

泛南海地区极端降水的历史分布和未来演变特征

杨崧^{1,2}, 徐连连^{1,2*}

1. 中山大学大气科学学院; 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519082

2. 广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室, 珠海 519082

*通讯作者: 徐连连, xullian@mail.sysu.edu.cn

摘要 泛南海地区是全球海-陆-气相互作用最敏感的区域之一, 该区域极端降水释放的潜热加热可以调节局地的温度和湿度廓线对大气环流进行调整, 进而影响周边地区甚至全球的天气气候。因此, 泛南海地区极端降水的时空变化特征及变异机理一直是国内外学者关注的焦点。本文利用观测数据(1951-2014年)和CMIP6两种共享社会经济路径(SSP1-2.6和SSP5-8.5)的统计降尺度数据(2015-2100年), 分析了泛南海地区年平均和季节平均的日降水的最大值(RX1day)、连续5日降水的最大值(RX5day)、极端强降水天数(R20)和非常湿润天(R95p)的时空变化特征。RX1day、RX5day、R20和R95p常用于表征极端强降水、持续性强降水、极端强降水的频率和极端累计降雨量的特征。1951-2014年泛南海地区年平均和季节平均的四个极端降水指数的较大值均分布在东南亚、中国东南部以及青藏高原南坡地区, 即这些区域不仅是极端强降水发生的区域, 也是持续性强降水以及高频极端降水发生的区域。季节平均的极端降水指数特征表现为: 东南亚一年四季都极易发生强降水、持续性强降水和高频极端降水; 南亚、青藏高原以及东亚的各个极端降水指数在夏季最大, 秋季和春季次之, 冬季最小。SSP1-2.6和SSP5-8.5情景下2015-2100年泛南海地区年平均和季节平均的四个极端降水指数的空间分布与历史时期相似, 且对整个区域而言, 各个指数均呈显著增加的趋势。由各个指数在未来三个时段(2016-2035年, 2046-2065年和2080-2099年)相比于1995-2014年的百分比变化可知, 南亚和青藏高原是泛南海地区未来强降水、持续性强降水以及高频极端降水变化最显著的区域。由此可知, 虽然东南亚是历史时期四个极端降水指数的大值区, 但该区域各个极端降水指数在未来三个时段的变化没有其他区域明显。此外, 以东南亚为例, 本文分析了该区域1979-2019年夏季极端降水的形成机理, 发现印度洋冷海温异常、热带北大西洋暖海温异常以及热带太平洋和大西洋海温异常是造成东南亚夏季极端降水呈北湿南干、全区一致偏湿和北干南湿的关键因子。

关键词: 泛南海, 极端降水, 时空变化特征, 海温异常

Extreme Precipitation in the South China Sea and Surrounding Areas:

Observation and Projection

YANG Song^{1,2} and XU Lianlian^{1,2*}

1. School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University; Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China
2. Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies, Sun Yat-sen University, Zhuhai, Guangdong 519082, China

*Corresponding author: XU Lianlian, xullian@mail.sysu.edu.cn

Abstract The South China Sea and surrounding areas (SCSSA) is one of the most sensitive regions with strong sea-land-air interactions. Extreme precipitation over the region has received widespread attentions in recent decades, because its large latent heat

can exert substantial impacts on climate variability across the globe, through providing substantial energy and moisture for global atmospheric circulations. Utilizing gauge-based gridded data and a statistically downscaled CMIP6 dataset, we systematically investigate the historical and future spatiotemporal characteristics of maximum 1-day precipitation (RX1day), maximum 5-day precipitation (RX5day), very heavy precipitation days (R20) and very wet days (R95p) over this region. The RX1day, RX5day, R20, and R95p are commonly used to represent heavy rainfall, persistent heavy rainfall, high-frequency heavy rainfall, and accumulated heavy rainfall amount, respectively. Result shows that four indices share an analogous spatial pattern during 1951-2014 at annual and seasonal time scales, with large values appearing over Southeast Asia, the Southern China, and southern part of the Tibetan Plateau. That is, these regions are not only with heavy rainfall, but also manifest sustained and high-frequency heavy precipitation. The four indices show large values over Southeast Asia in four seasons, and depict great (small) values over South Asia, the Tibet Plateau, and East Asia in summer (winter). The projected four indices in the future maintain the historical spatial structures, and the four indices averaged over the whole region exhibit increasing trends during 2015-2100 under the SSP1-2.6 and the SSP5-8.5 scenarios. The percentage changes in the four indices during 2016-2035, 2046-2065, and 2080-2099 under two scenarios with respective to 1995-2014 exhibit slightly decrease in Southeast Asia and East Asia, and increase over South Asia and the Tibetan Plateau. In addition, the physical mechanism associated with extreme precipitation over Southeast Asia has been further explored. The cold sea surface temperature anomalies (SSTAs) over Indian Ocean, warm SSTAs over the tropical North Atlantic, and SSTAs over the tropical Pacific and Atlantic are responsible for southern dry and northern wet, overall wet, and northern dry and southern patterns of extreme precipitation over Southeast Asia, respectively.

Key words: the South China Sea and surrounding areas, extreme precipitation, spatiotemporal characteristics, sea surface temperature anomalies

1 引言

在全球变暖背景下, 极端降水强度和频率的变化越来越显著, 由此引发了洪涝、干旱和泥石流等自然灾害, 严重威胁着人类的生命财产安全 (严中伟和杨赤 2000; 江志红等 2007; 杨金虎等 2008; Sillmann et al. 2013; 任福民等 2014; 孙颖等 2015; 徐影等 2017; Song et al. 2020; Sun et al. 2021; Zhou et al. 2021; 江洁等 2022; Xu et al. 2023)。众多国内外研究指出, 不同区域的极端降水对气候变暖的响应不同, 其中泛南海地区是北半球极端降水变化最显著的区域之一, 该区域每年由极端降水造成的经济损失超过总经济损失的40%, 严重影响了当地居民的生产和生活 (Ding et al. 2004; Scoccimarro and Gualdi 2013; Dong et al. 2021; Ge et al. 2021; Xu et al. 2021; Zhang et al. 2021)。

泛南海地区属于亚洲季风系统的关键区域, 是亚洲季风与厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO) 相互作用、太平洋与印度洋相互作用以及南北半球相互作用的交汇中心, 该区域降水释放的潜热加热可以调节局地哈德莱环流直接影响周边地区的降水, 也能够调节南亚高压的位置触发孟加拉湾夏季风的爆发, 还可以激发罗斯贝波列影响北美和欧亚大陆东北部的冬季气温 (何金海等 2006; Liu et al. 2013; Chen and Zhai 2017; He and Yang 2017; Jiang et al. 2017; Li et al. 2017; 舒建川等 2019; 杨崧等 2019; Wang and Dong 2022)。与平均降水相比, 泛南海地区的极端降水能够给局地带来更加严重的气象灾害, 对周边地区甚至全球的天气气候造成严重影响 (Scoccimarro and Gualdi 2013; Xu et al. 2021, 2022)。因此, 泛南海地区极端降水的时空变化特征及变异机理, 一直是国内外学者关注的焦点。

由于技术条件有限等多种原因, 针对泛南海的长期连续观测资料极为匮乏, 难以满足南海环境安全保障、生态环境保护以及气候变化研究等需求。近年来在国家 863 计划、国家海洋局专项以及国家自然科学基金等项目支持下, 各类气象观测站点逐渐加密, 使得泛南海地区的观测数据日益准确, 极大地促进了该区域极端气候的研究。例如 1994 年开展的“南海季风试验”, 中国科学家联合印度尼西亚、马来西亚、菲律宾等多个国家的科学家在泛南海区域开展了大型的

地面、探空等加密观测以及海洋浮标、科学考察船等特殊观测项目,所获得的数据在国内外相关研究中得到了广泛的应用。利用两套观测数据 (APHRODITE 和 CPC-UNI), 两套卫星数据 (TRMM 和 GPCP1DD) 以及三套再分析数据 (ERA-Interim、ERA5 和 JRA55), Kim et al. (2018) 分析了 1998-2007 年泛南海地区极端降水的空间分布特征, 指出 APHRODITE 和 CPC-UNI 具有较好的一致性。APHRODITE 是基于亚洲地区 12000 多个观测站点插值成的格点数据, 水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 时间长度为 1951-2015 年 (Yatagai et al. 2012)。CPC-UNI 是基于全球 30000 多个站点插值成的格点数据, 水平分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, 时间长度为 1979 至今 (Xie et al. 2007)。APHRODITE 和 CPC-UNI 经常作为参照数据评估模式数据在泛南海地区的适用性 (Ge et al. 2019; Utsumi and Kim 2022)。

为了方便个人、地区和国家能够以完全相同的方式研究极端气候, 气候变化与监测指标专家组 (ETCCDI) 定义了一系列极端降水指数 (Karl et al. 1999)。基于不同时段和不同分辨率的日降水数据, 研究者对泛南海区域极端降水的时空变化特征展开了大量的研究, 结果表明泛南海区域极端降水的变化具有较大的区域性差异 (Endo et al. 2009; Villafuerte and Matsumoto 2014; 江洁等 2022; Xu et al. 2022; 杨雯婷等 2022)。例如, 基于 APHRODITE 的日降水数据, Villafuerte and Matsumoto (2015) 发现 1951-2007 年东南亚地区年和季节最大降水量在中南半岛和菲律宾中东部地区呈现显著增加的趋势, 在海洋性大陆大部分区域呈现减小的趋势。为了更好地刻画极端气候在区域尺度上的变化特征, Iturbide et al. (2020) 将全球陆地区域分为 49 个子区域, 其中泛南海区域包含东南亚、南亚、青藏高原和东亚四个子区域 (图 1a)。截至目前, 少有研究基于不同极端降水指数, 全面分析泛南海不同区域极端降水的时空变化特征。

耦合模式比较计划第五和第六阶段 (CMIP5 和 CMIP6) 的多模式产品被广泛地应用于预估未来气候的变化。与 CMIP5 相比, CMIP6 气候模式对中国区域极端事件的模拟能力有了整体的提升, 但与观测仍然存在一定的偏差 (Chen et al. 2017; Zhu et al. 2020; Yang et al. 2021)。美国国家航空航天局对 CMIP6 气候模式的日产品进行误差订正并降尺度到 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的水平分辨率, 生成了高精度 NEX-GDDP-CMIP6 气候数据集 (Wood et al. 2002, 2004; Maurer and Hidalgo 2008; Thrasher et al. 2012)。基于高精度 NEX-GDDP-CMIP6 数据得到的泛南海地区极端降水在未来会呈现何种时空分布特征? 该问题的认识尚不清晰。

东南亚是泛南海地区对流最活跃的区域, 该地区对流活动能够显著影响我国南部的天气气候 (何金海等 2006; Liu et al. 2013; 杨崧等 2019)。以往研究主要分析热带海温异常对东南亚平均降水年际变率的影响, 对极端降水形成机制的研究较少。研究表明, ENSO 期间东南亚更容易发生极端降水, 且当 ENSO 和印度洋偶极子 (IOD) 同时发生时, 东南亚极端降水强度更大 (Villafuerte and Matsumoto 2015; Setiawan et al. 2017; Silva and Matthews 2021)。但热带海温异常如何影响东南亚极端降水, 这个问题尚未被清晰地揭示。

综上所述, 本文将主要解决以下两个科学问题: (1) 历史和未来时期, 泛南海地区不同极端降水指数会呈现何种时空分布特征? 依据 CMIP6 时段的划分, 本文的历史时段为 1951-2014 年, 未来时段为 2015-2100 年。(2) 热带海温异常通过何种途径影响东南亚极端降水? 这些问题的研究是深入认识泛南海地区极端降水变异机理的关键所在, 对该区域极端降水的预测预警具有十分重要的指示意义。

2 泛南海地区极端降水历史时期的时空变化特征

本研究挑选 ETCCDI 的四个极端降水指数 (表 1), 分别是日降水的最大值 (RX1day)、连续 5 日降水的最大值 (RX5day)、极端强降水天数 (R20) 和非常湿润天 (R95p)。RX1day 常用于表征极端强降水的强度。RX5day 一般用于持续性强降水的特征研究。R20 是基于绝对阈值定义的指数, 一般用于研究极端强降水的发生频率。R95p 是基于相对阈值定义的指数,

表示极端强降水的累计降雨量。本研究利用 APHRODITE 的日降水数据，分析 1951-2014 年泛南海地区四个极端降水指数的时空变化特征。

图 1 给出了 1951-2014 年泛南海地区年平均 R95p、R20、RX1day 和 RX5day 的空间分布特征以及四个指数在各个子区域的季节平均值。对整个区域而言，年平均 R95p、R20、RX1day 和 RX5day 的区域平均值分别为 226.2 毫米、7.7 天、37.0 毫米和 80.5 毫米。年平均 R95p 和 R20、RX1day 以及 RX5day 的空间分布相似，相关系数分别是 0.94，0.93 和 0.93，均通过 99% 的显著性检验，较大值分布在东南亚、中国东南部以及青藏高原南坡地区（图 1a-1d）。由此可见，泛南海地区极端强降水发生的区域，持续性降水的强度也高，极端降水的发生频次也大。

表 1 ETCCDI 中四个极端降水指数的名称、简写、定义以及单位。

Table 1 Names, abbreviations, definitions, and units of four extreme precipitation indices obtained from ETCCDI.

简写	指数名称	指数定义	单位
RX1day	日降水的最 大值	RR_{ij} 是时段 1951-2014 任意一天 i 的日降水量，日降水的 最大值是满足 $RX1day_j = \max(RR_{ij})$ 的降水量	毫米
RX5day	连续 5 日降 水的最大值	RR_{ij} 是时段 1951-2014 中以 5 天为窗口的降水量，连续 5 日降水的最大值是 $RX5day_j = \max(RR_{ij})$ 的总降水量	毫米
R20	极端强降水 天数	RR_{ij} 是时段 1951-2014 任意一天 i 的日降水量，强降水天 数是满足 $PR_{ij} > 20\text{mm}$ 的天数	天
R95p	非常湿润天	PR_{wj} 是时段 1951-2014 有雨天（ $PR \geq 1\text{mm}$ ）的降水量， PR_{wn95} 是时段 1951-2014 有雨天降水的 95th%， w 是时 段 1951-2014 有雨天的天数，非常湿润天是满足 $PR_{wj} > PR_{wn95}$ 的总降水量 $R95p_j = \sum_{w=1}^W PR_{wj}$	毫米

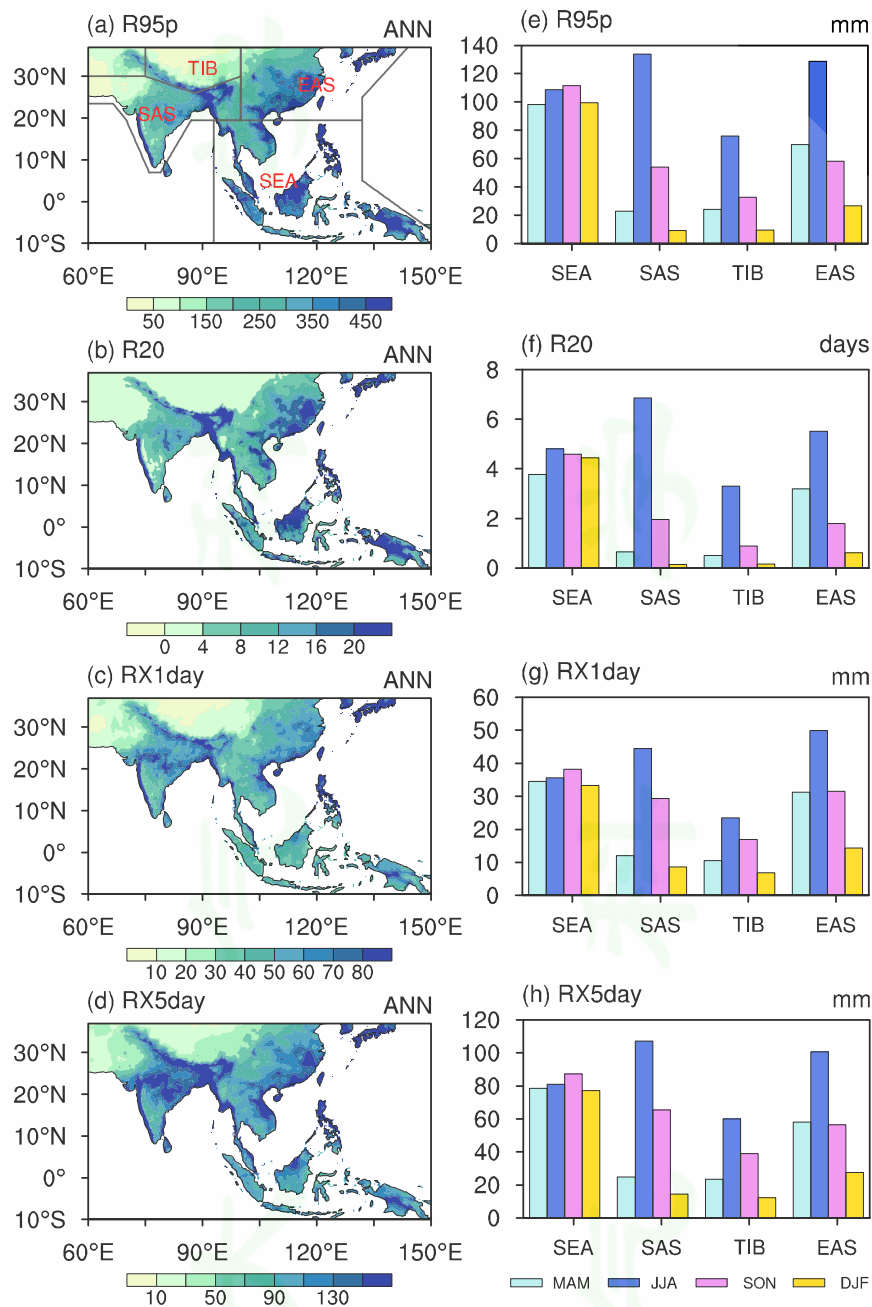


图 1 1951-2014 年泛南海地区年平均 (a) R95p (毫米)、(b) R20 (天)、(c) RX1day (毫米) 和 (d) RX5day (毫米) 的空间分布型。图 1a 中的 SEA、SAS、TIB 和 EAS 分别表示东南亚、南亚、青藏高原以及东亚区域。1951-2014 年 (e) R95p、(f) R20、(g) RX1day 和 (h) RX5day 在四个子区域的平均值。浅蓝、深蓝、粉色和黄色直条分别表示春季、夏季、秋季和冬季平均。

Fig. 1 Spatial patterns of annual mean (ANN) (a) R95p (mm), (b) R20 (days), (c) RX1day (mm), and (d) RX5day (mm) during 1951-2014 over the South China Sea and surrounding areas (SCSSA). SEA, SAS, TIB, and EAS in Fig.1a represent Southeast Asia, South Asia, the Tibet Plateau, and East Asia, respectively. Seasonal mean (e) R95p (f) R20, (g) RX1day, and (h) RX5day averaged over four sub-regions of the SCSSA during 1951-2014. Light blue, dark blue, pink, and yellow bars depict spring (MAM), summer (JJA), autumn (SON), and winter (DJF), respectively.

东南亚地区 R95p 的季节性差异较小，其他区域 R95p 在夏季最大，秋季和春季次之，冬季最小（图 1e）。值得注意的是，夏季平均的 R95p 在南亚和东亚的值大于东南亚，另外三个

季节东南亚的 R95p 最大。这是由于亚洲季风和澳大利亚季风系统的影响，泛南海地区的对流活动和降水在春季迅速发展，降水的大值中心从赤道向北移动，在夏季到达南亚和中国南部地区，秋季雨带逐渐向南移动，在冬季回到赤道附近（Zhang et al. 2016; Yang et al. 2019）。东南亚地区四个季节降水超过 20 毫米的天数大约为 4 天。南亚、青藏高原和东亚地区夏季降水超过 20 毫米的天数大约 7 天、3 天和 5 天，这三个区域冬季降水超过 20 毫米的天数几乎为零（图 1f）。由此可见，东南亚一年四季都极易发生强降水，南亚和东亚是泛南海夏季高频强降水的发生地区。RX1day 和 RX5day 的季节平均特征与 R95p 相似（图 1g-1h），即东南亚强降水和持续性强降水事件的季节性差异较小，其他区域这两种极端事件在夏季最大，冬季最小。

1951-2014 年泛南海地区年平均 R95p、R20、RX1day 以及 RX5day 趋势的空间分布不均一，且大部分区域的趋势并不显著（图 2a-2d）。对整个区域而言，年平均 R95p 在 1951-2014 年呈显著增加的趋势（0.75 毫米/年， $p < 0.01$ ）。春季、夏季和冬季平均的 R95p 均呈显著增加的趋势，而秋季的增加趋势不显著（图 2e）。与 R95p 相似，除秋季平均以外，年平均和其他季节平均的 RX1day 在 1951-2014 年呈显著增加的趋势（图 2f）。年、春季和冬季平均的 R20 和 RX5day 在 1951-2014 年呈显著增加的趋势，这两个指数在夏季和秋季的趋势变化不显著（图 2g 和 2h）。

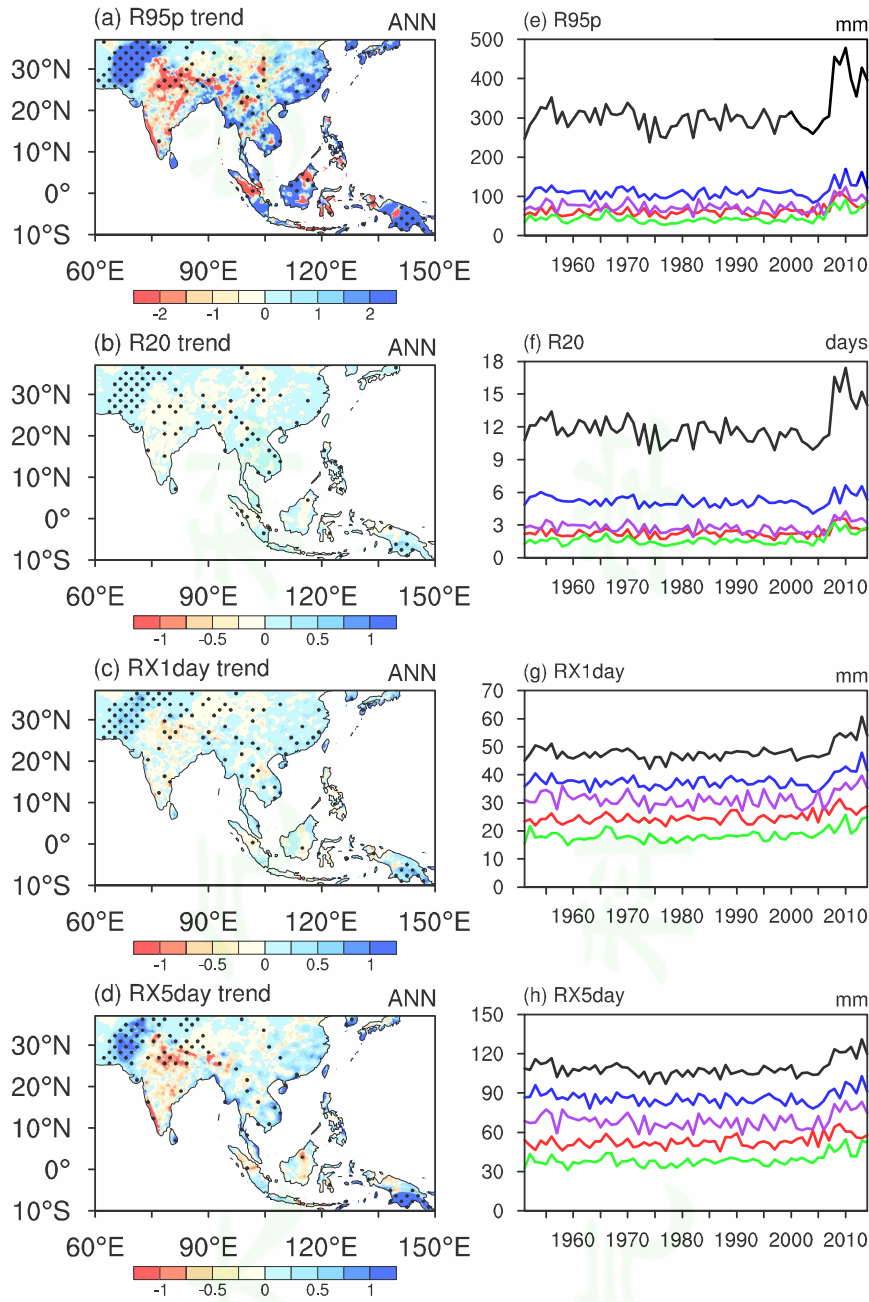


图2 (a) 1951-2014 年泛南海地区年平均 R95p 趋势 (毫米/年) 的空间分布特征。(b) 1951-2014 年泛南海区域平均的 R95p (毫米) 随时间的变化。黑色、红色、蓝色、紫色和绿色实线分别表示年、春季、夏季、秋季和冬季平均的 R95p。(c-d)、(e-f) 和 (g-h) 和 (a-b) 类似, 分别表示 R20 (天)、RX1day (毫米) 和 RX5day (毫米)

Fig. 2 (a) Spatial pattern of trend of annual mean R95p (mm/year) averaged over the SCSSA during 1951-2014. (b) Time series of R95p (mm) averaged over the SCSSA during 1951-2014. Black, red, blue, purple, and green lines depict ANN, MAM, JJA, SON, and DJF, respectively. (c-d), (e-f), and (g-h) are the same as (a-b), but for R20 (days), RX1day (mm), and RX5day (mm), respectively

综上所述, 1951-2014 年泛南海地区年平均和季节平均的四个极端降水指数的空间分布相似, 较大值分布在东南亚、中国东南部以及青藏高原南坡地区。东南亚四个极端降水指数的季节性差异较小, 其他区域极端降水指数在夏季最大, 秋季和春季次之, 冬季最小。泛南海地区 1951-2014 年四个极端降水指数趋势的空间分布不均一, 且大部分区域趋势的变化不显著。对整个区域而言, 年、春季和冬季平均的四个极端降水指数均呈显著增加的趋势, 秋季的增加趋

势不显著。不同指数在夏季的趋势变化存在差异，R95p 和 RX1day 呈显著增加的趋势，而 R20 和 RX5day 趋势变化不显著。

3 泛南海地区极端降水未来时期的时空变化特征

CMIP5 和 CMIP6 气候模式产品是预估未来气候变化的重要手段，但其对区域尺度极端降水的模拟与观测存在偏差（Chen et al. 2017; Zhu et al. 2020; Yang et al. 2021）。为了减小模式的偏差、提供更高水平分辨率的气候数据集，研究者们研发了多种统计和动力降尺度方法。与动力降尺度方法相比，统计降尺度方法需要的计算资源较少，已被广泛地应用于多个研究领域（Wood et al. 2002, 2004; Maurer and Hidalgo 2008; Thrasher et al. 2012; 魏培培等 2019; Xu and Wang 2019; Xu et al. 2023）。美国国家航空航天局利用误差订正-空间降尺度（BCSD）方法，将 CMIP5 气候模式历史时期和未来情景下的日数据进行误差订正并降尺度到 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的水平分辨率，生成了高精度 NEX-GDDP-CMIP5 数据集。与 CMIP5 原始值相比，NEX-GDDP-CMIP5 对区域尺度极端温度和极端降水的模拟与观测更加接近（Bao and Wen 2017; Chen et al. 2017; Xu and Wang 2019）。

BCSD 是基于分位数映射原理发展的统计降尺度方法，它的优势是能够将模式数据的平均值和标准差调整到和观测数据十分接近。例如：Xu and Wang（2019）指出，NEX-GDDP-CMIP5 对中国区域日最高温度的平均值和标准差的模拟与观测基本一致（图 3）。NEX-GDDP-CMIP6 和 NEX-GDDP-CMIP5 的生成原理相似，我们进一步基于 NEX-GDDP-CMIP6 数据集对东南亚的极端降水进行了预估研究。

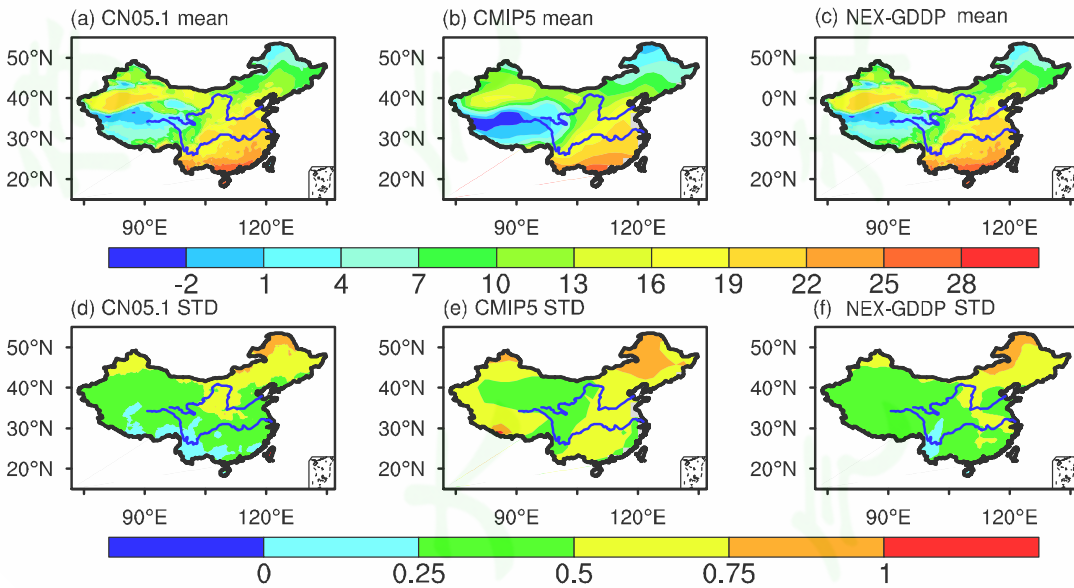


图 3 观测资料（CN05.1，左）、CMIP5 多模式集合（中）和 NEX-GDDP 数据集（右）得到的 1961-2005 年中国区域日最高温度的平均值（mean，°C，上）和标准差（STD，°C，下）。引自 Xu and Wang 2019

Fig. 3 Mean (°C, top) and standard deviation (°C, bottom) of daily maximum temperature during 1961-2005. (a and e) For observations (CN05.1). (b and f) For the raw CMIP5 simulations. (c and g) For the NEX-GDDP dataset (GMFD BCSD). From Xu and Wang 2019

基于 20 个 NEX-GDDP-CMIP6 气候模式在 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下的日降水数据，我们分析了 2015-2100 年泛南海地区 R95p、R20、RX1day 和 RX5day 的时空分布特征（图 4）。与历史时期相似，SSP1-2.6 情景下年平均的四个极端降水指数较大值分布在东南亚、中国东南部以及青藏高原南坡地区（图 3a-3d）。SSP5-8.5 情景下极端降水的空间分布也与历史时期相似（图略），且 SSP5-8.5 情景下极端降水的值大于 SSP1-2.6 情景。全面探索历史时期泛南海

地区极端强降水和持续性强降水的时空变化特征并揭示其中的物理机制,对于该区域未来的防灾减灾和气候预警工作至关重要。除了 R20 以外, R95p、RX1day 和 RX5day 的信噪比在泛南海区域大于 1。信噪比定于为多模式的集合平均值与多模式标准差的比,比值大于 1 表明模式对泛南海地区极端降水的模拟具有较好的一致性。对整个区域而言,2015-2100 年年平均的四个极端降水指数均呈显著增加的趋势,且 SSP5-8.5 情景下的增加趋势大于 SSP1-2.6 情景(图 4e-4h)。因此,泛南海地区极端强降水、持续性强降水以及强降水的发生频次在未来均增加,且温室气体浓度越高,增加趋势越显著。

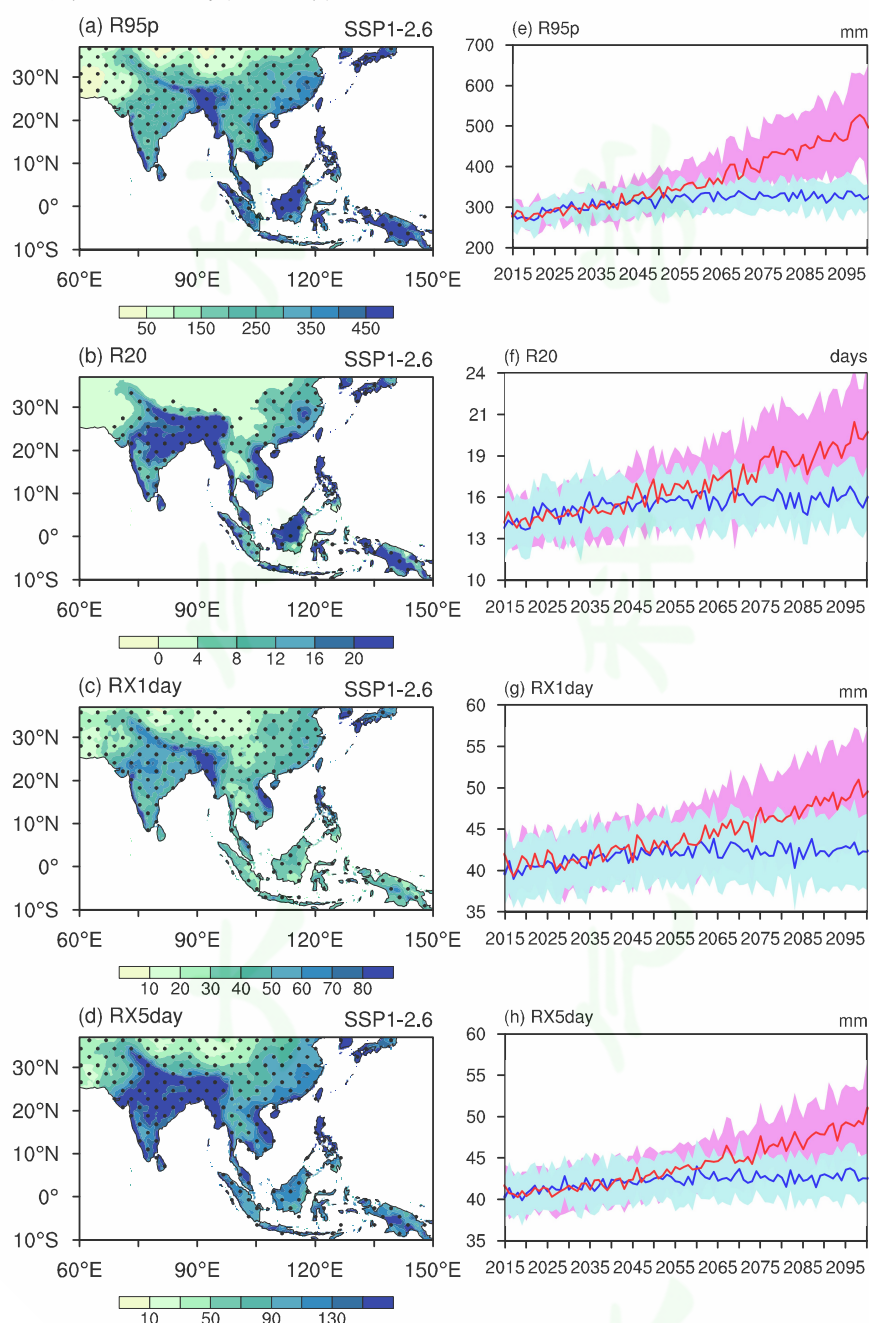


图 4 SSP1-2.6 情景下 2015-2100 年泛南海地区年平均 (a) R95p (毫米)、(b) R20 (天)、(c) RX1day (毫米) 和 (d) RX5day (毫米) 的空间分布。打点区域表示信噪比大于 1。信噪比定义为多模式集合平均与多模式标准差的比值。2015-2100 年泛南海区域年平均 (e) R95p (毫米)、(f) R20 (天)、(g) RX1day (天) 和 (h) RX5day (天) 随时间的变化。蓝线 (红线) 和蓝色 (红色) 阴影分别表示 SSP1-2.6 (SSP5-8.5) 情景下 20 个模式的平均值和标准差

Fig. 4 Spatial patterns of (a) R95p, (b) R20, (c) RX1day, and (d) RX5day during 2015-2100 under the SSP1-2.6 scenario over the SCSSA. The stippling in (a)-(d) denotes that the signal-to-noise ratio is above 1. The signal-to-noise ratio is defined as the ratio of the NEX-GDDP-CMIP6 multi-model ensemble mean to the corresponding inter-model standard deviation. The time series of (e) R95p, (f) R20, (g) RX1day, and (h) RX5day averaged over the SCSSA during 2015-2100 under the SSP1-2.6 (blue lines) and SSP5-8.5 scenarios (red lines) and their uncertainties (shadings)

图 5 给出了 2016-2035 年, 2046-2065 年和 2080-2099 年泛南海四个子区域年平均极端降水指数的百分比变化, 参考时段为 1995-2014。百分比变化定义为研究时段与参考时段的均值之差除以参考时段的均值。在 SSP1-2.6 情景下的未来三个时段 R95p 在四个子区域变化不大, SSP5-8.5 情景下南亚和青藏高原的 R95p 增加, 且随着时间的推移, 增加幅度越大。南亚和青藏高原的 R20 在未来两种情景的三个时段增加, 且 SSP5-8.5 情景下的增加幅度大于 SSP1-2.6 情景。东南亚的 R20 在未来三个时段呈现微弱的增加, 而东亚的 R20 则轻微减小。在 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下, RX1day 和 RX5day 在东南亚和东亚减小, 南亚和青藏高原增加。由此可见, 泛南海地区各个指数的变化具有显著的区域性差异, 但这四个指数均在南亚和青藏高原增加, 在东南亚和东亚减小。大量研究表明, ENSO、局地海温异常、南亚高压的建立时间以及青藏高原热源均能显著影响南亚地区的环流和降水异常 (Mao and Wu 2007; Jiang and Li 2011; Wang and Guo 2012; Yu et al. 2021)。北极海冰、北大西洋海温异常、ENSO 以及海洋性大陆的对流活动等是影响青藏高原降水异常的重要因子 (Yu et al. 2021, 2023)。但南亚和青藏高原的极端降水变化幅度大于东南亚和东亚地区的物理机制仍有待进一步研究。

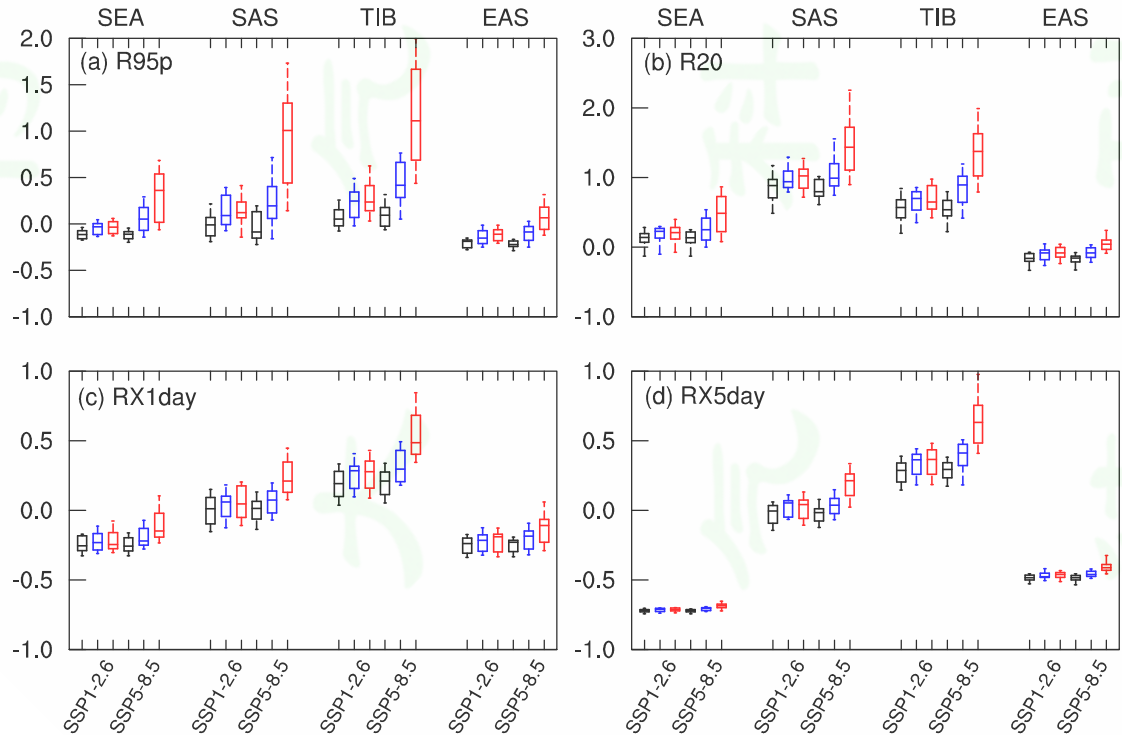


图 5 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下泛南海四个子区域年平均 (a) R95p、(b) R20、(c) RX1day 和 (d) RX5day 的百分比变化。黑色、蓝色和红色盒须图分别表示 2016-2035、2046-2065 年和 2080-2099 年相比于 1995-2014 年的变化。百分比变化定义为研究时段与参考时段的均值之差除以参考时段的均值。盒须图展示的是 20 个模式变化的 10th 分位数、25th 分位数、平均值、75th 分位数和 90th 分位数。

Fig. 5 Box-and-whisker plots of percentage changes in (a) R95p, (b) R20, (c) RX1day, and (d) RX5day during 2016-2035 (black boxes), 2046-2065 (blue boxes), and during 2080-2099 (red boxes) with respective to 1995-2014 under the SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios averaged over the four sub-regions. The box-and-whisker plot shows the 10th, 25th, 50th, 75th, and 90th percentiles of the 20 models from the NEX-GDDP-CMIP6 dataset

综上所述，虽然东南亚是 1951-2014 年年平均的各个极端降水指数的大值区，但该区域四个极端降水指数在未来的变化没有其他区域明显。南亚和青藏高原是未来四个极端降水指数变化的大值区，且 SSP5-8.5 情景下的变化幅度大于 SSP1-2.6 情景。

4 泛南海地区极端降水形成与变化的机理研究

泛南海地区极端降水的变化具有较大的区域性差异，尤其在东南亚区域，该区域降水释放的潜热加热可以调节局地哈德莱环流直接影响我国华南和西南等地区的降水（何金海等 2006; Jiang et al. 2017; Li et al. 2017; 舒建川等 2019）。由于复杂的地形分布、显著的海陆热力差异以及降水的多时空尺度变化特征，模式通常对东南亚地区降水的模拟性能较差（Yang et al. 2019）。深入理解该区域极端降水的变化特征及机理，可为改善模式对该区域降水的模拟能力提供理论支撑，也可为提高我国的短期气候预测水平提供有利的参考依据。

不同区域降水的变化不同，它们的气候效应也存在差别（Chang et al. 2005; Jin et al. 2017; Jiang and Li 2018）。但以往研究大多将东南亚视为整体，研究区域平均降水的气候效应。简单的区域平均可能低估东南亚降水的年际变率信号，进而低估 ENSO 对东亚夏季风的作用（McGregor 1992; Aldrian and Susanto 2003）。主模态的提取不仅可以涵盖东南亚所有区域，还能够弥补以往研究多侧重于区域平均而很少涉及降水空间差异性的不足。东南亚降水的空间分布十分复杂，常用的主分量分析方法（EOF/REOF）提取的主模态解释方差偏低（Aldrian and Susanto 2003; Xu et al. 2019）。最近几十年，K-means、Ward's method 和自组织映射（SOM）等聚类分析方法被广泛地应用于极端天气气候事件的研究领域。SOM 的优势是：当气候系统存在噪音或者分布十分复杂时，该方法仍能够精确客观地提取气候变量的主模态（Bao and Wallace 2015; Li et al. 2015; Guo et al. 2019）。

与所有动态聚类方法类似，SOM 方法需要事先指定分类数目。太多的分类数会导致类别之间的物理差异不够显著，分类数太少又不能够完全体现变量的分布特征。伪发现率（FDR）是常用的确定 SOM 最优分类数的场显著性检验方法（Johnson et al. 2008; Guo et al. 2019）。显著性水平 P 选取为 0.05。当极端降水被分为 K 类时，利用 FDR 方法分别对 $C_K^2 = \frac{K \times (K-1)}{2}$ 组极端降水合成场做显著性检验。其中 K 的取值从 2 开始增加，当 $K=L$ 时，如果出现场显著性检验的 P 值大于 0.05，即表明有 1 对极端降水合成场的差异不显著，由此将 SOM 的最优分类数确定为 $L-1$ 。

表 2 1979-2019 年春季、夏季、秋季和冬季极端降水的 SOM 分型及其频率

Table 2 Spatial patterns of SOM modes for spring, summer, autumn, and winter extreme precipitation over Southeast Asia during 1979-2019 and their frequencies.

春季		夏季		秋季		冬季	
空间分布	频率	空间分布	频率	空间分布	频率	空间分布	频率
北湿南干	38.3%	北湿南干	27.9%	北湿南干	29.7%	/	/
一致偏湿	61.7%	一致偏湿	43.5%	一致偏湿	37.5%	一致偏湿	75.1%
/	/	北干南湿	28.6%	北干南湿	32.8%	北干南湿	24.9%

APHRODITE 数据的时间长度是 1951-2015 年，为了分析最近几十年东南亚极端降水的形成机理，本文利用 CPC-UNI 日降水数据。依据相对阈值方法分别挑选东南亚 1979-2019 年春季、夏季、秋季和冬季的极端降水日。采用 SOM 和 FDR 方法对四个季节极端降水日的降水量进行聚类分析（表 2）。结果表明，东南亚春季极端降水主要分为北湿南干和全区一致偏湿两种空间分布型，这两种空间分布型出现的频率为 38.3%和 61.7%。东南亚夏季极端降水主要呈

现北湿南干（C1）、全区一致偏湿（C2）和北干南湿（C3）的空间分布特征（图 6），且三种主模态的发生频次呈上升的趋势，其中 C2 和 C3 呈显著增加的趋势，但 C1 的上升趋势不显著。值得注意的是，C1 和 C3 型极端降水的空间分布及其对应的大尺度环流特征相反，但两种类型极端降水对应的时间序列相关系数不显著，说明 C1 和 C3 是两种不同类型的极端降水。与夏季极端降水类似，东南亚秋季极端降水主要分为北湿南干、全区一致偏湿和北干南湿三种空间分布型。东南亚冬季一致偏湿和北干南湿分布型发生的频率为 75.1% 和 24.9%。

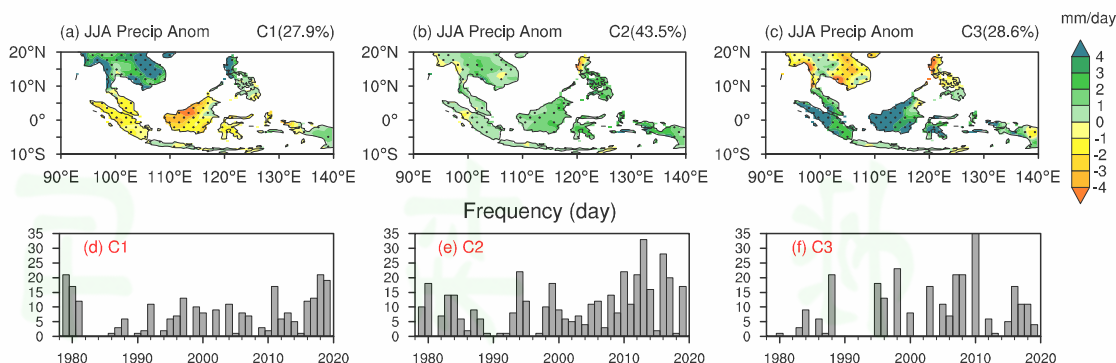


图 6 (a-c) 1979-2019 年东南亚夏季极端降水的空间分布及其 (d-f) 对应的时间序列。引自 Xu et al. 2022

Fig. 6 Spatial patterns of 1×3 SOM nodes (C1_extreme, C2_extreme, and C3_extreme) for summertime extreme precipitation (mm/day) over Southeast Asia (top panels) and their corresponding time series (bottom panels) during 1979-2019. The percentages in the parentheses of top panels represent the frequency of each pattern. Stippling indicates the anomalies that are statistically significant at the 95% confidence level based on the Student's *t*-test. From Xu et al. 2022

利用回归分析、合成分析、偏相关和偏回归等多种统计分析方法，结合多种诊断分析方法，我们进一步分析了 1979-2019 年东南亚夏季不同类型极端降水的大尺度环流特征及机理（图略，详见 Xu et al. 2022）。结果表明，C1 型极端降水主要与印度洋的冷海温异常高度相关。印度洋的冷海温异常能造成东南亚南部低层风场辐散和下沉运动以及北部低层风场辐合和上升运动，进一步导致东南亚极端降水呈现北湿南干的空间分布。C2 型极端降水主要与热带北大西洋暖海温异常紧密相关。春季热带北大西洋的暖海温异常能够持续到夏季，通过 Matsuno-Gill 响应引起热带东北太平洋和中太平洋的北风异常和冷海温异常。冷海温异常进一步通过 Matsuno-Gill 响应造成热带西北太平洋的东风异常和上升运动，导致东南亚极端降水呈现一致偏湿的空间分布型。C3 型极端降水主要由热带太平洋和大西洋的海温异常引起。热带西太平洋、东太平洋和大西洋海温异常的暖-冷-暖空间分布，能够造成东南亚南部低层风场辐合和上升运动，北部低层风场辐散和下沉运动，使得东南亚极端降水呈现北干南湿的空间分布。

此外，我们利用 SOM 方法提取了 1979-2019 年东南亚夏季总降水的主模态（图略），并分析了三种类型极端降水和非极端降水对总降水的贡献（图 7）。结果表明，1979-2019 年东南亚夏季总降水可以分为全区一致偏干、海洋性大陆主体偏干、北湿南干、全区一致偏湿和北干南湿五种空间分布型。第 1-2 类总降水主要由非极端降水决定，第 3-5 类总降水分别由 C1、C2 和 C3 极端降水和非极端降水共同影响。

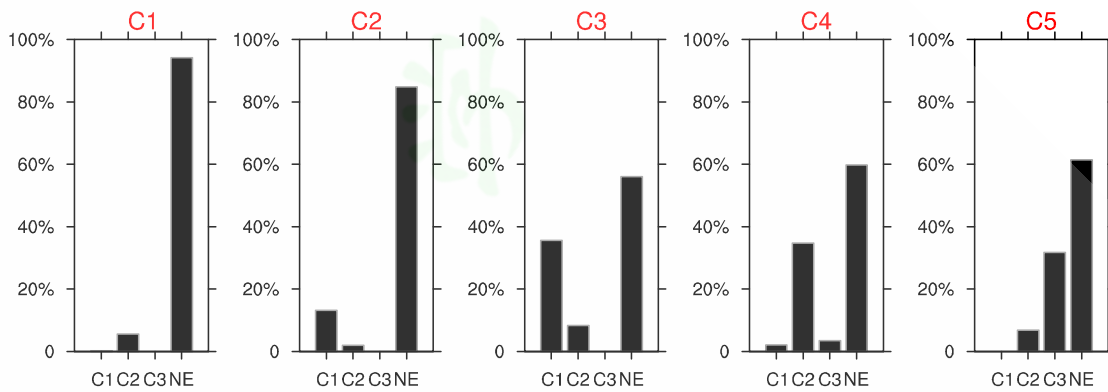


图7 三种类型极端降水和非极端降水对不同类型总降水的贡献。引自 Xu et al. 2022

Fig. 7 Relative contributions of three extreme precipitation patterns (C1_extreme, C2_extreme, and C3_extreme) and nonextreme precipitation (NE) to the various SOM patterns of total precipitation (C1_total, C2_total, C3_total, C4_total, and C5_total). From Xu et al. 2022

5 总结与展望

本文利用观测数据分析了1951-2014年泛南海地区年平均和季节平均的四个极端降水指数（R95p、R20、RX1day和RX5day）的时空变化特征。基于高精度统计降尺度数据（NEX-GDDP-CMIP6），预估了该区域各个极端降水指数在SSP1-2.6和SSP5-8.5情景下2015-2100年的变化特征。为了探讨不同区域极端降水对气候变化的响应程度，我们将泛南海地区分为四个子区域，分析了各个子区域年平均极端降水在2016-2035年、2046-2065年以及2080-2099年相比于1995-2014年的百分比变化。此外，东南亚位于热带西太平洋暖池区，是北半球天气气候变化最敏感的地区之一，同时也是亚洲季风区对流最活跃的地区之一。由于受多种海洋和大气系统的影响，东南亚天气气候复杂多变，极端降水频发。以该区域为例，分析了极端降水的大尺度环流特征及变化机理。本文的主要结论如下：

（1）1951-2014年泛南海地区年平均和季节平均的四个极端降水指数的时空变化特征相似。极端强降水和持续性强降水均分布在东南亚、中国东南部以及青藏高原南坡地区，这些区域同时也是高频强降水发生的地区。东南亚各个极端降水指数的季节性差异较小，其他区域四个极端指数在夏季最大，秋季和春季次之，冬季最小。1951-2014年泛南海地区各个极端降水指数的趋势空间分布不均一，且大部分区域趋势不显著。

（2）和历史时期类似，SSP1-2.6和SSP5-8.5情景下2015-2100年泛南海地区极端降水大值区主要分布在东南亚、中国东南部以及青藏高原南坡地区，且SSP5-8.5情景下极端降水的值大于SSP1-2.6情景。对整个区域而言，2015-2100年该区域四个极端降水指数均呈显著增加的趋势，且SSP5-8.5情景下的趋势比SSP1-2.6情景显著。虽然东南亚是1951-2014年极端降水的大值区，但该区域极端降水在未来三个时段（2016-2035年、2046-2065年和2080-2099年）的变化没有其他区域明显，南亚和青藏高原是泛南海地区未来极端降水变化的大值区。

（3）1979-2019年东南亚夏季极端降水主要分为北湿南干、全区一致偏湿和北干南湿的空间分布型。北湿南干型主要受印度洋冷海温异常控制，全区一致偏湿型与热带北大西洋暖海温异常密切相关，热带太平洋和大西洋海温异常是北干南湿型极端降水的主要影响因子。

利用SOM和FDR方法，本研究提取了东南亚四个季节极端降水空间分布的主模态，但目前仅分析了该区域夏季极端降水主模态的大尺度环流特征及机理，未来需加强其他三个季节极端降水变异机理的研究。例如，春季是季节转换中一个非常重要的季节，春季气候变异过程对夏季气候有着明显的影响（Li et al. 2017; Yang et al. 2019）。在全球变暖背景下，泛南海地区春季气候状况可能呈现新的变化规律，这些变化会加剧我国南方旱涝预测的难度和不确定性，在

今后的工作中需要多关注泛南海地区春季极端降水的变化特征及机理研究。

泛南海不同区域极端降水对气候变暖的响应不同,但本研究仅仅关注了东南亚极端降水的变化机理。未来工作需要加强其他区域极端降水的大尺度环流特征及机理的研究。此外,泛南海地区次季节-季节气候预测不仅对当地人民生活至关重要,也对其周边地区的气候预测有重要影响。研究指出,气候模式对泛南海地区环流和平均降水的次季节-季节变化有一定的预报能力(Zhang et al. 2016),但对该区域极端降水可预测性研究存在不足,亟需开展相关研究。

资助项目: 广东省基础与应用基础研究重大项目(2020B0301030004), 国家自然科学基金项目(42205015 和 42105062)。

参考文献

- [1] Agel L, Barlow M, Feldstein S B, et al. 2018. Identification of large-scale meteorological patterns associated with extreme precipitation in the US northeast[J]. *Climate Dynamics*, 50, 1819-1839.
- [2] Aldrian E, and Susanto R D. 2003. Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature[J]. *International Journal of Climatology*, 23, 1435-1452.
- [3] Bao M, and Wallace J M. 2015. Cluster analysis of northern hemisphere wintertime 500-hPa flow regimes during 1920-2014[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 72, 3597-3608.
- [1] Bao Y, and Wen X Y, 2017. Projection of China's near- and long-term climate in a new high-resolution daily downscaled dataset NEX-GDDP[J]. *Journal of Meteorology Research*, 31, 236-249.
- [4] Chang C P, Wang Z, McBride J, et al. 2005. Annual cycle of Southeast Asia-Maritime Continent rainfall and the asymmetric monsoon transition[J]. *Journal of Climate*, 18, 287-301.
- [5] Chen H P, Sun J Q, and Li H X. 2017. Future changes in precipitation extremes over China using the NEX-GDDP high-resolution daily downscaled data-set[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 10, 403-410.
- [6] Chen Y, and Zhai P M. 2017. Simultaneous modulations of precipitation and temperature extremes in Southern parts of China by the boreal summer intraseasonal oscillation[J]. *Climate Dynamics*, 49, 3363-3381.
- [7] Ding Y H, Li C Y, Liu Y J. 2004. Overview of the South China Sea monsoon experiment[J]. *Advance in Atmosphere Science*, 21, 343-360.
- [8] Dong Z Z, and Wang L. 2022. Quasi-Biweekly Oscillation over the western north Pacific in boreal winter and its Influence on the central north American air temperature [J]. *Journal of Climate*, 35, 1901-1913.
- [9] Dong Z Z, Wang L, Sun Y, et al. 2021. Heatwaves in Southeast Asia and their changes in a warmer world[J]. *Earth's Future*, 9, DOI: 10.1029/2021EF001992.
- [10] Ge F, Zhu S P, Luo H L, et al. 2021. Future changes in precipitation extremes over Southeast Asia: insights from CMIP6 multi-model ensemble[J]. *Environmental Research Letters*, 16, DOI: 10.1088/1748-9326/abd7ad.
- [11] Guo Y Y, Wen Z P, Chen R D, et al. 2019. Effect of boreal spring precipitation anomaly pattern change in the late 1990s over tropical Pacific on the atmospheric teleconnection[J]. *Climate Dynamics*, 52, 401-416.
- [12] He B, and Yang S. 2017. Role of latent heating over the tropical western Pacific in surface temperature change over North America during boreal spring[J]. *Journal of Climate*, 31, 2169-2184.
- [13] 何金海, 温敏, 丁一汇, 等. 2006. 亚澳“大陆桥”对流影响东亚夏季风建立的可能机制[J]. *中国科学(D辑)*, 36, 959-967.
- [14] 江洁, 周天军, 张文霞. 2022. 近 60 年来中国主要流域极端降水演变特征[J]. *大气科学*, 46,

707-724.

- [14] 江志红, 丁裕国和陈威霖. 2007. 21 世纪中国极端降水事件预估[J]. 气候变化研究进展, 3, 202-207.
- [15] Jiang L S, and Li T. 2018. Why rainfall response to El Niño over Maritime Continent is weaker and non-uniform in boreal winter than in boreal summer[J]. *Climate Dynamics*, 51, 1465-1483.
- [16] Jiang X W, and Li J P. 2011. Influence of the annual cycle of sea surface temperature on the monsoon onset[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116, D10105.
- [17] Jiang X W, Shu J C, Wang X, et al. 2017. The roles of convection over the western Maritime Continent and the Philippine Sea in interannual variability of summer rainfall over southwest China[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 18, 2043-2056.
- [18] Jin D C, Guan Z Y, Huo L W, et al. 2017. Possible impacts of spring sea surface temperature anomalies over South Indian Ocean on summer rainfall in Guangdong-Guangxi region of China[J]. *Climate Dynamics*, 49, 3075-3090
- [19] Karl T R, Nicholls N, and Ghazi A. 1999. Clivar/GCOS/WMO Workshop on indices and indicators for climate extremes workshop summary[J]. *Climatic Change*, 42, 3-7.
- [20] Kim I W, Oh J H, Woo S M, et al. 2019. Evaluation of precipitation extremes over the Asian domain: observation and modelling studies[J]. *Climate Dynamics*, 52, 1317-1342.
- [21] Li X, Li C Y, Ling J, et al. 2015. The relationship between contiguous El Nino and La Nina revealed by the self-organizing maps[J]. *Journal of Climate*, 28, 8118-8134.
- [22] Li Z N, Yang S, He B, et al. 2017. Intensified springtime deep convection over the South China Sea and the Philippine Sea dries Southern China[J]. *Scientific Report*, 6, DOI: 10.1038/srep30470.
- [23] Liu B Q, Wu G X, Mao J Y, et al. 2013. Genesis of the south Asian high and its impact on the Asian summer monsoon onset[J]. *Journal of Climate*, 26, 2976-2991.
- [24] Mao J Y, and Wu G X. 2007 Interannual variability in the onset of the summer monsoon over the Eastern Bay of Bengal. *Theoretical and Applied Climatology*, 89, 155-170.
- [25] Maurer E P, and Hidalgo H G. 2008. Utility of daily vs. monthly large-scale climate data: an intercomparison of two statistical downscaling methods[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 12, 551-563.
- [26] McGregor G R. 1992. Temporal and spatial characteristics of coastal rainfall anomalies in Papua New Guinea and their relationship to the southern oscillation[J]. *International Journal of Climatology*, 12, 449-468
- [27] 任福民, 高辉, 刘绿柳, 等. 2014. 极端天气气候事件监测与预测研究进展及其应用综述[J]. *气象*, 40, 860-874.
- [28] Scoccimarro E, Gualdi S, Bellucci A, et al. 2013. Heavy precipitation events in a warmer climate: Results from CMIP5 models[J]. *Journal of Climate*, 26, 7902-7911.
- [29] Sillmann J, Kharin V V, Zhang X, et al. 2013. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118: 1716-1733.
- [30] Song F F, Lu J, Leung L R, et al. 2020. Contrasting phase changes of precipitation annual cycle between land and ocean under global warming[J]. *Geophysical Research Letters*, 47, DOI: 10.1029/2020GL090327.
- [31] 舒建川, 蒋兴文, 黄小梅, 等. 2019. 中国西南夏季降水预测的统计降尺度建模分析[J]. *高原气象*, 38, 349-358.
- [32] 孙颖, 秦大河和周波涛. 2015. 未来气候变化科学研究的主要方向和挑战[J]. *气候变化研究进展*,

11, 324-330

- [33] Setiawan A M, Lee W S, and Rhee J Y. 2017. Spatio-temporal characteristics of Indonesian drought related to El Niño events and its predictability using the multi-model ensemble[J]. *International Journal of Climatology*, 37, 4700-4719.
- [34] Silva N A, and Matthews A J. 2021. Impact of the Madden-Julian Oscillation on extreme precipitation over the western Maritime Continent and Southeast Asia[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147, 3434-3453.
- [35] Sun Y, Zhang X B, Ding Y H, et al. 2021. Understanding human influence on climate change in China[J]. *National Science Review*, 0, DOI: 10.1093/nsr/nwab113.
- [36] Thrasher B, Maurer E P, McKellar C, and Duffy P B. 2012. Technical note: bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3309-3314.
- [37] Utsumi N, and Kim H. 2022. Observed influence of anthropogenic climate change on tropical cyclone heavy rainfall[J]. *Nature Climate Change*, 12, 1-5.
- [38] Villafuerte M Q, and Matsumoto J. 2015. Significant influences of global mean temperature and ENSO on extreme rainfall in Southeast Asia[J]. *Journal of Climate*, 28, 1905-1919.
- [39] Wang Z B, Wu R G, Zhao P M. et al. 2019. Formation of snow cover anomalies over the Tibetan Plateau in cold seasons[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 4873-4890.
- [39] 魏培培, 董广涛, 史军, 和张博文. 2019. 华东地区极端降水动力降尺度模拟及未来预估[J]. *气候与环境研究*, 24, 86-104.
- [40] Wood A W, Leung L R, Sridhar V, and Lettenmaier D P. 2004. Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs[J]. *Climate Change*, 62, 189-216.
- [41] Wood A W, Maurer E P, Kumar A, and Lettenmaier D P, 2002, Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107. DOI: 10.1029/2001JD000659.
- [42] Xu Q, Guan Z Y, Jin D C, et al. 2019: Regional characteristics of interannual variability of summer rainfall in the Maritime Continent and their related anomalous circulation patterns[J]. *Journal of Climate*, 32, 4179-4192.
- [43] Xu L L, and Wang A H, 2019. Application of the bias correction and spatial downscaling algorithm on the temperature extremes from CMIP5 multi-model ensembles in China[J]. *Earth and Space Science*, 6, 2508-2524.
- [43] Xu L L, Wang A H, Yang S, et al. 2021. Hot spots of extreme precipitation change in 1.5 °C and 2.0 °C global warming scenarios[J]. *Weather and Climate Extremes*, 33, 100357.
- [44] Xu L L, Zhang T T, Wang A H, et al. 2022. Variations of summer extreme and total precipitation over Southeast Asia and associated atmospheric and oceanic features[J]. *Journal of Climate*, 35, 2794-2808.
- [45] Xu L L, Zhang T T, Yu W, and Yang S. 2023. Changes in concurrent precipitation and temperature extremes over the Asian monsoon region: observation and projection[J]. *Environmental Research Letter*, 18, 044021.
- [46] 徐影, 周波涛, 吴婕, 等. 2017. 1.5~4.0 °C 升温阈值下亚洲地区气候变化预估[J]. *气候变化研究进展*, 13, 306-315.
- [47] 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 和陈彦山. 2008. 中国年极端降水事件的时空分布特征[J]. *气候与环境研究*. 13, 75-83.
- [47] 杨雯婷, 孙建华, 傅慎明, 和赵黎京. 2022. 1981~2020 年华南地区区域性极端降水事件研究[J]. *大*

气科学, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2211.22056.

- [47] 杨崧, 吴仁广, 简茂球, 等. 2019. 东南亚及周边地区的气候变化[M]//杨崧. 北京: 科学出版社.
- [48] Yang S, Zhang T T, Li Z N, and Dong S R. 2019. Climate variability over the Maritime Continent and its role in global climate variation: A review[J]. *Journal of Meteorological Research*, 33, 993-1015.
- [49] Yang X L, Zhou B T, Xu Y, and Han Z. 2021. CMIP6 evaluation and projection of temperature and precipitation over China[J]. *Advance in Atmosphere Science*, 38, 817-830.
- [50] Yao C, Qian W H, Yang S, et al. 2009. Regional features of precipitation over Asia and summer extreme precipitation over Southeast Asia and their associations with atmospheric-oceanic conditions. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 106, 57-73.
- [51] Yatagai A, Kamiguchi K, Arakawa O, et al. 2012. APHRODITE: Constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 1401-1415.
- [52] 严中伟和杨赤. 2000. 近几十年中国极端气候变化格局[J]. *气候与环境研究*, 5, 267-272.
- [53] Yu W, Liu Y M, Yang X Q, et al. 2021. Impact of North Atlantic SST and Tibetan Plateau forcing on seasonal transition of springtime South Asian monsoon circulation[J]. *Climate Dynamics*, 56, 559-579.
- [54] Yu W, Liu Y, Zhang T, et al. 2023. Potential impact of winter–spring North Atlantic tripole SSTAs on the following autumn–winter El Niño–Southern Oscillation: Bridging role of the Tibetan Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 50, e2022GL100663.
- [55] Zhang L X, Chen Z M, and Zhou T J. 2021. Human influence on the increasing drought risk over Southeast Asian monsoon region[J]. *Geophysical Research Letters*, 48, DOI: 10.1029/2021GL09377
- [56] Zhang T T, Yang S, Jiang X W, et al. 2016. Sub-seasonal prediction of the Maritime Continent rainfall of wet-dry transitional seasons in the NCEP climate forecast version 2. *Atmosphere*, 7, 28.
- [57] Zhou B T, Wang Z Y, Sun B, et al. 2021: Decadal change of heavy snowfall over northern China in the mid-1990s and associated background circulations[J]. *Journal of Climate*, 34, 825- 837.
- [58] Zhu H H, Jiang Z H, Li J, et al. 2020. Does CMIP6 inspire more confidence in simulating climate extremes over China[J]. *Advance in Atmosphere Science*, 37, 1119-1132