

DOI: 10.3969/j.issn.1004-7328.2022.05.024

基于小波分析的德州市降水分析与预测

潘立云, 王玉珏

(德州市水文中心, 山东 德州 253016)

摘要:利用小波分析法对德州市5个雨量站的时间序列(1961—2016年)的降水资料进行了分析,详细描述了研究区降水变化特征。主要研究结果如下:①在56 a的研究期间,年均降水量呈现非线性趋势变化,主要为下降趋势;②年均降水呈现出较强的周期特征,在15 a的时间尺度上最为明显;③在0.05的置信水平上对德州市降水进行M-K检验,表明德州市年均降水量的下降趋势是显著的。通过对德州市降水周期的判断以及显著性检验,可以最大限度地预测未来降水变化,降低降水对城市造成的不利影响。

关键词:气候变化;小波分析;Mann-Kendall检验;德州

中图分类号:TV121⁺.1

文献标识码:A

文章编号:1004-7328(2022)05-0086-04

Precipitation Analysis and Prediction in Dezhou City based on Wavelet Analysis

PAN li-yun, WANG Yu-jue

(Dezhou Hydrological Center, Dezhou 253016, China)

Abstract: In this paper, the precipitation data in the time series (from 1961 to 2016) of 5 meteorological stations in Dezhou City are analyzed through wavelet analysis, and the characteristics of precipitation change in the study area are described in detail. The main results are as follows: 1) during the 56-year study period, the average annual precipitation presents a nonlinear trend, mainly a downward trend; 2) the annual precipitation in Dezhou City shows a strong periodic feature, which is most obvious in the time scale of 15 years; 3) the M-K test of precipitation in Dezhou City is carried out at the confidence level of 0.05, indicating that the downward trend of annual precipitation in Dezhou City is significant. Through the judgment and significant test of the precipitation cycle in Dezhou City, the future precipitation change can be predicted to the maximum extent and the adverse effects of precipitation on the city can be reduced.

Key words: climate change; wavelet analysis; Mann-Kendall test; Dezhou City

随着经济快速发展,国内极端气候也频繁发生,主要表现为局部地区气温上升、降水量增加,高海拔地区冰川融化加速,导致河流径流增加以及湖泊水位上升面积扩大等^[1-3]。这些大规模气候变化引起了中国气候研究界的广泛关注^[4-6]。一个世纪以来的这些温度和湿度变化是否是全球气候变暖的结果已经成为一个重要的研究课题。

气候因子作为典型的区域变量,被用来揭示行星风带和气压带的大尺度空间分带分布^[7]。具有这些因素的研究通常存在重大的空间不确定性,它们受到自然条件和较小尺度的人类活动的影响,例如地形和地貌。在国内和国外进行的许多案例研究表明,区域气候是一个巨大而复杂的系

统,很难准确预测极端气候的发生。因此,为了揭示区域气候过程的复杂性,必须考虑多个时空尺度,并且必须研究不同的方法。本文以德州市5个雨量站1961—2016年的时间序列数据为基础,以年均降水量为研究指标,通过小波分析来说明降水量在不同时间尺度上的变化趋势。然后,运用Mann-Kendall(以下简称M-K)检验法,来检验这种趋势的显著性。

1 材料和方法

1.1 研究区域和数据来源

德州市位于山东省境内,属大陆性季风气候区,地处半湿润半干旱地区,年平均降雨量为571.3 mm。降水年际变化甚大,1964年降水量最多为1049.8 mm,1968年降水量最少为302.4 mm。因此,本文以德州市为研究对象对其气候变化以及多年降水变化进行

收稿日期:2022-07-18

作者简介:潘立云(1976—),女,工程师,主要从事水文水资源管理工作。

分析。为全面分析德州市气候变化及降水变化,选择德州市5个雨量站逐月降水资料,详见表1。数据来自中国气象数据网,因此可以确保数据的准确性和精确性。

表1 选用雨量站相关信息

站名	区站号	所属省份	经度/(°)	纬度/(°)	海拔高度/m
武城	54709	山东	116.04	37.13	25.7
临邑	54712	山东	116.49	37.12	18.5
德州	54714	山东	116.20	37.27	12.6
陵县	54715	山东	116.34	37.19	18.6
宁津	54716	山东	116.48	37.4	16.3

1.2 研究方法

1.2.1 小波分析

小波分析是一种分析信号时间尺度的多分辨率分析方法,可以有效分析径流和气候变化过程的周期性。本文的主要研究内容是基于小波分析研究不同时间尺度上的非线性趋势。

小波分解和重构的原理如下。考虑时间序列 $X(t)$,如温度、降水量、湿度等,可建立父小波和母小波的投影序列,有 $k\{k=1,2,\dots,N\}$ 和 $s\{s=2^j,j=1,2,\dots,J\}$, N 为自然数。

展开式中的系数由下式给出:

$$s_{J,k} = \int X(t)\Phi_{J,k}(t)dt \quad (1)$$

$$d_{J,k} = \int X(t)\Psi_{j,k}(t)dt \quad (j=1,2,\dots,J) \quad (2)$$

式中: J 为数据点数量可持续的最大尺度; $\Phi_{J,k} = 2^{-j/2}\Phi[(t-2^j k)/2^j]$ 为父小波; $\Psi_{j,k} = 2^{-j/2}\Psi[(t-2^j k)/2^j]$ 为母小波。通常,父小波用于最低频率的平滑分量,这需要具有最广泛支持的小波;母小波用于较高频率的细节分量。

信号 $X(t)$ 的表示可以由以下公式给出:

$$X(t) = S_J + D_J + D_{J-1} + \dots + D_j + \dots + D_1 \quad (3)$$

其中:

$$S_J = \sum_k S_{J,k}\Phi_{J,k}(t) \quad (4)$$

$$D_j = \sum_k d_{j,k}\Phi_{j,k}(t) \quad (j=1,2,\dots,J)$$

通常情况下,则:

$$S_{j-1} = S_j + D_j \quad (5)$$

其中, $\{S_j, S_{j-1}, \dots, S_1\}$ 是函数 $X(t)$ 在不断增加的细化水平上的多分辨率近似序列。

使用Symmlet作为基小波,对多个尺度函数进行了试验,以确定最适合该数据集的小波。结果发现,“Sym8”产生了最稳健的定性结果。因此,本文

使用“Sym8”来近似模拟气候演变过程的趋势。

1.2.2 回归分析

尽管区域气候是一个庞大而复杂的系统,仍然可以建立湿度、温度和降水量的统计关系。为了简化计算,本文还根据各时间尺度的小波分析结果,进行了回归分析,以检验降水的影响趋势。

1.2.3 M-K检验

M-K检验法是一种非参数统计检验方法,通常用于检验时间序列数据中时间趋势的显著性。M-K检验法的特点是不需要预先假设数据样本的统计分布。

M-K统计检验的统计值 Z_c 表示为:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (6)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sgn}(x_k - x_i) \quad (7)$$

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & (\theta > 0) \\ 0 & (\theta = 0) \\ -1 & (\theta < 0) \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (9)$$

式中: x_k 和 x_i 为顺序数据值; n 为数据的长度。

测量趋势的指标即倾斜度表示如下:

$$\beta = \frac{x_i - x_j}{i - j} \quad (1 < j < i < n) \quad (10)$$

式中: β 表示上升趋势; $-\beta$ 表示下降趋势。

M-K检验法可按以下方式使用:对于 $H_0=0, \beta=0$ 的假设,若 $|Z_c| > Z_{(1-\alpha)/2}$ 则拒绝零假设;其中, $Z_{(1-\alpha)/2}$ 为标准正态方差, α 为检验的显著性水平。

2 结果与讨论

2.1 年降水量变化特征

由图1可以看出,研究区1961—2016年降水整体分为3个明显的下降阶段,分别为1961—1968、1976—1990和1994—2008年;同时,有3个明显的上升阶段,分别为1969—1975、1991—1993和2009

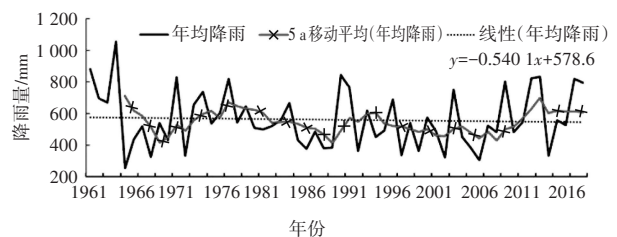


图1 德州市年均降水变化规律

—2012年,在2012年以后降水波动幅度较大。研究区范围内降水最大超过1 000 mm,最低接近200 mm。

2.2 降水时空分布特征

研究区年均降水系列小波系数实部等高线,如图2所示。

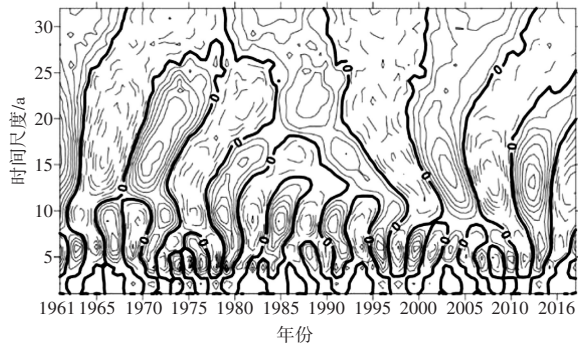


图2 小波系数等值线

图2能反映研究区的降水年周期和强度,实部小波系数为正,表示雨季,用实线表示;为负,表示旱季,用虚线表示;为0,表示降水均衡,用粗线表示。由图2可以看出,研究区降水量在15 a尺度上最为明显,有12个旱涝交替周期。1961—1963、1969—1974、1979—1984、1989—1995、2001—2006和2011—2016年间降水较大;1963—1969、1974—1979、1984—1989、1995—2001、2006—2011年间降水较小。降水过程有一定的波动,但总体上1961—2016年的年径流以15 a周期为主。

以上分析表明,研究区降水具有约15 a的周期性变化,可以反映研究区降水变化特征及其演变趋势。

为了确定每个站的主要周期即降水序列的主要功能,计算研究区的方差,结果如图3所示。

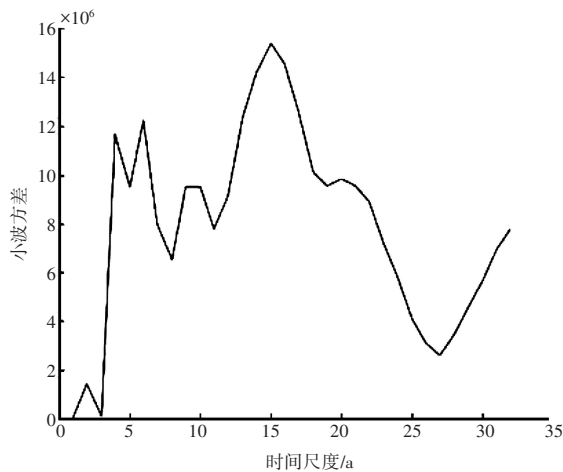


图3 小波方差

由图3可以看出,研究区降水具有多个时间尺

度特征,共有5个峰值,对应15、6、4、10和20 a振荡周期,其中15 a时间尺度小波方差最为明显,表明第一主周期为15 a,2~5个周期存在一定差异,对应Morlet小波系数真实等值线图,确定了研究区年均降水在整个时域内的变化特征。

2.3 年均降水M-K检验结果

采用M-K方法对研究区域5个雨量站1961—2016年的年平均降水变化的显著性进行了检验。结果表明,整个流域的年平均降水显著下降,在0.05置信水平下,年平均降水变化为0.540 1 mm。研究区域大部分地区的年增长幅度为负。临邑的年降低幅度最大,其次是德州、陵县和宁津,武城的变化幅度较为温和。

表2 年均降水趋势的M-K检验

站名	趋势(β)	Z_c	$Z_{(1-\alpha)/2}$	显著性检验($\alpha=0.05$)
武城	0.000 0	-0.266 6	502.89	显著
临邑	-1.063 4	-3.617 4	936.62	显著
德州	-0.806 3	-3.261 9	553.11	显著
陵县	-0.737 5	-2.186 5	1 141	显著
宁津	-0.635	-1.146 6	3 411.4	显著

3 结语

小波分析和M-K检验的分析结果为研究区1961—2016年的区域气候变化提供了一些依据。由上述分析结果可知,1961—2016年研究区降水的年际变化以多雨—少雨—多雨—少雨—多雨交替为主,总体呈下降趋势;1961—2016年期间,研究区的气候变化过程作为年平均降水量的时间序列数据,呈现出非线性趋势;在小波分析中,使用不同的时间尺度会导致不同的趋势变化,其中15 a周期最为明显;在0.05置信水平下,M-K非参数检验的结果表明,1961—2016年期间年平均降水的上升趋势显著,也就是说,由年平均降水上升所暗示的变暖趋势是显著的。降水周期的预测是未来研究的一个重要方向,通过对某一局部区域未来降水预测,可以减少降雨事件的不确定性,降低降雨对研究区的不利影响。

参考文献

[1] 秦国帅,刘建卫,许士国,等. 太子河流域降水及早涝时空演变特征分析[J]. 中国农村水利水电,2019(8):76-82.
 [2] 黄晚华,杨晓光,李茂松,等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近58 a演变特征[J]. 农业工程学报,2010,26(7):50-59.
 [3] 宋晓猛,张建云,孔凡哲,等. 北京地区降水极值时空演变特征[J]. 水科学进展,2017,28(2):161-173.

(下转第96页)

渠以下或田间。

5.4 加强水沙运行调度,采取大流量引水

灌区引水主要取决于农作物干旱程度和黄河来水量,应根据当地气候、作物种类等,制定合理引水计划,统一管理,集中灌溉,采取大流量引水,急引急停,保证渠内引水量不小于干渠设计流量的60%。当灌区用水紧张、黄河来水量小时,可采用上、中、下游分期供水、轮流灌溉的方法,防止支渠闸开关不一,渠内小水长流。尽可能做到轮灌段的支渠引水量等于干渠总引水量,不使“余”水流到下游,造成下游淤积。建立长效机制,节约用水,加强节水灌溉,提高灌溉水利用系数,减少引用水量,从而减少引沙量,促进灌区高质量发展。

为了减少泥沙危害,针对灌溉实际现状,簸箕李灌区2015年提出改“以挖待沉”的集中处理方式分散处理方式。通过加强水沙运行调度,提高水流挟沙能力,把大量泥沙输送到下游的渠系田间,灌区下游无棣县濒临渤海,低洼地、盐碱地较多,输送去的泥沙可以填平洼地,改良土壤。经过近几年的运行调度,效果良好,灌区上游干渠泥沙淤积相对减少,实现了远距离输沙到灌区下游及斗渠田间,达到了分散处理目的。

6 结语

引黄必引沙,随着引黄灌区累计引水量增多,引进的泥沙已对灌区构成了一定程度的负面影响。为减少沙害,加强了灌区水沙监测,分析研究灌区水沙输移规律。灌区引水引沙受黄河来水来沙情况影响较大,影响条渠内水沙运行的因素也较多:①引水泥沙随季节不同变化较大,簸箕李灌区条渠的输沙率为夏秋灌最大、春灌最小;②条渠上淤积的泥沙并不完全按固定比例来淤积,单位泥沙量流经条渠时泥沙淤积比为冬灌最大、夏秋灌最少;③引入条渠内的泥沙量自上而下呈逐步递减趋势,即条渠起到了拦沙作用,并存在一定函数关系;④在引水周期的起始,泥沙淤积多表现为溯源性淤积,随着淤积量增多,溯源性逐步消失,时常会出现渠底冲刷现象。经

(上接第88页)

[4] 王枫,武玉龙,王大旺,等. 1961-2014年北疆地区降水时间演变特征分析[J]. 农业灾害研究,2019,9(6):27-32.

[5] 张东艳,吴运卿,李妮. 基于Mann-Kendall检验的尼洋河流域水文变量演变趋势分析[J]. 中国农村水利水电,2017(12):86-89.

分析,簸箕李引黄灌区泥沙淤积主要是由于入渠泥沙偏多偏粗、渠道设计参数取值不合理、流量流速偏小、支渠引水不合理造成的。根据分析研究成果,提出了合理解决对策措施,减少入渠泥沙,合理修整渠道,改造支渠口,加强水沙运行调度,采取大流量引水等,经过近几年运行调度,取得了满意效果。

参考文献

[1] 岳中明. 勇担新使命 奋进新征程 勠力同心建设造福人民的幸福河[J]. 中国水利,2020(24):49-50.

[2] 史红玲,胡春宏,王延贵. 黄河下游引黄灌区水沙配置能力指标研究[J]. 泥沙研究,2019,44(1):1-7.

[3] 王延贵,万育生,刘峡. 引黄供水灌溉模式的特点及其应用前景[J]. 泥沙研究,2002,47(5):43-47.

[4] 王延贵,李希霞. 典型引黄灌区水沙分布及其特点[J]. 泥沙研究,1997(2):42-46.

[5] 中国水利学会泥沙专业委员会. 泥沙手册[M]. 北京:中国环境科学出版社,1992.

[6] 刘明潇,王鹏涛,孙东坡,等. 颗粒非均匀性对推移质输移影响的试验研究[J]. 泥沙研究,2014(6):30-35.

[7] 王延贵,李希霞,王冰伟. 典型引黄灌区泥沙运动及泥沙淤积成因[J]. 水利学报,1997(7):14-19,37.

[8] 赵琳琳,马太玲,于健,等. 引黄灌区侧向取水口泥沙淤积和入渠特性[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(8):685-690.

[9] 胡健,孙蓬蓬,戴清,等. 小浪底水库运用对下游引黄灌区的影响[J]. 节水灌溉,2010(3):26-29.

[10] 姜秀芳,潘丽. 人民胜利渠泥沙处理与资源利用途径[J]. 人民黄河,2012,34(8):39-40.

[11] 戴清,王景元,曹文洪,等. 小开河灌区水沙分布及泥沙长距离输送机理研究[J]. 泥沙研究,2010(4):45-50.

[12] 蒋如琴,曹文洪. 引黄灌区泥沙研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.

[13] 王延贵,胡春宏,周宗军. 引黄灌区泥沙远距离分散配置模式及其评价指标[J]. 水利学报,2010,41(7):764-770.

[14] 卞玉山,马承新,隋家明,等. 小浪底水库对山东引黄灌区泥沙淤积的影响及治理[J]. 水利水电科技进展,2002(6):8-11,64.

[15] 费祥俊. 远距离输沙渠道设计原理与方法[J]. 人民黄河,1999(11):17-20,46.

[6] 石教智,陈晓宏,吴甜. 东江流域降雨径流变化趋势及其原因分析[J]. 水电能源科学,2005(5):8-10,5.

[7] 刘海涛,张向军,李绣东,等. 和田河流域1954-2007年气温及降水气候特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2009,3(4):26-30.