

1960—2020 年内蒙古自治区沙尘天气的 时空演变特征及驱动因素

杨舒畅¹, 秦富仓¹, 王曼霏²

(1.内蒙古农业大学 林学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2.内蒙古自治区雷电预警防护中心, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: [目的] 分析 1960—2020 年内蒙古自治区沙尘天气的时空演变特征及其驱动因素, 科学认识气候变化背景下区域沙尘天气变化规律, 为生态治理提供理论依据。[方法] 利用内蒙古自治区 119 个气象站点 1960—2020 年逐日浮尘、扬沙、沙尘暴资料, 采用趋势分析、M—K 检验、相关分析等方法, 对内蒙古自治区沙尘天气的时空演变特征及驱动因素进行分析。[结果] ① 1960—2020 年内蒙古自治区的各等级沙尘日数及沙尘强度指数均呈极显著的下降趋势 ($p < 0.01$), 浮尘日数和扬沙日数均在 1990 年前后发生由多到少的突变, 沙尘暴日数和沙尘强度指数无明显突变点; ② 沙尘天气的空间变化趋势表现为, 西部地区发生频率高且强度较大, 高值中心出现在阿拉善盟的中部及西部与乌海市交界地区, 向东迅速减弱, 地区间差异明显; 1960—2020 年, 沙尘天气减弱程度西部地区较东部地区更为明显; ③ 1960—2020 年, 内蒙古自治区沙尘天气减弱, 既与增温背景下的大风日数减少 ($10.1 \text{ d}/10 \text{ a}$, $p < 0.01$) 及冬春季节降水增多 ($2.65 \text{ mm}/10 \text{ a}$, $p < 0.01$) 有关, 也与持续多年的大规模生态治理下, NDVI 明显增加 ($0.036/10 \text{ a}$, $p < 0.01$), 生态环境显著改善有关。[结论] 沙化土地治理是抑制沙尘天气发生频率和强度的有效手段, 必须持续推进生态环境建设, 尽可能减少沙尘源; 同时, 做好气候变化背景下水资源的开发和利用, 促进生态环境的良性循环, 达到减轻沙尘危害的目的。

关键词: 沙尘天气; 沙尘强度; 时空演变; 内蒙古自治区; 驱动因素

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)05-0235-09

中图分类号: P954

文献参数: 杨舒畅, 秦富仓, 王曼霏. 1960—2020 年内蒙古自治区沙尘天气的时空演变特征及驱动因素 [J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 235-243. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.028; Yang Shuchang, Qin Fucang, Wang Manfei. Spatial-temporal evolution characteristics and driving factors of sand-dust weather for Inner Mongolia Autonomous Region during 1960—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 235-243.

Spatial-temporal Evolution Characteristics and Driving Factors of Sand-dust Weather for Inner Mongolia Autonomous Region During 1960—2020

Yang Shuchang¹, Qin Fucang¹, Wang Manfei²

(1. College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China;

2. Lightning Warning and Protection Center, Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China)

Abstract: [Objective] The spatial and temporal evolution characteristics and driving factors of sand-dust weather in Inner Mongolia Autonomous Region from 1960 to 2020 were analyzed in order to scientifically understand the changes in regional sand-dust weather under the background of climate change and to provide a theoretical basis for ecological governance. [Methods] Daily data for floating dust, blowing sand, and sandstorms from 119 meteorological stations within the Inner Mongolia during 1960—2020 were analyzed to determine the spatial-temporal variation characteristics of sand-dust weather for this region using trend analysis, the M—K test, wavelet analysis, etc. [Results] ① The number and intensity of sand-dust storm

收稿日期: 2022-10-22

修回日期: 2023-01-08

资助项目: 内蒙古自治区高校科研项目“鄂尔多斯高原土壤侵蚀变化特征及其驱动因素分析”(NJZY23110); 国家自然科学基金项目“砒砂岩区裸露基岩—土壤复合坡面侵蚀过程”(41967008)

第一作者: 杨舒畅(1992—), 女(汉族), 内蒙古自治区通辽市人, 硕士, 讲师, 主要从事应用气象方面的研究。Email: fourpeas@163.com。

通信作者: 秦富仓(1966—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 教授, 主要从事土地资源管理、水土保持与荒漠化防治等方面的教学和科研工作。Email: qinfuc@126.com。

days at each level exhibited a very significant ($p < 0.01$) downward trend in the Inner Mongolia Autonomous Region from 1960 to 2020. There was an abrupt decreasing point around 1990 for both the number of floating dust days and blowing sand days. There was no obvious change point in either the number of sand-dust storm days or the sand dust intensity index. ② The frequency and intensity of sand-dust weather was high in the western part of the region, and the high-value center was at the junction of the central and western parts of Alxa League and Wuhai City. The influence of sand-dust weather quickly weakened to the east, and regional differences were great. The weakening degree of sand-dust weather was significantly greater in the western region than in the eastern region. ③ The reduction in number of sand-dust days for the Inner Mongolia Autonomous Region resulted from (a) the decreasing number of windy days (10.1 d/10 yr, $p < 0.01$) and the increasing amount of precipitation in winter and spring (10.1 d/10 yr, $p < 0.01$) caused by significant warming, and from (b) increasing NDVI (0.036/10 yr, $p < 0.01$) and a better ecological environment owing to the government's large-scale ecological governance. [Conclusion] Desertified land control is an effective way to suppress the frequency and intensity of sand-dust weather. It will be necessary to continuously promote the construction of the ecological environment and to minimize the sources of sand and dust. Moreover, we increase efforts to effectively develop and utilize water resources under the background of climate change, thereby promoting a virtuous cycle of ecological environment and reducing the harm caused by sand-dust weather.

Keywords: sand-dust weather; dust intensity; spatial-temporal evolution; Inner Mongolia Autonomous Region; driving factors

沙尘天气是指沙粒、尘土悬浮空中,使空气混浊、能见度降低的天气现象。根据沙尘发生时的水平能见度及风力大小可将其分为浮尘、扬沙和沙尘暴 3 个等级^[1-2]。沙尘天气,特别是沙尘暴天气,往往会给当地的农牧业生产、人民生命财产安全和生态环境等造成不同程度的损失,是干旱、半干旱地区的主要灾害天气之一^[3-7]。

内蒙古自治区是中国荒漠化和沙化最为严重的地区之一,荒漠化土地面积 $6.09 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占全国荒漠化土地面积的 23.3%; 沙化土地面积 $4.08 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占全国沙化土地面积的 23.7%^[6]。全区境内分布有巴丹吉林、腾格里、乌兰布和、库布其四大沙漠和毛乌素、浑善达克、科尔沁、呼伦贝尔四大沙地,沙化土地遍布全区 12 个盟市的 91 个旗县^[7]。脆弱的地表状况为沙尘天气的形成提供了丰富的沙源。同时,由于地处中高纬度地区,是蒙古气旋、冷锋等天气系统南下的重要通道,大风天气多,为沙尘天气的发生提供了动力条件^[8]。内蒙古自治区是中国北方重要的生态安全屏障,对遏制荒漠化东移南下具有重要的作用,沙尘天气治理是生态建设的重要内容之一^[9]。近几十年来,显著的区域气候变化和大规模的生态治理,对沙尘天气的发生产生了较大的影响^[10]。本文系统分析了内蒙古自治区 1960—2020 年来沙尘天气的时空演变特征及其驱动因素,以期科学认识气候变化背景下区域沙尘天气变化规律,为生态治理提供理论依据。

1 资料与方法

1.1 数据资料

选取内蒙古自治区 119 个地面气象站 1960—2020 年逐日的天气现象、平均风速、降水量等观测数据,天气现象包括:浮尘(能见度 $< 10.0 \text{ km}$)、扬沙($1.0 \text{ km} < \text{能见度} < 10.0 \text{ km}$)、沙尘暴(能见度 $< 1.0 \text{ km}$)。数据来源为内蒙古自治区气象局及中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.ov.cn/index.jsp>),少量缺失数据通过邻近站点拟合等处理。根据气候四季的划分,3—5 月为春季;6—8 月为夏季;9—11 月为秋季;12 月至次年 2 月为冬季。

遥感数据来源于美国国家航空航天局的 EOS/MODIS MOD13Q1 数据产品,选取年份为 2000—2020 年,时间分辨率为 16 d,空间分辨率为 250 m。利用最大合成法(MVC)合成月 NDVI 数据,在此基础上合成年最大 NDVI,并认为 NDVI 值小于 0.1 的地区为无植被区,具体方法见参考文献^[13—15]。

1.2 研究方法

1.2.1 沙尘强度指数 以 WANG 等^[16]定义的沙尘强度指数 DI 表征沙尘强度,计算公式为:

$$DI = D_{\text{Fidu}} + 3 D_{\text{FISa}} + 9 D_{\text{SaSt}} \quad (1)$$

式中: D_{Fidu} 、 D_{FISa} 和 D_{SaSt} 分别表示浮尘日数、扬沙日数和沙尘暴日数。

1.2.2 气候倾向率 用 x_i 表示样本量为 n 的某一气候变量,用 t 表示 x_i 所对应的时间,建立 x_i 与 t 之

间的一元线性回归方程:

$$x_i = a + bt_i \quad (i=1, 2 \cdots n) \quad (2)$$

式中: a 为回归常数; b 为回归系数; a 和 b 可以用最小二乘法进行估计。以 b 的10倍作为气候要素的气候倾向率^[17]。

1.2.3 M—K 检验 M—K 检验^[18]是一种无分布检验,不需要试验样本遵从特定的分布,亦不受少数异常值的干扰。可用于检验沙尘事件的变化趋势,具体过程如下:

对于具有 n 个样本量的时间序列 x ,构建秩序列 S_k , S_k 是第 i 时刻大于 j 时刻的累计值($j=1, 2 \cdots i$)。在时间序列随机独立的假定下,定义统计量:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (3)$$

式中: $E(S_k)$ 和 $\text{var}(S_k)$ 分别为累计数 S_k 的均值和方差。按时间序列 x 的逆序列重复计算秩序列 S_k ,并由上式计算标准分布下的 UB_k 。给定显著性水平 $\alpha=0.01$,若 $UF_k > U_\alpha$,则表明序列存在明显的趋势变化,若 UF 和 UB 相交于临界线范围内则为突变开始的时间。

2 结果与分析

2.1 时间变化特征

2.1.1 沙尘日数和强度的年际变化 数据分析表明,1960—2020年内蒙古自治区的总沙尘日数中,扬沙日数最多,占59.5%;浮尘日数次之,占21.4%;沙尘暴日数最少,为19.1%,表明扬沙是影响本区最主要的沙尘天气。从趋势变化来看,近61 a来,浮尘、扬沙和沙尘暴日数均呈极显著的下降趋势($p < 0.01$),下降速率分别为1.8、2.7,和1.6 d/10 a。各等级沙尘日数最大值均出现在1966年,分别为22.7、32.8、17.5 d;浮尘和扬沙日数的最小值出现在2013年,分别为0.4 d和3.4 d。沙尘暴日数最小值出现在2020年,仅为0.2 d(图1)。

由图2可知,1960—2020年内蒙古自治区沙尘强度指数整体呈波动下降趋势,下降速率为24.4/10 a($p < 0.01$)。沙尘强度指数最大值出现在1966年,达279.0;最小值出现在2013年,为16.0。1960—1975年,沙尘强度指数整体较高,平均值为144.9;1976—1999年,沙尘强度指数下降显著($p < 0.01$),速率为46.7/10 a,平均值为82.0;2000年后,沙尘强度年际间波动明显,但强度指数总体偏低,平均值为42.2。

2.1.2 沙尘日数和强度的月际变化 由图3可知,内蒙古自治区沙尘日数峰值出现在4月,各等级沙尘

日数比例均超过全年的20%,其中沙尘暴所占比例甚至接近30%;9月沙尘日数最少,各等级沙尘日数占比均在3%以下。从季节分布来看,春季沙尘天气最为多发,全年一半以上的沙尘日数均出现在春季,秋季的沙尘日数最少。

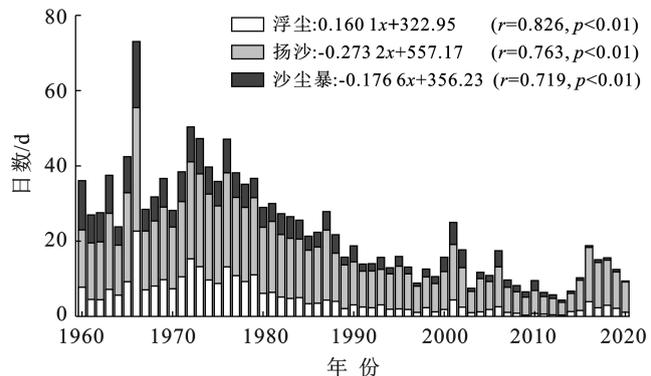


图1 1960—2020年内蒙古自治区各等级沙尘日数的年际变化
Fig.1 Annual variation of flowing dust, sand blowing and sand-dust storm days in Inner Mongolia Autonomous Region from 1960 to 2020

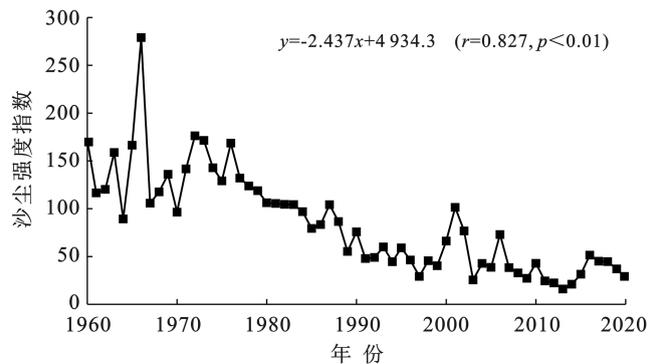


图2 1960—2020年内蒙古自治区沙尘强度指数的年际变化
Fig.2 Annual variation of sand dust intensity in Inner Mongolia Autonomous Region from 1960 to 2020

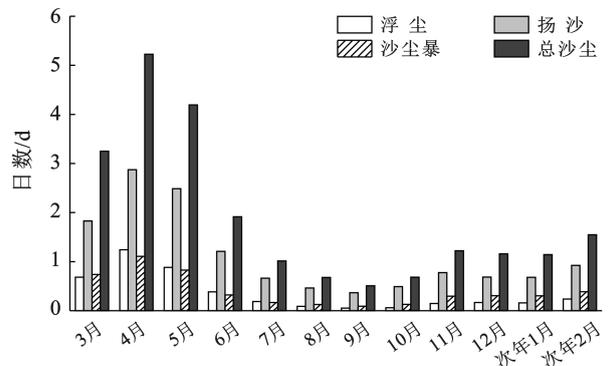


图3 1960—2020年内蒙古自治区各等级沙尘日数的月际变化
Fig.3 Monthly variation of flowing dust, sand blowing and sand-dust storm days in Inner Mongolia Autonomous Region from 1960 to 2020

图 4 为内蒙古自治区沙尘强度指数的月际变化。最大值出现在 4 月,为 20.9;最小值出现在 9 月,为 1.7,呈单峰型变化。从不同季节来看,春季沙尘强度指数最高(49.5),夏季次之(13.5),冬季再次(12.9),秋季最低(7.8)。

1960—2020 年各等级沙尘日数及沙尘强度指数的逐月变化见表 1。各等级沙尘日数均呈极显著的减少趋势($p < 0.01$),且其中 4 月沙尘天气减少最多,浮尘、扬沙和沙尘暴日数的减少速率分别达 3.6,4.0,3.9 d/10 a;各月份的沙尘强度指数也均呈极显著的下降趋势,且以 4 月降幅最大,达 5.1 d/10 a。

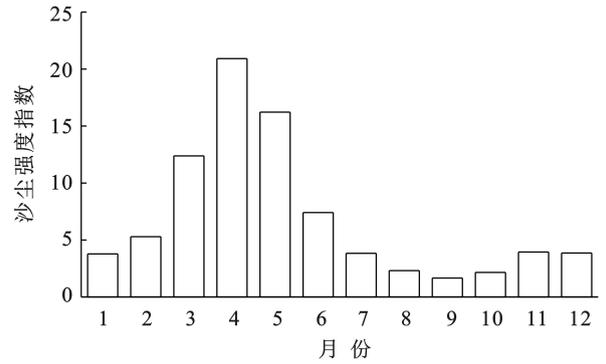


图 4 1960—2020 年内蒙古自治区沙尘强度指数的月际变化
Fig.4 Monthly variation of sand dust intensity in Inner Mongolia Autonomous Region from 1960 to 2020

表 1 1960—2020 年内蒙古自治区各等级沙尘日数及沙尘强度指数的变化率
Table 1 Change rate of flowing dust, sand blowing and sand-dust storm days in Inner Mongolia Autonomous Region from 1960 to 2020

月份	浮尘/ [d·(10 a) ⁻¹]	扬沙/ [d·(10 a) ⁻¹]	沙尘暴/ [d·10 a ⁻¹]	沙尘强度指数/ [DI·(10 a) ⁻¹]	月份	浮尘/ [d·(10 a) ⁻¹]	扬沙/ [d·(10 a) ⁻¹]	沙尘暴/ [d·(10 a) ⁻¹]	沙尘强度指数/ [DI·(10 a) ⁻¹]
1	-0.13**	-0.26**	-0.09**	-1.71**	7	-0.06**	-0.15**	-0.08**	-1.24**
2	-0.16**	-0.24**	-0.12**	-1.96**	8	-0.05**	-0.10**	-0.03**	-0.66**
3	-0.27**	-0.32**	-0.22**	-3.18**	9	-0.03**	-0.08**	-0.03**	-0.49**
4	-0.36**	-0.40**	-0.39**	-5.08**	10	-0.05**	-0.09**	-0.03**	-0.55**
5	-0.26**	-0.39**	-0.30**	-4.16**	11	-0.13**	-0.21**	-0.06**	-1.30**
6	-0.13**	-0.27**	-0.17**	-2.47**	12	-0.15**	-0.23**	-0.08**	-1.57**

注: ** 表示通过 $p < 0.01$ 显著性检验。

2.1.3 年尺度沙尘日数和强度指数的突变分析 利用 M-K 法对内蒙古自治区 1960—2020 年各等级沙尘日数及沙尘强度指数进行突变检验。由图 5a—5b 可见,浮尘日数和扬沙日数在 20 世纪 80 年代前均呈先降后升的趋势,80 年代后发生日数开始减少,且减少趋势均在 1990 年前后达到极显著水平。浮尘日数和扬沙日数的 UF 曲线和 UB 曲线在 1990 年左右存在交点,且交点位于 $\alpha = 0.01$ 的置信区间内,表明浮尘日数和扬沙日数均在 1990 年前后发生了由多到少的突变。除 1966 年外,沙尘暴日数(图 5c)的 UF 统计量均小于 0,表明研究时段内沙尘暴日数整体呈减少趋势,且在 1983 年后减少趋势达到极显著水平。

沙尘强度指数的突变检验见图 5d。1980 年以前,沙尘强度的 UF 统计量正负交替,波动较大。自 1980 年后,UF 统计量均小于 0,表明沙尘强度呈明显的减小趋势,且减小趋势在 1985 年后达到极显著水平。由于 UF 曲线和 UB 曲线的交点位于临界线外,尚不能确定沙尘强度的突变时间。

2.2 空间变化特征

2.2.1 沙尘日数和强度指数的空间分布 由图 6 可见,内蒙古自治区各等级沙尘日数的空间分布特征基本一致,均以西部地区最多,向东迅速减少,地区间

差异明显。各等级沙尘天气中,扬沙的发生日数最多且影响范围最广,其高值中心位于阿拉善盟的中部及西部与乌海市交界地区,发生日数为 54.8~72.3 d。仅有呼伦贝尔和兴安盟两个盟市年均扬沙日数低于 5.4 d;浮尘日数的空间分布与扬沙日数相似,但总日数相对较少,高值区进一步向阿拉善中部地区延伸,发生日数为 22.6~47.7 d;沙尘暴日数普遍较少,最高仅为 23 d,主要以阿拉善和巴彦淖尔北部最为频发。东部四盟市中,仅有通辽、赤峰两市南部地区受沙尘暴影响较大。全区以呼伦贝尔市受沙尘暴影响最小,年均沙尘暴日数不足 1 d。其中图里河在 1960—2020 年从未受到沙尘暴侵袭。

按照沙尘强度指数的大小(图 6d),可将内蒙古地区分为 3 个区域:西部阿拉善盟、乌海市、鄂尔多斯大部及巴彦淖尔西部地区沙尘强度较大,基本都在 144.3 以上,最大值出现在阿拉善的拐子湖站,达 378.3。中部呼和浩特市、包头市、乌兰察布市北部和锡林郭勒盟东部地区沙尘强度明显减弱,除锡林郭勒盟西部个别站点外,大部分地区的沙尘强度指数都在 87.4 以下。东部赤峰市、通辽市、兴安盟和呼伦贝尔市沙尘强度指数较小,仅在赤峰市和通辽市南部有零散较高值区的分布。

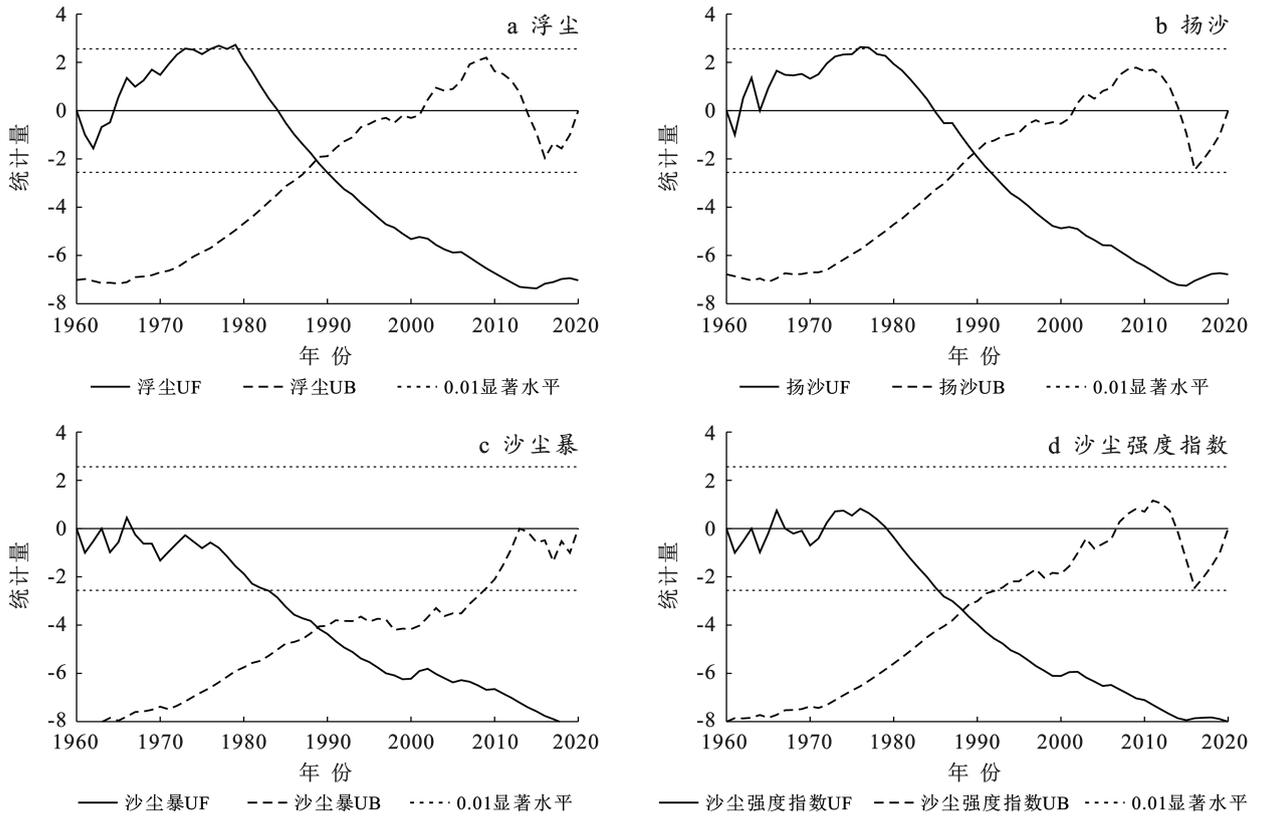


图 5 1960—2020 年内蒙古自治区各等级沙尘日数及沙尘强度指数的突变检验
 Fig.5 M—K test of flowing dust, sand blowing and sand-dust storm days and sand dust intensity in Inner Mongolia Autonomous Region from 1960 to 2020

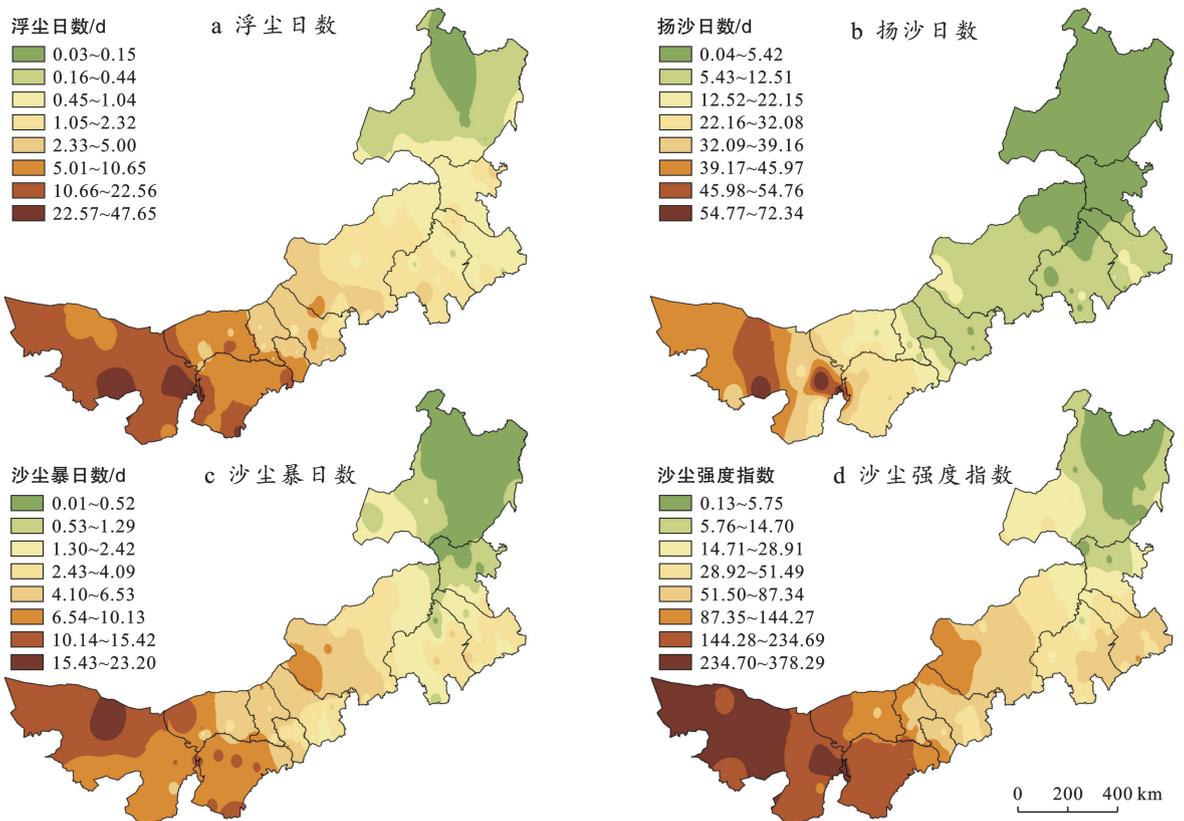
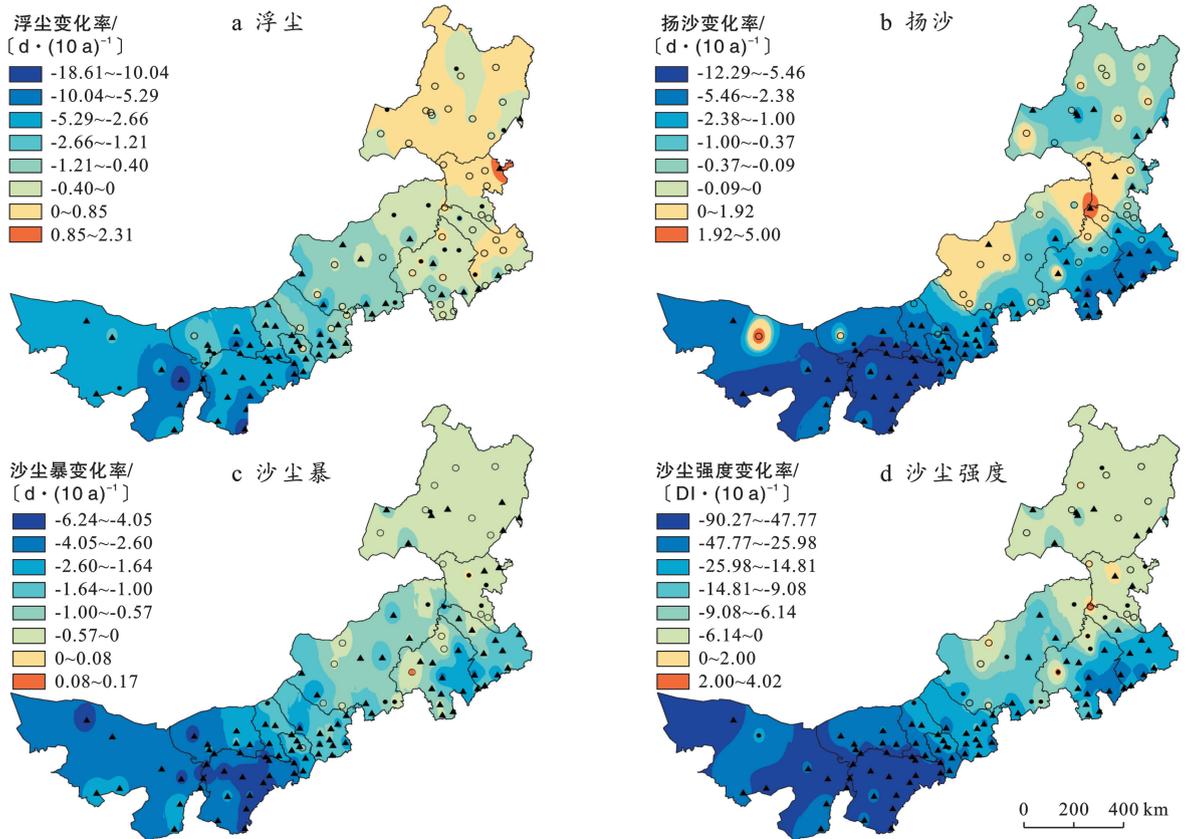


图 6 1960—2020 年内蒙古自治区各等级沙尘日数及沙尘强度的空间分布
 Fig.6 Spatial distribution of flowing dust, sand blowing and sand-dust storm days and sand dust intensity in Inner Mongolia Autonomous Region from 1960 to 2020

2.2.2 沙尘日数和强度的趋势变化 内蒙古自治区各等级沙尘日数及沙尘强度指数的变化趋势见图 7。由图 7a 可知,年浮尘日数整体呈现减少趋势,其中呈显著下降趋势的站点比例为 63.9% ($p < 0.05$),这些站点多位于西部的巴彦淖尔、鄂尔多斯、乌海和阿拉善 4 个盟市。东部地区浮尘日数略有上升,但仅有 4 个站达 $p < 0.05$ 的显著性水平;年扬沙日数(图 7b)

的变化趋势与浮尘日数类似,除少数站点呈微弱的上升趋势外,其余站点均呈下降趋势,且显著下降的站点达 68.1% ($p < 0.05$)。沙尘暴日数(图 7c)和沙尘强度指数(图 7d)的空间分布基本一致,除东部地区零星站点外,其余各站均表现出下降趋势,其中呈显著下降趋势的站点比例分别达 83.2% 和 84.0% ($p < 0.05$),且西部地区降幅明显高于东部。



注:“●”表示通过 $p < 0.05$ 显著性水平的站点;“▲”表示通过 $p < 0.01$ 显著性水平的站点;“○”表示未通过显著性检验的站点。

图 7 1960—2020 年内蒙古自治区各等级沙尘日数及沙尘强度的变化趋势

Fig.7 Changing trend of flowing dust, sand blowing and sand-dust storm days and sand dust intensity in Inner Mongolia Autonomous Region from 1960 to 2020

2.3 驱动因素分析

2.3.1 大风日数 风是影响地面起沙的动力条件。由于 4 级风力(5.5~7.9 m/s)对应的陆面现象为尘土卷入空中^[4],故大风日的定义为日平均风速 ≥ 5.5 m/s。以沙尘强度指数与大风日数进行相关分析,相关系数为 0.91,达到极显著水平($p < 0.01$),说明风速对沙尘天气的形成和扩散起决定性的作用。1960—2020 年年平均大风日数呈下降趋势(图 8),下降速率为 10.1 d/10 a ($p < 0.01$)。1960—2020 年,大风日数的变化与沙尘强度指数的变化趋势基本一致。均以 1975 年前为较高值,1966 年达到最大,1976 年后明显降低。就空间变化而言,全区 97.5% 的站点年

平均大风日数呈下降趋势,且 94.2% 的站点通过了极显著检验($p < 0.01$)。大风日数减少最多的站点位于巴彦淖尔市,达 35.2 d/10 a,乌兰察布市与锡林郭勒盟交界处大风日数减少趋势也较为明显。大风日数上升的 3 站零散分布在内蒙古西部地区,但均未通过显著性检验,说明内蒙古自治区整体年大风日数减少是导致全区 1976 年后沙尘强度指数明显减弱的主要原因。

2.3.2 冬春降水总量 内蒙古自治区全年近 60% 的沙尘天气发生在春季,区内主要沙源地冬季多为积雪覆盖,积雪通过影响地面起沙及植被返青进而影响沙尘天气的发生,沙尘强度指数与冬春季降水量相关性

($r = -0.40, p < 0.01$) 强于与春季降水量 ($r = -0.35, p < 0.01$) 和年降水量 ($p > 0.05$)。1960—2020 年, 内蒙古自治区冬春降水总量波动上升(图 9), 增速为 $2.65 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p < 0.01$)。从空间变化来看, 全区绝

大部分站点冬春降水总量都有所增加, 包括沙尘天气最为频发的阿拉善、乌海、巴彦淖尔、鄂尔多斯等盟市。冬春季节降水量的增加在一定程度上导致了研究区沙尘强度指数的降低。

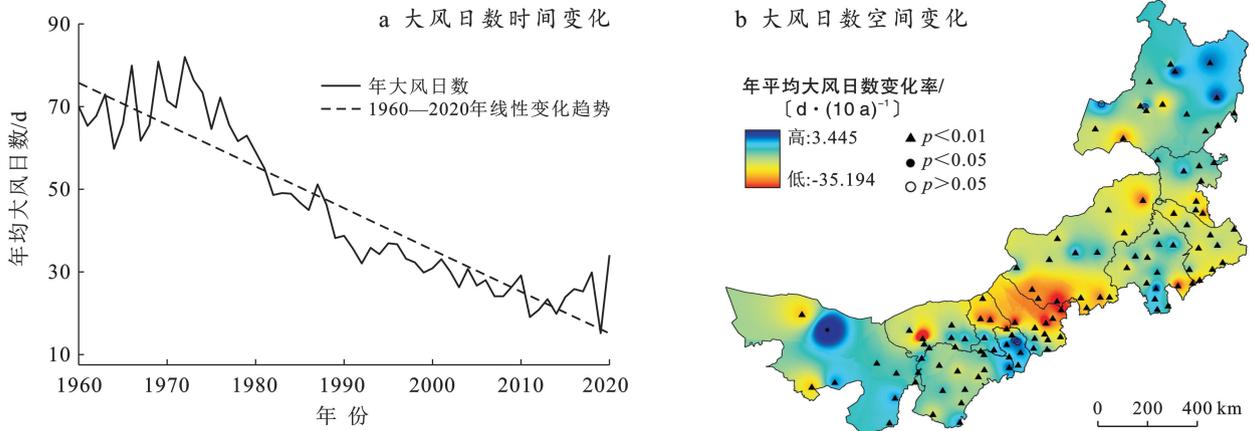


图 8 1960—2020 年内蒙古自治区年大风日数的时间和空间变化

Fig.8 Temporal and spatial variation of gale days in Inner Mongolia Autonomous Region from 1960 to 2020

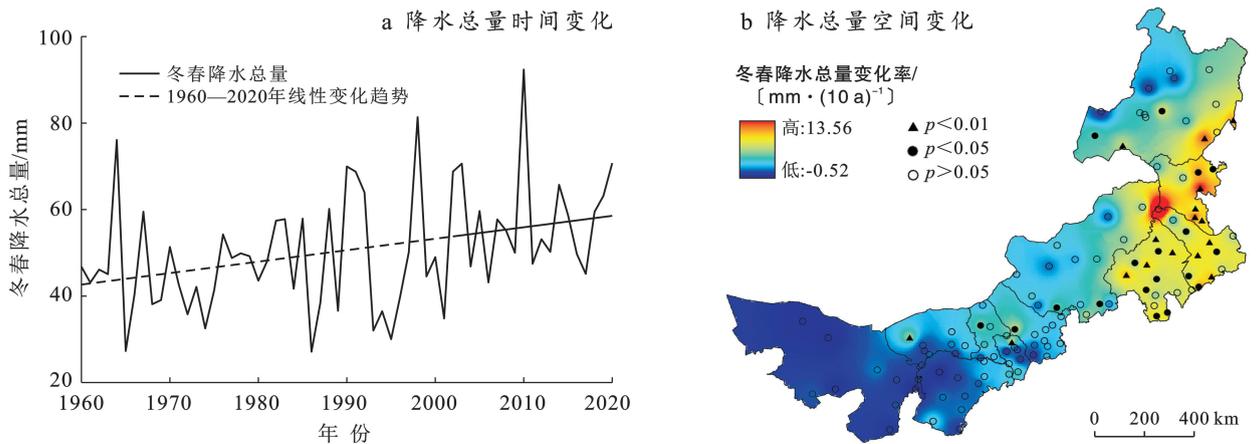


图 9 1960—2020 年内蒙古自治区冬春降水总量的时间变化

Fig.9 Temporal and spatial variation of total precipitation in winter and spring in Inner Mongolia Autonomous Region from 1960 to 2020

2.3.3 植被状况 如图 10 所示, 2000—2020 年内蒙古自治区 NDVI 平均值为 0.51, 整体呈波动上升趋势, 上升速率为 $0.036/10 \text{ a}$ ($p < 0.01$), 与沙尘强度指数的相关系数为 -0.46 ($p < 0.05$)。

对 NDVI 值的栅格数据进行逐像元 M—K 检验, 所得结果见图 10b。其中, NDVI 值上升区域占总面积的 90.2%, 表明内蒙古自治区植被状况整体以改善为主。其中, NDVI 极显著增加的区域约占总面积的 26.72%, 集中分布在内蒙古西部的鄂尔多斯市、巴彦淖尔市南部及阿拉善盟东部地区, 呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市、赤峰市、呼和浩特市等地也有一定分布。NDVI 显著增加的区域约占总面积的 15.90%, 在全

区散点分布; NDVI 值下降的区域主要分布在内蒙古中东部地区, 但达到 0.05 显著性的区域仅占总面积的 0.79%, 降低趋势很弱。

随着“三北”防护林、天然林保护、京津风沙源治理、退耕还林还草、退牧还草、沙化土地封禁保护等一系列国家重点工程和政策在内蒙古的强力推进, 内蒙古的生态环境实现了“整体遏制, 局部好转”的重大转变。2010—2020 年, 全区森林覆盖率和草原植被盖度实现“双提高”, 荒漠化土地和沙化土地面积实现“双减少”。累计营造林 $8.00 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 种草 $1.90 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 年均防沙治沙 $8.00 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 以上, 规模均居全国第一, 全区草原植被盖度和森林覆盖率分别由

40.3%和 20.8%提高到 45%和 23%，荒漠化和沙化土地面积持续减少^[19]。植被状况的改善，为减少地

面起沙提供了必要的植被保障，是近年来内蒙古自治区沙尘强度减弱的重要原因之一。

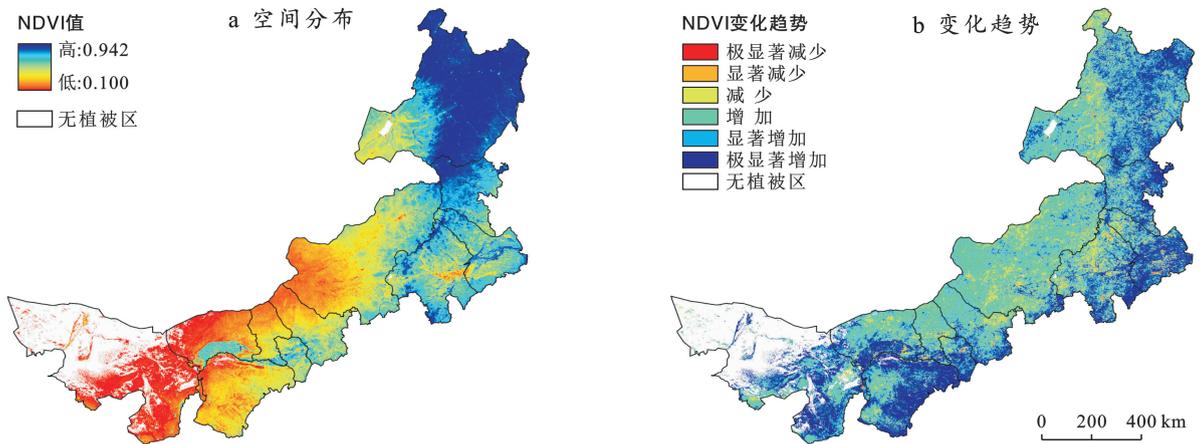


图 10 2000—2020 年内蒙古自治区 NDVI 空间分布(a)及变化趋势(b)

Fig.10 Spatial variation(a) and changing trend(b) of NDVI in Inner Mongolia Autonomous Region from 2000 to 2020

3 讨论

1960 年以来，内蒙古自治区的沙尘天气次数及强度指数均呈现为先上升后下降的规律。1962—1973 年，全区人口自然增长率持续高于 20%^[20]。人口的快速增长加大了土地资源压力，1958 年后的 20 a 间，全区仅草原滥垦就达 $2.50 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[21]。人类活动加速了土地荒漠化的发展，在一定程度上导致了 20 世纪 60—70 年代内蒙古自治区沙尘天气频发。1976—1990 年是沙尘天气由多转少的重要阶段，气候变化和生态环境改善共同作用是 1990 年后沙尘天气突变减少的主要原因。

从气候因素来看，风速是影响沙尘强度的最直接原因，1960—2020 年来全区 97.5% 以上的站点大风日数下降，极大地减弱了起沙和传输的动力条件。冬春季节降水量增加既可以产生湿沉降效应减少地面起沙，也可以缓解春旱促进植生长；从植被因素分析，80 年代以来，随着大规模的“三北”防护林、天然林保护、京津风沙源治理、退耕还林还草、矿山生态修复等生态治理工程的实施，区域生态环境明显改善，整体呈现“绿进沙退”的格局^[22-24]，减少了地面沙尘来源。兴安盟索伦站等个别站点扬沙日数、沙尘暴日数及沙尘强度指数均有所上升，且上升趋势达到显著水平 ($p < 0.05$)，这与当地草原生态破坏严重^[25]和极端天气活动有关。内蒙古扬沙日数降幅明显高于浮尘和沙尘暴日数的降幅，原因之一是扬沙取决于当地气候与植被，而浮尘和沙尘暴的发生既与当地气候植被有关，也与毗邻地区的气候植被有关。冬春季节，在西北气流的引导下，来自中国西北和蒙古国的沙尘暴天

气往往会加剧内蒙古的沙尘天气^[26-29]。

从空间变化来看，沙尘天气对内蒙古西部影响较大，向东逐渐减弱，地区间差异明显，这一空间格局的形成与气候、地理和生态环境等条件关系密切。西部地区气候干燥、风力强劲，土地沙漠化严重，境内分布有巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、库布齐沙漠及毛乌素沙地，加上过度开垦、放牧、采矿等人为因素，使其成为中国乃至亚洲沙尘天气的高发中心。中部地区受沙尘影响减弱，浑善达克沙地附近有一定的高值区分布。沙尘天气对东部地区的影响最小，仅有通辽市和赤峰两市受沙尘暴影响相对较大，这与科尔沁沙地的分布及冷空气频繁南下有关。呼伦贝尔市西部虽分布有呼伦贝尔沙地，但当地降水条件普遍较好，植被覆盖程度高，加上南侧大兴安岭的阻挡作用，沙尘天气活动较弱。1960—2020 年内蒙古西部地区的沙尘减弱趋势明显强于东部，应该与鄂尔多斯、阿拉善等西部地区近 30 a 生态治理成效显著，荒漠化逆转明显有关^[30]。

4 结论

(1) 从沙尘天气的趋势变化来看，1960—2020 年内蒙古自治区的各等级沙尘日数及强度均呈极显著的下降趋势 ($p < 0.01$)，浮尘、扬沙、沙尘暴的下降速率分别为 1.8, 2.7, 1.6 d/10 a。浮尘日数和扬沙日数均在 1990 年前后发生由多到少的突变，沙尘暴日数和沙尘强度虽无明显突变点，但其减少趋势分别在 1983 年和 1985 年达到极显著水平。

(2) 从沙尘天气的空间分布来看，西部地区频发且强度大，向东迅速减弱，地区间差异明显。随沙尘

等级的增加,发生日数逐渐减少,且高值区逐渐向西部的阿拉善、鄂尔多斯、乌海和巴彦淖尔延伸;就变化趋势而言,各等级沙尘日数及沙尘强度指数在大多数站点表现为显著的下降趋势($p < 0.05$),且西部地区降幅明显高于东部。

(3) 1960—2020年,内蒙古自治区沙尘天气减弱,既遇增温背景下的大风日数减少(10.1 d/10 a, $p < 0.01$)、冬春季节降水增多(2.65 mm/10 a, $p < 0.01$)有关,也与持续多年的大规模生态治理,NDVI上升(0.036/10 a, $p < 0.01$)和生态环境显著改善有关。

[参 考 文 献]

- [1] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.沙尘天气等级:GB/T 20480-2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [2] 赵明,周春晓,李崇,等.1960—2020年辽宁沙尘强度特征[J].中国沙漠,2022,42(2):113-120.
- [3] 王式功,王金艳,周自江,等.中国沙尘天气的区域特征[J].地理学报,2003,58(2):193-200.
- [4] 杨婕,赵天良,程叙耕,等.2000—2019年中国北方地区沙尘暴时空变化及其相关影响因素[J].环境科学学报,2021,41(8):2966-2975.
- [5] 范一大,史培军,周俊华,等.近50年来中国沙尘暴变化趋势分析[J].自然灾害学报,2005,14(3):22-28.
- [6] 张虎,刘贤德,张亚光等.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,2020,40(5):106-111,124.
- [7] 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.
- [8] 屠志方,李梦先,孙涛.第五次全国荒漠化和沙化监测结果及分析[J].林业资源管理,2016(1):1-5.
- [9] 杨雪栋.内蒙古自治区荒漠化和沙化土地监测概述[J].内蒙古林业调查设计,2020,43(2):86-88.
- [10] 云静波,姜学恭,孟雪峰,等.冷锋型和蒙古气旋型沙尘暴过程若干统计特征的对比分析[J].高原气象,2013,32(2):2423-2434.
- [11] 崔晓,赵媛媛,丁国栋,等.京津风沙源治理工程区植被对沙尘天气的时空影响[J].农业工程学报,2018,34(12):171-179.
- [12] 秦豪君,杨晓军,马莉,等.2000—2020年中国西北地区区域性沙尘暴特征及成因[J].中国沙漠,2022,42(6):53-64.
- [13] Piao Shilong, Wang Xuhui, Ciais P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006 [J]. Global Change Biology, 2011,17(10):3228-3239.
- [14] 覃云斌,信忠保,易扬,等.京津风沙源治理工程区沙尘暴时空变化及其与植被恢复关系[J].农业工程学报,2012,28(24):196-204.
- [15] 巩国丽,要玲,任丽霞,等.京津风沙源区生态保护与建设工程对防风固沙服务功能的影响[J].水土保持通报,2020,40(5):181-188.
- [16] Wang Shigong, Wang Jinyan, Zhou Zijiang, et al. Regional characteristics of three kinds of dust storm events in China [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(3):509-520.
- [17] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].2版.北京:气象出版社,2007.
- [18] 郑祚芳,张秀丽,丁海燕.近50年北京地区主要灾害性天气事件变化趋势[J].自然灾害学报,2012,21(1):47-52.
- [19] 陈沸宇,张彬.内蒙古坚持生态优先绿色发展[N].人民日报,2022-02-13(1).
- [20] 王玉希,杜金柱.内蒙古自治区人口五十年回眸与展望[J].内蒙古财经学院学报,2000(1):21-24.
- [21] 云和义.清代以来内蒙古大量开垦土地的主要原因[J].内蒙古农业科技,1999,27(6):8-11.
- [22] 张皓月,占车生,夏军,等.黄河流域内蒙古段植被时空变化特征及条带状分布成因[J].生态学报,2022,42(21):8818-8829.
- [23] 滑永春,张恒,王冰,等.1982—2015年内蒙古地区NDVI时空变化及驱动力分析[J].西南林业大学学报(自然科学),2021,41(6):175-182.
- [24] 吕基新,赖勇,耿守保,等.1992—2018年内蒙古自治区植被动态演替特征及驱动力[J].应用生态学报,2022,33(5):1240-1250.
- [25] 任军川,魏婧宇,刘懿德.草原“失色”:三道“禁令”为何难治科右前旗私开滥垦[EB/OL].(2019-10-28).http://news.xinhuanet.com/mrdx/2019-10/28/c_138509090.htm.
- [26] 杨晓军,张强,叶培龙,等.中国北方2021年3月中旬持续性沙尘天气的特征及其成因[J].中国沙漠,2021,41(3):245-255.
- [27] 孔祥吉,王雨,黄侃,等.2021年春季我国沙尘天气发生时空特征分析[J].林业资源管理,2022(3):117-121.
- [28] 王仁德,邹学勇,程宏,等.河北省沙尘天气时空分布特征及影响因素分析[J].水土保持通报,2009,29(6):57-63.
- [29] 钱正安,宋敏红,李万元.近50年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J].中国沙漠,2002,22(2):106-111.
- [30] 丁雪.内蒙古自治区土地荒漠化动态变化研究[D].黑龙江哈尔滨:东北农业大学,2018.