

# 基于统计方法对我国温带季风区气候变化的分析

——以昌乐地区为例

程 臻

中央财经大学, 北京  
Email: jrsf12381238@163.com

收稿日期: 2020年11月29日; 录用日期: 2020年12月22日; 发布日期: 2020年12月31日

## 摘 要

以昌乐地区为例, 尝试总结小范围温带季风区气候的气温、降水变化规律, 并简要预测其变动趋势。文中选取了1961~2019年山东省昌乐县的气温与降水数据, 分别利用线性趋势估计、小波分析、R/S分析计算Hurst特征值的方法对气象指标进行分析。通过研究, 发现昌乐地区已经对于全球气候变暖做出了响应。气温方面, 表现为年均温显著上升, 年际最低温大幅上升, 候温划分法下的季节长度产生变动, 冬季明显缩短, 夏季时长进一步增加。降水方面, 年均降水和汛期、非汛期降水变动较为稳定, 保持着以27a为主要周期的波动规律, 但汛期的降水集中期显著后移。

## 关键词

温带季风区, 气候变化, 分析

# Analysis of Climate Change in China's Temperate Monsoon Region Based on Statistical Methods

—A Case Study of Changle Region

Zhen Cheng

Central University of Finance and Economics, Beijing  
Email: jrsf12381238@163.com

Received: Nov. 29<sup>th</sup>, 2020; accepted: Dec. 22<sup>nd</sup>, 2020; published: Dec. 31<sup>st</sup>, 2020

## Abstract

With the increasingly severe situation of global warming, the climate in various regions of the world responds to the warming and presents different change characteristics. Taking Changle region as an example, this paper attempts to summarize the climate change rules of temperature and precipitation in a small range of temperate monsoon regions, and to predict the change trend. In this paper, the temperature and precipitation data of Changle region from 1961 to 2019 were selected, and the meteorological indicators were analyzed by using linear trend estimation, wavelet analysis and R/S analysis to calculate the characteristic value of Hurst. The study found that Changle region has made response to global warming. In terms of temperature, the annual average temperature and the lowest annual temperature increased significantly, the length of the season under the method of temperature division changed, the winter was significantly shortened, and the length of the summer was further increased. In terms of precipitation, the annual average precipitation and precipitation in flood season and non-flood season are relatively stable, maintaining the fluctuation rule with 27a as the main period, but the precipitation concentration period in flood season is significantly backward.

## Keywords

Temperate Monsoon Region, Climate Change, Analysis

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近百年来,全球气候变暖这一情况毋庸置疑,已成为了学界与政府重点关注的要点问题。按照 IPCC 全球第五次气候评估报告,从 1880 到 2012 年,全球平均温度升高近 0.85 摄氏度[1]。若气候变化趋势不能得到遏制,全球气温将在 2060 年代到达暖期阈值[2]。气候变暖的直接后果是引起极端天气频发,而极端天气表现了全球热量平衡的改变,又进一步引起了全球各地区气温与降水的异常,进而给各地的农业生产、社会经济活动带来负面影响[3] [4]。由于我国幅员辽阔,各个地区地形地貌、经纬差异极大,往往对全球变暖做出差别显著的不同响应,这也就使得根据不同地区的地理、气候特征分别分析其影响成为必要。王伟对青岛气温异常与全球海表温度异常进行分析,发现青岛地区表现出的气候异常不仅仅局限于厄尔尼诺地区,而受全球海表温度升高的影响[5]。李燕以广西岩溶生态区域为研究重点,描述了气候变暖对岩溶植被分布的影响[6]。吴楚樵分析了近几十年来江淮流域梅雨气候对全球变暖的响应,发现气候变暖明显增强了降水的空间分布非均匀性[7]。王欢、李栋梁研究了全球海温升高对中国东部夏季降水的影响,指出全球变暖使得中国东部低层北风异常,水汽在长江流域辐合,将导致长江流域降水增多,更易引发洪涝灾害[8]。Pritha Datta 等利用 MK 检验分析了印度西孟加拉邦的长期降水变化,发现喜马拉雅山以南地区和西部地区的年降水量正在减少,沿海地区的降水趋势却显著增加,这种趋势变化的复杂性增强了该区域面对干旱时的脆弱性[9]。可见各地区的气候变化趋势既有一致性,也表现出了明显的特异性与复杂性。尽管全球在总体上呈现出“气温升高,降水失衡”的气候大格局,但局域气候系统如何变化不可一概而论,需要结合当地以往的气候特征进行精确分析。作为中国华东地区的沿海大省,山东

省位于中国东部沿海,其纬度位置处于  $34^{\circ}22.9'N$  到  $38^{\circ}24.01'N$  之间,表现出了典型的温带大陆性季风性气候特征。一方面,山东省地处受全球气候变暖影响较大的地理位置,另一方面,山东又有着中国最高的耕地率,农业增加值长期稳居中国各省第一位,是中国的农业大省,省内广泛栽种了小麦、玉米、大豆等极易受气候变化影响的重要作物。因而,基于全球气候变暖的大背景下,对山东的年均温、年最低气温、年最高气温和年降水量、年降水日数进行分析,以得出各气象因素的年际线性变化、周期变化与日后变化趋势便尤为重要。本文试以山东省昌乐县的数据为例,结合线性趋势估计、小波分析、R/S 分析等统计方法探究我国华东地区如何对全球气候变化做出响应,为研究未来气候变化提供一定参考,亦为当地切实优化小范围的气象预报精度提供依据。

## 2. 主要研究方法

### 2.1. 线性趋势估计

建立一元线性回归方程,使用  $x_i$  表示某一样本量为  $n$  的气候变量,  $t_i$  表示所对应的时刻,有:

$$x_i = a + bt_i, i = 1, 2, \dots, n$$

其中  $a$  为回归常数,  $b$  为回归系数,均值可用最小二乘法估计,即

$$\begin{cases} \hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i t_i - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \left( \sum_{i=1}^n t_i \right)}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n t_i \right)^2} \\ \hat{a} = \bar{x} - \hat{b} \bar{t}, \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \end{cases}$$

对于线性回归的分析结果,重点分析内容为回归系数  $b$  和相关系数  $r$ 。回归系数  $b$  的符号反应了气候变量的倾向趋势,相关系数  $r$  表示变量  $x_i$  与时间  $t_i$  间的相关系数,反映了变量  $x$  与时间  $t$  之间线性相关的密切程度[10][11]。

### 2.2. 小波分析

小波分析通过选择一个适合的母波进行单位步长平移和二进制伸缩,形成“子波”,进而使用母波和子波的线性组合表示其他函数。由于小波分析基于仿射群的不变性,即伸缩和平移的不变性,故而在时间域和频率域同时拥有良好的局部化性质[12][13]。

本文采选取 Morlet 连续复小波函数以进行数据分析,其小波函数形式为  $\varphi(x) = e^{ik\varphi x} e^{-|x|^2/2}$ 。

### 2.3. R/S 分析

R/S 分析方法的基本原理为变更样本序列的时间尺度,分析各尺度范围内样本序列呈现出的统计规律,并利用 Hurst 指数判断时间序列的状态持续性和统计相关性[14][15]。

考量一个随机过程样本序列,若对于其时间序列  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 存在关系  $\frac{R(\tau)}{S(\tau)} = \left(\frac{\tau}{2}\right)^H$ , 则说明该样本存在 Hurst 现象。式中,  $\tau$  为时间序列序数,  $R(\tau)$  为时间序列对应累积偏差的域,  $S(\tau)$  为对应着  $R(\tau)$  的标准偏差,  $R(\tau)/S(\tau)$  为重标极差。

记  $H$  为 Hurst 指数,其取值范围为  $(0,1)$  [16],可以在双对数坐标系中根据  $[\ln \tau, \ln(R/S)]$  的数值采用最小二乘法拟合进行计算。在  $H = 0.5$  时,时间序列表现为标准的随机游走形式,可以认为变量当前的

状态不会对将来产生影响。当  $0 < H < 0.5$  时, 时间序列是反持久性或逆状态逆持续性的。当  $0.5 < H < 1$  时, 时间序列是一个持久性的或趋势增强的序列, 存在状态持续性, 具体偏倚程度依赖于  $H$  值接近 1 的程度。

### 3. 研究区域气温特征变化分析

#### 3.1. 气温的线性趋势估计

##### 3.1.1. 年际气温平均值

选取 1961~2019 年平均气温计算各年气温距平值, 并进行线性拟合, 得到 1961~2019 年昌乐平均气温距平变化曲线, 如图 1 所示, 其相关系数  $r^2 = 0.4242$ , 通过了显著性水平  $\alpha = 0.001$  的显著性检验。

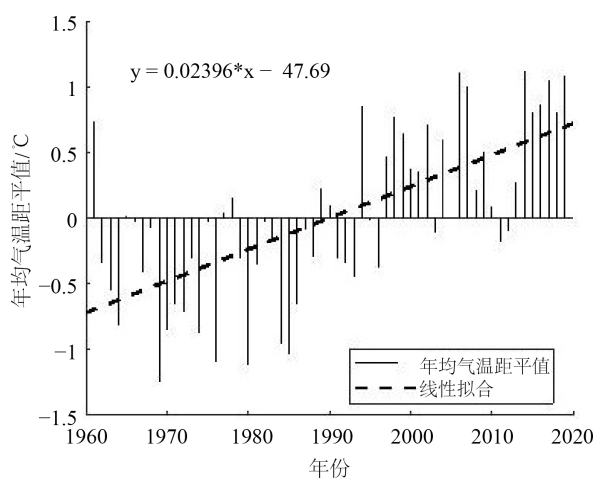


Figure 1. 1961-2019 average annual temperature anomaly in Changle region

图 1. 1961~2019 昌乐地区年均温距平

昌乐地区的年均气温在近 59a 来表现出明显的上涨倾向, 十年际的气候倾向值为  $0.23^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。在 1961~1993 期间共计 33 个数据中, 仅有 6 年表现出了正向气温距平值; 而在 1994~2019 年期间, 共有 20 个数据表现出正向气温距平, 较前 33a 年际平均气温升高了  $0.88^{\circ}\text{C}$ 。数据表明, 昌乐地区的气温升高自 1994 年来表现得日渐明显, 且在 2014~2019 年之间出现了持续的异常高温, 其距平值皆在  $[0.81, 1.12]^{\circ}\text{C}$  范围内, 并在 2014 年出现年均温最高值  $14.01^{\circ}\text{C}$ , 其气温距平为  $+1.12^{\circ}\text{C}$ 。近 6a 的年际平均气温较前 53a 提升了  $1.06^{\circ}\text{C}$ , 与 1994~2019 年间气温提升情况相比较, 可见气温升高幅度进一步扩大。

##### 3.1.2. 年际气温最值与高、低温天气日数

图 2 表现了 1961~2019 年间昌乐地区年最低气温与最高气温的距平值分布与变化, 进行线性拟合后, 最低气温距平值的相关系数  $r = 0.3779$ , 通过显著性水平  $\alpha = 0.01$  的显著性检验。最高气温距平值的相关系数  $r = 0.1503$ , 未通过显著性检验, 可见仅表现出了极其微弱的线性趋势。

图 2(a) 中, 昌乐地区的最低温在近 59a 来表现出较为鲜明的升高趋向, 最低气温的增长速率高达  $0.58^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。以 1991 年为分水岭, 可见 1991 年后昌乐地区最低气温距平基本表现为正向, 29a 中仅有 7a 呈现负距平, 最低气温平均值为  $-14.4^{\circ}\text{C}$ ; 1991 年前昌乐地区中 30a 则有 21a 表现出负向距平, 其最低气温平均值为  $-17.2^{\circ}\text{C}$ 。 $-19^{\circ}\text{C}$  以下极寒天气出现数亦从 6 降至 1。可认为昌乐地区在 1991 年后冬季低温受影响较大。

图 2(b) 中表现了昌乐地区最高气温近 59a 的变动, 可见其变化倾向极弱, 仅表现微弱的下降。

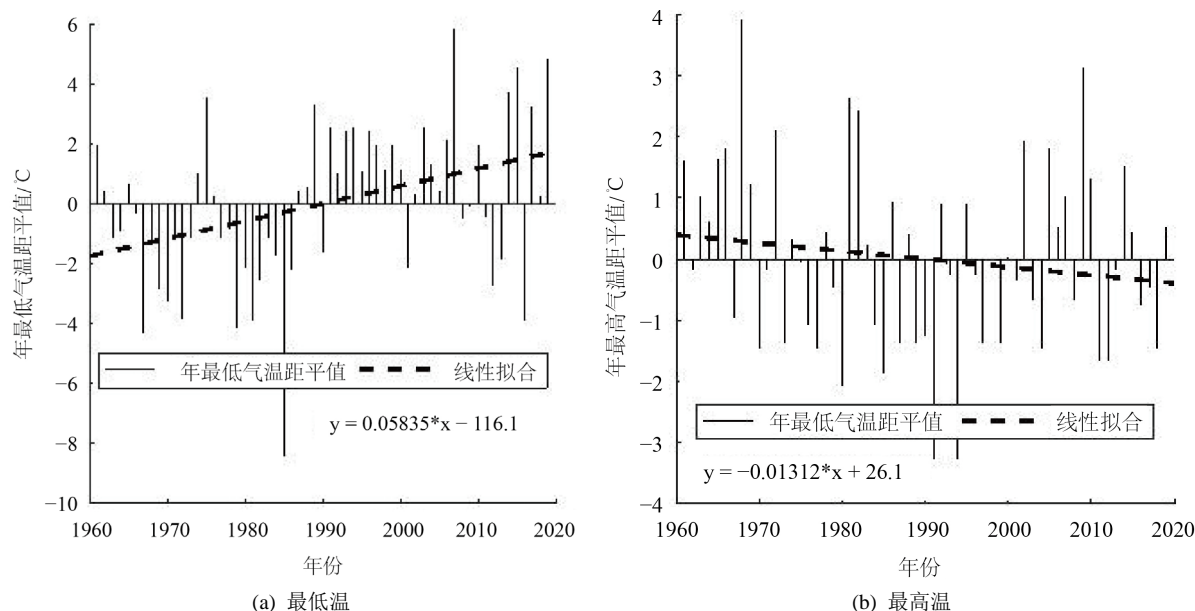


Figure 2. 1961-2019 extreme temperature anomaly in Changle region

图 2. 1961~2019 昌乐地区极端气温距平图

表 1 给出了 1961~2019 年间, 昌乐地区各项气温指标的气候倾向率, 可见昌乐地区气温变动更明显地体现在低温天气上, 高温天气的敏感性远低于低温天气。

Table 1. 1961-2019 climate trend rate of each temperature index in Changle region

表 1. 1961~2019 昌乐地区各气温指标气候倾向率

	年均温	年最低温	年最高温
气候倾向率/10a	0.23***	0.58**	-0.13

注: \*, \*\*, \*\*\*分别指在 0.05、0.01、0.001 水平上显著相关, 下同。

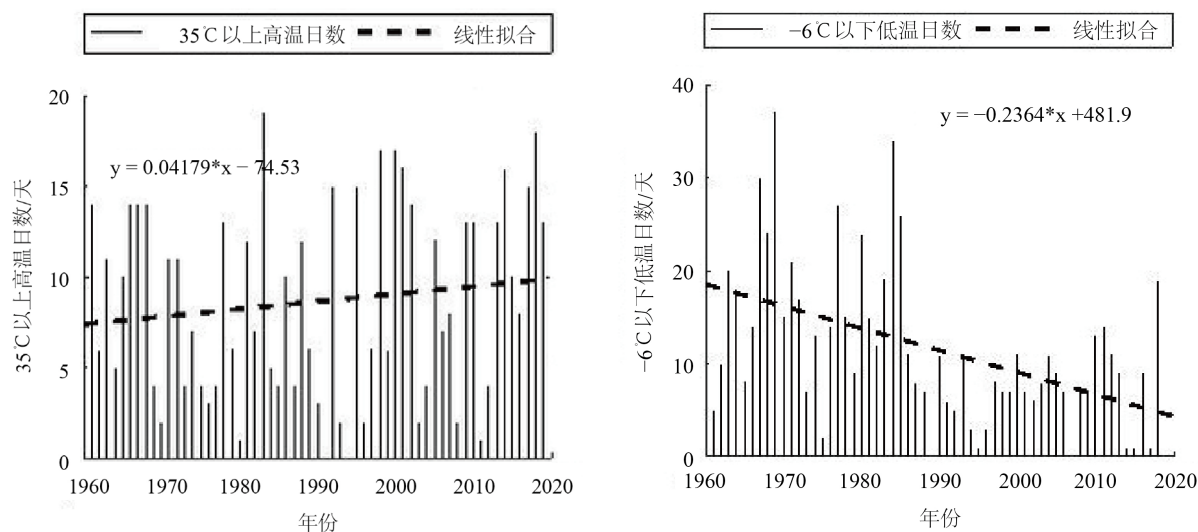
考虑到均温上升亦受较低与较高温天气日数影响, 本文以中国气象学划分的 $-6^{\circ}\text{C}$ 低温寒冷蓝色预警标准和 $35^{\circ}\text{C}$ 以上的高温黄色预警标准为依据, 计算了 1961~2019 年低温与高温日数变化。结果如图 3 与表 2 所示。

可见, 与气温最值一致, 在更宽的气温尺度上低温天气依然对全球变暖表现出了更明显的变动。其相关系数  $r = 0.4658$ , 通过了显著性水平  $\alpha = 0.001$  的显著性检验, 可以认为除最低气温升高以外, 低温天气日数整体的减少也是导致昌乐地区均温上升的重要原因。高温天气仅表现出了微小幅度的增长。

### 3.1.3. 以候温划分的四季变化

计每五天为一候, 以候平均气温作为区分季节指标的气温划分法, 称为候温划分法。

图 4 与表 3 给出了昌乐地区以候温为标准的四季长度变化。春季与秋季两个季节长度变化的相关系数分别为  $r_{\text{春}} = 0.2263$  与  $r_{\text{秋}} = 0.2680$ , 均未通过显著水平  $\alpha = 0.01$  下的显著性检验。夏季与冬季对气候变暖做出了更显著的响应, 10a 变化量皆在 3 d 以上, 且相关系数为  $r_{\text{夏}} = 0.3945$  与  $r_{\text{冬}} = 0.4265$  分别通过了显著性水平  $\alpha = 0.05$  与  $\alpha = 0.001$  的显著性检验。可见各季节受全球变暖影响的变化存在差异, 冬季敏感性最强, 夏季次之, 秋季、春季较弱。



**Figure 3.** 1961-2019 change region low temperature and high temperature days change chart

**图 3.** 1961~2019 昌乐地区高温与低温天气日数变化图

**Table 2.** 1961-2019 change rate of the number of days with low temperature and high temperature in Changle area

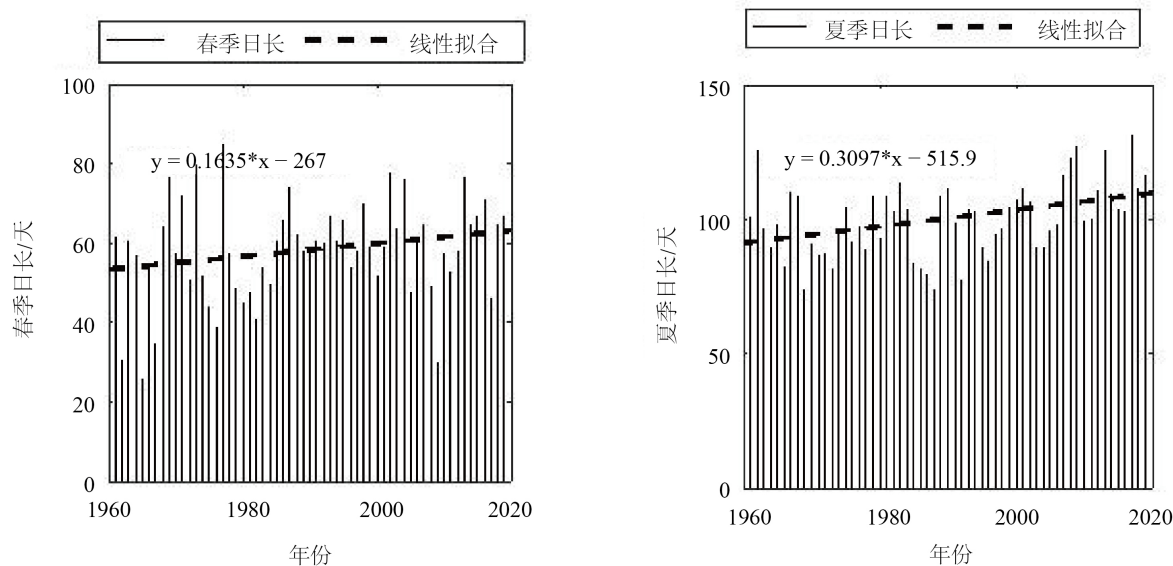
**表 2.** 1961~2019 昌乐地区低温与高温天气日数变化率

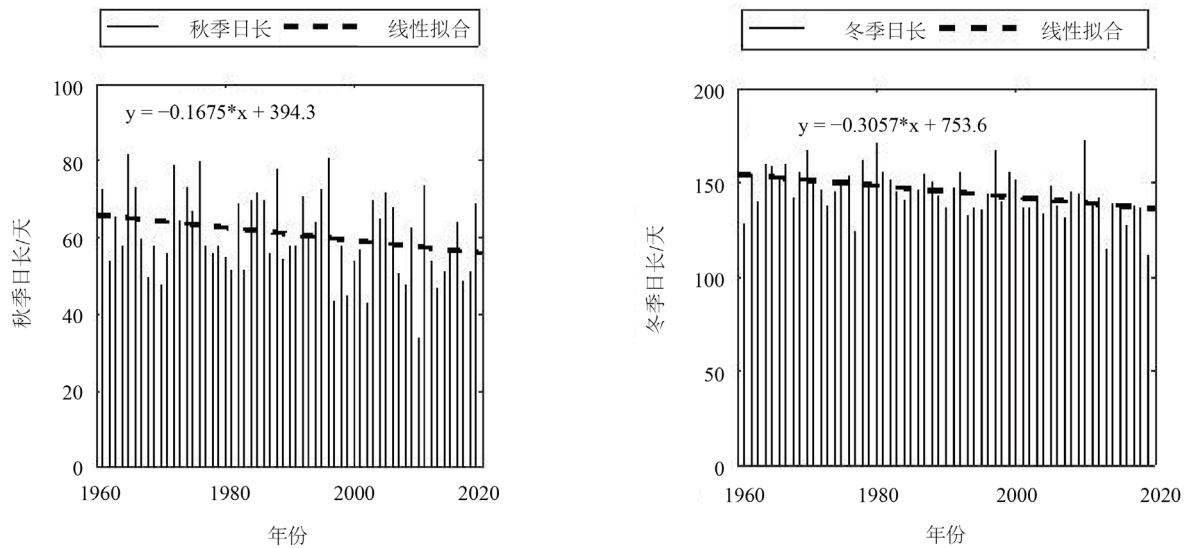
	低温天气	高温天气
日数变化率(d/10a)	-2.36***	0.42

**Table 3.** The change rate of the length of four seasons in Changle area under the method of temperature differentiation from 1961 to 2019

**表 3.** 1961~2019 昌乐地区候温划分法下的四季长度变化率

	春季	夏季	秋季	冬季
长度变化率(d/10a)	1.64	3.10**	-1.68	-3.06***



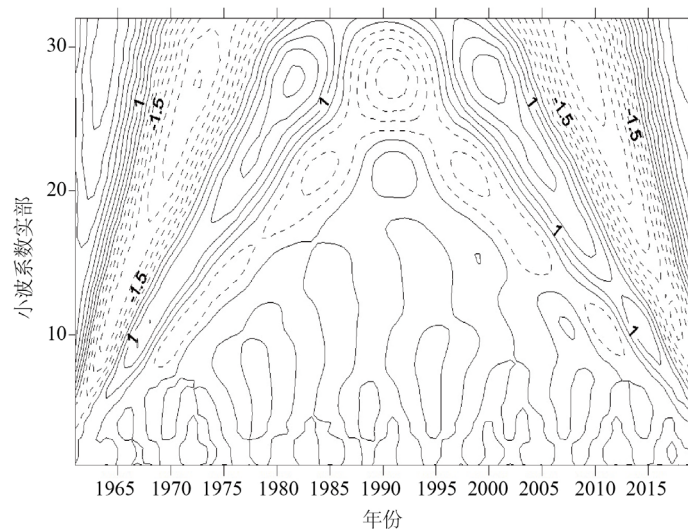


**Figure 4.** Seasonal length change map of Changle region under the method of temperature differentiation from 1961 to 2019  
**图 4.** 1961~2019 昌乐地区候温划分法下的四季长度变化图

### 3.2. 气温的小波分析

#### 3.2.1. 年际气温平均值

图 5 给出昌乐地域均温的 Morlet 小波变换结果，囊括实部等值线与模等值线。图 5(a)中可见，昌乐地区的气温变化过程中存在着 3~15a、10~18a、20~32a 三类尺度的周期变化。其中，20~32a 存在着低温 - 高温交替的准三次震荡，在 10~18a 存在准四次震荡。计算小波方差，时间尺度模值最大的周期在 20~32a 附近，说明了该尺度的周期变化最为明显，显著性远远高于其他时序尺度周期性。



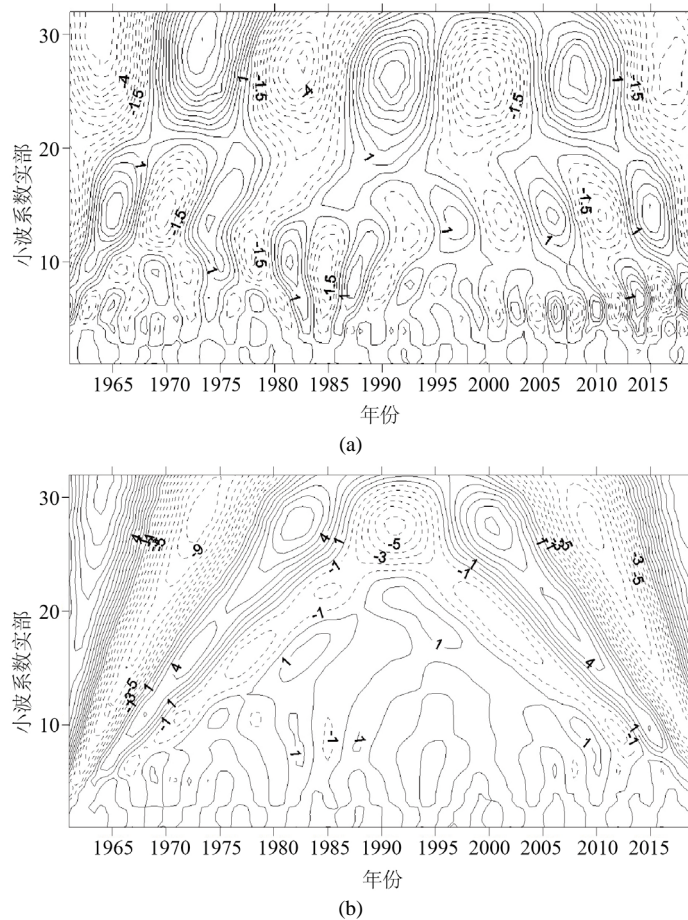
**Figure 5.** 1961-2019 real part contour of average annual temperature wavelet coefficient in Changle region

**图 5.** 1961~2019 昌乐地区年均温小波系数实部等值线

#### 3.2.2. 年际气温最值

图 6 展示了昌乐地区最低气温与最高气温的小波分析结果。由图 6(a)，可见昌乐地区的低温变化存

在 20~32a、10~20a 与 3~10a 三类尺度周期。其中，在 20~32a 尺度上共表现出了较低 - 较高的准三次震荡，在 10~20a 尺度，则表现出准六次震荡。同时，这两类尺度变化在整个周期中体现得较为稳固，具备一定水平的全域性。20~32a 时间尺度模值最大，具有较强的周期变化显著性，10~20a 时间尺度次之。根据图 7(b)，昌乐地区的高温变化存在 22~32a、13~20a、3~10a 三个较为明显的周期变化尺度。在 22~32a 尺度，存在着较低 - 较高交替的准三次震荡，在 10~18a 存在准四次震荡。其在 22~32a 周期的时间尺度上周期变化显著性较强。



**Figure 6.** 1961-2019 lowest temperature. (a) highest temperature; (b) real part contour line of wavelet coefficient

**图 6.** 1961~2019 昌乐地区最低温(a)、最高温(b)小波系数实部等值线

计算昌乐地域最低气温与最高气温的小波方差，可见研究地区低温小波方差呈现出两个较为明显的峰值，分别对应 6a 周期和 22a 周期，其中以 22a 周期最为明显。研究地区高温小波方差存在 10a、28a 两个较为显著的周期的结论，其中 28a 周期更显著。

### 3.3. 气温的 Hurst 指数分析

为了使用 Hurst 指数以预测接下来一段时间气温变动的趋势，利用 R/S 分形算法分析昌乐地区 1961~2019 年间年均气温、年最低气温、年最高气温的时间序列。表 4 给出 Hurst 指数计算结果如下。

昌乐地区年均温与年最低温皆介于区间(0.5, 0.65)之间，存在弱持续性，即气温在较弱程度上将继续过去持续升高的趋势。年最高温介于区间(0.35, 0.5)之间，属于弱反持续性，即最高气温与过去下降的趋



势相反, 存在上升的可能, 但由于 Hurst 指数数值非常接近 0.5, 可认为最高气温的变化存在一定随机性。

**Table 4.** 1961-2019 Hurst index of various temperature indexes in changle region

**表 4.** 1961~2019 昌乐地区各气温指标 Hurst 指数

	年均温	年最低温	年最高温
Hurst 指数	0.5786	0.5943	0.4887

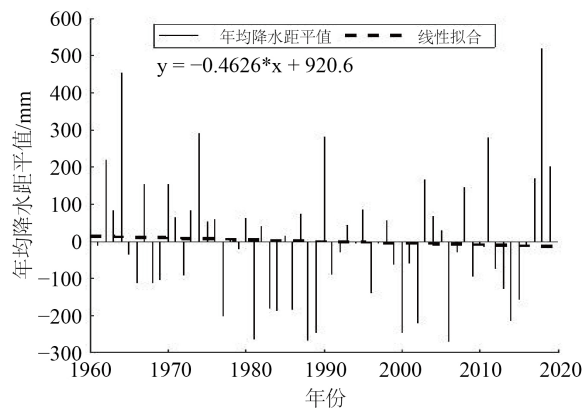
## 4. 研究区域降水特征变化分析

### 4.1. 降水的线性趋势估计

#### 4.1.1. 年际降水总量

图 7 分析了 1961~2019 年昌乐地区的年均降水量变化, 以 59a 数据平均值计算距平, 并进行线性拟合, 其  $r^2 = 0.0021$ , 未通过显著性检验, 可见昌乐地区年均降水量并未表现出明确的线性趋势。

昌乐地区年际降水平均值在 628 mm 左右, 各年降水总量距平常以 1~4a 为周期交替出现, 波动幅度并不剧烈。观测数据中, 共计有 27a 数据表现出正向距平, 32a 数据表现为负向距平, 并大致呈现出交替出现的规律。可见在降水量与降水周期两个维度, 研究地域降水变化特性都表现得较为稳固。



**Figure 7.** Average annual precipitation anomaly in Changle region from 1961 to 2019

**图 7.** 1961~2019 昌乐地区年均降水距平图

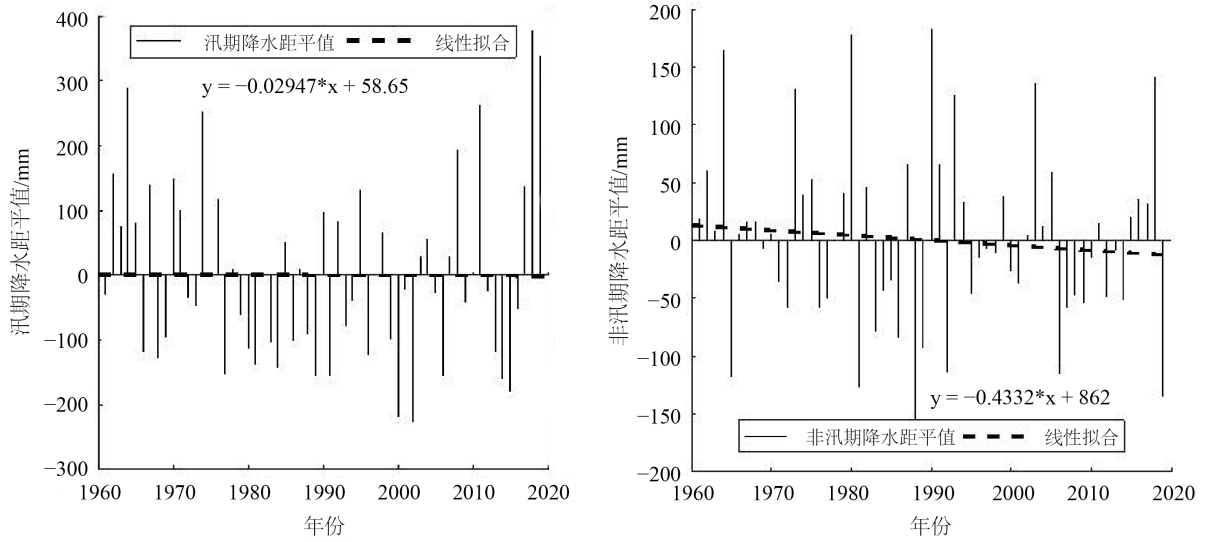
#### 4.1.2. 汛期与非汛期降水量

昌乐地区归属于黄河流域, 并属于温带季风性气候, 降水通常集中在某些时段, 月降水量之间差异较为明显。汛期(7~9月)与非汛期(10月~次年6月)之间降水差均值为 116 mm, 部分年份的降水差甚至可达 590 mm, 呈现出典型的降水集中期。

图 8 反映了昌乐地区汛期与非汛期的降水量变化, 可见仅非汛期的降水均值出现了微弱的降幅(4.3 mm/10a)。可认为昌乐地区的降水规律依然受季风性气候影响, 呈现出典型的季风性降水特征。

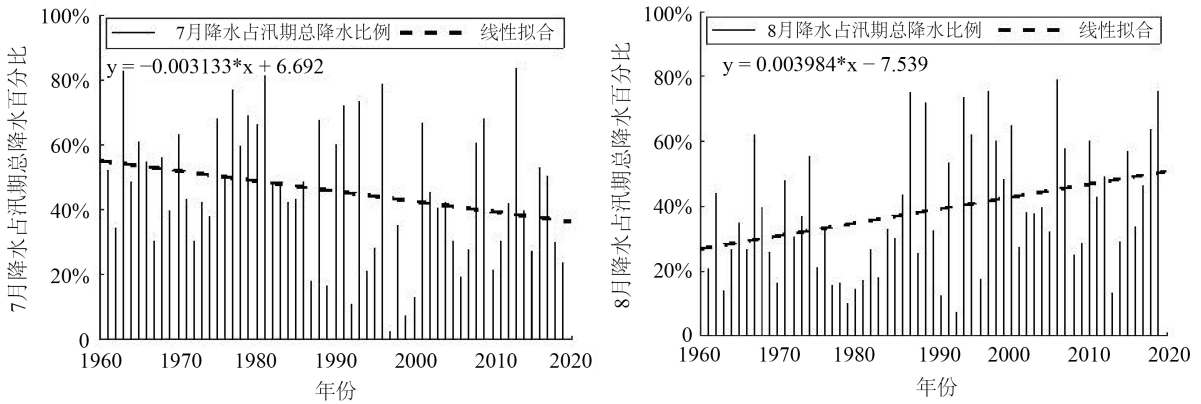
#### 4.1.3. 汛期降水量迁移

图 9 分别计算了 7 月降水占汛期总降水量百分比与 8 月降水占汛期总降水量百分比, 描绘了在时间尺度上, 汛期首要降水月的迁移。易见, 7 月份的降水占比正以 3.13%/10a 的速率下降, 其相关系数  $r^2 = 0.264$ , 通过了显著性水平  $\alpha = 0.05$  水平下的显著性检验; 8 月份的降水占比以 3.98%/10a 的速率上升, 相关系数  $r^2 = 0.348$ , 通过了  $\alpha = 0.01$  显著性水平下的显著性检验。



**Figure 8.** Precipitation anomaly in flood season and non-flood season in Changle region from 1961 to 2019

**图 8.** 1961~2019 昌乐地区汛期与非汛期降水距平图



**Figure 9.** 1961-2019 Changle area precipitation in July and August accounted for the total percentage change map

**图 9.** 1961~2019 昌乐地区 7 月、8 月降水占总百分比变化图

**Table 5.** 1961-2019 the change rate of precipitation in the total percentage in July and August in Changle region

**表 5.** 1961~2019 昌乐地区 7 月、8 月降水占总百分比变化率

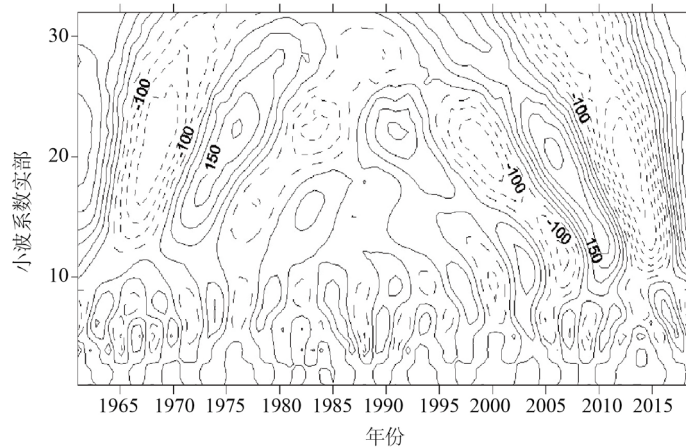
	7 月	8 月
百分比变化率(%/10a)	-3.13**	3.98***

通过计算降水占比变化率(表 5), 可认为以 2000 年为分界点, 8 月正逐渐取代 7 月成为研究地区最主要降水月份, 昌乐地区出现了较为明显的降水集中期后移。

## 4.2. 降水的小波分析

### 4.2.1. 年际总降水量

对昌乐地区年际总降水量进行小波分析, 并绘制等值线图如图 10, 可见该地区在 15~27a 尺度与 3~10a 尺度上表现出两个明显的降水周期。在 15~75a 时间尺度上, 昌乐地区大致呈现出四个少雨 - 多雨准周期。



**Figure 10.** 1961-2019 real part contour of total annual precipitation in Changle area

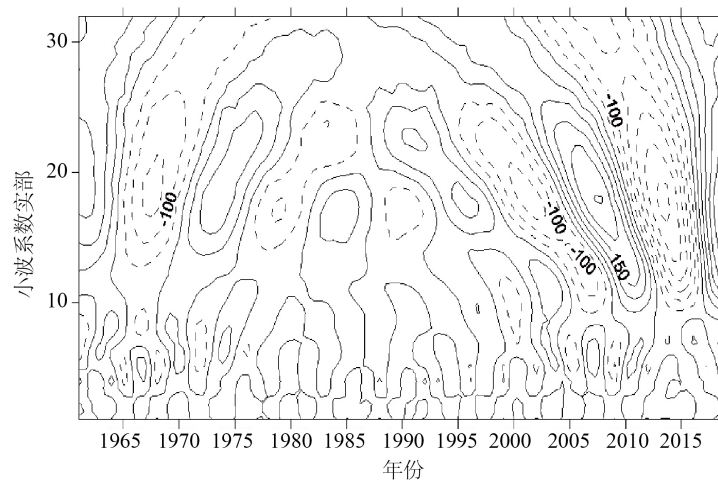
**图 10.** 1961~2019 昌乐地区年总降水小波系数实部等值线

计算小波方差，研究地区的年际总降水共有三个显著峰值，分别对应的时间尺度为 6a、15a、27a。其中又以 27a 时间尺度的方差数最大，可认为是昌乐地区降水变化的第一周期。

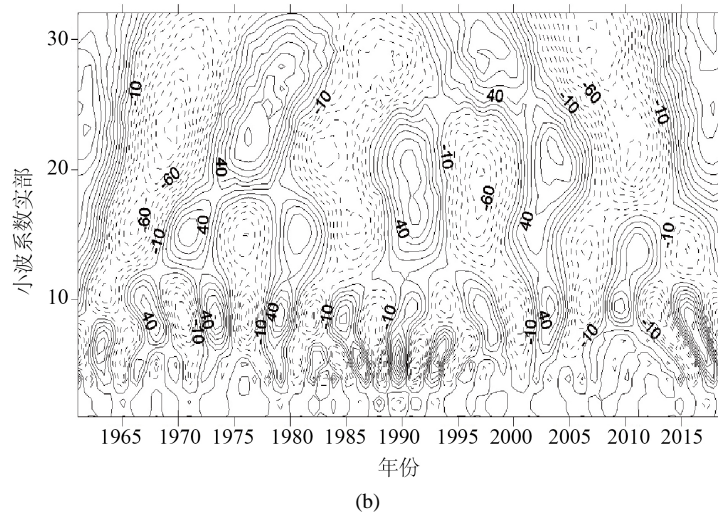
#### 4.2.2. 汛期、非汛期降水量

本文接下来对昌乐地区的汛期、非汛期降水进行了小波分析，绘图如下。由图 11(a)可见，在汛期，研究地区存在 15~24a 和 3~10a 两个大的降水量变化周期。在 15~24a 周期中，研究地区共经历了四个少雨 - 多雨变化的准周期，而在 3~10a，研究地区的汛期降水和年际总降水趋势大致保持一致，同样呈现出频繁的少雨 - 多雨更替。

依据图 11(b)对昌乐地区非汛期降水进行周期变化分析，可见，相对于汛期降水与年际总降水，非汛期降水呈现出更为复杂的周期变化特征。昌乐地区的非汛期降水量在 3~10a、12~15a、20~25a 及 30a 附近都表现出了比较明显的周期变动趋势。在 20~25a 尺度，研究地区表现出四个少雨~多雨的变化准周期；在 12~15a，研究地区呈现出六个少雨 - 多雨的变化准周期；在更小尺度上，周期变化更为频繁。该特征反映在小波方差上表现为较多的方差峰值，分别在 4a、9a、15a、21a、30a 等位置出现峰值，根据峰值大小可将其分为两个梯度，21a 与 30a 的周期变动最为显著，4a、9a、15a 次之。



(a)



**Figure 11.** 1961-2019 real part contour line of wavelet coefficient in flood season (a) and non-flood season (b) in Changle area

**图 11.** 1961~2019 昌乐地区汛期(a)、非汛期(b)小波系数实部等值线

### 4.3. 降水的 Hurst 指数分析

使用 R/S 分析研究地区降水时间序列的长期记忆过程，表 6 展示了昌乐地区逐年总降水、逐年七月降水、逐年八月降水的 Hurst 指数。

**Table 6.** Hurst index of each precipitation index in Changle region from 1961 to 2019

**表 6.** 1961~2019 昌乐地区各降水指标 Hurst 指数

	逐年总降水	逐年七月降水	逐年八月降水
Hurst 指数	0.4781	0.5264	0.5041

逐年总降水量的 Hurst 值介于区间(0.35, 0.5)，表现出微弱的反持续性，七月降水与八月降水的 Hurst 值皆在区间(0.5, 0.65)范围内，呈现出一定的持续性，但趋势十分微弱，接近于随机游走。结合图 11，可得出昌乐地区年总降水在接下来一段时间内或将增多，同时降水日期中心逐渐稳定在八月的结论。

## 5. 结论

### 5.1. 气温变化特征总结

(1) 昌乐地区的气候已较为明确地受到全球变暖影响。其响应模式大致表现为均温升高，气温最低值显著上升，低温天气日数锐减，夏季延长，冬季缩短。

(2) 全年均温以  $0.23^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  的速率提升，且升高速度加快。研究地区的低温比高温的抬升更加明显，可认为全球变暖对昌乐地区的气温影响主要作用于低温温度；相较于春秋两季，冬季与夏季对全球变暖的变化更为显著。

(3) 昌乐地区的年际均温 3~15a、10~18a、20~32a 三类尺度的周期变化，可认为 29a 为研究地区年均气温变化的主周期。年低温存在 20~32a、10~20a、3~10a 三类尺度周期，年高温变化存在 22~32a、13~20a、3~10a 三类尺度，与年均温周期变化较为一致。

(4) 研究地区正处在气温上升期。在一定时期内，昌乐地区的年均温与年最低温仍将持续升高，年最

高气温进入升高趋势的可能性较大。

## 5.2. 降水变化特征总结

(1) 研究地区的降水量数值变动并不十分明显, 降水变化的趋势主要表现为降雨集中期的后移。

(2) 八月份降水占汛期总降水比例的上升速率高达 3.98%/10a, 七月降水占比以 3.13%/10a 的速率骤减, 8月正取代7月逐渐成为当地的降水集中期。

(3) 在 Morlet 小波分析中, 研究地区的年际总降水在 3~10a 和 15~27a 时间尺度上出现了较为明显的变化周期, 而影响当地降水变化的主要周期为 27a。

(4) 7月和8月降水的 Hurst 指数皆大于 0.5, 但仍属于弱持续的范围, 可得结论, 研究地区的降水集中期将在未来一段时间内保持在 8月份, 但持续后移的可能性较小, 总体而言符合昌乐地区季风性气候的特征。

## 参考文献

- [1] 周天军, 邹立维. IPCC 第五次评估报告全球和区域气候预估图集评述[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(2): 149-152.
- [2] 施雅风. 全球和中国变暖特征及未来趋势[J]. 自然灾害学报, 1996(2): 5-14.
- [3] 刘建霞, 李洪轩, 王奕博, 焦洋洋. 极端天气事件与全球变暖的矛盾及相关性研究[J]. 河南科技, 2020(2): 150-152.
- [4] 闫军辉, 周晓, 刘明华, 严育通, 傅辉, 李丹阳. 1951~2015 年信极端温度事件变化及其对全球变暖的响应[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2017, 30(1): 82-86.
- [5] 王伟. 青岛气温异常与全球海表温度异常的相关分析[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [6] 李燕. 全球变暖气候对广西岩溶植被景观自然分布规律的影响[J]. 科技通报, 2019, 35(2): 37-41.
- [7] 吴楚樵. 江淮流域梅雨期气候对全球气候变暖的响应[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [8] 王欢, 李栋梁. 气候变暖背景下全球海温对中国东部夏季降水年代际转折的影响[J]. 热带气象学报, 2019, 35(3): 398-408.
- [9] Datta, P. and Das, S. (2019) Analysis of Long-Term Precipitation Changes in West Bengal, India: An Approach to Detect Monotonic Trends Influenced by Autocorrelations. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, **88**, 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2019.101118>
- [10] Hyun, J.W., Burman, P. and Paul, D. (2018) Local Linear Estimation for Spatial Random Processes with Stochastic Trend and Stationary Noise. *Sankhya B*, **80**, 369-394. <https://doi.org/10.1007/s13571-018-0155-4>
- [11] 骆敬新, 范文静. 基于线性倾向估计和预测方法的渤海沿海暑期气候舒适度变化研究[J]. 海洋信息, 2019, 34(4): 32-36.
- [12] Prasad, L. and Iyengar, S.S. (2020) *Wavelet Analysis with Applications to Image Processing*. CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9780367811310>
- [13] 李险峰, 朱海霞, 李秀芬, 王萍, 姜丽霞, 赵慧颖. 1961~2018 年黑龙江省干湿气候的时空格局特征[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(12): 73-78, 99.
- [14] 王俊骄, 张雅旎, 孙晓燕. 综合 R/S 法和 Mann-Kendall 法分析杭州市 60 年小雨降水日趋势变化[J]. 科技通报, 2019, 35(12): 41-45.
- [15] 陈江峰, 龚书浩, 李迎超. 基于 R/S 分析的阿坝藏族羌族自治州年降雨量定量预测[J]. 中国水土保持, 2019(7): 30-33.
- [16] Turcotte, D.L. (1997) *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 158-162. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139174695>