

近 54 年内蒙古自治区西部沙尘暴的变化趋势

马潇潇, 王海兵, 左合君

(内蒙古农业大学 沙漠治理学院 内蒙古风沙物理与防沙治沙工程重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010011)

摘要: [目的] 研究近 54 a 内蒙古自治区西部沙尘暴天气发生频次的变化特征, 为该区沙尘暴天气的科学预测和防治提供理论依据。[方法] 采用线性回归、5 a 滑动平均、小波分析、滑动 t 检验、Mann-Kendall 检验方法分析内蒙古自治区西部 24 个气象站点沙尘暴日数的变化趋势、周期性、突变性等特征。[结果] ①近 54 a 来沙尘暴天气发生频次可分为高频期(1960—1975 年)、快速减少期(1976—1992 年)和低频期(1993—2013 年)。沙尘暴发生的频次分别为 17.9 和 4 d/a; 发生频次的周期性存在 31, 22, 13 a 三个长周期和 5.8, 1.5 a 三个短周期的波动变化。②1986 年前后沙尘暴发生频次出现了明显的突变现象, 1976—1986 年的线性递减率为 0.76 d/a, 1987—1992 年的线性递减率为 1.4 d/a。[结论] 近 54 a 内蒙古自治区西部沙尘暴日数变化呈波动下降趋势, 且存在明显的周期性和突变性特征。

关键词: 沙尘暴日数; 小波分析方法; 周期性; 突变性; 内蒙古自治区西部

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)04-0017-05

中图分类号: P954

文献参数: 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.04.003; Ma Xiaoxiao, Wang Haibing, Zuo Hejun. Variation trend of sandstorm in Western Inner Mongolia Autonomous Region in recent 54 years[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4):17-21.

Variation Trend of Sandstorm in Western Inner Mongolia Autonomous Region in Recent 54 Years

Ma Xiaoxiao, Wang Haibing, Zuo Hejun

(College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Key Laboratory of Aedian Physics and Desertification on Control Engineering, Inner Monglia Agricultural University, Hohhot, Inner Monglia 010011, China)

Abstract: [Objective] The variation characteristics of sandstorm weather frequency in Western Inner Mongolia Autonomous Region in the recent 54 years were studied in order to provide theoretical basis for its scientific prediction and prevention and treatment. [Methods] Through the methods of linear regression, 5-year sliding average, wavelet analysis, moving t test and Mann-Kendall, the changing trend, periodicity and mutagenicity of sandstorm day number of 24 meteorological stations in Western Inner Mongolia Autonomous Region were analyzed. [Results] ① In the recent 54 years, the frequency of sandstorm weather could be divided into high frequency period(1960—1975), rapid attenuation period(1976—1992) and low frequency period(1993—2013). The frequency of dust occurrence was 17, 9, 4 days per year, there were 31, 22, 13 years long periods and 5, 8, 1.5 years short cycles. ② There was an obvious mutation in the frequency of sandstorm around 1986. The linear decrement rate of 1976—1986 was 0.76 day per years, that of 1987—1992 was 1.4 days per years. [Conclusion] In the recent 54 years, the change of sandstorm day number in Western Inner Mongolia Autonomous Region showed a fluctuating trend, and there were obvious cyclical and mutagenic characteristics.

Keywords: sandstorm days; wavelet analysis; periodicity; mutagenicity; Western Inner Mongolia Autonomous Region

收稿日期: 2018-12-29

修回日期: 2019-02-03

资助项目: 内蒙古农业大学人才项目“戈壁地表沙尘过程研究”(NDYB2017-3)

第一作者: 马潇潇(1992—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区鄂尔多斯市人, 硕士研究生, 研究方向为荒漠化防治。E-mail: 362292772@qq.com。

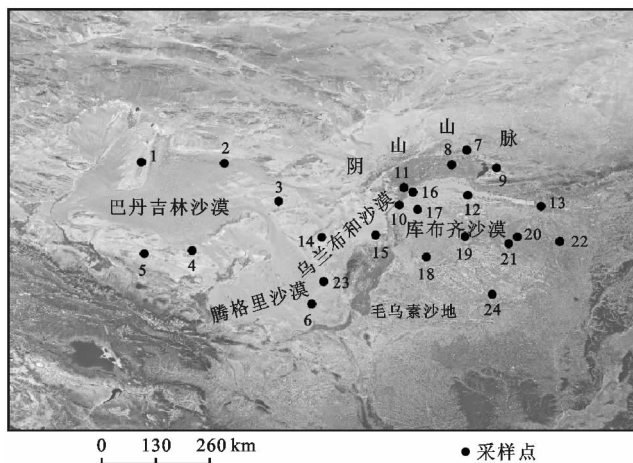
通讯作者: 王海兵(1982—), 男(汉族), 内蒙古自治区丰镇市人, 博士, 副教授, 主要从事干旱区荒漠化防治方面的研究。E-mail: hbwang@imau.edu.com。

沙尘暴是干旱区频发的灾害性天气现象^[1]。沙尘暴发生时,风沙掩埋农田、毁坏基础设施建设;能见度差,严重影响交通安全;大气中的可吸入颗粒物浓度增大,空气质量下降,导致患呼吸道系统疾病的人数增多,严重威胁着人们的身体健康。沙尘暴是制约干旱区人类生存和发展的重要因素。我国西北是重要的沙尘源区,区域内构造地貌、气候、土壤和植被具有显著的空间差异性,沙尘暴发生频率和强度存在明显的地域差异^[2-3]。清楚认识源区不同地域沙尘暴发生规律对于防治沙尘暴灾害至关重要。内蒙古自治区西部位于我国西北内陆,具有独特的地理环境条件,生态环境异常脆弱,土地贫瘠,沙漠化严重。温度高、降水少、风力强劲是其典型的气候条件。内蒙古自治区有 5 个沙尘暴多发中心,其中有四个分布于西部地区^[4]。内蒙古自治区西部沙尘暴的屡屡发生与该地区特定的气候、地理和生态环境等条件有密切关系^[5]。这里常年受西风带影响,冷空气入侵频繁,春季干燥,多大风天气,为沙尘暴的发生提供了动力条件。境内分布有巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、库布齐沙漠以及毛乌素沙地,这些沙漠、沙地为沙尘暴的发生提供了丰富的沙尘物质。内蒙古自治区西部已经成为一个重要的东亚以及太平洋地区的沙尘释放源区^[6-7]。目前,关于内蒙古自治区西部沙尘暴特征的研究较少,大多都是简单的数据统计分析。以往对于沙尘暴周期性特征的分析仅仅是从时域方面进行的,比如李红军^[8]等用最大熵谱分析方法分析了新疆地区的沙尘暴的周期性变化特征;丁瑞强^[9]等用奇异谱分析方法分析了中国春季沙尘暴的周期性变化特征;而小波分析方法可以同时从时域和频域两方面分析时间序列的局部特征,孙然好、王存忠、万的军^[10-12]等通过研究指出小波分析方法对于分析沙尘暴的周期性特征有很好的参考价值。对于沙尘暴突变性特征的分析大多都使用滑动 f 检验方法,忽略了人为主观取值的随意性;而使用 Mann-Kendall(MK)检验方法和滑动 t 检验方法相结合来分析沙尘暴突变性特征可以很好的避免主观取值对其影响。Mann-Kendall(MK)检验方法的优点是样本不需要遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,被广泛应用于水文、气候检验等方面。本文采用小波分析、MK 检验等多种统计分析方法对内蒙古自治区西部地区近 54 a 沙尘暴的趋势、周期性以及突变性等特征进行研究,旨在为科学预测与防治沙尘暴天气提供理论依据。在全面打造北疆亮丽风景线,建设美丽中国的新要求下,研究内蒙古西部地区沙尘暴天气的变化特征具有重要的理论与现实意义。

1 资料与方法

1.1 数据资料

内蒙古自治区西部包括阿拉善高原、河套平原及鄂尔多斯高原。本文所用的内蒙古自治区西部 1960—2013 年近 54 a 沙尘暴日数数据是由内蒙古气象局和中国气象数据共享网提供的。根据气象站点建站时间与数据完整性选取了 24 个气象站点(图 1)的逐日观测数据,其中阿拉善盟 8 个气象站、巴彦淖尔市 7 个气象站、鄂尔多斯市 8 个气象站、乌海市 1 个气象站。



注:1 额济纳旗;2 拐子湖;3 巴彦诺尔公;4 雅布赖;5 阿拉善右旗;6 乌斯太;7 乌拉特中旗;8 五原;9 大余太;10 磴口;11 杭锦旗后旗;12 乌拉特前旗;13 达拉特旗;14 吉兰泰;15 乌海;16 临河;17 伊克乌素;18 鄂托克旗;19 杭锦旗;20 东胜;21 伊金霍洛旗;22 准格尔旗;23 阿拉善左旗;24 乌审旗。

图 1 研究区域代表气象站点空间分布

1.2 研究方法

1.2.1 线性倾向估计法 气象要素的变化趋势采用一次线性方程表示:

$$Y_i = a + bt_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中: Y_i ——时间为 t_i 的某一气候变量; t ——所对应的时间; a ——回归常数; b ——线性趋势项。若 $b > 0$, Y 呈上升趋势,随 t 值的增加而增加。反之,同理。 b 值的大小反映了上升或下降的速率。

1.2.2 小波分析 小波分析能够同时从时域和频域揭示时间序列的局部特性,适合于研究具有多时间尺度变化特性的非平稳信号。沙尘暴天气发生频次可以看作是随时间有周期性变化的信号。本文利用 Morlet 小波对近 54 a 内蒙古自治区西部沙尘暴时间序列的周期性进行分析,其实部等值线图可以反映时间序列不同时间尺度的周期变化及其在时间域中的

分布。为了更直观的判断时间序列的主要周期(即长、短周期)还需进行小波方差检验,其值可以反映时间序列的波动能量随时间尺度的分布情况。

1.2.3 MK 检验 MK 检验,也叫无分布检验,是一种非参数检验方法。其优点是样本不需要遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰。

在时间序列 $X_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 随机独立的假定下,定义统计量:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (k=1, 2, 3, 4, \dots, n) \quad (2)$$

式中: $UF_1 = 0$; $E(S_k)$, $\text{var}(S_k)$ ——秩序列 S_k 的均值和方差,在时间序列 $X_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 相互独立,且有相同连续分布时,可由下式算出:

$$\left\{ \begin{array}{l} E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4} \\ \text{var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \end{array} \right\} \quad (k=2, 3, 4, \dots, n) \quad (3)$$

UF_i 为标准正态分布,它是按时间序列 X 顺序 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ 计算出的统计量序列,给定显著水平 α ,通过查表,如果 $|UF_i| > U_\alpha$,则表明序列存在明显的趋势变化。逆序重复上述过程,同时使 $UB_k = -UF_k (k=n, n-1, n-2, \dots, 1)$, $UB_1 = 0$ 。通过分析 UF_k 和 UB_k 曲线图可知,若 UF_k 的值大于 0,表明序列呈上升趋势,小于 0 则表明呈下降趋势。当它们超过临界值线时,表明上升或下降趋势显著。如果 UF_k 和 UB_k 出现的交点在临界线之间,那么交点对应的时刻便是突变开始的时间;超过临界线的范围则确定为出现突变的时间区域。MK 检验方法多用于发生突变时的分析,但由于 MK 检验方法不能用于多点突变的检查,因此当使用 MK 方法检测突变时,如果两条线的交叉点位于临界线以外,或检测出多次突变时,则需要用滑动 t 检验对突变点进一步确定。

1.2.4 滑动 t 检验 通过考察两组样本值差异是否显著来检验突变。其基本思想是把气候序列中两段子序列均值有无显著差异看作来自两个总体均值有无显著差异的问题来检验。对于具有 n 个样本量的时间序列 X ,设置一个基准点,基准点前后两段子序列 X_1, X_2 的样本分布为 n_1, n_2 , \bar{x}_1 和 \bar{x}_2 为两段子序列的平均值,方差分别为 S_1^2 和 S_2^2 ,则:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (4)$$

遵从自由度 $v = n_1 + n_2 - 2$ 的 t 分布。其中:

$$s = \sqrt{\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (5)$$

若 $|t_1| > t_{\alpha/2}$,则认为突变发生(α 为显著性水平)。

2 结果与分析

2.1 趋势特征分析

近 54 a 内蒙古自治区西部沙尘暴日数整体而言是呈下降趋势,根据沙尘暴天气发生频次以及其线性趋势,将沙尘暴日数变化趋势分为 3 个时期(图 2):高频期(1960—1975 年)、快速减少期(1976—1992 年)和低频期(1993—2013 年)。其中,在快速减少时期内:1976—1986 年的线性递减率为 0.76 d/a,1987—1992 年的线性递减率为 1.4 d/a;显然,沙尘暴日数在 1986 年前后发生了明显的突变现象。

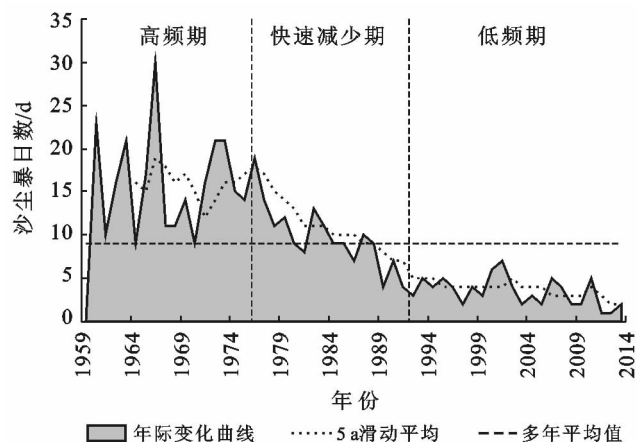


图 2 研究区年平均沙尘暴日数特征趋势线

2.2 周期性分析

内蒙古自治区西部年均沙尘暴日数的小波变换系数实部等值线如图 3 所示。图 3 中小波系数值越大,对应的沙尘暴日数就越多;小波系数值越小,对应的沙尘暴日数就越少;等值线中心对应的时间尺度就是沙尘暴的变化周期。内蒙古自治区西部年均沙尘暴日数主要存在 1~2 a, 3~6 a, 7~10 a, 11~17 a, 18~25 a, 26~32 a 这 6 个明显的周期变化规律。其中 26~32 a 周期尺度上小波变换系数实部等值线最密集,存在明显的高低值变化规律,这种变化规律表现具有稳定性、全域性特征。

内蒙古自治区西部沙尘暴日数时间序列的波动能量随尺度变化过程中,存在 1.5, 5, 8, 13, 22, 31 a 这 6 个峰值(图 4)。综合小波变换系数实部等值线图与小波方差变化图可知在研究时段内,内蒙古自治区西部沙尘暴日数存在 31, 22 和 13 a 三个长周期和 5, 8 和 1.5 a 三个短周期。

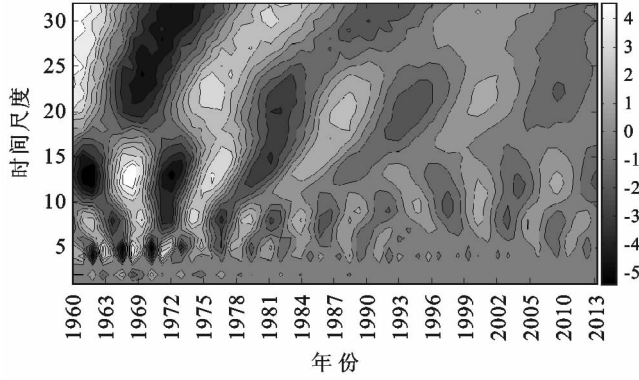


图 3 研究区沙尘暴日数的小波变换系数实部等值线图

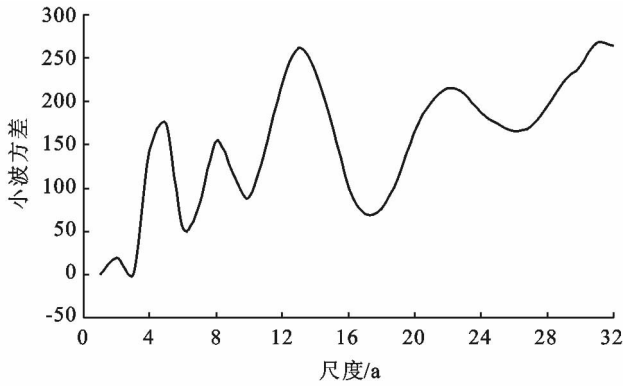


图 4 研究区沙尘暴日数的小波方差分析

2.3 突变检验

利用滑动 t 检验与 MK 检验相结合,同时对 1960—2013 年内蒙古自治区西部地区沙尘暴的年均日数进行突变检验,置信水平取 95%。根据沙尘暴日数滑动 t 检验统计量曲线(图 5—6)与沙尘暴日数 MK 检验统计量曲线图(图 7)可知,当滑动子序列长度 $n=7$ 时。

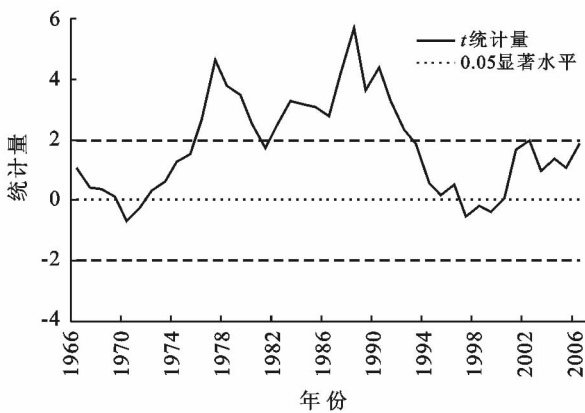


图 5 研究区沙尘暴日数滑动 t 检验统计量曲线 ($n=7$)

从图 5 中可大致判断突变发生的时段有 1976—1980 年、1982—1992 年;当滑动子序列长度 $n=5$ 时,

从图 6 中可大致判断突变发生的时段有 1971—1972 年、1975—1979 年、1986—1990 年;在 MK 检验统计量曲线图(图 7)中,年均沙尘暴日数的正序列曲线 UF,在 1977 年后呈现出下降的趋势,其中在 1983 年超过临界线,表明下降的趋势更加明显。而 UF 与 UB 曲线在临界线外相交于 1986 年,符合滑动 t 检验判断的突变时间区域,也与趋势特征变化中的结果一致,所以该突变点是可信的。综上所述,内蒙古自治区西部近 54 a 沙尘暴日数在 1986 年左右发生了突变的现象。

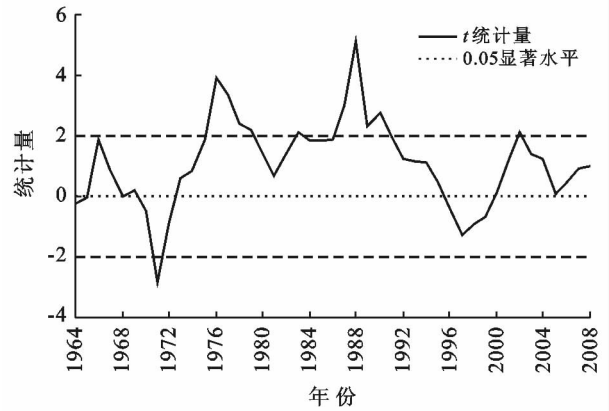


图 6 研究区沙尘暴日数滑动 t 检验统计量曲线 ($n=5$)

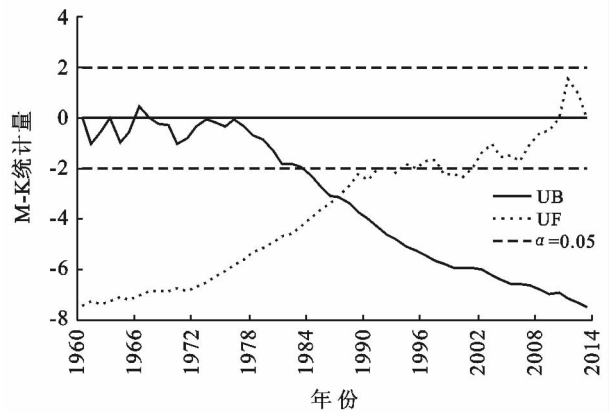


图 7 研究区沙尘暴日数 Mann-Kendall 检验统计量曲线

3 讨论

沙尘暴是由多种因素共同作用形成的,张冲^[4]等通过研究沙尘暴活动特点与气候因子的相关性,得出沙尘暴日数与降水量的发生呈负相关;刘景涛^[13]等指出内蒙古自治区在 20 世纪 60—70 年代属于干旱少雨时期,80—90 年代则相对比较湿润;李海英^[14]等研究指出冬季的气候因子和环流指数与内蒙古西部春季沙尘暴发生频数关系密切,在 60 年代初至 80 年代中期北半球的冷空气活动势力比较强,寒潮、大风

天气偏多,对应的春季沙尘暴发生频数就多,从 80 年代中期开始至 90 年代末冷空气活动势力减弱,对应的春季沙尘暴发生频数少;王勇、颜明^[15-16]等的研究结果也指出这种变化可能源于气候周期变化和全球变暖的双重影响,大风日数的减少削弱了沙尘暴发生的动力条件。钱正安^[17]指出内蒙古自治区西部在 20 世纪 60—70 年代迫于人口压力而过度开垦土地、过度放牧、地下水下降以及滥开矿的现象导致了沙尘暴天气多发;随着内蒙古自治区西部实施了退牧还草、三北防护林建设、京津风沙源治理等国家重大生态环境工程,使得内蒙古自治区西部的生态环境变好沙尘暴天气的发生频次也就有所减少;本研究得出的内蒙古自治区西部沙尘暴的变化特征与这些学者得出的特征表现一致,其存在的 5,8 和 1.5 a 三个短周期在 1986 年之前比较明显,31,22 和 13 a 三个长周期在 1986 年之后比较明显;沙尘暴在 20 世纪 60—70 年代发生频繁,80—90 年代明显下降,90 年代至 21 世纪是沙尘暴发生的低频期;沙尘暴的发生频次由短周期转变为长周期,这意味着内蒙古自治区西部整体的生态环境有所好转。王春学^[18]等通过研究指出近 40 a 我国北方春季沙尘暴存在年代际尺度的准 18 a 周期;王式功^[19]等指出我国沙尘暴日数的变化存在着 6.7 a 的周期;孙然好^[10]等指出河西走廊沙尘暴存在 7,13 和 23 a 左右的周期变化;李红军^[8]等分析指出新疆沙尘暴存在准 3 a 周期变化;郭慧^[20]等分析指出甘肃省的沙尘暴存在 3~6 a 的周期变化;郭晓宁^[21]等分析指出柴达木盆地春季沙尘暴存在 8 和 20 a 的周期变化;这些学者均指出沙尘暴日数的时间序列和大风日数时间序列具有一定的同步性,大风日数是影响沙尘暴周期性特征的重要因素。本文研究的时间尺度和研究区域均与这些学者不同,但本文所得出的长、短周期均与其相近。内蒙古自治区西部地貌类型复杂,沉积物组分差异明显,这种差异就使得其内部具有区域性特征;这种区域性特征的存在,造成内蒙古自治区西部沙尘暴的周期变化与其他区域不同,而其内部不同空间尺度的周期性特征对于整体的周期性的影响还需进一步探究。

4 结论

(1) 内蒙古自治区西部近 54 a 来沙尘暴日数,根据其变化特点可分为高频期(1960—1975 年)、快速衰减期(1976—1992 年)和低频期(1993—2013 年)。沙尘暴发生的频次分别为 17,9 和 4 d/a;发生频次的周期性存在 31,22 和 13 a 三个长周期和 5,8 和 1.5 a 三个短周期的波动变化。

(2) 1986 年前后沙尘暴发生频次出现了明显的突变现象。1976—1986 年的线性递减率为 0.76 d/a;1987—1992 年的线性递减率为 1.4 d/a。

[参 考 文 献]

- [1] 冯鑫媛,王式功,程一帆,等. 中国北方中西部沙尘暴气候特征[J]. 中国沙漠,2010,30(2):394-399.
- [2] Wang Haibing, Jia Xiaopeng, Li Kuan, et al. Horizontal wind erosion flux and potential dust emission in arid and semiarid regions of China: A major source area for East Asia dust storms[J]. *Catena*, 2015,133:373-384.
- [3] Wang Haibing, Jia Xiaopeng. Field observations of windblown sand and dust in the Takimakan Desert, NW China, and insights into modern dust sources[J]. *Land Degradation & Development*, 2013,24(4):323-333.
- [4] 张冲,赵景波. 我国西北近 50 年春季沙尘暴活动的变化与气候因子相关性研究[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(8):129-132.
- [5] 赵明瑞,闫大同,李岩瑛,等. 甘肃民勤 2001—2010 年沙尘暴变化特征及原因分析[J]. 中国沙漠,2013,33(4):1144-1149.
- [6] Xuan Jie, Liu Guoliang, Du Ke. Dust emission inventory in Northern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2000,34(26):4565-4570.
- [7] Xuan Jie, Sokolik I N. Characterization of sources and emission rates of mineral dust in Northern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2002,36(31):4863-4876.
- [8] 李红军,李军,何清. 新疆沙尘暴的趋势和突变研究[J]. 中国沙漠,2008,28(5):915-919.
- [9] 丁瑞强,王式功,尚可政,等. 近 45 年我国沙尘暴和扬沙天气变化趋势和突变分析[J]. 中国沙漠,2003,23(3):306-310.
- [10] 孙然好,刘清丽,陈利顶,等. 河西走廊沙尘暴及其影响因子的多尺度研究[J]. 中国沙漠,2010,30(3):649-653.
- [11] 王存忠,牛生杰,王兰宁,等. 50 年来中国沙尘暴的多时间尺度变化特征[J]. 大气科学学报,2009,32(4):507-512.
- [12] 万的军,穆桂金,雷加强,等. 塔里木盆地南缘近 54 年沙尘天气的变化特征及其未来趋势预测[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(9):78-74.
- [13] 刘景涛,郑明倩. 华北北部特强沙尘暴的气候特征[J]. 气象,1998,24(2):39-44.
- [14] 李海英,徐彦慧,高涛. 冬季环流特征对内蒙古中西部春季沙尘暴的影响及预测[J]. 内蒙古气象,2007(1):4-7.
- [15] 王勇,缪启龙,丁园圆. 西北地区春季沙尘暴的区域性时间变化特征[J]. 干旱区资源与环境,2008,11(22):30-37.

这与三板溪、洪江、碗米坡、凤滩、高滩等5座梯级水电站有关,这5座水电站皆在2004年前后投产发电,提高了沅水流域水资源的利用率,大大舒缓了沅水流域各乡镇在电力供应上的压力,同时也调节了径流,减小了部分水旱灾害的影响,使得流域内的社会经济持续健康发展。

4 结论

(1) 采用累计距平法等对沅水流域的径流、降水等序列的趋势进行分析,结合滑动 t 检验探讨了沅水流域水文要素的序列突变情况,发现桃源站的年径流量在波动中呈现下降的趋势,而浦市站和安江站的年径流量呈现上升趋势;3个水文站径流量均在1989和2004年发生显著突变,并据此将序列划分为基准期和变异期。

(2) 以1959—1988年作为基准期,以不考虑蒸散发为研究前提,对径流量变化在变异期受降水以及人类活动的影响程度进行定量评估。在变异期Ⅰ,沅水安江站上游,人类活动对径流量变化做出了主要贡献,其贡献率为60%;在沅水下游段流域内,径流量变化主要受降水因子的影响,其贡献率为74.3%;在变异期Ⅱ,沅水流域人类活动对径流量变化的影响都有不同程度的增加,流域下游受人类活动的影响贡献率的增幅最大。

[参 考 文 献]

[1] 王国庆,张建云,刘九夫,等.气候变化和人类活动对河川径流影响的定量分析[J].中国水利,2008(2):55-58.

[2] 刘春葵,占车生,夏军,等.关于气候变化与人类活动对径流影响研究的评述[J].水利学报,2014,45(4):379-385,393.

[3] 李峰平,章光新,董李勤.气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J].地理科学,2013,33(4):457-464.

[4] 文广超,王文科,段磊,等.青海柴达木盆地巴音河上游

径流量对气候变化和人类活动的响应[J].冰川冻土,2018,40(1):136-144.

- [5] 冯畅,毛德华,周慧,等.气候与土地利用变化对涟水流域径流的影响[J].冰川冻土,2017,39(2):395-406.
- [6] 王彦君,王随继,苏腾.降水和人类活动对松花江径流量变化的贡献率[J].自然资源学报,2015,30(2):304-314.
- [7] 邱玲花,彭定志,林荷娟,等.气候变化与人类活动对太湖西苕溪流域水文水资源影响甄别[J].水文,2015,35(1):45-50.
- [8] 刘克岩,张轸,张光辉,等.人类活动对华北白洋淀流域径流影响的识别研究[J].水文,2007,27(6):6-10.
- [9] 罗平玖.沅水干流安江水文站年径流变化特征及趋势分析[J].湖南水利水电,2015(1):76-78.
- [10] 王顺强,胡国华.沅水流域径流演变规律研究[J].湖南水利水电,2010(1):23-26.
- [11] 吴作平.沅水流域径流周期性规律分析[J].水电能源科学,2009,27(4):16-18.
- [12] 刘培亮,毛德华,周慧,等.1990—2013年湖南四水入洞庭湖汛期径流量的变化规律[J].水资源保护,2015,31(4):52-61.
- [13] 雷红富,谢平,陈广才,等.水文序列变异点检验方法的性能比较分析[J].水电能源科学,2007,25(4):36-40.
- [14] 周园园,师长兴,范小黎,等.国内水文序列变异点分析方法及在各流域应用研究进展[J].地理科学进展,2011,30(11):1361-1369.
- [15] 王随继,闫云霞,颜明,等.皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析:累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J].地理学报,2012,67(3):388-397.
- [16] 王彦君,王随继,苏腾.1955—2010年松花江流域不同区段径流量变化影响因素定量评估[J].地理科学进展,2014,33(1):65-75.
- [17] 李凌程,张利平,夏军,等.气候波动和人类活动对南水北调中线工程典型流域径流影响的定量评估[J].气候变化研究进展,2014,10(2):118-126.
- [18] 胡彩虹,王艺璇,管新建,等.基于双累积曲线法的径流变化成因分析[J].水资源研究,2012,1(4):204-210.

(上接第21页)

[16] 颜明,王彩侠,王随继,等.1958—2007年黄土高原沙尘暴和降雨的时空变化研究[J].中国沙漠,2013,33(3):850-856.

[17] 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.

[18] 王春学,秦宇生.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.

- [19] 王式功,董光荣,杨德保,等.中国北方地区沙尘暴变化趋势初探[J].自然灾害学报,1996,5(2):86-94.
- [20] 郭慧,王式功,李栋梁,等.甘肃春季沙尘暴环流特征及其时间尺度诊断分析[J].中国沙漠,2004,24(5):593-598.
- [21] 郭晓宁,杨延华,马元仓,等.柴达木盆地春季沙尘暴变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2018,32(8):107-113.