

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0154

段娜, 杨贵羽, 游进军. 五指山市近60年降雨量时空演变规律分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 60-67, 79. DUAN N, YANG G Y, YOU J J. Temporal and spatial evolution of precipitation in Wuzhishan City in recent 60 years[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 60-67, 79. (in Chinese)

# 五指山市近60年降雨量时空演变规律分析

段娜<sup>1,2</sup>, 杨贵羽<sup>2</sup>, 游进军<sup>2</sup>

(1. 河北工程大学 水利水电学院, 河北 邯郸 056021; 2. 中国水利水电科学研究院 水资源所, 北京 100038)

**摘要:** 为了解五指山市近几十年降雨量的变化规律, 基于市内及周边17个雨量站/气象站资料, 采用不同插值方法逐月插值, 与海南省水资源二次评价对比得到合理方法; 并用滑动平均法、累积距平法、Mann-Kendall非参数检验法及Morlet小波分析等方法对降雨量进行时空变化分析, 得到如下结果: 五指山市近60年多年平均降雨量为1921.3 mm, 在空间上呈现由东北、正北向西南逐渐递减的趋势, 不同丰枯情景下降雨分布略有差异, 但其对地形的响应较为一致; 年降雨量总体呈现显著增加的态势, 并且在1988年左右存在由减少到增多的突变; 借助SPSS软件, 通过归因分析表明, 蒸发主要影响着五指山市降雨的变化规律; 降雨量存在多尺度时间效应, 存在23 a和16 a左右的主周期, 且均存在丰枯交替变化, 并在未来几年均处在偏丰时期。研究结果对五指山市的水资源开发利用和规划具有现实指导意义。

**关键词:** 降雨量时空演变; 滑动平均法; 累积距平法; M-K非参数检验法; Morlet小波分析; 规律分析

中图分类号: TV 125 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Temporal and spatial evolution of precipitation in Wuzhishan City in recent 60 years

DUAN Na<sup>1,2</sup>, YANG Guiyu<sup>2</sup>, YOU Jinjun<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hebei University of Engineering, Handan 056021, China;

2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** In order to illustrate the variation characteristic of precipitation in Wuzhishan City in the recent 60 years, based on the data of 17 rainfall stations/meteorological stations, we used different interpolation methods to conduct monthly interpolation and compared the results with the Second Evaluation results of Hainan Province, and thus selected the reasonable method. We analyzed the spatial and temporal changes of precipitation using sliding average method, cumulative anomaly method, Mann-Kendall nonparametric test, and Morlet wavelet analysis. The results were as follows: (1) The average precipitation in the past 60 years of Wuzhishan was 1921.3 mm and showed a gradually declining trend spatially from the northeast and north to the southwest. (2) The distribution of precipitation differed slightly across different scenarios, but showed consistent response to topography. (3) The annual precipitation generally showed a significant increasing trend, with a sudden change from decreasing to increasing around 1988. (4) The results of attribution analysis with SPSS showed that the evaporation mainly affected the variation pattern of precipitation in Wuzhishan. (5) There are multi-scale time effects of precipitation and major cycles of 23 years and 16 years with alternations between wet and dry years. The next few years will be wet years. The above results have realistic significance to the development, utilization, and planning of water resources in Wuzhishan.

收稿日期: 2018-06-11 修回日期: 2018-07-24 网络出版时间: 2018-07-26

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180725.1148.008.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0601503); 国家自然科学基金项目(51779144); 工程院院士科技咨询项目(2015-ZD-16-02-03)

Funds: National Key R&D Program of China (2016YFA0601503); National Natural Science Foundation of China (51779144); Engineering Academy Academician Consulting Project (2015-ZD-16-02-03)

作者简介: 段娜(1992-), 女, 河北石家庄人, 主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail: 18640080532@163.com

通讯作者: 杨贵羽(1974-), 女, 内蒙古乌兰察布人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水文学水资源和农田水利方面研究。E-mail: guiyuy@iwhr.com

**Key words:** spatial and temporal evolution of precipitation; sliding average method; cumulative anomaly; M-K nonparametric test; Morlet wavelet analysis; pattern analysis

降雨异常是导致旱涝发生的首要因素。随着全球气候变化加剧,降雨量的时空分布格局发生了变异,导致了旱涝等极端天气事件,严重制约了区域社会经济的可持续发展<sup>[1]</sup>。在旱涝灾害频发的态势下,掌握降雨量的时空演化,对于应对气候变化、洪涝预警管理方面的研究具有重要意义。近些年来,不同的专家学者从降雨的年内变化规律、空间分布特征等多方面分析了东南地区降雨的演变规律,尤以珠江流域的为多。例如:李深林等<sup>[2]</sup>分析了珠江三角洲近 30 年降雨变化趋势,指出珠江三角地区 2 月-4 月降雨量存在显著下降趋势,而 6 月-9 月降雨量有显著的上升趋势;唐亦汉等<sup>[3]</sup>分析了近 50 年珠江流域降雨多尺度时空变化特征,指出珠江流域西部年降雨有减少趋势,全区极端降雨在 20 世纪 60 年代、80 年代末有突变现象;彭俊台等<sup>[4]</sup>分析了珠江流域极端降雨时空演变特征,指出极端降雨事件的空间分布特征与地形有密切联系,流域内极端降水事件的多发区周围往往有山脉或高大地形环绕。但是,鲜有学者专门对海南这一重要的岛屿旅游省份的降雨情况进行分析。本文以海南五指山市为研究区,解析区域降雨的时空分布规律、开展降雨时间变化规律的归因分析并揭示气候变化条件下的相关特征。由于研究区是全岛主要产水区,境内五指山是海南省第一高峰,气候和地势的综合作用影响着整个海南岛的降雨以及水资源的分布格局;因此,研究成果不仅为本区域还可为海南岛的降雨和水资源的合理开发、利用提供关键依据。

## 1 研究区域概况

五指山市位于海南岛中南部,东经  $109^{\circ}19' - 109^{\circ}44'$ 、北纬  $18^{\circ}38' - 19^{\circ}02'$  之间(图 1),总面积  $1\,144\text{ km}^2$ ,占海南省土地总面积的 3.19%;属热带山区气候,冬暖夏凉,年平均气温  $22.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,极端最高气温  $35.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。年平均降雨量为  $1\,860\text{ mm}$ ,极端最大年降雨量为  $2\,810.4\text{ mm}$ ,极端最小年降雨量为  $1\,055.5\text{ mm}$ ,年平均相对湿度为 84%,年平均日照为  $2\,000\text{ h}$  左右。

本文共收集五指山市域及周边 17 个雨量站/气象站 1956-2014 年系列年逐月降雨资料。为保证数据资料的完整性和一致性,对缺测站点进行同步期插值。在插补过程中,对需插补延长的年份,采用

地理条件及气候特性相似的邻近站或多站平均值插补;少数站采用绘制降雨等值线方法插补。对于 2000 年以后建站的站点,鉴于建站时间较晚,需插补年份过长,不进行前期雨量的插补。五指山市地理位置及站点分布见图 1。

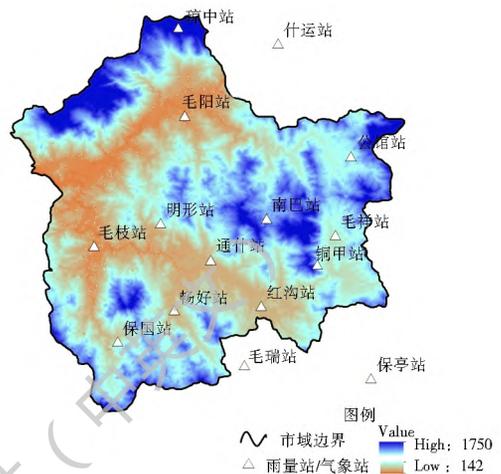


图 1 五指山地形及雨量站分

Fig. 1 Distribution of gauge stations and terrain of Wuzhishan

## 2 研究方法

本文研究主要涉及多年平均面雨量计算、降雨序列演变趋势分析以及降雨多尺度周期分析三部分内容。

### 2.1 面雨量计算插值方法选择及分析

面雨量计算主要利用 Arcgis10.0 软件和一些空间插值方法结合来计算。目前常用方法有距离加权反比法(Inverse Distance Weighted, IDW)、考虑高程的 IDW、克里金(Kriging)、自然邻点(Natural Neighbor)4 种插值方法<sup>[56]</sup>,选择合适的方法成为分析区域降雨空间分布的关键。对此,本文以研究区第二次水资源评价(1956-2000 年系列)成果为基准,分别计算不同的插值方法计算结果的相对误差,并进行对比显示,考虑高程的 IDW 误差最小,控制在 5% 以内,其他方法均在 7% 左右(表 1)。分析其具体原因如下。

由五指山地形特征可知,高程和雨量站个数及空间分布都是精确计算区域面降雨的关键因素。上述方法中,Natural Neighbor 法,是直接将点雨量代表雨量站控制区域的面雨量,并采用面积加权得到区域面雨量,难以反映地形的起伏变化;Kriging 法源于地学,是通过对空间分布的数据求线性最优、无

偏内插估计的一种方法, 尽管考虑到降雨空间的变化, 但主要集中于水平距离方面的影响, 对于较大高程变化的山丘区来说, 精度还是欠缺; IDW 法, 仅能考虑测站数量及测站间的距离, 仍没有考虑地形的变化; 考虑高程的 IDW 法, 在常规距离加权反比法的基础

上, 再考虑各点高程对插值距离的影响, 通过各点的高程值对插值结果进行修正, 兼顾了雨量站数量、雨量站分布以及地形变化对区域降雨量的影响, 是 IDW 法的一种改进。因此, 考虑高程的 IDW 相对最优, 适用于五指山市的降雨空间变化分析。

表 1 不同差值方法对比

Tab. 1 Comparison of different interpolation methods

结果	考虑高程的 IDW	IDW	Kriging	Natural Neighbour	二次评价结果 <sup>[7]</sup>
降雨量(1956-2000年)/mm	1 855.3	1 887.6	1 893.5	1 897.3	1 768.6
相对误差(%)	4.90	6.73	7.06	7.27	-

## 2.2 降雨演变趋势分析

长系列的降雨演变过程是一个趋势性、突变性和周期性相互叠加的过程<sup>[8-10]</sup>。为揭示五指山市降雨在不同时间尺度上的演变特征, 本文采用 Mann-Kendall(简称 M-K)趋势检验法<sup>[11-12]</sup>和滑动平均法共同分析降雨的年度趋势变化规律; 通过 M-K 突变检验法<sup>[13]</sup>和累积距平法进行突变检测。通过用能够揭示多时间尺度变化特征的 Morlet 小波<sup>[14-16]</sup>分析法来进行不同时间尺度周期分析; 最后综合趋势、突变和周期分析, 对区域未来一定时期的降雨变化趋势做出判断。

### 2.2.1 M-K 趋势检验法

M-K 非参数统计检验法是提取气象和水文序列变化趋势的有效方法之一, 可对整体系列趋势变化做出定量评价。其计算公式为

$$\begin{cases} U = \frac{\tau}{[Var(\tau)]^{1/2}} \\ \tau = \frac{4p}{n(n-1)} - 1 \\ Var(\tau) = \frac{2(2n+5)}{9n \cdot (n-1)} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U$  为 Kendall 秩次相关系数;  $\tau$  为 Kendall 统计量;  $p$  为系列中所有的对偶观测值;  $n$  为降系列长度;  $Var(\tau)$  为系列样本方差。若  $U > 0$ , 说明序列呈上升趋势; 若  $U < 0$ , 说明序列呈下降趋势。当  $U$  超过临界值时, 方能通过假设检验, 且绝对值越大, 序列的变化趋势越显著。

### 2.2.2 M-K 突变检验法

M-K 非参数统计检验法可分析变化序列各阶段的显著性, 并可检验突变发生的时间、次数及其显著性<sup>[17-21]</sup>。对具有  $n$  个样本量的时间序列  $x$ , 构成一秩序列

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i, r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (2)$$

式中: 秩序列  $S_k$  为第  $i$  时刻值大于第  $j$  时刻值个数

的累计数,  $j = 1, 2, \dots, i$ 。

假定时间序列随机独立, 定义统计量  $U_{F_k}$  为

$$U_{F_k} = [S_k - E(S_k)] / [Var(S_k)]^{1/2} \quad (3)$$

式中:  $U_{F_k}$  为标准正态分布, 是按时间序列  $x$  的顺序  $x_1, x_2, \dots, x_n$  计算出的统计量序列,  $U_{0.05} = 0$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ ;  $E(S_k)$ 、 $Var(S_k)$  分别为累计数  $S_k$  的均值, 在  $x_1, x_2, \dots, x_n$  相互独立且有相同连续分布时, 可计算

$$Var(S_k) = n(n-1)(2n+5)/72 \quad (4)$$

$$E(S_k) = n(n-1)/4 \quad (5)$$

按时间序列  $x$  的逆序  $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$  再重复上述过程, 同时使  $U_{B_k}$  (序列的逆序值) =  $-U_{F_k}$  ( $k = n, n-1, \dots, 1$ ),  $U_{B_1} = 0$ 。将  $U_{F_k}$ 、 $U_{B_k}$  两个统计量曲线和  $\pm U_{1-\alpha/2}$  两条直线绘在一张图上。若  $U_{F_k}$  和  $U_{B_k}$  两条曲线出现交点, 且交点在  $\pm U_{1-\alpha/2}$  两条临界线之间, 则交点对应的时刻就是突变开始的时间。判定时, 以  $U_{F_k}$  值大于或小于 0 分别表明序列呈上升或下降趋势; 以  $U_{F_k}$  是否超过临界值来判定趋势是否显著。

### 2.2.3 累积距平法

累积距平法是一种常用的、由曲线直接判断变化趋势的方法。对于序列  $x$ , 某一时刻  $t$  的累积距平表示为

$$x_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}) \quad (t = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

其中:  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 。将  $n$  个时刻的累积距平全部算出来, 即可绘制出累积距平曲线进行分析。

累积距平曲线呈上升趋势, 表示距平值增加, 呈下降趋势则表示距平值减小。从曲线明显的上下起伏, 可以判断其长期显著的演变趋势及持续性变化, 甚至可以判断出发生突变的大致时间<sup>[22]</sup>。

### 2.2.4 Morlet 小波分析法

小波变换是在傅立叶变换的基础上发展而来, 其变化主要是引入了窗口函数作为核函数, 并基于

“窗口”平移和伸缩的不变性,可将序列信息同时映射分解在时域和频域上。所谓小波分析即通过序列“时-频”信息分辨时间序列在不同尺度上的演变特征<sup>[23-25]</sup>。小波  $\varphi(t)$  有多种形式,其中 Morlet 小波的函数表达如下:

$$\varphi(t) = \exp(-t^2/2 + i\omega_0 t) \quad (7)$$

式中:  $i$  为虚数;  $\omega_0$  为常数,  $\omega_0 \geq 5$  时 Morlet 小波能够近似满足允许性条件,本文取  $\omega_0 = 6.2$ 。

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (8)$$

式中:  $a$  为尺度因子,因  $\omega_0 = 6.2$ ,此时  $a$  和周期  $T$  相等,如是  $a$  就能反映小波周期;  $b$  为时间因子,反映时间上的平移;  $\varphi(t)$  为母小波;  $W_f(a, b)$  为小波变换系数。

将小波变化系数的平方在整个时间域上进行积分,即可计算得小波方差:

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (9)$$

小波方差随  $a$  的变化过程即小波方差图,反映了波动能量随尺度的分布;在此,  $a = T$ ,因此可确定水文序列的主周期。

## 3 结果分析

### 3.1 降雨量的空间变化分析

为了精细刻画区域降雨量空间变化特征,运用 Arcgis 工具,采用考虑高程的 IDW 法插值计算结果,绘制区域 1956–2014 年多年平均等值线图(图 2(a))。可知:区域降雨量在空间分布上整体呈现由东北(降雨量 2 200 mm)、正北(降雨量 2 300 mm)向

西南方向递减的规律,且两方向递减逐渐汇合并最终在西部偏南形成以降雨量 1 700 mm 为极小值的闭合曲线的分布格局。

结合图 1 区域地形分析可知,降雨等值线分布与地形 DEM 分布密切相关,山区降雨量明显大于平原及河谷降雨量,差值达 600 mm,因而造成上述区域降雨分布呈现递减梯度大、空间分布差异性显著的特征。

进而采用 P-III 型经验曲线法绘制了典型丰水年(2008 年)和典型枯水年(1977 年)的降雨等值线图(图 2(b)、2(c)),以展示区域不同丰枯情景下的降雨量分布。可知,相对多年平均而言,无论典型丰水年还是典型枯水年,降雨量值在区域分布的差异性较小、梯度变化较缓,量值差异均在 400 mm 左右。但是极值分布上来看,典型丰水年呈现由中部偏东的极大值(降雨量约 2 400 mm)闭合曲线向四周发散递减的规律,并在西部、西南部及南部形成 3 个极小值均约为 2 100 mm 的闭合曲线。从递减梯度而言,两极值点闭合曲线之间的变化梯度较大、北部和南部的变化梯度相对较缓。典型枯水年的降雨空间分布则明显不同,呈现由东北、正北向西部及中部偏北递减的规律,并在中心偏北形成了极小值约为 1 300 mm 的闭合曲线,且整个区域降雨等值线递减分布与多年平均的趋势较为相似。

尽管不同丰枯情境下,各典型年的降雨量极值点分布差异性较大,但其极大值位于山区、极小值位于河流或山谷的分布特征一致。综合多年平均降雨量的空间演变特征分析可知,不同丰枯情景下,研究区降雨量对地形的响应情况较为一致。

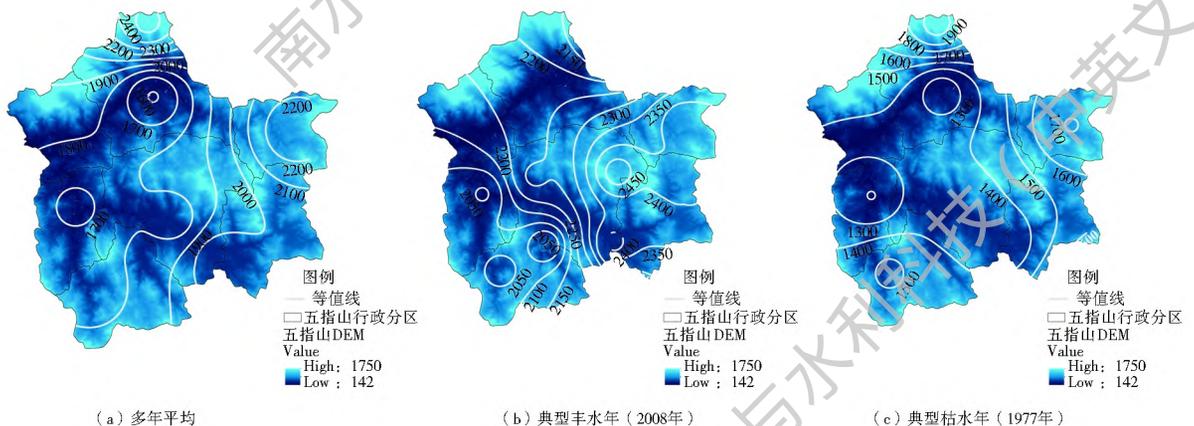


图 2 五指山市不同典型年降雨空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of precipitation in typical years in Wuzhishan

### 3.2 降雨量的时间演变规律

#### 3.2.1 年内变化

针对五指山市特殊的气候条件,按照长期以来的降雨规律<sup>[7]</sup>,将长系列降雨分为 1956–1980 年

(早期)、1981–2000 年(中期)以及 2001–2014 年(近期)三个年代,年内则分丰水期(5 月–10 月)、降雨集中期(7 月–9 月)、枯水期(11 月–次年 4 月)三个时期,就不同年代降雨的年内变化进

行对比分析(表 2),以期更为全面解析五指山市的降雨特征。

分析结果表明:不同年代丰水期年内占比差异不大,均占全年降雨量的 85% 左右,相互之间比例差异不超过 1%,与多年平均占比相比,差异不到 0.5%;枯水期同此规律。但就降雨集中期而言,在各年代间有所差异,其中近期区域年内降雨显著集中,高达 66.05%;早期降雨其次,占比为 63.17%;相对而言,中期降雨年内集中较小,占比 61.03%;

说明五指山市近 60 年降雨的显著增加主要源于丰水期特别是降雨集中期的增加。进一步对比各时期气象倾斜率后发现,中期枯水期降雨量较其他两个年代增加明显,降雨集中期则呈现减少的趋势,而近期年降雨集中期降雨增加明显,枯水期降雨减少。由此可见,五指山市降雨量的年内分布经历了早期 1956-1980 年的较为集中,到中期 1981-2000 年的相对均匀,再到 2001-2014 年的更加集中的变化。

表 2 五指山市各年代年内不同时期降雨量及其占比及气象倾斜率

Tab. 2 Annual precipitation and its proportion and weather incline rate in different periods in Wuzhishan

年代分期	枯水期			丰水期			集中期		
	降雨量 /mm	比例 (%)	气象倾斜率 /[mm · (10a) <sup>-1</sup> ]	降雨量 /mm	比例 (%)	气象倾斜率 /[mm · (10a) <sup>-1</sup> ]	降雨量 /mm	比例 (%)	气象倾斜率 /[mm · (10a) <sup>-1</sup> ]
早期(1956-1979年)	283.6	15.05	3.78	1600.63	84.95	120	1190.22	63.17	89.24
中期(1980-2000年)	271.32	14.24	38.82	1633.91	85.76	31.42	1162.73	61.03	-22.55
近期(2001-2014年)	307.82	14.85	58.11	1765.02	85.15	131.77	1369.16	66.05	113.21
全期(1956-2014年)	285.3	14.71	8.82	1654.57	85.29	57.89	1225.77	63.19	48.68

### 3.2.2 年际变化

#### (1) 趋势性变化。

绘制五指山市 1956-2014 年逐年面降雨量过程线(图 3),可知,区域多年平均降雨量为 1921.3 mm,最大年降雨量约为 2725 mm(1964 年),最小年降雨量约为 1125 mm(1959 年),两者差异显著,近 1600 mm。

表 3 五指山市 1956-2014 年降雨量 M-K 统计值

Tab. 3 M-K statistic of precipitation in 1956-2014 in Wuzhishan

时期	枯水期	丰水期	降雨集中期	全年
统计值	1.18	2.57	2.46	2.79

#### (2) 突变性检验。

在 1956-2014 年逐年降雨过程线(图 3)的基础上,绘制区域降雨 M-K 统计量曲线(图 4)。在置信水平临界线之间,UF、UB 曲线在 1988 年、1991 年及 1993 年存在交点,说明其对应年份降雨可能存在突变。为进一步揭示区域降雨突变特征,采用累积距平曲线做进一步分析(图 5),可知,曲线在 20 世纪 80 年代末出现极小值,因而整个曲线呈现先下降、后上升的“V”字型变化过程,也说明近 60 年五指山市降雨呈现先下降后上升的趋势,转折点位于 20 世纪 80 年代末。结合 M-K 突变检验结果,UF、UB 曲线在置信水平临界线内于 1988 年恰好存在一个交点,因此,两种方法共同说明区域近 60 年间降雨在 1988 年左右存在突变,其变化趋势呈现由减少到增多的趋势。

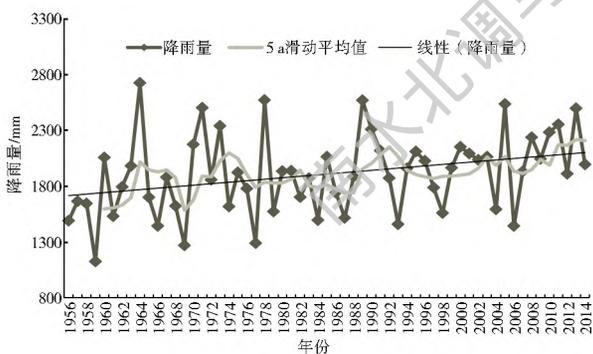


图 3 1956-2014 年逐年降雨变化及 5 年滑动平均变化

Fig. 3 Annual trend and 5-year sliding average changes of precipitation from 1956 to 2014 in Wuzhishan

在逐年过程线的基础上,计算绘制区域 5 a 降雨滑动平均曲线及其线性拟合曲线,并进行 M-K 趋势检验。计算区域全年及各个时期 M-K 统计值(表 3)可知,全年统计值( $U = 2.79$ )、丰水期统计值( $U = 2.57$ )和降雨集中期统计值( $U = 2.46$ )均超过了显著性水平  $\alpha = 5\%$  对应的临界值( $U_{0.05} = 1.96$ ),因而五指山近 60 年降雨量、丰水期降雨量以及集中期降雨量均呈现显著增加趋势。

同时,图 4 显示:近 60 年来,除 1959 年外,其余年份 UF 曲线所对应纵坐标值均大于 0,说明降雨量一直呈现增加的态势,且 2000-2008 年,逐年在临界线上下波动,自 2008 年以后均超过临界线且直线上升。这进一步说明区域降雨呈现整体增加,且进入 21 世纪以来增加趋势显著。

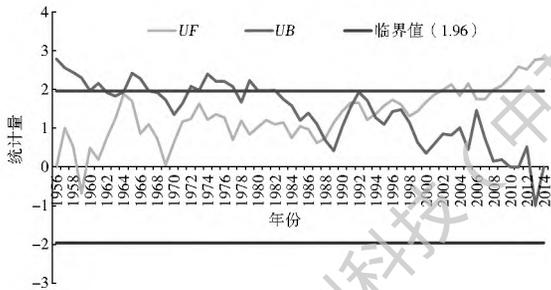


图 4 五指山市年降雨 M-K 统计量曲线(1956-2014 年)  
Fig. 4 Mann-Kendall statistics curve of annual precipitation in Wuzhishan (1956-2014)

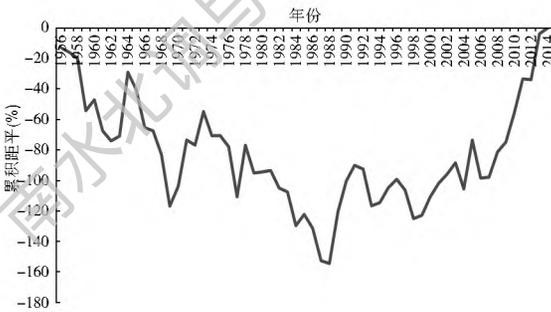


图 5 五指山市逐年降雨累积距平(1956-2014 年)  
Fig. 5 Accumulated anomalies of annual precipitation in Wuzhishan (1956-2014)

### 3.2.3 多时间尺度辨析

本文采用 Morlet 小波进行多时间尺度分析,亦即对降雨周期变化的多样性以及不同周期下的降雨特性及其演变规律进行解析,以便了解未来几年区域降雨的变化趋势<sup>[26]</sup>。

通过公式(8)计算得到年降雨量小波变换系数实部等值线见图 6,表示不同周期降雨位相在不同年份的变换及分布等信息;由于以多年平均值为距平,则正值(实线)对应于降雨量丰水期,负值(虚线)对应于枯水期,零值即意味着降雨的多年平均情况。可知,其中 17~24 a、38~40 a 两个周期的尺度降雨丰枯变化规律显著且具有全域性,尺度中心分别为 23 a 和 39 a;15~17 a 周期尺度的降雨丰枯变化规

律也较为明显,5 a 以下尺度上的丰枯交替也有体现,但相对而言,交替频繁且较为散乱。

由式(9)可知,小波方差就是不同周期尺度(a)上能量的积分,其大小随时间的变化即小波方差过程线(图 7),可反映水文要素在不同尺度扰动的强弱,因此,研究学者以扰动较强的极大值判定为水文要素的主周期。可知,年降雨变化过程小波方差的极大值对应的尺度有 39 a 和 23 a,16 a 尺度的周期也有体现但不明显。综合图 6-图 8 分析可知,就五指山市 1956-2014 年降雨序列而言,存在 23 a 和 16 a 的主周期,且 23 a 的主周期较为显著;根据水文统计相关理论<sup>[26]</sup>,鉴于现有序列仅 59 a,只能推断该过程极可能存在 39 a 的主周期。

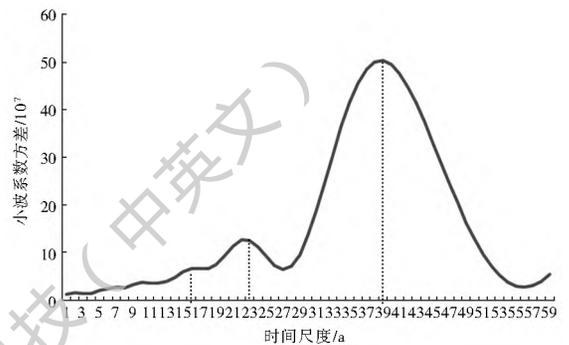


图 7 五指山市年降雨变化过程小波方差(1956-2014)  
Fig. 7 Wavelet variance process of annual precipitation in Wuzhishan (1956-2014)

进一步,绘制 16 a 和 23 a 尺度下年降雨量小波系数实部过程线(图 8)、统计各尺度降雨量的丰枯具体时期(表 4)。无论哪个时间尺度下,区域降雨序列均按各自相应周期丰枯交替变化:从 23 a 时间尺度看,五指山降雨量变化经历了“丰-枯-丰-枯-丰”变化;从 16 a 时间尺度看,则经历了“丰-枯-丰-枯-丰”变化。由图 8 可知,无论哪个时间尺度下,尽管区域降雨已跨过丰水期峰值,但未来几年区域降雨仍然处于偏丰时期。

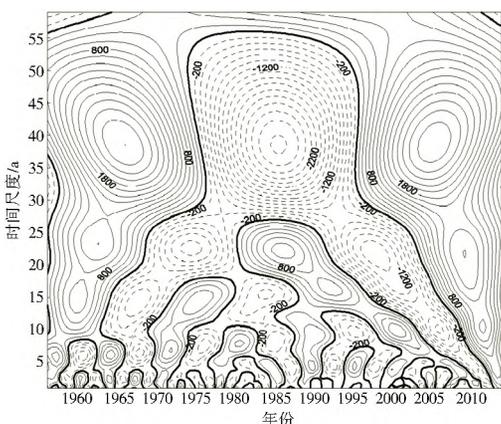


图 6 五指山市年降雨小波变换系数实部等值线(1956-2014)  
Fig. 6 Real parts of wavelet transform coefficient for annual precipitation in Wuzhishan (1956-2014)

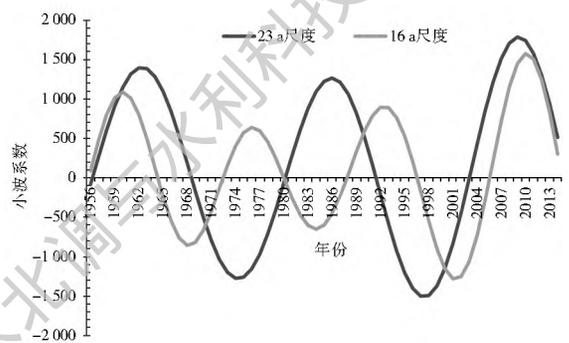


图 8 五指山市年降雨小波系数实部变化过程(1956-2014)  
Fig. 8 Real parts of wavelet coefficients of annual precipitation in Wuzhishan (1956-2014)

表 4 五指山市不同主周期下年降雨丰枯时段变化(1956-2014 年)

Tab. 4 The change of wet years and dry years in different major cycles in Wuzhishan (1956-2014)

时间尺度	丰水期	枯水期
23 a	1956-1968 年, 1981-1992 年, 2006-2014 年	1969-1980 年, 1993-2005 年
16 a	1956-1964 年, 1971-1976 年, 1987-1996 年, 2006-2014 年	1965-1970 年, 1977-1986 年, 1997-2005 年

### 3.3 降雨量的时间演变规律归因分析

影响大气降水的基本气象要素主要是气压、气温、湿度、风、辐射等<sup>[27]</sup>,但是由于本文研究区域尺度比较小,团队收集到的要素资料有限,不能逐一展开、只能选定主要因子进行分析。政府间气候变化专门委员会(IPCC)在 2013 年发布的第五次评估报告(AR5)<sup>[1]</sup>表明全球气候有变暖趋势,并指出气候变暖导致降雨等极端事件发生的频率增大,因此本文收集气温作为间接反映气候变化影响要素进行分析;人类活动对区域的影响首先直接体现的是植被等下垫面的变化上,而下垫面的变化势必影响区域蒸发,进而导致降雨量的变化,因此本文选用蒸发要作为间接反映人类活动影响要素进行分析。

综上,本文通过中国气象数据共享网(<http://cdc.cma.gov.cn>)选取了五指山市通什站 1959-2011 年的气温、蒸发数据,利用 SPSS 软件与五指山市对应系列降雨做相关分析(表 5),以期获悉五指山降雨的影响因素。根据相关原理<sup>[28]</sup>,就降雨与这两个要素的显著性个案数进行统计,表明:降雨与蒸发呈显著负相关关系,与气温相关性次之,但不显著。该结果揭示了五指山市近 60 年来的降雨变化受蒸发和气温两个因素影响,且受蒸发的影响更大。

表 5 降雨与主要气象因素相关系数统计

Tab. 5 Correlation coefficient statistics of precipitation and main meteorological factor

气象因素	蒸发	气温
皮尔逊相关性	-0.33*	0.13
显著性(双尾)	0.02	0.36
个案数	53	53

注\* 表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

## 4 结论

本文基于 Arcgis 软件,对比分析了 4 种不同插值方法,优选了考虑高程的 IDW 法空间插值计算五指山市 1956-2014 年逐年面雨量,形成区域年降雨序列;在此基础上,分析了区域逐年降雨的时空演变

规律、年际变化特性及多时间尺度特性,得出以下结论。

(1) 五指山市多年平均降雨量在空间上呈现由东北、正北向西南逐渐递减的趋势,典型丰水年的降雨空间分布呈现中部偏东向四周发散递减的趋势,而典型枯水年的降雨空间分布则呈现由东北、正北向西部及中部偏北递减的规律趋势;无论哪个年型,区域降雨量极大值位于山区、极小值位于河流或山谷的分布特征较一致,说明地形在影响五指山降雨空间分布的作用显著。

(2) 五指山市降雨存在明显的丰水期与枯水期,降雨大多集中在 5 月-10 月,进入 21 世纪以后,降雨更多的集中在 7 月-10 月;采用 M-K 趋势检验法的分析结果也表明了近 60 年区域丰水期、集中期降雨量显著增加的态势。

(3) 采用 M-K 非参数统计检验法分析得出,五指山市近 60 年降雨量突变年份在 1988 年左右,降雨量变化趋势由减少变增多。结合第(2)条结论可知,区域极端天气出现的概率增加,因此建议相关部门应做好准备,以降低气候变化给人类生活造成的影响。

(4) 采用 Morlet 小波分析法,解析得出五指山降雨存在 23 a、16 a 左右的主周期变化,与小波系数实部等值线的分布情况较为一致;进而剖析了区域降雨量在不同周期尺度下各自呈现的相应的丰枯交替变化。

(5) 借助 SPSS 对五指山市降雨与气温、蒸发两个气象因素归因分析表明,区域降雨时间变化主要受蒸发要素的影响。

### 参考文献(References):

- [1] 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(7): 874-883. (QIN D H. Climate change science and sustainable development[J]. Progress in Geography, 2014, 33(7): 874-883. (in Chinese))
- [2] 李深林, 陈晓宏, 赖成光, 等. 珠江三角洲地区近 30 年降雨变化趋势及其与气溶胶的关系[J]. 水文, 2016, 36(4): 31-36, 84. (LI S L, CHEN X H, LAI C G, et al. Precipitation change trend in Pearl River Delta Area and relation with aerosol from 1980 to 2010[J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(4): 31-36, 84. (in Chinese)) DOI: 1000-0852(2016)04-0031-06.
- [3] 唐亦汉, 陈晓宏. 近 50 年珠江流域降雨多尺度时空变化特征及其影响[J]. 地理科学, 2015, 35(4): 476-482. (TANG Y H, CHEN X H. Multi-scale spatio-temporal characteristics and influence of precipitation variation in Pearl River Basin during the last 50 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(4): 476-482. (in Chinese)) DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2015.04.

- 013.
- [4] 彭俊台, 张强, 陈晓宏, 等. 珠江流域极端降雨时空演变特征分析[J]. 灾害学, 2011, 26(4): 24-28, 34. (PENG J T, ZHANG Q, CHEN X H, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of extreme rainfalls in the Pearl River Basin [J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(4): 24-28, 34. (in Chinese)) DOI: 1000-811X(2011)04-0024-06.
- [5] 赵冰雪, 王雷, 程东亚. 安徽省气象数据空间插值方法比较与分布特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 141-145. (ZHAO BX, WANG L, CHENG D Y. Comparison of spatial interpolation method for meteorological data and distribution characteristic in Anhui Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(3): 141-145. (in Chinese)) DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2017.03.026.
- [6] 李艳, 朱军, 胡亚, 等. 不同插值方法模拟四川省逐月降雨量的对比分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 151-154, 160. (LI Y, ZHU J, HU Y, et al. Comparison analysis on different spatial interpolation methods to simulate monthly precipitation in Sichuan Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(1): 151-154, 160. (in Chinese)) DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2017.01.018.
- [7] 海南省水文水资源勘测局. 海南省水资源调查评价[R], 2004. (Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Hainan Province. Water Resources Survey and Evaluation of Hainan Province [R], 2004. (in Chinese))
- [8] 袁喆, 杨志勇, 郑晓东, 等. 近 50 年来淮河流域降水时空变化特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 98-103. (YUAN Z, YANG Z Y, ZHENG X D, et al. Spatial and temporal variations of precipitation in Huaihe River Basin in recent 50 years [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(2): 98-103. (in Chinese)) DOI: 1672-1683(2012)02-0098-06.
- [9] 刘梅, 魏加华, 王峰. 渭河流域降水时空变化与干旱特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(2): 193-197, 210. (LIU M, WEI J H, WANG F. Spatial temporal variations of precipitation and drought characteristics in Wei River Basin [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(2): 193-197, 210. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2015.02.001.
- [10] 徐东霞, 章光新, 尹雄锐. 近 50 年嫩江流域径流变化及影响因素分析[J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 416-421. (XU D X, ZHANG G X, YIN X R. Runoff variation and its impacting factor in Nenjiang River during 1956-2006 [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 416-421. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2009.03.012.
- [11] 陈鹏, 何军, 徐小峰, 等. 气候变化背景下降雨序列的变异分析[J]. 水电能源科学, 2015, 33(12): 6-8, 5. (CHEN P, HE J, XU X F, et al. Variability analysis of rainfall series under climate change [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(12): 6-8, 5. (in Chinese)) DOI: 1000-7709(2015)12-0006-03.
- [12] 徐玲玲, 张巍. 江苏徐州近 42 年降水和气温变化特征[J]. 人民长江, 2014, 45(增刊 1): 26-28. (XU L L, ZHANG W. Analysis on characteristics of precipitation and temperature changes in recent 42 years in Xuzhou, Jiangsu Province [J]. Yangtze River, 2014, 45(S1): 26-28. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2014.s1.001.
- [13] 雷廷, 张兆吉, 费宇红, 等. 海河平原 1956 年-2011 年降水特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1): 32-36, 41. (LEI T, ZHANG Z J, FEI Y H, et al. Analysis of precipitation characteristics in the Haihe River Plain from 1956 to 2011 [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(1): 32-36, 41. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2014.01032.
- [14] 方宏阳, 栾清华, 赵志轩, 等. 变化环境下白洋淀湿地演变驱动机制分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(8): 107-111. (FANG H Y, LUAN Q H, ZHAO Z X, et al. Analysis of driving mechanism of Baiyangdian Wetland Evolution Under Changing environment [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(8): 107-111. (in Chinese)) DOI: 1000-7709(2012)08-0107-05.
- [15] 张宇, 钟平安, 万新宇, 等. 近 57 年江苏沿海降水量演变特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(2): 198-201, 205. (ZHANG Y, ZHONG P A, WAN X Y, et al. Evolution characteristics of precipitation along the coastal area of Jiangsu Province in recent 57 years [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(2): 198-201, 205. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2015.02.002.
- [16] 祁顺杰, 陈皓锐. Morlet 小波在降雨的多时间尺度分析中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(3): 79-82. (QI S J, CHEN H R. Multiple time scale analysis on yearly rainfall with Morlet wavelet analysis [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(3): 79-82. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2010.03079.
- [17] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999. (WEI F Y. Modern climate statistical diagnosis prediction technology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999. (in Chinese))
- [18] TAO H, GEMMER M, BAI Y G, et al. Trends of streamflow in the Tarim River Basin during the past 50 years: Human impact or climate change [J]. Journal of Hydrology, 2011, (400): 1-9.
- [19] 邱临静, 郑粉莉, 尹润生. 1952-2008 年延河流域降水与径流的变化趋势分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 49-53. (QIU L J, ZHENG F L, YIN R S. Trends analysis of precipitation and stream flow during 1952-2008 in Yanhe River Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(3): 49-53. (in Chinese)) DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2011.03.029.
- [20] 张峰, 雷晓辉, 蒋钟, 等. 近 55 年珠江上游流域降水演变规律[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(1): 49-54. (ZHANG F, LEI X H, JIANG Y Z, et al. Analysis of spatial and temporal precipitation variations for the upstream of Pearl River Basin during the past 55 years [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(1): 49-54. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2012.01049.

(下转第 79 页)

- j. hydro. 2018. 03. 016.
- [15] 何流. 人工降雨模拟地表污染物冲刷规律及初期效应分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011. (HE L. Research on surface contaminant washoff rule and the first flush effect with artificial rainfall simulation [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [16] 张超, 姜应和, 金建华, 等. 不同下垫面径流污染物冲刷规律研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(08): 128-132. (ZHANG C, JIANG Y H, JIN J H, et al. Study on rainwater pollutant washoff rate in different underlying surface [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(08): 128-132. (in Chinese)). DOI: 10.3963/j.issn.1674-4431.2012.08.025.
- [17] XIAO Y, ZHANG T T, LIANG D F, et al. Experimental study of water and dissolved pollutant runoffs on impervious surfaces [J]. Journal of hydrodynamics, 2016, 28(1): 162-165. DOI: 10.1016/S1001-6058(16)60617-0.
- [18] SANSALONE J J, KORAN J M, SMITHSON J A, et al. Physical characteristics of urban roadway solids transported during rain events [J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 1998, 124(4): 427-440. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(1998)124:5(427).
- [19] SHENG Y, YING G, SANSALONE J. Differentiation of transport for particulate and dissolved water chemistry load indices in rainfall runoff from urban source area watersheds [J]. Journal of Hydrology, 2008, 361(1-2): 144-158. DOI: 10.1016/j.jhydro.2008.07.039.
- [20] DENG Z Q, LIMA J L M P D, SINGH V P. Transport rate based model for overland flow and solute transport: Parameter estimation and process simulation [J]. Journal of Hydrology, 2005, 315(1): 220-235. DOI: 10.1016/j.jhydro.2005.03.042.
- [21] HE Z G, WENG H X, HO H C, et al. Soil erosion and pollutant transport during rainfall runoff processes [J]. Water Resources, 2014, 41(5): 604-611. DOI: 10.1134/S0097807814050170.
- [22] 王宝山, 黄廷林, 聂小保, 等. 不透水表面雨水径流污染物冲刷规律研究 [J]. 环境工程学报, 2010, 4(09): 1950-1954. (WANG B S, HUANG T L, NIE X B, et al. Study on rainwater pollutant washoff rate in impervious surface [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(09): 1950-1954. (in Chinese))
- [23] ALLEY W M, SMITH P E. Estimation of accumulation parameters for urban runoff quality modeling [J]. Water Resources Research, 1981, 17(6): 1657-1664. DOI: 10.1029/WR017i006p01657.
- [24] ALLEY W M. Estimation of impervious area washoff parameters [J]. Water Resources Research, 1981, 17(4): 1161-1166. DOI: 10.1029/WR017i004p01161.
- [25] MILLAR R G. Analytical determination of pollutant washoff parameters [J]. Journal of Environmental Engineering, 1999, 125(10): 989-992. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(1999)125:10(989).

(上接第 67 页)

- [21] 丁华龙, 肖卫国, 陈晓宏, 等. 滨江流域降水时空演变规律分析 [J]. 水文, 2014, 34(5): 67-74. (DING H L, XIAO W G, CHEN X H, et al. Analysis of precipitation change trend in Binjiang River Basin [J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(5): 67-74. (in Chinese)) DOI: 1009-0852(2014)05-0067-08.
- [22] 李钦伟, 张端梅. 吉林省九台市作物生育期降水量特征分析 [J]. 吉林水利, 2014(1): 48251. (LI Q W, ZHANG D M. Analysis of characteristics of precipitation of crop growth period in jiutai city, Jilin province [J]. Jilin Water Resources, 2014(1): 48251. (in Chinese)) DOI: 10.15920/j.cnki.22-1179/tv.2014.01.001.
- [23] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. (WANG W S, DING J, LI Y Q. Hydrological wavelet analysis [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese))
- [24] 胡建桥, 刘万锋, 常周梅, 等. 兰州市 1951—2015 年降水量变化特征研究 [J]. 水利水电技术, 2017, 48(4): 8-12. (HU J Q, LIU W F, CHANG Z M, et al. Study on variation characteristics of precipitation in Lanzhou from 1951 to 2015 [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(4): 8-12. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2017.04.002.
- [25] 马吉巍, 郭翔宇, 付强, 等. 佳木斯市近 60 年降水量演变规律分析 [J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1): 6-9. (MA J W, GUO X Y, FU Q, et al. Variation rule of precipitation in Jiamusi City in recent 60 years [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(1): 6-9. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2015.01.002.
- [26] 王晓琳. 基于小波分析的邯郸山区水文特性分析与预测 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2012. (WANG X L. The analysis and prediction of hydrological characteristics based on Wavelet Analysis in Handan mountain area [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2012. (in Chinese))
- [27] 肖鹏. 洞庭湖流域水资源演变归因分析 [D]. 北京: 清华大学, 2014. (XIAO P. Analysis on the evolution of water resources in Dongting Lake Basin [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014. (in Chinese))
- [28] 杨贵羽, 王知生, 王浩, 等. 海河流域 ET<sub>0</sub> 演变规律及灵敏度分析 [J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 409-415. (YANG G Y, WANG Z S, WANG H, et al. Potential evapotranspiration evolution rule and its sensitivity analysis in Haihe River basin [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 409-415. (in Chinese)) DOI: 1001-6791(2009)03-0409-07.