

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.05.002

珠海市香洲城区降水变化特征及成因分析

曹永强¹, 李玲慧¹, 邵薇薇², 李元菲¹

(1. 辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连 116029;

2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要:基于珠海市 1981—2010 年逐日降水资料及 2011—2018 年 CMADS 中国大气同化驱动数据集 V1.0 及 V1.1, 利用 Manner-Kendall 检验法、小波分析法分析不同等级降水分布频率、变化趋势及周期特征, 根据 NASA GPM IMERG 0.5 h 分辨率的降水数据分析香洲城区 51 场大暴雨及特大暴雨的时程分配特征, 并依据城区土地利用类型及气溶胶粒子的变化规律进行成因分析。结果表明: 1981—2018 年, 香洲城区总降水量呈波动减小趋势, 下降率每 10 a 为 65.70 mm, 主要原因是大雨及暴雨量级雨量的减少; 年降水日数及总降水量均经历了增多—减少—增多—减少—增多的 4 次周期振荡变化, 主周期均为 25 a 左右; 场次暴雨持续时间为 4.5 ~ 23 h, 且降水时长有增加趋势, 暴雨峰值的出现时间的概率由大到小为夜间、上午、午间、午后; 城市化进程引起地面粗糙度增大对移动的降雨系统产生了阻碍效应, 对城区降雨时长的增加有一定影响, 且暴雨峰值的出现时间与空气中气溶胶粒子的日变化规律相关。

关键词:降水特征; 暴雨; 城市化; 香洲城区; 珠海市

中图分类号:TV213.4; P426.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)05-0009-07

Analysis on characteristics and causes of precipitation change in Xiangzhou urban area, Zhuhai City // CAO Yongqiang¹, LI Linghui¹, SHAO Weiwei², LI Yuanfei¹ (1. School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Based on the daily precipitation data of Zhuhai City from 1981 to 2010 and CMADS China atmospheric assimilation driving data sets V1.0 and V1.1 from 2011 to 2018, the distribution frequency, change trend and periodic characteristics of different levels of precipitation were analyzed by using Manner-Kendall test and wavelet analysis, and the time history assignment characteristics of 51 rainstorms and heavy rainstorms were analyzed according to the precipitation data with 0.5 h resolution of NASA GPM IMERG. The cause of formation was analyzed according to the type of urban land use and the change law of aerosol particles. The results show that from 1981 to 2018, the total precipitation in Xiangzhou urban area of Zhuhai City show a fluctuating and decreasing trend, with a decline rate of 65.70mm every 10 years, mainly due to the reduction of heavy rain and rainstorm. The annual precipitation days and total precipitation have experienced four periodic oscillations of increase-decrease-increase-decrease-increase, and the main periods are about 25 years. The duration of the rainstorm is 4.5-23 h, and the precipitation duration tends to increase. The probability of the occurrence time of the rainstorm peak is: night, morning, noon and afternoon. The increase of surface roughness caused by urbanization has a blocking effect on the moving rainfall system and has a certain impact on the growth of rain time in urban areas, and the occurrence time of rainstorm peak is related to the daily variation law of aerosol particles in the air.

Key words: precipitation characteristics; rainstorm; urbanization; Xiangzhou urban area; Zhuhai City

在全球变暖以及城市化进程加快的双重背景下, 城市建成区面积迅速扩张、建筑密度变大, 人类活动加剧使得空气中凝结核增多以及对流层空气层

结不稳定性增强, 致使产生热岛效应和雨岛效应^[1-2], 进而影响城市降水特征发生变化。另外, 地表不透水率增加过程伴随的填洼、下渗量的减少和

滞洪量的增加也使得防洪减灾问题更加突出^[3]。关于降水特征的研究一直是我国气候相关领域的研究热点。如,陈隆勋等^[4]对 1951—1989 年的中国降水的研究表明,全国年降水量呈减少趋势,但西部降水量增长显著;张建云等^[5]研究发现尽管我国北方地区近年来降水量有所增加,但仍低于多年平均值;王澄海等^[6]对我国西北地区降水周期变化特征进行了研究,结果表明,西北地区降水呈现出非周期性振荡和多平衡态的特点;林纾等^[7]也对我国西北地区 1960 年以来的暴雨气候变化特征进行了分析,结果显示西北地区暴雨发生最为频繁是其东部地区,且以 6—9 月发生暴雨的概率最大。2000 年以来,国际减灾战略的实施表明,在自然灾害预防、防备和减灾 3 项工作中,灾害预防工作最为重要,且灾情信息获取是灾害预防的重要工具^[8-9]。暴雨是内涝之源,暴雨时程分配特征对于暴雨径流和城市防洪排涝有着重要影响^[10-12],以往的研究在中国各地区降水特征方面已取得了丰硕成果,但针对城区降水特征及暴雨时程分配的研究还相对较少。

由于特殊的地理位置和地形条件,珠海市香洲城区常遭受台风风暴潮、外江洪水和当地降雨带来的洪涝灾害。2017 年第 13 号台风“天鸽”为珠海建市记载以来遭遇的最强台风,其引发的风暴潮叠加天文大潮的波峰共同影响了潮位^[13],后续带来的超强降雨、风暴潮和巨浪严重威胁了沿海低洼地区人员的生命安全,全市受灾人员高达 64.14 万人,直接经济损失高达 204.5 亿元。鉴于此,本文分析气候变暖背景下珠海市香洲城区不同等级降水的分布频率、分布周期、变化趋势以及暴雨的时程分配特征,以期预防内涝灾害发生及降低灾害损失等提供参考。

1 研究区概况

珠海市是我国首批 4 个经济特区之一,位于南海之滨、珠江口西岸($22^{\circ}21'N \sim 22^{\circ}33'N$, $113^{\circ}46'E \sim 113^{\circ}62'E$)。香洲城区地势相对低平,自西北向东南倾斜,是由板障山四周的平地构成的中心城区(图 1)。气候属亚热带海洋性季风气候,多年平均降水量约为 2065 mm,降水季节长,年降水日数为 103 天左右。近年来,香洲城区城镇化发展迅速,2018 年土地面积达 559.29 km²,常住人口为 109.81 万人,城镇人口比为 90.08%^[14]。在旅游业等产业发展的影响下,城区内土地利用类型变化显著,加之气候变化,使得该地区降水特征有所改变,洪涝灾害的发生越来越频繁,给城市排水系统增添了极大压力。

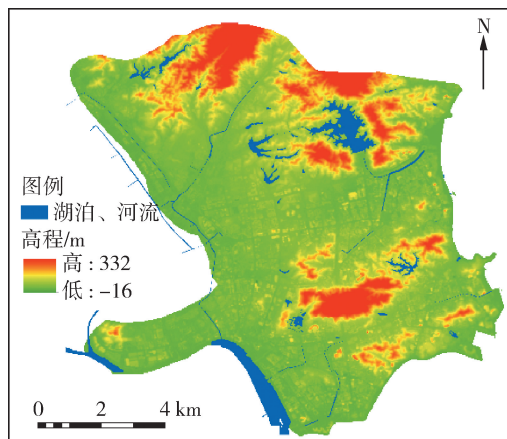


图 1 香洲城区地形

Fig. 1 Topography of Xiangzhou urban area

2 资料与方法

本文所使用的数据包括珠海市 1981—2010 年逐日降水数据,来源于珠海市规划设计院,以及 2011—2018 年 CMADS 中国大气同化驱动数据集 V1.0 及 V1.1。由于研究区相关数据比较缺乏,可获得的气象数据年份受限,因此选用不同种类数据进行补充研究。0.5 h 间隔降水数据来源于 NASA GPM IMERG,时间为 2000—2018 年,用于分析暴雨及以上等级降水的时程分配特征;下垫面数据中林地、水域、绿地等来源于 Open Street Map 影像;建筑物轮廓来源于 91 卫图助手;DEM 数据来源于 ALOS 对地观测卫星,分辨率为 10 m。

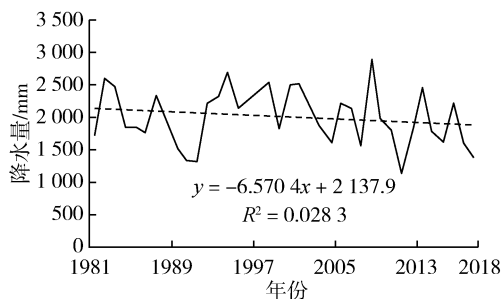
本文利用 Mann-Kendall 检验法及小波分析法从多种角度分析香洲城区不同等级降水量变化趋势及周期特征,具体方法参考文献^[15-17]。

3 结果与分析

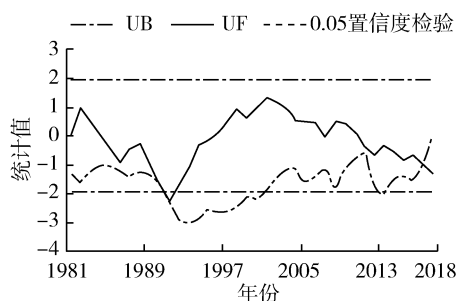
3.1 不同等级降水分布频率及变化趋势

通过对收集的数据进行计算可得到,1981—2018 年香洲城区降水日数共 5 487 d,平均每年 141 d,其中,降水日数最多的是 2016 年,为 191 d,最少的是 2004 年,为 101 d^[18-19]。图 2 为香洲城区降水量年际变化及显著性检验,可见香洲城区降水量变化呈波动减小趋势,下降率每 10 a 为 65.70 mm,且下降趋势通过了 0.05 的显著性检验。

根据 GB/T 28592—2012《降水量等级标准》,以日雨量计可将降雨划分为小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨及特大暴雨 6 种不同等级,划分标准为:24 h 降水总量在 0.1 ~ 10 mm 之间为小雨,10 ~ 25 mm 之间为中雨,25 ~ 50 mm 之间为大雨,50 ~ 100 mm 之间为暴雨,100 ~ 250 mm 之间为大暴雨,250 mm 以上为特大暴雨,本文将暴雨、大暴雨和特大暴雨统称为



(a) 降水量年际变化



(b) 降水量年际变化显著性检验

图2 香洲城区降水量年际变化及显著性检验

Fig.2 Interannual variation and significance test of precipitation in Xiangzhou urban area

总暴雨。根据统计,可得到不同等级降水日数频率分布与降水量占比情况:香洲城区小雨只占总降水量的 11.95%,但降水日数占总降水日数的 69.55%;中雨占总降水量的 17.21%,降水日数占总降水日数的 14.53%;大雨占总降水量的

22.98%,降水日数占总降水日数的 9.02%;总暴雨量占总降水量的 47.86%,降水日数占总降水日数的 6.91%。结果表明,不同等级降水对总降水量的贡献以大雨以上为主。春、秋季以暴雨为主,其降水量分别占该季总降水量的 25.35% 和 28.70%;夏季以大雨为主,其降水量占该季总降水量的 24.97%;冬季以中雨为主,其降水量占该季总降水量的 33.03%。

小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨和特大暴雨等不同等级降雨的变化率每 10 a 分别为 -2.45 mm、0.52 mm、-16.62 mm、-46.37 mm、16.79 mm 和 28.23 mm。进一步分析可知,1981—2018 年,香洲城区大暴雨呈显著增加趋势(每 10 a 为 16.79 mm),中雨和特大暴雨每 10 a 增加幅度分别为 0.52 mm 和 28.23 mm,但增加趋势未经过 0.05 显著性检验。小雨、大雨及暴雨呈减少趋势,每 10 a 减少幅度分别为 2.45 mm、16.62 mm 和 46.37 mm。从不同等级降水量占比情况来看,由大到小排序为:暴雨、大雨、大暴雨、中雨、小雨、特大暴雨,且大雨和暴雨两个等级降雨占比均超过 20%,因此,1981—2018 年,香洲城区降水量的减少主要是由于大雨及暴雨减少造成的。

3.2 不同等级降水的周期变化

3.2.1 降水日数的周期变化

图3为不同等级降水日数的小波变换的实部等值线图。分析香洲城区总降水和小雨量级的年降水

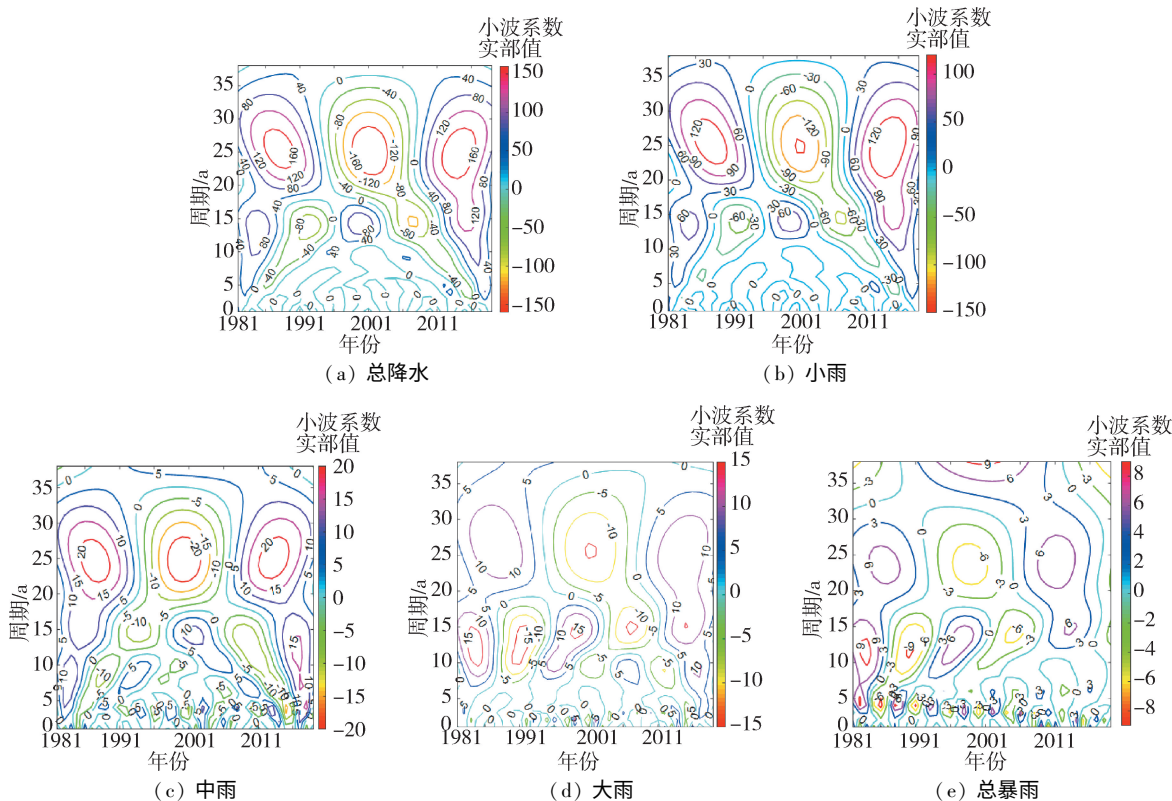


图3 不同等级降水日数的周期变化

Fig.3 Periodic changes of precipitation days of different grade rainfall

日数的小波变换实部等值线图(图3(a)(b))可知,1981—2018年,在年降水日数的变化过程中均存在着1~7a、7~18a及18~38a的3种尺度的周期变化规律。对应7~18a周期,降水日数经历了增多—减少—增多—减少—增多的转换趋势,正负交替出现4次振荡;对应18~38a周期,降水日数经历了增多—减少—增多的变化趋势。中雨的年降水日数变化过程(图3(c))中存在着1~5a、5~9a、9~12a、12~18a、18~36a和36~38a多尺度的周期变化规律;大雨的年降水日数变化过程(图3(d))中存在着1~5a、5~11a、11~19a、19~36a和36~38a的多尺度的周期变化规律;总暴雨的年降水日数变化过程(图3(e))中存在着1~7a、7~18a、18~31a和31~38a的周期变化规律。总体来说,香洲城区不同等级的降水日数呈现多时间尺度的复杂嵌套,小尺度嵌套在较大尺度的周期性变化特征。

图4为不同等级降水日数的小波方差图,可以看出,总降水日数及小雨日数的小波方差图中存在3个较为明显的峰值,降水日数序列的能量中心分别位于5a、14a和25a的特征时间尺度,说明在这4年左右的振荡最为强烈,其中,最大峰值对应25a的时间尺度,为降水日数变化的第一主周期,14a和5a的时间尺度对应着第二、第三峰值,分别为降水日数变化的第二、第三主周期。中雨存在5个较为明显的峰值,分别为4a、7a、10a、14a和25a,其中,降水日数变化的第一主周期同样为25a、14a、4a、10a和7a分别为中雨日数变化的第二至第五主周期。大雨日数存在4个较为明显的峰值,能量中心分别位于14a、25a、10a和2a特征时间尺度,其中,14a左右的周期震荡为大雨日数变化的第一主周期,25a、10a和2a分别为大雨日数变化的第二至第四主周期。总暴雨存在3个较为明显的峰值,分别为4a、14a和24a,其中,14a左右的周期震荡为总

暴雨日数变化的第一主周期,24a和4a分别为总暴雨日数变化的第二、第三主周期。此外,从主振荡周期上看,香洲城区总暴雨日数减少的等值线还未闭合,说明在未来一段时间内该地区总暴雨日数将处于偏少的时期。

3.2.2 降水量的周期变化

图5为不同等级降水量小波变换的实部等值线图。由图5(a)可见,1981—2018年,年总降水量的变化过程中均存在着1~2a、2~7a、7~18a、18~33a和33~38a的5种尺度的周期变化规律。对应7~18a周期,降水量经历了增多—减少—增多—减少—增多的正负交替4次丰枯振荡;对应18~33a周期,降水日数经历了增多—减少—增多2次振荡变化。其中,小雨(图5(b))存在1~9a、9~18a和18~38a的周期变化规律,中雨(图5(c))存在1~5a、5~9a、9~18a、18~35a和35~38a的多尺度周期变化规律,大雨(图5(d))存在1~6a、6~11a、11~19a、19~36a和36~38a的变化规律,总暴雨(图5(e))存在1~2a、2~9a、9~20a、20~31a和31~38a的周期变化规律。总体来说,与降水日数变化周期相似,香洲城区不同降水量级的年降水量同样呈现出多时间尺度的复杂嵌套,小尺度嵌套在较大尺度的周期性变化特征,且不同等级降水的日数与降水量的振荡周期大致相似。

图6为不同等级降水量小波方差图,可以看出,总降水量及小雨量级的小波方差均存在3个较为明显的峰值,在5a、14a和25a的时间尺度振荡最为强烈。其中,最大峰值对应着25a的时间尺度,为降水量的变化的第一主周期,14a和5a时间尺度分别为第二、第三主周期。中雨存在4个较为明显的峰值,为4a、7a、14a和25a,其中,最大峰值同样对应25a的时间尺度,为降水量变化的第一主周期,14a、7a、4a分别为中雨降水量变化的第二至第五主周期。大雨同样存在4个较为明显的峰值,为2a、10a、14a和25a,其中,25a左右的周期震荡为大雨日数变化的第一主周期,14a、10a和2a分别为大雨日数变化的第二至第四主周期。总暴雨存在3个较为明显的峰值,分别为5a、15a和25a,其中,15a左右的周期震荡为总暴雨量变化的第一主周期,5a和25a分别为总暴雨量变化的第二、第三主周期。此外,从主振荡周期上看,香洲城区总降水量和总暴雨量减少的等值线还未闭合,说明在未来一段时间内该地区总降水量及总暴雨量将处于偏少的时期。

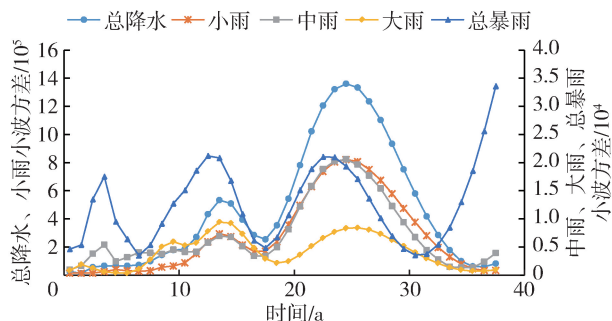


图4 不同等级降水日数小波方差

Fig.4 Wavelet variance diagram of precipitation days of different grade rainfall

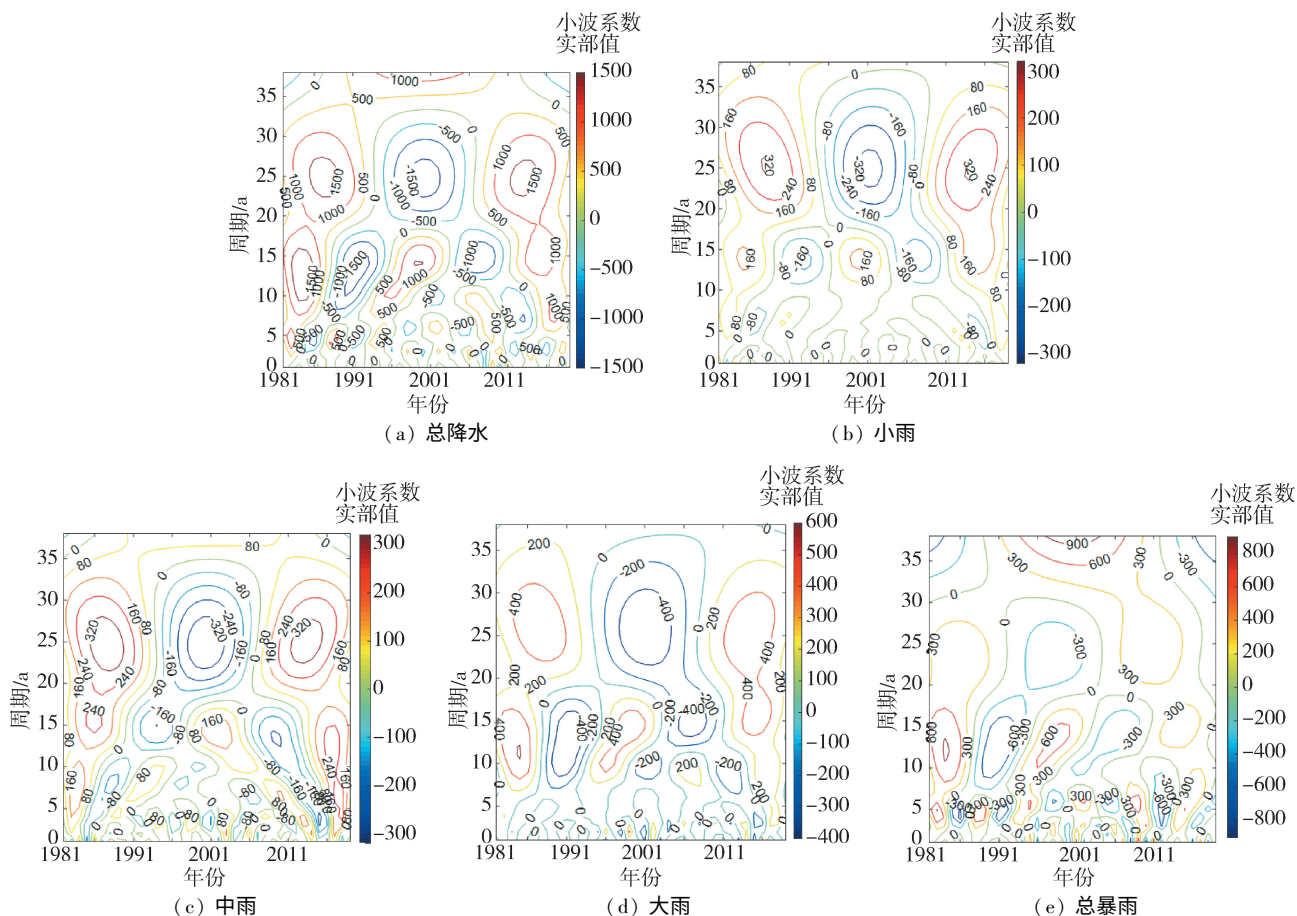


图5 不同等级降水量的周期变化

Fig. 5 Periodic changes of precipitation at different levels

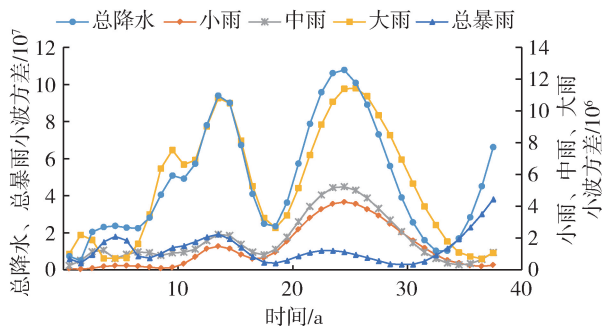


图6 不同等级降水量小波方差

Fig. 6 Wavelet variance diagram of different grades of precipitation

3.3 总暴雨场次年际及年内变化特征

1981—2018年,珠海市香洲城区降水达暴雨以上等级共计412场,总暴雨出现频次总体呈波动上升趋势,速率每10a为0.36次,2013年总暴雨频次达到峰值,2017年总暴雨频次最少。以旬为单位统计暴雨在年内发生的次数用于识别场次暴雨年内分布特征,结果表明,研究期内珠海市香洲城区暴雨最早出现于1月中旬,最迟出现于12月上旬,集中发生于4—10月,暴雨发生频次合计363场次,占场次暴雨总数的88.11%,其中,在4—6月前汛期雨季和7—10月后汛期雨季暴雨发生频次分别占场次暴

雨总数的43.69%和44.42%。

3.4 场次大暴雨时程分配及成因分析

通过珠海市2000—2018年逐日降水数据筛选出降水等级达大暴雨及以上等级的日期,以日为单位,对应NASA GPM IMERG时间间隔0.5h的降水数据,利用Origin 8.0绘制统计出的研究期间51场大暴雨及特大暴雨的时程分配特征,结果见图7。由图7可见,场次暴雨持续时间在4.5~23h之间,且降雨时长有增加趋势。为进一步探究其原因,对香洲城区城市化发展带来的土地利用类型变化情况进行统计分析,结果如图8所示。可见,1981—2018年林地面积占比由39.29%上升至41.41%,这是由于珠海市设立经济特区伊始,大力发展旅游业,将保护生态环境作为城市发展的战略目标^[20]。农田面积占比由23.34%下降到4%,农村居民点从有到无,大量农业人口转变为城镇人口^[21],产业和经济快速发展,使得城市建设用地面积占比由35.11%上升到51.52%,从而导致香洲城区产生“城市热岛效应”,使城区降雨时长增长^[22-23]。此外,51场暴雨中有39场峰值区间出现在夜间,8场出现在上午,6场出现在午间,5场出现在午后。究其原因,与空气中气溶胶粒子的日变化

规律有关。据统计,近年来珠海市空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度分别为 $28.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $45.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$, SO_2 和 NO_2 质量浓度分别为 $7.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $30.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$, CO 和 O_3 质量浓度分别为 $0.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $58.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。且空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度在 5:00—7:00 达到高值,颗粒物浓度随太阳辐射的增强和近地面大气混合层高度的增加而下降。由于东南沿海的地理位置,在午后多出现局部对流天气, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度降低,随着晚高峰的出现,气溶胶浓度有所回升,因此,暴雨峰值多出现在夜间。

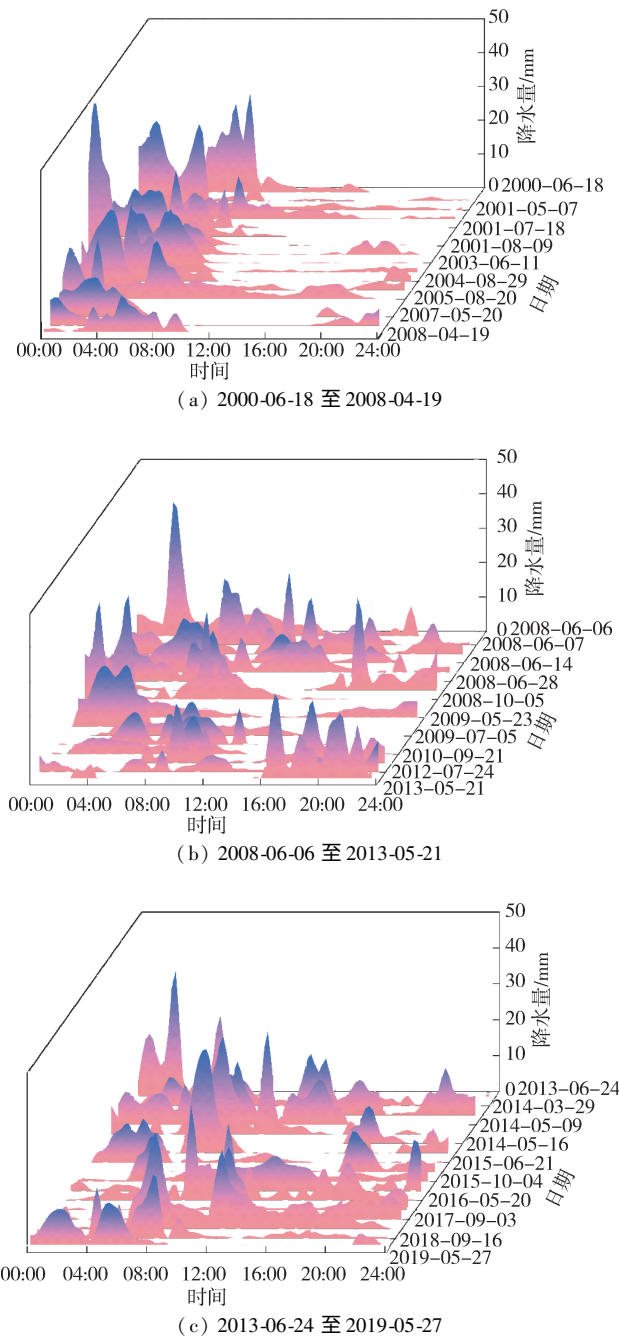


图7 场次大暴雨时程分配特征

Fig. 7 Time history distribution characteristics of heavy rainstorm

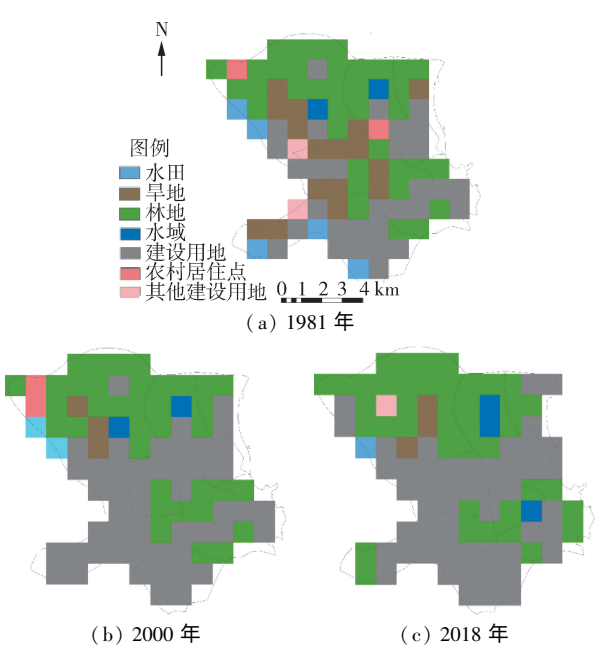


图8 珠海市香洲城区土地利用类型变化

Fig. 8 Changes in land use types in Xiangzhou urban area, Zhuhai City

4 结 论

a. 1981—2018 年,珠海市香洲城区总降水量、小雨、大雨及暴雨等级降水量呈波动减小趋势,下降率每 10 a 分别为 65.70 mm、2.45 mm、16.62 mm 和 46.37 mm;中雨、大暴雨和特大暴雨呈增加趋势,每 10 a 增加幅度分别为 0.52 mm、16.79 mm 和 28.23 mm。

b. 总降水量的减少主要是由于大雨及暴雨减少所造成。年降水日数及总降水量的周期变化均经历了增多—减少—增多—减少—增多的 4 次正负振荡变换,并以 25 a 的周期振荡为第一周期。

c. 场次暴雨持续时间在 4.5 ~ 23 h 之间,且降水时长有增加趋势,主要原因为城市化进程引起地面粗糙度增大对移动的降雨系统产生了阻碍效应,使城区雨时增长;暴雨峰值的出现时间频率由大到小排序为夜间、上午、午间、午后,这与空气中气溶胶粒子的日变化规律相关。

参考文献:

[1] 廉陆鹂. 中国降水特征变化及其对气候变暖的响应 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.

[2] 黄国如, 何泓杰. 城市化对济南市汛期降雨特征的影响 [J]. 自然灾害学报, 2011, 20 (3): 7-12. (HUANG Guoru, HE Hongjie. Effects of urbanization on rainfall characteristics in flood season in jinan [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20 (3): 7-12. (in Chinese))

[3] 黄国如, 罗海婉, 卢鑫祥, 等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述 [J]. 水资源保护, 2020, 36 (6): 1-6. (HUANG Guoru, LUO Haiwan, LU Xinxiang, et al. Study

- on risk analysis and zoning method of urban flood disaster [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 1-6. (in Chinese))
- [4] 陈隆勋,邵永宁,张清芬,等. 近四十年来中国气候变化的初步分析[J]. 应用气象学报, 1991, 2(2): 164-173. (CHEN Longxun, SHAO Yongning, ZHANG Qingfen, et al. A preliminary analysis of climate change in China in recent 40 years[J]. Journal of Applied Meteorology, 1991, 2(2): 164-173. (in Chinese))
- [5] 张建云,贺瑞敏,齐晶,等. 关于中国北方水资源问题的再认识[J]. 水科学进展, 2013, 24(3): 303-310. (ZHANG Jianyun, HE Ruimin, QI Jing, et al. A reunderstanding of water resources problems in northern China[J]. Progress in Water Science, 2013, 24(3): 303-310. (in Chinese))
- [6] 王澄海,崔洋. 西北地区近 50 年降水周期的稳定性分析[J]. 地球科学进展, 2006, 21(6): 576-584. (WANG Chenghai, CUI Yang. Stability analysis of recent 50-year precipitation cycle in northwest China[J]. Progress in Earth Science, 2006, 21(6): 576-584. (in Chinese))
- [7] 林纾,陆登荣,王毅荣,等. 1960 年代以来西北地区暴雨气候变化特征[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(3): 16-21. (LIN Shu, LU Dengrong, WANG Yirong, et al. Characteristics of rainstorm climate change in northwest China since the 1960s[J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(3): 16-21. (in Chinese))
- [8] 姜仁贵,解建仓. 城市内涝的集合应对体系[J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 17. (JIANG Rengui, XIE Jiancang. An integrated coping system for urban waterlogging[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 17. (in Chinese))
- [9] 王丛笑. 城市暴雨内涝的影响因素与减缓研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2017.
- [10] 黄津辉,王超,范泽华. 天津市设计暴雨雨型的演变[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 38-43. (HUANG Jinhui, WANG Chao, FAN Zehua. Evolution of design rainfall pattern in Tianjin[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 38-43. (in Chinese))
- [11] 廖代强,朱浩楠,周杰,等. 暴雨强度公式及其设计雨型的取样方法研究[J]. 气象, 2019, 45(10): 1375-1381. (LIAO Daiqiang, ZHU Haonan, ZHOU Jie, et al. Research on the formula of rainstorm intensity and the sampling method of designed rain pattern[J]. Meteorology, 2019, 45(10): 1375-1381. (in Chinese))
- [12] 袁婷婷,李国芳,王艺晗. 常州市区设计暴雨公式及雨型研究[J]. 水电能源科学, 2019(6): 16-18. (YUAN Tingting, LI Guofang, WANG Yihan. Research on the design formula of changzhou Urban Rainstorm and its Rain pattern[J]. Hydro-electric Energy Science, 2019(6): 16-18. (in Chinese))
- [13] 珠海市规划设计研究院. 珠海市城市防灾标准研究: 台风“天鸽”受灾汇编[M]. 珠海: 珠海市规划设计研究院, 2018.
- [14] 珠海市统计局. 珠海统计年鉴[M]. 珠海: 珠海市统计局, 2019.
- [15] 胡刚,宋慧. 基于 Mann-Kendall 的济南市气温变化趋势及突变分析[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2012, 26(1): 96-101. (HU Gang, SONG Hui. Trend and mutation analysis of temperature change in Jinan city based on Mann-Kendall[J]. Journal of Jinan University (Natural Science Edition), 2012, 26(1): 96-101. (in Chinese))
- [16] 杜尧,陈后慧,和鹏飞,等. 南京地区暴雨变化特性分析[J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 89-94. (DU Yao, CHEN Qihui, HE Pengfei, et al. Analysis of rainstorm variation characteristics in Nanjing region[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 89-94. (in Chinese))
- [17] 宋耘,李琼芳,牛铭媛,等. 基于 SWMM 模型的南京典型易涝区暴雨内涝模拟[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 56-61. (SONG Yun, LI Qiongfang, NIU Mingyuan, et al. Rainstorm and waterlogging simulation in typical inundated districts of Nanjing based on SWMM[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 56-61. (in Chinese))
- [18] MENG X, WANG H, SHI C, et al. Establishment and evaluation of the China meteorological assimilation driving datasets for the SWAT model(CMADS)[J]. Water, 2018, 10: 1555.
- [19] MENG X, ZHANG X, YANG M, et al. Application and evaluation of the China meteorological assimilation driving datasets for the SWAT model(CMADS) in Poorly Gauged Regions in Western China[J]. Water, 2019, 11: 2171.
- [20] 吴大放,刘艳艳. 基于 RS/GIS 的珠海市城市空间扩展[J]. 热带地理, 2013, 33(4): 473-479. (WU Dafang, LIU Yanyan. Urban spatial expansion of Zhuhai city based on RS/GIS[J]. Tropical Geography, 2013, 33(4): 473-479. (in Chinese))
- [21] 姚华松,许学强. 继续推进改革、开放和创新, 开创珠三角发展新局面:《珠江三角洲地区改革发展规划纲要》(2008—2020 年)之解读[J]. 特区经济, 2009(7): 41-42. (YAO Huasong, XU Xueqiang. Continue to promote reform, opening up and innovation, and create a new situation for the development of the Pearl River Delta region: an interpretation of the Outline of The Reform and Development Plan for the Pearl River Delta Region (2008-2020)[J]. Special Economic Zone, 2009(7): 41-42. (in Chinese))
- [22] 徐伟,史敏涛,陈华忠. 玉环市暴雨特性研究[J]. 农业与技术, 2019, 39(1): 158-161. (XU Wei, SHI Mintao, CHEN Huazhong. Study on characteristics of heavy rainfall in Yuhuan City[J]. Agriculture and Technology, 2019, 39(1): 158-161. (in Chinese))
- [23] 彭保发,石忆邵,王贺封,等. 城市热岛效应的影响机理及其作用规律: 以上海市为例[J]. 地理学报, 2013, 68(11): 1461-1471. (PENG Baofa, SHI Yishao, WANG Hefeng, et al. The impacting mechanism and laws of function of urban heat islands effect: a case study of Shanghai[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(11): 1461-1471. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-10-20 编辑: 王 芳)