

文章编号:1004-4574(2009)01-0209-08

锡盟沙尘暴的时空分布及其 与气候因子的关系

王 静¹, 牛生杰¹, 沈建国^{2,3}

(1. 南京信息工程大学 大气物理与大气环境重点实验室, 江苏 南京 210044; 2. 南京信息工程大学大气科学学院, 江苏 南京 210044; 3. 内蒙古自治区气象局, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要:利用内蒙古锡林郭勒盟 15 个气象站 30 年(1971–2000 年)的沙尘暴观测资料,分析了沙尘暴发生日数的时空分布以及气候因子对沙尘暴日数的影响。结果表明,锡盟的中西部是沙尘暴的易发区,其中苏尼特右旗及朱日和是沙尘暴的高值区;从单站的沙尘暴日数来看,沙尘暴的发生时间有明显的日变化和季节差异,30 年间除朱日和站沙尘暴年际变化趋势不明显外,其它两站的沙尘暴日数均有显著的下降趋势;沙尘暴的年代际变化也呈减少的趋势。大风对沙尘暴发生次数的影响最为显著,单站的相关系数在 0.60 以上(通过 0.05 显著性检验);平均气温日较差与沙尘暴日数也呈显著正相关;其中锡林浩特站的年均气温及冬春季平均气温与沙尘暴日数有显著负相关;降水量对沙尘暴的发生次数有一定的影响,尤其是前期降水量与次年沙尘暴的发生有较好的负相关。

关键词:锡林郭勒盟; 沙尘暴; 时空分布; 气候因子; 相关性

中图分类号:P445^{+.4}

文献标识码:A

Spatiotemporal distribution of sand-dust storm in Xilingol League and its correlation with climate factors

WANG Jing¹, NIU Sheng-jie¹, SHEN Jian-guo^{2,3}

(1. Key Laboratory of Atmospheric Physics & Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Inner Mongolia Meteorological Bureau, Huhhot 010051, China)

Abstract: Based on the observed sand-dust storm data and meteorological records from 15 meteorological observational stations in Xilingol League of Inner Mongolia for 30 years(1971–2000), the temporal and spatial variation characteristics of sand-dust storm are statistically analyzed. The influence of climate factors on the sand-dust storm events is quantitatively studied. The result shows that the central-western part of Xilingol League is the most frequent hit region on spatial distribution, especially in Suniteqi and Zhurihe as the two high value regions. According to the sand-dust storm days of individual stations, there is an obvious daily variation and seasonal differences. The decadal characteristic of sand-dust storm days appears an obvious downward trend during the past 30 years, except for Zhurihe station. Correlation analysis shows that wind is a key factor in the occurrence of sand-dust storm in the study area, and the correlation coefficient between sand-dust storm days and strong wind is above 0.60 (correlation is significant at the 0.05 level). Significant positive correlation between daily range of air temperature and days with sand-dust storm is also found. There are significant negative correlation between the number of sand-dust storm

收稿日期:2007-07-16; 修订日期:2007-10-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40575048),科技部社会公益专项(2005DIB3J108),南京信息工程大学气象灾害江苏省重点实验室(KLME05006)

作者简介:王静(1981–),女,硕士研究生,主要从事沙尘气溶胶方面的研究。E-mail:wangjing2004y@nuist.edu.cn

days and mean annual temperature, mean winter temperature and mean spring temperature only in Xilinhaote station. Increase of precipitation over the source areas of dust or so might restrain the development of sand-dust storm. So the total precipitation especially the early stage ones are much more important.

Key words: Xilingol League; sand-dust storm; spatiotemporal distribution; climatic factor; correlation

根据中国气象局 2003 年 3 月 1 日实施的沙尘暴标准,将沙尘天气划分为浮尘、扬沙、沙尘暴和强沙尘暴四类。其中沙尘暴是指强风将地面大量尘沙吹起,使空气很混浊,水平能见度小于 1 km 的天气现象。这种灾害性天气主要发生在降水少、大风多、植被稀疏的干旱及半干旱地区。全球沙尘暴分别位于中亚、北美、中非和澳大利亚等地。我国的沙尘暴是中亚沙尘暴多发区的一部分,属全球沙尘暴高发区之一,主要发生在西北、华北和东北的部分地区,西北是我国沙尘暴灾害史最长、受灾最严重的地区^[1]。

早在 20 世纪 20 年代国外学者就开始了沙尘暴时空分布及成因机制方面的研究^[2-6]。墨西哥城沙尘暴时空分布的研究指出降水量小于 13 mm 的 3 月份沙尘暴发生频率最高^[3];沙尘暴发生次数最多的地区是年降水量为 100 ~ 200 mm 的区域^[4]。20 世纪 90 年代后期,美国对撒哈拉及其周围的干旱区沙尘暴过程的时空分布特征的研究更加深入和全面^[5]。我国从 20 世纪 70 年代也开始了该方面的研究,主要集中在对个例和全国尺度上时空特征的分析^[7-15],特别是 1993 年西北 5.5 特大黑风暴事件和 2000 年华北频繁暴发沙尘暴之后,国内加大了对沙尘暴天气的研究力度。随着气象站观测资料年代的增加,通过对历史时期沙尘暴的统计及典型个例分析,已基本搞清了我国沙尘暴时空分布特征:我国西北、华北、东北和青藏高原地区是沙尘暴的主要影响区^[14];20 世纪 50 年代沙尘暴天气的年代际变化呈增加趋势,60,70 年代沙尘暴发生频繁,80 年代开始下降,90 年代在减少中有所回升^[15];除青海、内蒙古的部分地区及北京等地外我国各地沙尘暴发生的总次数呈明显的下降的趋势^[13]。在沙尘暴成因分析、可能的影响机制探讨方面,对于影响沙尘暴发生次数的气候因子,很多研究工作集中在统计大风、降水和气温等气象要素的多年变化上^[16];沙尘暴主要发生在春季和初夏季节,大风、地面的沙尘物质和不稳定的空气状态是沙尘暴形成的 3 个基本条件,锋后大风是产生沙尘暴最重要的因素之一^[12]。然而,地理区域不同,其沙尘暴和气候特点也各有不同^[17]。因此,特定的区域和气候背景对于认识沙尘暴的发生规律是非常重要的。

本文针对内蒙古锡林郭勒盟这一沙尘暴高发区,探讨了该区沙尘暴的时空分布和演变趋势及其与各气候因子的关系,以期加深对该区域沙尘暴时空特征和成因机制的理解。

1 研究区域地表与气候特征

锡林郭勒盟位于内蒙古中北部地区,属于中温带半干旱、干旱大陆性季风气候。全盟地域面积约 $2 \times 10^5 \text{ km}^2$,平均海拔高度 1000 m 左右^[18]。大部地区为典型草原,西部部分地区为荒漠、半荒漠草原,腹部的浑善达克沙地约占全盟总面积的 10% 左右,为该区沙尘暴的发生提供了充足的沙尘来源。对研究区域的气候资料进行统计,得到该盟大部分地区年平均降水量在 200 ~ 300 mm 左右,分布趋势自东南向西北递减。由于位于亚洲中高纬地区,径向环流偏强,冷空气活动频繁,冬春季节经常处于强大的蒙古高压前部,全年平均大风日数多达 50 ~ 80d。冬季气温偏低,年平均气温在 $-1 \sim -5^\circ\text{C}$ 左右。

2 资料来源及方法

2.1 数据来源

本文研究主要使用了两种资料:第一种是选取锡盟 15 个基本和基准气象台站的沙尘暴日期档案;第二种资料是筛选出的锡盟具有代表性的 3 个台站(锡林浩特、朱日和、二连浩特)1971 ~ 2000 年 30 年间的气候整编资料。这 3 个台站位于锡盟的不同方位,其信息及地理位置见表 1,分别代表了不同的下垫面状况:锡林浩特位于典型的草原和草甸草原的非沙化区,朱日和位于沙漠边缘的沙漠化发展区,二连浩特位于荒漠草原的沙化区。

表 1 筛选锡盟具代表性的 3 个基本和基准台站信息
Table 1 Information of 3 basic and benchmark meteorological stations in Xilinguole League

区站号	站名	经度/(°)	纬度(°)	海拔/m	台站类型	备 注
54102	锡林浩特	116.07	43.95	989.5	基本站	
53276	朱日和	112.9	42.4	1150.8	基准站	1987 年改基准站
53068	二连浩特	111.97	43.65	964.7	基本站	

2.2 处理方法

本文研究针对不同的描述对象采用了不同的资料处理方法。在基本空间数据的支持下,将离散的点状数据通过空间插值(反距离权插值 IDW 法)的方法实现空间平面化,得到锡盟 30a 沙尘暴年平均日数的空间分布。空间数据处理、分析和制图在 ArcView3.2 中完成。采用线性趋势估计将沙尘暴日数与时间序列进行线性回归,经统计检验,得到沙尘暴发生次数的时间分布特征。

根据牛生杰等^[19]提出的沙尘暴的阈值风速,由各月逐日平均风速资料统计出累年平均风速≥5m/s 的有效起沙风速日数。大风日数的统计按观测规范规定为瞬时风速达 17m/s 及以上日数。对单站沙尘暴发生次数与各月及逐年的气候因子序列进行标准化处理,这一过程可消除各时间序列因权重不同和各因子因单位不同所产生的影响,使不同因子及各序列数据间具有可比性。利用统计软件 SPSS for Windows 实现标准化数据的 Spearman 和 Kendall 相关分析。

土壤湿度指数 H 采用邱玉珺^[20]的计算方法,该指标对 Thornthwaite^[21]1931 年提出的 $P-E$ 指数 I 进行了修正, $P-E$ 指数和土壤湿度指数计算公式见式(1)、式(2):

$$I = P / E, \tag{1}$$

$$H = (P - E) \cdot d_b. \tag{2}$$

四季划分按气象季节划分方法,即前一年 12 月至当年 2 月为冬季,3-5 月为春季,6-8 月为夏季,9-11 月为秋季。对于序列中缺测的部分,资料处理中进行了剔除。

3 沙尘暴的时空分布特征

3.1 沙尘暴年平均日数的空间分布

本文选用沙尘暴年平均日数(n_d)来研究沙尘暴的地理分布。统计锡盟 15 个气象站 30a 的沙尘暴平均日数,经过插值分析获得其空间分布,如图 1 所示,总的分布趋势是西部大于东部。按周自江^[22]对沙尘暴的区划,沙尘暴高值区集中在中西部:二连浩特(7.1d/a),朱日和(8.2d/a),苏尼特右旗(9.7d/a),苏尼特左旗(5.8d/a),正镶白旗(5.3d/a),正蓝旗(7.3d/a)位于沙尘暴易发区;其余 9 个站点位于沙尘暴影响区($n_d < 5d/a$)。

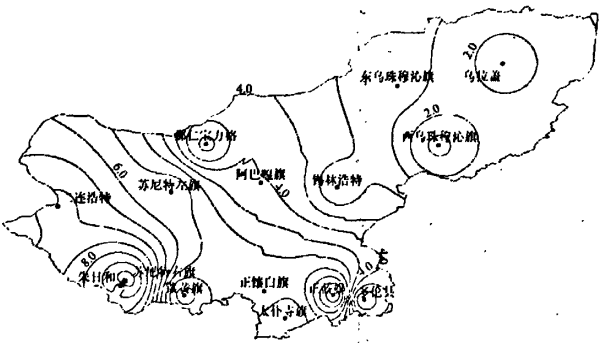


图 1 1971-2000 年平均沙尘暴日数分布图(单位:d)
Fig. 1 Spatial distribution of the average sand-dust storm days (1971-2000)

3.2 时间分布

3.2.1 沙尘暴日数的日变化

按照方宗义等^[2-3]对沙尘暴最小水平能见度的划分标准,统计各单站 02 时、08 时、14 时和 20 时各时段能见度 1~3 级出现的平均次数,得到 3 个代表站 6h 间隔的沙尘暴频次分布曲线,如图 2 所示,沙尘暴的发生时间大多集中在中午至傍晚,夜间相对较少,3 个站除锡林浩特外,沙尘暴的发生时间主要在 14 时左右的时段,这与近地层空气热力稳定性的日变化有关。午后地面辐射加热最强,气层不稳定,容易激发热力性对流;其次与风的日变化也有密切关系,通常午后风速成加大趋势,造成沙尘暴在午后最为强盛。

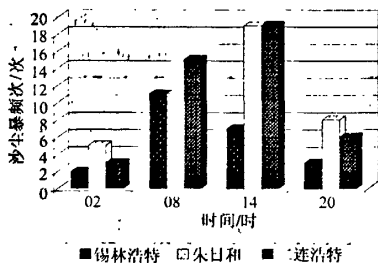


图 2 锡盟三个气象台站 1971~2000 年沙尘暴发生频次日变化

Fig.2 Temporal distribution of sand-dust storm frequency of 3 basic and benchmark meteorological stations in Xilinguole League (1971~2000)

3.2.2 沙尘暴日数的年变化

由 3 个代表站 30a 平均沙尘暴日数的年变化曲线图 3 来看,该盟沙尘暴的季节分布基本上是春多秋少,3 个站春季沙尘暴发生日数分别占各站全年沙尘暴发生日数的 69.23% (锡林浩特)、81.48% (朱日和)、71.43% (二连浩特),其中,沙尘暴天气出现次数具有十分明显的季节变化特征,3 个站的沙尘暴的高峰时段都出现在 4 月份,这与锡盟季节性气候变化有密切的关系。

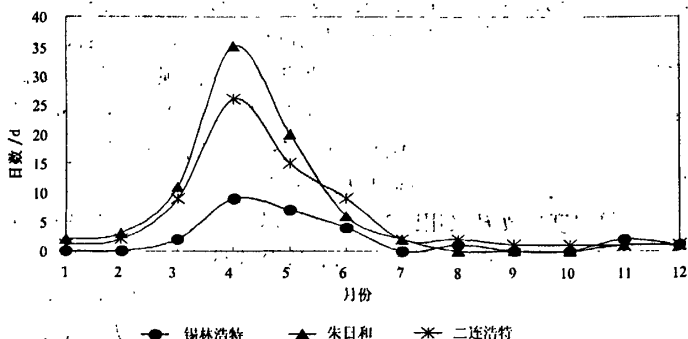


图 3 锡盟 3 个气象台站 1971~2000 年沙尘暴

Fig.3 Monthly change of sand-dust storm frequency of 3 basic and benchmark meteorological stations in Xilinguole League (1971~2000)

3.2.3 沙尘暴日数的年际变化和年际变化

图 4 是 3 个气象台站 30a 逐年沙尘暴日数。采用最小二乘法对沙尘暴日数随年序列变化的线性趋势进行统计并对得到的回归系数做显著性检验表明,具有显著下降趋势的是锡林浩特和二连浩特,从方程系数的 t 检验中得到系数显著;从图 4(b)可以看出,朱日和站的沙尘暴日数随时间没有显著的上升或下降趋势。

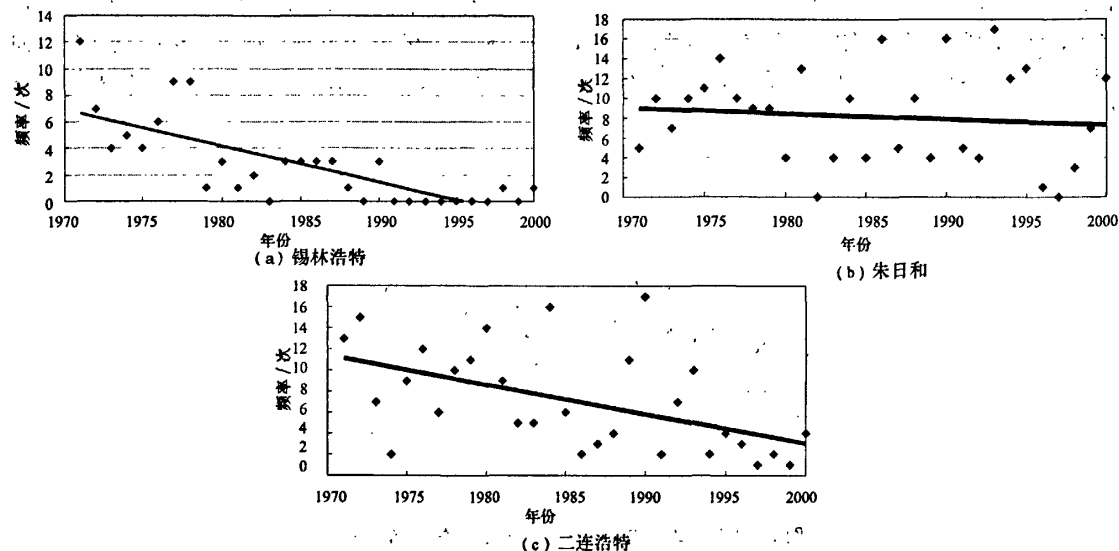


图 4 锡盟 3 个气象台站 1971~2000 年沙尘暴频次的年际变化

Fig.4 Yearly change of sand - dust storms frequency of 3 basic and benchmark meteorological stations in Xilinguole League (1971~2000)

由图 5 可以看出,所选 3 个台站的沙尘暴年代际变化均呈减少的趋势,其中从 20 世纪 80 年代到 90 年代的相对变化率最大,锡林浩特为 -89.5%,朱日和为 -9.8%,二连浩特为 -53.8%。

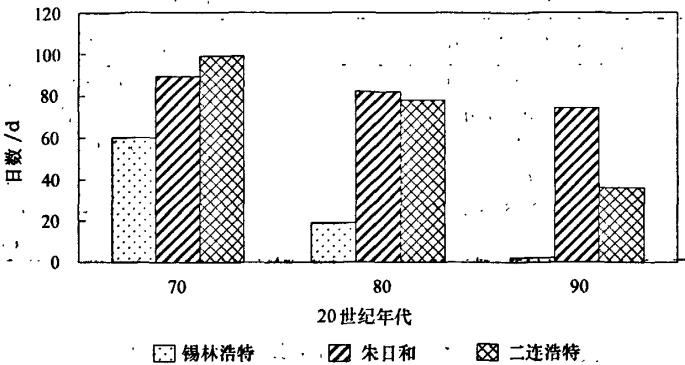


图 5 锡盟 3 个气象台站 1971 - 2000 年沙尘暴日数的年代际变化
Fig.5 Interdecadal change of sand-dust storms days of 3 basic and benchmark meteorological stations in Xilinguole League(1971 - 2000)

4 沙尘暴发生次数与气候因子的关系

通过统计锡盟 3 个气象台站的沙尘暴发生日数及气候影响因子的多年变化,由于大部分样本数据分布不满足正态分布的条件,因此我们采用非参相关分析,根据数据的秩使用 Spearman 和 Kendall's tau - b 相关分析,计算得到的沙尘暴发生次数与各气候因子的相关系数如表 2、表 3 所示。

根据因子既显著、残差估计又最小的原则建立最优回归方程。采取双重检验的逐步回归方案,从标准化变量出发,选用 F 检验的概率 (enter ≤ 0.050, remove ≥ 0.100) 作为变量引入模型或从模型中剔除的判据。表 4 为经过多元线性回归后得到的回归方程。

表 2 各代表站月平均沙尘暴发生频次与各气象要素的 Spearman 相关系数

Table 2 Spearman correlation coefficients between sand-dust storm monthly mean frequencies and climatic factors at representative stations

气象要素	锡林浩特	朱日和	二连浩特
月均降水量 m_1	0.098	-0.129	-0.176
月平均地面温度 m_2	0.222	0.060	0.483
各月平均风速 m_3	0.816 **	0.658 **	0.661 **
各月平均相对湿度 m_4	-0.622 *	-0.581 *	-0.750 **
月平均大风日数 m_5	0.674 *	0.633 *	0.813 **
土壤湿度指数 H	-0.528	-0.643 *	-0.673 *
月平均气温日较差 m_6	0.424	0.718 **	0.796 **

注:“**”表示在 0.01 水平上相关性显著; “*”表示在 0.05 水平上相关性显著。

表 3 各代表站年平均沙尘暴发生频次与各气象要素的 Spearman 相关系数

Table 3 Spearman correlation coefficients between sand-dust storm annual mean frequencies and climatic factors at representative stations

气象要素	锡林浩特	朱日和	二连浩特
年降水量 x_1	0.019	0.139	-0.023
冬季降水量 x_2	-0.163	-0.075	0.216
春季降水量 x_3	0.084	-0.379 *	-0.123
上年秋季降水量 x_4	0.341	0.086	-0.033
上年夏季降水量 x_5	-0.317	-0.251	-0.475 *
年均温 x_6	-0.595 **	-0.211	-0.331
冬季均温 x_7	-0.353	-0.155	-0.254
春季均温 x_8	-0.396 *	-0.089	-0.260
平均气温日较差 x_9	0.612 **	-0.129	0.278
起沙风日数 x_{10}	0.769 **	-0.130	0.562 **

注:“**”表示在 0.01 水平上相关性显著; “*”表示在 0.05 水平上相关性显著。

表 4 沙尘暴发生次数与各因子的回归模型

Table 4 Regression equation and R^2 between sand - dust storm frequencies and climatic factors

	标准化变量的回归方程(月)和 R^2	标准化变量的回归方程(年)和 R^2
锡林浩特	$Y = -17.302 + 0.566 \cdot m_3$ $R^2 = 0.915$	$Y = -3.346 + 0.1 \cdot x_{10}$ $R^2 = 0.609$
朱日和	$Y = -11.778 + 0.260 \cdot m_5$ $R^2 = 0.714$	$Y = 16.461 - 0.004 \cdot x_5 - 0.013 \cdot x_3$ $R^2 = 0.298$
二连浩特	$Y = -42.352 + 1.175 \cdot m_3$ $R^2 = 0.798$	$Y = -4.691 + 0.126 \cdot x_{10}$ $R^2 = 0.350$

4.1 动力因子

大风是发生沙尘暴的直接动力条件。本文考虑各月平均风速、月平均大风日数和年起沙风日数对沙尘暴序列时间分布的影响程度。为了排除各气候因子间较强的线性关系对其与沙尘暴发生次数相关性的影响,我们采用偏相关分析对与沙尘暴发生次数有显著影响的因子再次分析发现,单站的沙尘暴发生频次与风速及大风日数有着密切的关系,分别通过了 0.05 和 0.01 显著水平检验。其中,锡林浩特站月平均沙尘暴发生频次与月平均大风日数的正相关系数高达 0.827,假设成立的概率 0.2%;年平均沙尘暴发生频次与起沙风日数的偏相关系数为 0.610,显著性水平在千分之一以下。这说明风速,尤其是大风天气对沙尘暴的发生和传播起决定性作用。图 6、图 7 分别为单站沙尘暴日数与其回归方程中引入的因子标准化序列的季节及年际变化曲线。

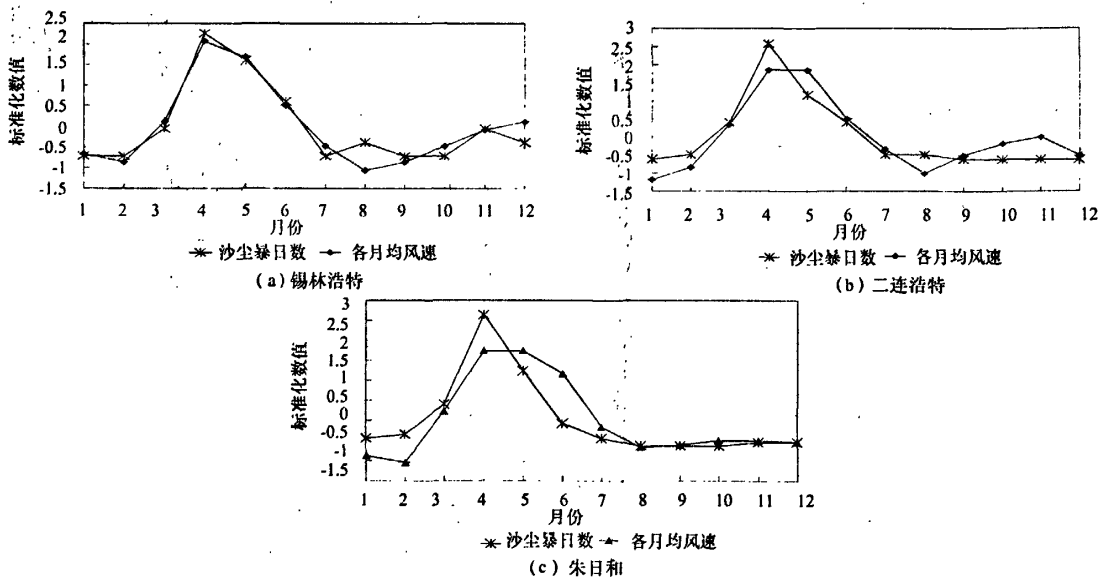


图 6 沙尘暴日数和月平均风速

Fig.6 Monthly sand-dust storm days and mean wind velocity at 3 basic and benchmark meteorological stations in Xilinguole League(1971 - 2000)

4.2 热力因子

不稳定的热力条件对形成沙尘暴具有重要影响,冷空气活跃的春季和气柱最不稳定的春季午后是沙尘暴多发季节和时段^[24]。本文分析了月平均地面温度、月(年)平均气温日较差、年均温、冬季均温及春季均温与沙尘暴发生次数的关系,由表 2、表 3 的分析可看出,平均气温日较差对沙尘暴发生的影响较为显著,说明气温波动幅度大有利于沙尘暴的发生;年均温、冬季均温以及春季均温只在锡林浩特站与沙尘暴发生次数有较强的相关性,呈反位相关系,即沙尘暴频发时期大致对应于气候干冷期。

降水量和平均相对湿度的变化,在一定程度上能够较好的反映区域环境的干湿状况。春季是沙尘暴发

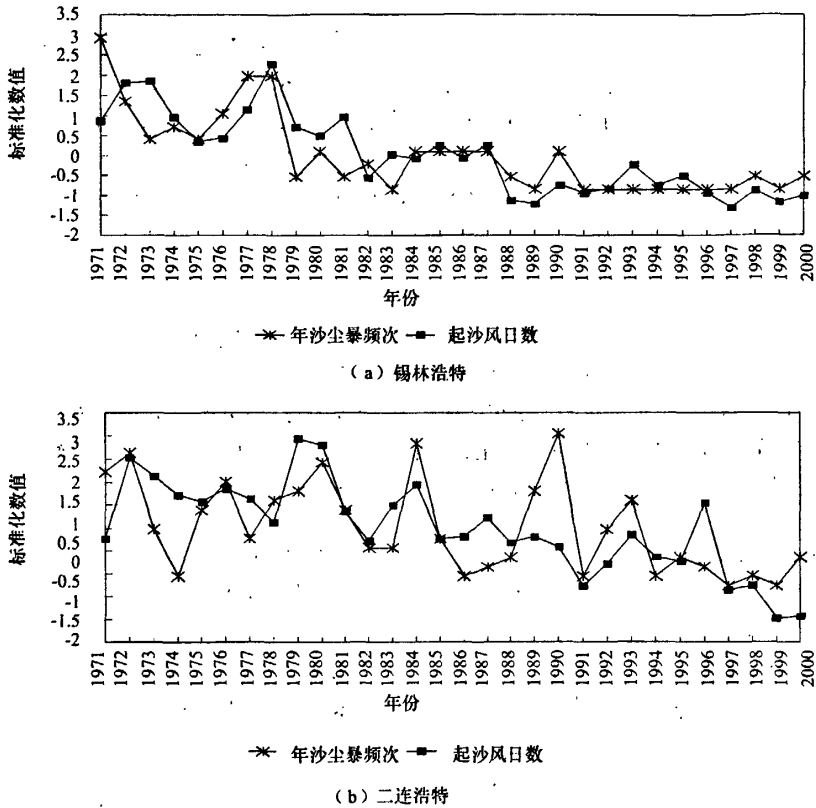


图 7 沙尘暴发生次数和起沙风日数(a)锡林浩特(b)二连浩特

Fig. 7 Yearly sand dust frequency and days with wind velocity larger than 5m/s at 2 basic and benchmark meteorological stations in Xilinguole League(1971-2000)

生的集中期,适宜的降水能湿润地表,有抑制沙尘飞扬的作用。锡盟春季干旱少雨,3 个站 4 月份的平均降水量分别为 68mm(锡林浩特)、58mm(朱日和)、45mm(二连浩特),图 8 为朱日和站回归模型中沙尘暴发生次数与降水量因子的关系曲线。可以看出,前期降水因子对次年沙尘暴的发生有一定的影响。

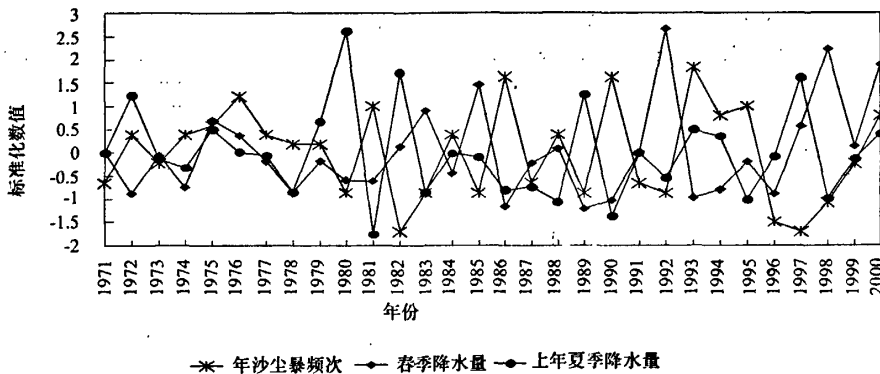


图 8 朱日和沙尘暴发生次数与降水量的关系

Fig. 8 Relationship between sand-dust storm frequency and precipitation for Zhurihe

4.3 地表特征

在动力和热力条件相同的情况下,地表沙尘物质结持较好的地区不易产生沙尘暴。锡林浩特较远离沙

漠,且下垫面为潜在沙化区,沙尘暴日数的逐年递减趋势显著;朱日和位于严重沙化发展区,沙尘暴年际变化趋势不明显。

通过对土壤湿度指数的研究表明,植被覆盖较差的二连浩特和朱日和站与 H 的相关性较好,其偏相关系数通过 0.05 显著水平检验。锡盟冬半年长时间的干燥和冻结,使得裸露的地面土壤严重冻结,冻土层厚,其中,二连浩特 30a 平均最大冻土深度达到 31.0cm,平均年积雪日数达 60.8d。较深的积雪掩盖了沙尘源下垫面(沙源、干燥土壤)对沙尘暴的贡献,到春季气温回升迅速且温度偏高,使解冻后地表土质变的很疏松,沙尘源条件具备,一旦风速达到阈值风速,就会形成浮尘、扬沙甚至沙尘暴。

5 结论

沙尘暴发生在特定的地理区域,其频次和强度的地区间差异具有突出的特点。本文通过分析锡盟 30a 沙尘暴的时空分布特征及其与气候因子的关系,得出以下结论:

(1) 锡盟沙尘暴日数的分布总趋势是由东向西增多,西部的高值中心位于苏尼特右旗与朱日和。

(2) 从单站来看,沙尘暴发生次数的日变化和季节特征明显,春季和夏初较多,秋冬较少。近 30a 来,除朱日和站外,其余两个站的沙尘暴发生的次数在波动中逐年递减,其中 20 世纪 80 年代到 90 年代的递减率最大。

(3) 气候因素是影响沙尘暴发生次数的主要原因,其中大风天气的影响最为显著,大风的季节变化影响了沙尘暴发生次数的季节变化,而 30a 来沙尘暴发生趋少与起沙风日数的逐年递减也有一定关系。温度和降水对沙尘暴的发生次数有一定的影响。

(4) 沙尘暴的形成和发展是受综合因素影响的,除了强风和温度、降水等气候因子外,地表状况也是很重要的因子。冬季地表的积雪及深厚的冻土,导致解冻后较深的疏松土层,为沙尘暴的发生提供了有利的条件。

参考文献:

- [1] 史培军,严平,高尚玉,等. 我国沙尘暴灾害及其研究进展与展望[J]. 自然灾害学报,2000,(3):71-77.
- [2] Idso S B, Ingram R S, Pritchard J M. An American Haboob[J]. Bull Amer Meteor Soc,1972,53(10):930-935.
- [3] Jauregui E. The dust storms of Mexico city [J]. Int J Climatol, 1989, 9(2):169-180.
- [4] Coudieas. Dust storm in space and time [J]. Process in Physical Geograph, 1983,7(4):502-508.
- [5] Swap R S, Ulanski S, Cobbett M, et al. Temporal and spatial characteristics of Saharan dust outbreaks [J]. Geophys Res, 1996, 101:4295-4220.
- [6] Littmann T. Dust storm frequency in Asia: climatic control and variability[J]. International Journal of Climatology, 1991, 11:393-412.
- [7] 徐国昌,陈敏连,吴国雄. 甘肃省“4.22”特大沙尘暴分析[J]. 气象学报,1972,37(4):26-35.
- [8] 牛生杰,孙继明,桑建人. 贺兰山地区沙尘暴发生次数的变化趋势[J]. 中国沙漠,2000,20(1):55-58.
- [9] 钱正安,贺慧敏,魏章,等. 我国西北地区沙尘暴的分级标准和个例谱及其统计特征[A]. 方宗义等编. 中国沙尘暴研究[C]. 北京:气象出版社,1997.1-10.
- [10] 徐启运,胡敬松. 我国西北地区沙尘暴天气时空分布特征分析[A]. 方宗义. 中国沙尘暴研究[C]. 北京:气象出版社,1997:11-15.
- [11] 杨东贞,房秀梅,李兴生. 我国北方沙尘暴变化趋势的分析[J]. 应用气象学报,1998,9(3):352-358.
- [12] 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.
- [13] 邱新法,曾燕,缪启龙. 我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径[J]. 地理学报,2001,56(3):316-322.
- [14] 周自江. 近 45 年中国扬沙和沙尘暴天气[J]. 第四纪研究,2001,21(1):9-17.
- [15] 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.
- [16] 黄富祥,张新时,徐永福. 毛乌素地气候因素对沙尘暴频率影响作用的模拟研究[J]. 生态学报,2001(21):1875-1884.
- [17] 陈玉福,唐海萍. 近 50 年首都圈沙尘暴的变化趋势及其与气温、降水和风的关系[J]. 环境科学,2005,26(1):32-37.
- [18] 乌兰. 沙尘暴与锡林郭勒盟的可持续发展[J]. 干旱区资源与环境,2004(18):263-265.
- [19] 牛生杰,章澄昌. 贺兰山地区沙尘暴沙尘启动和垂直输送物理因子的综合研究[J]. 气象学报,2002,60(2):194-204.
- [20] 邱玉琚,邹学勇. 气候因素对沙尘天气影响的模型研究[J]. 自然灾害学报,2005(14):35-40.
- [21] Thornthwaite C W. The climates of North America according to a new classification [J]. Geographical Review,1931,21:633-655.
- [22] 周自江,王锡稳,牛若芸. 近 47 年中国沙尘暴气候特征研究[J]. 应用气象学报,2002,13(2):193-200.
- [23] 方宗义,朱福康,江吉喜,等. 中国沙尘暴研究[M]. 北京:气象出版社,1997.31-36.
- [24] 钱正安,蔡英,刘景涛,等. 中国北方沙尘暴研究的若干进展[J]. 干旱区资源与环境,2004,18(1):3-4.