

海口市极端降雨事件演变趋势分析

陈成豪¹, 李彤彤^{2a}, 冯杰³, 李龙兵¹, 邢李桃¹, 黄国如^{2a,2b}

(1. 海南省水文水资源勘测局, 海南 海口 510203; 2. 华南理工大学 a. 土木与交通学院;

b. 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 3. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 城市暴雨内涝与极端降雨事件息息相关。为揭示城市暴雨内涝成因, 利用海口站 1953-2012 年日降雨量资料, 采用线性倾向估计法、Mann-Kendall 趋势检验法、Mann-Kendall 突变检验法和小波分析法等探讨了海口市极端降雨事件演变规律。结果表明: 近 60 年来海口市极端降雨指标均呈现出上升趋势, 但极端降雨日数上升趋势较弱, 短历时暴雨强度增加, 对城市内涝带来较大压力; 极端降雨事件的突变年份在 2007 年附近, 暗示海口市在 2007 年附近对土地的开发利用是一个节点; 海口市降雨周期性不是很显著。

关键词: 极端降雨指标; 趋势分析; Mann-Kendall 突变检验; 小波分析; 海口市

中图分类号: TV125

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)03-0006-05

Analysis of Temporal Evolution Law of Extreme Rainstorm Events in Haikou City

CHEN Chenghao¹, LI Tongtong^{2a}, FENG Jie³, LI Longbing¹, XING Litao¹, HUANG Guoru^{2a,2b}

(1. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Hainan Province, Haikou 510203, China;

2. a. School of Civil Engineering and Transportation; b. State Key Laboratory of Subtropical Building Science,

South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Department of Water Resources,

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

Abstract: Urban storm waterlogging has close relationship with extreme rainfall events. In order to understand the causes of urban rainstorm waterlogging, the paper used the daily rainfall data of Haikou station from 1953 to 2012, and analyzed the evolution law of extreme rainstorm events in Haikou by the method of linear trend estimation, Mann-Kendall trend test, Mann-Kendall mutation test and wavelet analysis. The result shows that the extreme precipitation indexes of Haikou appeared a rising trend, but the number of extreme precipitation days had no obvious change in the last 60 years. So the intensity of short durative rainstorm has increased and brought greater pressure to city waterlogging. The mutation year of extreme rainfall events was around 2007, which indicated that the land development and utilization of Haikou had a node in 2007. The periodicity of rainfall was not very significant.

Key words: extreme precipitation index; trend analysis; Mann-Kendall mutation test; wavelet analysis; Haikou

随着全球气候变化和城市化进程的不断加快, 温室气体排放量快速上升, 城区气温上升导致城市降雨时空分布趋于不均, 增强了各种极端降雨事件的发生频率, 城市暴雨内涝与极端降雨事件息息相关, 因此, 研究城市极端降雨事件特征及其演变规律对解决城市暴雨内涝问题具有重要意义。海口市地

处华南南部, 属热带海洋性季风气候, 降雨充沛, 经过多年建设, 海口市工业体系得到快速发展, 温室气体排放量逐渐上升, 加上全球气候变暖, 增加了海口市城区降雨量, 同时夏季台风暴雨呈现上升趋势, 导致近年来海口市极端降雨事件频发。近年来, 有学者对海口市暴雨时空特征演变规律进行过分析, 令

收稿日期: 2016-01-15; 修回日期: 2016-03-21

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301093、201401048)

作者简介: 陈成豪(1967-), 男, 海南临高人, 高级工程师, 主要从事水文水资源研究。

通讯作者: 黄国如(1969-), 男, 江苏南京人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源研究。

聪婧等^[1]对海口市 1951 - 2008 年秋汛期旱涝特征及其影响因子进行分析,李福胜等^[2]探讨了海口市 1951 - 2010 年降雨在季尺度上的趋势、突变和周期情况,黄国如等^[3]基于海口市 1951 - 2012 年逐时降雨资料,对年最大 1h 降雨序列进行统计分析。上述研究主要是针对年降雨、汛期降雨或 1 h 降雨特征进行分析,本文针对近年来海口市极端降雨频发状况,采用极端降雨指数,利用线性倾向估计法、Mann - Kendall 趋势检验法、Mann - Kendall 突变检验法和小波分析法,综合研究海口市 60 年来日降雨特征及其演变趋势,从而增强对海口市暴雨事件的预警能力。

1 研究数据和方法

1.1 研究数据

所需资料来自中国气象局国家气象信息中心的中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>) 提供的海口站 1953 - 2012 年共 60 a 的日降雨量资料,该资料经过严格的质量控制,且较为完整。

联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 在第四次评估报告中,根据气象要素的概率分布,将小于等于第 10 个 (或大于等于第 90 个) 百分位的事件定义为极端气候事件。

本文将全序列日降雨量从小到大排序,排在第 95 个百分位的降雨量取为极端降雨阈值,超过该阈值即为发生了极端降雨事件。采用极端气候指数表征极端气候状况,较常使用的评价区域极端气候状况的指标是由 ETCCDMI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) 所定义并推荐使用的 27 个极端气候指数^[4],其中包括 11 个极端降雨指数和 16 个极端气温指数,根据本研究对象具体情况,从中选择了 5 个极端降雨指数,其具体名称和涵义如表 1 所示。

所需资料来自中国气象局国家气象信息中心的中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>) 提供的海口站 1953 - 2012 年共 60 a 的日降雨量资料,该资料经过严格的质量控制,且较为完整。

表 1 极端降雨指标

符号	名称	定义
RRx1day	最大 1 日降雨量/mm	一年中最大 1 日降雨量
RRx5day	最大 5 日降雨量/mm	一年中最大连续 5 日降雨量
SSDII	简单降雨强度指数/(mm · d ⁻¹)	一年中日降雨量 ≥ 1.0mm 降雨总量与日数之比
RR50mm	暴雨日数/d	一年中日降雨量大于 50mm 的日数
RR95pTOT	非常湿天降雨量/mm	一年中日湿天降雨量(日降雨 ≥ 1.0 mm) 大于 1961 - 1990 年第 95 个百分位值的总降雨量

1.2 研究方法

采用线性倾向估计法和 Mann - Kendall 检验法来分析极端事件的趋势走向,线性倾向估计法用一条合理的直线表示变量 x 随时间 t 的变化趋势^[5-6],是一种最简单的传统线性方法。

Mann - Kendall 检验法是世界气象组织推荐并已广泛使用的非参数检验方法^[6-9],对于水文、气象等非正态分布的数据,计算简便且结果可靠,常被用于统计分析时间序列的变化趋势。

在 Mann - Kendall 趋势检验法中, x_i 是样本量为 n 的时间序列变量。原假设 H_0 : 时间序列数据 $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ 是 n 个独立的、随机变量同分布的样本,选择假设 H_1 : 对于所有的 $k, j \leq n$ 且 $k \neq j$, 样本 x_k 和 x_j 的分布是不同的。检验统计量 Z 服从标准正态分布,如果 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$, 表示拒绝原假设,即在 α 置信水平上,原时间序列数据存在明显的上升或下降趋势, Z 的绝对值越大表示增加或减少的趋势越明

显。如果 $|Z| \geq 1.40, 1.64$ 和 1.96 , 分别表示序列通过了置信度为 80%、90% 和 95% 的显著性趋势检验。 $Z > 0$, 表示时间系列呈上升或增加趋势; $Z < 0$, 表示时间系列呈下降或减少趋势。

突变检验统计值与上述 Mann - Kendall 趋势检验有所不同,突变检验是对于样本量为 n 的变量 x , 构造一秩序列 S_k 表示第 i 时刻变量大于 j 时刻变量个数的累计数,计算公式如下:

$$S_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_{ij}, \quad (k = 2, 3, 4, \dots, n) \quad (1)$$

其中:

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j \end{cases}, \quad (j = 1, 2, 3, \dots, i) \quad (2)$$

假定时间序列具有随机独立性,定义检验统计量 UF_k 和 UB_k , 计算公式如下:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}}, \quad (k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

式中: 定义 $UF_1 = 0$, $E(S_k)$ 和 $\text{Var}(S_k)$ 分别为秩序列 S_k 的均值和方差, 计算公式如下:

$$E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (4)$$

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

按时间序列将变量 x_i 逆序排列得 $(x_n, x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_1)$, 再重复式(1)到(5), 同时使 $UB_k = -UF_k$, $k = n, n-1, n-2, \dots, 1, UB_1 = 0$ 。通过分析统计序列 UF_k 和 UB_k 可以明确突变的时间。

在同一张图表中绘出 UF_k 和 UB_k 曲线图, $UF_k > 0$, 表示序列呈上升趋势, $UF_k < 0$, 表示序列呈下降趋势。若 UF_k 和 UB_k 两条曲线相交, 且交点在临界线之间, 则交点对应的时刻即为突变开始时间。给定显著性水平 α , 当 UF_k 和 UB_k 超过临界值时, 表示变化趋势显著, 通过了显著性水平为 α 的检验。当

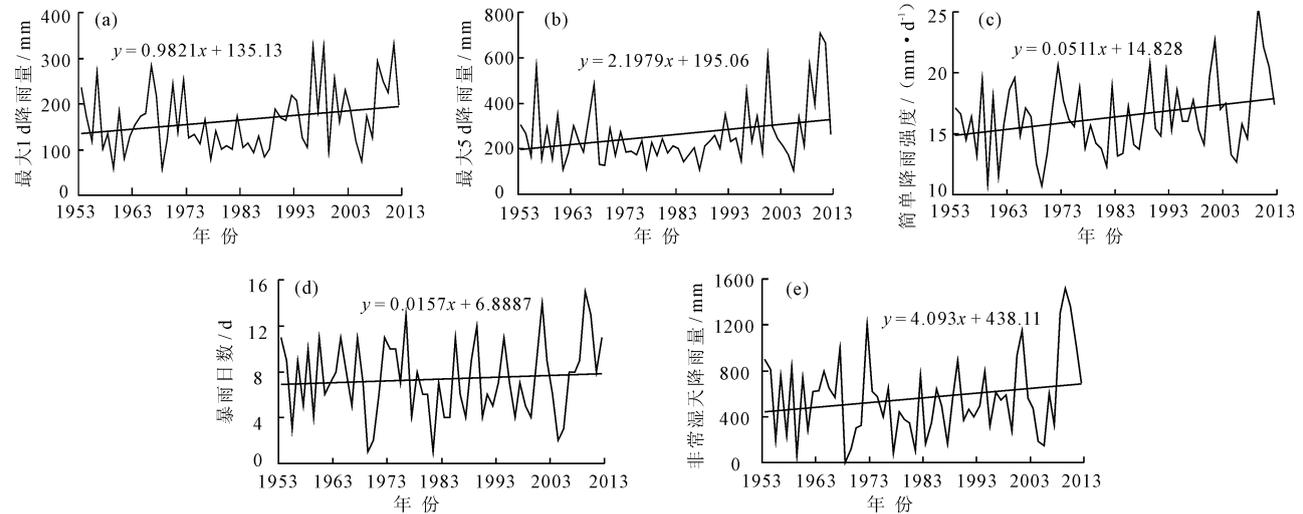


图1 海口市极端降雨指标时间变化趋势

由图1可以看出, 海口市最大1 d、最大5 d降雨量和简单降雨强度指数均呈现出波动上升趋势, 其上升速度分别为 0.982、2.198 mm/a 和 0.511 mm/(d·10 a)。

非常湿天降雨总量呈现出显著上升趋势, 以 4.093 mm/a 的趋势上升; 海口市近 60 a 来暴雨日数稍有上升, 以 0.157 d/10a 的速度上升。

2.2 Mann-Kendall 检验法趋势分析

运用 Mann-Kendall 法对海口市极端降雨指标进行分析, 结果见表2。

从表2可以看出, Mann-Kendall 趋势检验结果与线性倾向估计分析结果基本吻合, 各项指标均呈现出上升趋势, 其中最大5 d降雨量和简单降雨强度指数均通过了置信度为 90% 的显著性检验, 呈现

$\alpha = 0.05$, 则临界值 $U_{0.05} = \pm 1.96$ 。

小波分析可反映水文序列在时间频率上的精细结构及多尺度变化特征, 具有较强的周期特征提取能力, 小波函数的选择是关系到小波分析结果的关键步骤。鉴于水文降雨序列的特征, 本文研究选用 Morlet 连续复小波函数^[9-11]。主要用到的数据结果包括小波系数实部等值图和小波系数方差图, 小波系数实部等值图表达了水文序列存在的不同时间周期尺度, 小波系数方差图方差峰值所对应的时间尺度为该时间序列的振荡周期。

2 计算结果分析

2.1 线性倾向趋势分析

利用线性倾向估计法分析海口市 5 个极端降雨指标随时间的变化趋势, 结果见图1。

出显著的上升趋势。而最大1 d降雨量、暴雨日数和非常湿天降雨总量均未通过置信度为 90% 的显著性检验, 呈现出弱上升趋势, 其中暴雨日数上升得更为微弱。

表2 海口市极端降雨指标 Mann-Kendall 趋势检验结果(Z值)

RRx1day	RRx5day	SSDII	RR50mm	RR95PTOT
1.276	1.701 *	1.709 *	0.383	0.887

注: * 表示通过了置信度为 90% 的显著性检验

2.3 Mann-Kendall 检验法突变分析

运用 Mann-Kendall 突变检验法进行突变分析, 得到每个指标的检验统计量 UF_k 和 UB_k , 结果见图2。

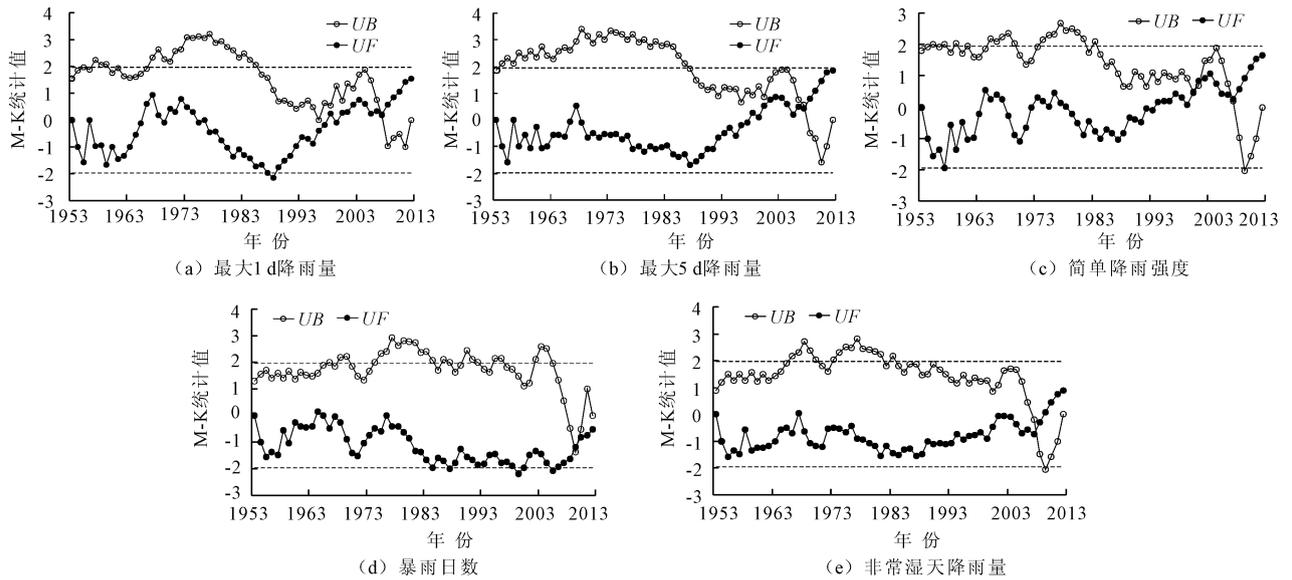


图2 海口市极端降雨指标 Mann - Kendall 突变检验

从图2可以看出,最大1 d和最大5 d降雨量突变检验结果中的 *UB* 或 *UF* 值超出了临界值,说明变化趋势显著,并且在上下临界线之间存在交点为2007年,故2007年是可能突变年份;简单降雨强度指标的两条曲线均超出了显著性检验的临界线,且这两条曲线在临界线范围内的交点为2001、2002和2007年,说明这3年为简单降雨强度指数的可能突变年份;暴雨日数的两条曲线也超出了临界线范围,而且在临界线之间的交点为2009年和2010年,这2年为暴雨日数的可能突变年份;非常湿天降雨量 *UB* 曲线超出了临界线范围,并与 *UF* 曲线在上下临界线之间存在交点,说明可能突变年份为2007年。从

各个极端降雨指标的结果综合起来看,2007年最可能为突变年份。

2.4 小波分析法周期分析

运用小波分析得到5个极端降雨指标的小波实部等值线见图3。该图纵轴方向上的上半部为低频区域,等值线通常较为稀疏,代表了较长尺度周期振荡;下半部为高频区,等值线较为密集,代表了较短尺度周期振荡。

小波系数实部的正值表示降雨偏多的年份,用实线表示,负值表示降雨偏少的年份,用虚线表示,系数实部呈现正负交替的现象代表了该地区降雨量丰枯交替的振荡变化。

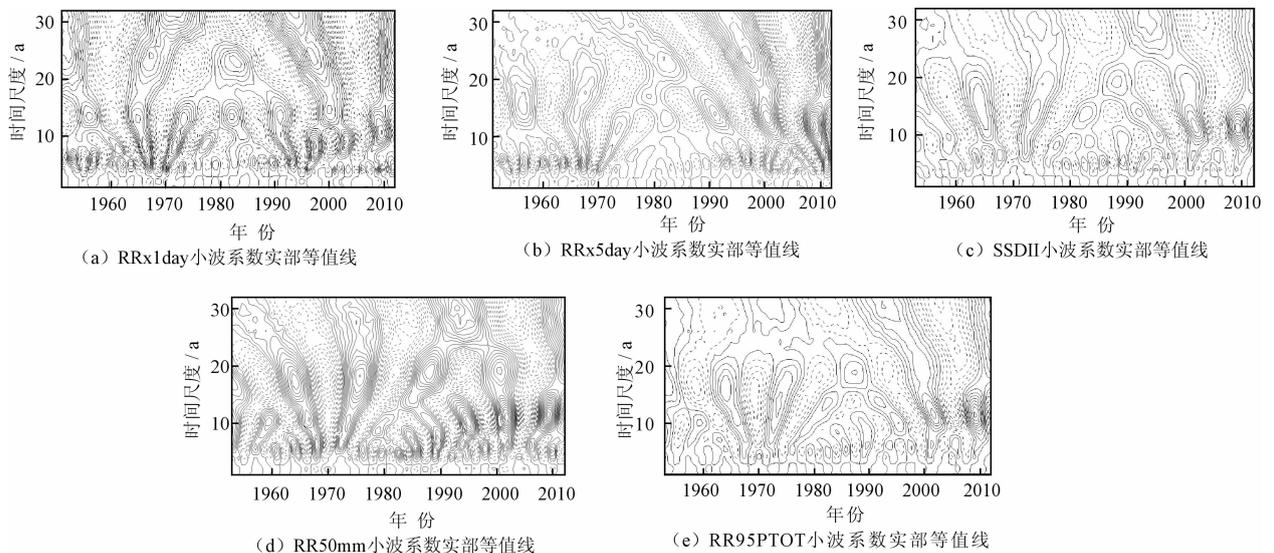


图3 海口市极端降雨指标小波系数实部等值线

由图3可以看出,海口市最大1d降雨量在时空演变过程中存在20~27、10~18和4~10 a三类尺度的周期变化,在20~27 a尺度上出现了丰枯交替的4次震荡,同时在10~18 a尺度上丰枯交替也非常明显,而且较为稳定。海口市最大5d降雨量在时空演变过程中存在12~30年和3~6年两类尺度的周期变化,在12~30 a尺度上出现了丰枯交替的4次震荡,但不稳定,同时在3~6 a尺度上丰枯交替也比较明显,但是在1970-1985年期间不大稳定,其余时间段均较为稳定。简单降雨强度指数在时空演变过程中存在25~32、14~24和8~12 a三类尺

度的周期变化,25~32 a尺度的周期变化较为稳定,出现丰枯交替的3次震荡,其余两个尺度的周期变化则不稳定。海口市暴雨日数在时空演变过程中存在25~32、15~24和8~12 a三类时间尺度的周期变化,15~24 a时间尺度较为稳定,存在5次明显的强弱交替状况,其他时间尺度则相对欠稳定。非常湿天降雨总量存在10~20和23~32 a两类时间尺度的周期变化,但这两类周期变化均不稳定。

小波方差图的数据结果见图4,图中最大峰值对应该时间序列的第1主周期,第2、第3峰值分别对应了时间序列的第2、第3主周期。

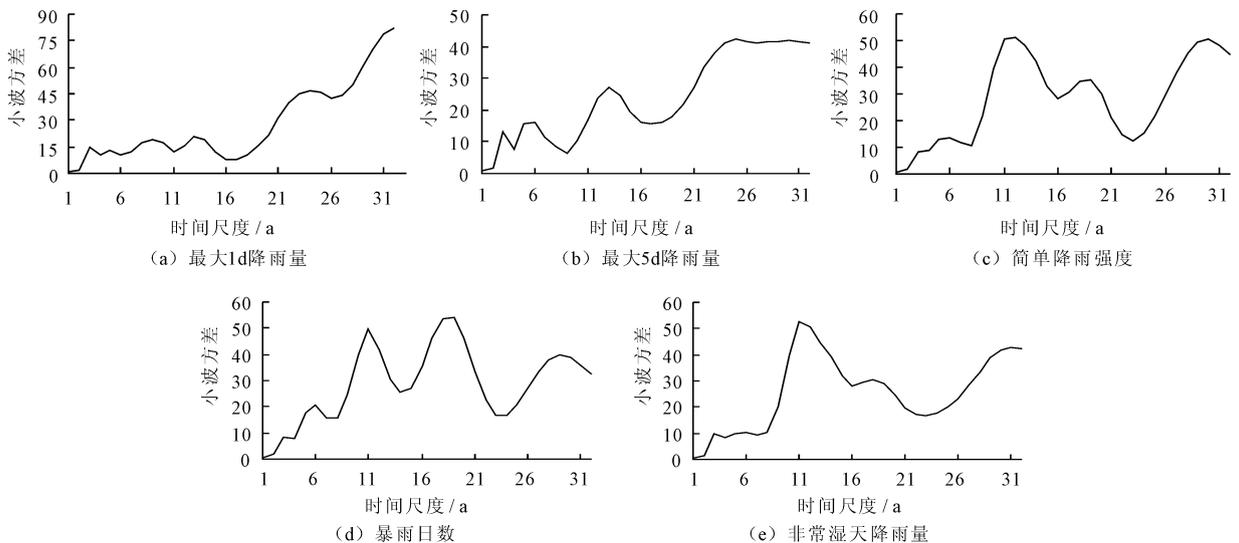


图4 海口市极端降雨指标的小波方差

由图4可以看出,海口市最大1d降雨量存在3个较为明显的峰值,分别对应了24、13和9 a的时间尺度,说明24 a左右周期性最强,为最大1d降雨量的主周期,13和9 a分别为第2和第3主周期。最大5d降雨量有3个较为明显的峰值,分别对应了25、13和6 a的时间尺度,最大峰值对应的是25 a时间尺度,为最大5d降雨量的主周期,13和6 a分别为第2和第3主周期。简单降雨强度指数最明显的3个峰值分别对应12、30和19,12 a为简单降雨强度指数的第1主周期,30和19 a分别为第2和第3主周期。海口市暴雨日数具有3个较为明显的波峰,分别对应的时间尺度为19、11和29 a,第1主周期为19,11和29 a为第2和第3主周期。非常湿天降雨量存在3个较为明显的峰值,分别对应11、31和18 a,11 a为第1主周期,31和18 a分别为第2、第3主周期。

3 结论

(1)海口市降雨量呈现出波动上升趋势,其中最大5d降雨量和简单降雨强度指数上升趋势较为显著,但降雨日数上升趋势较为缓慢,基本保持稳定,使短历时暴雨强度增加。

(2)利用Mann-Kendall趋势突变检验法所得到的结果表明,从各个极端降雨指标的结果综合起来看,2007年最可能为突变年份。

(3)海口市最大1d降雨量的主周期为24 a左右,第2周期为13 a左右,各个极端降雨指标的周期性无显著规律。

参考文献:

- [1] 令聪婧,任广成.海口秋汛期(9-10月)降雨异常变化特征及影响因子分析[J].海洋预报,2011,28(3):62-67.

- [46] Field R, Struck S, Tafuri A, et al. BMP technology in urban watersheds: current and future directions[R]. Virginia: American Society of Civil Engineers(ASCE), 2006:10-18.
- [47] 李家科,刘增超,黄宁俊,等. 低影响开发(LID)生物滞留技术研究进展[J]. 干旱区研究, 2014, 31(3):431-439.
- [48] 俞孔坚. 建筑与水涝共生—哈尔滨群力雨洪公园[J]. 建筑学报, 2012(10):68-69.
- [49] 车伍,张伟,李俊奇,等. 中国城市雨洪控制利用模式研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(16):51-57.
- [50] 张冬冬,严登华,王义成,等. 城市内涝灾害风险评估及综合应对研究进展[J]. 灾害学, 2014, 29(1):144-149.
- [51] Webster P J. Improve weather forecasts for the developing world[J]. Nature, 2013, 493(7430):17-19.
- [52] Heikkila E J, Huang M. Adaptation to flooding in urban areas an economic primer[J]. Public Works Management & Policy, 2014, 19(1):11-36.
- [53] 住房城乡建设部. 海绵城市建设技术指南[R]. 建城函[2014]275号, 2014.
- [54] 姜仁贵,解建仓,李建勋. 面向防汛的三维预警监视平台研究与应用[J]. 水利学报, 2012, 43(6):749-755.
- [55] Liu Y C, Cheng C L. A solution for flood control in urban area: using street block and raft foundation space operation model[J]. Water Resources Management, 2014, 28(14):4985-4998.

(上接第10页)

- [2] 李福胜,张仲. 海口市1951-2010年降雨的多时间尺度分析[J]. 广东气象, 2013, 35(3):40-44.
- [3] 黄国如,洗卓雁,陈文杰. 海口市近年短历时暴雨演变特征分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(2):121-126.
- [4] Lupikasza E. Spatial and temporal variability of extreme precipitation in Poland in the period 1951-2006[J]. International Journal of Climatology, 2009, 30(7):991-1007.
- [5] 杨东,程军奇. 甘肃黄土高原近52年四季极端降雨变化特征[J]. 中国农学通报, 2013, 29(11):180-187.
- [6] 李小亚,张勃. 河西地区最大连续降雨事件的时空变化特征[J]. 水土保持通报, 2013, 33(2):43-48.
- [7] 曹洁萍,迟道才,武立强,等. Mann-Kendall检验方法在降雨趋势分析中的应用研究[J]. 农业科技与装备, 2008, 179(5):35-37+40.
- [8] 王兆礼,陈晓宏,张灵,等. 近40年来珠江流域降雨量的时空演变特征[J]. 水文, 2006, 26(6):71-75.
- [9] 张剑明,章新平,黎祖贤,等. 湖南省46年来降水的气候特征[J]. 热带气象学报, 2008, 24(5):512-517.
- [10] 董满宇,王炳钦,廖剑宇,等. 近50年东江流域极端降水事件变化特征[J]. 资源科学, 2013, 35(3):521-529.
- [11] 姜德娟,李志,王昆. 1961-2008年山东省极端降雨事件的变化趋势分析[J]. 地理科学, 2011, 31(9):1118-1124.