

# 内蒙古阴山北麓农牧交错带风蚀气候侵蚀力特征

邹春霞<sup>1,2</sup>,申向东<sup>1</sup>,李夏子<sup>2,3</sup>,李彰俊<sup>3</sup>

1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,呼和浩特 010018

2. 内蒙古农业大学生态环境学院,呼和浩特 010018

3. 内蒙古气象局,呼和浩特 010051

**摘要:**为了解内蒙古阴山北麓农牧交错带的风蚀气候侵蚀力变化特征及规律,在收集多年风速、降水、气温、相对湿度和沙尘暴气象站观测数据的基础上,计算了典型区域风蚀气候侵蚀力。引入MHP小波函数,对该时间序列进行小波分析,揭示了区域风蚀气候侵蚀力变化的多时间尺度的复杂结构,分析了其在不同时间尺度下的周期性和突变诊断点。结合沙尘暴发生日数的观测资料,进一步分析风蚀气候指数与沙尘暴发生日数的尺度变化关系。研究表明:内蒙古阴山北麓农牧交错带风蚀气候侵蚀力具有明显的阶段性特征,以16 a的周期振动最强;在整个时间域上,区域风蚀气候侵蚀因子与沙尘暴日数的变化具有较好的对应关系,即风蚀气候指数偏大期对应沙尘暴日数偏多期,风蚀气候指数偏小期对应沙尘暴日数偏少期;并预测在未来一段时间内风蚀气候侵蚀力较大时间尺度变化处于增强的偏小期,但较小尺度表现出由大到小的过渡。

**关键词:**风蚀;气候侵蚀力;MHP小波;多时间尺度;农牧交错带

中图分类号:P46;X16

文献标志码:A

文章编号:1671-5888(2011)04-1172-07

## Characteristics of Wind Erosion Climatic Erosivity in Agro-Pastoral Ecotone of North Yin Mountain, Inner Mongolia, China

ZOU Chun-xia<sup>1</sup>, SHEN Xiang-dong<sup>1</sup>, LI Xia-zi<sup>2,3</sup>, LI Zhang-jun<sup>3</sup>

1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China

2. College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China

3. Inner Mongolia Weather Bureau, Huhhot 010010, China

**Abstract:** The study focused on the climatic erosivity time series of past long years in agro-pastoral ecotone of northern foot of Yin Mountain, Inner Mongolia, China, based on the meteorology data of wind speed, precipitation, temperature, humidity and so on. The temporal-frequency multiscaling variations and abrupt change features of climatic erosivity were analyzed by the MHP wavelet method which contributes to reveal the multi-scale variations characteristics of climatic erosivity, as well as the periods and abrupt change points of climatic erosivity series in different time-scale. Meanwhile, the relationship between the sandstorm phenomenon and the wind erosion climatic erosivity was obtained in

收稿日期:2010-10-31

基金项目:国家自然科学基金项目(10262001);科技部重大基础前期研究专项(2002ccc03400);内蒙古自然科学基金项目(20050801304);内蒙古高等学校科学研究项目(NJzy08044);内蒙古农业大学博士科研启动项目(BJ07-27)

作者简介:邹春霞(1975—),女,内蒙古巴彦淖尔人,副教授,博士,主要从事土壤风蚀、工程力学的教学与研究,E-mail:anna-zcx@163.com

通信作者:申向东(1955—),男,内蒙古呼和浩特人,教授,博士生导师,主要从事工程结构力学、环境力学的教学与研究,E-mail:ndsx@163.com。

the meteorology. The results showed that there were obvious staggered features about the variations of climatic erosivity in agro-pastoral ecotone of northern foot of Yin Mountain. Furthermore, it is found that approximate 16-year period-oscillation of climatic erosivity variations is the strongest. In addition, the sandstorm is more frequent where the larger wind erosion climatic erosivity is. Finally, the wavelet coefficients patterns exhibit a strongly reducing trend in climatic erosivity in the future years in long-term, but in short-term, there is a transition from larger climatic erosivity to smaller one.

**Key words:** wind erosion; climatic erosivity; MHF wavelet; multi-time scale; agro-pastoral ecotone

## 0 引言

风蚀气候侵蚀力是对气候影响风蚀的可能程度的量度,国际上一般用风蚀气候因子指数表示。表征风蚀气候侵蚀力的风蚀气候因子是国外广泛应用的风蚀方程中的5个自变量之一,亦是沙漠化评价的重要指标,其研究具有重要的理论意义和应用价值<sup>[1-3]</sup>。

自1962年Chepil等<sup>[4]</sup>在研究美国堪萨斯州加尔登城的风蚀问题时,提出以一个气候因子去估计一系列气候条件下的年平均潜在风蚀量的思想后,国外科学家开始致力于对风蚀气候侵蚀力及其影响因子的研究<sup>[5-6]</sup>,如风速、降水、蒸发等因子对风蚀气候因子的影响。到1979年,经过联合国粮农组织对Chepil的气候指数进行修订以后,得到考虑月平均风速、降水量、潜在蒸发量的表达式<sup>[7]</sup>。1986年,E. L. Skidmore<sup>[8]</sup>根据风沙物理理论提出了考虑空气密度、风速、颗粒间水分所产生的内聚力的另外一个表达气候指数的公式,而公式的各因子测量较为复杂。

国内相关研究较少,1994年中国科学院沙漠研究所<sup>[2]</sup>曾对我国干旱半干旱地区表征风蚀气候侵蚀力强度的风蚀气候因子指数进行了计算,从宏观上阐述了我国风蚀气候侵蚀力的基本特点,指出阴山北麓风蚀气候指数大于100,这为我国风蚀气候侵蚀力的研究奠定了良好的基础。

本研究利用联合国粮农组织的风蚀气候因子公式计算该区域的风蚀气候侵蚀力,并从较小区域尺度研究内蒙古阴山北麓农牧交错带的四子王旗气候指数变化特征,分析了其在不同时间尺度下的周期性和突变诊断点,并结合沙尘暴发生日数的观测资料,揭示了风蚀气候指数与沙尘暴发生日数的尺度变化关系。

## 1 研究区域特点和数据来源

### 1.1 研究区域

研究区域选在阴山北麓农牧交错带的中部波状高原区四子王旗,地处北纬41°33',东经111°38',海拔1490.70 m,属于典型的干旱地区。该区或45年年均降水量为313.0 mm,主要集中在夏、秋季;年平均风速3.72 m/s,3—5月风速较大,大风、扬沙和沙尘暴天气频繁:大风天气约占全年的49%,扬沙天气约占全年的68.8%,沙尘暴天气约占全年的75.6%,大风、沙尘天气主要发生在干旱少雨、风大的春季。近年来,由于风蚀所致耕地表土颗粒粗化较为严重,该区成为整个农牧交错带中生态最为脆弱和最贫困的地区之一。

### 1.2 数据来源

本研究所用沙尘暴气象数据资料主要来源于内蒙古气象局和内蒙古四子王旗气象站,包括四子王旗1970年以来的风速、气温、降水、相对湿度、沙尘暴发生日数等翔实的记载数据。

## 2 研究方法

小波分析法是近年来国际上十分热门的分析法,亦称多分辨率分析法。它以一种小波变换方式产生一系列“瞬时”波谱信号估计,详细而准确地揭示出时间序列中瞬时频率结构随时间的变化;既可确定函数在整个频域上的频率特点,也能反映信号在时域上的总体特征;可以通过伸缩和平移等运算功能对函数或信号序列进行多尺度细化分析,研究不同尺度(周期)随时间的演变情况和变化的时间位置,具有数学意义上的严格的突变点诊断能力<sup>[9-10]</sup>。

### 2.1 墨西哥帽(MHF)小波变换

设有时间序列 $f(t)$ 及一组由参数 $a, b$ 构成的母小波 $g(a, b, t)$ ,由 $f(t)$ 与 $g(a, b, t)$ 的卷积构成小波变换:

$$T_g(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} g\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt. \quad (1)$$

若  $\Delta t$  为取样间隔,  $n$  为样本容量, 则其离散形式为

$$T_g(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Delta t \sum_{i=1}^n g\left(\frac{i\Delta t - b}{a}\right) f(i\Delta t). \quad (2)$$

## 2.2 MHF 小波方差

将时间域上关于  $a$  的所有小波系数的平方进行积分, 即为小波方差:

$$\text{var}(a) = \sum (T_g)^2(a, b); \quad (3)$$

MHF 的表达式为

$$g(t) = (1-t^2) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2}, -\infty < t < \infty. \quad (4)$$

联立式(2)和(4)可以得到小波变换结果。为了减少边界效应, 常将资料向前和向后各延拓一个样本长度, 变换后再将前后延拓部分舍弃。

设样本长度为  $N$ , 资料序列为

$$X(t) = \{X(1), X(2), \dots, X(N)\}, \quad (5)$$

向前延拓  $N$  个资料, 得

$$X(-t) = X(t+1), t = 0, 1, \dots, N-1, \quad (6)$$

向后延拓  $N$  个资料, 得

$$X(t+N) = X(N+1-t), t = 1, 2, \dots, N. \quad (7)$$

## 3 研究结果

### 3.1 风蚀气候指数的周期变化和突变特征

图 1a 为研究区风蚀气候指数距 100 序列及其 8 次多项式拟合曲线。图中反映出: 从 1971 年以来, 该区域风蚀气候指数大体经历了 2 个变化阶段: 1983 年以前风蚀气候指数的相对 100 偏大期和 1983 年以后的相对 100 偏小期。其中 20 世纪 70 年代前期风蚀气候指数最大, 说明该时期的气候条件可能造成风蚀侵蚀力最强; 而 21 世纪 10 年代中期最小, 气候条件可能造成区域风蚀侵蚀力相对较弱。

为进一步对风蚀气候指数时间序列作多时间尺度的分析, 将现有资料分别向前和向后延拓一个样本长度进行小波变换, 变换后再将所延拓部分进行舍弃, 只取中段。同时将波的最大周期取资料长度的  $1/2$ , 即 17 年。

图 1b、c 为研究区风蚀气候指数距 100 变化的 MHF 小波变换结果。信号的强弱通过小波系数的大小来表示: 等值线数值为正代表气候指数偏大; 等

值线数值为负代表气候指数偏小; 小波系数数值为零则对应着突变点。从图 1b、c 可以看出, 该区域风蚀气候指数的不同时间尺度周期变化在时间域中的分布存在差异性。即自 1971 年以来四子王旗风蚀气候指数在不同时期的振动周期是变化的, 最强的几个振动中心(正等值线中心)分别在 20 世纪 70 年代前期, 80 年代后期, 其周期大致为  $15 \sim 17$  a 和  $2 \sim 3$  a。即周期在  $15 \sim 17$  a 左右的振荡在 70 年代前期最显著; 周期在  $2 \sim 3$  a 左右的振荡在 80 年代后期。可见, 不同尺度周期信号的强弱在时-频域中的分布具有较强的局部特征。

研究区风蚀气候指数表现出不同的年际及年代际尺度变化。由于 MHF 小波变换系数的零点对应于风蚀气候指数变化的拐点, 所以小波变换系数的零点位置对应于该区域风蚀气候指数变化的突变点位置; 由此可以诊断出不同时间尺度上的变化突变点位置, 从而可以得出其多时间尺度特征和规律。对应于  $13 \sim 15$  a 时间尺度, 该区域的风蚀气候指数主要经历了 2 个较大时间尺度的大小更替: 1986 年以前的偏大期和 1986 年以后的偏小期, 而 1986 年就是一个突变点。对应于较小时间尺度的风蚀气候指数演变, 则表现出相对复杂的现象。如果采用  $2 \sim 4$  a 的时间尺度, 则风蚀气候指数主要经历了 4 个变化阶段: 1980 年以前的偏大期、1980—1986 年的偏小期、1987—1990 年的偏大期和 1991 年以后的偏小期, 对应的突变点为 1980, 1987 和 1991 年。从图 1b、c 还可以看出: 风蚀气候指数最大的 70 年代前期, 其高频和低频振荡一致, 都反映出偏大的特征; 最小的在 80 年代中后期, 其高频和低频振荡一致, 都反映出偏小的特征。近年来的风蚀气候指数变化情况, 较大时间尺度变化处于增强的偏小期, 但较小尺度表现出由小到大的过渡。

图 2 为研究区风蚀气候指数变化的 MHF 小波方差, 反映了能量随时间尺度的分布。由图可以确定一个时间序列中各种尺度振动的相对强度, 对应峰值处的尺度成为该序列的主要时间尺度, 用以反映时间序列的主要周期。在整个时间域内, 研究区风蚀气候指数以  $16$  a 左右周期振动最强, 说明该区域风蚀气候指数的年代际特征较为明显。

### 3.2 沙尘暴日数的周期变化和突变特征

图 3a 为研究区 1971—2006 年沙尘暴发生总日数距平序列及其 8 次多项式拟合曲线。自 1971 年以来, 研究区沙尘暴天气大体经历了 3 个变化阶

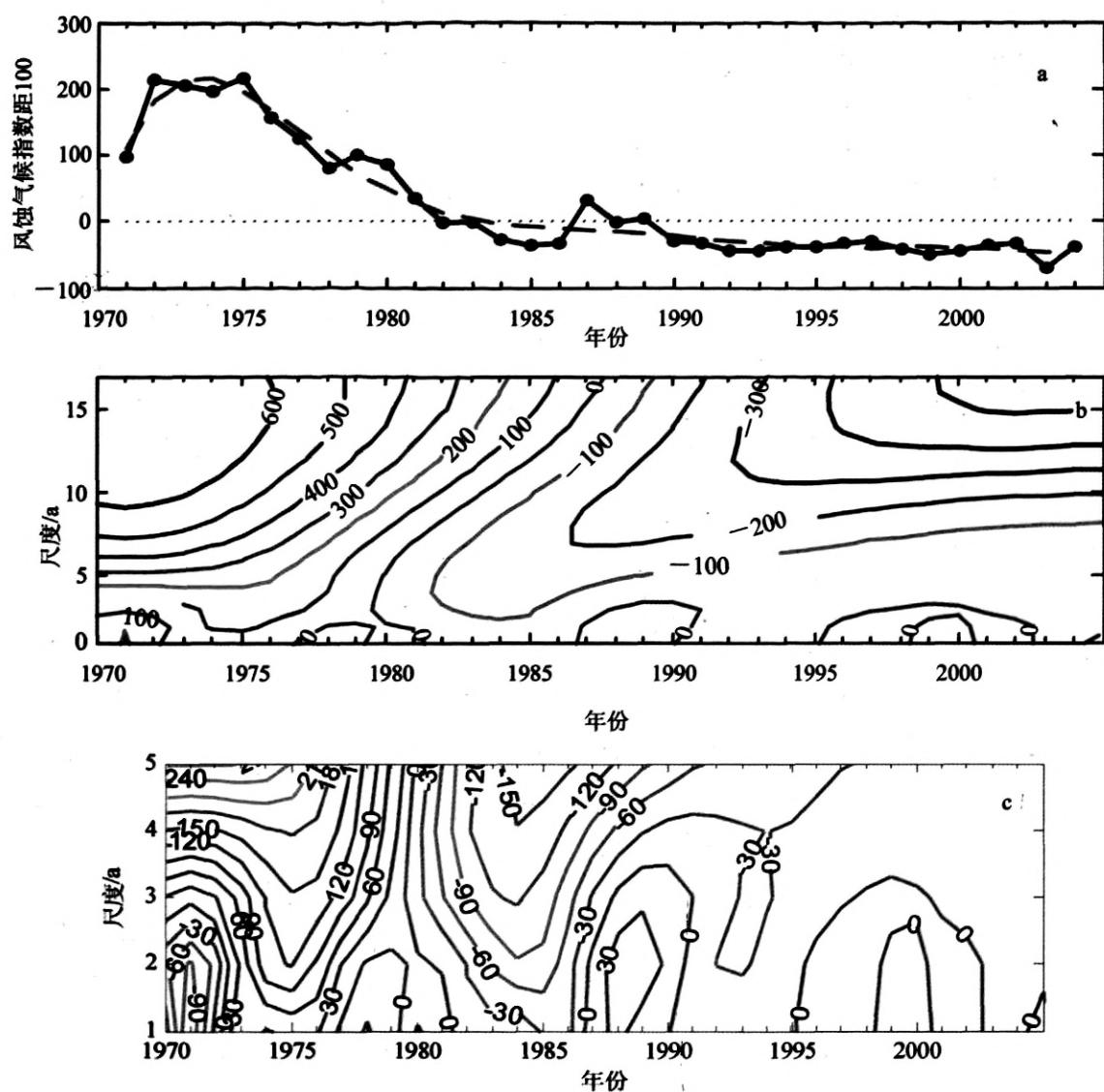


图1 研究区风蚀气候指数距100及其小波波幅时间变化图

Fig. 1 Wind erosion climatic erosivity variation anomaly between 100 and its wavelet transform in study area

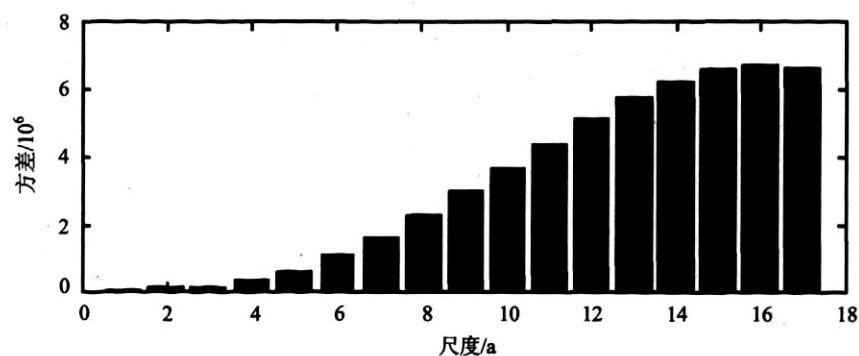


图2 研究区风蚀气候指数变化的MHW小波方差

Fig. 2 MHW wavelet variance of wind erosion climatic erosivity in study area

段:1981 年以前沙尘暴天气的相对偏多期,1981—2005 年的相对偏少期和 2005 年以后的相对偏多期。另外,20 世纪 70 年代中期沙尘暴天气发生最频繁,而 20 世纪 90 年代中期沙尘暴天气发生最少。

图 3b 为 1971—2006 年沙尘暴日数距平变化的 MHF 小波变换结果。从图 3b(图 3c 为尺度 1~5 区间)可以看出:图的上半部分等值线相对稀疏,对应较长尺度周期的振荡(低频振荡),而下半部分等值线相对密集,对应较短时间尺度周期振荡(高频振荡)。四子王旗沙尘暴日数的不同时间尺度周期变化在时间域中的分布是有差异的。自 1971 年以来沙尘暴天气在不同时期的振动周期是变化的,最强的几个振动中心分别在 20 世纪 70 年代前期,20 世纪 70 年代中期和 21 世纪 10 年代中期,其周期大致为 12~14 a、3~4 a 和 5~7 a。周期在 12~14 a 左右的振荡在 20 世纪 70 年代前期最显著;周期在 3~4 a 左右的振荡在 20 世纪 70 年代中期;周期在 5~7 a 左右的振荡在 21 世纪 10 年代中期最显著。

由于 MHF 小波变换系数的零点对应于沙尘暴日数变化的拐点,所以小波变换系数的零点位置对应于沙尘暴日数变化的突变点位置;由此可以诊断出不同时间尺度上变化的突变点位置,从而可以得出多时间尺度特征和规律。对应于 10~15 a 的时间尺度,沙尘暴天气主要经历了 2 个较大时间尺度的多寡更替:它们是 1985 年以前的偏多期和 1985 年以后的偏少期,1985 年就是一个突变点。对应于较小时时间尺度的沙尘暴日数演变,则表现出相对复杂的现象。如果采用 2~5 a 的时间尺度,则沙尘暴日数主要经历了 6 个变化阶段:1973 年以前的偏少期、1973—1979 年的偏多期、1980—1987 年的偏少期、1988—1990 年的偏多期、1991—2001 年的偏少期、2002 年以后的偏多期,对应的突变点为 1973、1980、1988、1991 和 2002 年。对更小时时间尺度,则情况更为复杂,周期性也较弱。从图 3b,c 还可以看出,研究区沙尘暴日数最多的 20 世纪 70 年代中期,其高频和低频振荡一致都反映出偏多的特征;在最少的 20 世纪 90 年代,其高频和低频振荡一致都反映出偏少的特征。近年来的沙尘暴日数变化情况,较大时间尺度变化处于增强的偏少期,但较小尺度表现出由少到多的过渡;因此可推断在未来一段时问内沙尘暴日数可能出现短期的增加。

图 4 为研究区年沙尘暴日数变化的 MHF 小波方差。在整个时间域内,全年沙尘暴日数以 17 年左

右周期振动最强,说明研究区沙尘暴日数的年代际特征较为明显。

### 3.3 风蚀气候侵蚀力与沙尘暴日数的尺度变化关系

从图 3b 和图 1b 可以看出,在整个时间域上,小波系数分布大体上是同相的,表明研究区风蚀气候指数与沙尘暴日数变化有比较好的对应关系,即研究区风蚀气候指数偏大期对应沙尘暴日数偏多期,风蚀气候指数偏小期对应沙尘暴日数偏少期。而具体到不同的时间尺度上其对应关系又存在一定的差异。

图 5 表示 2 a 和 12 a 尺度下的风蚀气候指数与沙尘暴日数小波系数的变化。可以看出,不同时间尺度下的年风蚀气候指数与沙尘暴日数变化表现出从小尺度的复杂变化到大尺度的规律性变化的过渡特征。从较大时间尺度(12 a)来看,风蚀气候指数与沙尘暴日数呈大指数多沙尘暴、小指数少沙尘暴结构排列,两者相位一致;从较小时时间尺度(2 a)来看,风蚀气候指数与沙尘暴日数变化在不同阶段的同位性比大时间尺度稍复杂。从整个时间域上看,风蚀气候指数变化与沙尘暴日数变化总体表现为位相相同,只是在一些阶段出现风蚀气候指数位相超前,如 20 世纪 80 年代前期。

## 4 结论

1) 阴山北麓农牧交错带年风蚀气候侵蚀因子变化具有明显的阶段性特征:相对于 15 a 时间尺度,风蚀气候指数表现出 1984 年以前的大于 100 和 1984 年以后的小于 100 的更替;相对于 5 a 时间尺度,风蚀气候指数表现出 1980 年以前的大于 100 和 1980 年以后的小于 100 的更替;相对于更小时时间尺度,更替表现得更为复杂。

2) 1971—2006 年时间域内,阴山北麓农牧交错带的年风蚀气候侵蚀因子变化以 16 a 左右周期振动较强。从研究区的风蚀气候指数变化情况,较大时间尺度变化处于增强的偏小期,但较小尺度表现出由大到小的过渡。

3) 阴山北麓农牧交错带沙尘暴发生日数具有明显的阶段性特征:相对于 10~15 a 时间尺度而言,沙尘暴日数表现出 1985 年以前的偏多期和 1985 年以后的偏少期的更替;相对于 5 a 时间尺度而言,沙尘暴日数表现为 1980 年以前的偏多期、1980—1987 年的偏少期和 2002 年以后的偏多期的更替;相

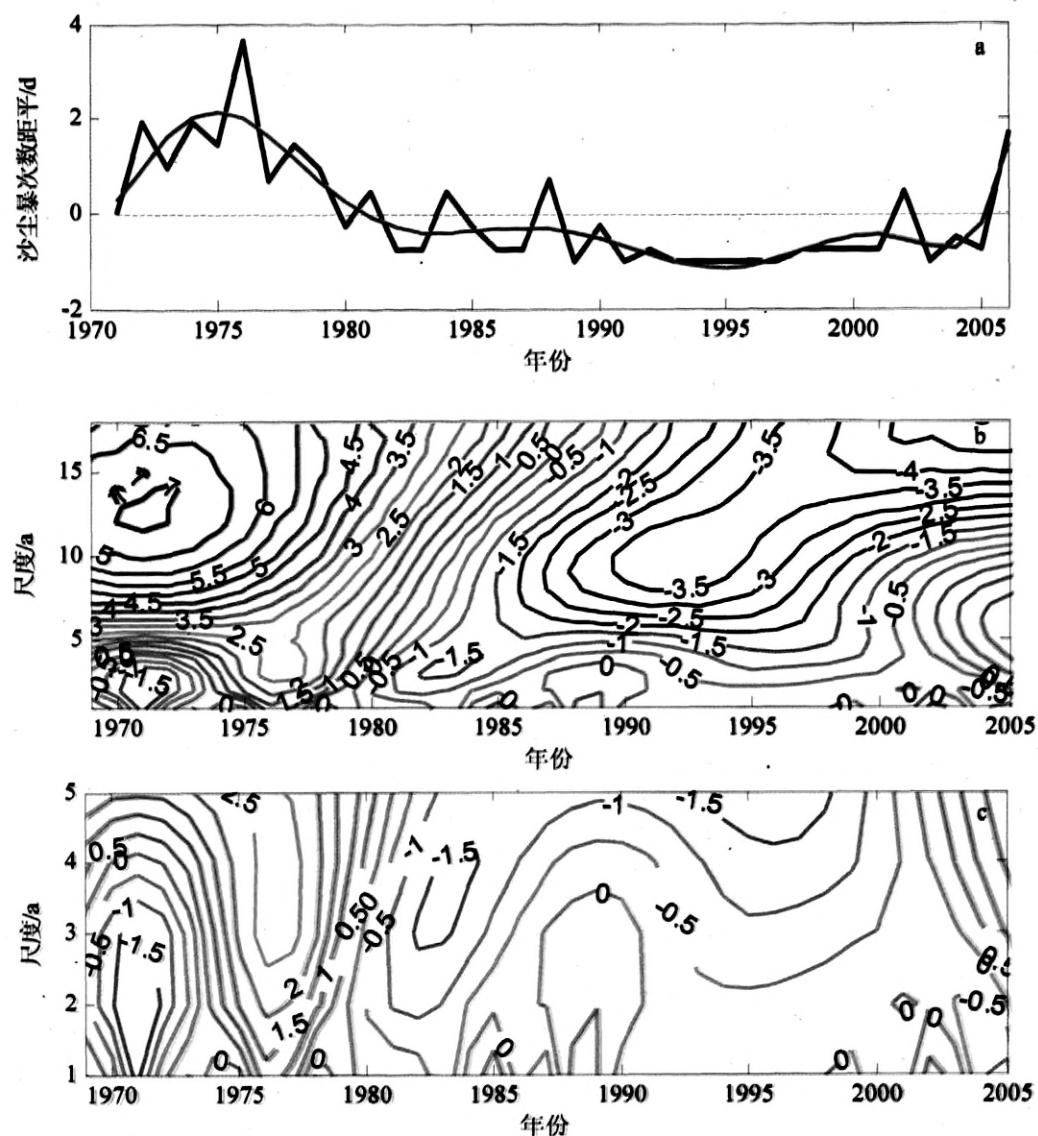


图3 沙尘暴日数距平及其小波波幅时间变化图  
Fig. 3 Days of sandstorm anomaly and its wavelet transform

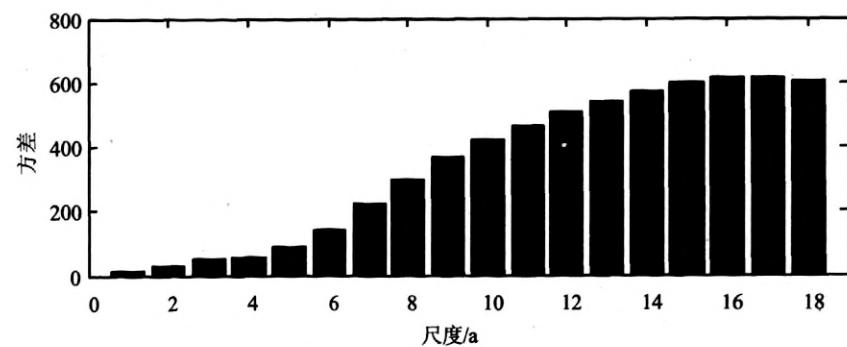


图4 沙尘暴日数变化的 MHF 小波方差  
Fig. 4 MHF wavelet variance of the sandstorm days

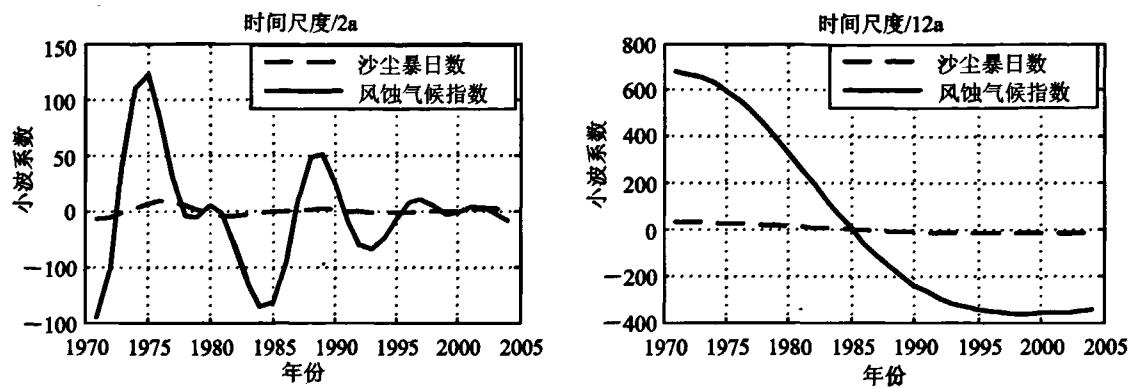


图5 研究区不同时间尺度风蚀气候指数与沙尘暴日数的变化趋势

Fig. 5 Variation trends of wind erosion climatic erosivity and sandstorm days in different time scale

对于更小的时间尺度而言,沙尘暴日数更替表现得更为复杂;1971—2006年时间域内,年沙尘暴日数变化以17 a左右周期振动较强。

4)从四子王旗的年沙尘暴日数变化来看,较大时间尺度变化处于增强的偏少期,但较小尺度表现出由少到多的过渡;因此可推断在未来一段时间内沙尘暴日数可能出现短期的增加,但不会急剧上升。

5)在整个时间域上,风蚀气候侵蚀因子与沙尘暴日数的变化具有较好的对应关系,即风蚀气候指数偏大期对应沙尘暴日数偏多期,风蚀气候指数偏小期对应沙尘暴日数偏少期。

#### 参考文献(References):

- [1] 吴正. 风沙地貌与治沙工程[M]. 北京:科学出版社, 2003: 91—105.  
WU Zheng. Geomorphology of wind-drift sands and wind-sand engineering [M]. Beijing: Science Press, 2003: 91—105.
- [2] 董玉祥, 康国定. 中国干旱半干旱地区风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J]. 水土保持学报, 1994, 8(3): 1—7.  
DONG Yu-xiang, KANG Guo-ding. Study on the wind erosion climatic erosivity in arid and semi-arid areas in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 8(3): 1—7.
- [3] 邱玉琨, 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(2): 35—40.  
QIU Yu-jun, ZOU Xue-yong. Model study of influence of climate factors on dust event[J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(2): 35—40.
- [4] Chepil W S. Climatic factor for estimating wind erodibility fields[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1962, 17(4): 162—165.
- [5] Woodruff N P, Siddoway F H. A wind erosion equation[J]. Soil Science Society Proceedings, 1965 (29): 602—608.
- [6] Fryrear D W, Lyles L. Wind erosion research accomplishments and needs[J]. Transactions of the ASAE, 1977, 20(5): 916—918.
- [7] FAO. A provisional methodology for soil degradation assessment [M]. Rome: Delle Terme Di Caracalla, 1979: 14—50.
- [8] Skidmore E L. Wind erosion climatic erosivity[J]. Climate Change, 1986, 9(1/2): 195—208.
- [9] 付强. 数据处理方法及其农业应用[M]. 北京:科学出版社, 2006: 430—456.  
FU Qiang. Method of data process and its application in agriculture[M]. Beijing: Science Press, 2006: 430—456.
- [10] 飞思科技产品研发中心. 小波分析理论与 MATLAB7 实现[M]. 北京:电子工业出版社, 2006: 116—216.  
Technology Product Research and Development Center of Fecit. Wavelet analysis theory and its MATLAB7 program [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2006: 116—216.
- [11] 卢文喜, 陈社明, 王晨子, 等. 基于小波变换的大安地区年降水量变化特征[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2010, 40(1): 121—127.  
LU Wen-xi, CHEN She-ming, WANG Chen-zi, et al. Variation characteristics of annual precipitation in Da'an area based on wavelet transformation[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2010, 40(1): 121—127.