

基于高分辨率数据的热带气旋降水时空变化特征*

林泽群¹, 吴海鸥², 杨振华¹, 张智¹, 王大刚¹

1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510006

2. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519082

摘要: 热带气旋降水的时空分布和变化对受灾地区具有重要影响, 而目前鲜有关于短时热带气旋降水及其时空分布特征的研究。本文利用高时空分辨率的降水产品数据 CMFD, 基于基尼系数、空间基尼系数和线性回归方法, 对 1979—2018 年影响我国的热带气旋降水时空分布特征及其变化趋势进行研究, 结果表明: 1) 热带气旋年影响频次和年降水量在空间上均表现出从东南向西北减少的规律; 在趋势上, 影响频次在我国东南大部分地区表现为显著下降, 而年降水量则表现出明显的空间差异性。2) 热带气旋降水时长呈现出减少的趋势, 导致降水强度和降水集中度增加, 表明热带气旋会带来更强和在时间分布上更加集中的降水。3) 四场热带气旋事件分析的结果表明, 中心路径 200 km 范围内为主要降水区域; 在 800 km 范围内, 降水随距离的增加在时间分布上更加集中。

关键词: 热带气旋降水; 降水集中度; 基尼系数; 时空变化特征

中图分类号: P468.024 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2023)05-0157-14

The spatio-temporal characteristics of tropical cyclone precipitation based on high-resolution data

LIN Zequn¹, WU Haiou², YANG Zhenhua¹, ZHANG Zhi¹, WANG Dagang¹

1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China

2. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

Abstract: The spatiotemporal distribution and variation of tropical cyclone precipitation have significant impacts on disaster-affected areas. However, studies on short duration tropical cyclone precipitation and its spatiotemporal distribution characteristics are lacking. Therefore, this study uses a precipitation product data with high spatial and temporal resolution, based on Gini index, Space Gini index and linear regression method, to study the spatial and temporal distribution characteristics and trends of tropical cyclone precipitation. The results show that: 1) the average annual impact frequency and annual precipitation of tropical cyclones decrease from southeast to northwest. The trend of influence frequency decreases significantly in most southeast regions of China, and the trend of annual precipitation shows obvious spatial differences. 2) Precipitation duration of tropical cyclones shows a decreasing trend, resulting in an increase in precipitation intensity and concentration, which indicates that tropical cyclone precipitation was more concentrated in time while its intensity is enhanced. 3) The analysis results of four tropical cyclones show that, within 200 km of the central path is the main precipitation ar-

* 收稿日期: 2023-01-09

录用日期: 2023-02-20

网络首发日期: 2023-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(52079151)

作者简介: 林泽群(1998年生), 男; 研究方向: 水文气象学; E-mail: Linzq25@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 王大刚(1975年生), 男; 研究方向: 极端气候变化、水文气象预测等; E-mail: wangdag@mail.sysu.edu.cn

ea, which is uniform in temporal distribution. In the range of 800 km, precipitation is more concentrated in time with the increasing distance.

Key words: tropical cyclone precipitation; precipitation concentration; Gini index; spatiotemporal characteristics

热带气旋作为一种中尺度的天气系统,其伴随的大风天气、强降水及其引发的一系列次生灾害,包括城市洪涝、水库决堤、泥石流和滑坡等地质灾害,严重影响社会经济运行和人民的生命财产安全。受东风气流、季风槽和西太平洋副高的影响,西北太平洋上生成的热带气旋大部分会向中国大陆移动(胡媛媛等, 2022),这使得我国成为受热带气旋影响最为严重的国家之一。据统计, 1995—2005年期间热带气旋平均每年造成经济损失高达292亿元,死亡人数达438人(秦大河, 2008); 2005—2016年期间热带气旋造成的经济损失上升到每年695亿元(吴彩铭等, 2022)。作为重要的致灾因子,热带气旋引发的极端降水和强风对房屋及室内财产造成重大损失,并且可能进一步引发流域性洪水和城市内涝等问题(方伟华等, 2022)。因此,研究热带气旋降水的时空变化特征,对防台减灾工作具有重要意义。

已有研究提出了多种识别热带气旋降水的方法和技术。如采用天气图人工判别的方法进行热带气旋降水的识别;任福民等(2001)提出的客观天气图分析法,在识别雨带的基础上判别热带气旋引发的降水的空间特征,从而提取出热带气旋降水;王咏梅等(2006)对客观天气图分析法进行了改进,认为其中的参数 D_0 和 D_1 ,取值应随台风强度等级的变化而变化; Touma et al.(2019)利用热带气旋路径作为中心、700 km为半径的缓冲区对美国地区的热带气旋降水进行识别。在识别热带气旋降水的基础上,许多学者对其时空特征、空间分布规律和变化趋势等开展了相关的研究。在我国,热带气旋降水时间上主要集中于5~7月,其主要影响的地区为东南沿海地区以及海南省,其降水量以及对年降水量的贡献呈现出减少的趋势(Ren et al., 2002)。杨慧等(2019)利用1960—2017年的数据研究热带气旋对降水变化的影响,发现热带气旋降水量呈现出显著下降趋势,减少的中心位于广东和海南。然而,我国东南部地区的热带气旋降水量和强度呈现增加的趋势,如 Ying et al.(2011)对影响我国大陆地区的热带气旋

的大风和降水进行了趋势分析,发现长江以南地区的单场热带气旋降水量和1 h降水强度表现出增加趋势; Zhang et al.(2013)利用1965—2009年514个气象站点数据对热带气旋降水进行研究,发现我国东南部的单场热带气旋降水量呈现出显著的增加趋势,并且这种趋势与热带气旋本身的强度没有明显关系。从已有的研究中可以发现,我国热带气旋在频次和降水量上呈现出减少的趋势,但是在东南部地区单场降水量以及降水强度则呈现出增强的趋势。

降水集中度用于表征降水在时间序列中的分布情况,常用的指标包括:降水集中度(PCD, precipitation concentration degree)、降水集中期(PCP, precipitation concentration period)、降水集中指数(PCI, precipitation concentration index)和基尼系数(GI, Gini index)等。在不同指标中,GI因为具有去参数化和适应性强的优点,被广泛应用于降水集中度的研究中; Rajah et al.(2014)利用GI等研究了全球范围内的降水集中度及其变化趋势,发现在美国、南美洲南部和西欧呈现出增加的趋势,而在东亚地区则是下降的趋势; Monjo et al.(2016)利用GI等降水集中度指标和日降水数据,研究降水在年内的分布情况以及空间差异,结果发现在季节性温暖的海岸地区(比如巴西、澳大利亚)和靠近沙漠的地区,比较快速的大气对流活动使得降水集中度更高;刘新有等(2007)利用GI分析了云南省昆明市1972—2001年降水情况和降水分布均匀度的情况,发现昆明市降水量在研究时段内呈现出增加的趋势,并且GI的年际振幅越来越大,降水时间分布稳定性减弱,可能会进一步加剧旱涝灾害;王钰峰(2017)利用GI对黑河莺落峡水文站的年降水集中度进行分析,发现降水在年内分布极不均匀,汛期降水集中。

已有热带气旋降水的研究,大部分都基于站点的日尺度数据(Ren et al., 2002, 2006; Zhang et al., 2013; 杨慧等, 2019);少量研究采用小时级别的降水数据(Ying et al., 2011),但空间分辨率较低(蒋贤玲等, 2017; 孙行知等, 2017; 覃皓等,

2022)。热带气旋携带大量来自海洋的水汽,在地形、下垫面、大尺度环境场以及自身移向等因素的综合作用下使得登陆台风降水在短时间内可能发生剧烈变化,而且这种变化的空间异质性很强(倪钟萍等,2022)。相较于低时空分辨率数据,高时空分辨率数据能够更好地捕捉热带气旋降水的精细时空特征变化。此外,目前鲜有利用GI分析热带气旋降水时空分布特征的研究。因此,本文旨在利用高分辨率降水产品数据、热带气旋路径数据,研究热带气旋降水的时空特征,并特别关注降水集中度的变化特征,从而更好地了解热带气旋降水的时空分布规律,为防风减灾提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究数据

1.1.1 高分辨率降水产品数据集 已有成果多采用TRMM资料对热带气旋的结构及降水特征进行了研究(曹爱琴等,2016;丁伟钰等,2004;元慧慧等,2010),而中国区域地面气象要素驱动数据集(CMFD, China meteorological forcing dataset)是以TRMM降水资料为背景场,融合了多种再分析数据集和站点气象观测制作而成,其降水数据相较于TRMM数据在精度方面有所提升(He et al., 2020),本文拟采用CMFD数据集中的降水率数据作为热带气旋降水研究的原始数据。CMFD数据集时间跨度从1979—2018年,空间分辨率为 0.1° ,时间分辨率为3 h。

1.1.2 热带气旋最佳路径数据集 对于热带气旋的移动路径,本文采用中国气象局热带气旋资料中心发布的CMA最佳路径数据集(China meteorological administration tropical cyclone database),数据集时间跨度从1949—2020年,大部分记录的时间分辨率为6 h(2017年后,对登陆我国的热带气旋,在登陆前24 h内,时间频次加密为3 h),数据较为完整记录了影响我国的热带气旋路径、中心最低气压(hPa)、热带气旋等级等信息(Lu et al., 2021; Ying et al., 2014)。

1.1.3 数据预处理 对于降水强度数据,本文通过设置阈值(0.1 mm/h)对原始降水强度数据进行预处理(黄国如等,2021),小于阈值的降水被认为是无降水,重新赋值为0。本文采用的2种原始数据:3 h降水率数据(CMFD)和台风最佳路径数据(CMA最佳路径)在时间跨度上不是完全重合的,

通过选取两者的最长重叠期,将时间范围选定为1979—2018年。此外,2种数据的时间分辨率不同,需要进行统一。为了研究短时热带气旋降水的时空变化特征,保持降水数据的时间分辨率不变,而对热带气旋路径数据进行插值处理,将时间分辨率从6 h提高到3 h,具体处理方法如下:由前后2个时刻的连线中点确定热带气旋中心的位置,等级沿用前一时刻的等级,其余变量取前后2个时刻的平均值。其中2017年后登陆台风的部分时间间隔已经是3 h,这部分没有进行插值处理。

1.2 研究方法

1.2.1 热带气旋降水范围确定 目前已有识别热带气旋降水的方法包括:1)人工方式识别。通过识别天气云图,确定热带气旋降水范围;2)客观天气图分析法。通过识别雨带,计算雨带中心与热带气旋的距离,从而判断是否为热带气旋带来的降水;3)缓冲区方法。认为离热带气旋中心一定距离以内的降水,是热带气旋所带来的。本文采用缓冲区方法识别热带气旋降水,以热带气旋中心为圆心,建立半径为1 100 km的缓冲区来识别热带气旋降水(王咏梅等,2006)。当一个网格的中心距离热带气旋中心 $\leq 1 100 \text{ km}$ 便认为受到热带气旋的影响,如果出现降水,则识别为热带气旋降水。同时为了增加结论的可信度,本文还利用半径900 km建立缓冲区,计算的结果用于与1 100 km的结果进行比较分析。

1.2.2 降水时空集中度指标 热带气旋降水GI计算方法(Rajah et al., 2014)如下:将每一个网格作为独立样本,其中从网格进入热带气旋降水范围作为起始状态,持续到网格脱离降水范围,在这期间的数据作为一个完整的计算序列。首先将序列中缺省值去除,然后按递增的顺序排列,计算排列后的累计降水量,除以序列总降水量得到累计降水百分比,构建洛伦兹曲线,GI则是该曲线和 45° 标准线之间面积的2倍,计算公式为

$$GI = \frac{1}{n} \left[n + 1 - 2 \left(\frac{\sum_{i=1}^n (n + 1 - i) y_i}{\sum_{i=1}^n y_i} \right) \right], \quad (1)$$

式中 n 为序列长度,也就是网格在热带气旋降水范围以内的总时段数, i 为数据在递增序列中的次序, y_i 为累计降水百分比,计算得到的GI范围为0~1,其中0代表热带气旋降水在时段内分布均匀,1代

表降水分布非常不均匀,降水集中在序列中的某一个时段。在计算过程中发现,部分位于影响范围边缘的网格受影响时段数较少,计算得到的GI并不准确,因此将受热带气旋影响的总时段数<3的网格认为是无效网格,在计算GI时不予考虑。

本文不仅计算了时间上的GI(以进入热带气旋降水范围和脱离降水范围的持续时段作为计算序列),而且参考相关研究中使用的空间集中度指标(Long et al., 2021),计算了空间基尼系数(GI_s , space Gini index)。如图1所示,对于 GI_s ,其研究对象是热带气旋的累计降水量,得到的结果表征热带气旋降水在空间上的分布情况。计算步骤为:① 计算热带气旋事件的累计降水量;② 确定累计降水中心(累计降水量最大的网格)。如果出现多个累计降水中心,则分别计算对应的 GI_s ,取最大值作为本场热带气旋降水的空间集中度;③ 计算区域内其余任何一个网格与累计降水中心的距离,根据距离从远到近排列;④ 设定距离区间阈值 k ,将其设置为10 km(Long et al., 2021),计算每个距离区间内网格的累计降水量的平均值,从而得到一个按照从远到近排列的累计降水空间序列;⑤ 计算得到 GI_s ,

$$GI_s = \frac{1}{n} \left[n + 1 - 2 \frac{\sum_{i=1}^n (n + 1 - i) y_i}{\sum_{i=1}^n y_i} \right], \quad (2)$$

式中 n 代表距离区间的总数, i 代表距离区间编号(按照离累计降水中心从远到近编号), y_i 代表各距离区间的累计降水百分比。计算得到的 GI_s 的数值

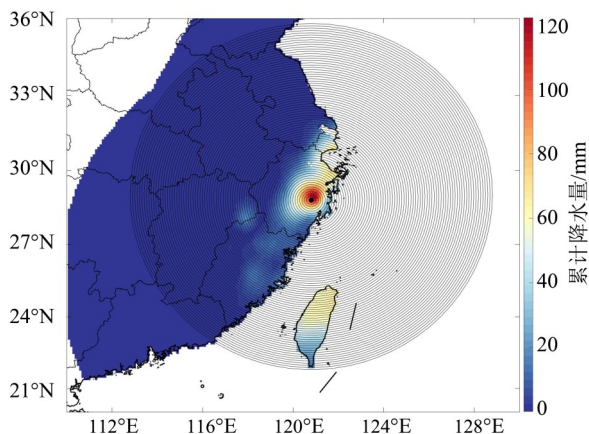


图1 GI_s 计算示意图(以1986年热带气旋Abby为例)
Fig. 1 Schematic diagram of space Gini index calculation
(Take tropical cyclone Abby in 1986 as an example)

范围为0~1,其中0代表热带气旋降水在空间上均匀分布,区域内的热带气旋累计降水量没有差别;1代表降水在空间上全部集中于中心分布,呈现高度聚集的情况。

1.2.3 线性回归法 线性回归法是一种常用的趋势识别方法,通过构建一元线性回归方程,估算变量的长期变化趋势,构建的方程为

$$x(t) = a + bt,$$

式中 $x(t)$ 为需要计算的变量, t 为 $x(t)$ 所对应的年份; a 为截距, b 为斜率,两个参数通过最小二乘法算出,得到的回归系数 b 反映了变量的变化速率,正负则代表增减变化趋势。同时,以0.01作为回归显著性检验的标准,当 $p < 0.01$ 时认为趋势具有显著性。计算变化速率的变量包括:年热带气旋影响频次、年热带气旋降水量和GI等,由于热带气旋路径具有随机性,部分地区并不是每年都受热带气旋影响,因此将变量缺失年份<10%的地区仍纳入趋势计算范围,从而获得变化趋势的空间分布图。

2 结果与讨论

为了研究短时热带气旋降水的时空变化特征,本文拟从区域角度上,研究受热带气旋影响情况、降水特征(降水量和降水集中度)及变化趋势;在热带气旋事件角度上,分析所有热带气旋事件的降水特征随时间的变化规律及其内在联系,并对典型热带气旋事件进行具体分析,以发现降水的时空分布不均匀性及空间分布规律。

2.1 热带气旋路径分析

为了研究1979—2018年区域热带气旋降水的情况,首先需要根据CMA最佳路径集插值后的热带气旋路径和影响半径,提取出所有影响我国的热带气旋路径图(图2)。从发源地来看,影响我国的热带气旋大多数是从西太平洋发源,只有少部分发源于南海地区。从移动方向来看,热带气旋的移动路径具有随机性,但是其主要的移动方向主要西北方向和东北方向;从登陆情况来看,热带气旋可以分为登陆和未登陆热带气旋,前者的等级在登陆前后发生明显变化,登陆后迅速减弱,而向东北移动的未登陆热带气旋则减弱较慢。

每个地区受热带气旋影响的频次由热带气旋的路径及影响半径所决定。在热带气旋路径分析的基础上,在区域尺度分析热带气旋的影响频次

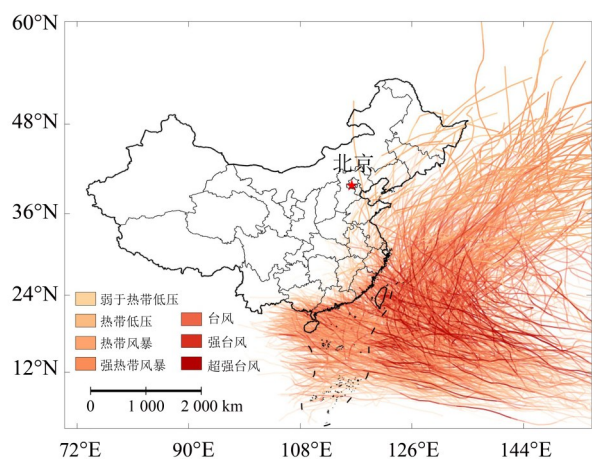


图2 1979—2018年影响中国地区的热带气旋路径
Fig. 2 Tropical cyclone tracks affecting China from 1979 to 2018

及其变化趋势, 有助于了解热带气旋对各个地区的总体影响。从图3(a)可以发现, 热带气旋的影响频次在空间分布上表现出明显的规律性: 从东南向西北减少, 台湾岛的年影响频次最高。年热带气旋影响频次超过4次的地区主要集中在我国东南沿海地区, 包括长江下游地区和粤港澳大湾区等人口稠密地区, 这些地区是台风灾害防御的重点关注地区。我国东南部大部分地区年热带气旋影响频次的变化趋势为减少(图3(b)), 其中广东省中部地区的下降趋势相比于其他地区更快($> 1.2/10a$), 并且通过显著性检验。对比影响半径为900 km的结果(见图4), 不同之处在于半径为1 100 km(图3)的热带气旋影响范围更广, 影响频次和下降的趋势更大且空间分布统一, 但是两个半径下的影响频次空间分布规律一致, 整体趋势均表现为减少。

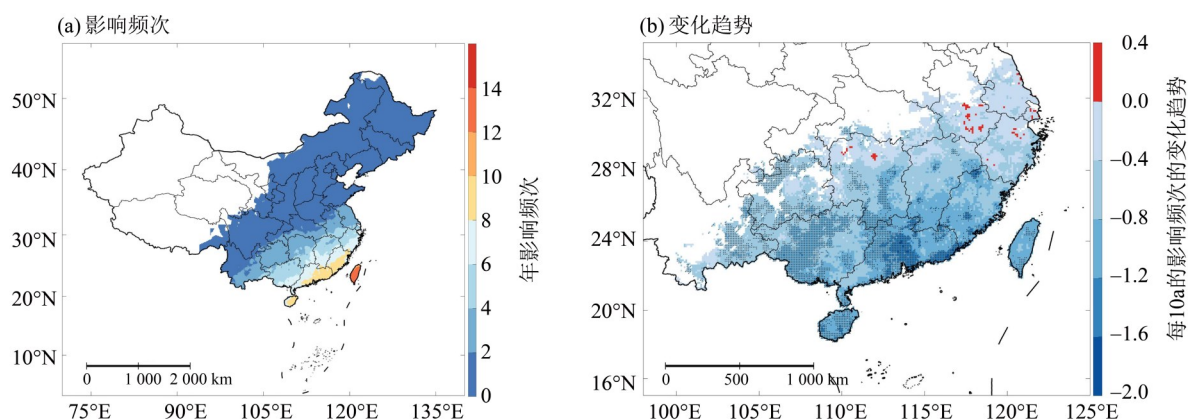


图3 年热带气旋影响频次及变化趋势的空间分布(图中黑色点表征网格通过显著性检验)
Fig. 3 Spatial distribution of annual tropical cyclone impact frequency and trend (The black points represent the pixels that pass the significance test at the 1% significance level)

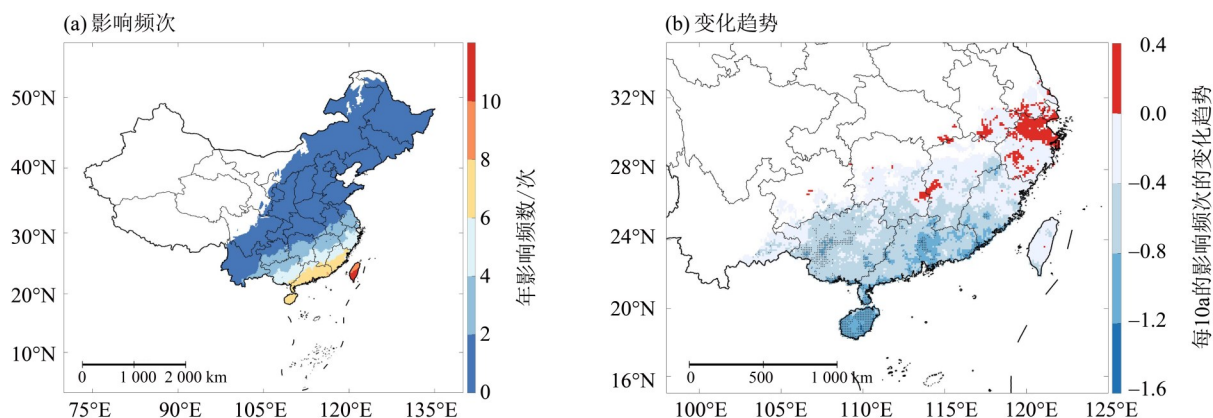


图4 年热带气旋影响频次及变化趋势的空间分布图(影响半径取900 km, 黑色点表征网格通过显著性检验)
Fig. 4 Spatial distribution of annual tropical cyclone impact frequency and trend (The influence radius is 900 km and the black points represent the pixels that pass the significance test at the 1% significance level)

(The influence radius is 900 km and the black points represent the pixels that pass the significance test at the 1% significance level)

区域的年热带气旋降水量直观地反映热带气旋带来的水汽总量,同时有助于研究热带气旋水汽在空间分布上的规律。通过统计每个区域在1979—2018年期间产生影响的热带气旋的累计降水量之和,计算多年平均值,获得年热带气旋降水量空间分布图。如图5(a)所示,年热带气旋降水量的空间分布规律与影响频次相似,均是从东南向西北减少,在台湾岛、海南岛中部和东南沿海地区取得高值。然而热带气旋降水在空间上表现出不同趋势(图5(b)),长江下游地区和台湾岛热带气旋降水

呈现增加趋势,其中台湾东南部显著增加且速率超过15 mm/a,结合影响频次的减少趋势,说明这些地区单场热带气旋事件的降水将会增大,可能会带来更加严重的灾害。而广东地区及海南岛的热带气旋降水则表现出不显著的下降趋势。在影响半径为900 km的条件下(图6),年热带气旋降水量明显减少,变化趋势主要以增加为主,呈现减少趋势的地区明显减少。然而,2个影响半径产生的年热带气旋降水量高值区域分布保持一致,台湾岛东南部的显著增加趋势也高度相似。

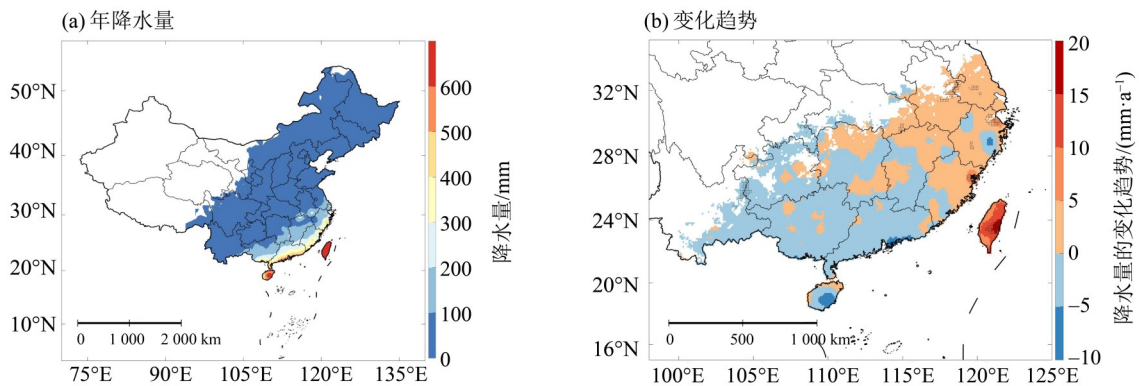


图5 年热带气旋降水量及变化趋势的空间分布图(黑色点表征网格通过显著性检验)

Fig. 5 Spatial distribution of annual precipitation and trend of tropical cyclones

(The black points represent the pixels that pass the significance test at the 1% significance level)

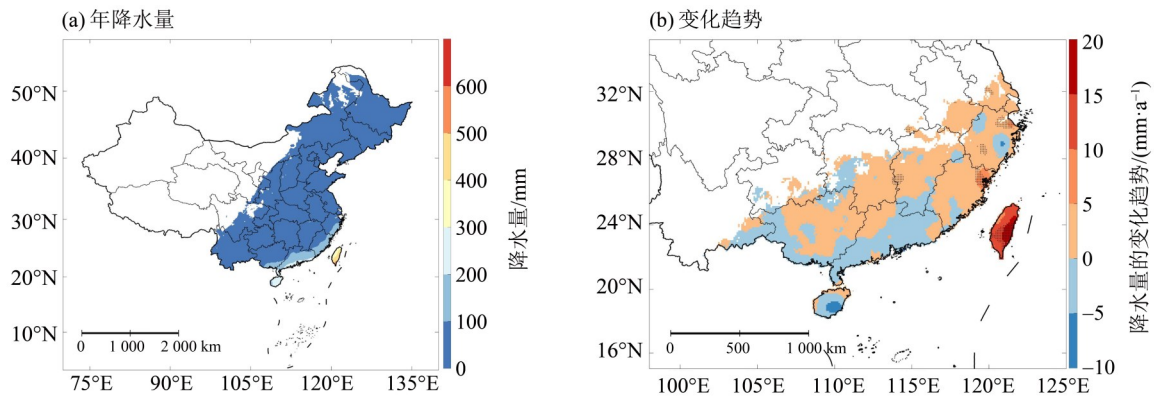


图6 年热带气旋降水量及变化趋势的空间分布图(影响半径取900 km,黑色点表征网格通过显著性检验)

Fig. 6 Spatial distribution of annual tropical cyclone precipitation and trend

(The influence radius is 900 km and the black points represent the pixels that pass the significance test at the 1% significance level)

热带气旋降水时间分布的不均匀性可以用降水集中度表征,降水集中度高的地区,其热带气旋降水在受影响的时间段内,分布更为集中,就越有可能出现短时强降水,对当地造成更严重的灾害。通过统计1979—2018年区域所有热带气旋事件的GI,计算多年平均,得到GI多年平均值的空间分布(图7(a))。热带气旋降水集中度在空间

上的分布规律仍然是从东南向西北减少,东南部地区GI > 0.7,表明对于我国东南部地区,热带气旋带来的降水在时间上比起其他地区更加集中,这也更有可能导致台风灾害。同时GI > 0.8的地区主要集中在广东省北部、江西省南部、云南省东部和福建省西北部的部分地区,表明这些地方热带气旋降水分布最为集中。GI在大部分地区都呈

现出显著增加的趋势(图 7(b)), 表明热带气旋降水在时间上越来越趋向于集中分布, 其中在云南省和湖北省的部分地区出现了超过 0.05/10a 的变化趋势, 在广东中部以及海南岛中部的变化趋势大于 0.03/10a。在影响半径为 900 km 的结果中(图 8), 随着半径的减小, GI 相比于 1 100 km 的结果有所减小, 但是其增加趋势的速率增大, 在江西省中部地区出现超过 0.06/10a 的趋势, 表明该地区的热带气旋降水在时间分布上变得更加集中。不同半径计算得到的结果具有高度的相似性, 包括 GI 的空间分布规律和显著增加的趋势, 表明对于热带气旋的降水集中度而言, 选取的半径并不会导致结论出现较大的差异, 基于 1 100 km 影响半径得到的结论是可信的。

2.2 热带气旋事件的降水特征

由于热带气旋事件具有很强的随机性, 不同热带气旋事件的等级、强度、路径和降水特征具

有很大的差异, 为了从中找到具有普适性的规律, 本文从事件的角度对热带气旋降水进行研究, 并探讨降水特征之间的联系。

将研究时段(1979—2018 年)内所有的气旋事件分成 2 个事件区间: 1979—1998 年和 1999—2018 年, 计算逐场热带气旋事件的 6 个特征变量(场均影响时长、场均降水时长、场均面降水量、场均降水强度、场均 GI 和 GI_t), 按照每个特征变量的范围分为 9 个区间, 统计前后 20 年逐场 6 个特征变量分别在 9 个区间内的频率。值得注意的是, 这里的场均面降水量是将一场热带气旋降水范围内的所有网格的累计降水量求和, 然后除以范围内的总网格数, 表征的是受到热带气旋影响地区的面降水量, 有助于全面评估受热带气旋影响地区的降水量情况。而场均降水强度则是对一场热带气旋事件中所有存在降水的网格计算降水强度, 然后求平均, 表征热带气旋事件的平均降

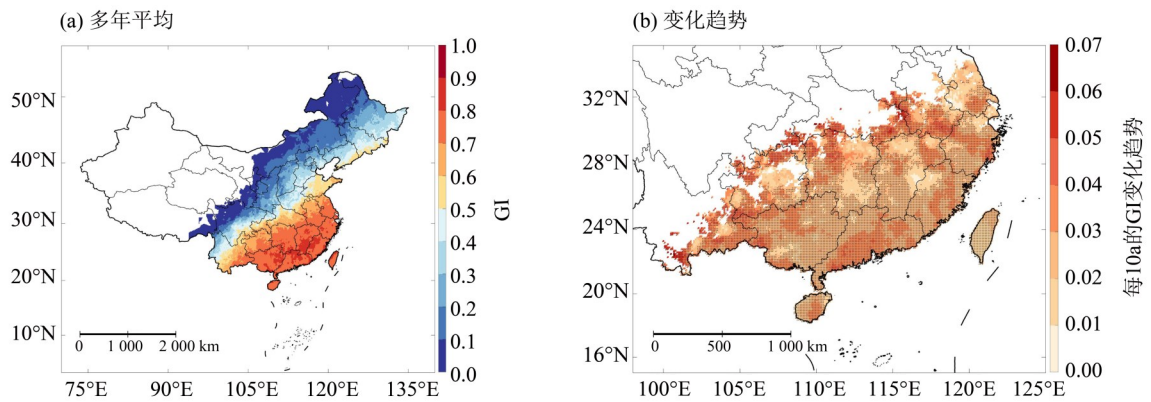


图 7 GI 的多年平均和变化趋势空间分布图(黑色点表征网格通过显著性检验)

Fig. 7 Spatial distribution of multi-year average and trend of Gini index

(The black points represent the pixels that pass the significance test at the 1% significance level)

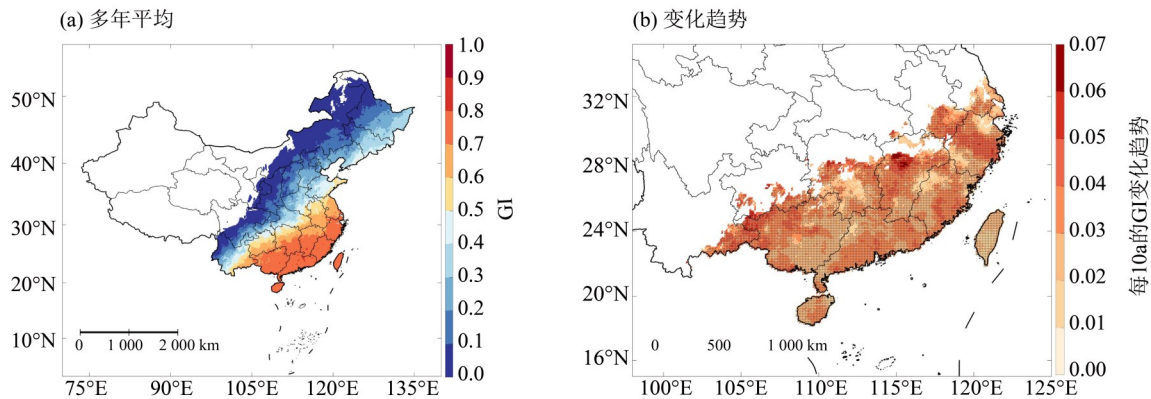


图 8 GI 的多年平均和变化趋势空间分布图(影响半径取 900 km, 黑色点表征网格通过显著性检验)

Fig. 8 Spatial distribution of multi-year average and trend of Gini index from 1979 to 2018

(The influence radius is 900 km and the black points represent the pixels that pass the significance test at the 1% significance level)

水速率。场均影响时长、降水时长、面降水量在前后 20 年都表现出右偏的数据分布(图 9(a,b,c)), 表明热带气旋出现相应的极端情况(场均影响时长超过 156 h、场均降水时长超过 52 h 和场均面降水量超过 1.8 mm)频率很小, 但是极端情况对应的值很大, 可能导致严重的台风灾害, 值得深入关注。而从前后 20 年对比来看, 1999—2018 年热带气旋的场均影响时长在 92、156 和 188 h 区间内的频率明显增加, 而短影响时长(区间中心值为 28 和 60 h)的热带气旋事件出现的频率明显下降。相似的还有场均面降水量, 在 1999—2018 年期间, 场均面降水量在 1.0 mm 区间内的频率明显上升。场均降水时长则呈现出相反的规律, 1999—2018 年期间短降水时长(区间中心值为 16 h)的热带气旋事件出现的频率明显上升, 其他降水时长的热带气

旋事件频率则相比于 1979—1998 年期间有明显下降。这也导致了场均降水强度较高的热带气旋在后 20 年出现的频率增加, 同时 1999—2018 年场均降水强度的数据分布与 1979—1998 年出现较大差别(图 9(d))。从图 9(e)可以发现, GI 在 1999—2018 年在高值区的频率增加, 中心值为 0.84 的区间的频率增加最为明显, 远高于前 20 年的频率, 表明热带气旋降水在 1999—2018 年相比于 1979—1998 年在时间上的分布更加不均匀。而 GI_s 在高值区(区间中心值为 0.90)的频率在后 20 年也有所增加(图 9(f)), 但是幅度远远小于 GI 变化的幅度, 表明热带气旋降水在空间分布上的变化较小。本文也尝试了利用 900 km 作为影响半径(图 10), 基于 2 个不同影响半径的 6 个特征变量在前后 20 年的变化规律高度相似。

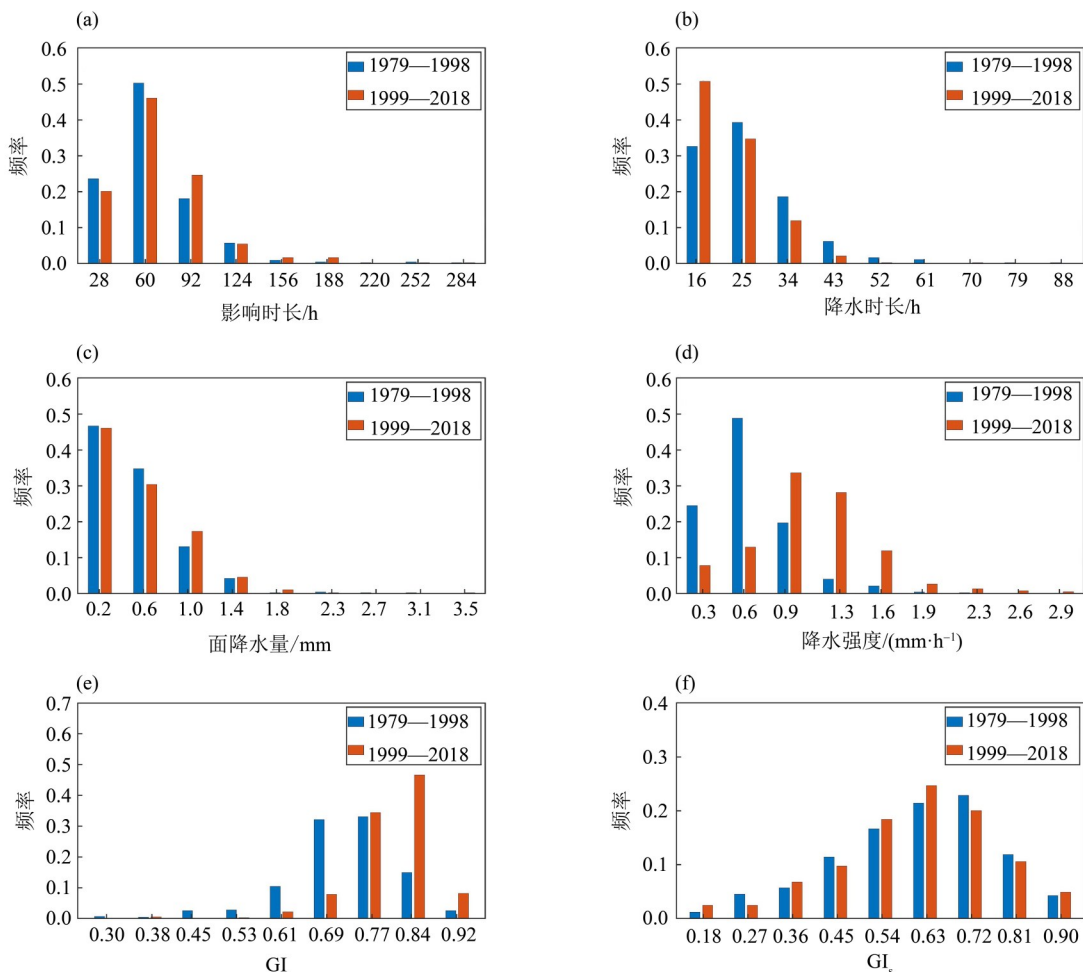


图 9 热带气旋场均特征变量的频率直方图(影响半径取 1 100 km)

Fig. 9 Frequency histograms of eigenvectors of tropical cyclones (The influence radius is 1 100 km)

为揭示热带气旋降水的时序特征, 在分析 2 个时期降水特征变化的基础上, 对 6 个特征变量进行时间序列分析(图 11)。场均影响时长、场均面降水量以及 GI_s 的时间序列没有表现出明显的趋势, 但是年际之间存在差异, 整体序列呈现波动性(图 11(a, c, f))。而场均降水时长表现出下降的趋势, 在 1997 年下降并在新的范围内波动(图 11(b))。而场均 GI 和场均降水强度表现出明显的增加趋势(图 11(e, d)), 说明影响我国的热带气旋在场均面降水量没有明显变化趋势的情况下, 场均降水时长减少, 从而导致降水集中度和降水强度方面都有增强, 更有可能在短时间内造成严重的台风灾害, 值得有关部门关注并做出相应的应对措施。从影响半径为 900 km 的结果(图 12)可以发现, 随着半

径的减小, 场均影响时长和降水时长有所减少。在时间序列的趋势方面, 场均面降水量呈现波动性, 但是没有明显的变化趋势, 场均降水时长表现出下降趋势, 从而导致了场均降水强度和 GI 呈现出明显的增加趋势, 与影响半径为 1 100 km(图 11)条件下得出的结论一致。

本文利用影响半径为 900 km 的结果(图 4、6、8、10、12)与 1 100 km 的结果(图 3、5、7、9、11)进行比较, 总体而言, 影响半径的变化使得热带气旋的影响频次、降水量、降水时长、面降水量和降水强度在空间覆盖范围和数值上有所变化, 但是空间分布规律、变化趋势、前后 20 年的变化规律等方面保持一致, 说明了选取 1 100 km 作为影响半径是合理的。

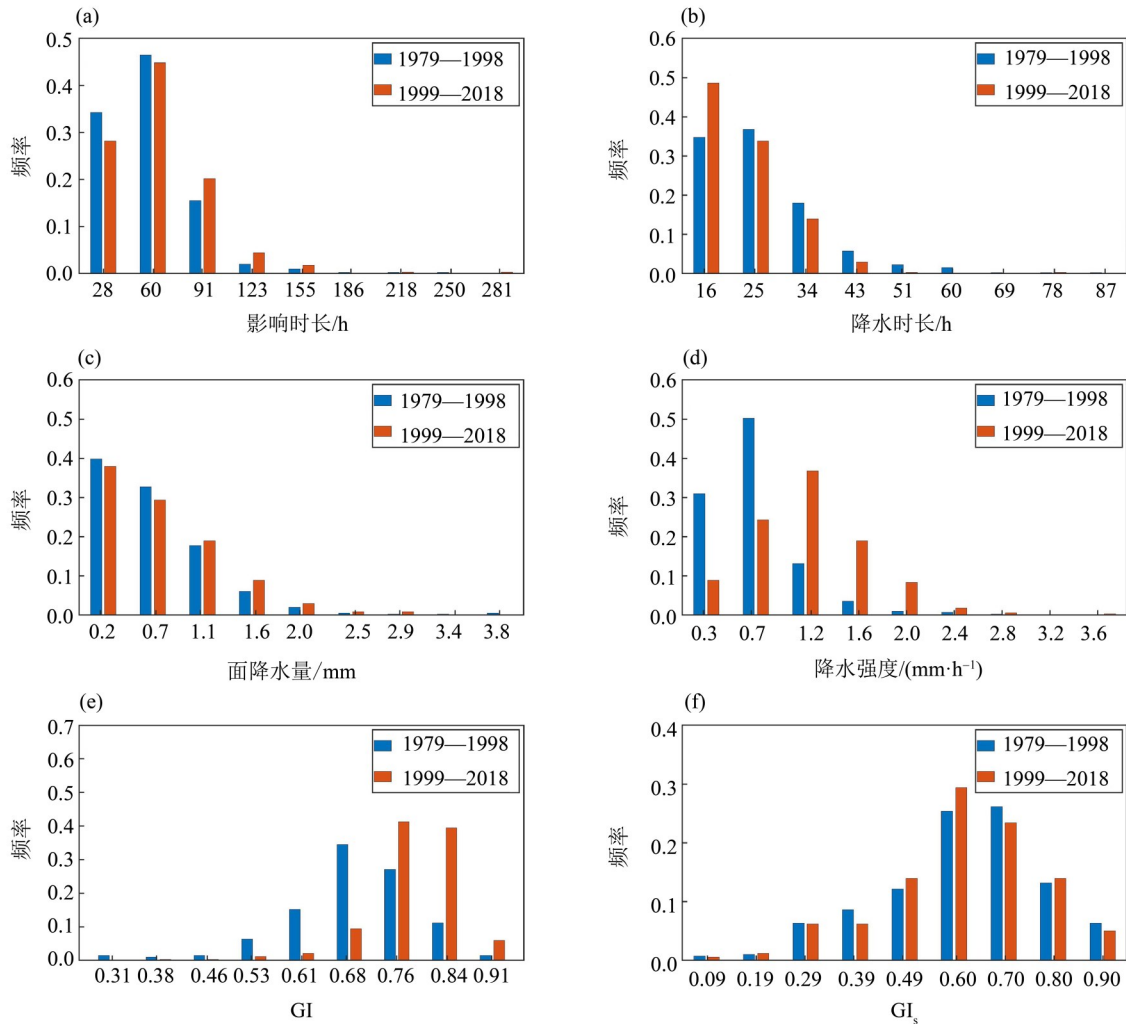


图 10 1979—2018 年热带气旋场均特征变量的频率直方图(影响半径取 900 km)

Fig. 10 Frequency histograms of eigenvariables of tropical cyclones from 1979 to 2018(The influence radius is 900 km)

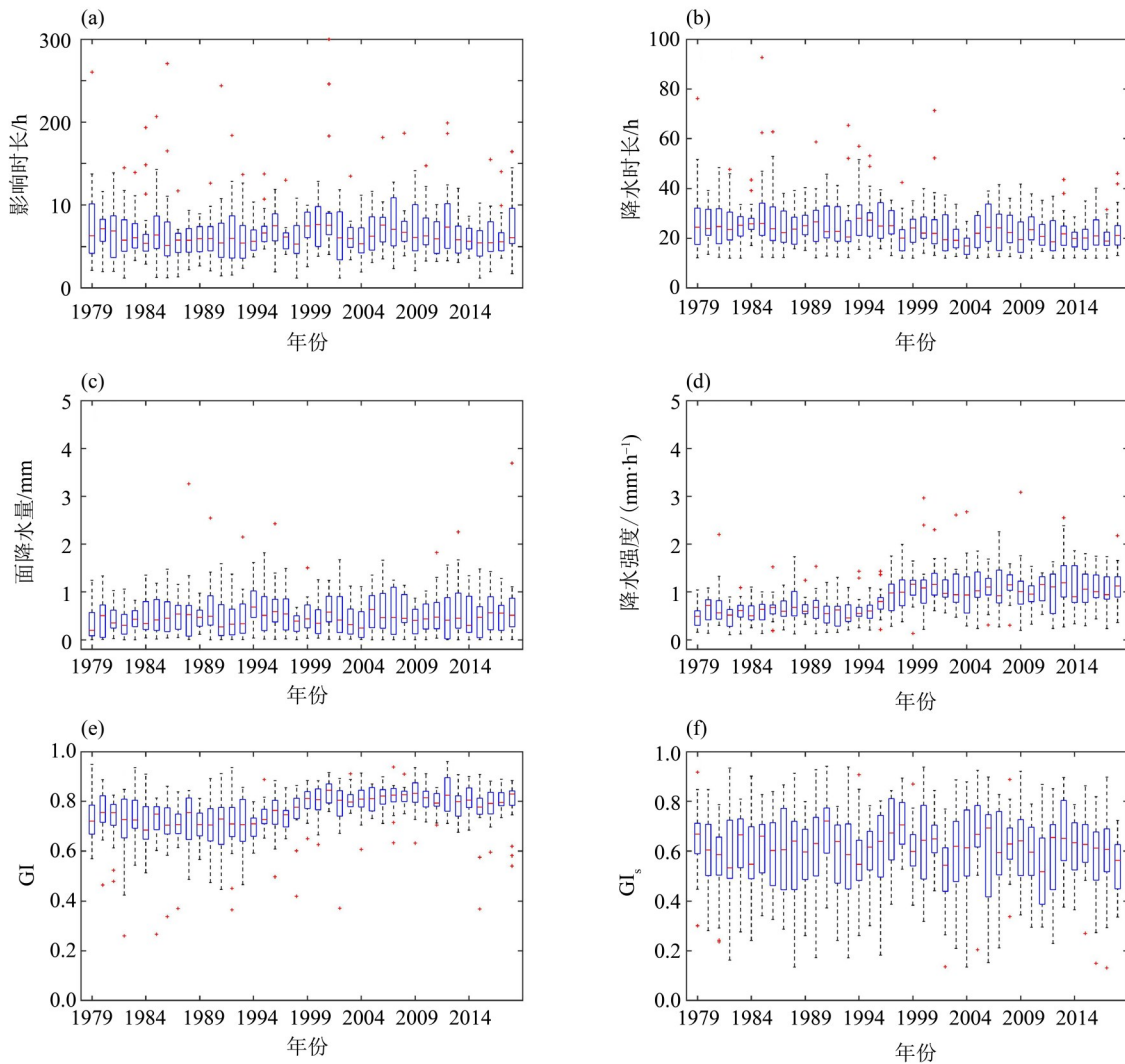


图 11 热带气旋场均特征变量的时间序列箱型图 (影响半径取 1 100 km)

Fig. 11 Time series box diagram of eigenvectors of tropical cyclones (The influence radius is 1 100 km)

为研究热带气旋降水特征变量之间的相互关系, 计算 6 个特征变量间的相关系数(表 1)。可以看到 GI 与影响时长有最强的正相关关系(0.62), 表明热带气旋场均影响时间越长, 其范围内的降水在时间上的分布将变得更加集中。面降水量和降水强度也表现出了较高的正相关性(0.57)。GI_s

与影响时长、降水时长、降水强度都表现出显著的相关, 但是相关系数均<0.5, 其影响因素仍有待进一步研究。

2.3 典型热带气旋事件分析

对 4 场典型热带气旋事件的降水分布(图 13)、集中度情况(图 14)以及两者与中心路径的关系(图

表 1 热带气旋场均特征变量的相关系数表¹⁾

Table 1 Pearson correlation coefficient between eigenvectors of tropical cyclones

项目	降水时长	面降水量	降水强度	GI	GI _s
影响时长	0.63**	-0.03	-0.02	0.62**	0.18**
降水时长		0.37**	0.07	0.09**	0.18**
面降水量			0.57**	-0.20**	-0.02
降水强度				0.13**	0.12**
GI					0.14**

1) **表示在 0.01 水平上显著相关; *表示在 0.05 水平上显著相关。

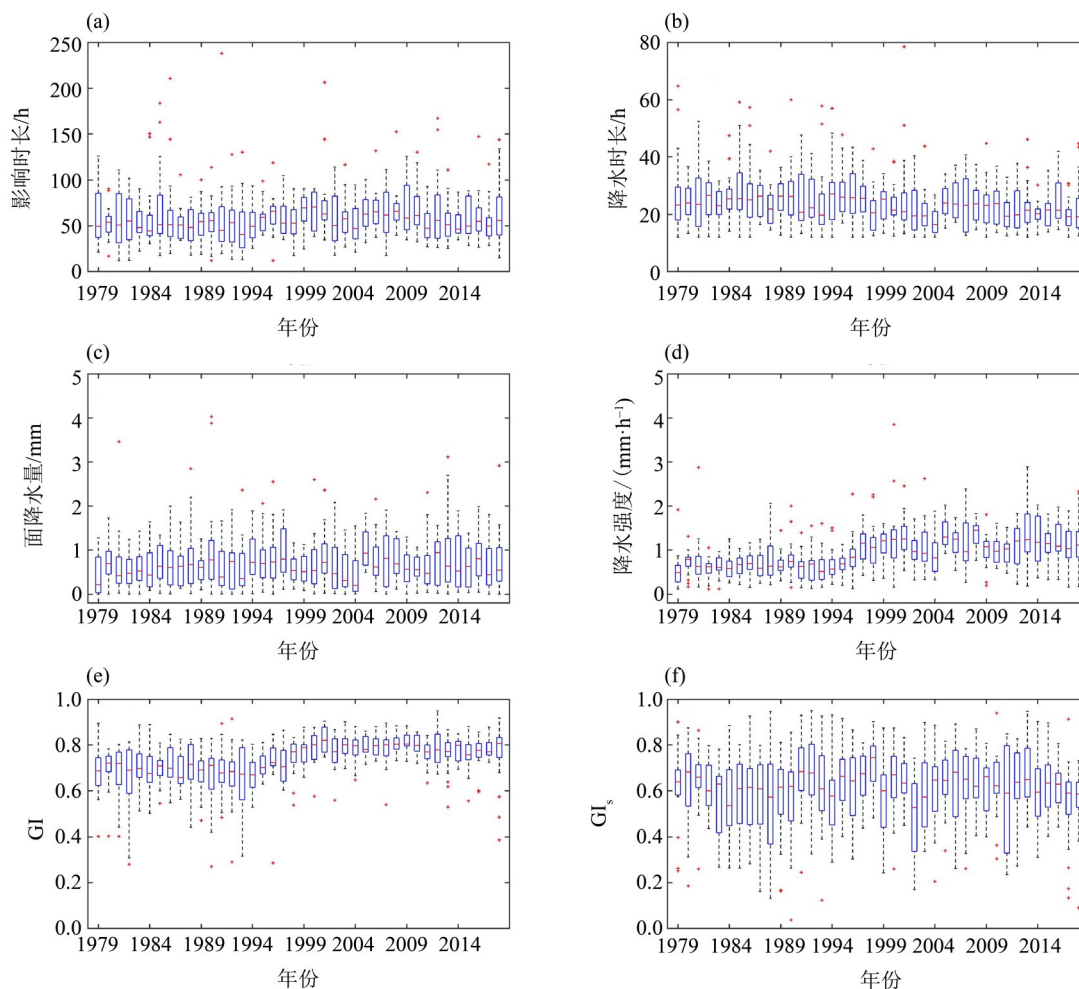


图12 热带气旋场均特征变量的时间序列箱型图(影响半径取900 km)

Fig. 12 Time series box diagram of eigenvectors of tropical cyclones (The influence radius is 900 km)

15)进行研究,包括2005年热带气旋海棠、2005年热带气旋泰利、2007年热带气旋圣帕和2013年热带气旋尤特,从而提高研究的可信度。热带气旋的累计降水量主要集中分布在中心路径周围,距离路径越远的地方累计降水量越小(图13)。对于热带气旋泰利和尤特,累计降水量高值区域均位于中心路径的右侧,与路径并不是完全重合(图13(b,d)),表明热带气旋降水并不是沿着中心路径简单分布,而是呈现出非对称结构,并受到不同因子的影响(温冠环等,2020)。对于热带气旋降水的空间分布不均匀性而言,相比于其他3个热带气旋事件的降水量高值区在空间上的松散分布(图13(b,c,d)),热带气旋海棠的降水在空间上表现最为集中,主要集中分布在台湾岛,其 GI_s 为0.78,明显高于其他3个事件,表明热带气旋海棠相比其他3个事件更具有危害性,会对降水集中的地区造成更严重的破坏(薛根元等,2006)。

而从降水时间分布情况来看(图14),热带气旋降水呈现出集中分布的情况,大部分网格的GI大于0.7。但是GI的空间分布则较为分散,高值区(0.9~1.0)主要分布在离中心路径一定距离的地区,而中心路径周围地区,GI相对较小。这表明对于热带气旋事件,靠近中心路径的网格降水相较于其他网格在时间分布上表现得更为均匀。

为更好研究热带气旋事件的累计降水量和降水集中度在空间上的变化规律,通过计算影响范围内的网格距中心路径的最短距离,并以30 km为固定步长,将不同网格分为若干组,在组内求对应网格的平均累计降水量和GI,得到的结果如图15所示。从图中蓝色线可以看到,热带气旋的累计降水量随着最短距离的增加而剧烈减小,表明热带气旋降水主要集中在中心路径周围。同时从热带气旋海棠和泰利的结果可以发现(图15(a,b)),在0~200 km内,累计降水量下降幅度较小,

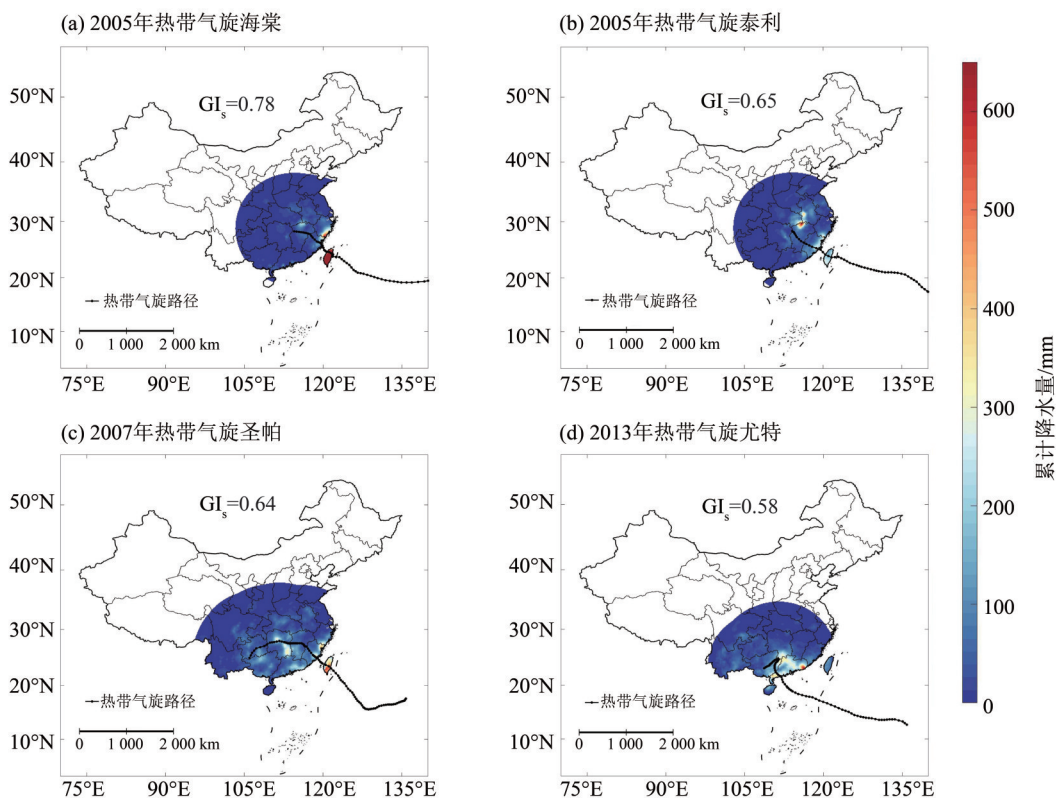


图 13 四场热带气旋的累计降水量空间分布图

Fig. 13 Spatial distribution of accumulated precipitation of four tropical cyclones

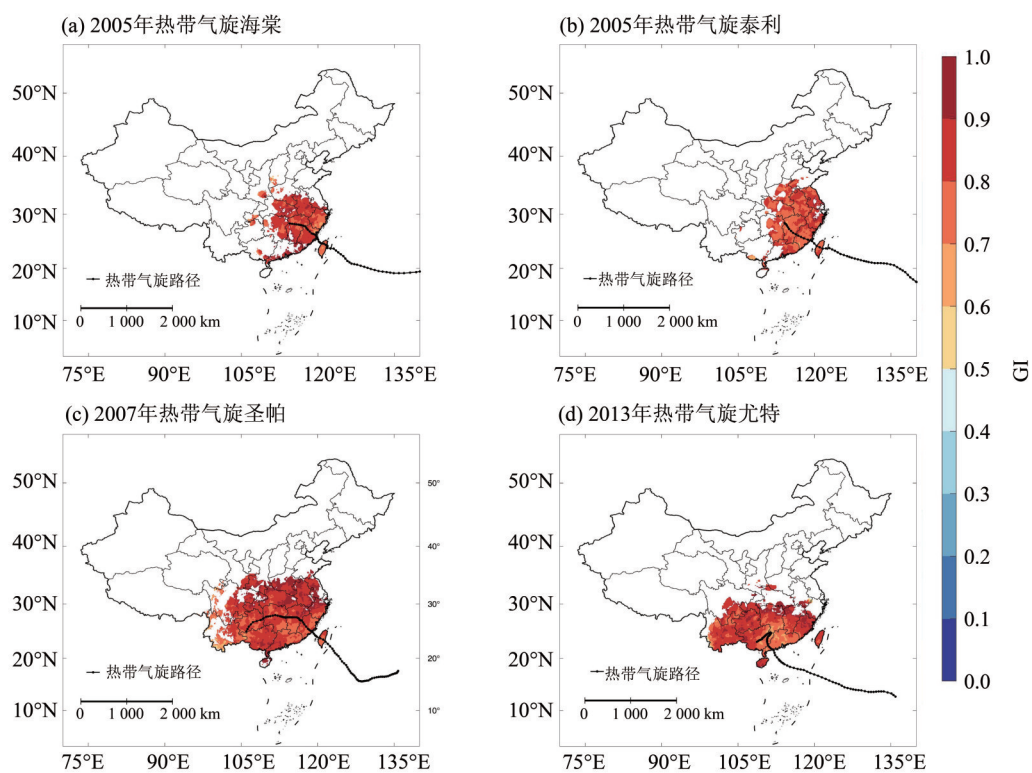


图 14 四场热带气旋的GI空间分布图

Fig. 14 Spatial distribution of Gini index of four tropical cyclones

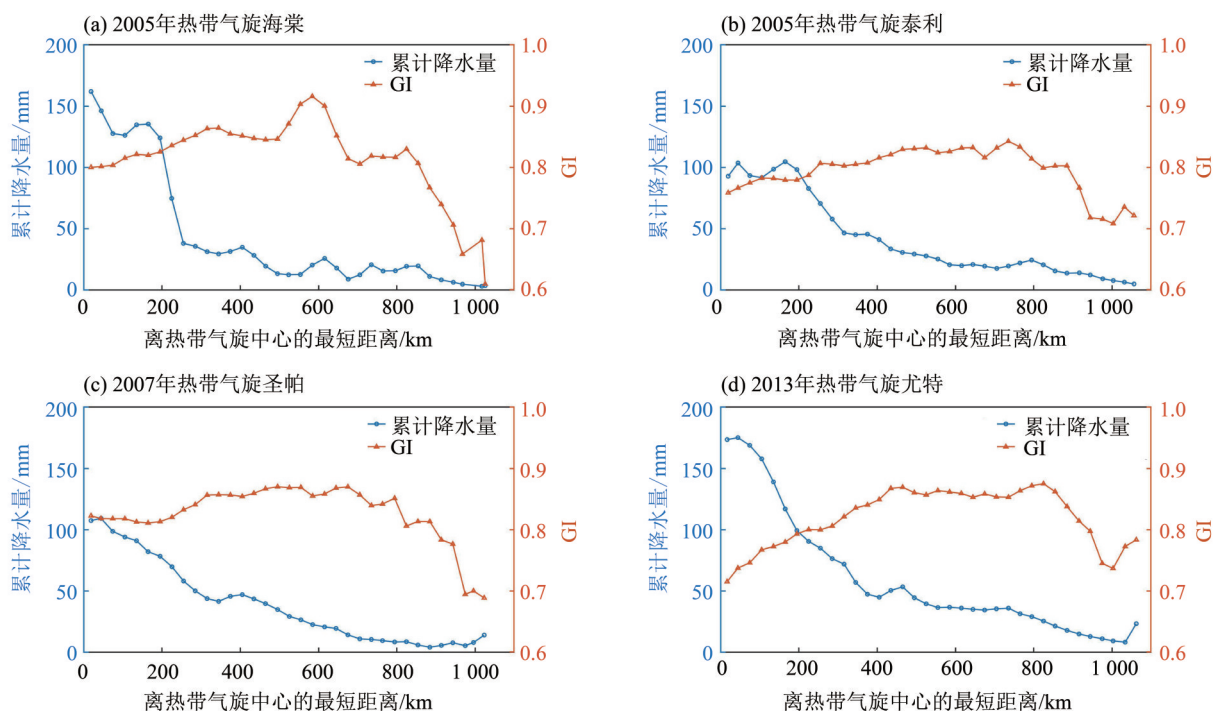


图15 四场热带气旋累计降水量和降水集中度随离中心距离变化的关系图

Fig. 15 The relationship between accumulated precipitation/precipitation concentration and the shortest distance with tropical cyclone center for four tropical cyclones

甚至随最短距离的增加而略有增加, 表明在这两个热带气旋事件中, 气旋降水主要集中在眼墙的结构内(林青, 2014)。GI的变化规律则较为一致, 在0~800 km内呈现上升的趋势, 表明降水随最短距离增加而在时间上分布得更加集中, 在800 km后则剧烈下降, 降水呈现均匀分布。总体而言, 对于4场热带气旋事件, 距离中心路径200 km以内为主要降水区域, 降水量大, 在时间上分布均匀, 表示该范围内主要以长时间的大雨或者暴雨为主。而200~800 km范围内, 降水量迅速下降, 但是在时间上愈发呈现集中分布态势, 以短时的强降水为主, 但是总体降水量相比于200 km以内的地区则较小; 800~1 100 km范围内则情况较为复杂, GI可能快速下降(图15(a,c)), 伴随累计降水量基本不变或者有略微上升; GI也可能在下降后再次上升, 伴随降水量的增加(图15(d)), 这可能是由于地区处在热带气旋边缘, 受到多种不同因素的影响, 从而导致多种情况的发生。

3 结论

本文利用高分辨率降水产品数据和热带气旋

最佳路径数据, 基于GI、GI_s和线性回归法的方法, 对1979—2018年影响我国的热带气旋降水时空变化特征进行了分析, 得出以下主要结论:

1) 对于影响我国的热带气旋事件, 在影响频次上有比较明显的下降, 特别是粤港澳大湾区, 其下降的趋势大于1.2/10a并具有显著性, 而年热带气旋降水量的趋势则呈现出空间差异性, 广东、广西和云南等地区呈现下降趋势, 长江下游地区和台湾地区呈现增加的趋势。

2) 热带气旋场均降水强度和GI, 在1995年后均表现出明显上升趋势; GI在我国东南部呈现出明显的上升趋势, 表明热带气旋降水在强度增强的同时分布更加集中。

3) 典型热带气旋事件的分析表明, 距离中心路径200 km内的地区为热带气旋主要降水区域, 以长时间大雨或者暴雨为主, 降水量大, 时间分布均匀; 而在200~800 km范围内, 以短时强降水为主, 降水量随距离增加而迅速减少, 在时间分布上变得更加集中; 热带气旋降水在空间上分布得越集中, 其危害性越大, 越有可能造成严重的台风灾害。

参考文献:

- 曹爱琴,程华,王东勇,等,2016.基于TRMM卫星资料的“麦莎”台风降水特征分析[J].中国农学通报,32(26):143-156.
- 丁伟钰,陈子通,2004.利用TRMM资料分析2002年登陆广东的热带气旋降水分布特征[J].应用气象学报,15(4):436-444.
- 方伟华,栗健,张海霞,等,2022.热带气旋多致灾因子综合动态风险预警方法概述[J].中国减灾,(15):28-31.
- 胡媛媛,兰红平,杨红龙,等,2022.1952—2020年影响深圳的热带气旋气候特征[J].广东气象,44(3):19-23.
- 黄国如,陈易僊,姚芝军,2021.高度城镇化背景下珠三角地区极端降雨时空演变特征[J].水科学进展,32(2):161-170.
- 蒋贤玲,任福民,马柱国,等,2017.2014年两次路径相似热带气旋降水特征及其成因的对比[J].地球物理学报,60(4):1305-1320.
- 林青.2014.华南登陆台风内核区降水非对称结构分析[D].南京:南京大学.
- 刘新有,史正涛,彭海英,等,2007.基于“基尼系数”的降水时间分布均匀度变化研究[J].气象研究与应用,28(2):46-48+65.
- 倪钟萍,魏雪,贺立夫,等,2022.台风“摩羯”(2018年)登陆台州并造成台州大暴雨的成因分析[J].海洋预报,39(4):37-46.
- 秦大河,2008.影响我国的主要气象灾害及其发展态势[J].中国应急救援,(6):4-6.
- 任福民,GLEASON B, EASTERLING D,2001.一种识别热带气旋降水的数值方法[J].热带气象学报,17(3):308-313.
- 孙行知,钟中,江静,2017.西北太平洋热带气旋活动对大尺度环境场影响的线性回归分析[J].地球物理学报,60(3):903-911.
- 覃皓,郑凤琴,伍丽泉,2022.台风威马逊(1409)强度与降水变化的相互作用[J].应用气象学报,33(4):477-488.
- 王咏梅,任福民,王小玲,等,2006.中国台风降水分离客观方法的改进研究[J].气象,32(3):6-10.
- 王钰峰,2017.基尼系数在黑河莺落峡水文站降水年内分配均匀度分析中的应用[J].甘肃水利水电技术,53(2):4-7.
- 温冠环,刘春霞,毕雪岩,等,2020.广东登陆热带气旋降水非对称性特征及其影响因子研究[R].广州:广州热带海洋气象研究所.
- 吴彩铭,任福民,朱婧,2022.热带气旋灾害预评估模型研究回顾[J].海洋气象学报,42(3):13-22.
- 薛根元,周丽峰,诸晓明,2006.2005年热带气旋灾害特点初步研究[J].科技导报,(4):22-28.
- 杨慧,任福民,杨明仁,2019.不同强度热带气旋对中国降水变化的影响[J].地球科学进展,34(7):747-756.
- 元慧慧,钟中,李杰,等,2010.基于TRMM的热带气旋降水三维结构特征分析[J].海洋预报,27(6):12-19.
- HE J, YANG K, TANG W J, et al, 2020. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. Scientific Data, 7(1):25.
- LONG K H, WANG D G, WANG G L, et al, 2021. Higher temperature enhances spatiotemporal concentration of rainfall[J]. Journal of Hydrometeorology, 22(12):3159-3169.
- LU X Q, YU H, YING M, et al, 2021. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 38(4):690-699.
- MONJO R, MARTIN-VIDE J, 2016. Daily precipitation concentration around the world according to several indices [J]. International Journal of Climatology, 36(11):3828-3838.
- RAJAH K, O'LEARY T, TURNER A, et al, 2014. Changes to the temporal distribution of daily precipitation[J]. Geophysical Research Letters, 41(24):8887-8894.
- REN F M, GLEASON B, EASTERLING D, 2002. Typhoon impacts on China's precipitation during 1957-1996 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 19(5):943-952.
- REN F M, WU G X, DONG W J, et al, 2006. Changes in tropical cyclone precipitation over China[J]. Geophysical Research Letters, 33(20):L20702.
- TOUMA D, STEVENSON S, CAMARGO S J, et al, 2019. Variations in the intensity and spatial extent of tropical cyclone precipitation[J]. Geophysical Research Letters, 46(23):13992-14002.
- YING M, CHEN B D, WU G X, 2011. Climate trends in tropical cyclone-induced wind and precipitation over China's mainland [J]. Geophysical Research Letters, 38(1):L01702.
- YING M, ZHANG W, YU H, et al, 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 31(2):287-301.
- ZHANG J Y, WU L G, REN F M, et al, 2013. Changes in tropical cyclone rainfall in China [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 91(5):585-595.