

李岩瑛,张春燕,张爱萍,等,2022.河西走廊春季沙尘暴大气边界层垂直结构特征[J].气象,48(9):1171-1185. Li Y Y, Zhang C Y, Zhang A P, et al, 2022. Vertical structure characteristics of atmospheric boundary layer in spring sandstorm over Hexi Corridor[J]. Meteor Mon, 48(9): 1171-1185(in Chinese).

## 河西走廊春季沙尘暴大气边界层垂直结构特征<sup>\*</sup>

李岩瑛<sup>1,2</sup> 张春燕<sup>1</sup> 张爱萍<sup>3</sup> 杨吉萍<sup>3</sup> 陈 英<sup>3</sup> 聂 鑫<sup>2</sup>

1 甘肃省武威市气象局,武威 733000

2 中国气象局兰州干旱气象研究所,甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/  
中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室,兰州 730020

3 甘肃省民勤县气象局,民勤 733399

**提 要:** 沙尘暴是河西走廊春季最严重的灾害天气之一,弄清沙尘暴的大气边界层特征,是提高其预报预警水平和减轻危害的重要手段。应用河西走廊敦煌、酒泉、张掖、民勤等 4 个站 2006—2016 年春季逐日 08 时(北京时,下同)和 20 时高分辨率探空资料和地面风沙观测资料,探讨该地区不同站点从地面到高空 5 km 高度范围内沙尘强度、沙尘暴日变化和持续时间,以及不同环流形势下的大气边界层垂直结构变化特征。结果表明:沙尘暴 08 时逆温强度在  $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$  以上,相对湿度  $<40\%$  干层厚度超过 3 km,  $<30\%$  干层厚度超过 1.5 km 且 20 时最大风速  $>13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。受海拔高度、地形和下垫面土壤性质影响,低层风场具有明显的日变化,山谷风效应显著;敦煌和民勤气温高,空气干燥,风速大且沙尘多;张掖受走廊狭管效应影响,风速较大。沙尘暴中敦煌低层以东南风到西南风为主,高层及其他站以偏西风到西北风为主。沙尘暴发生时边界层内气象条件日变化总体而言:上午干暖,下午冷湿风速较大,最大风速为  $17.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,出现在 0.9 km 高度;近地面夜间和上午为南风,下午为西风,夜间风速较小且空气干燥。沙尘暴持续时间长时,早晚气温低,持续时间 5 h 以下的 08 时大气干层较厚,达 2.85 km;而 5 h 以上的 20 时大气干层较厚,达 1.05 km。相对湿度  $\leq 30\%$  时大气干层上午和夜间较厚,下午浅薄,温度露点差最小阈值为  $16\sim 17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最大高度在 2.85~3.00 km。不同沙尘暴环流形势下:脊型早上干冷风速大,0.75 km 高度处风速最大达  $14.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;西风槽型下午湿冷风速大,0.9 km 高度处风速最大达  $15.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;而西风气流型近地层冷干,风速小,但早上 1.2~3.5 km 高度和晚上 2.4 km 以上高层风速较大。

**关键词:** 垂直结构特征,大气边界层,日变化和持续时间,环流形势,河西走廊,春季沙尘暴

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.080501

## Vertical Structure Characteristics of Atmospheric Boundary Layer in Spring Sandstorm over Hexi Corridor

LI Yanying<sup>1,2</sup> ZHANG Chunyan<sup>1</sup> ZHANG Aiping<sup>3</sup> YANG Jiping<sup>3</sup> CHEN Ying<sup>3</sup> NIE Xin<sup>2</sup>

1 Wuwei Meteorological Office of Gansu Province, Wuwei 733000

2 Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province/Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of CMA/Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020

3 Minqin Meteorological Station of Gansu Province, Minqin 733399

**Abstract:** Sandstorm is one of the most serious disaster weather in the spring of Hexi Corridor. Understanding the atmospheric boundary layer characteristics of sandstorms is an important means to improve the prediction and early warning level and reduce the impact of sandstorm. Using daily high-resolution sounding data at 08:00 BT and 20:00 BT and the ground wind-sand observation data from Dunhuang,

\* 国家自然科学基金面上项目(41975015)资助

2021 年 3 月 18 日收稿; 2021 年 8 月 5 日收修定稿

第一作者:李岩瑛,主要从事天气预报及研究工作. E-mail:lyyqxj@163.com

Jiuquan, Zhangye and Minqin stations over Hexi Corridor in the spring of 2006–2016, this article investigates the variation characteristics of vertical structure of atmospheric boundary layer in terms of dust intensity at different stations, daily change and duration of duststorm as well as duststorms under different circulation situations from surface up to 5 km height. The results show that the intensity of temperature inversion in the presence of sandstorm at 08:00 BT was above  $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$ , the dry layer thickness of less than 40% relative humidity was more than 3 km, the dry layer thickness of less than 30% relative humidity was more than 1.5 km and the maximum wind speed at 20:00 BT was more than  $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Due to the influence of altitude, topography and underlying soil properties, the lower wind field has obvious diurnal variation and valley wind effect. It was high temperature, dry air, big wind speed and more dust in Dunhuang and Minqin. Zhangye had heigher wind speed affected by the narrow tube effect in the corridor. The lower layer of Dunhuang was mainly southeast to southwest wind, but its upper level and other stations were mainly west to northwest wind. For daily variation of meteorological conditions in the boundary layer at the time of sandstorm, it was dry and warm in morning, but wet, cold and strong wind in the afternoon. The maximum wind speed was  $17.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , occurring at height of 0.9 km, south wind occurred near ground from night to morning, west wind occurred in afternoon, dry and light wind occurred over night. When the sandstorm lasted for a long time, the temperature was low in the morning and evening, and the dry layer of the atmosphere with relative humidity  $\leq 30\%$  was 2.85 km thick at 08:00 BT in less than 5 hours, while the dry layer being 1.05 km thick lasted for more than 5 hours at 20:00 BT and it was thicker in the morning and night, shallow in the afternoon. The minimum threshold of depression of the dew point was  $16\text{--}17\text{ }^{\circ}\text{C}$  with maximum height of 2.85–3.00 km. Under different sandstorm circulation conditions, the ridge type was dry and cold in the morning, the maximum wind speed was  $14.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  at 0.75 km height, the trough type was wet with cold and strong wind in the afternoon, and the maximum wind speed was  $15.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  at 0.9 km height; and the westerly type was dry with cold and light wind blowing near the ground, but wind speed was stronger at the height between 1.2–3.5 km in the morning and higher than 2.4 km in the evening.

**Key words:** vertical structure characteristic, atmospheric boundary layer, diurnal variation and duration, circulation situation, Hexi Corridor, spring sandstorm

## 引 言

河西走廊是我国沙尘暴发生最多而且灾情最重的地区之一,冬、春季污染严重,气溶胶光学厚度值最大(Filonchyk et al, 2020),该区为沙漠大地貌背景,地表粉尘含量高,干旱水分少,植被少,因而在较强风力作用下,沙尘事件频发(程鹏, 2011; 孔锋, 2020; 李宽等, 2019)。沙尘暴天气是造成河西走廊缺血性心脏病患者死亡的危险因素之一(Li et al, 2020),该区春季沙尘暴发生多而灾情重(李岩瑛等, 2014),常发生远距离跨太平洋运输,使大量风积尘沉积在亚洲大陆和北太平洋(Wei et al, 2020),甚至输送到阿拉斯加和加拿大西海岸(Guo et al, 2017; Liu et al, 2019),其产生的沙尘气溶胶对北半球空

气质量、海洋生态环境及太阳辐射平衡等有复杂影响(黄悦等, 2021; Chen et al, 2020; 张鹏等, 2018)。近 30 年来河西走廊的沙尘暴发生次数减弱而强度增强(蒋盈沙等, 2019),主要原因包括:第一,沙尘暴发生频率变化与气温变化呈负相关关系,如:丰华等(2012)揭示了近年来,由于气温整体升高导致我国沙尘暴发生频率呈整体下降趋势;第二,沙尘暴频次减小也可能与新疆和内蒙古等沙源区向暖湿化发展有关,由暖干化向暖湿化转型对沙尘暴的发生有一定的弱化作用(姚俊强等, 2013);第三,还与当地浅层土壤湿度、大气湿度和风速有关(常兆丰等, 2011; 张虎等, 2020),造成该区强沙尘暴的主要因素是水文和风力,其次是源范围的扩大(Guan et al, 2013),河西走廊近 70 年资料表明沙尘暴日数与大风日数关系较密切,呈显著正相关,而该区大风日数呈减少

趋势;第四,从海气相互作用来看,春、夏季河西走廊沙尘暴发生次数与前两年赤道中、东太平洋海温的负相关最好(尚可政等,1998),计算1951—2020年赤道中、东太平洋三个区秋、冬季海温距平线性趋势表明,三个区近70年来均呈上升趋势。另外,Zhang et al(2021)通过对中国北方近500年沙尘暴活动及机制分析得出:近现代沙尘暴活动的增强可能与因人类活动增强而导致的粉尘供应量增加有关,而该时段内沙尘暴减弱趋势可能与近现代全球变暖导致的平均风速降低有关;黄土高原东北部公海湖近230年沙尘暴重建也进一步证实人类活动、全球变暖对沙尘暴产生的显著影响(Xu et al, 2021)。

沙尘暴主要发生在大气边界层中,边界层厚度及其温湿风条件等垂直结构特征直接影响着沙尘暴的发生发展,进一步影响其强度、范围和持续时间。针对民勤站干湿、风沙等不同天气的边界层垂直结构特征进行分析,表明风沙边界层高度介于无降水和有降水之间,沙尘暴多由风场的剧烈扰动和锋面过境引起,近地层越干冷、西北风越强,强沙尘暴持续时间越长(李岩瑛等,2011;2014)。李岩瑛等(2019)进一步探讨了河西走廊边界层厚度与风沙强度的关系,得出边界层厚度与最高气温、最低气温和0 cm最高地温较密切,与最高气温、极大风速成正比;边界层厚度随着风沙强度的增强而增高,4月较高(3500 m以上),而塔克拉玛干沙漠边界层厚度在夏季最大,只有3000 m(何清和金莉莉,2020);河西走廊东部沙尘暴下午到傍晚出现最多(李玲萍等,2019),原因是夜间至早晨近地面逆温厚且强,大气层结稳定,不利于沙尘暴发生发展,而午后到傍晚,地面热通量增强,地气温差大,大气不稳定增强,加强了动量下传和风速,有利于沙尘暴发生发展(张春燕等,2019;李彰俊,2008)。典型个例研究证明沙尘暴过程是大气不稳定层结变为稳定层结的过程(赵庆云等,2012;阿布力克木等,2019;Peng et al, 2005),但多数是局地的、零散的分析。

河西走廊春季沙尘暴边界层厚度在3~4 km,因而其海拔高度在4~5 km(李岩瑛等,2019),处于500 hPa以下,位居对流层中下层。该层内气温随高度增加而降低,空气对流运动明显,近地面的水热、沙尘等通过对流向上空输送,5 km高度处在风沙边界层的顶端,受其南部祁连山地形影响较小,高空动量常通过该层高度下传到地面形成大风沙尘暴

天气(李岩瑛等,2019),而沙尘暴在垂直方向主要靠对流和湍流向上输送(张强和王胜,2005)。

本文利用河西走廊10年以上逐日探空加密资料和风沙资料,重点分析从地面到高空5 km不同地点沙尘强度、沙尘暴日变化和持续时间,以及不同环流形势下的大气垂直结构,以期得到河西走廊春季沙尘暴的大气边界层垂直结构特征。

## 1 研究区及资料方法

河西走廊东起乌鞘岭,西至古玉门关,南北介于祁连山、阿尔金山和马鬃山、合黎山、龙首山之间,南部山脉海拔在3000~4000 m,祁连山主峰海拔为5564 m;北部在2000~3000 m,东部的龙首山较高在2500~3000 m,而中西部较低在2000 m左右。境内地势南北高,中间低;地形比较复杂,南部为山地、中部为平原、北部为沙漠和戈壁。巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠分别位于河西走廊中东部的北侧,以及民勤的北部和东部(图1)。

应用资料:河西走廊敦煌、酒泉、张掖、民勤4个站2006—2016年春季逐日08时和20时两个时次地面到5 km每隔50 m高空加密观测资料,地面风沙资料。使用日数平均法,即:同一种天气相同高度平均,同一站点不同天气平均,同一天气不同站点平均。

从河西走廊13个站1960—2019年60年年均沙尘暴日数得出:东部的民勤最多(21.7 d),其次是西部的金塔(15.6 d)、鼎新(13.3 d)、张掖(10.6 d),马鬃山最小,为1.2 d(图1)。

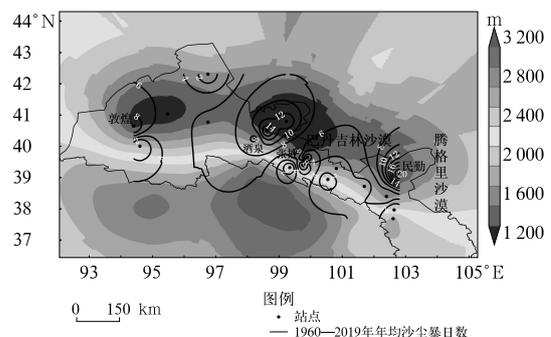


图1 河西走廊13个站1960—2019年年均沙尘暴日数及海拔高度、沙漠分布

Fig. 1 Average annual sandstorm days for 13 stations during 1960—2019, elevation and desert distribution over Hexi Corridor

## 2 近地层风沙边界层气象特征

对比不同风沙条件下,计算近地面到高空 5 km 河西走廊 4 个站平均的逆温层厚度及强度,近地层

相对湿度 $<40\%$ 的干层厚度,相对湿度 $<30\%$ 的干层起止高度, $\leq 1$  km 最大风速及高度,不稳定层结(即 $\partial\theta/\partial z < 0$ )的最低高度(李崇银等,2005),详见表 1。

早晚对比:逆温仅发生在 08 时,厚度小于

表 1 河西走廊地面到 5 km 高度 08 时和 20 时不同风沙强度要素特征  
Table 1 Characteristics of different wind-sand force elements at 08:00 BT and 20:00 BT from ground up to 5 km altitude over Hexi corridor

风沙天气	年均日数/d	逆温层	最大逆温强度	相对湿度 $<40\%$		相对湿度 $<30\%$		$\leq 1$ km 最大风速,出现		最低不稳定	
		厚度/km	$/[^\circ\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}]$	干层厚度/km	干层厚度/km	干层起止高度/km	干层起止高度/km	高度 $/(m\cdot s^{-1}),\text{km}$	高度 $/(m\cdot s^{-1}),\text{km}$	层结高度/m	层结高度/m
		08 时	08 时	08 时	20 时	08 时	20 时	08 时	20 时	08 时	20 时
浮尘	2.8	0.1	1.75	2.95	2.05	0	0~1.3	6.4,1.0	7.2,0.5	5450	100
扬沙	3.0	0.2	1.6	2.4	1.85	0	0~1.05	10.2,0.7	10.2,0.6	6200	200
沙尘暴	2.0	0.15	1.6	3.15	1.45	0.05~1.7	0~0.65	10.1,0.95	13.9,0.9	3050	200
强沙尘暴	2.0	0.15	1.9	4.5	1.55	0.05~1.6	0.05~0.2	9.2,0.7	13.1,0.9	5250	100
大风无沙尘	3.0	0.25	1.0	2.95	3.95	0.1~1.4	0~1.6	13.7,0.8	13.0,0.75	3800	350
大风伴沙尘	2.5	0.15	1.45	2.05	1.5	0	0~0.55	11.4,0.75	12.6,0.65	5200	50

0.25 km,强沙尘暴时逆温最强且相对湿度 $<40\%$ 的大气干层厚度达 4.5 km,08 时比 20 时厚 0.5~3 km,而相对湿度 $<30\%$ 的大气干层只有在沙尘暴和强沙尘暴时 08 时的厚度在 1.5 km 以上,其他风沙天气是 20 时较厚;最大风速除大风无沙尘天气时 08 时较 20 时略大外,其他风沙天气 20 时风速较大,高度在 0.5~1.0 km,20 时沙尘暴及强沙尘暴出现高度为 0.9 km,风速明显比 08 时偏大  $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  左右,这与西北大气边界层高度 600 m 和 900 m 平均风速增加一致(孟丹等,2019)。不同风沙天气最大风速对比:08 时大风大,而 20 时沙尘暴较大。不稳定层结高度 08 时远高于 20 时,08 时 3 km 以下层结稳定,而 20 时 0.4 km 以下近地层稳定。

沙尘暴不同于风沙天气的显著特点是:08 时逆温强度在  $1.6^\circ\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$  以上,相对湿度 $<40\%$ 干层厚度超过 3 km, $<30\%$ 干层厚度超过 1.5 km 且 20 时最大风速大于  $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

## 3 河西走廊 4 站沙尘天气大气边界层垂直结构

对 2006—2016 年河西走廊 4 个站六种不同风沙天气的边界层特征进行分析,结果如下:

浮尘:08 时贴地面 300 m 以下存在逆温层,强度弱,气温从高到低为民勤、敦煌、酒泉、张掖,相对湿度 $<40\%$ ,风速 1 km 以下小于  $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,风向 2 km 以下从东南风到西南风,以上从西南风到偏西风;20 时近地面无逆温层,气温地面到 1.4 km 以下

民勤较高,1.4 km 以上敦煌较高;2 km 以下相对湿度 $<40\%$ 且风速在 2 km 以下,民勤较大,为  $11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,其他 3 个站风速小于  $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,随高度增大,风向 5 km 以下从地面到高空由东南风向西风转变(图略)。

扬沙:08 时贴地面 500 m 以下存在逆温层,强度弱,气温敦煌较高,其他 3 个站较相近,1 km 以下相对湿度 $<40\%$ ,风速 $<11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,民勤在 0.7 km 附近风速较大,达  $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,风向敦煌、酒泉随高度从东南风转到偏西风,其他 2 个站以偏西风为主;20 时近地面无逆温层,气温敦煌明显高  $4\sim 5^\circ\text{C}$  以上,1 km 以下相对湿度 $<40\%$ ,风速随高度增大,从小到大为敦煌、张掖、酒泉和民勤,略大于 08 时,风向敦煌从地面向高空由偏南风向西风转变,其他 3 个站以偏西风为主(图略)。

沙尘暴:4 个站的月均沙尘暴日数除张掖略少(2 d)外,其他 3 个站均为 3 d。08 时贴地面 400 m 以下存在逆温层,强度弱,08 时气温张掖明显偏高  $4^\circ\text{C}$  以上,2 km 以下相对湿度 $<40\%$ ,1 km 以下风速民勤较大,为  $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,敦煌在 600 m 附近风速较大,达  $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,风向自西向东从东南风转到偏西风;20 时张掖 0.5 km 以下,其他 3 个站 1 km 以下相对湿度 $<40\%$ ,张掖湿度较大,风速在 1 km 以下从小到大为敦煌、民勤、酒泉和张掖,张掖在 1 km 处风速较大,达  $17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,风向中 3 km 以下敦煌从地面向高空由偏南风向西风转变,其他 3 个站以偏西风到西北风为主(图 2)。图 2d<sub>1</sub> 中民勤高空 2 km 左右风向转变说明 08 时有高空槽通过,低层在

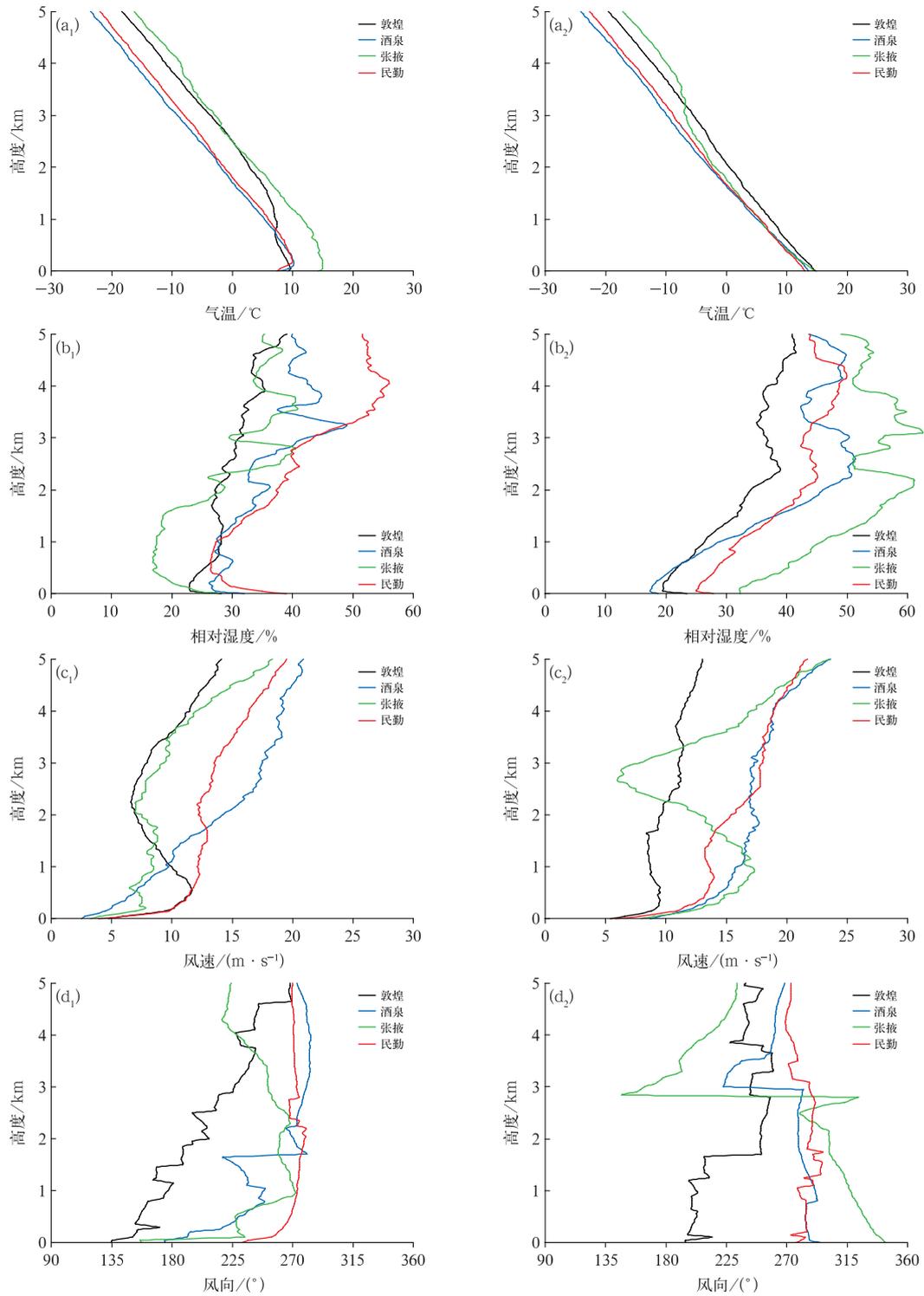


图 2 2006—2016 年河西走廊 4 个观测站春季沙尘暴温湿风随高度的分布

(a)气温,(b)相对湿度,(c)风速,(d)风向

(角标 1 为 08 时,2 为 20 时,下同)

Fig. 2 Distribution of temperature, relative humidity and wind with height in spring sandstorm

at (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>, d<sub>1</sub>) 08:00 BT and (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>, d<sub>2</sub>) 20:00 BT (the same below)

at four observation stations in Hexi Corridor during 2006—2016

(a) temperature, (b) relative humidity, (c) wind speed, (d) wind direction

槽前是西南风,高层在槽后为西北风。图 2d<sub>2</sub> 酒泉、张掖站的风向突变转向说明 20 时沙尘暴发生时,在酒泉、张掖 2 个站之间存在锋面次级环流;在 2.8~3 km 以下低层西北风表示有冷空气,为下沉气流,以上为西南风到东南风表示有暖空气,为上升气流。

强沙尘暴:08 时近地面 1 km 以下存在逆温层,敦煌、酒泉气温较高,相对湿度 $<30\%$ ,民勤、敦煌风速较大,为  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,其他 2 个站较小,风向从地面到 5 km 高空敦煌从东南风到西南风,民勤从西南风到偏西风,而其他 2 个站为西风向西北风转变;20 时民勤、敦煌相对湿度 $<30\%$ ,酒泉在  $40\%$  左右,而张掖在  $50\% \sim 70\%$ ;在 1.4 km 以下风速从敦煌、酒泉、民勤和张掖依次增大,从地面到高空 5 km 风向除敦煌从东南风到西风外,其他均为西北风(图 3)。图 3d<sub>1</sub> 说明 08 时张掖在近地面受祁连山地形山谷风影响吹南风,0.05~0.6 km 高度吹西北风,有冷平流,0.6~1.0 km 高度间风向顺转,有暖平流,1.0 km 高度以上逆转是冷平流,大气层结不稳定。图 3d<sub>2</sub> 说明 20 时敦煌受南部祁连山地形影响盛行偏南风,因而在高空 1.7 km 以下和 3.8 km 以上是偏南风,1.7~3.8 km 是偏西风,说明敦煌上空 1.7~3.8 km 有冷空气入侵。

大风无沙尘:敦煌显著干暖风速大,08 时近地面 0.5 km 以下存在逆温层,相对湿度从干到湿依次为敦煌、民勤、酒泉和张掖,敦煌 4 km 以下相对湿度 $<20\%$ ;风速从小到大为张掖、酒泉、民勤、敦煌,敦煌较大,在 0.8 km 附近达  $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;风向从地面到 5 km 高空敦煌从东北风到西南风,民勤从西北风到偏西风,而其他 2 个站为西南风到偏西风转变。20 时近地层 0.7 km 以下相对湿度 $<30\%$ ;风速在 1.4 km 以下从张掖、民勤、酒泉和敦煌依次增大,敦煌在 0.5 km 附近达  $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;风向从地面到高空 5 km 除敦煌从东北-北风到西南风转变外,其他均为西北风(图略)。

大风伴沙尘:气温敦煌较高、酒泉较低,08 时近地面 0.2 km 以下存在逆温层,相对湿度 $<30\%$ ,风速民勤、敦煌较大(在  $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上),其他两站较小,从地面到 5 km 高空风向敦煌从东南风到西南风,而其他从西南风到偏西风转变;20 时相对湿度只有张掖大于  $30\%$ ,0.9 km 以下从张掖、敦煌、酒泉和民勤风速依次增大,5 km 以下敦煌风向以西南

风为主,其他均为西北风(图略)。

## 4 大气边界层垂直结构的影响因素

### 4.1 沙尘强度的影响

计算方法:先将六种不同沙尘天气站点平均,然后再由河西走廊 4 个站平均,通过对比得出河西走廊边界层要素的变化。

#### 4.1.1 气温

08 时气温(图 4a):近地层 0.1 km 以下均有逆温层存在。气温 1.1 km 以下从低到高为浮尘、扬沙、大风伴沙尘、大风无沙尘、强沙尘暴、沙尘暴,1.1~1.8 km 强沙尘暴较高,1.8~3.1 km 大风无沙尘较高,沙尘暴、强沙尘暴次之。3.1~4 km 大风无沙尘较低,大风伴沙尘较高,4 km 以上沙尘暴较高。20 时气温(图 4b):大风无沙尘气温较高,其他 0~0.5 km 从低到高为强沙尘暴、大风伴沙尘、沙尘暴、浮尘、扬沙,0.5~0.9 km 大风伴沙尘低而扬沙高,0.9 km 以上大风伴沙尘低而沙尘暴高。

说明沙尘暴在发生前近地层增温明显,发生后降温迅速,早晚气温变幅从大到小为大风无沙尘、浮尘、扬沙、大风伴沙尘、沙尘暴、强沙尘暴。沙尘越强,气温在 20 时低于 08 时的高度越低,上述风沙天气对应高度分别为 1.65、1.65、1.25、0.75、0.5 和 0.4 km,冷空气下沉高度越低。

#### 4.1.2 相对湿度

如图 5 所示,上湿下干,08 时 5 km 以下强沙尘暴、沙尘暴较干,大风伴沙尘较湿;1 km 以下从干到湿为强沙尘暴、沙尘暴和大风无沙尘(小于  $30\%$ ),其他依次为浮尘、扬沙和大风伴沙尘。20 时 1.5 km 以下从干到湿为大风无沙尘、浮尘、扬沙、沙尘暴、大风伴沙尘和强沙尘暴。沙尘暴和强沙尘暴的特征是早干晚湿,08 时 0.7 km 以下随高度增加湿度减小,以上则增加;而 20 时近地层 5 km 以下随高度增加而湿度增加。

#### 4.1.3 风速

08 时(图 6a):浮尘风速较小,其他风沙天气则是 0.05 km 以下强沙尘暴较大,0.05~1.4 km 从强沙尘暴、沙尘暴、扬沙、大风伴沙尘和大风无沙尘依次增大,大风无沙尘在 0.9 km 达  $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,1.4~

1.8 km 又从扬沙、沙尘暴、大风无沙尘、大风伴沙尘和强沙尘暴依次增大,1.8~3.5 km 大风伴沙尘较大,3.5 km 以上大风无沙尘较大。

强沙尘暴大,0.05~0.4 km 大风伴沙尘大,0.4~1.7 km 沙尘暴大,1.7~2.5 km 强沙尘暴大,2.5~5 km 大风伴沙尘大,而强沙尘暴略小。

20 时(图 6b):浮尘、扬沙风速较小,0~0.05 km

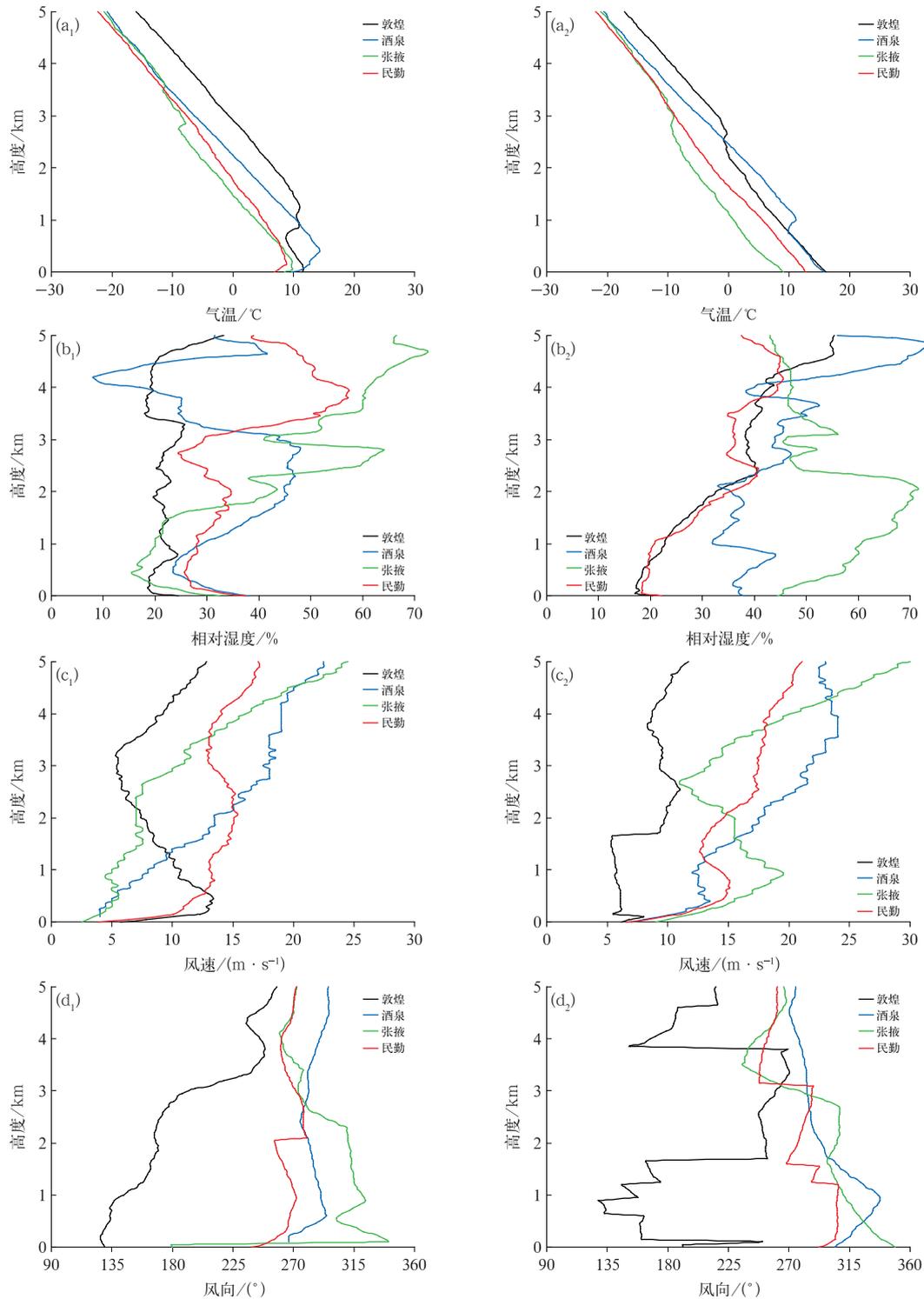


图 3 同图 2,但为强沙尘暴

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for strong sandstorms

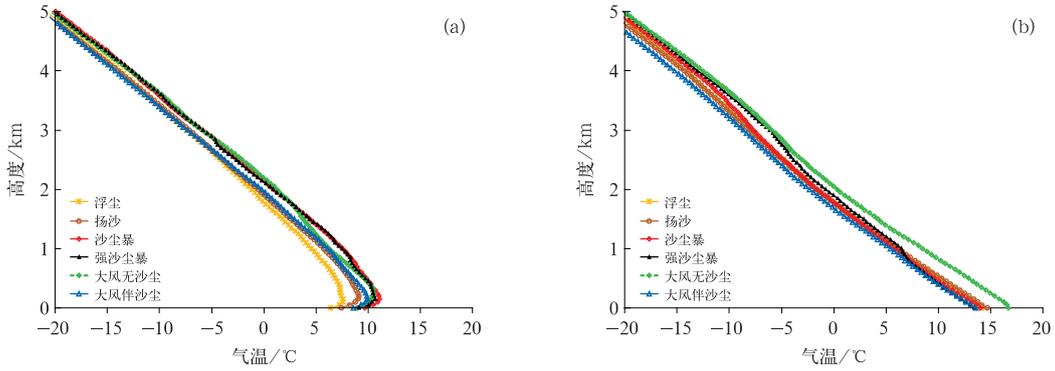


图 4 2006—2016 年春季(a)08 时和(b)20 时河西走廊 4 个观测站不同沙尘强度中气温随高度的分布  
Fig. 4 Distribution of temperature with height in different sand-dust intensities at four observation stations in Hexi Corridor at (a) 08:00 BT and (b) 20:00 BT in spring of 2006—2016

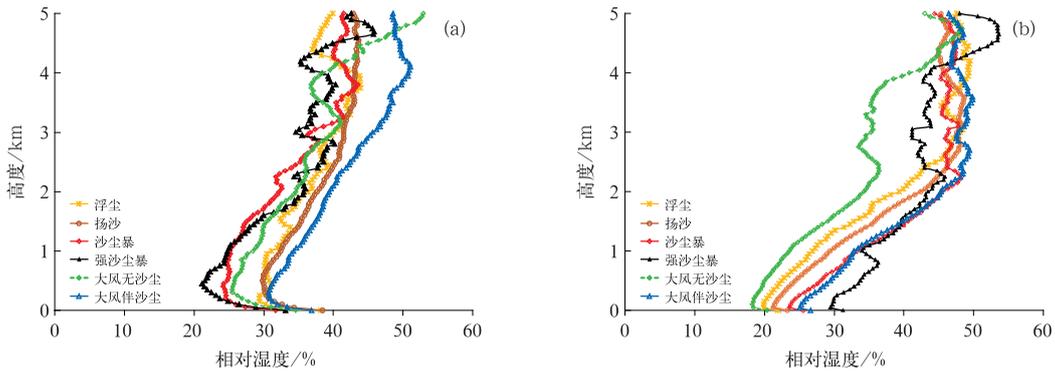


图 5 同图 4, 但为相对湿度  
Fig. 5 Same as Fig. 4, but for relative humidity

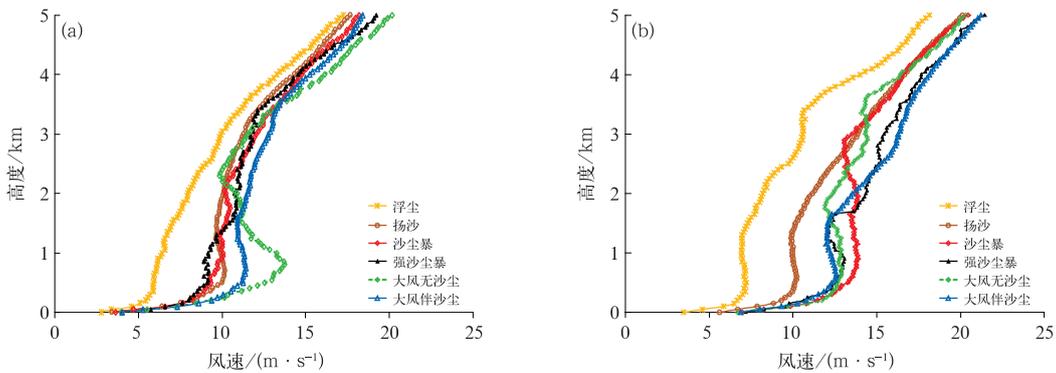


图 6 同图 4, 但为风速  
Fig. 6 Same as Fig. 4, but for wind speed

早晚对比:20 时风速是增大的,其中沙尘暴在 0.5~0.9 km、强沙尘暴在 0.9 km、2.5 km 附近增速较明显,增速达  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右。

#### 4.1.4 风向

08 时(图 7a):大风无沙尘在 3 km 以下,浮尘在

1.6 km 以下风向处于偏南与西南风之间,其他处于西南风至西风之间,在 5 km 高空以上均转为西风。20 时(图 7b):浮尘在 1.6 km 以下风向处于偏南与西南风之间,大风无沙尘和扬沙在 3 km 以下处于西南风至西风之间,其他以偏西风为主。

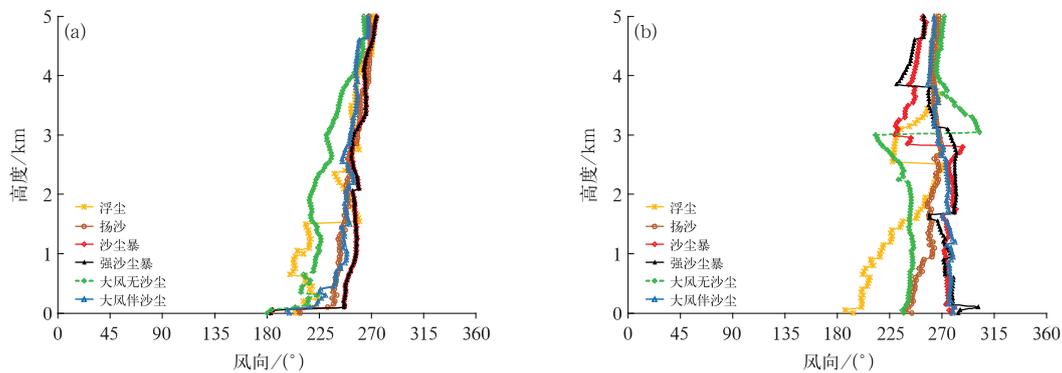


图7 同图4,但为风向

Fig. 7 Same as Fig. 4, but for wind direction

#### 4.2 沙尘暴天气条件下的边界层气象条件日变化的影响

针对发生在不同时段上午(08—12时)、下午(12—20时)和夜间(20时至次日08时)沙尘暴的近地面要素变化对比得出(图8):气温08时明显偏高 $4\sim 7^{\circ}\text{C}$ 以上,下午高于夜间,近地面差距较大,3 km以上下午和夜间无差距;20时明显偏低 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ 以上,2.4 km以下夜间较高,2.4 km以上上午较高。相对湿度08时较干( $20\%\sim 30\%$ ),0.5~0.8 km和2.4 km以上下午较湿;20时从干到湿为夜间、上午和下午,分别在 $16\%\sim 20\%$ 、 $20\%\sim 30\%$ 和 $30\%\sim 43\%$ 。

风速08时在1.7 km以下从大到小为上午、下午和夜间,0.9 km处上午最大风速为 $12.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,1.7~2.7 km下午较大;20时在3.1 km以下从大到小为下午、上午和夜间,0.9 km处下午最大风速为 $17.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从夜间、上午到下午风速依次增大,20时风速随高度变化除上午和下午1~3 km减小外,其他随高度增大。风向08时自地面向上由东南风转为西南风,20时白天以西风为主,夜间自地面向上由偏南风转为偏西风。

#### 4.3 不同持续时间沙尘暴边界层气象条件的影响

将沙尘暴持续时间分为 $\leq 1\text{ h}$ 、 $1\sim 5\text{ h}$ 、 $> 5\text{ h}$ ,进一步分析沙尘暴不同持续时间的边界层特征(图9)。

08时气温从高到低沙尘暴持续时间为 $1\sim 5\text{ h}$ 、 $\leq 1\text{ h}$ 、 $> 5\text{ h}$ ;20时从高到低为 $\leq 1\text{ h}$ 、 $1\sim 5\text{ h}$ 、 $> 5\text{ h}$ ;相对湿度08时沙尘暴持续时间越短,湿度越小,20时相反;风速08时近地层0.8 km以下沙尘暴持续

时间越短,风速越小,而20时近地层2.2 km以下沙尘暴持续时间越长,风速越小;高空盛行西风或西北风时沙尘暴持续时间较短,偏南风到西南风时持续时间长。

5 h以下的08时大气干层较厚,而沙尘暴持续时间5 h以上的20时大气干层较厚。相对湿度 $\leq 30\%$ 时温度露点差最小阈值是 $17^{\circ}\text{C}$ ,最大高度达2.85 km; $\leq 40\%$ 时温度露点差最小阈值是 $13^{\circ}\text{C}$ ,最大高度达4.65 km(表2)。

大气干层上午和夜间较厚,下午较薄。相对湿度 $\leq 30\%$ 对应的温度露点差最小阈值是 $16^{\circ}\text{C}$ ,最大高度达3.35 km;而相对湿度 $\leq 40\%$ 对应的温度露点差最小阈值是 $13^{\circ}\text{C}$ ,最大高度达5 km(表3)。

#### 4.4 沙尘暴环流形势的影响

河西走廊沙尘暴主要环流形势分为西风槽型、西风气流型和脊型(西北气流中有冷平流)三种(李岩瑛等,2004),应用2006—2016年4个站沙尘暴资料,先对不同环流形势沙尘暴进行月平均,然后进行春季平均,再进行4个站平均,得出以下结果(图10):

西风槽型上午暖下午冷,脊型相反,西风气流型气温较低,08时200 m以下均有逆温层存在。

相对湿度08时近地层0.8 km以下西风槽型较干,但0.8~3 km西风气流型较干,1.8 km以下脊型略湿;20时槽型整层较湿相对湿度 $> 30\%$ ,其他 $< 30\%$ ,1.7 km以下西风气流型较干,1.7 km以上脊型较干。

西风气流型近地层冷干,风速小,风向从东南风转为西南风,早上在1.2~3.5 km高度和晚上在2.4 km以上风速较大;脊型早上略湿冷,1.2 km以

下风速较大,0.75 km 处风速最大达  $14.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 以西南风为主,晚上偏西风;西风槽型早上干暖风速小,风向从东南风到西南风,而晚上明显较湿且

1.8 km 以下风速较大,0.9 km 处风速最大,达  $15.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,盛行偏西风。

冷槽之前地面伴有冷锋,锋前常受热低压控制,

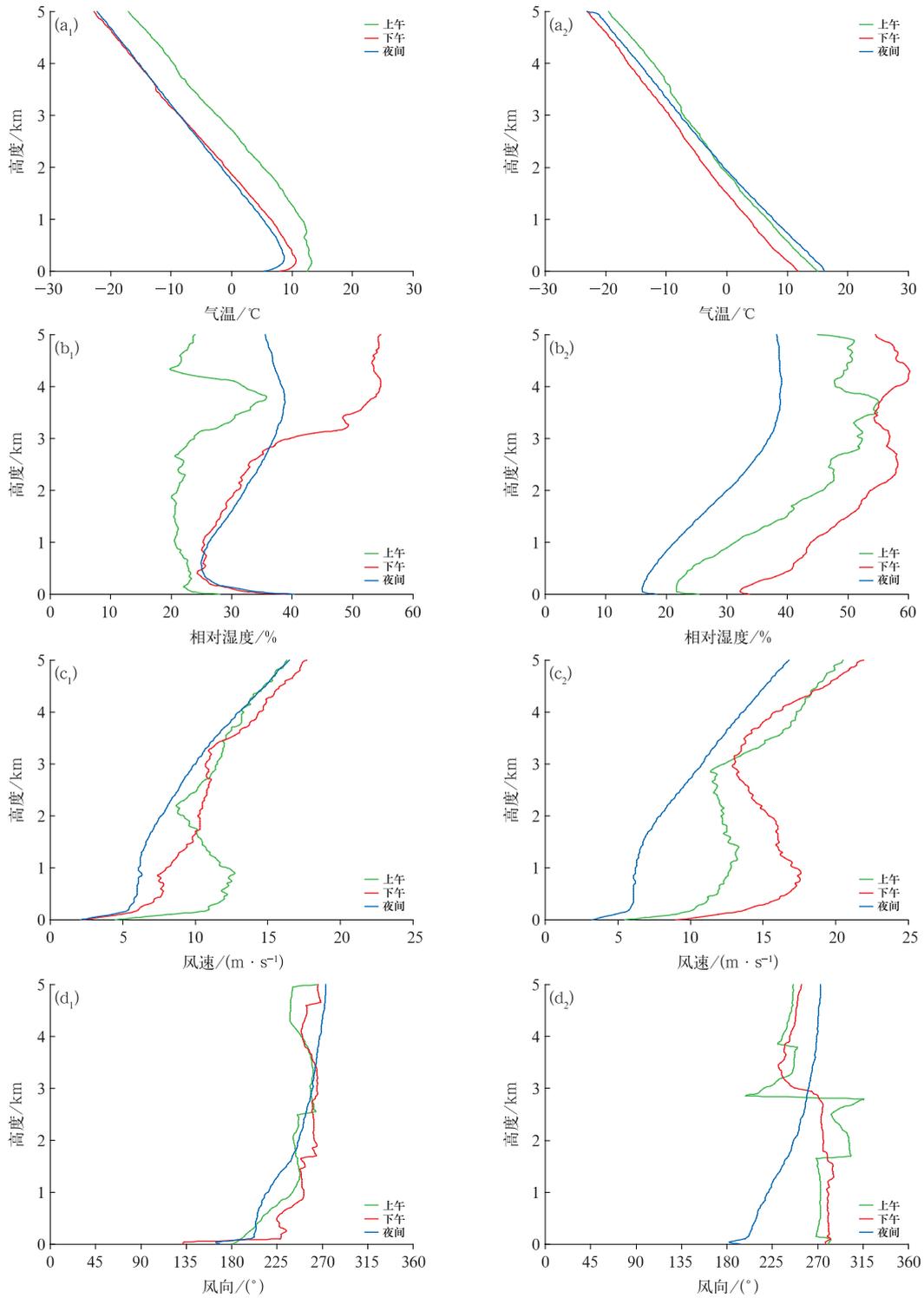


图 8 2006—2016 年河西走廊春季平均不同时段沙尘暴中温湿风随高度的分布

Fig. 8 Distribution of temperature, relative humidity and wind with height in spring sandstorm under different average periods in Hexi Corridor during 2006—2016

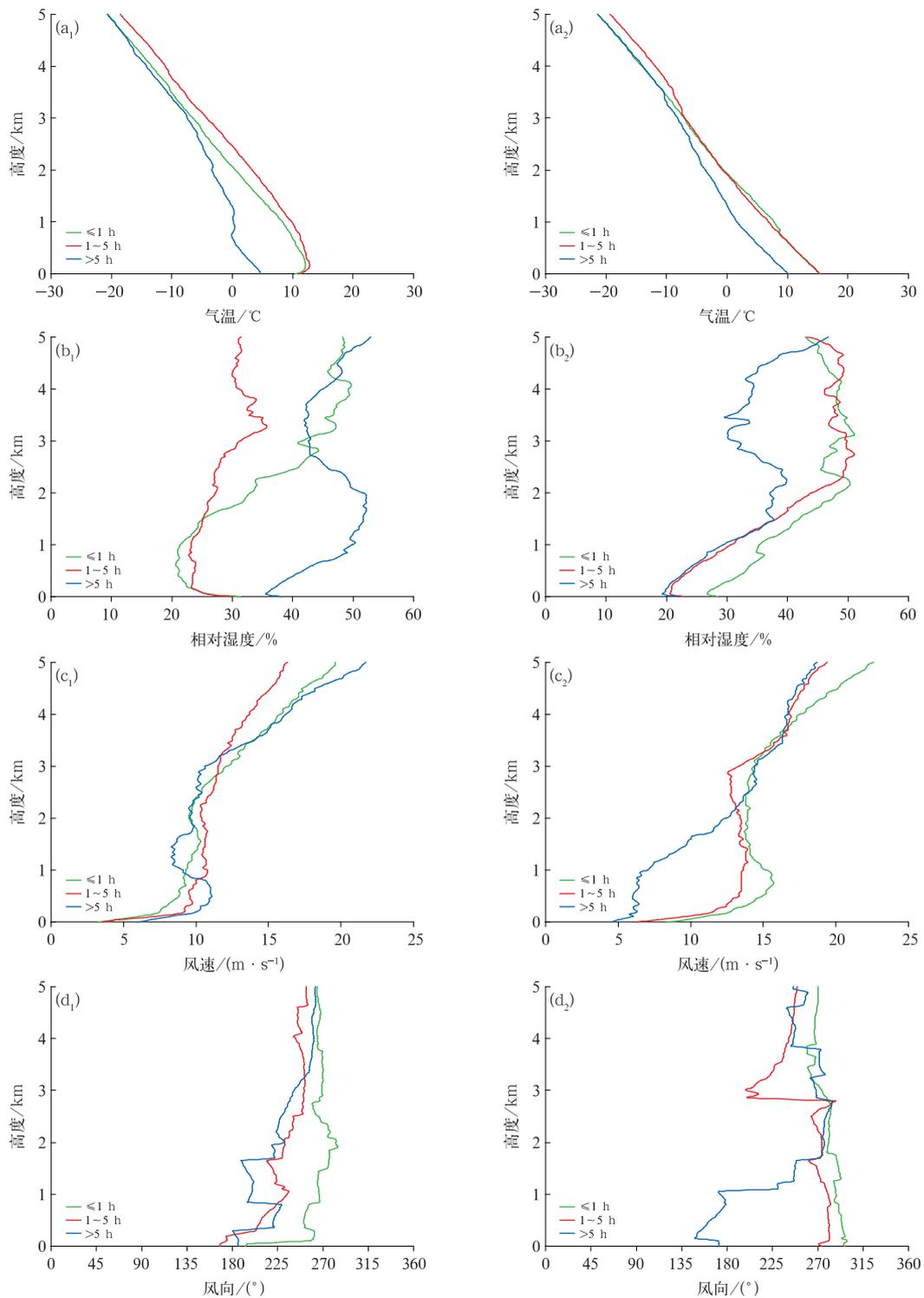


图 9 同图 8, 但为平均不同持续时间

Fig. 9 Same as Fig. 8, but under different average durations

气温较高,冷锋过后气温迅速下降,统计表明西风槽型及夜间沙尘暴出现较多,因而上午暖夜间冷;而脊型沙尘暴发生前早上往往天气晴朗,气温低,随着日

变化气温升高,与高层冷平流形成热力不稳定,将高空强风速下传至地面造成沙尘暴。西风气流型沙尘暴高低空均有冷空气活动,风速大,因而气温较低。

日变化中,夜间近地层较稳定,气温较低,08 时受太阳辐射的影响,高层增温快而低层冷,会形成逆温;

而 20 时低层暖高层冷,不会形成逆温。

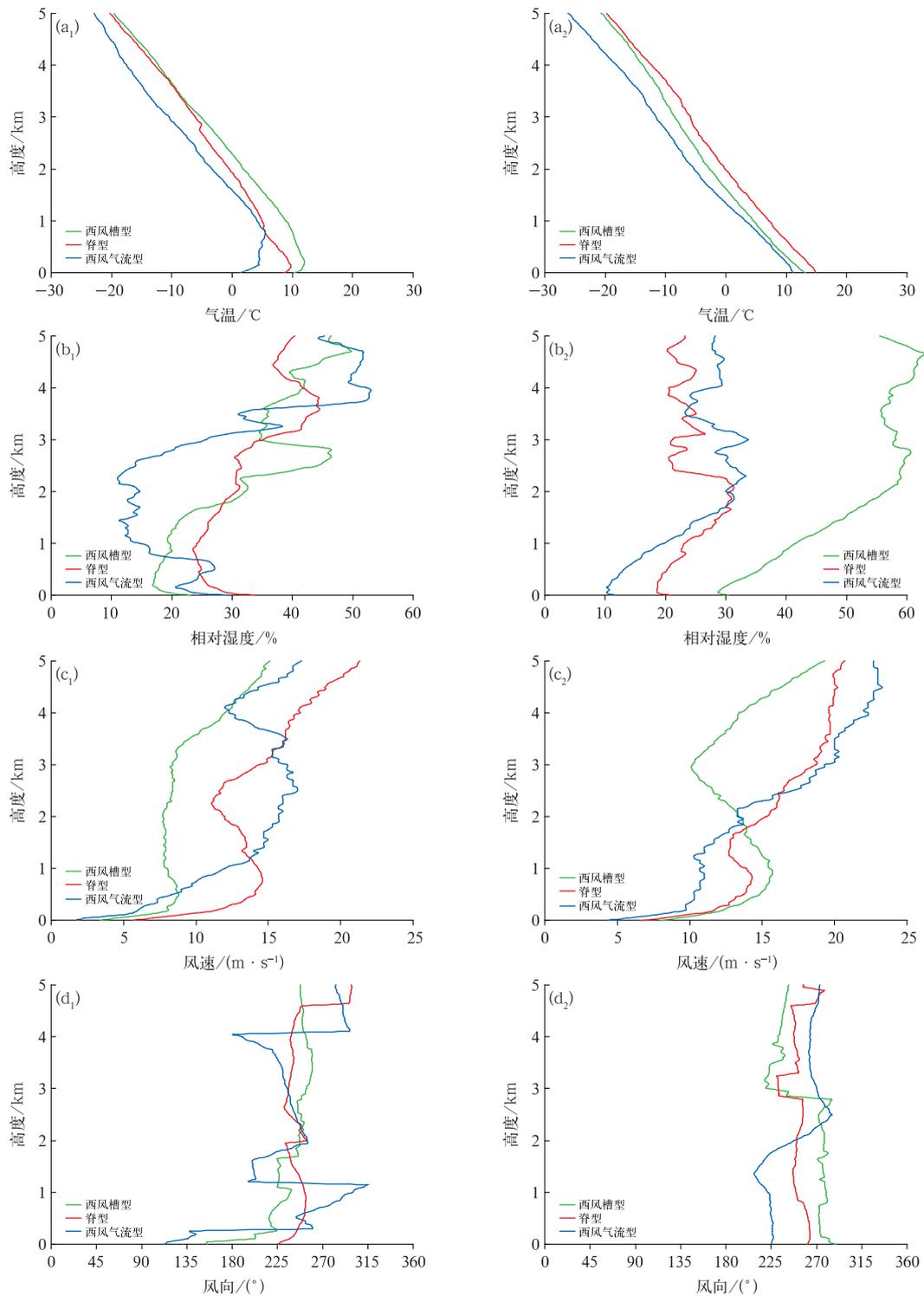


图 10 同图 8, 但为平均不同环流形势

Fig. 10 Same as Fig. 8, but under different average circulation patterns

表2 沙尘暴不同持续时间下各时次相对湿度对应的温度露点差最小阈值(单位:℃; 括号内数字为最大高度,单位:km)

Table 2 Minimum threshold for temperature and dew difference (unit: °C; number in bracket: maximum height, unit: km) stratified by different durations of sandstorm and relative humidity

持续时间 时次	≤1 h		1~5 h		>5 h	
	08时	20时	08时	20时	08时	20时
相对湿度≤30%	18(1.7)	21(0.3)	17(2.85)	19(0.95)	无(0)	20(1.05)
相对湿度≤40%	14(2.45)	16(1.3)	15(5.0)	14(1.65)	14(0.35)	13(4.65)

表3 同表2,但针对沙尘不同的发生时段

Table 3 Same as Table 2, but for different occurrence time of sand-dust

出现时间 时次	上午		下午		夜间	
	08时	20时	08时	20时	08时	20时
相对湿度≤30%	16(3.35)	18(0.9)	17(1.9)	无(0)	16(1.6)	19(2.0)
相对湿度≤40%	14(5.0)	13(1.55)	13(3.0)	17(0.4)	13(5.0)	14(5.0)

## 5 结论

风速小时,低层风场主要受海拔高度、河西走廊南部祁连山区较高大地形影响,具有明显的日变化和山谷风效应(李岩瑛等,2017)。夜间河西走廊盛行山风,主要以东南风和西南风为主;白天则为谷风,但又同时受河西走廊地形的狭管效应和高空风影响,盛行西北风。敦煌是盆地,海拔高度为1140 m,地理位置和地势较其他3个站偏南偏低,南部正面毗邻青藏高原,西南有阿尔金山,东南有祁连山等形成地形屏障,平均海拔高度为3000~4000 m,因而山谷风效应更显著。张掖处于河西走廊中端,是南北两山距离最近的区域,狭管效应明显,风速较大。敦煌和民勤地势较低,四周受沙漠、戈壁包围,因而气温高,空气干燥,风速大且沙尘多。3 km以上受地形影响小,风向趋于一致。主要结论如下:

(1)早上有逆温且强沙尘暴逆温较强,沙尘暴08时逆温强度在 $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$ 以上,相对湿度 $<40\%$ 干层厚度超过3 km, $<30\%$ 干层厚度超过1.5 km且20时最大风速 $>13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(2)气温较高出现在扬沙、强沙尘暴和大风中的敦煌,浮尘中的民勤和沙尘暴中的张掖;敦煌、民勤干而风速大;风向中5 km以下,浮尘从地面到高空由东南风向西风转变,扬沙敦煌、酒泉从地面到高空由偏南风向西风转变,其他两站以偏西风为主。沙尘暴3 km以下敦煌从地面到高空由偏南风向西风转变,其他3个站以偏西风到西北风为主,强沙尘暴除敦煌从东南风到西风转变外,其他均为西北风。大风敦煌以西南风为主,其他均为西北风。

(3)沙尘暴上午干暖,最大风速在0.9 km高度为 $12.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;而下午冷湿风速较大,最大风速在0.9 km高度为 $17.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,近地面夜间和上午为南风,下午为西风,夜间风速较小且空气干燥。

(4)沙尘暴持续时间长时,早晚气温低,08时空气湿而风速大,而20时空气干而风速小。说明决定沙尘暴持续时间的主要因素是冷空气,冷空气越强,沙尘暴持续时间越长。沙尘暴持续时间5 h以下的08时大气干层较厚,达2.85 km;而5 h以上的20时大气干层较厚,达1.05 km。大气干层上午和夜间较厚,下午浅薄。相对湿度 $\leq 30\%$ 时温度露点差最小阈值是 $16\sim 17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最大高度在2.85~3.00 km; $\leq 40\%$ 时温度露点差最小阈值是 $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最大高度达4.65~5 km。

(5)不同沙尘暴环流形势下:脊型早上干冷风速大,0.75 km处风速最大,达 $14.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;西风槽型下午湿冷风速大,0.9 km处风速最大,达 $15.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;而西风气流型近地层冷干,风速小,但早上1.2~3.5 km高度和晚上2.4 km以上高层风速较大。

(6)08时逆温强度大于 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$ ,大气干层厚度在1.5 km以上并且900 m以下风速大于 $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,这是河西走廊沙尘暴预报预警的重要指标。

## 参考文献

- 阿不力米提江·阿布力克木,李娜,赵克明,等,2019.塔里木盆地一次“东灌”沙尘暴大气边界层特征[J].沙漠与绿洲气象,13(5):55-61. Ablimitjan A, Li N, Zhao K M, et al, 2019. Characteristics of atmospheric boundary layer during an east irrigated sandstorm in Tarim Basin[J]. Desert Oasis Meteor, 13(5): 55-61(in

- Chinese).
- 常兆丰,韩福贵,仲生年,2011.民勤荒漠区气候变化对全球变暖的响应[J].中国沙漠,31(2):505-510.Chang Z F,Han F G,Zhong S N,2011.Response of desert climate change to global warming in Minqin,China[J].J Desert Res,31(2):505-510(in Chinese).
- 程鹏,2011.河西走廊沙尘暴分布特征及春季区域性强沙尘暴个例研究[D].兰州:兰州大学.Cheng P,2011.Distribution characteristics of duststorms in Hexi Corridor and a case study of regional strong duststorm[D].Lanzhou:Lanzhou University(in Chinese).
- 丰华,刘植,李平原,等,2012.从沙尘暴变化趋势看全球气候变化[J].亚热带资源与环境学报,7(1):76-82.Feng H,Liu Z,Li P Y,et al,2012.Considering global climate change from the trend of sandstorms in China[J].J Subtrop Resour Environ,7(1):76-82(in Chinese).
- 何清,金莉莉,2020.塔克拉玛干沙漠陆气相互作用观测与模拟研究[M].北京:气象出版社.He Q,Jin L L,2020.Observation and simulation study on land-air interaction in Taklimakan Desert[M].Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).
- 黄悦,陈斌,董莉,等,2021.利用星载和地基激光雷达分析 2019 年 5 月东亚沙尘天气过程[J].大气科学,45(3):524-538.Huang Y,Chen B,Dong L,et al,2021.Analysis of a dust weather process over East Asia in May 2019 based on satellite and ground-based Lidar[J].Chin J Atmos Sci,45(3):524-538(in Chinese).
- 蒋盈沙,高艳红,潘永洁,等,2019.青藏高原及其周边区域沙尘天气的时空分布特征[J].中国沙漠,39(4):83-91.Jiang Y S,Gao Y H,Pan Y J,et al,2019.Spatial and seasonal distributions of sand dusts in Qinghai-Tibet Plateau and its surrounding areas[J].J Desert Res,39(4):83-91(in Chinese).
- 孔锋,2020.中国灾害性沙尘天气日数的时空演变特征(1961-2017)[J].干旱区资源与环境,34(8):116-123.Kong F,2020.Spatial and temporal evolution characteristics of days of disastrous dust weather in China from 1961 to 2017[J].J Arid Land Resour Environ,34(8):116-123(in Chinese).
- 李崇银,刘式适,陈嘉滨,等,2005.动力气象学导论[M].北京:气象出版社:17-20.Li C Y,Liu S K,Chen J B,et al,2005.An Introduction to Dynamic Meteorology[M].Beijing:China Meteorological Press:17-20(in Chinese).
- 李宽,熊鑫,王海兵,等,2019.内蒙古西部高频沙尘活动空间分布及其成因[J].干旱区研究,36(3):657-663.Li K,Xiong X,Wang H B,et al,2019.Spatial distribution and formation causes of frequent dust weather in West Inner Mongolia[J].Arid Zone Res,36(3):657-663(in Chinese).
- 李玲萍,李岩瑛,孙占峰,等,2019.河西走廊东部沙尘暴特征及地面气象因素影响机制[J].干旱区研究,36(6):1457-1465.Li L P,Li Y Y,Sun Z F,et al,2019.Sandstorm and its affecting meteorological factors in East Hexi Corridor[J].Arid Zone Res,36(6):1457-1465(in Chinese).
- 李岩瑛,李耀辉,罗晓玲,等,2004.河西走廊东部沙尘暴预报方法研究[J].中国沙漠,24(5):607-610.Li Y Y,Li Y H,Luo X L,et al,2004.Study on forecasting methods of sand-dust storm in east of Hexi Corridor[J].J Desert Res,24(5):607-610(in Chinese).
- 李岩瑛,张爱萍,李红英,等,2019.河西走廊边界层高度与风沙强度的关系[J].中国沙漠,39(5):11-20.Li Y Y,Zhang A P,Li H Y,et al,2019.Relationship between boundary layer height and wind-sand intensities over Hexi Corridor,China[J].J Desert Res,39(5):11-20(in Chinese).
- 李岩瑛,张爱萍,谢万银,等,2017.从预报角度探讨乌鞘岭山区大气温差成因[J].沙漠与绿洲气象,11(1):58-66.Li Y Y,Zhang A P,Xie W Y,et al,2017.Discussion on formation causes of atmospheric temperature difference over Wushaoling Mountains for prediction[J].Desert Oasis Meteor,11(1):58-66(in Chinese).
- 李岩瑛,张强,陈英,等,2014.中国西北干旱区沙尘暴源地风沙大气边界层特征[J].中国沙漠,34(1):206-214.Li Y Y,Zhang Q,Chen Y,et al,2014.Vertical structure of atmosphere boundary layer during wind-sandstorm process over sandstorm source in arid area of Northwest China[J].J Desert Res,34(1):206-214(in Chinese).
- 李岩瑛,张强,薛新玲,等,2011.民勤大气边界层特征与沙尘天气的气候学关系研究[J].中国沙漠,31(3):757-764.Li Y Y,Zhang Q,Xue X L,et al,2011.Relationship between atmosphere boundary layer characteristics and sand-dust weather climatology in Minqin[J].J Desert Res,31(3):757-764(in Chinese).
- 李彰俊,2008.内蒙古中西部地区下垫面对沙尘暴发生发展的影响研究[D].南京:南京信息工程大学.Li Z J,2008.The study of impact of earth surface on sand and dust storm in midwestern Inner Mongolia[D].Nanjing:Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 孟丹,陈正洪,陈城,等,2019.基于探空风资料的大气边界层不同高度风速变化研究[J].气象,45(12):1756-1761.Meng D,Chen Z H,Chen C,et al,2019.Research on wind changes at different heights in atmospheric boundary layer based on sounding wind data[J].Meteor Mon,45(12):1756-1761(in Chinese).
- 尚可政,孙黎辉,王式功,等,1998.甘肃河西走廊沙尘暴与赤道中、东太平洋海温之间的遥相关分析[J].中国沙漠,18(3):239-243.Shang K Z,Sun L H,Wang S G,et al,1998.The teleconnections of sand dust storms over Hexi corridor in Gansu Province and sea surface temperature in area of middle and eastern Pacific Ocean near equator[J].J Desert Res,18(3):239-243(in Chinese).
- 姚俊强,杨青,陈亚宁,等,2013.西北干旱区气候变化及其对生态环境影响[J].生态学杂志,32(5):1283-1291.Yao J Q,Yang Q,Chen Y N,et al,2013.Climate change in arid areas of Northwest China and its effects on the local ecological environment[J].Chin J Ecol,32(5):1283-1291(in Chinese).
- 张春燕,李岩瑛,曾婷,等,2019.河西走廊东部冬季沙尘暴的典型个例及气候特征分析[J].气象,45(9):1227-1237.Zhang C Y,Li Y Y,Zeng T,et al,2019.Case analysis and climatic characteristics of winter sandstorm over eastern Hexi Corridor[J].Meteor Mon,45(9):1227-1237(in Chinese).

- 张虎,刘贤德,张亚光,等,2020.黑河流域中游荒漠区沙尘暴、扬沙和浮尘监测及其与气候因子的关系[J].水土保持通报,40(5):106-111,124. Zhang H, Liu X D, Zhang Y G, et al, 2020. Monitoring on dust storms, fly sand, and floating dust and their relations with climatic factors in middle reaches of Heihe River[J]. Bull Soil Water Conserv, 40(5):106-111, 124(in Chinese).
- 张鹏,王春姣,陈林,等,2018.沙尘气溶胶卫星遥感现状与需要关注的若干问题[J].气象,44(6):725-736. Zhang P, Wang C J, Chen L, et al, 2018. Current status of satellite-based dust aerosol remote sensing and some issues to be concerned[J]. Meteor Mon, 44(6):725-736(in Chinese).
- 张强,王胜,2005.论特强沙尘暴(黑风)的物理特征及其气候效应[J].中国沙漠,25(5):675-681. Zhang Q, Wang S, 2005. On physical characteristics of heavy dust storm and its climatic effect[J]. J Desert Res, 25(5):675-681(in Chinese).
- 赵庆云,张武,吕萍,等,2012.河西走廊“2010.04.24”特强沙尘暴特征分析[J].高原气象,31(3):688-696. Zhao Q Y, Zhang W, Lv P, et al, 2012. Characteristic analysis of the severe dust event occurred in Hexi Corridor on April 24, 2010[J]. Plateau Meteor, 31(3):688-696(in Chinese).
- Chen S Q, Liu J B, Chen J H, et al, 2020. Differences in the evolutionary pattern of dust storms over the past 2000 years between eastern and western China and the driving mechanisms[J]. Sci China Earth Sci, 63(9):1422-1424.
- Filonchyk M, Hurynovich V, Yan H W, et al, 2020. Atmospheric pollution assessment near potential source of natural aerosols in the South Gobi Desert region, China[J]. GISci Remote Sens, 57(2):227-244.
- Guan Q Y, Pan B T, Yang J, et al, 2013. The processes and mechanisms of severe sandstorm development in the eastern Hexi Corridor China, during the last glacial period[J]. J Asian Earth Sci, 62:769-775.
- Guo J P, Lou M Y, Miao Y C, et al, 2017. Trans-Pacific transport of dust aerosols from East Asia: Insights gained from multiple observations and modeling[J]. Environ Pollut, 230:1030-1039.
- Li X H, Cai H, Ren X L, et al, 2020. Sandstorm weather is a risk factor for mortality in ischemic heart disease patients in the Hexi Corridor, northwestern China[J]. Environ Sci Pollut Res, 27(27):34099-34106.
- Liu L, Guo J P, Gong H N, et al, 2019. Contrasting influence of Gobi and Taklimakan deserts on the dust aerosols in western North America[J]. Geophys Res Lett, 46(15):9064-9071.
- Peng Z, Hu F, Cheng X, 2005. Some characteristics of atmospheric boundary layer structure during the strong dust storm period in Beijing[C]// Abstracts of the Third International Workshop on Sandstorms and Associated Dustfall. Chin Meteor Soci, 20.
- Wei W J, Wang B, Niu X, 2020. Forest roles in particle removal during spring dust storms on transport path[J]. Int J Environ Res Public Health, 17(2):478.
- Xu L S, Wan D J, Duan Y H, et al, 2021. A-230-year dust storm record from China's Lake Gonghai on the northeast Loess Plateau[J]. Arab J Geosci, 14(12):1195.
- Zhang S, Xu H, Lan J H, et al, 2021. Dust storms in northern China during the last 500 years[J]. Sci China Earth Sci, 64(5):813-824.

(本文责编:俞卫平)