

毛乌素沙地气候因素对沙尘暴频率影响作用的模拟研究

黄富祥^{1,2}, 张新时^{1,3}, 徐永福²

(1. 中国科学院植物研究所植被数量生态开放实验室, 北京 100093; 2. 中国科学院大气物理研究所人气边界层物理和人气化学国家实验室, 北京 100029; 3. 北京师范大学资源科学研究所, 北京 100875)

摘要: 沙尘暴是一种强烈的风蚀输沙形式, 是造成流沙蔓延和土地沙化最重要、最直接的作用过程之一。借鉴国际上最新的研究进展, 建立了适合毛乌素沙地气候特征的定量模型, 比较深入地考察了毛乌素沙地的气候因素对沙尘暴频率的影响作用, 利用沙地位于不同方位的 6 个气象站多年气候记录资料, 分别计算了各月气候对沙尘暴频率的影响作用指数, 分别对 6 个气象站各月沙尘暴频率进行回归, 并利用气候影响指数对沙尘暴频率进行了拟合, 取得比较理想的效果。

关键词: 毛乌素沙地; 沙尘暴频率; 气候指数; 土壤湿润度 Thornthwaite P-E 指数

Simulating the effect of climate on the dust storm frequency in Mu Us Sandland, north China

HUANG Fu-Xiang^{1,2}, ZHANG Xin-Shi^{1,3}, XU Yong-Fu² (1. Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; 2. LAPC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Institute of Resource Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China), *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11): 1875~1884.

Abstract: Dust storm is a kind of serious wind erosion and one of the most important and direct processes of sand removal in arid and semi-arid regions. In the present paper, a quantitative model simulating the effect of climate on dust storm frequency was presented and the climatic effect on dust storm frequency in Mu Us Sandland was studied. Meteorological records of many years in six meteorological stations were applied to evaluate the climatic influential index and to simulate the actual dust storm frequency.

Key words: Mu Us Sandland; dust storm frequency; climate index; thornthwaite index of soil moisture

文章编号: 1000-0933(2001)11-1875-10 中图分类号: X4 文献标识码: A

在干旱半干旱地区, 沙尘暴作为一种常见的强烈风蚀输沙形式, 是造成流沙蔓延和土地沙化进程中最重要、最直接的作用过程之一。长期以来, 关于沙尘暴发生机制、影响因素等方面的研究, 一直是风沙动力学中的重点内容之一, 然而, 由于各种影响因素的复杂性, 研究方法主要以定性为主, 定量研究是一个比较薄弱的环节^[1~3]。近些年来, 国际上开始尝试利用风速、降水等气候因子建立综合气候影响指数模型, 分析气候因素对沙尘暴频率格局的影响, 取得较大进展^[1,4]。

毛乌素沙地位于鄂尔多斯高原中南部, 处于北纬 37°27'30"~39°22'30", 东经 107°20'~111°30' 之间, 总面积约 40,000 km²。从生态地理区位来看, 毛乌素沙地地处一个多层次的过渡带上, 生态环境特征表现为极端的脆弱性和敏感性。由于长期战乱和不合理土地利用的破坏, 引起了严重的现代土地沙化和荒漠化进程, 各种流动程度不一的流动和半流动沙丘组成了今天优势的自然景观^[5~6]。几十年来, 毛乌素沙地一直是

基金项目: 中国科学院工宽诚博士后奖励基金和中国科学院“引进国外杰出人才”计划资助项目

收稿日期: 2000-11-29; 修订日期: 2001-01-25

作者简介: 黄富祥 (1957~), 男, 湖北蕲春县人, 博士, 主要从事土地利用、风蚀和沙尘暴模型等研究。

我国北方荒漠化研究的重点地区,关于其自然条件、土地沙化进程等方面,前人开展过大量的研究工作^[3~5]。但是,关于毛乌素沙地风蚀和沙尘暴的发生机制,尤其是气候条件对沙尘暴发生频率究竟产生怎样的影响等问题的研究,十分少见,利用定量模型研究气候因素对沙尘暴频率的影响,更尚未见报道。

本文借鉴国际上在沙尘暴作用机制方面定量模型研究的最新进展,结合毛乌素沙地气候特征的实际特点,建立了沙地气候因子影响沙尘暴频率的定量模型,利用沙地不同方位 6 个典型气象站多年气象记录资料,深入考察了气候因素对沙尘暴频率的影响,并对沙尘暴频率分布格局进行了分析。

1 方法和数据

利用风速、降水、潜在蒸发散等气候因子,建立适应毛乌素沙地气候特征的沙尘暴频率气候影响指数模型,选取沙地代表不同方位的乌审召、乌审旗、河南、鄂托克旗、新街和伊金霍洛旗 6 个气象站多年气候资料(表 1),分别计算各台站各月气候影响指数;将沙地多年来各月沙尘暴频率记录资料对气候影响指数,建立回归模型,利用回归模型模拟各月沙尘暴的发生频率,以此来评价沙地各处气候因素对沙尘暴发生频率的影响作用。

表 1 毛乌素沙地各气象站地理位置以及资料年代^{*}

Table 1 Location of the selected meteorological stations and the period of records

气象站 Meteorological station	方位 Location	北纬 North latitude	东经 East longitude	记录年代 Period of meteorol- ogical records
乌审召 Uxin Ju	北部 North	39°06'	109°02'	1959-05~1980-12
乌审旗 Uxin Banner	中部 Middle	38°36'	108°50'	1959-01~1980-12
河南 He nan	南部 South	37°51'	108°43'	1959-05~1980-12
鄂托克旗 Otog Banner	西北部 North West	39°06'	107°59'	1954-10~1980-12
新街 Xin Jie	东北部 North East	39°22'	109°48'	1954-01~1979-12
伊旗 Ejin Horo Banner	东北部 North East	39°34'	109°44'	1958-11~1980-12

本文在研究过程中涉及的变量主要有:风速、土壤湿润指数、沙尘暴频率等,这些变量都是利用气象台站多年的记录资料,通过统计处理提取。

① 风速 利用各气象台站风速记录数据,通过多年平均得到各月平均风速数据,将风速单位由 m/s 换算成以 km/d 为单位的数^[1]。

② 土壤湿润指数 采纳 Thornthwaite 降水 蒸发指数度量土壤的湿润程度,利用降水量与同期潜在蒸发散比值的 10 倍得到土壤湿润度 $P-E$ 指数^[1,10]。

③ 沙尘暴频率 利用气象台站多年来记录的各月沙尘暴平均日数,除以各月天数,得到各月沙尘暴频率,各月沙尘暴频率实际上表示平均每天发生沙尘暴的次数^[1]。

2 模型建立

2.1 定性规律

沙尘暴的发生至少要具备 3 个基本条件,一是大风,这是沙尘暴的动力条件;二是地面丰富的沙尘源,这是沙尘暴的物质基础;三是不稳定的空气状况,这是重要的局地热力条件^[1]。从气象台站目前记录资料的角度看,这些条件主要归纳为风速和降水、地表蒸发等因素决定的土壤湿润状况^[1~1]。根据 6 个气象台站的记录资料,毛乌素沙地沙尘暴、风速和土壤湿润状况在不同月份的变化规律用图形表现为(图 1)。

从图 1 中可得到以下基本认识:沙尘暴发生的高频期与风速大、土壤干燥的月份相对应,主要集中在春季 3~5 月份;沙尘暴发生的低频期则与风速较低、湿润程度大的时期吻合,主要是集中于 8~10 月份。即月平均风速是沙尘暴频率的正相关因子,湿润指数则是负相关因子。McTainsh 等人考察的澳大利亚气候与沙尘暴频率关系,得到与此一致的基本规律^[1,3,4]。

^{*} 内蒙古自治区气象台,1982,内蒙古自治区伊克昭盟地面气候资料

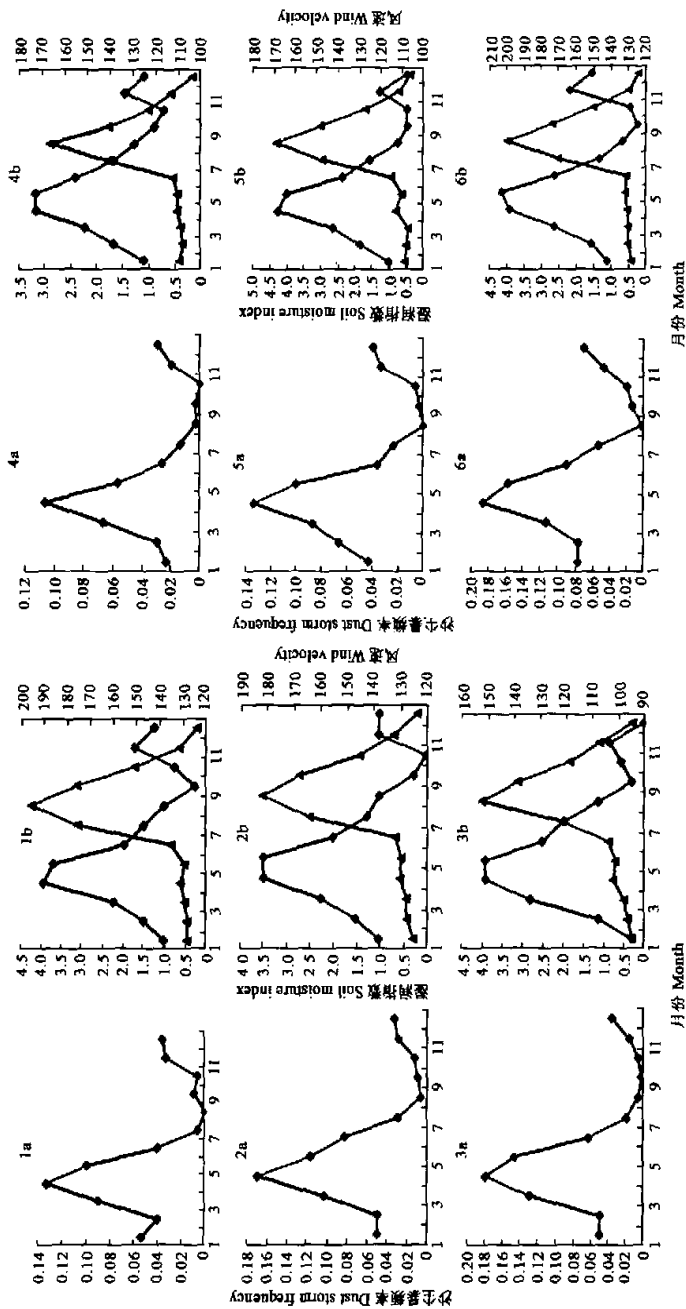


图 1 6 个气象站多年来各月沙尘暴频率(a)和土壤湿润指数、风速(b)
(1~6 分别为乌审召、乌审旗、鄂托克旗、新街和伊金霍洛旗 6 个气象站)
Fig. 1 Monthly averaged dust storm frequency(a) and moisture index, wind velocity(b)
(1~6 refer to Uxin Ju, Uxin Banner, Henan, Chog Banner, Xin Jie and Ejin Hero Banner station)

2.2 McTainsh 等人建立的模型

定量考察气候因素对沙尘暴频率的影响作用,最早从美国的 Chepil 和 Fryrear 等人的工作开始^[1-3],这些模型主要利用气象台站以年为时间单位的记录资料进行研究。沙尘暴发生次数以及风速大小等,在一年中的不同月份存在着很大差异,如果在年的时间尺度下取平均值,必然掩盖了时间上的差异性,进而影响研究结果的精确性^[14]。早期的模型都是以年作为时间单位,这些工作一般只具有研究思路上的参考价值。

McTainsh 等人在澳大利亚气候因素对沙尘暴频率影响作用的定量研究中,对前人工作进行了有益的改进,利用月的风速和土壤湿润指数平均数据,建立气候影响指数模型来模拟沙尘暴的发生频率,取得较好效果^[1-4]。模型基本结构为:

$$E_a = \frac{W}{(P - E)^2} \quad (1)$$

其中 E_a 是用来刻画气候因素影响沙尘暴频率的气候指数, W 为风速月平均值, $P-E$ 是土壤湿润指数,采用 Thornthwaite 方法计算得到的 $P-E$ 指数^[15]。

另外,考虑到土壤湿润状况在不同季节和月份间发生显著变化,相邻月份土壤湿润状况的显著变化有时如此剧烈,以致对沙尘暴频率产生影响。McTainsh 等人将相邻月份土壤湿润状况的变化划分为两种情况:一是土壤越来越湿润的变化过程,在这种情况下前月较低的湿润度可以使本月土壤实际的湿润状况低于本月降水和蒸发状况决定的湿润度,从而使本月沙尘暴频率有所增大;另一情况是土壤越来越干燥的变化过程,此时前月较高的湿润度可使本月土壤实际的湿润状况高于由本月降水和蒸发状况决定的湿润度,而使本月沙尘暴频率有所减小。对第一个变化过程,采用 E_{at} 模型(式(2))代替 E_a 指数,第二种变化过程采用 E_{ad} 模型(式(3))代替 E_a 指数:

$$E_{at} = \frac{W}{(P - E)^2} + (P - E)^{-1} \frac{W}{(P - E)} \quad (2)$$

这里 E_{at} 为土壤越来越湿润过程月份的气候影响指数,其中 W 和 $P-E$ 分别表示本月的风速和湿润指数, $(P-E)^{-1}$ 表示前月的土壤湿润指数。

土壤越来越干燥过程中的气候影响指数模型为:

$$E_{ad} = \frac{W}{(P - E)^2} - \frac{1}{(P - E)^{-1}} \frac{W}{(P - E)} \quad (3)$$

E_{ad} 表示土壤越来越干燥过程月份的气候影响指数,变量 W 、 $P-E$ 、 $(P-E)^{-1}$ 同前。

与前人工作相比,McTainsh 模型主要在 3 个方面作了改进:①变量的时间尺度由年变成月,时间间隔的缩短可提高模型的精确性;②采用改进的气候指数模型,考察两种变化过程中前月土壤湿润状况对本月沙尘暴频率的影响作用;③设定风速阈值,只对阈值以上风速条件才考察气候对沙尘暴频率的影响^[1]。

McTainsh 等对前人模型的改进,显著提高了模型的精确性,使气候定量模型模拟沙尘暴频率成为可能,为进一步的定量研究提供基本思路和模型框架,也是本文建模的基本依据。

2.3 毛乌素沙地气候影响指数模型的建立

McTainsh 等建立的模型,适合澳大利亚气候特征,取得比较理想的效果^[1]。然而,我国西部和毛乌素沙地的气候条件与澳大利亚存在显著的差别,因此,建立毛乌素沙地气候影响指数模型,必须在借鉴和采纳 McTainsh 模型合理成分的基础上,根据毛乌素沙地实际,对其中的一些方面作出必要的改进。

(1) 冬季月份(11月份,12月份,1月份和12月份)气候影响指数

毛乌素沙地与澳大利亚气候条件最显著的差异是冬季的冰冻气温。在毛乌素沙地11月份到来年2月份的冬季,平均气温一般保持在 -10°C ,结合降雪或不多见的降雨,这种极端低温往往造成地表土壤的冻结,从而使风蚀和沙尘暴发生的可能性大为降低。因此,毛乌素沙地模型必须对冬季各月气候指数模型予以特别关注。

在这4个月份,冰冻气温大大降低了沙尘暴发生的可能性,各月气候影响指数用 E_{wi} 指数取代 E_a 指数:

$$E_{u_i} = \frac{W}{P-E} \quad (1)$$

式中 W 、 P 、 E 变量的意义同前。

(2) 考虑前月湿润状况影响下的气候指数模型

在 McTainsh 等的研究中,土壤越来越湿润过程的气候指数以 E_{u_i} 指数取代 E 指数^[1]。认为 McTainsh 模型以前月湿润指数 $(P-E)^{-1}$ 乘本月 E 指数来刻画前月湿润指数对本月沙尘暴频率的影响作用,是不合理的。因为从模型(2)可以推理出,随着前月湿润度 $(P-E)^{-1}$ 的增大,前月较高的湿润程度导致本月气候影响指数增大,沙尘暴频率也随之增大;而当前月湿润程度 $(P-E)^{-1}$ 减小时,前月较低的湿润度导致本月气候影响指数减小,沙尘暴频率也随之变小,这种是不符合沙尘暴发生规律的。为此,本文在建立毛乌素沙地气候影响指数模型过程中,对 McTainsh 模型(2)作如下改进:

$$E_{u_i} = \frac{W}{(P-E)^{-1}} + \frac{1}{(P-E)^{-1}} + \frac{W}{(P-E)^{-1}} \quad (5)$$

从图 1 中可见,在毛乌素沙地属于越来越湿润过程的有 4、6、7、8 等 4 个月份,因此,在这 4 个月,气候影响指数采用式(5)中的 E_{u_i} 模型。

在毛乌素沙地,处于土壤越来越干燥的变化过程的有 5、9、10 等 3 个月份。本文建立毛乌素沙地气候对沙尘暴频率的影响指数模型,采用 McTainsh 式(3)中的 E_{u_i} 模型作为 9、10 两个月份的气候影响指数,由于土壤湿润指数从 4 月到 5 月间的变化率较低,因此,5 月份的气候指数仍然采用式(1)中的 E_u 指数。

(3) 毛乌素沙地气候影响指数模型

综合上述,本文建立毛乌素沙地气候影响沙尘暴频率的指数模型,可用如下分段函数来表示:

$$E = \begin{cases} E_u & (3 \text{ 月份}, 5 \text{ 月份}) \\ E_{u_i} & (4 \text{ 月份}, 6 \text{ 月份}, 7 \text{ 月份}, 8 \text{ 月份}) \\ E_{u_d} & (9 \text{ 月份}, 10 \text{ 月份}) \\ E_{u_i} & (11 \text{ 月份}, 12 \text{ 月份}, 1 \text{ 月份}, 2 \text{ 月份}) \end{cases} \quad (6)$$

其中 E_u 、 E_{u_i} 、 E_{u_d} 和 E_{u_i} 指数分别由式(1)、(5)、(3)和(4)模型确定。

与 McTainsh 模型相比,本文建立的模型,作了这样方面的改进:①冬季 11、12、1 和 2 等 4 个月份的气候影响指数采用 E_{u_i} 模型;②对土壤越来越湿润变化过程,采用 E_{u_i} 模型对 McTainsh 模型中 E_{u_i} 指数模型的不合理成分进行了改进;③利用降水和潜在蒸发量确定的 $P-E$ 指数作为度量土壤湿润程度的指标,改进 McTainsh 模型直接利用降水和气温计算湿润指数,更加合理;④不同月份土壤湿润状况、植被生长和覆盖状况等都存在差异,从而在不同月份沙尘暴发生的风速条件也相应存在着差异,因此,借鉴风沙动力学中沙粒启动风速概念来设定沙尘暴发生的风速阈值,是不科学的,本文摒弃了 McTainsh 模型中人为设定风速阈值的做法,提高了模型的客观性。

3 模拟结果与分析

首先建立沙尘暴频率对气候影响指数的回归模型,然后利用回归模型对沙尘暴频率进行模拟,并分析模拟的结果。

3.1 建立沙尘暴频率对气候影响指数的回归模型

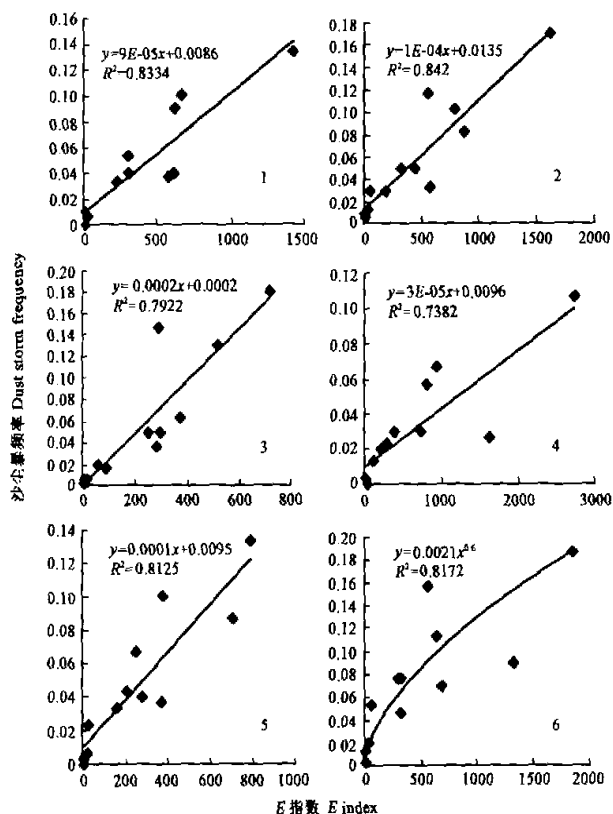
将毛乌素沙地 6 个气象台站各月沙尘暴频率数据,对相应的气候影响指数进行回归建模,回归的情况见图 2。

模型的回归分析结果见表 2。

表 2 显示本文建立的毛乌素沙地气候影响指数模型用于解释气候因素影响下的沙尘暴频率分布格局,具有较好的显著性,可以认为气候因素是决定毛乌素沙地沙尘暴分布格局的主要原因。

3.2 模拟结果及分析

利用上述回归模型,模拟不同月份各气象台站沙尘暴的发生频率,模拟值与记录资料的对比情况,如图 3 所示。

图2 各台站沙尘暴频率对气候影响指数 E 的回归

(1~6 分别为乌审召、乌审旗、河南、鄂托克旗、新街和伊金霍洛旗 6 个气象站)

Fig. 2 Regression of the dust storm frequency to the climatic index E

6 refer to Uxin Ju, Uxin Banner, Henan, Otog Banner, Xin Jie and Ejin Horu Banner station)

表2 毛乌素沙地各处沙尘暴频率对气候因子影响作用的 E 指数回归分析结果Table 2 ANOVA of the dust storm frequency to the climatic index E

台站 Meteorological stations	模型表达式 Model	R^2	Sig.
乌审召 Uxin Ju	$Y = 9E-05x + 0.0086$	0.83	0.000
乌审旗 Uxin Banner	$Y = 1E-04x + 0.0135$	0.84	0.000
河南 He nan	$Y = 2E-04x + 0.0002$	0.79	0.000
鄂托克旗 Otog Banner	$Y = 3E-05x + 0.0096$	0.74	0.006
新街 Xin Jie	$Y = 1E-04x + 0.0095$	0.81	0.003
伊旗 Ejin Horu Banner	$Y = 0.0021x^2 + 0.006$	0.82	0.000

从图3可见,本模型对各月沙尘暴发生频率的模拟效果都比较理想。

在毛乌素沙地,春季3~5月份不仅降水稀缺,春情严重,而且也是平均风速最大、大风日数最多的时期,同时,植物一般尚未开始萌发生长,覆盖率低下,无法为地表土壤提供有效保护;另外,这个时期正是农

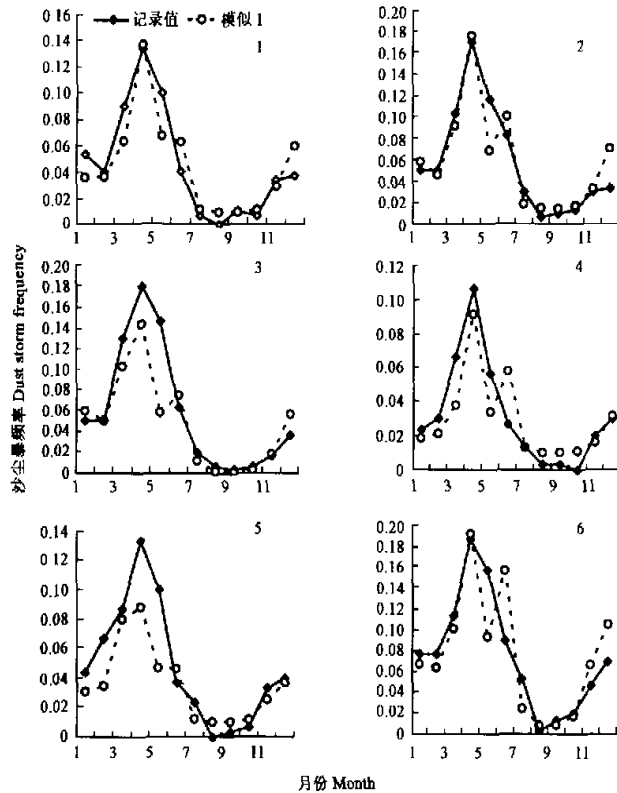


图3 毛乌素沙地各气象台站沙尘暴频率的模拟结果

(1~6 分别为乌审召、乌审旗、河南、鄂托克旗、新街和伊金霍洛旗 6 个气象站)

Fig. 3 Simulation of the dust storm frequency in Mu Us Sandland

6 refer to Uxin Ju, Uxin Banner, Henan, Otog Banner, Xin Jie and Ejin Horo Banner station)

牧民开始耕种的季节,土地耕种清除了地表仅存的植被,并破坏土壤覆被结构,将深层细微土壤颗粒暴露于地表。所有这一切因素,决定了春季往往是毛乌素沙地沙尘暴发生最为频繁的季节,尤其在4月份为甚。进入夏季以后,随着降水的增多,土壤湿润程度不断提高,同时,风力减弱,植被覆盖率有所增大,沙尘暴的发生频率也随之降低,往往在8月份降至最低;进入秋季和冬季后,风速增大,降水渐少,植被覆盖率也逐渐降低,沙尘暴频率中间增大,但是冬季月份冰冻温度对地表的冻结作用,在一定程度上减少了沙尘暴的发生。

4 讨论

4.1 不同模型模拟效果的对比

本模型主要从两方面对 McTainsh 模型进行改进,一是冬季月份以 E_{wv} 指数改进 E_a 指数模型,另一是用 E_{wv} 指数改进 E_{wv} 指数模型。为此,分别将本模型的模拟结果、沙尘暴频率记录资料以及改进前的模型模拟结果进行了对比。

4.1.1 冬季月份气候指数改进气候模拟效果比较 McTainsh 模型由式(1)~(3)组成,在不改进冬季4个月份气候指数的情况下,气候影响指数模型应为如下分段函数:

$$E = \begin{cases} E_w & (1 \text{ 月份}, 2 \text{ 月份}, 3 \text{ 月份}, 5 \text{ 月份}, 11 \text{ 月份}, 12 \text{ 月份}) \\ E_{ur} & (4 \text{ 月份}, 6 \text{ 月份}, 7 \text{ 月份}, 8 \text{ 月份}) \\ E_{va} & (9 \text{ 月份}, 10 \text{ 月份}) \end{cases} \quad (7)$$

其中 E_w 、 E_{ur} 、 E_{va} 指数分别由式(1)、(2)和(3)确定。

重复上文过程,可利用 McTainsh 模型对毛素沙地沙尘暴频率进行模拟,模拟结果与本文模拟结果以及沙尘暴频率记录值的比较情况,见图 4。

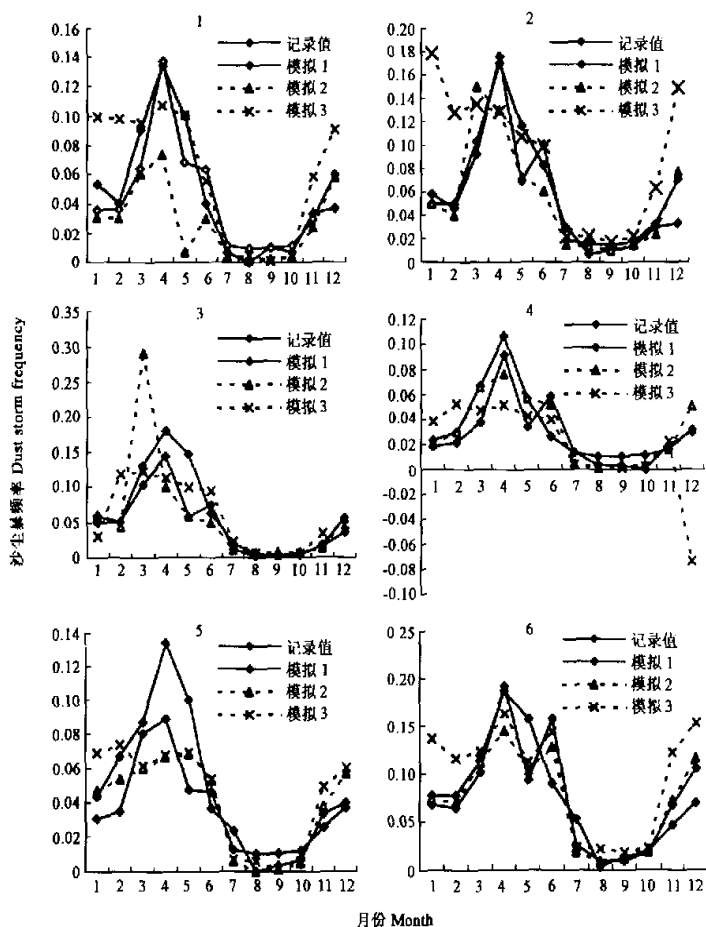


图 4 本文模型模拟结果与改进前的 McTainsh 模型模拟效果比较

Fig. 1 Comparison of the simulated results by the unchanged and present model

(1)~6 分别为乌审召、乌审旗、河南、鄂托克旗、新街和伊金霍洛旗 6 个气象站,模拟 1 本文模型模拟,模拟 2 McTainsh 模型模拟,模拟 3 McTainsh 模型模拟 1~6 refer to Uxin Ju, Uxin Banner, Henan, Otog Banner, Xin Jie and Ejin Horo Banner station

在图中,实线为气象站的记录值,模拟 1 是本文模型的模拟结果,模拟 2 是 McTainsh 模型冬季月份气候指数没有改进的模拟结果。模拟 1 和模拟 2 比较显示,本文模型的模拟效果显著优于 McTainsh 模型,尤其是冬季的 4 个月份。另外,在鄂托克旗气象站,McTainsh 模型对 12 月份沙尘暴频率的模拟结果为负

数,是极不合理的,也更说明了改进 McTainsh 模型冬季月份气候指数模型的必要性。对比表明,本文对 McTainsh 模型冬季月份的改进,取得了比较理想的效果。

4.1.2 E_{wet} 指数模型改进前后模拟效果比较 为了比较 E_{wet} 指数模型改进前后模拟效果的差异,采用 McTainsh 模型中的 E_{wet} 指数模型形式,则毛乌素沙地气候影响指数模型可用分段函数表示如下:

$$E = \begin{cases} E_n & (3 \text{ 月份}, 5 \text{ 月份}) \\ E_{wet} & (4 \text{ 月份}, 6 \text{ 月份}, 7 \text{ 月份}, 8 \text{ 月份}) \\ E_{wd} & (9 \text{ 月份}, 10 \text{ 月份}) \\ E_w & (11 \text{ 月份}, 12 \text{ 月份}, 1 \text{ 月份}, 2 \text{ 月份}) \end{cases} \quad (8)$$

这里 E_n 、 E_{wet} 、 E_{wd} 、 E_w 指数分别由式(1)、(2)、(3)和(4)确定。

利用该模型对各月沙尘暴频率进行模拟,模拟结果见图 4 中的模拟 3 表示的曲线。

对比图 4 中 E_{wet} 指数模型改进前后的模拟效果,不难看出,本文改进模型也显著改善了模型模拟效果,尤其是春季 3~5 月份沙尘暴高发期,模拟值更加接近实际值。可以认为本文对 McTainsh 模型 E_{wet} 指数的改进也是有效的。

4.2 相邻月份土壤湿润状况变化率的阈值讨论

本文借鉴 McTainsh 模型对土壤越来越湿润和越来越干燥两种变化过程中前月湿润状况对本月沙尘暴频率产生显著影响的思想,对若干月份气候影响指数模型进行了改进。但是,5 月份和 9、10 月份同处于越来越干燥过程,但为什么本文模型中 5 月份并没有采用 E_{wd} 指数呢?

之所以在考察某些月份沙尘暴频率时必须对前月土壤湿润状况的影响予以考虑,是因为土壤湿润状况在相邻两个月间发生了如此大的变化,以致前月湿润状况对本月湿润指数及本月沙尘暴频率产生了显著影响。不难理解,当相邻两个月份间土壤湿润状况变化并不足够大时,前月湿润状况并不能对本月沙尘暴频率构成显著影响。因此,土壤湿润状况在相邻月份间的变化率阈值问题,即相邻月份间土壤湿润状况变化究竟达到怎样的程度,前月湿润状况才可能对本月沙尘暴频率可能造成显著影响而必须予以考虑,是一个值得深入探讨的问题。

然而,要得到一个精确的阈值,必须基于多个点上长期资料的对比研究。这里,将上述处于两种变化过程中 7 个月份土壤湿润指数变化率计算如下(表 3)。

表 3 相邻月份土壤湿润指数变化率(%)

Table 3 Change ratio of soil moisture during the seven months

台站 Meteorological stations	4 月 Apr.	6 月 Jun.	7 月 Jul.	8 月 Aug.	5 月 May	9 月 Sep.	10 月 Oct.
乌审召 Uxin Ju	19	38	72	27	19	35	80
乌审旗 Uxin Banner	23	19	72	29	5	30	88
河南 Henan	35	10	21	55	49	29	58
鄂托克旗 Otog Banner	15	16	69	39	2	64	75
新街 Xin Jie	46	32	67	31	26	43	78
伊旗 Ejin Horo Banner	7	-2	77	37	-7	48	79
平均值 Average	25	19	63	36	16	42	78

注:这里前 4 列月份处于越来越湿润过程,变化率计算公式为(本月湿润指数-前月湿润指数)/本月湿润指数 $\times 100\%$,后 3 列为越来越干燥的月份,变化率计算公式为(前月湿润指数-本月湿润指数)/本月湿润指数 $\times 100\%$ 。

经过对比分析,毛乌素沙地处于越来越湿润过程的 4 个月份,前月较低的干燥度对本月沙尘暴频率产生显著影响,气候指数模型必须采用 E_{wet} 指数;处于越来越干燥过程中的 3 个月份,5 月份不考虑前月湿润状况的影响,4、9 月份采用 E_{wd} 指数模型考虑前月湿润状况的影响,模型达到最好的模拟效果。因此,可以初步得出结论:前月湿润状况显著影响本月沙尘暴频率的湿润指数变化率阈值大致范围是,越来越湿润过程 20%~30%,越来越干燥过程 20%~40%,即在土壤越来越湿润的变化过程中,当相邻月份土壤湿润指数变化率超过 20%~30%时,前月较低的湿润状况将对本月沙尘暴频率产生显著影响,使其大于由本月湿

润状况决定的频率;在土壤越来越干燥的变化过程中,当相邻月份土壤湿润指数变化率超过 20%~40% 时,前月较高的湿润状况也将对本月沙尘暴频率产生显著影响,使其小于由本月湿润状况决定的频率

4.3 关于 E_{wd} 指数模型形式的讨论

本文在建立毛乌素沙地气候影响指数模型时,对于湿润状况越来越干燥变化过程中的月份,气候影响指数借鉴 McTainsh 等人的 E_{wd} 指数模型。实际上,分析 E_{wd} 指数模型的结构,采用当月 E_w 指数中减去前月湿润指数,表示由于前月较高的土壤湿润度使本月沙尘暴频率有所减小,这是合理的。但是,模型中减去项系数取为 $1/(P-E)^*$ 则表明,当本月 E_w 指数一定时,前月土壤湿润度越大,减去的部分越少,前月湿润状况对本月沙尘暴频率影响作用越小,前月土壤湿润度越小,减去的部分越多,前月湿润状况对本月沙尘暴频率影响作用越大,这是不合理的。在建模过程中,曾尝试过对 E_{wd} 指数模型的多种改进方法,都无法取得理想的模拟效果。因此,如何改进 E_{wd} 指数模型的形式,使其结构更加合理,将是进一步定量模型研究要解决的重要方面。

5 主要结论

(1) 气候因素是影响沙尘暴频率的主要原因,大风天气,结合当地干燥气候,地表丰富的沙尘物质源等,是沙尘暴发生的重要条件;

(2) 本文建立的气候影响指数模型,比较适合毛乌素沙地的气候特征,能够较好地模拟各月沙尘暴发生频率,不仅可用于解释当前的沙尘暴频率分布格局,也可用于各地沙尘暴频率的预测和评估等目的。

(3) 本文对 McTainsh 等人模型尽管取得比较理想的效果,但模型仍然存在一些不太合理的地方,这些有待在进一步的工作中得到改进。

参考文献

- [1] McTainsh G H, Lynch A W & Tews F K. Climatic controls upon dust storm occurrence in eastern Australia. *Journal of Arid Environments*, 1998, **39**: 457~466.
- [2] Yu B, Hesse P P & Neil D T. The relationship between antecedent climatic conditions and the occurrence of dust events at Mildura, Australia. *Journal of Arid Environments*, 1993, **24**: 109~121.
- [3] McTainsh G H, Burgess R C & Pitblado J R. Aridity, drought and dust storms in Australia (1960~1984). *Journal of Arid Environments*, 1989, **16**: 11~22.
- [4] McTainsh G H, Lynch A W & Burgess R C. Wind erosion in eastern Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 1990, **28**: 323~339.
- [5] 张新时,毛乌素沙地的生态背景及其草地建设的原则与优化模式. *植物生态学报*, 1994, **18**(1): 1~16.
- [6] 北京大学地理系,中国科学院兰州沙漠所,中国科学院兰州冰川所. 毛乌素沙地自然条件及利用, 1983. 北京: 科学出版社, 1~113.
- [7] 董光荣,高尚玉,金炯,等. 毛乌素沙漠的形成、演变和成因问题. *中国科学(B)*, 1988, (6): 633~642.
- [8] 吴波,慈龙骏. 毛乌素沙地沙漠化的遥感监测. *科学通报*, 1998, **43**(22): 2437~2440.
- [9] 赵永复. 历史上毛乌素沙地的变迁问题. *历史地理*, 创刊号, 1981, 34~47.
- [10] Thornthwaite C W. The climates of North America according to a new classification. *Geographical Review*, 1931, **21**: 633~655.
- [11] 黄兆华. 我国西北地区历史时期的风沙尘暴. 见: 方宗义,朱福康,江占喜,钱止安 编, *中国沙尘暴研究*, 1997, 北京: 气象出版社, 31~36.
- [12] Chepil W S. Influence of soil moisture on erodibility of soil by wind. *Proceedings, Soil Science Society of America*, 1956, **20**: 288~291.
- [13] Fryrear D W. Dust storms in the Southern Great Plains. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1981, **24**: 991~999.
- [14] Stout J E. Effect of averaging time on the apparent threshold for aeolian transport. *Journal of Arid Environments*, 1998, **39**: 395~401.