 28(2): 370-376.
- [8] 赵翠光,刘还珠. 我国北方沙尘暴发生的环流形势分析[J]. 应用气象学报, 2004, 15(2): 245-250.
- [9] 程海霞,丁治英,帅克杰. 近 5a 我国沙尘暴与高空急流关系的统计分析[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 891-896.

- [10] 马禹, 王旭, 肖开提, 刘小枚, 谭江. 天山北麓一例黑风暴天气的成因[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(3): 343-350.
- [11] 刘宁微, 马雁军, 刘晓梅, 周德平, 王扬锋, 王若男. 蒙古气旋引发辽宁沙尘暴天气过程的数值模拟[J]. 中国沙漠, 2011, 31(1): 217-222.
- [12] 王益柏, 袁勇, 郭骞, 张根生, 袁博, 元慧慧, 徐斌. 一次强沙尘暴过程的动量下传诊断分析[J]. 气象科技, 2012, 40(5): 820-826.
- [13] 陈楠, 陈晓光, 赵光平. 宁夏不同强度沙尘暴环流差异特征的对比分析[J]. 高原气象, 2006, 25(4): 680-686.
- [14] 张文军, 李健, 杨庆华, 田庆明, 王海燕. 河西走廊西部一次极端大风天气过程3次风速波动的动力条件分析[J]. 高原气象, 2019, 38(5): 1082-1090.
- [15] 李娜, 闵月, 汤浩, 刘雯. “4·23”南疆翻山型强沙尘暴动力结构特征分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 792-800.
- [16] 钱莉, 杨永龙, 王荣喆. 河西走廊“2010.4.24”黑风成因分析[J]. 高原气象, 2011, 30(6): 1653-1660.
- [17] 王伏村, 许东蓓, 王宝鉴, 付有智. 河西走廊一次特强沙尘暴的热力动力特征分析[J]. 气象, 2012, 38(8): 950-959.
- [18] 董安祥, 胡文超, 张宇, 刘德祥. 河西走廊特殊地形与大风的关系探讨[J]. 冰川冻土, 2014, 36(2): 347-351.
- [19] 李耀辉, 沈洁, 赵建华, 胡田田, 尹晗. 地形对民勤沙尘暴发生发展影响的模拟研究——以一次特强沙尘暴为例[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 849-860.
- [20] 孙永刚, 孟雪峰, 荀学义, 袁慧敏, 仲夏. 温度平流在沙尘暴和大风天气预报中的差异分析[J]. 气象, 2014, 40(11): 1302-1307.
- [21] 谭志强, 桑建人, 纪晓玲, 邵建, 朱晓炜. 宁夏一次大风扬沙天气过程机制分析[J]. 干旱区地理, 2017, 40(6): 1134-1142.
- [22] 邬仲勋, 王式功, 尚可政, 杨子凡, 陈锋. 冷空气大风过程中动量下传特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(2): 467-473.
- [23] 邬仲勋. 新疆东部至甘肃河西西部铁路沿线大风天气气候特征及其成因研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2016.