

## Characteristics and Influences of Precipitation Tendency in Foshan under Environmental Variations

Ningning Shi<sup>1,2</sup>, Jiayi Liu<sup>1</sup>, Yanliang Kuang<sup>1</sup>, Yueying Zhou<sup>1</sup>, Qiang Liao<sup>1</sup>, Zufa Liu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Center of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou

<sup>2</sup>Nanjing Water Planning and Designing Institute Co. Ltd, Nanjing

Email: [eeslzf@mail.sysu.edu.cn](mailto:eeslzf@mail.sysu.edu.cn)

Received: Sep. 30<sup>th</sup>, 2013; revised: Nov. 20<sup>th</sup>, 2013; accepted: Nov. 26<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2014 Ningning Shi et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2014 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Ningning Shi et al. All Copyright © 2014 are guarded by law and by Hans as a guardian.

**Abstract:** Precipitation data of main precipitation stations of Foshan's 5 zones during 1956-2010 are analyzed by Thiessen Polygons to explore the average monthly precipitation of Foshan. The method of linear regression is used to detect the variation characteristics of monthly and quarterly precipitation. The method of moving average and Mann-Kendall are used to explore the variation tendency, significance and mutation detection of Foshan's precipitation during those 50 years. Combined with the variation of climatic environment, these conclusions are drawn: the precipitation of Foshan is getting higher during 1956-2010, and a mutation of rising was detected in 1997; Foshan's annual average precipitation is positively correlated with the annual average temperature of Guangdong; the precipitation of summer is mainly controlled by urban heat island caused by human activities. No regular pattern is detected in annual variation of extreme precipitation.

**Keywords:** Foshan; Environmental Variation; Precipitation Characteristics; Influences; Tendency Analysis

## 变化环境下的佛山降雨趋势特征及影响因素分析

施宁宁<sup>1,2</sup>, 刘嘉仪<sup>1</sup>, 邝燕良<sup>1</sup>, 周月英<sup>1</sup>, 廖强<sup>1</sup>, 刘祖发<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中山大学水资源与环境研究中心, 广州

<sup>2</sup>南京市水利规划设计院有限责任公司, 南京

Email: [eeslzf@mail.sysu.edu.cn](mailto:eeslzf@mail.sysu.edu.cn)

收稿日期: 2013年9月30日; 修回日期: 2013年11月20日; 录用日期: 2013年11月26日

**摘要:** 本文通过对佛山市5个区的主要雨量站在1956~2010年的降雨量数据, 用泰森多边形法进行统计整理得出佛山市月降雨量。用一元线性回归法线性拟合月、季的降雨量变化特征, 再通过滑动平均法和 Mann-Kendall 检验法分析佛山年降雨量在过去50多年间的变化趋势, 并进行显著性及突变检验, 得出佛山市降雨情况在1956~2010年呈上升趋势, 在1997年发生降雨量上升的突变。结合气候环境的变化, 认为佛山市年降雨量基本随年平均温度的升高而升高, 与广东省温度变化正相关。此外, 佛山市夏季降雨量的主要影响因素为人类活动造成的城市热岛效应, 极端降雨量的年际变化尚未发现规律。

**关键词:** 佛山; 变化环境; 降雨特征; 影响; 趋势分析

\*通讯作者。

## 1. 引言

近年来, 极端气候的高频发生使人们更加关注环境变化对气候现象的影响。气候变化的同时, 降雨量也出现了明显的变化, 并且其时空变化特点更复杂<sup>[1]</sup>。一个地区的降雨情况关系到该地区的民生与发展, 干旱与洪涝都严重影响居民生活, 给社会生产带来重大的损失。国内已有很多针对气候变化所带来的影响的研究<sup>[2,3]</sup>, 如施雅风提出中国西北气候可能由暖干向暖湿转型<sup>[4]</sup>, 左洪超等人对 50 年来中国的气温及降雨变化进行了分析, 重点介绍了华北华中及西部地区的降雨量变化特征<sup>[5]</sup>, 陈华等人对汉江流域的降雨气温时空变化特征进行了预测<sup>[6]</sup>。佛山市近年来的降雨变化较大, 并于环境变化有一定的关系, 目前, 针对佛山市的降雨情况的研究还比较少, 所选取的雨量站也不够全面<sup>[7-11]</sup>。

佛山市位于广东省中南部, 地处珠江三角洲腹地, 东经 113°06', 北纬 23°02', 珠江水系中的西江、北江及其支流贯穿全境。东倚广州, 距离港、澳两区约 100 公里, 是珠三角的经济重地, 全市总面积 3848.49 平方公里。暴雨是佛山市的主要气象灾害。本文在前人的基础上, 对佛山全市范围内选取的三水、大沥、紫洞、南海、高明、西坑等 8 个主要雨量站在过去 50 多年的数据资料进行了分析, 对佛山市降雨情况的变化特征和未来趋势进行了研究与推测, 并尝试找出佛山市降雨量变化的某种规律, 分析其对社会生产与农业的影响, 为佛山市防洪除涝等防灾工作提供气候背景依据。

## 2. 研究数据与方法

### 2.1. 数据来源

本文数据采用了佛山市禅城、南海、顺德、高明、三水五个辖区的主要雨量站自 1956~2010 年的月降雨量, 通过泰森多边形法计算出佛山市的月降雨量。对于有数据缺失的月份, 采用空间插补法进行处理。气候资料主要参考自广东省月气候评价资料。

### 2.2. 研究方法

对月降雨量数据按照季节分组, 并摘取最大(小)月降雨量。用一元线性回归法逐月分析 1956 年以来佛山市月降雨量变化趋势, 用滑动平均法研究 1956

年以来的佛山市年降雨量, 并做出一元多次函数进行拟合、印证。为检验以上分析的趋势变化的显著性, 采用 Mann-Kendall 检验法进行显著性检验, 找出该趋势变化的突变点及趋势显著的区间。最后, 联系环境因素, 分析降雨量变化的原因。

#### 2.2.1. 一元线性回归法

降雨量变化的线性回归方程可表示为:

$$P = at + b \quad (1)$$

式中:  $P$  为降雨量;  $t$  为时间;  $b$  为常数;  $a$  为降雨变化趋势。当  $a > 0$  时, 表示降雨量呈增加趋势;  $a < 0$  时, 表示降雨量呈减少趋势。 $a$  的绝对值等于单位时间  $P$  的变化量。

#### 2.2.2. 滑动平均法

滑动平均法是趋势拟合技术最基础的方法, 它相当于低通滤波器。用确定时间序列的平滑值来显示变化趋势。对样本量为  $n$  的序列  $x$ , 其滑动平均序列表示为:

$$\hat{x}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_{t+i-1} \quad (j=1, 2, \dots, n-k+1) \quad (2)$$

式中:  $k$  为滑动长度。可以证明, 经过滑动平均后, 序列中短于滑动长度的周期大大削弱, 显现出变化趋势<sup>[12]</sup>。

#### 2.2.3. Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall 法用来检验水文气候要素时间序列的趋势, 它具有检测范围宽、不受少数异常值干扰、定量化程度高的优点<sup>[13]</sup>。

对于具有  $n$  个样本量的时间序列  $x$ , 构造一秩序列:

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k=2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

其中,

$$r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i = x_j \\ -1 & x_i < x_j \end{cases} \quad (j=1, 2, \dots, i) \quad (4)$$

可见, 秩序列  $s_k$  是第  $i$  时刻数值大于  $j$  时刻数值的个数累积数。在时间序列随机独立的假定下, 定义统计量:

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{\text{Var}(s_k)}} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

其中  $UF_1 = 0$ ,  $E(s_k)$ ,  $\text{Var}(s_k)$  是累计数  $s_k$  的均值和方差, 当  $x_1, x_2, \dots, x_n$  相互独立且有相同连续分布时, 他们可由下式算出:

$$\begin{aligned} E(s_k) &= \frac{n(n-1)}{4} \\ \text{Var}(s_k) &= \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \end{aligned} \quad (6)$$

$UF_i$  服从标准正态分布, 它是按时间序列  $x$  顺序计算出的统计量序列。给定显著性水平  $\alpha$ , 查正态分布表, 若  $|UF_i| > U_\alpha$ , 则表明序列存在明显的趋势变化。本文取 0.05 的显著性水平, 则  $UF_i$  的绝对值大于 1.96 时, 序列存在明显的变化趋势。

按时间序列  $x$  逆序  $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$ , 再重复上述过程。同时使  $UB_k = -UF_k, k = n, n-1, \dots, 1, UB_1 = 0$ 。分别将  $UF_k$  和  $UB_k$  两个统计量序列曲线和  $\pm 1.96$  两条直线绘制在一张图上。 $UF_k$  或  $UB_k$  为正值时, 表示序列呈升高趋势; 为负值时, 序列呈降低趋势。超过临界线的范围确定为出现突变的时间区域。如果  $UF_k$  和  $UB_k$  两条曲线出现交点且在临界线之间, 则交点对应的时刻便是突变开始的时间。

#### 2.2.4. 相关性检验

国内外的许多文献研究了时间序列的相关性对 M-K 检验结果的影响<sup>[14]</sup>。在对这些雨量站的降雨量资料进行 M-K 检验之前, 要检验降雨资料的相关性。检验相关性的计算方法是:

$$\rho_m = \frac{\text{Cov}(X_t, X_{t+m})}{\text{Var}(X_t)} = \frac{\frac{1}{n-m} \sum_{t=1}^{n-m} (X_t - \bar{X})(X_{t+m} - \bar{X})}{\frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})^2} \quad (7)$$

式中  $X_t$  是待检验时间序列;  $\bar{X}$  是待检验序列的均值;  $X_{t+m}$  是滞后  $m$  年的待检验时间序列。  $-1 < \rho_m < 1$ ,  $m = 0$  时,  $\rho_m = 1$ 。对于独立的随机变量如果  $m \neq 0$ ,  $\rho_m \approx 0$ 。

检验序列是否独立的置信区间的计算方法为:

$$\frac{U}{L} = \frac{-1 \pm Z_{1-\alpha/2} \sqrt{n-2}}{n-1} \quad (8)$$

式中:  $U$ 、 $L$  是序列最大值和最小值;  $\alpha$  是置信度, 在

本文中采用 5% 的置信度;  $Z$  是在  $\alpha$  置信水平下的正态分布的临界值;  $n$  是被检验的时间序列的长度。如果  $\rho_m$  值落在 95% 的置信区间内, 说明序列相关性不显著, M-K 对序列的检验影响不明显。

### 3. 佛山降水趋势研究

#### 3.1. 月降雨量变化趋势

为了研究佛山市各月降雨量的年际变化, 选取了 1957 至 2010 年以来每个月的月降雨量并做趋势图(图 1)。

由图 1, 可以对佛山市月降雨量的年际变化有一个大体走向的认识。一月份的降雨量总体平稳, 但在 1969 年和 1983 年出现了两个较大的峰值。二月份的降雨量呈下降趋势, 平均每年下降 0.35 mm, 但有多多个年份降雨量在 50 mm 以下, 此外在 1983 年达到了突出的峰值。三月份的降雨量基本稳定在 50~150 mm 之间, 也在 1983 年达到了峰值。4 月份的降雨量总体呈上升趋势, 平均每年上升约 0.25 mm。5 月份的降雨量总体呈下降趋势, 平均每年约下降 0.40 mm。6 月份的降雨量呈现较明显的上升趋势, 平均每年上升约 0.49 mm, 2008 年甚至达到了 633 mm。7 月份的降雨量总体呈下降趋势, 但不是特别明显, 平均每年约下降 0.10 mm。8 月份的降雨量总体呈上升趋势, 平均每年上升 0.28 mm, 但最大的两个降雨量出现在 1970 年以前。9 月份的降雨量呈现下降趋势, 平均每年下降约 0.30 mm, 但最大与最小降雨量都出现在 1970 年以前。10 月份降雨量年际变化幅度较大, 有多年 10 月份降雨量记录小于 10 mm 甚至为 0, 且 90 年代以来, 降雨量小于 50 mm 的年份较以往更为密集, 但是 10 月份降雨量最大的两年分别达到了 288 mm 及 275 mm, 总体呈下降趋势, 平均每年约下降 0.25 mm。11 月份的降雨量在年际变化上同样表现出较大的差异, 总体降雨量偏少, 在 150 mm 以内, 且呈现下降趋势, 平均每年下降约 0.32 mm。12 月份的降雨量进一步减少, 多数集中在 40 mm 以内, 总体呈现微弱的上升趋势。

#### 3.2. 最大(小)月降雨量变化趋势

为分析极端降雨的变化情况, 从 1957~2010 年的降雨量资料中提取每一年的最大与最小月降雨量。分

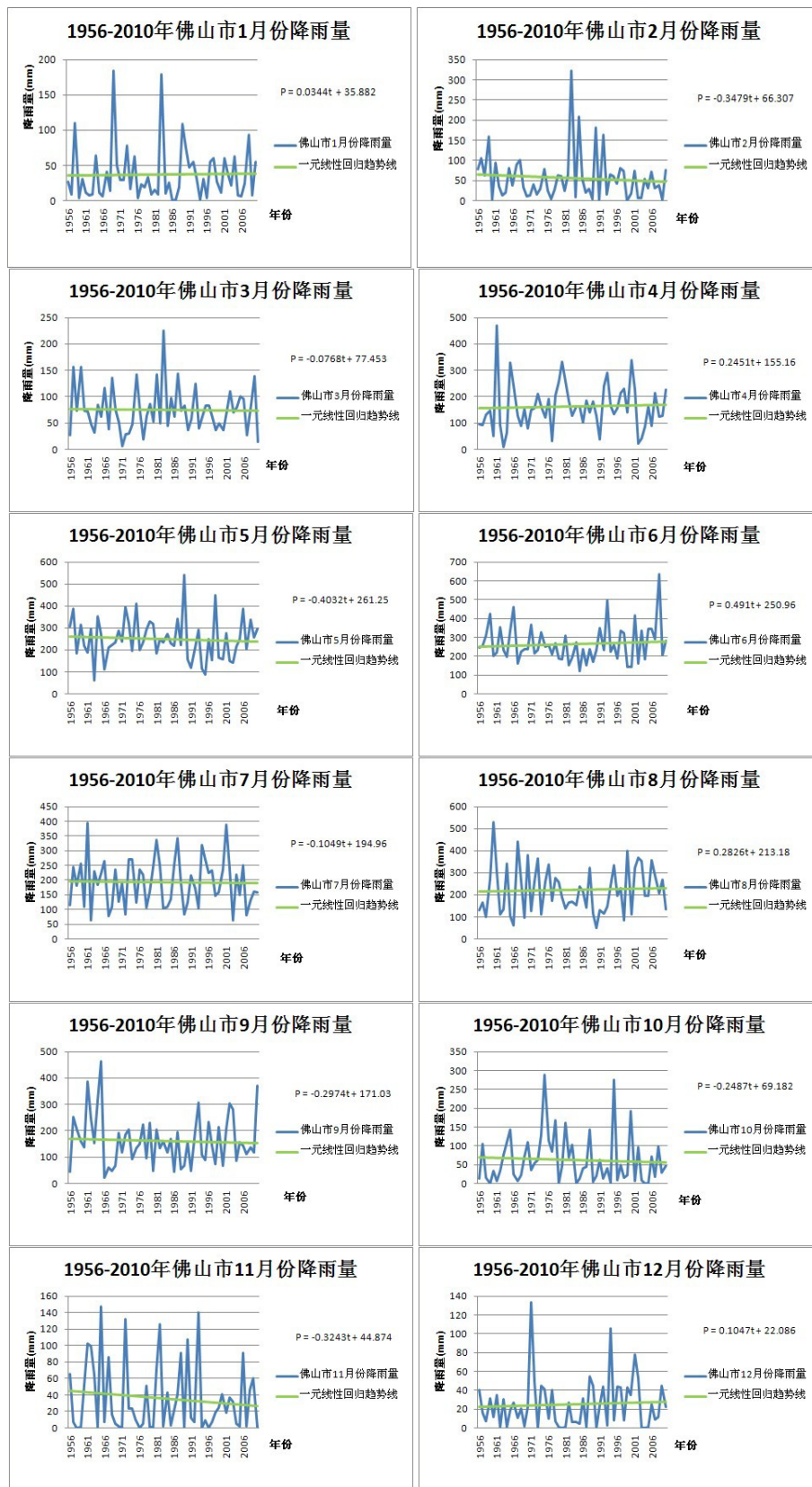


Figure 1. Foshan's interannual precipitation variations of 12 months during 1956-2010  
 图 1. 佛山市 1956-2010 年各月降雨量年际变化



别做出变化趋势图(图 2)。

由图可见佛山市最大与最小月降雨量都呈降低趋势。其中最小月降雨量均在 30 mm 以内, 变化幅度比较平稳。最大月降雨量呈现较大趋势的波动, 最大差值超过 400 mm, 平均每年减小约 0.30 mm。

### 3.3. 四季降雨量变化趋势

按照惯例, 把 3 月~5 月定为春季; 6 月~8 月定为夏季, 9 月~11 月定为秋季; 12 月~2 月定为冬季。分别计算出各个季节的总降雨量, 并做出趋势线, 如下图(图 3)所示:

同样的, 从图中可以对各个季节降雨量的年际变化有一个初步的了解。春季的降雨量较多, 每隔 15 年左右出现一个大的反差, 多数在 500 mm 上下波动, 呈现轻微的下陷趋势, 平均每年约下降 0.23 mm。夏季的降雨量在近十年来有大幅度增长, 总体呈现较明显的增长趋势, 平均每年上升约 0.67 mm。秋季的降雨量则呈现明显的下降趋势, 在 1965 年的 754 mm 后, 大多数年份的秋季降雨量都在 400 mm 以下, 平均每年下降约 0.87 mm。冬季的降雨量基本平稳在 200 mm 以下, 在 1983 年达到了罕见的 529 mm 最大值。

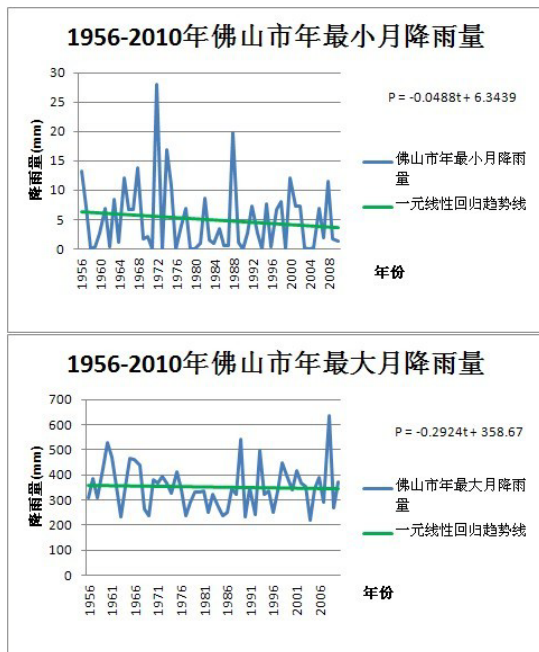


Figure 2. Foshan's interannual minimum & maximum precipitation variations during 1956-2010  
图 2. 佛山市 1956~2010 年最大(小)月年变化趋势图

### 3.4. 年降雨量变化趋势

年降雨量反映佛山市水资源的总体丰枯情况, 并与水资源的规划、开发利用以及保护等, 都有密切的关联, 因此年降雨量的变化趋势是本文的重点研究内容。为了分析佛山市降雨量在 55 年间各时段的变化趋势, 本文对原年降雨量曲线分别作七年、九年、十一年滑动平均和一元三次函数拟合。如图 4 所示。

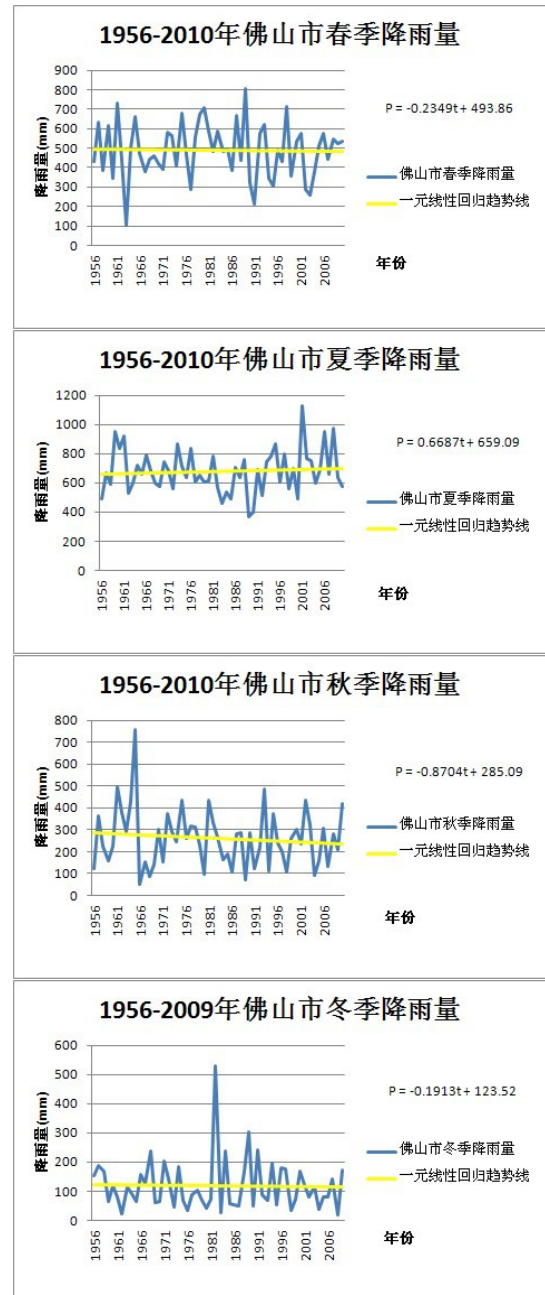


Figure 3. Foshan's interannual precipitation variations of 4 seasons during 1956-2010  
图 3. 佛山市 1956~2010 年四季降雨量年际变化

由图可见, 年降雨量序列经过滑动平均处理后, 序列中短于滑动长度的周期大大削弱, 呈现出变化趋势。一元三次函数的拟合效果也大致符合滑动平均的处理结果。由一元三次函数的拟合公式可得,  $x$  在等于 9 和 37 时, 分别为两个极值点, 即佛山市降雨量在 1965 年左右及 1993 年左右分别达到了最大与最小雨量。从 50 年代中期至 60 年代中期, 佛山市的年降雨量呈缓慢上升的趋势, 从 60 年代末至 90 年代初期, 年降雨量有减少的趋势, 此后一直到 2010 年, 年降雨量呈较明显的上升趋势, 其上升速度较前 40 年的变化速率都有明显的加快, 并且 2010 年处的数值大于上一个周期的最高点。因此, 初步认为 55 年间佛山市的年降雨量未呈现明显的周期变化。按照此趋势, 佛山市降雨量在 2010 年之后仍将有一段时期呈上升趋势。

### 3.5. 降水趋势的显著性检验和突变检验

从以上的初步分析中, 可以发现高明区的年降雨量经历了一个先增加、后减少、再增加的趋势。为了进一步研究佛山市年降雨量的变化, 利用 Mann-Kendall 法对年降雨量变化趋势进行显著性检验和突变检验。

首先进行相关性检验, 检验结果如表 1。

第一列“*To Lag*”代表滞后量  $m$  的范围, 如“6”, 代表这一行在 Autocorrelations 区对应的是滞后量由 1 至 6 分别求得的相关性系数。而第四列数据均大于 0.05, 则证明佛山市降雨量不具有自相关性。

接下来用 Mann-Kendall 方法检验其显著性和突变情况, 绘制  $UF_k$  和  $UB_k$  的序列曲线如图 5。

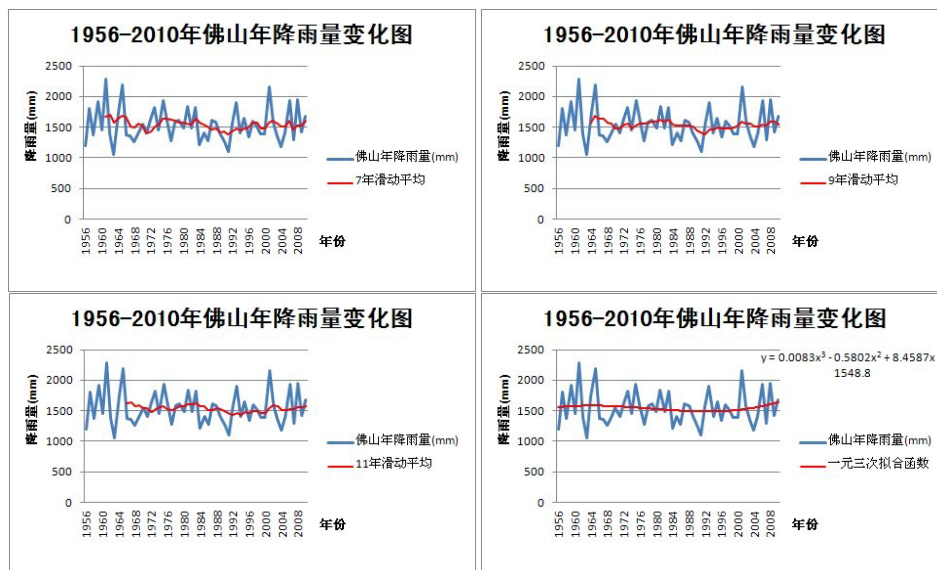


Figure 4. Variations of each period  
图 4. 各时段变化趋势

Table 1. Autocorrelations  
表 1. 自相关检验结果

To Lag	Chi-Square	DF	Pr > ChiSq	Autocorrelations					
6	5.08	6	0.5342	-0.151	-0.087	-0.216	0.086	0.026	0.005
12	7.42	12	0.8283	-0.034	0.107	-0.092	-0.076	-0.047	-0.072
18	12.13	18	0.8403	0.053	0.182	-0.054	-0.046	-0.082	0.109
24	14.99	24	0.9211	-0.061	0.061	-0.042	0.104	0.027	-0.096
30	21.34	30	0.8770	-0.120	-0.034	0.005	0.159	-0.060	-0.104
36	28.81	36	0.7970	-0.036	-0.015	0.040	-0.017	-0.033	0.203
42	37.89	42	0.6517	0.006	-0.082	-0.161	0.076	0.081	0.012
48	46.23	48	0.5455	-0.070	0.023	-0.025	-0.061	0.103	-0.054
54	63.76	54	0.1708	0.113	-0.080	0.065	-0.048	0.020	-0.012

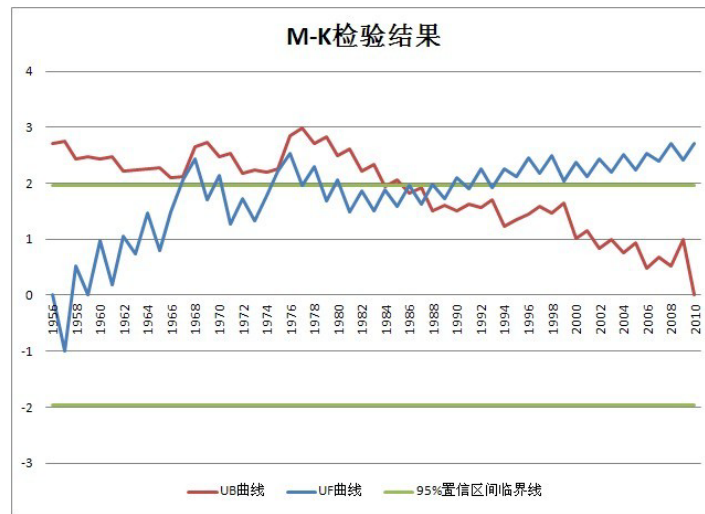


Figure 5. The M-K trends of Foshan's annual precipitation during 1956-2010  
图 5. 佛山市 1956~2010 年降雨量 M-K 检验结果

M-K 检验结果表明, 佛山市的降雨量在 1956 年以来有明显的上升趋势。在 1967 年以前, 降雨量的上升趋势不明显; 70 年代到 80 年代期间, 上升趋势愈发明显, 在临界线附近波动; 90 年代以来, 这种上升趋势均大大超过 0.05 临界线, 甚至有超过 0.001 临界线 ( $U_{0.001} = 2.56$ ) 的趋势。因此, 佛山市降雨量的上升趋势是显著的。根据  $UF_k$  和  $UB_k$  曲线交点的位置, 佛山年降雨量上升是突变现象, 约在 1987 年开始。

#### 4. 变化环境对降水变化的影响

由上述降雨量出发, 比照与降雨量有关的环境因素, 分析佛山的降雨量变化是否与环境因素的变化相关。众所周知, 过去 100 年来, 由于人类工业的高度发展对环境的改造作用以及气候的波动, 引起全球性气候变暖。国内对我国气候变化的研究显示: 我国的气候变化情况和全球气候变化趋势基本一致, 广东省年平均气温在 20 世纪 80 年代之前基本平稳, 80 年代中后期以后增温幅度明显增大, 且增温趋势在干旱的季节较明显, 潮湿季节增温较缓<sup>[15]</sup>。

对照佛山市降雨量的变化情况, 佛山降雨主要受东南亚季风活动带来的潮湿气流的强度影响, 佛山市降雨量从上世纪 60 年开始呈现明显的上升趋势, 并且在 1987 年出现降雨量上升的突变, 这一变化规律基本符合广东省年平均气温的变化规律, 即降雨量随着气温的上升而升高。根据预测, 珠江流域在 21 世纪

前 50 年的气候变化趋势为朝更湿润的气候变化, 过去 50 年依然属于珠江流域的较干早期, 可以估计, 佛山市降雨量在未来 40 年内依然呈现升高趋势<sup>[16]</sup>。

佛山地势平坦, 海拔偏低, 主要在 0.7~2.5 米, 在珠江流域属于低地。而珠江流域海拔较低处降雨量增加趋势愈明显<sup>[17]</sup>, 也为佛山年降雨量的增加趋势提供依据。珠江流域地势较低处在冬季与春季的降雨量呈现上升趋势, 而佛山市春季和冬季的降雨量呈轻微的下降趋势, 且夏季降雨量呈上升趋势, 与东南亚季风活动规律不符合, 这两个异常现象还需考虑地形等其他因素对降雨量的影响<sup>[18]</sup>, 留待作进一步研究。

初步认为, 由于在上世纪 80 年代以来佛山市工业的飞速发展, 城市热岛效应以及城市化的人类活动造成的夏季高温对佛山市降雨量的促进作用, 胜过了东亚夏季风减弱给佛山降雨带来的影响<sup>[19]</sup>。佛山市年最大月和最小月降雨量在研究期间呈轻微下降趋势, 但目前没有显著的相关原因可以证明佛山市未来的最大月与最小月降雨量仍然会维持这一变化趋势<sup>[20]</sup>。

#### 5. 结语

通过线性拟合与 Mann-Kendall 检验法分析表明, 佛山市降雨量在 1956~2010 年期间呈显著的升高趋势, 并且随着珠江流域的气候整体向潮湿方向变化, 结合佛山市所处的地势环境条件, 初步认为佛山市降雨量在接下去四十年内依然会呈现上升趋势。佛山市降雨



量主要受东南亚季风带来的潮湿空气所影响, 而东南亚夏季风在过去 50 年呈现减弱的变化, 受此季风影响, 其夏季降雨量仍然呈现升高趋势, 可以认为佛山市夏季降雨量的影响因素更主要是人类活动及城市热岛效应造成的区域高温, 而佛山市洪涝灾害发生于夏季, 因此, 有必要对佛山市人类活动对降雨量的影响做进一步的研究, 以及时缓解洪涝灾害对佛山的不利影响。此外, 佛山市春季与冬季的降雨量变化与整个珠江流域海拔低地的同时期降雨量变化趋势相反, 其原因也需要后续研究。佛山市最大月与最小月降雨量尚没有发现其与变化环境的关系。

## 致谢

感谢国家自然科学基金项目的支持, 感谢第十一届中国水论坛推荐!

## 基金项目

基于多重工作假说的流域水文模拟方法与应用研究——以华南湿润区为例(51379223)。

## 参考文献 (References)

- [1] 许吟隆, 薛峰, 林一骅. 不同温室气体排放情景下中国 21 世纪地面气温和降水变化的模拟分析[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(2): 209-217.  
XU Yinlong, XUE Feng, LIN Yihua. Changes of surface air temperature and precipitation in China during the 21st century simulated by HadCM2 under different greenhouse gas emission scenarios. *Climatic and Environmental Research*, 2003, 8(2): 209-217. (in Chinese)
- [2] 陈仁升, 康尔泗, 蓝永超, 等. 河西地区近 50a 来年径流、降水和气温变化趋势分析[J]. 干旱区资源与环境, 2001, 15(4): 51-56.  
CHEN Rensheng, KANG Ersi, LAN Yongchao, et al. Variance tendency of annual runoff, precipitation and temperature in Hexi region in 50-years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2001, 15(4): 51-56. (in Chinese)
- [3] 徐宗学, 张楠. 黄河流域近 50 年降水变化趋势分析[J]. 地理研究, 2006, 25(1): 27-34.  
XU Zongxue, ZHANG Nan. Long-term trend of precipitation in the Yellow River basin during the past 50 years. *Geographical Research*, 2006, 25(1): 27-34. (in Chinese)
- [4] 施雅风, 沈永平. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初探[J]. 科技导报, 2003, 2: 54-57.  
SHI Yafeng, SHEN Yongping. Signal, impact and outlook of climatic shift from warm-dry to warm-humid in northwest China. *Science and Technology Review*, 2003, 2: 54-57. (in Chinese)
- [5] 左洪超, 吕世华, 胡隐樵. 中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析[J]. 高原气象, 2004, 23(2): 238-244.  
ZUO Hongchao, LV Shihua, HU Yinqiao. Variations trend of yearly mean air temperature and precipitation in China in the last 50 years. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(2): 238-244. (in Chinese)
- [6] 陈华, 郭生练, 郭海晋, 等. 汉江流域 1951~2003 年降水气温时空变化趋势分析[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(3): 340-345.  
CHEN Hua, GUO Shenglian, GUO Haijin, et al. Temporal and spatial trend in the precipitation and temperature from 1951 to 2003 in the Hanjiang basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(3): 340-345. (in Chinese)
- [7] 陈志芳. 佛山降水变化的小波特征[J]. 气象科技, 2002, 30(4): 214-217.  
CHEN Zhifang. Wavelet feature of rainfall variation in Foshan. *Meteorological science and technology*, 2002, 30(4): 214-217. (in Chinese)
- [8] 王亚雄, 黄淑娴, 刘祖发, 等. 变化环境下北江下游年径流量的加权马尔可夫链预测[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 754-760.  
WANG Yaxiong, HUANG Shuxian, LIU Zufu, et al. Forecast of yearly river runoff in lower reaches of Beijiang River by Weighted Markov-Chain Method in changing environments. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4): 754-760. (in Chinese)
- [9] 黄先香, 炎利军, 李与广, 等. 佛山市暴雨的气候特征及天气系统配置[J]. 广东气象, 2011, 33(2): 12-15.  
HUANG Xianxiang, YAN Lijun, LI Yuguang, et al. Climate characteristics and the weather pattern of torrential rain in Foshan. *Guangdong Meteorology*, 2011, 33(2): 12-15. (in Chinese)
- [10] 张小霞, 陈小芸, 杨宇声, 等. 佛山一场大暴雨的强降水特征[J]. 广东气象, 2006, 2: 40-46.  
ZHANG Xiaoxia, CHEN Xiaoyu, YANG Yusheng, et al. Analysis on the characteristics of a large rainstorm in Foshan. *Guangdong Meteorology*, 2006, 2: 40-46. (in Chinese)
- [11] 刘德地, 陈晓宏, 楼章华. 基于云模型的降雨时空分布特性分析[J]. 水利学报, 2009, 40(7): 850-857.  
LIU Dedi, CHEN Xiaohong, LOU Zhanghua. Analysis on characteristics of spatial-temporal precipitation distribution based on cloud model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(7): 850-857. (in Chinese)
- [12] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 北京气象出版社, 1999.  
WEI Fengying. The current statistical climatic diagnosis and forecasting technology. Beijing: Beijing Meteorological Press, 1999. (in Chinese)
- [13] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482-493.  
FU Congbin, WANG Qiang. The definition and detection of the abrupt climatic change. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1992, 16(4): 482-493. (in Chinese)
- [14] KUMAR, S. and MERWADE V. Streamflow trends in Indiana: Effects of long term persistence, precipitation and subsurface drains. *Journal of Hydrology*, 2009, 374(1-2): 171-183.
- [15] 顾骏强, 杨军. 中国华南地区气候和环境变化特征及其对策[J]. 资源科学, 2005, 27(1): 128-135.  
GU Junqiang, YANG Jun. Features of climatic and environmental changes in the south China. *Resources Science*, 2005, 27(1): 128-135. (in Chinese)
- [16] LIU, B., ZHAI, J. Q., HARTMANN, H., et al. Dryness/wetness variations in ten large river basins of China during the first 50 years of the 21st century. *Quaternary International*, 2010, 226(1-2): 101-111.
- [17] CHEN DAVID, Y. Q., ZHANG, Q., et al. Precipitation variability (1956-2002) in the Dongjiang River (Zhujiang River Basin, China) and associated large-scale circulation. *Quaternary International*, 2011, 244: 130-137.
- [18] 郭金兰, 刘凤辉, 杜辉, 等. 一次地形作用产生的强降雨过程分析[J]. 气象, 30(7): 12-17.  
GUO Jinlan, LIU Fenghui, DU Hui, et al. Analysis of heavy orographic rainfall in Beijing. *Meteorology*, 2004, 30(7): 12-17. (in Chinese)



- [19] 宋敏, 商良, 邵东国. 珠三角地区城市雨洪过程模拟与计算——以佛山市南海区北村水系为例[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(4): 260-263.  
SONG Min, SHANG Liang, SHAO Dongguo. Simulation and calculation of storm runoff process for Pearl River Delta megapopolis—A case study of the North Village water system, Nanhai District, Foshan Municipality. *Journal of Safety and Environment*, 2011, 11(4): 260-263. (in Chinese)
- [20] FISCHER, T., GEMMER, M., LIU, L. L., et al. Temperature and precipitation trends and dryness/wetness pattern in the Zhujiang River Basin, South China, 1961-2007. *Quaternary International*, 2011, 244: 138-148.