

DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2018245

杨向权,肖静.基于Mann-Kendall的海南岛降水变化趋势及突变分析[J].中国防汛抗旱,2020,30(2):27-30. YANG Xiangquan, XIAO Jing. Analysis of precipitation change trend and mutation in Hainan Island based on Mann-Kendall[J]. China Flood & Drought Management, 2020, 30(2): 27-30. (in Chinese)

基于Mann-Kendall的海南岛降水变化趋势及突变分析

杨向权¹ 肖静²

(1. 海南省水务厅,海口571126; 2. 海南省水文水资源勘测局,海口570203)

摘要:通过应用Mann-Kendall检验法对海南岛18个水文气象站1986—2015年的逐日降水观测资料进行分析,并辅以滑动 t 检验分析,发现海南岛平均年降水量、汛期降雨量、最大1d降雨量总体呈上升趋势,但趋势不显著。2002年、2006年和2007年为海南岛年降水量突变点,2006年为海南岛汛期降雨量突变点。

关键词:海南岛;降水;Mann-Kendall检验;变化趋势;突变分析

中图法分类号:P426.6

文章标识码:A

文章编号:1673-9264(2020)02-27-04

当前,全球气候变暖,我国气温也呈上升趋势,但降水年际变化增减不一^[1]。海南岛位于我国南端,是典型的海洋性热带季风气候,同时受地形地理因素影响,降水具有独有的特性。王胜等^[2]应用趋势分析法分析了海南岛16个测站1961—2004年年均降水量变化趋势,认为呈增加趋势(平均年倾向值2.228 mm/a)。孙瑞等^[3]运用7个国家标准气象站观测数据,分析了海南岛大雨、暴雨日数和强度的时空变化特征。随着时间的推移,海南的气象水文条件发生了较大变化,本文在前人研究的基础上,基于海南岛18个水文气象站1986—2015年的逐日降水观测资料,应用Mann-Kendall检验法对海南岛及各站的年降水量、汛期降雨量、最大1d降雨量的变化趋势进行分析,并用滑动 t 检验法检验海南岛年降水量的突变情况,为进一步认识海南岛降水变化特征、科学应对汛期降雨特别是短历时降雨提供参考。

1 资料和方法

1.1 研究区域概况与数据来源

海南岛位于我国南端,陆地面积3.39万km²。地形中

间高四周低,以中部五指山、鹦哥岭为隆起核心,主峰海拔1 867 m,向外围逐级下降,由山地、丘陵、台地、平原构成环状圈层地貌,梯级结构明显。海南岛地处热带北缘,属热带季风气候,全年暖热,长夏无冬,干湿季节明显,台风活动频繁,雨量充沛,气候资源多样。海南降雨多与台风相关,台风暴雨降雨量占全年降水量的24.4%^[4]。大雨和暴雨对年降水量的贡献较大,合计超过65%^[5]。5月15日至11月15日为海南岛汛期,其余时间为非汛期。受地形影响,全岛水系呈放射状,河流多源短流急。

本研究中使用的数据为海南岛18个水文气象站1986—2015年逐日降水观测资料,具有完整的观测资料时间序列,站点空间分布也比较均匀,具有代表性。

1.2 研究方法

Mann-Kendall检验法是一种非参数检查方法。其不要求样本遵从一定的分布,且检验结果基本不受少数异常值的干扰,被广泛应用于分析降水、气温、径流等要素随时间序列的趋势变化。假设 H_0 表示时

收稿日期:2018-10-26

第一作者信息:杨向权,男,工程师,E-mail:yaxiquan@qq.com。

间序列 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 是数据独立同分布、不存在趋势的样本。备选假设 H_1 是双边检验: 对于所有的 $i, j \leq n$ 且 $i \neq j$, x_i 和 x_j 的分布是不同的, 检验的统计变量 S 计算如下式:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$$

式中: $\text{sgn}()$ 为符号函数, 当 $x_j - x_i \leq 0$ 或 > 0 时, $\text{sgn}()$ 分别取值 -1 、 0 或 1 。 S 为正态分布, 均值为 0 , 方差为:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(i-1)(2i+5)}{18}$$

式中: t 为任意给定结点的范围, 当 $n > 10$ 时, Z_c 收敛于标准正态分布, 并通过下式计算:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{[\text{Var}(S)]^{\frac{1}{2}}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{[\text{Var}(S)]^{\frac{1}{2}}} & S < 0 \end{cases}$$

在双边的趋势检验中, 在给定的 α 置信水平上, 若 $|Z_c| \geq Z_{1-\alpha/2}$, 拒绝原假设 H_0 , 即在 α 置信水平上, 时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。 Z_c 为正值时表示增加趋势, 负值表示减少趋势。 $\pm Z_{1-\alpha/2}$ 为标准正态分布的 $(1-\alpha/2)$ 分位数, α 为检验的置信水平。在 $|Z_c| \geq 1.64$ 、 1.96 、 2.58 时则表示分别通过了置信度 $\alpha = 0.1$ 、 0.05 、 0.01 的显著性检验。变化趋势的大小可用 Kendall 倾斜度 β 来表示, 其计算公式为:

$$\beta = \text{Median} \left[\frac{x_i - x_j}{i - j} \right] \quad \forall j < i, \quad 1 < j < i < n$$

除用于趋势分析外, Mann-Kendall 检验法还可用于突变检验。对一个给定的时间序列, 共有 n 个样本量, 构造一个序列 S_k :

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

式中: 当 $x_i > x_j$ 时, $r_i = 1$; 当 $x_i \leq x_j$ 时, $r_i = 0$; $j = 1, 2, \dots, i$ 。假定所选时间序列随机而且相互独立, 定义统计量:

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

其中

$$UF_1 = 0$$

$$E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4}$$

$$\text{Var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72}$$

UF_k 为标准正态分布。若给定显著性水平 α , 且 $|UF_i| > U_{\alpha/2}$, 说明该时间序列 x_i 存在显著的趋势变化。按逆序列重复以上过程, 计算另一统计量 UB_i :

$$UB_i = -UF_i \quad i = n, n-1, \dots, 1, UB_1 = 0$$

若 $UF_i > 0$ 表示气候量 x_i 呈上升趋势, 反之呈下降趋势。若 UF_i 和 UB_i 曲线相交, 且交点在上下两条临界线之间, 则交点即为该气候量 x_i 的突变起始点。若 UF_i 和 UB_i 没有交点或它们有交点但交点在临界线之外或有交点并且交点在两条临界线之间, 但在交点前后 UF_i 和 UB_i 都出现大于临界值的情况, 那么说明气候量 x_i 突变趋势有不明显。

滑动 t 检验法是利用 t 检验法的原理, 对序列逐点进行 t 检验。 t 检验的原理是: 设滑动点前后, 两个序列总体的分布函数各为 $F_1(x)$ 和 $F_2(x)$, 从总体 $F_1(x)$ 和 $F_2(x)$ 中分别抽取容量为 n_1 和 n_2 的两个样本, 要求检查原假设: $F_1(x) = F_2(x)$, 则

$$T = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_w \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)^{\frac{1}{2}}}$$

其中

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} x_i$$

$$\bar{x}_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} x_i$$

$$S_w^2 = \frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

$$S_1^2 = \frac{1}{n_1-1} \sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2$$

$$S_2^2 = \frac{1}{n_2-1} \sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} (x_i - \bar{x}_2)^2$$

T 服从 $t(n_1 + n_2 - 2)$ 分布, 选择显著性水平 α , 查 t 分布表得到临界值 $t_{\alpha/2}$, 当 $T > t_{\alpha/2}$ 时, 拒绝原假设, 说明其存在显著性差异; 当 $T < t_{\alpha/2}$ 时, 则接受原假设, 说明其不存在显著差异。

2 降水量变化趋势分析

2.1 年降水量变化趋势分析

从时间上看,1986—2015年海南岛多年平均降水量1 812.9 mm,但年际变化大,1989—1990年、1994—1997年、2000—2001年、2008—2014年共15年的年降水量超过多年平均值,其中2009年年降水量最大(2 266.4 mm)。2004年年降水量最小(1 258.9 mm)。从图1可以看出,海南岛年降水量整体呈上升趋势,其降水倾向率为6.2 mm/a,但上升趋势不显著,未通过 $\alpha=0.1$ 的显著性检验。

从空间上看,海南岛多年平均降水量分布不均匀、差异性大,中部山区大于沿海地区,中部及东部地区大于西部地区。多年平均降水量高值区为中部山区及东部沿海地区,最高值为琼中;次高值区为北部和西南部的昌江县、乐东县及东南陵水县一带;西部沿海东方市最少。1986—2015年,海口市、文昌市、琼海市、万宁市、陵水县、

三亚市、东方市、昌江县、儋州市、临高县、澄迈县、定安县、屯昌县共13个市(县)的降水倾向率大于0,表明年降水量总体呈上升趋势,西北部的澄迈县年降水量上升趋势最为显著,降水倾向率达到了18.61 mm/a,通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验;其他12个市(县)上升趋势不显著,均未通过 $\alpha=0.1$ 的显著性检验。中部山区的琼中县、保亭县、五指山市、白沙县和西南部的乐东县年降水量呈下降趋势,但下降趋势不显著,均未通过 $\alpha=0.1$ 的显著性检验,见表1。

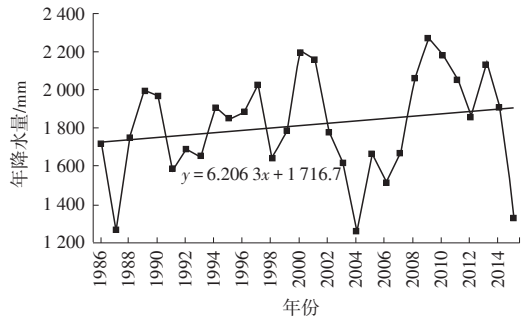


图1 1986—2015年海南岛年降水量变化趋势图

表1 海南岛18个市(县)多年平均降水量及趋势统计表

地名	海口	三亚	儋州	五指山	文昌	琼海	万宁	东方	定安	屯昌	澄迈	临高	白沙	昌江	乐东	陵水	保亭	琼中
多年平均降水量/mm	1 622	1 377	1 884	1 902	1 900	2 022	2 187	1 027	1 977	2 237	1 842	1 438	1 886	1 598	1 709	1 652	2 078	2 321
降水倾向率/(mm·a ⁻¹)	8.05	3.42	7.69	-5.52	12.51	14.99	13.12	12.01	8.46	8.74	18.61	7.78	-0.94	8.99	-5.61	5.36	-11.18	-0.67

2.2 汛期降雨量变化趋势分析

海南岛降雨主要集中在汛期(887.9~1 842.5 mm之间),平均降雨量占年平均降水量的81.8%。从空间分布上看,中部山区降雨大于沿海地区,中部及东部地区降雨大于西部地区,最高值为琼中县(1 843.0 mm),最少值为东方市(887.9 mm)(图2)。这与年降水量分布规律一致。从时间上看,汛期降雨量整体呈上升趋势,降水倾向率为5.79 mm/a,但上升趋势不显著,未通过 $\alpha=0.1$ 的显著性检验,1986—2015年海南岛汛期和非汛期降雨量变化趋势图见图3。

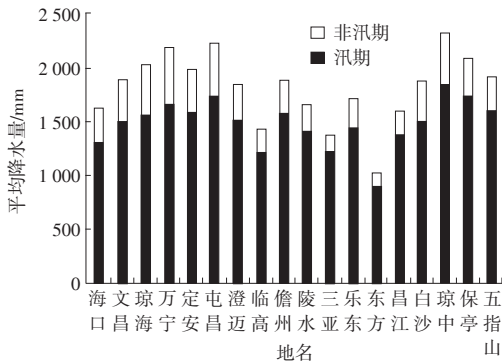


图2 海南岛18个市(县)汛期及非汛期降雨情况

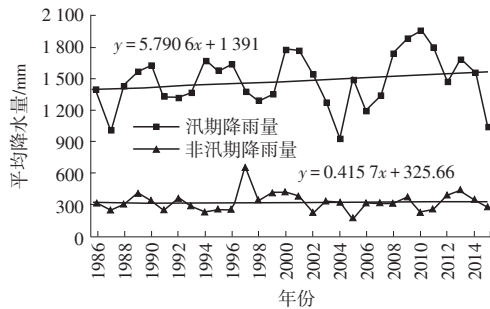


图3 1986—2015年海南岛汛期和非汛期降水量变化趋势图

2.3 最大1 d降雨量变化趋势分析

单个台风影响海南的时间为1~3 d,但对某一区域来讲,单次台风暴雨影响时间基本为1 d。1986—2015年,除儋州市、乐东县和五指山市共3个市(县)最大1 d降雨量呈下降趋势外,其他15个市(县)均呈上升趋势。四周沿海地区的最大1 d降雨量增加趋势明显大于中部地区最大1 d降雨量增加趋势。其中东方市、临高县最大1 d降雨量的变化趋势通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,尤以东方市上升趋势最为显著,降水倾向率达到了3.95 mm/a。西南部的儋州市、乐东县和中部的五指山市最大1 d降雨量的下降趋势

不显著,均未通过 $\alpha=0.1$ 的显著性检验,乐东县下降趋势最大,达到 -1.77 mm/a ,详见表2。

表2 海南岛 18 个市(县)最大 1 d 降雨变化趋势统计表

地名	海口	三亚	儋州	五指山	文昌	琼海	万宁	东方	定安	屯昌	澄迈	临高	白沙	昌江	乐东	陵水	保亭	琼中
降水倾向率/($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)	3.21	1.03	-1.06	-0.64	1.66	1.60	1.61	3.95	0.55	0.84	0.62	2.94	0.44	1.98	-1.77	1.23	0.84	0.86

3 降水量突变性分析

采用 Mann-Kendall 法对海南岛 1986—2015 年年降水量及汛期降雨量序列进行突变性检查,并结合滑动 t 检验来分析各时段的突变情况,两种方法均采用 $\alpha=0.05$ 显著性检验,如图4、图5所示。

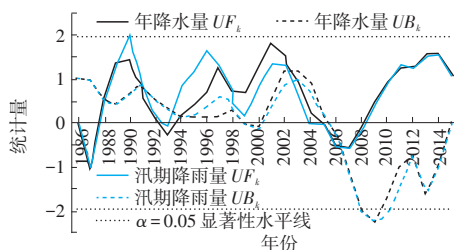


图4 海南岛年降水量和汛期降雨量的 Mann-Kendall 曲线

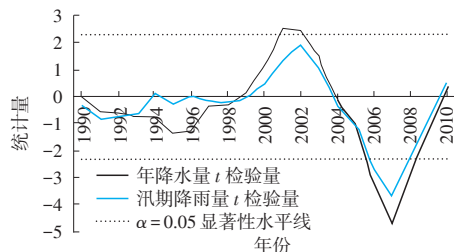


图5 海南岛年降水量的滑动 t 检验

海南岛年降水量 Mann-Kendall 检验法统计量 UF 曲线总体变化比较平缓,仅在 2008—2009 年 UB 曲线超过了 $\alpha=0.05$ 的显著性水平,表明 2008—2009 年年降水量增加趋势显著。其他年份 UF 和 UB 曲线均在 $\alpha=0.05$ 的显著性水平线内,但整体表现为上升趋势。在 $\alpha=0.05$ 的显著性水平线之间 UF 曲线和 UB 曲线在 1988 年、1991 年、1994 年、2002—2003 年、2006—2007 年前后多次出现交点,再对比滑动 t 检验,在 2001—2002 年、2006—2008 年超过显著性水平线,说明 2002 年、2006 年和 2007 年为海南岛年降水量的突变点。

和年降水量相似,汛期降雨量整体表现为上升趋势, Mann-Kendall 检验法统计量 UF 曲线在 1990 年达到 $\alpha=0.05$ 的显著性水平, UB 曲线在 2008—2010 年超过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平,表明这几年降雨量增加比较显著。 UF 曲线和 UB 曲线在 1988 年、1991 年、1993 年、1998—1999 年、

2002—2003 年、2005—2006 年前后多次出现交点,再对比滑动 t 检验,在 2006—2008 年超过显著性水平线,说明 2006 年为汛期降雨量的突变点。

4 结 语

通过对海南岛 18 个水文气象站 1986—2015 年的逐日降水观测资料进行 Mann-Kendall 检验,辅以滑动 t 检验分析,并结合海南防汛抗洪工作得到以下结论及建议。

(1)海南岛年降水量、汛期降雨量总体呈上升趋势。气候倾向率分别为 6.2 mm/a 、 5.79 mm/a ,上升趋势均不显著。18 个市(县)中 13 个市(县)年降水量呈上升趋势,琼中县、保亭县、五指山市、白沙县和乐东县年降水量呈下降趋势。海南岛年降水量在 2002 年、2006 年和 2007 年发生突变。汛期降雨量在 2006 年发生突变。15 个市(县)的最大 1 d 降雨量呈上升趋势,东方市、临高县上升趋势显著。儋州市、乐东县和五指山市最大 1 d 降雨量呈下降趋势。

(2)海南岛年降水量及汛期降雨量整体呈周期性变化,防汛抗旱及水务水文部门应掌握雨情年度变化形势,准确把握下一年度防汛抗旱工作重点。降水低值区的市(县)防汛抗旱压力较降水高值区的市(县)更大,应将防汛和抗旱工作并重,尤其东方、乐东、三亚、陵水、临高、昌江等市(县)。最大 1 d 降雨量分析切合实际,海口、临高、东方 3 个市(县)增加趋势尤为显著,应重视短历时强降水防御及城市排水防涝系统建设工作。

参考文献

- [1] 张国宏,李智才,宋燕,等.中国降水量变化的空间分布特征与东亚夏季风[J].干旱地理,2011,34(1):34-42.
- [2] 王胜,吴坤梯,陈明.1961 年以来海南岛降水变化趋势分析[J].广西气象,2006,27(1):24-44.
- [3] 孙瑞,吴志祥,陈帮乾,等.1959~2013 年海南岛降水事件变化特征[J].热带作物学报,2017,38(11):2176-2182.
- [4] 陆桂荣,王文,郑美琴,等.海南台风暴雨的时空分布特征[J].大气科学学报,2015,38(5):700-714.

责任编辑 姚力玮