

# 粤港澳大湾区极端降雨的时空变化及其驱动因素探究

王 垚<sup>1,2</sup>, 史海匀<sup>1,2</sup>

(1. 南方科技大学深圳市城市环境健康风险精准测量与预警技术重点实验室, 广东 深圳 518055;  
2. 南方科技大学环境科学与工程学院, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 基于1979—2018年中国区域地面气象要素驱动数据集和多种大气环流模式指数, 采用改进的Mann-Kendall趋势检验法、皮尔逊相关分析、小波分析等方法, 探究了粤港澳大湾区极端降雨的时空分布特征及其与大气环流模式的关系。结果表明: 粤港澳大湾区极端降雨总体呈现上升趋势, 空间分布以中北部地区上升趋势较为显著, 且主要集中在6月; 与大湾区极端降雨相关性最强的大气环流模式是东亚季风, 其次是太平洋年代际振荡和厄尔尼诺-南方涛动; 东亚季风对大湾区不同极端降雨指数有稳定的8~16月周期影响; 厄尔尼诺-南方涛动和太平洋年代际振荡的影响则较为复杂, 其与东亚季风存在一定的耦合作用。

**关键词:** 极端降雨; 大气环流模式; 小波分析; 粤港澳大湾区

**中图分类号:** TV125; P426.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2024)06-0028-10

**Exploring spatiotemporal variations and driving factors of extreme precipitation in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area**//WANG Yao<sup>1,2</sup>, SHI Haiyun<sup>1,2</sup> (1. *Shenzhen Key Laboratory of Precision Measurement and Early Warning Technology for Urban Environmental Health Risks, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China*; 2. *School of Environmental Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China*)

**Abstract:** Based on the China Regional Ground Surface Meteorological Element Driving Dataset from 1979 to 2018 and multiple atmospheric circulation mode indices, the spatiotemporal distribution characteristics of extreme precipitation in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and their relationships with atmospheric circulation modes were explored using improved Mann Kendall trend test method, Pearson correlation analysis, wavelet analysis and other methods. The results show that extreme precipitation in the Greater Bay Area shows an overall increasing trend, with the most significant increasing trend spatially distributed in the central and northern regions, and extreme precipitation is concentrated in June mostly. The atmospheric circulation mode which is most strongly correlated with extreme precipitation in the Greater Bay Area is EAM (East Asian Monsoon), followed by PDO (Pacific Decadal Oscillation) and ENSO (El Niño-Southern Oscillation). The EAM has a stable 8~16 month cyclic impact on different extreme precipitation indices in this region, while ENSO and the PDO show more complex correlations, with some coupling effects existing between them and the EAM.

**Key words:** extreme precipitation; atmospheric circulation mode; wavelet analysis; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次评估报告显示, 1985—2015年地表温度比以往任何时期都要高, 标志着明显的全球变暖趋势<sup>[1]</sup>。在这种气候变化背景下, 极端天气事件的频次明显增加, 不仅改变了区域气候特征, 也对自然生态系统构成了严重威

胁<sup>[2-3]</sup>。在所有气候变量中, 降水量的变化尤其重要, 因其直接影响水文过程和水资源管理<sup>[4]</sup>。从20世纪起, 全球多数地区的极端降雨事件呈现显著增多的态势, 对当地的生态、工业和社会经济产生了广泛影响<sup>[5-6]</sup>。然而, 极端天气事件的时空分布地区差异显著, 具有不同的影响范围、频率、持续时间和

基金项目: 深圳市基础研究专项面上项目 (JCYJ20210324105014039)

作者简介: 王垚 (1995—), 男, 博士研究生, 主要从事极端水文事件研究。E-mail: 12131078@mail.sustech.edu.cn

通信作者: 史海匀 (1985—), 男, 研究员, 博士, 主要从事极端水文事件研究。E-mail: shihy@sustech.edu.cn

严重程度<sup>[7-8]</sup>。因此,研究不同地区极端降雨的时空变化特征对于科学制定应对策略具有重要意义。极端降雨时空分布特征受诸多因素影响,对极端降雨驱动因素的研究有助于极端降雨的预测和暴雨灾害的预防。在所有的气候和非气候因素中,大气环流模式被认为是影响极端降雨的重要因素之一,有研究表明极端降雨与大气环流模式之间的存在密切的关系。例如,管新建等<sup>[9-10]</sup>的研究表明东亚季风(East Asian Monsoon, EAM)在年际和年代际时间尺度上有显著的变率,并对长江流域的极端降雨有独特的影响;Du 等<sup>[11-12]</sup>的研究表明了厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)和太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)对一些地区的极端降雨有显著的控制作用;Lestari 等<sup>[13-15]</sup>的研究表明厄尔尼诺活动影响了中国极端降水的趋势和变化,EAM 是影响东南部极端降水的重要驱动因素之一。

粤港澳大湾区(以下简称大湾区)位于中国南部,是中国重要的经济中心之一,同时也是极易受到极端降雨影响的区域之一<sup>[16]</sup>。目前,针对整个大湾区极端降雨研究还相对较少,随着气候变化加剧,极端降雨造成的灾害在大湾区会变得越来越频繁,对城市安全和人民生命财产都将造成极大的威胁。鉴于此,本文基于 1979—2018 年中国区域地面气象要素驱动数据集和多种大气环流模式指数,探究大湾区极端降雨的时空分布特征,并分析大气环流模式与极端降雨之间的遥相关关系,以期为大湾区极端降雨事件的预测和洪涝灾害防治提供科学支撑。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

大湾区地处广东省中部、珠江三角洲,北纬 21°31′~24°38′、东经 111°59′~115°25′,包括香港、澳门两个特别行政区和广东省 9 个城市,面积 5.6 万 km<sup>2</sup>。大湾区属亚热带季风气候,海拔 200 m 以下,地势平坦,年温暖湿润,年平均气温 22.3℃<sup>[17]</sup>。该区域降水丰沛,年平均降水量可达 1 832 mm,且雨热同季。在全球变暖的背景下,近年来大湾区暴雨洪涝、超强台风、高温等极端事件频发。自 1961 年

以来,大湾区的平均气温每 10 a 上升 0.21℃,降雨更加集中、更加强劲,暴雨天数趋高<sup>[18]</sup>。研究区概况如图 1 所示。

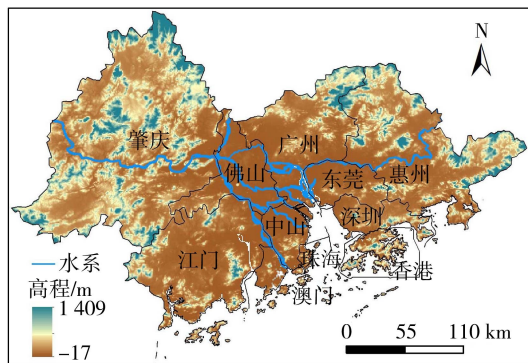


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

### 1.2 数据来源

采用来源于国家青藏高原科学数据中心的 1979—2018 年中国区域地面气象要素驱动数据集作为降水资料,数据集的时间分辨率为 3 h,水平空间分辨率为 0.1°<sup>[19-20]</sup>,其数据精度优于国际上已有再分析数据的精度,并且已在华南地区得到验证<sup>[21-22]</sup>。大气环流模式数据来源于美国国家海洋和大气管理局物理科学部地球系统研究实验室(<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>)。选取了 6 个大气环流模式进行研究,包括:北极涛动(Arctic Oscillation, AO)、EAM、PDO、ENSO、西太平洋(Western Pacific, WP)和印度洋偶极子(Indian Ocean Dipole, IOD)。

## 2 研究方法

### 2.1 极端降雨指标

为了更好了解极端降雨的变化规律,根据世界气象组织(WMO)和 IPCC 第五次评估报告的建议,选取 6 个极端降雨指标来对大湾区极端降雨的时空分布特征进行探究<sup>[23]</sup>,具体见表 1。

### 2.2 趋势检验和突变检验方法

传统的 Mann-Kendall(M-K)趋势检验方法基于序列随机独立性假设,但没有考虑序列相关性造成的误差<sup>[24-25]</sup>。改进的 M-K 趋势检验方法在传统的

表 1 极端降雨指标

Table 1 Extreme rainfall indicators

指标	描述	含义	单位
PRCPTOT	总降水量	日降水量不小于 1 mm 的累积降水量	mm
SDII	单日降雨强度	年降水总量与湿日天数的比值(日降水量大于 1 mm 即为湿日)	mm/d
RP90DAY	强降水天数	日降水量大于 90%分位值的累积天数	
RP95DAY	极强降水天数	日降水量大于 95%分位值的累积天数	
RX1DAY	最大单日降雨	一年中最大的 1 d 降水量	mm
RX3DAY	最大连续 3 d 降雨	一年中最大的 3 d 降水量	mm

M-K 趋势检验方法中添加了一个校正因子并考虑了滞后的序列关系<sup>[26-27]</sup>,从而补偿序列相关性对 M-K 统计量的影响。本文采用改进的 M-K 趋势检验和 Pettitt 突变检验共同作为大湾区极端降雨时间序列的突变检验方法,以确保序列突变点诊断结果的有效性<sup>[28-29]</sup>。

### 2.3 皮尔逊相关分析

皮尔逊相关分析通过分析两个变量之间的线性关系描述两个变量之间的紧密程度。当相关系数数值大于 0,变量呈正相关关系,当相关系数小于 0,呈负相关关系。相关系数的绝对值接近于 1 表示两个变量之间的相关性很强,接近于 0 表示相关性很弱,相关系数为 0 表示不存在线性关系。

### 2.4 交叉小波变换

Hudgins 等<sup>[30]</sup>提出的交叉小波变换是研究两个时间序列之间相关性的有效工具,其结合了小波变换和交叉谱分析的优点,可以显示两个时间相关的时域序列关系特征。计算过程参见 Torrence 等<sup>[31]</sup>的研究。

### 2.5 部分小波相干分析

部分小波相干(partial wavelet coherence, PWC)分析通过排除掉其他变量的影响,评估时间-频率域中两个变量之间的相关关系<sup>[32]</sup>,计算过程参见 Hu 等<sup>[33]</sup>的研究。

## 3 结果与分析

### 3.1 极端降雨的时空分布特征

#### 3.1.1 空间分布特征

图 2 为 1979—2018 年 PRCPTOT、SDII、RP90DAY、RP95DAY、RX1DAY 和 RX3DAY 6 个极端降雨指标

多年平均值的空间分布。由图 2 可见,极端降雨指标均值较高的地区几乎都在大湾区的沿海一侧,这与该区域常年遭受台风影响有关<sup>[34-35]</sup>。而 PRCPTOT、SDII、RP90DAY 和 RP95DAY 在大湾区中北部也有较高的值,这可能是由于该区域城市化率较高,对当地气候产生了一定的影响。

对 6 个极端降雨指标进行 M-K 趋势检验, PRCPTOT、SDII、RP90DAY、RP95DAY、RX1DAY 和 RX3DAY 的 M-K 趋势检验 Z 值分别为 0.38、2.42、1.51、0.86、0.99 和 0.56,表明所有极端降雨指标都呈现上升的趋势,其中 SDII 上升的程度最大,RP90DAY 次之。图 3 为 1979—2018 年极端降雨指标的 M-K 趋势检验 Z 值的空间分布,图中打点处代表变化趋势显著。由图 3 可见,多数极端降雨指标在大湾区内大部分地区都呈现不同程度的上升趋势,仅有最东部表现出了较为明显的下降趋势。对于 SDII 来说,几乎大湾区全域都是显著的上升趋势,而对于其他指标显著上升趋势集中在大湾区的中北部。大湾区中部城市化水平最高,人口最为密集,下垫面的改变影响了小区域的水汽循环,加剧了热岛和雨岛效应,导致了极端降雨显著增加<sup>[36-38]</sup>。而对于 RX3DAY 来说,显著上升和显著下降的地区均集中在沿海,这可能是因为大湾区西部的沿海地区登陆的台风数量较多,而东部沿海地区登陆的台风相对较少<sup>[39]</sup>。

#### 3.1.2 时间分布特征

图 4 为极端降雨指标 M-K 趋势检验 UF 和 UB 统计量随时间变化情况。由图 4 可见,所有的极端降雨指标都呈现出先上升到下降再上升的趋势。其中,只有 SDII 的突变点较为明显(发生在 1996 年),

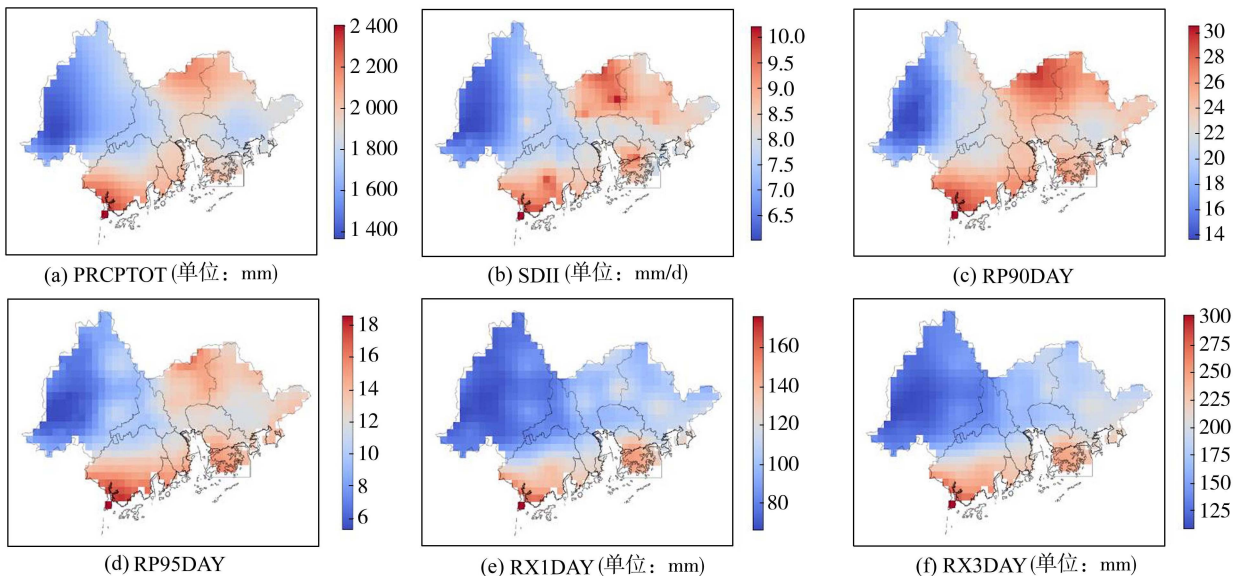


图 2 极端降雨指标多年平均值的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of annual average values of extreme rainfall indicators



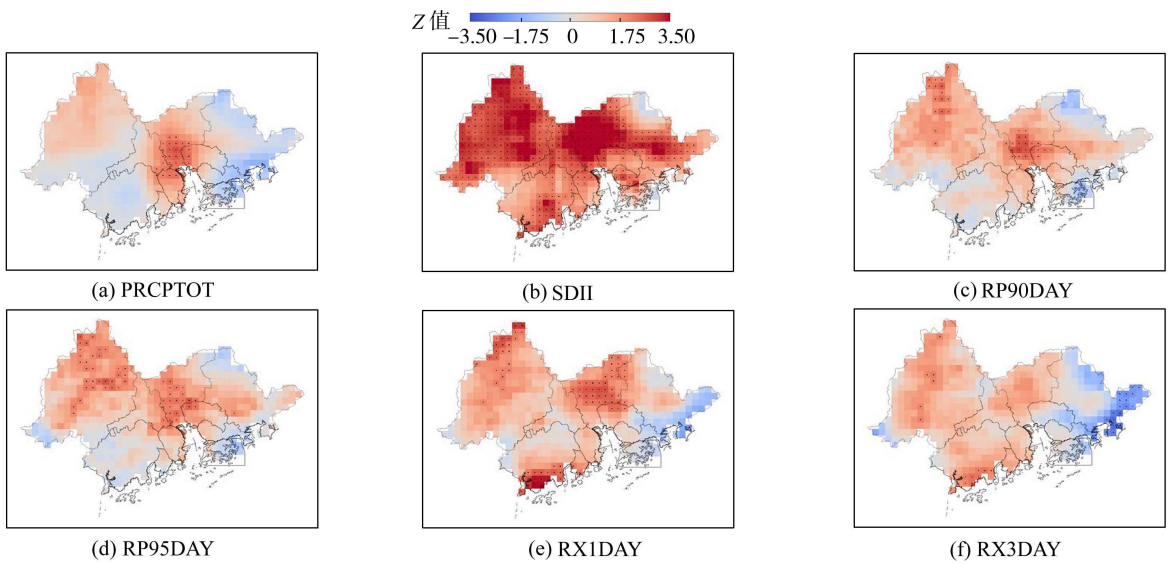


图3 1979—2018年极端降雨指标的M-K趋势检验值的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of M-K trend test values for extreme rainfall indicators from 1979 to 2018

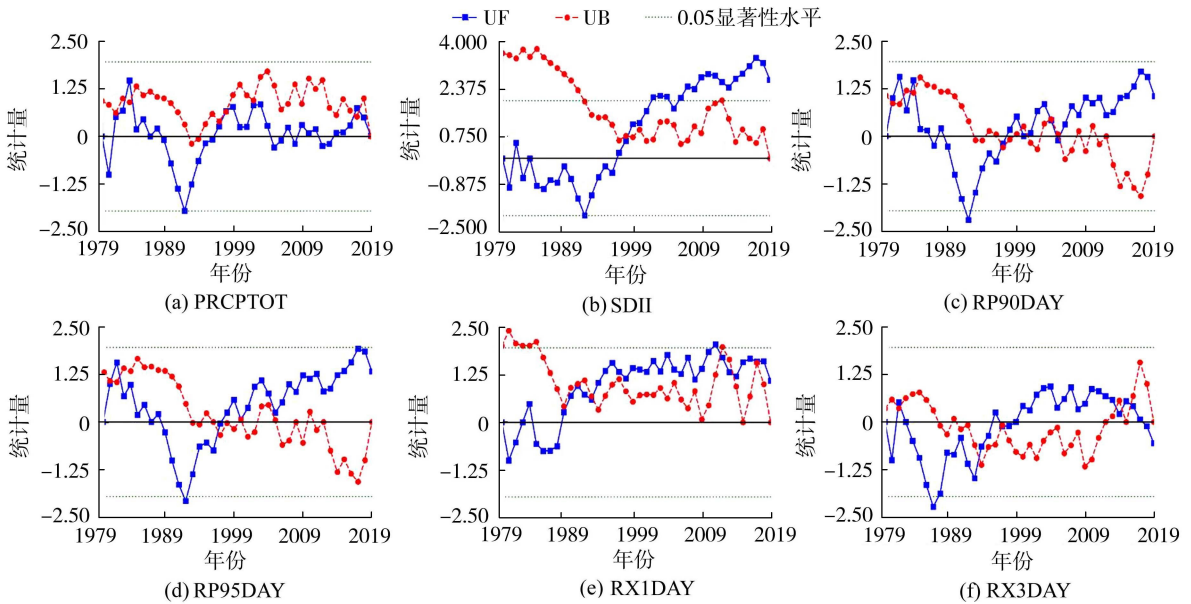


图4 极端降雨指标M-K趋势检验UF和UB统计量随时间变化情况

Fig. 4 Changes of M-K trend test UF and UB statistics over time of extreme rainfall indicators

其他5个极端降雨指标的突变点都超过了3个,交点过多,所以不能直接判定是否为极端降雨时间序列的真实突变点。因此,对极端降雨指标进行了Pettitt突变检验,结果如图5所示。由图5可见,对于SDII,两种检验方法得到了相同的结果。PRCPTOT、RP90DAY、RP95DAY的Pettitt突变检验显示其在1992年发生了突变,M-K趋势检验中也存在这个现象,证明了该突变点的真实性。两种检验方法结果都表明RX1DAY和RX5DAY的突变发生在1988年和1993年。研究发现,极端降雨指标的突变点几乎都在1990年左右,这可能与大气环流的变化及城市化引起的下垫面剧变有关,大湾区在1990年左右发生了PDO相变,并且大湾区的发展

转折发生在20世纪末<sup>[40]</sup>,具体原因还需要进一步探究。

为了进一步探究大湾区极端降雨的时间分布特征,统计了极端降雨指标极值在不同月份的分布,结果如图6所示。由图6可见,所有的极端降雨都集中在4—9月,10月至次年3月的极端降雨较少。但是,RX1DAY在1月突破了150 mm,而RX3DAY在3月突破了300 mm,这意味着即使是在降雨较少的月份也需要谨慎防范极端降雨。PRCPTOT、SDII、RP90DAY和RP95DAY的极值都出现在6月,而RX1DAY和RX3DAY的极值则分别出现在8月和9月。研究表明,大湾区在雨季的末尾更加容易出现短期较为极端的降雨,而整个雨季都需要做好对



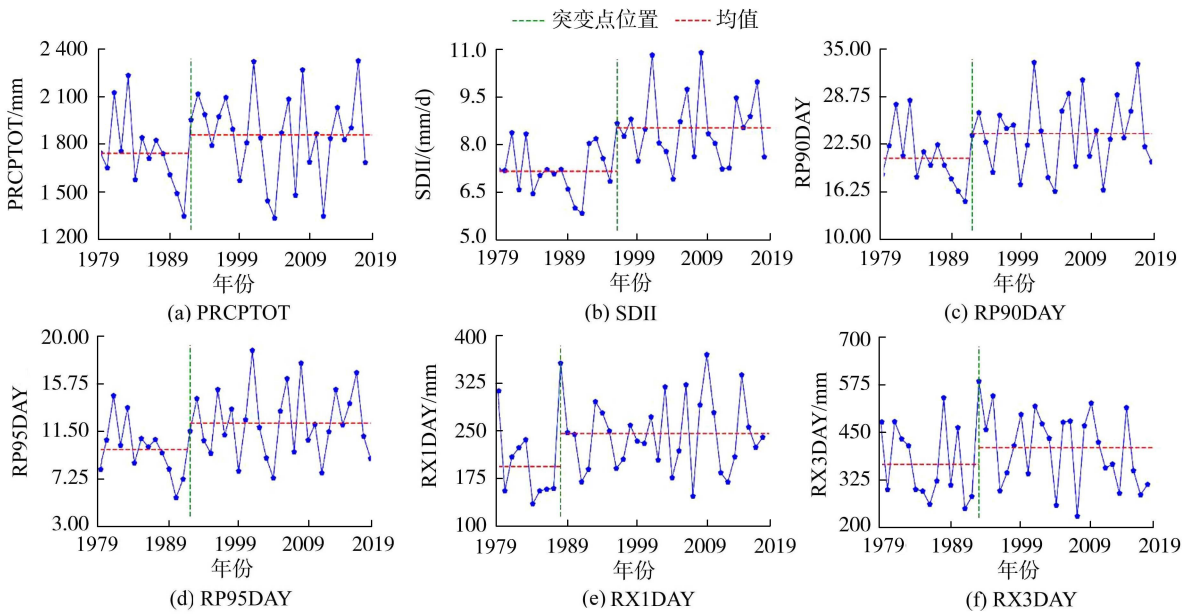


图 5 极端降雨指标 Pettitt 突变检测结果

Fig. 5 Results of Pettitt mutation detection of extreme rainfall indicators

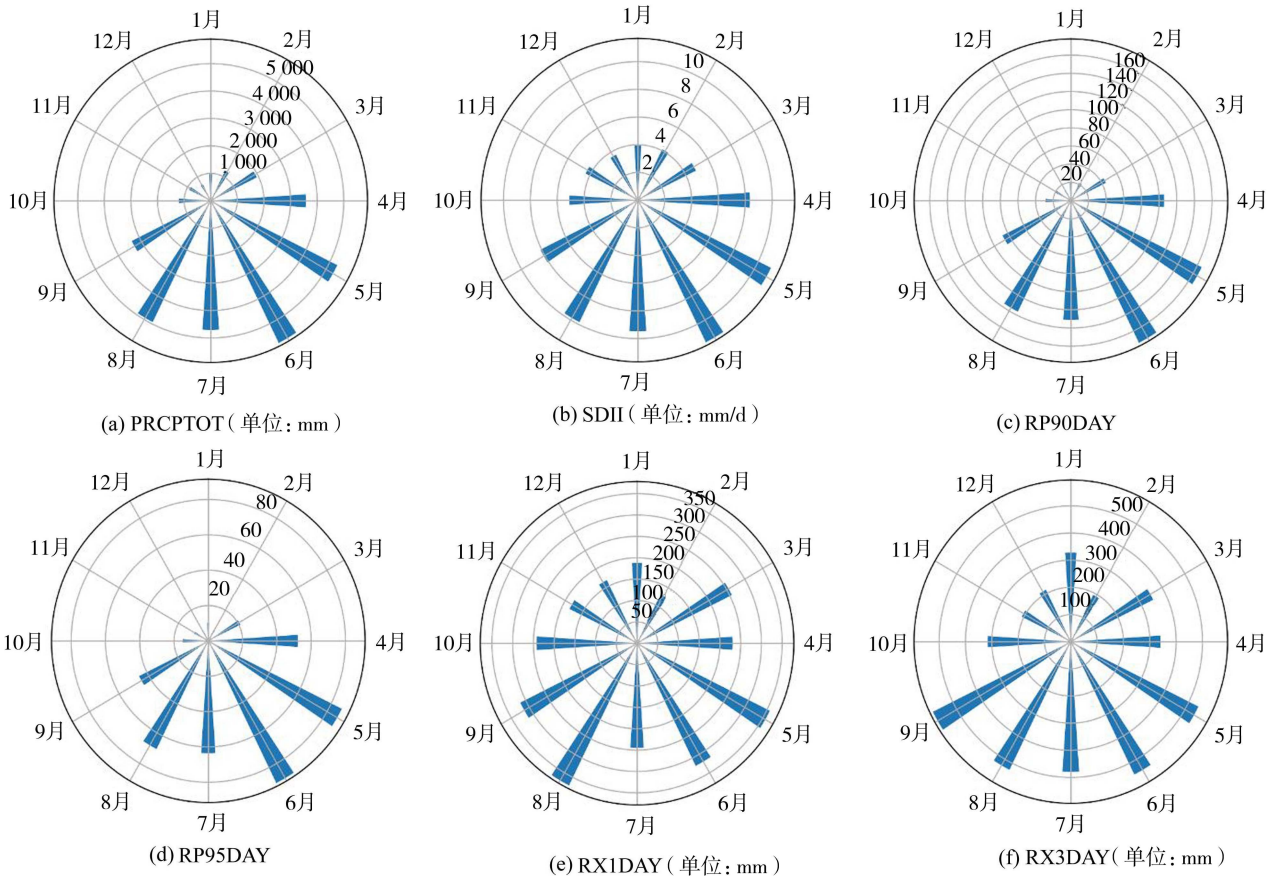


图 6 极端降雨指标极值在不同月份的分布

Fig. 6 Distribution of extreme rainfall indicator peak in different months

极端降雨的预测以及灾害防范工作。

### 3.2 极端降雨与大气环流模式的相关性

利用皮尔逊相关分析方法对极端降雨与大气环流模式之间的相关性进行分析,结果见图 7,图中\*代表在 0.05 的水平上显著相关。由图 7 可见,EAM

与大湾区的极端降雨指标的相关性最高,且均呈现显著的正相关关系,相关系数达到 0.5 以上。AO 和 IOD 分别与极端降雨指标呈现了正相关关系和负相关关系,但其所有相关性均不显著。PDO 与除 PRCPTOT 之外的极端降雨指标都存在显著的相关

性,与 RX1DAY 和 RX3DAY 存在显著的正相关关系,而与其他指标存在显著的负相关关系。ENSO 与 WP 表现较为相似,与极端降雨指标都存在正相关关系,并且与 RX1DAY 和 RX3DAY 的相关性较为显著,但 WP 与极端降雨指标的相关性要弱于 ENSO。总体来说,对于大湾区的极端降雨,EAM 的影响最大,PDO 和 ENSO 也是不容忽视的影响因素,而 WP、AO 和 IOD 对大湾区极端降雨的影响相对较小。

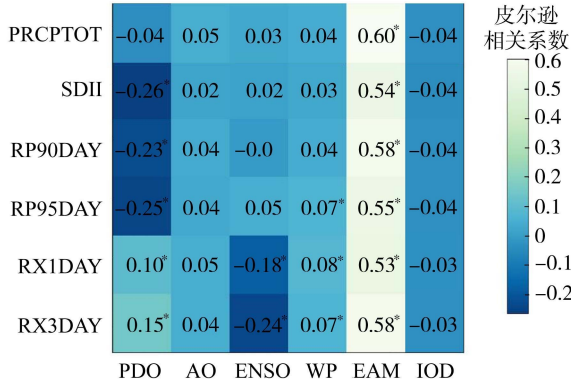


图 7 极端降雨指标与大气环流模式的皮尔逊相关系数  
Fig. 7 Pearson correlation coefficients between extreme rainfall indicators and large climate patterns

### 3.3 极端降雨指标与大尺度气候模式的时频相关性

考虑到极端降雨指标与大气环流模式的皮尔逊相关系数的分布,利用交叉小波分析了两者的周期相关性以及在时频域的共振频率和相移。极端降雨指标与 AO、WP 和 IOD 的皮尔逊相关系数不够显著而且小波响应关系不明显,所以图 8 只列出了极端降雨指标与 ENSO、EAM、PDO 的交叉小波功率谱,图中黄色表示能量密度的高值,蓝色表示能量密度的低值,黑色细实线为小波边界效应影响锥曲线,粗黑实线范围之内代表超过了置信水平为 95% 红色噪音标准谱的检验。由图 8 可见,PDO、ENSO 与极端降雨指标存在不连续的 8~16 月的周期性相关关系,而 EAM 与极端降雨指标有着稳定的 8~16 月的周期关系,除此之外,PDO 与 RX1DAY、RX3DAY 在 1985—2000 年有着 64 月左右的周期关系。对于 PDO 来说,在 8~16 月的周期上对不同极端降雨指标的影响较为相似,但在 2000 年前后每个小周期的持续时间上存在着细微的差异。同时,PDO 对极端降雨指标的影响在 1990 年和 2000 年前后有着明显的相位变化,1990 年之前 PDO 与极端降雨指标呈负相关的周期关系,在 1990—2000 年呈现正相关的周期关系,而在 2000 年之后又呈现负相关的周期关系。PDO 与极端降雨指标的周期相关性的相位变

化也和极端降雨指标的突变点有着较为明显的对应关系,这意味着 PDO 对极端降雨的变化规律有显著的影响<sup>[41-42]</sup>。而 EAM 对不同极端降雨指标表现出了非常一致并且稳定的影响,EAM 一直都是影响中国东南沿海区域降水的非常稳定大气环流模式,印证了交叉小波分析的正确性<sup>[43-44]</sup>。此外,ENSO 一直都是影响中国乃至整个东亚的非常重要的大气环流模式。对于 ENSO 来说,不同的极端降雨指标受到的影响差异较为明显,主要表现为 1990—1995 年 8~16 月的周期以及 2010—2018 年 4 月以下的周期;在相位变化上,ENSO 并没有显著的表现,结果与郭品文等<sup>[45]</sup>的研究结果一致。

### 3.4 极端降雨指标与大气环流模式的 PWC 分析

多数情况下,大气环流模式对极端降雨的影响并非单一存在,而是多种大气环流模式互相作用的结果<sup>[9]</sup>。因此,采用 PWC 分析单一大气环流模式与极端降雨指标之间的相关关系,图 9 为极端降水指标与 ENSO、EAM、PDO 的 PWC 功率谱。总体来说,在剔除了其他大气环流模式的影响后,基本结果与交叉小波的结果相差较大,但是基本的正负相关性没有改变。对于 PDO 来说,在剔除掉 ENSO 及 EAM 的影响后,在 8~16 月的周期上只剩下一些非常零散的周期信号。PDO 与极端降雨指标在 1990—1995 年多出了一些 32 月左右的周期信号;在 1990—2010 年则多出了一些 64 月以上的周期信号。这表明了 PDO 对极端降雨的影响是一个长期的过程,但是也可能与其他大气环流模式耦合后在短期内影响大湾区的极端降雨。ENSO 与 PDO 的表现相似,在消除了 PDO 和 EAM 的影响之后,ENSO 与极端降雨在 16 月以下的短周期信号变得零散不连续,取而代之的是 ENSO 与 RX1DAY 和 RX3DAY 在 16 月以上出现较为显著的长周期信号。总体来说,在剔除了 PDO 和 EAM 的影响之后,ENSO 与极端降雨的周期相关性不如交叉小波的结果显著,但是与皮尔逊相关分析的结果更加接近,ENSO 对极端降雨指标中的 RX1DAY 和 RX3DAY 有着较为显著的影响。在消除了 PDO 和 ENSO 的影响后,EAM 的结果和交叉小波的结果并没有明显改变,依然表现出了非常稳定的 8~16 月的周期信号,但是信号不如交叉小波结果光滑并在 RX1DAY 的结果中出现了断点,这也表明了 ENSO 和 PDO 对极端降雨在 8~16 月的短周期上与 EAM 有着耦合作用。因此,在对极端降雨进行预测时并不能以单一大气环流模式作为预报依据,需要考虑多种大气环流模式的耦合作用。



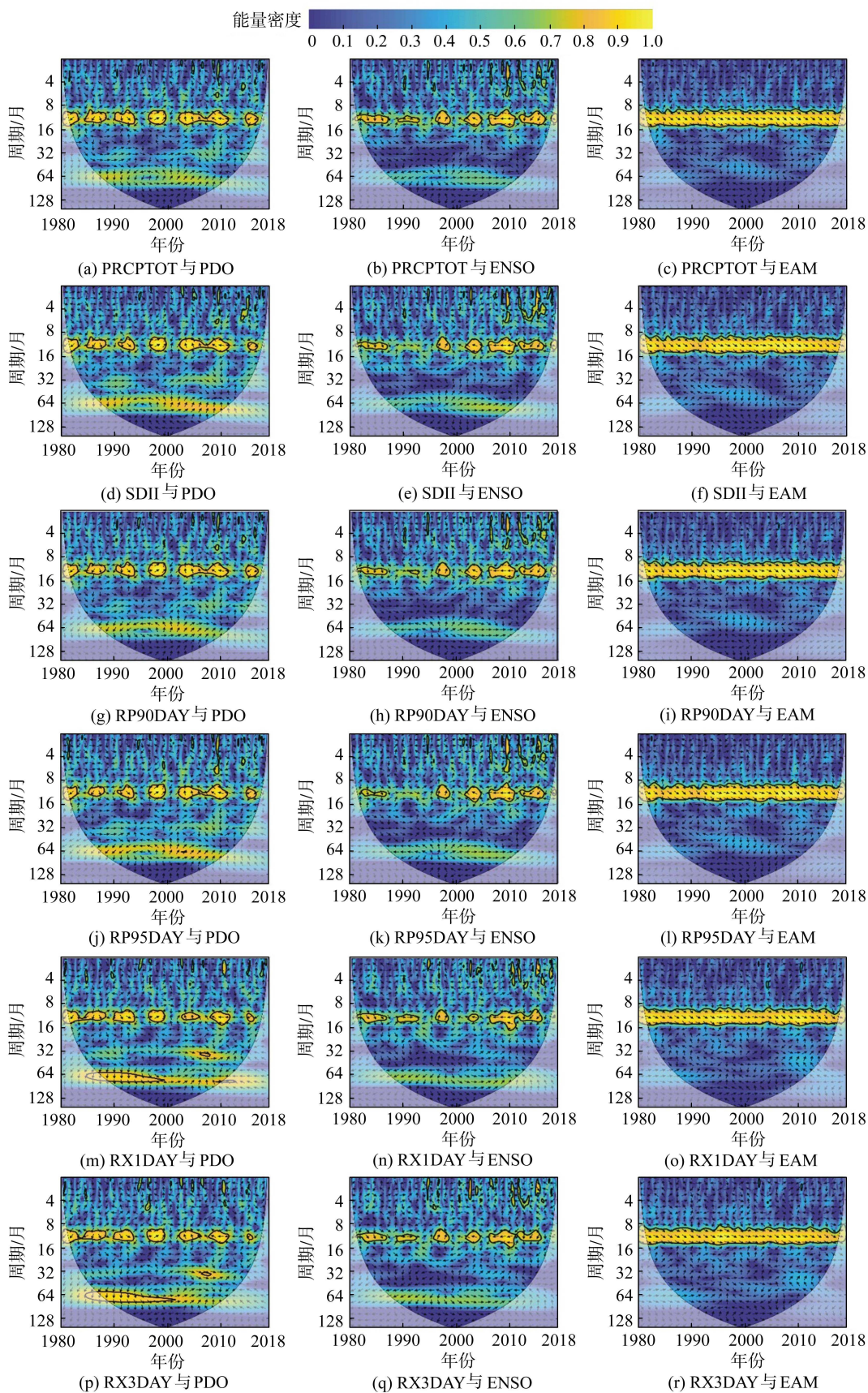


图 8 极端降雨指标与 ENSO、EAM、PDO 的交叉小波功率谱

Fig. 8 Cross wavelet power spectra of extreme rainfall indicators and ENSO, EAM, PDO



能量密度 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0

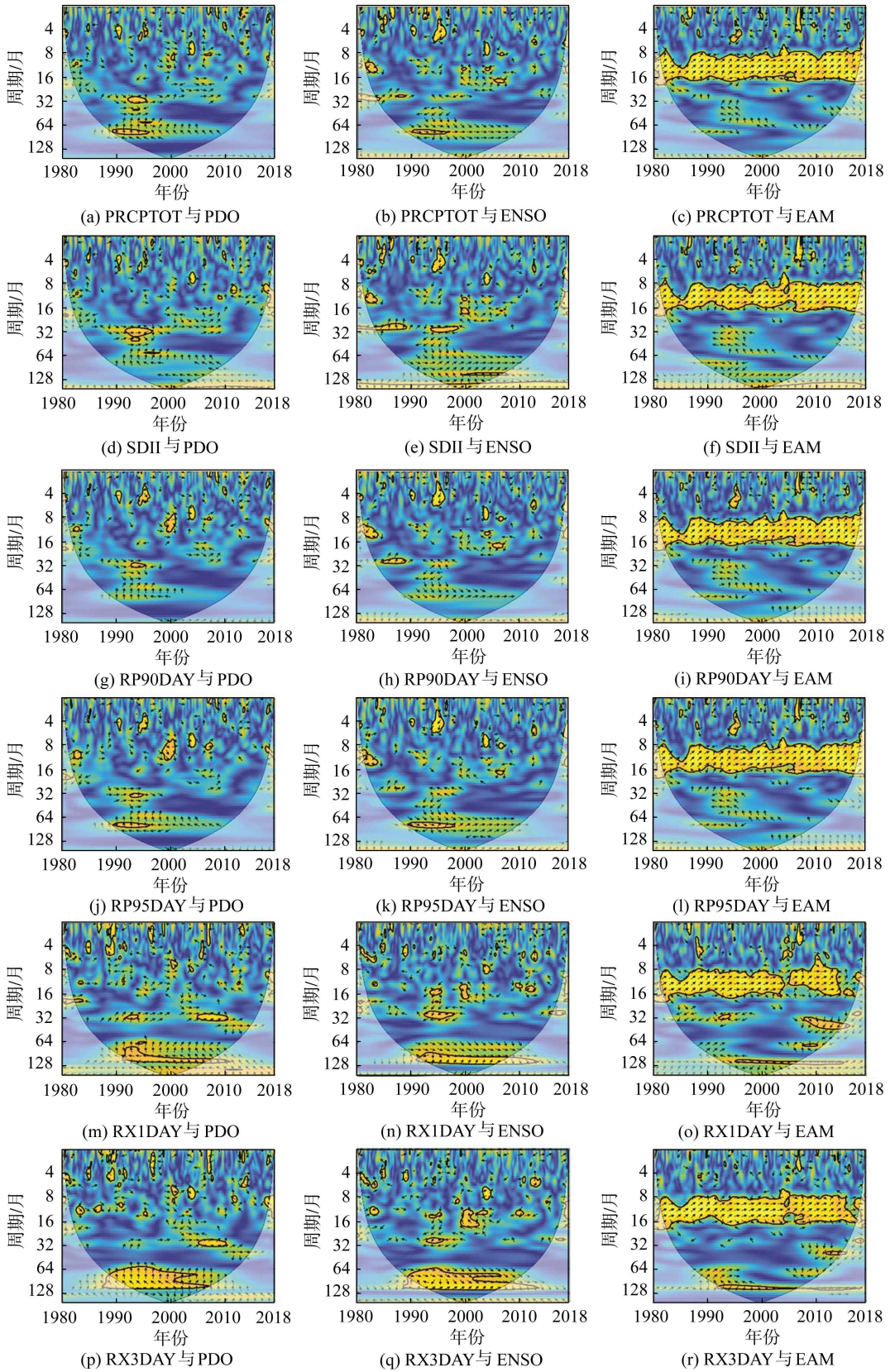


图9 极端降雨指标与 ENSO、EAM、PDO 的 PWC 功率谱

Fig. 9 PWC power spectra of extreme precipitation indicators and ENSO, EAM, PDO

## 4 结 论

a. 1979—2018年,粤港澳大湾区极端降雨总体呈现上升趋势,6个极端降雨指标的空间分布以大湾区中北部地区的上升趋势较为显著。从时域上看,极端降雨在1990—2000年存在明显的相变,整体呈现先减后增的态势;从月份分布看,极端降雨主要集中在雨季,尤其集中在6月。20世纪90年代是大湾区极端降雨发生重要转折的时期节点。

b. 皮尔逊相关分析结果表明,EAM为与大湾区6个极端降雨指标相关性最强的大气环流模式,相关系数均超过0.5,并达到显著水平。其次为PDO和ENSO,其与大湾区多数极端降雨指标呈显著的负相关关系,而AO和IOD对极端降雨指标的影响不显著。

c. 交叉小波分析结果表明,EAM对不同极端降雨指标的影响存在稳定的8~16月周期性;ENSO和PDO与极端降雨指标的时频相关性则相对复杂。PWC分析结果表明,ENSO和PDO对极端降雨指标的影响在16月以下的周期性大量消失而EAM则在8~16月周期上保持稳定,表明其他大气环流模式与EAM存在一定的耦合作用。

### 参考文献:

[1] AGILAN V, UMAMAHESH N V, MUJUMDAR P P. Influence of threshold selection in modeling peaks over threshold based nonstationary extreme rainfall series[J]. Journal of Hydrology, 2021, 593: 125625.

[2] ZHOU Zhaoqiang, SHI Haiyun, FU Qiang, et al. Is the cold region in Northeast China still getting warmer under climate change impact? [J]. Atmospheric Research, 2020, 237: 104864.

[3] 刘永志,唐雯雯,张文婷,等.基于灾害链的洪涝灾害风险分析综述[J].水资源保护,2021,37(1):20-27. (LIU Yongzhi, TANG Wenwen, ZHANG Wenting, et al. Review of flood disaster risk analysis based on disaster chain[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 20-27. (in Chinese))

[4] 张长征,沈婷,徐慎晖,等.极端天气下特大型城市“水-能源-粮食”安全风险研究[J].水利经济,2023,41(1):55-61. (ZHANG Changzheng, SHEN Ting, XU Shenhui, et al. Study on the security risk of “water-energy-food” in mega cities under extreme weather[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(1): 55-61. (in Chinese))

[5] 黄晶,吴星妍,李梦晗.不同主体视角下极端暴雨灾害事件网络舆情演化研究[J].水利经济,2023,41(4):94-101. (HUANG Jing, WU Xingyan, LI Menghan.

Research on the evolution of network public opinion of extreme rainstorm disaster events from the perspective of different subjects [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(4): 94-101. (in Chinese))

[6] 邹磊,夏军,张印,等.海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析[J].水资源保护,2021,37(1):53-60. (ZOU Lei, XIA Jun, ZHANG Yin, et al. Spatial-temporal change characteristics and driving forces of precipitation in the Haihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 53-60. (in Chinese))

[7] 王辉,吴文俊,王广,等.昆明市极端降水事件演变特征及城市效应[J].水资源保护,2021,37(4):61-68. (WANG Hui, WU Wenjun, WANG Guang, et al. Evolution characteristics of extreme precipitation events and its urban effect in Kunming City [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 61-68. (in Chinese))

[8] WANG Yao, LIU Suning, CHEN Ji, et al. Investigating the spatiotemporal variations of extreme rainfall and its potential driving factors with improved partial wavelet coherence [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 951468.

[9] 管新建,刘源,孟钰,等.中国洪涝灾害农业致灾性时空分布规律[J].水资源保护,2022,38(4):21-25. (GUAN Xinjian, LIU Yuan, MENG Yu, et al. Analysis on spatiotemporal distribution of agricultural disaster caused by floods and waterlogging in China [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 21-25. (in Chinese))

[10] TAN Xuezi, SHAO Dongguo. Precipitation trends and teleconnections identified using quantile regressions over Xinjiang, China [J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(3): 1510-1525.

[11] DU Haibo, WU Zhengfang, ZONG Shengwei, et al. Assessing the characteristics of extreme precipitation over northeast China using the multifractal detrended fluctuation analysis [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(12): 6165-6174.

[12] NALLEY D, ADAMOWSKI J, BISWAS A, et al. A multiscale and multivariate analysis of precipitation and streamflow variability in relation to ENSO, NAO and PDO [J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 288-307.

[13] LESTARI S, HAMADA J I, SYAMSUDIN F, et al. ENSO influences on rainfall extremes around Sulawesi and Maluku islands in the eastern Indonesian maritime continent [J]. SOLA, 2016, 12: 37-41.

[14] LI Xin, ZHANG Ke, GU Pengrui, et al. Changes in precipitation extremes in the Yangtze River Basin during 1960-2019 and the association with global warming, ENSO, and local effects [J]. Science of the Total Environment, 2021, 760: 144244.

[15] 乔云亭,陈烈庭,张庆云.东亚季风指数的定义及其与中国气候的关系[J].大气科学,2002,26(1):69-82.

- (QIAO Yunting, CHEN Lieting, ZHANG Qingyun. The definition of east Asian monsoon indices and their relationship to climate in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2002, 26 ( 1 ): 69-82. ( in Chinese ))
- [16] TAN Xueling, LIU Suning, TIAN Yong, et al. Impacts of climate change and land use/cover change on regional hydrological processes; case of the Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 9: 783324.
- [17] LI Tianhong, WEN Xiaoling. Local ecological footprint dynamics in the construction of the Three Gorges Dam [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 132: 314-323.
- [18] XIN Ying, LU Ning, JIANG Hou, et al. Performance of ERA5 reanalysis precipitation products in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China [J]. Journal of Hydrology, 2021, 602: 126791.
- [19] HE Jie, YANG Kun, TANG Wenjun, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China [J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 25.
- [20] YANG Kun, HE Jie, TANG Wenjun, et al. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions; observation and modeling in the Tibetan Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(1): 38-46.
- [21] 王俊阳, 史海匀. 深圳市极端降水时空演变特征分析 [J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2024, 45(2): 59-72. ( WANG Junyang, SHI Haiyun. Analysis of spatio-temporal evolution characteristics of extreme precipitation in Shenzhen [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2024, 45(2): 59-72. ( in Chinese ))
- [22] ZHANG X B, ALEXANDER L, HEGERL G C, et al. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011, 2(6): 851-870.
- [23] MANN H B. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.
- [24] SHI Haiyun, LI Tiejian, WEI Jiahua, et al. Spatial and temporal characteristics of precipitation over the Three-River Headwaters region during 1961-2014 [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2016, 6: 52-65.
- [25] SHI Haiyun, WANG Guangqian. Impacts of climate change and hydraulic structures on runoff and sediment discharge in the middle Yellow River [J]. Hydrological Processes, 2015, 29(14): 3236-3246.
- [26] HAMED K H. Trend detection in hydrologic data; the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis [J]. Journal of Hydrology, 2008, 349(3/4): 350-363.
- [27] KHALIQ M N, OUARDA T B M J, GACHON P. Identification of temporal trends in annual and seasonal low flows occurring in Canadian rivers; the effect of short- and long-term persistence [J]. Journal of Hydrology, 2009, 369(1/2): 183-197.
- [28] CONTE L C, BAYER D M, BAYER F M. Bootstrap Pettitt test for detecting change points in hydroclimatological data; case study of Itaipu Hydroelectric Plant, Brazil [J]. Hydrological Sciences Journal, 2019, 64(11): 1312-1326.
- [29] MALLAKPOUR I, VILLARINI G. A simulation study to examine the sensitivity of the Pettitt test to detect abrupt changes in mean [J]. Hydrological Sciences Journal, 2016, 61(2): 245-254.
- [30] HUDGINS L, FRIEHE C A, MAYER M E. Wavelet transforms and atmospheric turbulence [J]. Physical Review Letters, 1993, 71(20): 3279-3282.
- [31] TORRENCE C, COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61-78.
- [32] ZHOU Zhaoqiang, SHI Haiyun, FU Qiang, et al. Characteristics of propagation from meteorological drought to hydrological drought in the Pearl River Basin [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2021, 126(4): e2020JD033959.
- [33] HU Wei, SI Bing. Technical note: improved partial wavelet coherency for understanding scale-specific and localized bivariate relationships in geosciences [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(1): 321-331.
- [34] TAN Xuezhi, MAI Qiyang, CHEN Guixing, et al. Intensity-duration-frequency curves in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area inferred from the Bayesian hierarchical model [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, 46: 101327.
- [35] WANG Dashan, WANG Xianwei, LIU Lin, et al. Evaluation of CMPA precipitation estimate in the evolution of typhoon-related storm rainfall in Guangdong, China [J]. Journal of Hydroinformatics, 2016, 18(6): 1055-1068.
- [36] 赵彦军, 夏军, 徐宗学, 等. 深圳市雨岛效应分析 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(6): 768-775. ( ZHAO Yanjun, XIA Jun, XU Zongxue, et al. Rain island effect in Shenzhen City [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021, 57(6): 768-775. ( in Chinese ))
- [37] 张树钦, 黄哲帆, 唐若莹, 等. 广东汕头市近十年来城市热岛效应分析 [J]. 中国海洋大学学报, 2022, 52(8): 19-30. ( ZHANG Shuqin, HUANG Zhefan, TANG Ruoying, et al. Analyses of urban heat island effect in Shantou City of Guangdong Province in recent ten years [J]. Periodical of Ocean University of China, 2022, 52(8): 19-30. ( in Chinese ))



- Science, 2013, 24(6): 861-868. (in Chinese)
- [18] NASH S, HARTNETT M. Nested circulation modelling of inter-tidal zones: details of a nesting approach incorporating moving boundaries [J]. *Ocean Dynamics*, 2010, 60(6): 1479-1495.
- [19] HÉNONIN J, MA Hongtao, YANG Zhengyu, et al. Citywide multi-grid urban flood modelling: the July 2012 flood in Beijing [J]. *Urban Water Journal*, 2015, 12(1): 52-66.
- [20] 陈文龙, 徐宗学, 宋利祥, 等. 基于流域系统整体观的城市洪涝治理研究 [J]. *水利学报*, 2021, 52(6): 659-672. (CHEN Wenlong, XU Zongxue, SONG Lixiang, et al. Research on the control measures of pluvial and fluvial urban floods based on holistic view of watershed system [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(6): 659-672. (in Chinese))
- [21] 黄国如, 陈志威, 曾博威. 城市洪涝模型及 CPU-GPU 异构并行计算技术研究进展 [J]. *水利学报*, 2023, 54(6): 654-665. (HUANG Guoru, CHEN Zhiwei, ZENG Bowei. Research progress of urban flood model and CPU-GPU heterogeneous parallel computing technology [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 54(6): 654-665. (in Chinese))
- [22] 胡昌伟. 太湖流域洪水风险模拟研究 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2012.
- [23] 吕宏兴, 裴国霞, 杨玲霞. 水力学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [24] 徐山川. 基于 GIS 的 SWMM 模型在洪雅县的应用研究: 以柳江古镇为例 [D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [25] FEDERATION W E. Design and construction of urban stormwater management systems [M]. Reston: American Society of Civil Engineers, 1992.
- [26] 任国源. 填洼损失量计算在海河流域洪水预报中的应用 [J]. *水利规划与设计*, 2014(9): 39-41. (REN Guoyuan. Application on calculation of filling loss amount in flood forecasting of Haihe River Basin [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2014(9): 39-41. (in Chinese))
- [27] 陶涛, 颜合想, 李树平, 等. 城市雨水管理模型中关键问题探讨 (二): 下渗模型 [J]. *给水排水*, 2017, 53(9): 115-119. (TAO Tao, YAN Hexiang, LI Shuping, et al. Discussion on key issues in urban rainwater management model (II): infiltration model [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 53(9): 115-119. (in Chinese))
- [28] 陈秋伶, 林凯荣, 陈文龙, 等. 多尺度海绵城市系统雨洪控制研究 [J]. *水利学报*, 2022, 53(7): 862-875. (CHEN Qiuling, LIN Kairong, CHEN Wenlong, et al. Study on storm flood control in multi-scale sponge city system [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(7): 862-875. (in Chinese))
- [29] 马旭. 基于 Infoworks ICM 模型的典型城市内涝模拟及海绵减控效果研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [30] 黄国如, 陈文杰, 喻海军. 城市洪涝水文水力耦合模型构建与评估 [J]. *水科学进展*, 2021, 32(3): 334-344. (HUANG Guoru, CHEN Wenjie, YU Haijun. Construction and evaluation of an integrated hydrological and hydrodynamics urban flood model [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(3): 334-344. (in Chinese))
- (收稿日期: 2024-03-27 编辑: 王芳)
- 
- (上接第 37 页)
- [38] 陈申鹏. 深圳多年降水变化规律和雨岛效应分析 [J]. *气象科技进展*, 2019, 9(3): 166-170. (CHEN Shenpeng. Multi-year variation of precipitation and rain island effect in Shenzhen [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2019, 9(3): 166-170. (in Chinese))
- [39] 王磊之, 崔婷婷, 李笑天, 等. 降水变化条件下沿海地区暴雨-潮位遭遇联合风险 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(4): 110-116. (WANG Leizhi, CUI Tingting, LI Xiaotian, et al. Joint risks of rainstorm and tidal level under varying precipitation conditions in coastal areas [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(4): 110-116. (in Chinese))
- [40] YANG Fang, WANG Xinghan, ZHOU Xiaoxue, et al. Effects of urbanization on changes in precipitation extremes in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China [J]. *Water*, 2023, 15(19): 3438.
- [41] ZOU Xukai, REN Fumin. Changes in regional heavy rainfall events in China during 1961-2012 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, 32(5): 704-714.
- [42] YU Xiaocheng, ZHOU Wen, ZHANG Yue. The decadal shift in TC-induced precipitation over China [J]. *Atmospheric Research*, 2022, 274: 106186.
- [43] DING Y H, CHAN J C L. The East Asian summer monsoon: an overview [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2005, 89(1): 117-142.
- [44] PARK C, SON S W, KIM H. Distinct features of atmospheric rivers in the early versus late East Asian summer monsoon and their impacts on monsoon rainfall [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126(7): e2020JD033537.
- [45] 郭品文, 郎丽玲. ENSO 与中国东部夏季降水异常关系的年代际变化 [J]. *大气科学学报*, 2017, 40(4): 463-472. (GUO Pinwen, LANG Liling. Interdecadal variation of the relationship between ENSO and East-China summer rainfall [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2017, 40(4): 463-472. (in Chinese))
- (收稿日期: 2024-02-07 编辑: 王芳)