

近 60 年河西走廊地区沙尘暴发生演变 特征及其气象影响因子

罗晓玲¹, 李岩瑛^{1,2}, 严志明³, 杨 梅¹, 聂 鑫²

(1.甘肃省武威市气象局, 甘肃 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.甘肃省武威市党政专用通信局, 甘肃 武威 733000)

摘 要:为探讨沙尘暴演变特点及影响因素,应用河西走廊 13 个气象站 1960—2019 年的逐日沙尘暴和同期 130 项大气环流特征量资料,采用概率统计、线性倾向率、滑动 t 检验等方法,详细分析了河西走廊沙尘暴频次的时空演变特征、沙尘暴持续时间和强度特点及变化规律,并使用相关系数(Pearson)法进一步探索沙尘暴的气候影响因素。结果表明:沙尘暴频次呈显著减少趋势,年际倾向率为 3.2 d/10 a,且这种减少趋势存在突变;四季沙尘暴均为减少趋势,减少速度为春季>夏季>冬季>秋季;空间演变特点为,沙尘暴发生频次与减少速度呈显著正相关,减少速度为民勤最快,马鬃山最慢。沙尘暴平均持续时间为 119 min,持续 60~300 min 的频次最多,>300 min 的频次最少;持续时间呈显著缩短趋势,年际倾向率为-7.42 min/10 a,近 9 年持续时间缩短最明显。沙尘暴过程平均最小能见度为 0.569 km,最小能见度为 0.5~1.0 km 的一般沙尘暴频次最多,<0.05 km 的特强沙尘暴频次最少;近 16 年沙尘暴强度无明显变化。沙尘暴频次和持续时间与副高西伸脊点指数呈显著正相关,与西太平洋副高面积指数、西太平洋副高强度指数、东亚槽强度指数、青藏高原-1 指数、青藏高原-2 指数、大西洋年代际振荡指数呈显著负相关。由此可见,大气环流指数是影响沙尘暴发生发展的重要因素之一。

关键词:沙尘暴;要素变化特征;影响因子;相关性分析;河西走廊

中图分类号:P445.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)05-0254-07

Evolution Characteristics of Sandstorm and Meteorological Influence Factors in Hexi Corridor in Recent 60 Years

LUO Xiaoling¹, LI Yanying^{1,2}, YAN Zhiming³, YANG Mei¹, NIE Xin²

(1.Wuwei City Meteorological Bureau, Wuwei, Gansu 733000, China; 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,

China; 3.Wuwei City Party and Government Special Communication Bureau, Wuwei, Gansu 733000, China)

Abstract:In order to study the evolutionary characteristics and influencing factors of sand-dust storm, the methods of probability statistics, linear tendency rate and sliding t test were used, the spatial and temporal evolution characteristics of sandstorm in Hexi Corrido and its changing regularity were analyzed in detail based on the daily sandstorm data from 13 weather stations from 1960 to 2019 and the atmospheric circulation characteristics provided by the National Climate Center, and the climatic influencing factors of sandstorms were explored by correlation coefficient method. The results showed that the sandstorm had a significant decreasing trend, the interannual trend rate was 3.2 d/decade, and the decreasing trend was mutational, the reduction gradient of sandstorm decrease in the order: spring>summer>winter>autumn. The spatial evolution characteristics was that occurrence frequency of sandstorm was positively correlated with the decreasing level, which was the highest in Minqin and the lowest in Mazong Mountain. The average duration of sandstorm was 119 minutes, the duration frequency of 60~300 minutes was the most, the duration frequency of>300 minutes was the least. The duration showed a significant shortening trend, the interannual trend rate

收稿日期:2020-10-12

修回日期:2021-03-11

资助项目:国家自然科学基金面上项目“河西地区高层大气向边界层动量下传对强沙尘暴的影响机制”(41975015)

第一作者:罗晓玲(1966—),女,甘肃酒泉人,高工,主要从事天气气候预报预测和相关研究。E-mail:qxjlxl@yeah.net

was -7.42 m/decade , the most obvious shortening had been observed in the last 9 years. The average minimum visibility of sandstorm was 0.569 km , the average frequency of general sandstorm with the minimum visibility of $0.5 \sim 1.0 \text{ km}$ was the most, and the frequency of $<0.05 \text{ km}$ super-strong sandstorm was the least, the intensity of sandstorm had no obvious change in recent 16 years. The frequency and duration of sandstorms were positively correlated with the Western Pacific Sub Tropical High Western Ridge Point Index, and negatively correlated with the Western Pacific Subtropical High Area and Intensity Index, East Asian Trough Intensity Index, Tibet Plateau Region -1 and -2 Index, Atlantic multi-decadal Oscillation Index. The atmospheric circulation index is one of the important factors that affect the occurrence and development of sand-dust storms.

Keywords: sandstorm; elements evolution characteristics; impact factor; correlation analysis; Hexi Corridor

沙尘暴是特殊下垫面和地理环境条件下,因不同大尺度环流背景与中小尺度天气系统叠加而造成的一种小概率、大危害的灾害性天气^[1-3]。甘肃省气象灾害种类多、发生频率高、危害重,因气象灾害造成的损失占自然灾害损失的 88.5% ,高出全国平均状况 18.5% ,占 GDP 的 $3\% \sim 5\%$ ^[4]。甘肃河西走廊因其特殊的地理位置成为甘肃乃至全国沙尘暴的高发区之一^[5-7]。因沙尘暴造成的损失位列全部气象灾害损失第 3,仅武威市年均经济损失超过 $3\,783$ 万元,年均农业受灾面积超过 $13\,195 \text{ hm}^2$,已严重影响地方经济的发展^[8]。

有研究者^[9-13]分析了中国沙尘暴的分布及频次变化特征认为,我国 50% 以上的沙尘暴发生在春季,沙尘暴频次变化呈波动下降趋势,随着时间序列变长,沙尘暴是否有新的变化特征,作者用最新气象资料做了深入研究,以期有新的变化。近年来,沙尘暴的形成机理引起了广大学者的关注,研究表明^[14-27],沙尘暴频次与大风频次、风速、冬春季蒸发量为显著正相关,与气温、日照时数为负相关,降水对沙尘暴的发生有抑制作用,地形、地貌为沙尘暴的发生、发展提供沙源和起沙条件。Li 等^[28-29]得出塔里木盆地和蒙古中西部地区的沙尘暴频率与 500 hPa 位势高度为显著负相关,前冬北大西洋涛动指数与春、夏季沙尘暴日数有较好的相关性,刘生元等^[30]研究表明,春季东亚副热带西风急流强度与中国春季沙尘暴日数呈显著负相关,Yang 等^[31]则认为,在沙尘暴高频年中,东亚高纬地区上部和中部对流层的经向气流明显强于低纬地区,冯鑫媛等^[32]利用 1954—2005 年沙尘暴资料研究出沙尘暴持续时间分布规律为,短时型、中间型和持续型,但对持续时间变化特征未做研究。有关沙尘暴持续时间及强度变化特征的文献极少,虽然赵明瑞等^[33]分析了甘肃民勤 2001—2010 年沙尘暴强度,但范围小,时间短,代表性不强,因此,本研究利用近 60 a 河西走廊区域性沙尘暴资料,从沙尘暴频次空间和时间变化以及沙尘暴持续时间和强度变化 4 个方面进行系统

性分析研究,并首次研究大气环流特征量指数与河西走廊沙尘暴的关系,以期寻找更多影响因素,为准确预报沙尘暴,防灾减灾,减轻损失,为地方服务提供决策依据意义重大。

1 研究区概况

河西走廊位于甘肃省西北部,在祁连山以北,合黎山以南,乌鞘岭以西,甘肃新疆边界以东,为西北—东南走向的狭长平地。地域上包括甘肃省的河西五市:武威、张掖、金昌、酒泉和嘉峪关。西部敦煌市与库木塔格沙漠相连,北部金塔县与巴丹吉林沙漠接壤,东北部民勤县被腾格里沙漠所围。地势南高北低,其海拔高度 $1\,139 \sim 3\,100 \text{ m}$,年降水量 $40 \sim 410 \text{ mm}$,年蒸发量 $1\,500 \sim 3\,311 \text{ mm}$ 。气候干旱少雨,大风沙尘暴频发。

2 资料与分析方法

2.1 资料来源及说明

所用气象要素数据来源于河西走廊酒泉市、张掖市、武威市 13 个沙尘暴发生频次较高气象站的逐日观测记录。为了对比研究,按照地理位置划分为西部(马鬃山、肃州、敦煌、玉门镇、鼎新、金塔、瓜州)、中部(甘州、高台、山丹)、东部(民勤、永昌、凉州)3 个区域。

根据中华人民共和国国家质检总局和国家标准委 2006 年 11 月 1 日批准发布的《沙尘暴天气等级》,根据地面水平能见度依次分为浮尘、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴和特强沙尘暴 5 个等级。分级标准为,沙尘暴:能见度 $<1.0 \text{ km}$,强沙尘暴:能见度 $<0.5 \text{ km}$,特强沙尘暴:能见度 $<0.05 \text{ km}$ 。由于能见度的观测在 1979 年及以前为 0~9 级,1980—2003 年的单位不一致,而且在地面观测月报表中有些年份没有最小能见度观测记录,故本文用 2004—2019 年的最小能见度资料统计分析沙尘暴的强度。

大气环流特征量指数由中国气象局国家气候中心气候监测室提供。冷空气次数,取酒泉、兰州等 8 个北方站和南京、汉口等 7 个南方站逐日平均气温。

判定标准:三天内(个别情况二天或四天)连续降温 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ (允许某一天变温在 $0\sim 1^{\circ}\text{C}$)为一次冷空气过程,其数目为冷空气次数;NINO 3.4 区海表温度距平指数为 $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ 、 $170^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{W}$ 区域内海表温度距平的区域平均值;大西洋多年代际振荡指数为 $0^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{N}$ 、 $80^{\circ}\sim 0^{\circ}\text{W}$ 区域内海表温度距平的区域平均值;类 El Nino 指数定义为: $[\text{SSTA}]\text{C}-0.5[\text{SSTA}]\text{E}-0.5[\text{SSTA}]\text{W}$ 。其中 $[\text{SSTA}]\text{C}$ 、 $[\text{SSTA}]\text{E}$ 和 $[\text{SSTA}]\text{W}$ 分别表示热带太平洋中部($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 、 $165^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{W}$)、东部($15^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{W}$)和西部($10^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 、 $125^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$)区域海表温度距平的区域平均值;西太平洋副高面积指数是 500 hPa 高度场, $10^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$ 区域内 $\geq 5\ 880$ 位势米(gpm)区域的球面面积;西太平洋副高强度指数是 500 hPa 高度场, $10^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$ 范围 $\geq 5\ 880$ 位势米(gpm)的区域内,格点位势高度与 5 870 位势米(gpm)之差乘以格点面积的累积值;东亚槽位置指数为 500 hPa 高度场, $30^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{E}$ 区域内,槽线的平均经向位置;西藏高原-1 指数为 500 hPa 高度场, $25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 、 $80^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$ 区域内,格点位势高度与 5 000 位势米(gpm)之差乘以格点面积的累积值。西藏高原-2 指数为 500 hPa 高度场, $30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $75^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$ 区域内,格点位势高度与 5 000 位势米(gpm)之差乘以格点面积的累积值;欧亚纬向环流指数是 500 hPa 高度场, $45^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{N}$ 、 $0^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 区域内,以 30 个经度为间隔划分为 5 个区,分别按照公式(1)计算纬向指数 I_{Zi} ,然后计算 5 个区的平均纬向指数。

$$I_{Zi} = -\frac{\overline{\Delta Z}}{\Delta \varphi} = \frac{\overline{Z_1 - Z_2}}{\varphi_2 - \varphi_1} = \frac{\sum_{i=1}^l Z_{1i} - \sum_{i=1}^l Z_{2i}}{l(\varphi_2 - \varphi_1)} \quad (1)$$

式中: φ_1, φ_2 表示计算 I_Z 的纬度范围; Z_{1i}, Z_{2i} 分别是在 φ_1, φ_2 两个纬圈上的高度值; l 为分别在 φ_1, φ_2 纬圈上均匀取点的高度值的数量。

2.2 统计与分析方法

用河西走廊 13 个观测站 1960—2019 年的逐日沙尘暴资料,利用线性倾向率方法分析沙尘暴频次的时间及空间变化趋势,通过滑动 t 检验方法检验是否存在显著突变;应用概率统计和线性倾向率方法研判该区沙尘暴持续时间和强度(最小能见度)特征及演变规律。

使用国家气候中心提供的 130 项 1960—2019 年逐日大气环流特征量指数,从大尺度天气系统、海温、冷空气的角度出发,利用相关系数(Pearson)法,分析气候系统指数与沙尘暴频次、沙尘暴过程持续时间的关系。

通过 Excel 2007, SPSS 22.0, vb6.0 等软件,对资料进行统计、处理和分析。

3 结果与分析

3.1 沙尘暴的空间分布及演变特征

河西走廊是中国沙尘暴的高发区之一,沙尘暴发生频次最多的是东北部的民勤(21.7 d/a),其次是金塔(15.7 d/a)、鼎新(13.3 d/a)、甘州(10.5 d/a)、敦煌(9.3 d/a),最少的是马鬃山(1.2 d/a)。从地理位置看,临近沙漠地区,沙尘暴频次较多,反之亦然。民勤三面被巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠所围,金塔、鼎新、甘州北面与巴丹吉林沙漠接壤,敦煌西接库姆塔格沙漠。随着时间变化各地沙尘暴均呈减少趋势,年际倾向率为民勤 $-7.2\text{ d}/10\text{ a}$ >金塔 $-5.7\text{ d}/10\text{ a}$ >鼎新 $-4.8\text{ d}/10\text{ a}$ >甘州 $-4.4\text{ d}/10\text{ a}$ >高台 $-3.2\text{ d}/10\text{ a}$ >敦煌 $-3.1\text{ d}/10\text{ a}$ >肃州 $-2.6\text{ d}/10\text{ a}$ >凉州 $-2.4\text{ d}/10\text{ a}$ >瓜州 $-2.0\text{ d}/10\text{ a}$ >玉门镇 $-1.9\text{ d}/10\text{ a}$ >山丹 $-1.7\text{ d}/10\text{ a}$ >永昌 $-1.1\text{ d}/10\text{ a}$ >马鬃山 $-0.2\text{ d}/10\text{ a}$ (马鬃山 $p<0.05$,其他站 $p<0.001$)。由此可见,沙尘暴发生频次与减少速度呈显著正相关,民勤是沙尘暴发生频次最多的地方,也是减少速度最快的地方,这与近年来全球气候变暖、中纬度西风带强度减弱、大风日数减少,区域生态的重建和恢复息息相关。

3.2 沙尘暴频次的时间演变特征

3.2.1 沙尘暴频次的年际及年代际演变特征 沙尘暴频次年变化曲线(图 1)显示,沙尘暴呈显著减少趋势,年际倾向率为东部 $-3.5\text{ d}/10\text{ a}$ ($p<0.001$)>中部 $-3.1\text{ d}/10\text{ a}$ ($p<0.001$)>西部 $-2.9\text{ d}/10\text{ a}$ ($p<0.001$)。东、中、西部减少速度最快的分别为民勤、甘州、金塔;年代际变化(表 1)表明,20 世纪 70 年代是沙尘暴高发期,80 年代开始到 90 年代迅速减少,2000 年以后减少速度减小,近 9 a 减少最显著。

滑动 t 检验监测显示,河西走廊沙尘暴发生了突变减少,显著突变点($p<0.05$),西部在 1979 年,中部在 1966 年、1972 年、1973 年,东部则在 1966 年。

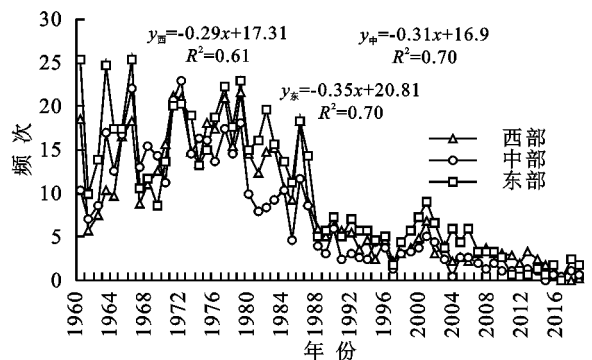


图 1 河西走廊沙尘暴年变化趋势

3.2.2 沙尘暴频次的月际及季节演变特征 河西走廊沙尘暴一年四季均有发生,其中 9 月、10 月最少,月均

0.2 d,占全年沙尘暴频次的 2.3%,4 月最多为 1.6 d,占全年沙尘暴频次的 18.6%;春季最多为 4.2 d,占全年沙尘暴频次的 48.9%,其次是夏季 2.1 d、冬季 1.6 d,秋季最少为 0.7 d,仅占全年沙尘暴频次的 8.1%。

表 1 河西走廊各县(区)沙尘暴距平年代际变化天

起止年限	马鬃山	肃州	敦煌	玉门镇	鼎新	金塔	瓜州	甘州	高台	山丹	民勤	永昌	凉州
1961—1970	−0.1	2.4	6.6	1.9	4.2	4.8	2.5	11.1	4.8	3.3	8.9	0.2	7.0
1971—1980	0.8	11.2	6.5	6.9	15.3	21.9	3.4	9.8	12.0	5.3	17.7	3.8	3.9
1981—1990	0.2	0.9	1.3	1.9	5.6	3.4	2.3	0.3	1.3	−1.7	9.1	0.8	−1.8
1991—2000	−0.2	−4.8	−3.7	−2.6	−7.0	−10.5	−2.3	−6.1	−4.9	−2.4	−9.6	−1.7	−3.2
2001—2010	−0.5	−4.4	−4.9	−3.2	−9.2	−10.1	−3.1	−7.1	−5.6	−2.5	−10.8	−1.5	−3.3
2011—2019	−0.4	−6.1	−7.2	−5.3	−11.8	−13.0	−5.2	−9.2	−7.9	−3.1	−19.7	−3.0	−4.3

四季沙尘暴也为显著减少趋势(图 2),减少速度是春季>夏季>冬季>秋季。春季沙尘暴频次年际倾向率为中部−1.6 d/10 a>东部−1.4 d/10 a>西部−1.2 d/10 a;夏季年际倾向率为东部−0.99 d/10 a>中部−0.84 d/10 a>西部−0.66 d/10 a;秋季年际倾向率为西部−0.29 d/10 a>东部−0.28 d/10 a>中部−0.20 d/10 a;冬季年际倾向率为东部−0.89 d/10 a>西部−0.70 d/10 a>中部−0.48 d/10 a。

四季均为 20 世纪 70 年代是最多期,之后持续减少,近 9 a 减少最显著,春、夏、秋、冬较 70 年代分别减少了 7.3 d,4.0 d,1.1 d,3.9 d。(四季变化趋势均 $p<0.001$)。

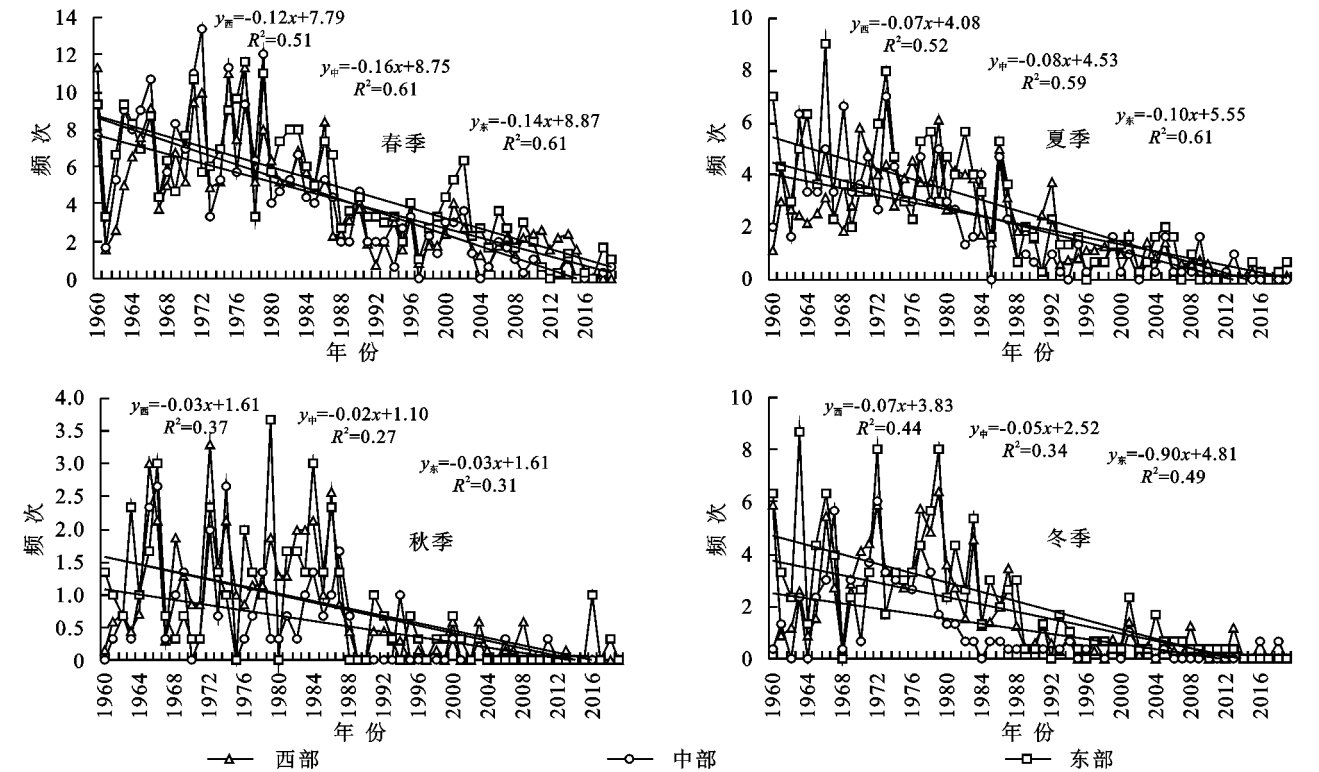


图 2 河西走廊沙尘暴四季变化趋势

3.3 沙尘暴持续时间特征及演变规律

河西走廊沙尘暴过程平均持续时间(图 3A)为 119 min,持续 60~300 min 的频次最多,其次是<60 min 的,>300 min 的频次最少。其中,西部和东部是持续 60~300 min 的频次最多,>300 min 的频次最少;中部是<60 min 的频次最多,>300 min 的频次最少。

四季平均持续时间(图 3B)分别为,春季 106.7 min、夏季 41.9 min、秋季 35.1 min、冬季 64.2 min。冬季、春季和秋季均是持续 60~300 min 的频次最多,>300 min 的频次最少;夏季是<60 min 的频次

最多,>300 min 的频次最少。

以沙尘暴发生频次最高的民勤为例研究发现,<60 min 的沙尘暴主要出现在下午到夜间,持续 60~300 min 和>300 min 的沙尘暴则多出现在中午前后到下午。

近 60 年沙尘暴平均持续时间呈显著缩短趋势(图 4),年际倾向率为−7.42 min/10 a($p<0.001$)。年代际变化显示,20 世纪 60—70 年代是沙尘暴持续时间最长时期,平均持续时间为 132 min,80 年代持续时间有所缩短,平均持续时间为 116.9 min,90 年代迅速反弹延长,平均持续时间为 124.2 min,1996 年出现了

1965年以来河西走廊西部最强沙尘暴,也是近60年持续时间最长的沙尘暴,2000年以后持续时间迅速

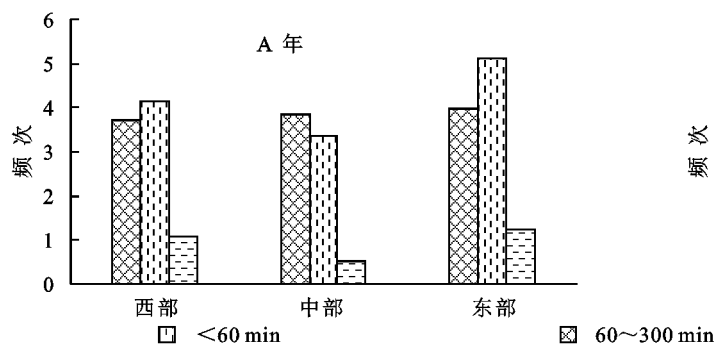


图3 河西走廊沙尘暴持续时间年、四季特征

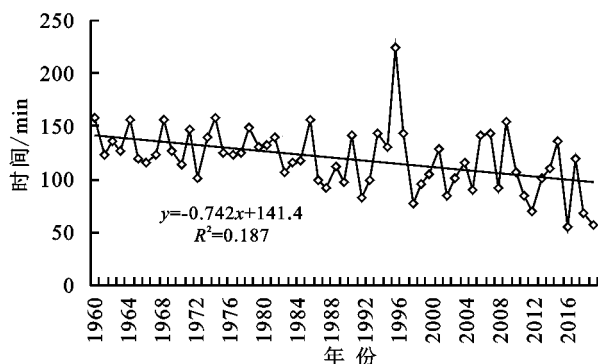


图4 河西走廊沙尘暴持续时间变化趋势

沙尘暴四季持续时间也呈显著缩短趋势,缩短速度是冬季>春季>秋季>夏季。春、夏、秋、冬四季持续时间年际倾向率分别为 $-16.8 \text{ min}/10 \text{ a}$, $-11.2 \text{ min}/10 \text{ a}$, $-13.6 \text{ min}/10 \text{ a}$, $-21.7 \text{ min}/10 \text{ a}$ 。(四季均 $p < 0.001$)。冬季和春季持续时间最长为20世纪70年代,之后持续缩短,近9a是持续时间最短期,

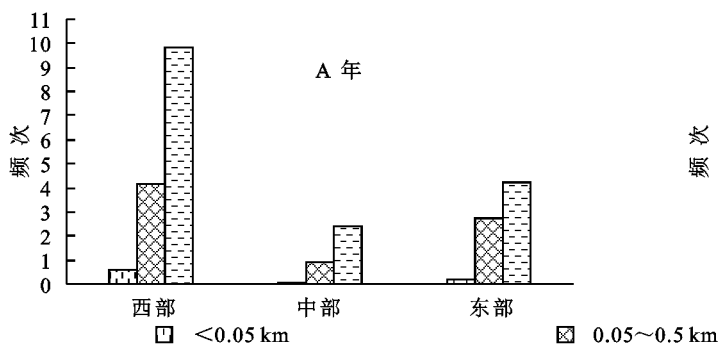


图5 河西走廊沙尘暴最小能见度年、四季特征

近16a沙尘暴年均最小能见度序列变化显示,河西走廊沙尘暴强度无明显变化,最小能见度维持在0.57 km左右。

3.5 沙尘暴变化影响因素分析

3.5.1 频次变化影响因素分析 影响沙尘暴发生的因素很多,诸多学者已有研究,这里不再一一赘述,本文拟从大尺度天气系统、海温、冷空气的角度出发分析大气环流特征量指数变化对该地区沙尘暴的影响(表2)。

缩短,平均持续时间为103.3 min,特别近9a时间缩短最明显,持续时间是平均持续时间的2/3。

较70年代分别缩短了108.2 min和100.0 min;夏季和秋季持续时间最长为20世纪60年代,之后持续缩短,近9a是持续时间最短期,较60年代分别缩短了62.7 min和63.1 min。

3.4 沙尘暴的强度特征及演变规律

根据每次沙尘暴天气过程中最小能见度来表征沙尘暴的强度,沙尘暴个例资料显示,河西走廊沙尘暴过程平均最小能见度为0.569 km(沙尘暴),0.5~1.0 km(沙尘暴)的频次最多,占总频次的70%,其次是0.05~0.5 km(强沙尘暴)的,<0.05 km(特强沙尘暴)的频次最少,仅占总频次的3.2%(图5A)。即河西走廊沙尘暴以普通类型为主。

沙尘暴四季强度(图5B)和年特征一样,各季均是0.5~1.0 km(沙尘暴)的频次最多,其次为0.05~0.5 km(强沙尘暴)的,<0.05 km(特强沙尘暴)的频次最少。

分析发现,与河西走廊年沙尘暴频次相关性最好的是大西洋年代际振荡指数,其次是青藏高原-1指数、青藏高原-2指数、副高西伸脊点指数、西太平洋副高面积指数、西太平洋副高强度指数、东亚槽强度指数、东亚槽位置指数、NINO 3.4区海表温度距平指数、类ENSO指数(以上均 $p < 0.05$)。其中,与太平洋年代际振荡指数、NINO 3.4区海表温度距平指数成显著负相关,类ENSO指数成显著正相关,说明沙尘暴频次与ENSO事件关系密切,PDO负位

相(拉尼娜)有利于沙尘暴发生;与青藏高原-1 指数和青藏高原-2 指数均呈显著负相关,且相关系数较大,表明高原槽的位置和强度对沙尘暴频次影响较明显;与副高西伸脊点指数呈显著正相关,西太平洋副高面积指数、西太平洋副高强度指数呈显著负相关,说明西太平洋副热带高压 588 线位置越偏西,面积越小,强度越弱,河西走廊沙尘暴频次越多;与东亚槽位置

指数呈正相关,东亚槽强度指数呈显著负相关,说明东亚槽的位置和强度直接影响着沙尘暴频次;与冷空气次数呈弱正相关,冷空气次数多,就意味着天气过程多,伴随地面冷锋过境,在锋面前后强气压梯度作用下形成大风,继而引发沙尘暴;与欧亚纬向环流指数呈弱负相关,表明 500 hPa 环流经向度加大,偏北气流引导冷空气南下,形成大风,导致沙尘暴频次加大。

表 2 河西走廊沙尘暴频次与各影响因子相关系数

位置	大西洋多年代际振荡指数	青藏高原-1 指数	青藏高原-2 指数	副高西伸脊点指数	西太平洋副高面积指数	西太平洋副高强度指数	东亚槽强度指数	东亚槽位置指数	NINO 3.4 区海表温度距平指数	类 ENSO 指数	冷空气次数	欧亚纬向环流指数
西部	-0.74**	-0.51**	-0.50**	0.50**	-0.48**	-0.46**	-0.48**	0.31*	-0.27*	0.21	0.20	-0.22
中部	-0.74**	-0.65**	-0.62**	0.60**	-0.55**	-0.50**	-0.47**	0.22	-0.31*	0.30*	0.23	-0.26*
东部	-0.70**	-0.61**	-0.62**	0.53**	-0.52**	-0.51**	-0.49**	0.30*	-0.27*	0.25	0.26*	-0.23
走廊	-0.75**	-0.61**	-0.60**	0.56**	-0.53**	-0.51**	-0.50**	0.29*	-0.29*	0.26*	0.24	-0.24

注: **, * 分别表示通过了 0.01, 0.05 信度检验,下同。

3.5.2 持续时间变化影响因素分析 分析沙尘暴持续时间与大气环流特征量的关系发现(表 3),与河西走廊沙尘暴持续时间相关性最好的是西太平洋副高面积指数,其次是西太平洋副高强度指数、青藏高原-2 指数、青藏高原-1 指数、副高西伸脊点指数、大西洋多年代际振荡指数、东亚槽强度指数(以上均 $p<0.05$)。与副高西伸脊点指数呈显著正相关,与西太平洋副高面积指数、西太平洋副高强度指数呈显著

负相关,表明西太平洋副热带高压 588 线位置越偏西,面积越小,强度越弱,河西走廊沙尘暴持续时间越长;与青藏高原-1 指数、青藏高原-2 指数均呈显著负相关,即高原槽的位置和强度对沙尘暴持续时间有一定影响;与大西洋多年代际振荡指数呈显著负相关,说明沙尘暴持续时间与 ENSO 事件有一定关系;与东亚槽强度指数呈负相关,表明东亚槽的强度直接影响着沙尘暴的持续时间。

表 3 河西走廊沙尘暴持续时间与各影响因子相关系数

位置	西太平洋副高面积指数	西太平洋副高强度指数	青藏高原-2 指数	青藏高原-1 指数	副高西伸脊点指数	大西洋多年代际振荡指数	东亚槽强度指数	冷空气次数	类 ENSO 指数	NINO 3.4 区海表温度距平指数	欧亚纬向环流指数	东亚槽位置指数
西部	-0.40**	-0.41**	-0.38**	-0.37**	0.41**	-0.41**	-0.23	-0.29*	0.26*	-0.20	-0.05	-0.08
中部	-0.31*	-0.26*	-0.35**	-0.34**	0.28*	-0.20	-0.16	-0.06	0.12	-0.05	-0.09	0.01
东部	-0.42**	-0.39**	-0.34**	-0.35**	0.34**	-0.33*	-0.28*	-0.05	-0.05	-0.10	-0.20	0.16
走廊	-0.52**	-0.50**	-0.50**	-0.49**	0.49**	-0.46**	-0.31*	-0.24	0.21	-0.19	-0.12	0.00

综合以上,年沙尘暴频次与环流指数的关系比持续时间与环流指数的关系更为显著,河西走廊沙尘暴的发生发展,下垫面条件是主要影响因素,大尺度天气系统演变是触发机制,气候要素变化是直接影响因子。

4 讨论

河西走廊沙尘暴年、季频次呈显著减少趋势,与高振荣等^[18]研究结论完全一致,年际倾向率有所差别是所用资料时间长短不同所致;沙尘暴过程,持续 60~300 min 的频次最多,>300 min 的频次最少,与李玲萍等^[17]分析的河西走廊东部沙尘暴持续时间结果基本一致;河西走廊沙尘暴强度无明显变化,最小能见度维持在 0.57 km 左右,这一结论与赵明瑞等^[33]用 2001—2010 年民勤沙尘暴资料得出的“最小

能见度有减小趋势”有所不同,主要原因是研究范围和资料长度不同所致;大气环流经向度加大,沙尘暴发生频次加大、持续时间延长,这一个结论与江灏等^[5]的研究相一致;沙尘暴频次与 NINO 3.4 区海表温度距平指数、大西洋多年代际振荡指数成显著负相关,与类 ENSO 指数成显著正相关,与南方涛动指数关系不显著,这一结论与李威^[34]用 1957—2002 年资料分析结果“北方春季沙尘暴与 NINO3 区海表温度的相关不如与 SOI 的好”不完全相同,究其原因,与资料年代长短、研究区范围大小、地理位置不同所致,有待进一步研究。

5 结论

(1) 河西走廊沙尘暴分布特点为,临近沙漠地区

发生频次多,远离沙漠地区发生频次少。随着时间变化各地沙尘暴均呈减少趋势,且发生频次与减少速度呈显著正相关。

(2) 河西走廊沙尘暴频次呈显著减少趋势,年际倾向率为东部 $-3.5 \text{ d}/10 \text{ a}$ >中部 $-3.1 \text{ d}/10 \text{ a}$ >西部 $-2.9 \text{ d}/10 \text{ a}$ 。20 世纪 70 年代是沙尘暴高发期,之后持续减少,近 9 a 减少最显著。四季也呈显著减少趋势,减少速度是春季>夏季>冬季>秋季。沙尘暴发生了突变减少。

(3) 河西走廊沙尘暴过程平均持续时间为 119 min,持续 60~300 min 的频次最多,>300 min 的频次最少。沙尘暴平均持续时间呈显著缩短趋势,年际倾向率为 $-7.42 \text{ min}/10 \text{ a}$,近 9 a 持续时间缩短最明显;四季持续时间也呈显著缩短趋势,缩短速度是冬季>春季>秋季>夏季。

(4) 河西走廊沙尘暴过程平均最小能见度为 0.569 km,0.5~1.0 km(沙尘暴)的频次最多,占总频次的 70%, $<0.05 \text{ km}$ (特强沙尘暴)的频次最少,仅占总频次的 3.2%。近 16 a 沙尘暴年均最小能见度无明显变化,始终在平均值上下波动。

(5) 河西走廊年沙尘暴频次与副高西伸脊点指数、东亚槽位置指数、类 ENSO 指数呈显著正相关,与西太平洋副高面积指数、西太平洋副高强度指数、东亚槽强度指数、青藏高原-1 指数、青藏高原-2 指数、NINO 3.4 区海表温度距平指数、大西洋多年代际振荡指数呈显著负相关。

(6) 河西走廊沙尘暴过程持续时间与副高西伸脊点呈显著正相关,与西太平洋副高面积指数、西太平洋副高强度指数、青藏高原-1 指数、青藏高原-2 指数、东亚槽强度指数、大西洋多年代际振荡指数呈显著负相关。

参考文献:

- [1] 王式功,董光荣,陈惠忠,等.沙尘暴研究的进展[J].中国沙漠,2000,20(4):349-356.
- [2] 甄泉,王雅晴,洗超凡,等.沙尘暴对北京市空气细菌多样性特征的影响[J].生态学报,2019,39(2):717-725.
- [3] Xie S, Qi Y Z L, Tang X. Characteristics of air pollution in Beijing during sand-dust storm periods[J]. Water, Air, & Soil Pollution: Focus, 2005, 5(3): 217-229.
- [4] 韩兰英,张强,杨阳,等.气候变化背景下甘肃省主要气象灾害综合损失特征[J].干旱区资源与环境,2019,33(7):107-114.
- [5] 江灏,吴虹,尹宪志,等.河西走廊沙尘暴的时空变化特征与其环流背景[J].高原气象,2004,23(4):548-552.
- [6] Gao Y, Arimoto R, Zhou M Y, et al. Relationships between the dust concentrations over eastern Asia and the remote North Pacific [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, 97(9): 9867-9872.
- [7] Xuan J, Sokolik I N. Characterization of sources and emission rates of mineral dust in Northern China[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(31): 4863-4876.
- [8] 罗晓玲,胡丽莉,杨梅.近 30 年石羊河流域气象灾害特征及风险评估技术研究[J].中国农学通报,2015, 31(32): 205-210.
- [9] 王春学,秦宁生.中国北方春季沙尘暴周期变化特征及其对最大风速的响应[J].水土保持研究,2018, 25(3): 133-141.
- [10] 蒋盈沙,高艳红,潘永洁,等.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,2019,39(4): 83-91.
- [11] 孔锋.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,2020, 34(8): 116-123.
- [12] 姜萍,徐洁,陈鹏翔,等.南疆近 57 年沙尘暴变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2019,33(2): 103-109.
- [13] 马潇潇,王海兵,左合君.近 54 年内蒙古自治区西部沙尘暴的变化趋势[J].水土保持通报,2019, 39(4): 17-21, 101.
- [14] 袁国波.21 世纪以来内蒙古沙尘暴特征及成因[J].中国沙漠,2017,37(6): 1204-1209.
- [15] 李宽,熊鑫,王海兵,等.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,2019,36(3): 657-663.
- [16] 常兆丰,王耀琳,韩福贵,等.沙尘暴发生日数与空气湿度和植物物候的关系:以民勤荒漠区为例[J].生态学报,2012,32(5): 1378-1386.
- [17] 李玲萍,李岩瑛,孙占峰,等.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,2019, 36(6): 1457-1465.
- [18] 高振荣,李红英,瞿汶,等.近 55 年来河西地区沙尘暴时空演变特征[J].干旱区资源与环境,2014, 28(12): 76-81.
- [19] 刘洪兰,张强,张俊国,等.1960—2012 年河西走廊中部沙尘暴空间分布特征和变化规律[J].中国沙漠,2014, 34(4): 1102-1108.
- [20] 赵明瑞,杨晓玲,滕水昌.甘肃民勤地区沙尘暴变化趋势及影响因素[J].干旱气象,2012,30(3): 421-425.
- [21] 李璠,肖建设,祁栋林,等.柴达木盆地沙尘暴天气影响因素[J].中国沙漠,2019,39(2): 144-150.
- [22] 张伟,杨淑敏,周向玲.喀什地区沙尘暴天气变化特征及影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2016,30(6): 95-101.
- [23] 李玄姝,常春平,李云强.承德沙尘天气空间分布特征、成因及防治措施[J].水土保持研究,2012,19(4): 270-273.
- [24] 王森,王雪姣,陈东东,等.1961—2017 年南疆地区沙尘天气的时空变化特征及影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2019,33(9): 81-86.