

The Characteristics of Spatial-temporal Distribution of Rainstorm and its effect on Agriculture around the Region of Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay in Recent 36 years

Yusi Li
College of Geomatics, Xi'an University
of Science and Technology
Xi'an, China
934350471@qq.com
Qinghua Gong
Guangzhou Institute of Geochemistry,
Chinese Academy of Sciences
Guangzhou, China

Gqh100608@163.com
Junxiang Zhang
Tourism College, Huangshan
University
Huangshan, China
peonyzjx@126.com
Zhao Guo
Dongguan Urban Planning And Design
Insitute

Dongguan, China
421658279@qq.com
Bowen Liu
College of Land and Resources
Engineering, Kunming University of
Science and Technology
Kunming, China
542677354@qq.com

近 36a 粤港澳大湾区暴雨时空格局变化及其对农业的影响研究

李雨思
西安科技大学测绘科学与技术学院
西安 710054, 中国
934350471@qq.com
宫清华
中国科学院广州地理研究所
广州 510070, 中国

gqh100608@163.com
张俊香
黄山学院旅游学院
黄山 245021, 中国
peonyzjx@126.com
郭昭
东莞市城建规划设计院

东莞 523001, 中国
421658279@qq.com
刘博文
昆明理工大学国土资源工程学院
昆明 650093, 中国
542677354@qq.com

Abstract—Under the background of global warming, extreme weather phenomena occur frequently, and the number of natural disasters increases slowly. Rainstorm disaster is a common natural disaster, which has a significant impact on nature and society. Based on the daily rainfall data of 13 meteorological observation stations of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1980 to 2015 and the agricultural disaster data from 1992 to 2007, this paper discusses the temporal and spatial distribution characteristics of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area rainstorm in recent 36 years and the distribution of agricultural disasters under the influence of rainstorm by using Kringing method, principal component analysis and M/K detection. The results show that: (1) The area is rich in heavy rainfall. In time, the storm rainfall fluctuates and increases, which has the characteristics of seasonality and periodicity, and the number of rainstorm days decreases with the increase of rainstorm intensity. (2) Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area storm rainfall has obvious difference in space, showing a trend of increasing year by year from north to south. The rainstorm index is the highest and the lowest is Jiangmen and Zhaoqing respectively. (3) rainstorm is an important factor leading to flood disaster in this area. With the increase of storm rainfall, crops are affected by disasters, and the disaster area shows a downward trend year by year, which indicates that the regional economic level is improved and the ability of disaster prevention and mitigation is also strengthened. In the context of global warming. On the other hand, it can provide scientific basis for disaster prediction to understand the time evolution

and spatial distribution of rainstorm in Guangdong, Hong Kong and Macao Bay.

Keywords—Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, rainstorm, variation characteristics, principal component analysis, Mann-kendall

摘要—全球变暖背景下, 极端天气现象频繁发生, 自然灾害发生次数呈缓慢增加趋势。暴雨灾害是一种常见的自然灾害, 其对自然和社会的影响显著。本文基于 1980-2015 年粤港澳大湾区 13 个气象观测站点逐日降雨数据以及 1992-2007 年农业灾情数据, 利用 Kringing 法、主成分分析和 M-K 检测等方法, 探讨近 36 年来粤港澳大湾区暴雨时空分布特征以及在暴雨影响下, 农业灾情分布情况。结果表明: (1) 粤港澳大湾区暴雨量十分丰富。在时间上, 暴雨量呈现波动增加的趋势, 具有季节性、周期性特点, 并且暴雨日数随着暴雨强度的增加而减少。(2) 粤港澳大湾区暴雨量在空间上有明显的差异性, 呈现出由北向南逐年增加的趋势。暴雨指数最高、最低的区域分别为江门、肇庆。(3) 暴雨是导致本区洪涝灾害发生的重要因素。随着暴雨量的增加, 农作物受灾、成灾面积呈现逐年下降趋势, 说明区域经济水平提高, 防灾减灾能力也随之加强。在全球变暖大背景影响下, 详细了解粤港澳大湾区暴雨的时间演变和空间分布变化特征可为灾害预报提供科学依据。

关键词—粤港澳大湾区, 暴雨, 变化特征, 主成分分析, M-K 检测

I. 引言

气候变暖背景下,全球多数地区暴雨频发^[1-3],严重威胁人民生命财产安全,阻碍了社会经济的可持续发展^[4-5],加之城市规模不断扩张、人口增长以及机动车辆激增,灾害在社会经济系统中的叠加作用造成了巨大的损失^[6]。如2007年7月17日,重庆遭遇了115年来最强暴雨的袭击,受灾人口达272.3万,造成了巨大的财产损失^[3,7]。2010年东北地区和东南沿海地区受暴雨影响损失惨重,约2亿人次受灾,经济损失高达3505亿元^[8]。2012年7月21日,北京地区遭遇61年来最强暴雨,导致79人死亡,160.2万人受灾,经济损失达116.4亿元^[9],灾害造成的经济损失呈现着显著上升的趋势,且愈在经济发达的地区,灾害的损失程度就愈大,灾害产生的社会风险以及人民生活的影响愈大。

因此,国内外众多学者对其进行了大量的研究:Chagon S A对美国、Iwashima T等对日本、Osborn T J等对英国、Brunetti M对意大利、Stone D A等对加拿大都进行过降雨变化趋势的研究^[10-14]。张艳梅等^[15]指出贵州夏季暴雨量呈增加趋势,暴雨日数和暴雨量均存在15年和准10年的周期振荡;毛文书等^[16]采用模糊聚类和EOF方法分析了近50年江淮梅雨期暴雨的时空变化特征,认为江淮梅雨期暴雨量存在显著的南北两区差异,两区暴雨量均存在不同时间尺度的振荡周期;朱宵峰等^[17]采用小波分析、Mann-kendall非参数检验及趋势系数等方法分析了长江下游地区汛期暴雨特征,表明暴雨量呈现增加的趋势并具有多重时间尺度的周期变化;彭丽英等^[18]分析了华南前汛期暴雨的气候特征,表明华南前汛期暴雨降水量和频次的变化趋势都呈略减少且有明显的年际、年代际变化特征等等。

从研究区域来看,基于特大城市群区域的降雨时空分布的研究较少。城市群是城市发展成熟阶段的最高空间组织形式,是在地域上集中分布的若干城市和特大城市集聚而成的庞大的、多核心、多层次城市集团,是大都市区的联合体。气候变化,尤其是降雨的变化很可能对该区域的生产和生活带来巨大影响^[19]。粤港澳大湾区位于我国广东省中南部,该地区人口密集、经济高度发达,是自改革开放以来,受人类活动影响最为直接、显著的地区之一。此外,暴雨是诱发洪涝灾害的主要因素,造成极大财产损失,同时制约农业的可持续发展,本文将暴雨与农业灾情相结合分析其二者关系及影响,以期为我国沿海地区灾害风险提供科学支撑。

II. 研究区概况

粤港澳大湾区位于我国广东省的中南部,介于北纬23°40'-21°30'之间,其行政区域包括肇庆、广州、东莞、深圳、珠海、江门、惠州、中山、佛山共九个地级市以及香港、澳门特别行政区组成的城市群^[20],总面积达到5.6万平方公里(本文研究区不包括香港、澳门)。境内水系发育,河流众多,珠江流域构成本区的主要河流。地形复杂,主要以山脉、丘陵以及平原为主,地势北高南低,大体是以北向南伸向海洋的大斜坡^[21]。本区大部分地区处在海拔200m以下,地势平坦,植被茂盛,主要以亚热带常绿阔叶林植被为主^[22]。本区属于亚热带季风性气候,全年气候温和湿润,平均气温在21-23°C之间,平均降水量在1500-2300mm之间,全年4-9月为汛期,占全年降水量的80%以上^[23],10月至翌年3月是

非汛期。春夏降水量大于秋冬降水量,尤其是夏季多台风暴雨。多雨季节与高温季节同步,土壤肥沃,河道纵横,对农业有利(图1)。

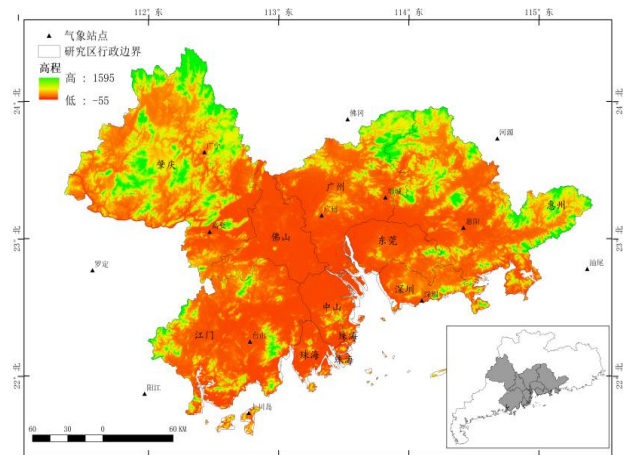


图1 研究区范围及气象站点分布

III. 数据与方法

A. 数据来源

IPCC AR5 报告指出,受多种尺度因素的影响,全球气候变化会显现出年际和年代际差异^[1-2]。而短期的气候变化趋势对起始年和终止年的选择很敏感,一般不能反映长期的气候变化,所以气候变化研究一般要基于30年及以上的数据资料^[24]。因此,本文气象站点数据下载自在中国气象数据共享网(<http://data.cma.cn>),包括粤港澳大湾区(香港、澳门除外)的13个气象站1980-2015年逐日降水数据。统计整理气象站点逐日降水观测数据,获取逐年暴雨量、年暴雨强度、暴雨日数数据等,并利用克里金法(Kriging)进行插值计算,裁切获得空间分布数据。

20世纪90年代以后,极端天气骤增,自然灾害频繁发生,为探讨在暴雨影响下,农业灾情的变化趋势,因此选取自《广东省农村统计年鉴》,1992-2007年农业灾情数据。主要是指统计整理研究区内各行政区因暴雨导致农作物发生的洪涝灾害的受灾面积和成灾面积数据。

B. 计算方法

降水充沛,暴雨雨量大是本区的气候特点。依据气象部门降雨等级标准^[25],本文首先对暴雨时间序列1980-2015年,统计整理8个降雨因子,分别是年暴雨量、暴雨日数、年暴雨强度、年大暴雨量、年大暴雨日数、年特大暴雨量、年特大暴雨日数。采用主成分分析方法,构建暴雨指数,计算方法为:对于要分析的地理对象,假设存在 k 个样本(行),每个样本有 n 个变量(列),构成一个 $n \times k$ 的矩阵,当变量 n 个数较多时,不利于对问题的分析和考虑,这就需要降维处理,将 n 个变量归并为少数几个变量,而所包含主要信息量不减少的目的。设新的变量为 y_1, y_2, \dots, y_k ($k < n$),则新的变量是原有变量 $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in}$ 的多元线性函数,构成如下方程组:

$$y_1 = v_{11}x_{i1}' + v_{21}x_{i2}' + \dots + v_{n1}x_{in}'$$

$$\dots$$

$$y_k = v_{1k}x_{i1}' + v_{2k}x_{i2}' + \dots + v_{nk}x_{in}' \quad (1)$$

以每个主成分所对应的特征值占原变量总方差的比例作为权重计算主成分综合表达式(2)，以此作为原来 n 个降水因子的暴雨指数。

$$Y = \frac{\lambda_1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} * y_1 + \frac{\lambda_2}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} y_2 \quad (2)$$

并对结果极差标准化，将暴雨指数划分为 5 个等级：暴雨指数值在[0, 0.2)为 I 级；暴雨指数值在[0.2, 0.4)为 II 级；暴雨指数值在[0.4, 0.6)为 III 级；暴雨指数值在[0.6, 0.8)为 IV 级；暴雨指数 ≥ 0.8 为 V 级。暴雨指数越高表示暴雨强度越大，反之亦然。

除采用主成分分析方法以外，本文还采用统计分析方法和 Mann-Kendall 突变检测(M-K 突变检测)^[26]的方法来诊断暴雨的趋势特征和突变特征。累积距平法来直观判断气候变化的趋势。其数学模型表示如下^[27]：

$$X_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}) \quad (t = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

式中， $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ，计算 n 个时刻的累积距平值，

绘制累计距平曲线，进行趋势分析。累积距平值有正有负，当为正值时，说明降水量表现为增加趋势；反之，降水量表现为减少趋势；当累计距平值为 0 时，说明气候变化幅度不大。

IV. 结果与分析

A. 粤港澳大湾区暴雨时间动态变化

统计表明(图 2)，近 36 年来，粤港澳大湾区 1-12 月均有暴雨出现。计算表明，86.47%的暴雨出现在 4-9 月的汛期，其中前汛期占 49.14%，后汛期占 37.32%。从粤港澳大湾区逐月暴雨总日数分布情况可以看出，暴雨日数有 2 个连续的跳跃增长，一是 3 月份 136 d 突增至 4 月份 358 d，增加了 222 d；二是从 4 月份增至 5 月份，增加了 189 d。此外，暴雨日数还有 2 个快速下降，分别是 6 月份下降至 7 月份 432 d 以及从 8 月份下降至 9 月份 285 d。另外，暴雨日数和大暴雨日数的月际分布均具有单峰特征。峰值均出现在 6 月份，分别为 621 d 和 189 d。

4-6 月，由于冷暖空气频繁交替，雨量增多，在南海季风的影响下，暴雨增多，造成暴雨日数的突增^[28]；7-9 月，受到台风等热带天气系统的影响，暴雨日数较前汛期减少且分布差异小。非汛期，受冷空气影响，暴雨大幅减少。

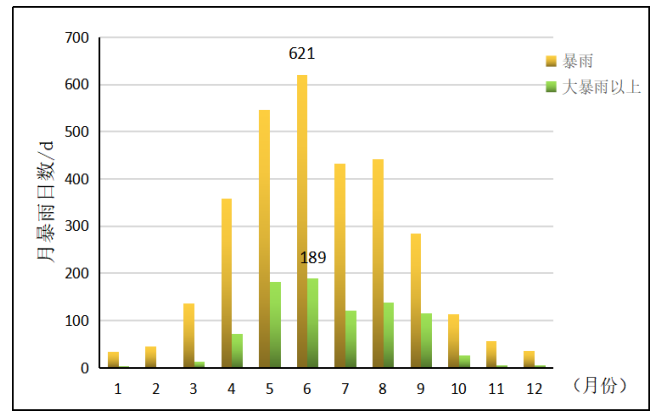
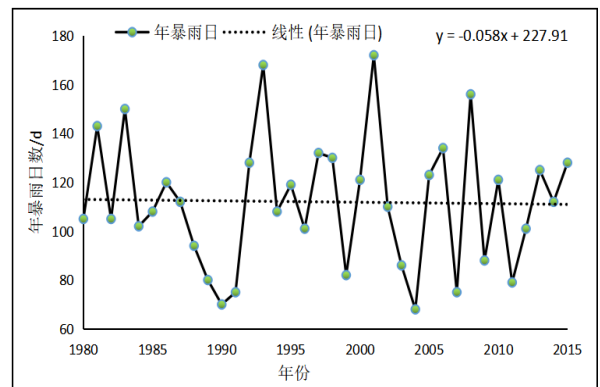
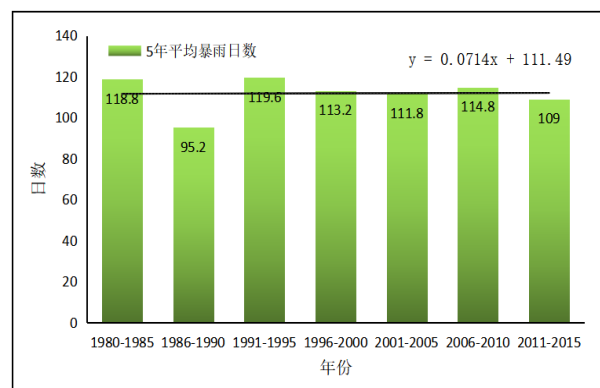


图 2 粤港澳大湾区 1980-2015 年逐月暴雨总日数

1980-2015 年粤港澳大湾区逐年暴雨日变化差异明显(图 3a)。采用 Excel 建立暴雨日与时间序列线性拟合，计算表明，年暴雨日数总体上以每年 0.058 d 的势下降。近 36 年暴雨总日数为 4031 d，平均每年约为 112 d，占全年降水天数的 36.72%。最多年 172 d(2001 年)，最少年为 68 d(2004 年)。另外，将研究时间序列以 5 年为一时段，划分(1980-1985 年是 6 年为一时段)为 7 个时段(图 3b)，计算表明，在这 7 个时段里，年暴雨日数以每 5 年 0.0714 d 的趋势增加，其中 1986-1990 时段，年均暴雨日数最少(95.2 d)，1991-1995 时段，年均暴雨日数最多(119.6 d)。



(a)

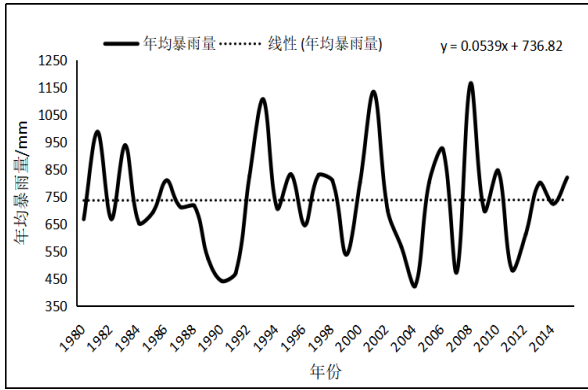


(b)

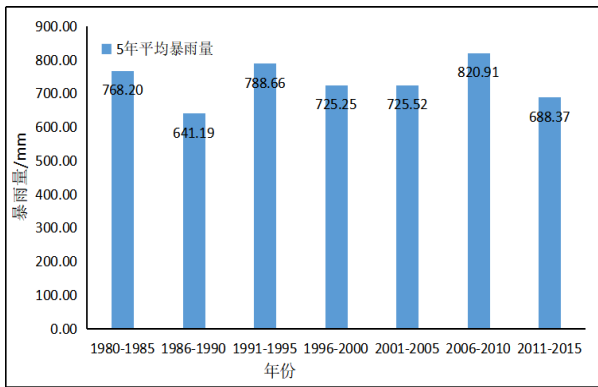
图 3 1980-2015 年粤港澳大湾区逐年暴雨总日数 (a) 和 5 年平均暴雨日数 (b) 变化

为进一步探讨研究区暴雨年际变化特征，从图 3c 中可知，年暴雨量分布情况与年暴雨日数(图 3a)分布

一致，然而，经过计算表明，1980-2015 年间，平均年暴雨量约为 736.87mm，占全年降水量的 43.67%左右，其中，年暴雨量最大值和最小值分别为 1164.24mm 和 424.68mm，出现在 2008 年和 2004 年。并且，年暴雨量以每年 0.0539mm 的趋势在增加。对比图 3a 和图 3c 结果表明，暴雨日数与暴雨量的变化趋势相反，暴雨日数随着暴雨强度的加大而减少。此外，从图 3d 可知，暴雨量的时段分布呈现“减-增-减-增”的变化趋势，说明暴雨量在时间序列上具有波动递增的周期性特点。



(c)



(d)

图 3 1980-2015 年粤港澳大湾区年均暴雨量 (c) 和 5 年平均暴雨量 (d) 变化

B. 粤港澳大湾区暴雨空间动态变化

通过上述对粤港澳大湾区不同时间段的暴雨在时间上的变化特征分析，本文将时间序列以 5 年为时间间隔，分别选取 1980、1985、1990、1995、2000、2005、2010 和 2015 年为代表年份，对本文 8 个降水因子进行主成分分析计算，在 Arcgis10.2 统计分析模块的支持下，计算出各行政区在不同时期的暴雨指数。结果表明，得到暴雨指数的前 2 个主成分的方差贡献率均达到 80%以上，并能较好的反映出粤港澳大湾区各行政区内暴雨的累积作用和剧烈程度在时空上的分布特征。

从表 1 可知，各区年平均暴雨指数按照大小值顺序，依次为：江门>惠州>珠海>深圳>广州>东莞>中山>佛山>肇庆，年平均暴雨指数最大值出现在江门市（0.79），最小值出现在肇庆市（0.35）。暴雨指数最大值出现在 2000 年的深圳市（1.0），主要原因是在 2000 年 4 月 14 日遭受特大暴雨，单日暴雨量达 344mm，突破 1952 年以来该地日暴雨量记录^[29]；最小值出现 1995 年的佛山市（0.18）。其中，珠海市除 1990 年以外，暴雨指数均超过 0.6，而在 1990 年暴雨指数最低，说明 1990 年珠海市暴雨强度相较于其他时期暴雨强度较弱；肇庆市暴雨指数在各个时期均小于 0.6，说明肇庆市暴雨强度相较于其他地区较弱。

粤港澳大湾区暴雨指数等级空间分布差异明显，不同时期各区暴雨指数等级不同，总体上呈现沿海地区向大陆地区降低趋势。暴雨指数等级主要在 II-V 级为主，I 级只出现一次，在 1995 年的佛山（图 4d）。II 级暴雨指数主要分布在肇庆和佛山两地，III 级暴雨指数主要分布在广州、中山、东莞等地区，IV、V 级暴雨指数主要分布在惠州、珠海、深圳和江门地区，其中，紧靠沿海的江门市是暴雨指数等级最高的地区，说明江门是暴雨强度最大的地区。从图 4 中可知，2000 年之前，肇庆暴雨指数等级无明显变化，暴雨指数等级均为 II 级，说明暴雨强度较低，暴雨变化趋势较稳定。然而，2000 年以后，肇庆暴雨指数等级在 II 级暴雨指数和 III 级暴雨指数间波动，呈现“上升-下降-又上升”的变化趋势。同样地，其他地区在不同时期里，暴雨指数等级呈现出相似的变化趋势，更加印证了暴雨变化趋势呈现周期性变化规律的特征，具体的周期尺度还需进一步的研究。

表 1 不同时期各行政区暴雨指数变化情况表

年份	珠海	深圳	江门	中山	广州	惠州	佛山	东莞	肇庆
1980	0.63	0.86	0.49	0.61	0.75	0.91	0.47	0.82	0.37
1985	0.65	0.42	0.85	0.46	0.56	0.53	0.36	0.46	0.29
1990	0.48	0.48	0.77	0.26	0.39	0.73	0.22	0.32	0.31
1995	0.69	0.59	0.94	0.40	0.30	0.53	0.18	0.38	0.21
2000	0.84	1.00	0.80	0.81	0.80	0.89	0.64	0.94	0.45
2005	0.64	0.66	0.68	0.57	0.61	0.80	0.43	0.64	0.34
2010	0.73	0.50	0.87	0.54	0.57	0.41	0.52	0.51	0.31
2015	0.78	0.61	0.94	0.58	0.80	0.71	0.57	0.58	0.52
年平均暴雨指数	0.68	0.64	0.79	0.53	0.60	0.69	0.43	0.58	0.35

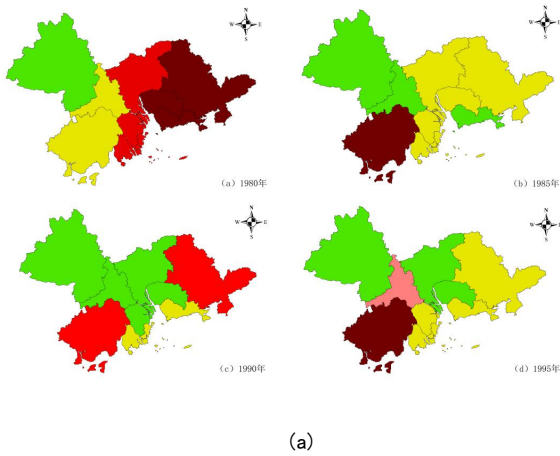


图 4 不同时期暴雨指数等级空间分布图 (a)

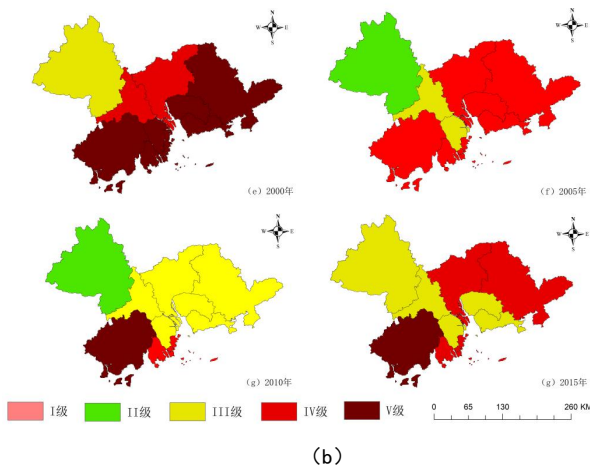


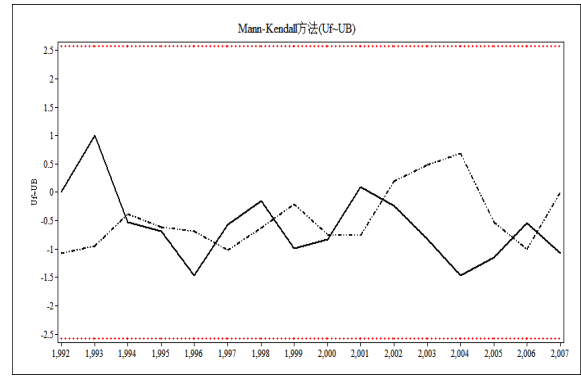
图 4 不同时期暴雨指数等级空间分布图 (b)

C. 暴雨与农业灾情分析

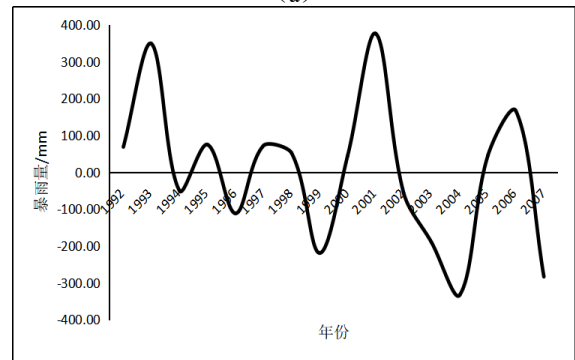
为近一步探讨在研究时间序列内，暴雨与洪涝灾害的相关关系，本文收集了大量相关资料，并对农业灾情数据进行计算处理和分析。M-K 突变检测结果表明（图 5a），在置信区间内，UF 和 UB 曲线出现了 6 个交点，交点首次出现是在 1994 年，此时暴雨量开始发生突变，之后突变年份依次是 1996、1998、2000、2002、2005 和 2006 年，突变原因是受到台风风暴等天气系统影响，天气易走极端。如“94.6”特大洪水受 9403 号强热带风暴影响，造成一场历时长、范围广、强度大的连续性大暴雨^[30]，“98.6”特大洪水规模更是仅次于 1915 年特大洪水，珠江三角洲部分河道出现超 200 年一遇洪水^[31]，1996 年的大洪水更是危机两广和湖南等地区^[32]。2000 年 8 月，受台风“碧利斯”影响，广东省发生特大洪水；2005 年 6 月，持续一周特大致洪暴雨过程，使广东省遭遇了百年一遇的洪水灾害；2006 年 7 月，受第 4 号强热带风暴影响，广东遭受了近年来最严重的一次的洪涝灾害^[33-34]。2002 年，我国多地降雨量少，干旱范围较广，广东省因早有 1300 多座水库干涸^[35]。

累积距平（图 5b）结果表明：1994 年和 1996 年累积距平值均为负值，说明 1994 年和 1996 年年暴雨量呈现下降趋势，1998 年累积距平值大于 0，说明年暴雨量开始呈现增加趋势；自 2000 年起，除 2002 年累积距平值小于 0 外，2000、2005 和 2006 年累积距平值均大于 0，说明年暴雨量从 2000 年开始呈现波动增加的趋势。

结合两种检测结果可知，粤港澳大湾区年暴雨量总体呈现周期性递增的趋势。



(a)



(b)

图 5 1992-2007 年暴雨量 M-K 突变检测 (a) 和累积距平图 (b)

从图 6 可知，在研究区内，以 2000 年为时间节点。2000 年以前，农作物受灾面积和成灾面积范围较大，其中，气候突变年份中，1994 年农作物受损最为严重，成灾面积占受灾面积的 68%以上，其次是 1998 年，农作物成灾面积占到受灾面积的 63.6%，1996 年农作物成灾面积占受灾面积的 43.97%。2000 年以后，农作物受灾面积和成灾面积明显降低，在气候突变年份中，2005 年和 2006 年受灾面积影响范围较大，成灾面积分别占到受灾面积的 33.2%和 26.7%。依据计算结果发现，年暴雨量变化趋势与农作物的受灾面积和成灾面积变化趋势不尽相同，原因可能是随着经济进步和技术发展，加之防灾减灾战略实施，对于洪涝灾害的预警与治理有着明显成效，因此农作物受到洪涝灾害的影响较小。

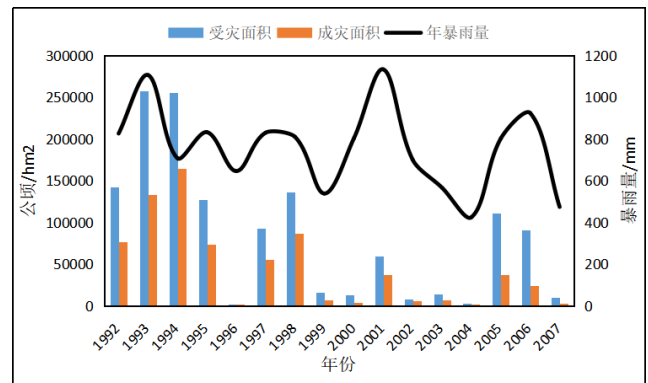


图 6 农作物受灾面积、成灾面积和年暴雨量情况分布图

V. 结论与讨论

本文基于 1980-2015 年气象数据, 利用表征暴雨的 8 个降水因子, 构建了基于年暴雨日数和年暴雨量的暴雨指数模型, 结合 M-K 检测方法、累积距平法等方法, 分析了粤港澳大湾区近 36 年来暴雨时空格局变化趋势以及与农业灾情的关系影响, 并对该变化趋势及影响进行分析, 得出以下结论:

(1) 粤港澳大湾区暴雨量十分充沛, 1980-2015 年间, 1-12 月均有暴雨以及大暴雨甚至特大暴雨的出现, 汛期暴雨量高于非汛期暴雨量, 后汛期暴雨量高于前汛期暴雨量, 具有季节性特点。暴雨日数每年以 0.058 d 的趋势减少, 暴雨量每年以 0.054 mm 的趋势增加, 表明暴雨量呈现递增的变化趋势且暴雨日数随着暴雨强度的增加而减少。5 个暴雨量时间段呈现“减-增-减-增”的变化趋势, 表明暴雨量在时间序列上具有波动递增的周期性特点。

(2) 近 36 年来, 粤港澳大湾区暴雨量空间上呈现由北向南(即由内陆地区向沿海地区增加)递增的分布规律。除肇庆、佛山外, 平均暴雨指数均达到 0.5 以上。暴雨指数等级空间分布差异明显, 不同时期各地区暴雨指数等级不同, 其中肇庆暴雨指数等级最低, 为 II 级, 江门暴雨指数等级最高, 达到 V 级, 表明构建暴雨指数模型与实际暴雨空间分布情况相符合。

(3) 暴雨是造成洪涝灾害的重要因素, 与农作物的受灾、成灾面积有着直接关系。在暴雨突变年份中, 农作物的受灾、成灾面积也与之产生相应的变化趋势。但是, 农作物受灾、成灾面积的变化趋势与暴雨量变化趋势并不完全相同, 反而呈现逐年下降的趋势, 2000 年以后, 表现尤为显著。这说明区域经济水平的提高, 抗灾能力也随之加强, 农业灾情得到良好的预防与把控。

本文分析了粤港澳大湾区近 36 年来暴雨时空格局的变化趋势特征, 并将暴雨与农业灾情结合, 以期沿海地区灾害风险的预防与治理提供科学支撑。整个研究区内, 暴雨时空分布特征除主要受台风、气旋等多种类型天气系统影响外, 地形地貌、植被、水源等外界因素也是影响暴雨产生分布差异的原因, 而本文未考虑到这些相关因素; 洪涝灾害的发生也会受到农作物自身条件以及人类工程活动等方面的影响, 而本文没有考虑这些方面。因此, 如何细化研究外界因素以及人类活动对暴雨的影响程度, 还需今后研究中进一步加强。此外, 除暴雨所引发的洪涝灾害外, 还会导致滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害的发生, 且造成社会经济损失惨重, 人民生活受到严重影响, 所以, 暴雨所带来的自然风险以及社会风险的影响分析将作为下一步的研究计划重点。

致谢

本项目受国家自然科学基金面上项目(编号: 41671506 和编号: 41977413)、广东省科技计划: 粤港澳大湾区城市群生态系统观测研究站 2018B030324002、广东省科学院实施驱动发展能力建设专项: 地理信息产业化和智库平台建设(2018GDASCX-0101)资助。

参考文献

[1] IPCC SREX. "Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation". London: Cambridge University Press, 2012.

[2] IPCC AR5. "Intergovernmental panel on climate change climate change fifth assessment report (AR5)". London Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2013.

[3] 孔锋, 史培军, 方建, 等. "全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望". 灾害学, vol.32, issue 2, pp.165-174, 2017.

[4] Zou X, Ren F. "Changes in regional heavy rainfall events in China during 1961-2012". *Advances in Atmospheric Science*, vol.32, issue 5, pp.704-714, 2015.

[5] 孔锋, 刘凡, 吕丽莉, 等. "1961-2010 年中国大尺度区域暴雨时空分布特征研究". *长江流域资源与环境*, vol.26, issue 4, pp.631-640, 2017.

[6] 史培军, 孔锋, 叶谦, 等. "灾害风险科学发展与科技减灾". *地球科学进展*, vol.29, issue 11, pp.1205-1211, 2014.

[7] Gao J, Lin H, You L, et al. "Monitoring early - flood season intraseasonal oscillations and persistent heavy rainfall in South China". *Climate Dynamics*, vol.47, issue 12, pp.3845-3861, 2016.

[8] Ren Z, Zhang M, Wang S, et al. "Changes in daily extreme precipitation events in South China from 1961 to 2011". *Journal of Geographical Sciences*, vol.25, issue 1, pp.58-68, 2015.

[9] Ban N, Schmidli J, Schär C. "Heavy precipitation in a changing climate: Does short-term summer precipitation increase faster?". *Geophysical Research Letters*, vol.42, issue 4, pp.1165-1172, 2015.

[10] Chagon, S A. "Comments on secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States". *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol.79, pp.2550-2552, 1998.

[11] Iwashima T, Yamamoto R. "A statistical analysis of the extreme event: long -term trend of heavy daily precipitation". *Journal of Meteorological Society of Japan*, vol.71, pp.637-640, 1993.

[12] Osborn T J, Hulme M, Jones P D, et al. "Observed trends in the daily intensity of United Kingdom precipitation". *International Journal Climatology*, vol.20, pp.347-367, 2000.

[13] Brunetti M, Maugeri M, Monti F, et al. "Changes in daily precipitation frequency and distribution in Italy over the last 120 years". *Journal of Geophysical Research*, vol.109, .D05102, doi:10.1029/2003JD004296, 2004.

[14] Stone D A, Weaver A J, Zwiers E W. "Trends in Canadian precipitation intensity". *Atmosphere Ocean*, vol.37, pp.321-347, 1999.

[15] 张艳梅, 江志红, 王冀, 等. "贵州夏季暴雨的气候特征". *气候变化研究进展*, vol.4, issue 3, pp.182-185, 2008.

[16] 毛文书, 王谦谦, 王永忠, 等. "近 50a 江淮梅雨期暴雨的区域特征". *南京气象学院学报*, vol.29, issue 1, pp.33-40, 2006.

[17] 朱宵峰, 钱永甫, 宁亮, 等. "长江下游地区汛期暴雨气候特征分析". *热带气象学报*, vol.24, issue 2, pp. 136-146, 2008.

[18] Peng Liying, Wang Qiangqian, Ma Hui. "A study on the climatic features of the rainfall of rain storms in the pre-flood season in South China". *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, vol.29, issue 2, pp.281-288, 2006. [彭丽英, 王谦谦, 马慧. "华南前汛期暴雨气候特征的研究". *南京气象学院学报*, vol.29, issue 2, pp.281-288, 2006.

[19] 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". *水文*, vol.36, issue 4, pp.31-36, 2016.

[20] 胡兆量: "《珠三角港澳化及湾区中心化——关于大珠三角地区发展的几点思考》", 《城市问题》, vol.9, pp.2-4, 2009.

[21] 宫清华, 黄光庆, 郭敏, 等. "基于 GIS 技术的广东省洪涝灾害风险区划". *自然灾害学报*, vol.18, issue 1, pp.58-63, 2009.

[22] 梁禄元. "珠江三角洲农地整治综合效益分区评价与比较分析".

[23] 冯峥嵘. "浅谈珠三角地区土质边坡灾害的一般规律". *武汉生物工程学院学报*, issue 2, pp.117-120, 2010.

[24] 翟盘茂, 王萃萃, 李威. "极端降水事件变化的观测研究". *气候变化研究进展*, vol.3, issue 3, pp.144-148, 2007.

[25] 丁一汇. "中国气象灾害大典(综合卷)". 北京:气象出版社. 2008.

- [26] 孔锋, 吕丽莉, 方建, 等. “中国不同时段气候变暖速率的时空分异研究(1961—2014)”. 北京师范大学学报(自然科学版), vol.53, issue 4, pp.426-435, 2017.
- [27] 钟起海, 钟佳李, 王芳. “定安县近 40 年气候变化特征分析.” 气象研究与应用, vol.32, issue 2, pp.8-11, 2010.
- [28] 曾琮, 谢炯光, 谢定升. “广州市的大暴雨灾害及其天气成因分析.” 灾害学, vol.18, issue 3, pp.54-60, 2003.
- [29] 谢小敏, 胡文瑄, 王小林, 等. “新疆柯坪地区寒武纪-奥陶纪碳酸盐岩沉积旋回的碳氧同位素研究.” 地球化学, vol.38, issue 1, pp.75-88, 2009.
- [30] 张金标, 陈淡芳, 欧善国, et al. “广东的洪涝及其对农业的危害与防御对策”. 热带地理, vol.22, issue 2, 2002.
- [31] 刘俊勇. “对近年珠三角区域外洪与内涝问题的新思考.” 人民珠江, vol.35, issue 5, pp.16-20, 2014.
- [32] “龙舟水”泛滥成百年一遇的特大洪灾”. 广东气象, issue 3, pp.55, 2005.
- [33] 宋国坤. “水情自动测报系统在长潭水库特大洪水中的应用”. 水电厂自动化, issue 1, pp.74-76, 2002.
- [34] 刘圣楠, 崔晓鹏. ““碧利斯”(2006)暴雨过程降水强度和降水效率分析.” 大气科学, vol.42, issue 1, pp.192-208, 2018.
- [35] 陆军天. “2002 年我国天气气候特点”. 气象, vol.29, issue 4, pp.32-36, 2003.