

杨雯婷, 傅慎明, 孙建华, 等. 2022. 近 32 年泰国降水的主要变化趋势研究 [J]. 大气科学, 46(2): 263–274. YANG Wenting, FU Shenming, SUN Jianhua, et al. 2022. Study of the Main Trend of Precipitation in Thailand over the Last 32 Years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(2): 263–274. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2107.21001

近 32 年泰国降水的主要变化趋势研究

杨雯婷^{1,2} 傅慎明^{2,3} 孙建华^{1,2} 郑飞^{2,3} 卫捷^{1,2}

1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与风暴实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

摘 要 基于泰国气象局提供的近 32 年 (1981~2012) 站点逐日降水观测资料, 利用线性趋势和集合经验模态分解 (Ensemble empirical mode decomposition, EEMD) 等分析方法, 本文重点研究了泰国及其五个地理分区内各等级降水量与降水日数出现正异常 (第 95 百分位及以上) 的站点比例变化, 并深入分析了泰国逐年降水量与暴雨级别以上持续性和非持续性降水量相对贡献的变化。主要结论如下: (1) 泰国东部和南部地区是其降水最强的区域, 而泰国北部地区降水相对最弱, 在研究的 32 年时段内, 泰国境内有 87% 的站点出现了逐年降水增加的趋势 (共有 22 个站通过了 95% 置信水平的显著性检验), 其中泰国南部是增加最快的区域, 而泰国东部地区则是出现降水增加趋势最少的地区。位于泰国湾沿岸的曼谷站和洛坤站是整个泰国境内逐年降水增加最快的站点。(2) 泰国北部地区的逐年降水量、逐年降水日数与平均降水强度出现正异常的站点比例显著增加, 表明极端降水的影响范围在扩大, 而泰国南部地区仅大暴雨级别以上的极端降水出现了范围扩大的趋势。(3) 暴雨级别以上的降水在泰国不同地区存在着显著差异, 其中泰国北部、东北部和中部地区, 非持续性降水占主导地位, 而在泰国东部和南部地区, 持续性与非持续性降水的贡献相当。暴雨级别以上持续性降水出现正异常的站点比例在泰国北部和南部地区有显著的增加趋势, 表明这些地区受稳定系统影响所发生强降水的范围有着显著的扩大趋势。

关键词 泰国降水 极值 变化趋势

文章编号 1006-9895(2022)02-0263-12

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2107.21001

Study of the Main Trend of Precipitation in Thailand over the Last 32 Years

YANG Wenting^{1,2}, FU Shenming^{2,3}, SUN Jianhua^{1,2}, ZHENG Fei^{2,3}, and WEI Jie^{1,2}

1 Key Laboratory of Cloud–Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract On the basis of 32-year daily precipitation observation data from Thailand’s meteorological department during

收稿日期 2021-01-04; 网络预出版日期 2021-08-27

作者简介 杨雯婷, 女, 1997 年出生, 博士研究生, 主要从事中尺度气象学研究。E-mail: yangwenting@mail.iap.ac.cn

通讯作者 傅慎明, E-mail: fushm@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41861144015、42075002、41775046, 中国科学院前沿科学重点研究计划 ZDBS-LY-DQC010, 国家重点科技基础设施项目“地球系统科学数值模拟设施”

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41861144015, 42075002, 41775046), Key Research Program of Frontier Sciences, Chinese Academy of Sciences (Grant ZDBS-LY-DQC010), National Key Scientific and Technological Infrastructure Project “Earth System Science Numerical Simulator Facility”

1981–2012, using linear trend and EEMD (ensemble empirical mode decomposition), this study focused on the changes in the proportion of stations with abnormally high (95th percentile and above) precipitation and precipitation days in multiple grades in Thailand as a whole and its five geographical regions and further analyzed the annual precipitation and the variation trend of the relative contribution of annual persistent and nonpersistent precipitation to annual precipitation above heavy rain level. The main conclusions are as follows: (1) Annual precipitation is the strongest in eastern and southern Thailand and the weakest in northern Thailand. Additionally, during the 32-year study period, it shows an increasing trend at 87% of the stations (with 22 stations reaching the 90% confidence level), showing the fastest increase in South Thailand and the slowest increase in eastern Thailand. In Thailand, annual precipitation at the Bangkok and Nakhon Si Thammarat stations on the coast of the Gulf of Thailand shows the most significant increasing trend. (2) The proportion of stations with abnormally high annual precipitation, annual precipitation days, and mean precipitation intensity increase significantly in North Thailand, which indicates that the range of extreme precipitation is expanding, while in southern Thailand, only the range of extreme precipitation for precipitation above storm rain level increases significantly. (3) In Thailand, precipitation above heavy rain level varies significantly in different regions. In North, Northeast, and central Thailand, precipitation-heavy is more of a nonpersistent form, while in East and South Thailand, two forms (nonpersistent and persistent) of precipitation are balanced. The proportion of stations with abnormally high persistent precipitation above heavy rain level has a significant expansion trend in North and South Thailand, which indicates that the range of heavy precipitation under the influence of the stable system has a significant expansion trend.

Keywords Thailand precipitation, Extremum, Trend

1 引言

在全球变暖的背景下, 极端天气气候事件频发, 对环境、社会及经济构成了巨大的威胁 (翟盘茂和章国材, 2004; 刘学华等, 2006; IPCC, 2014)。亚洲是气候变化的敏感区 (IPCC, 2014), 由于其地域广大, 不同区域所表现出来的变化特征具有显著的差异。其中, 极端降水事件是东亚地区最重要的气象灾害之一, 其通常定义为日降水量超过某一百分位 (如 90 百分位) 的降水事件 (翟盘茂和潘晓华, 2003; 杨涵洧等, 2020), 已有的研究表明, 它的强度和频次在近几十年内呈现出显著的上升趋势 (Manton et al., 2001; 江志红等, 2009; 李铭宇等, 2020)。东南亚地区相比东亚地区的纬度更低, 具有更充沛的水汽, 且受夏季风的影响更显著, 因此, 其极端降水事件在全球变暖的背景下可能表现出更剧烈的变化, 然而目前的相关研究较少, 未有明确的答案。

泰国地处中南半岛中心地区 (图 1), 面积约为 $5.1 \times 10^5 \text{ km}^2$, 其北部为山地, 南部相对平坦, 且围绕泰国湾, 是东南亚地区的典型代表区域。此外, 作为全世界最重要的稻米产地之一 (Chokngamwong and Chiu, 2008), 泰国对降水的短期气候预测水平较低, 应对暴雨灾害的能力相对较弱 (例如, 2011 年的特大洪水给泰国造成巨大的经济损失),

这将极大地影响亚洲乃至全球的稻米供应, 因此, 开展泰国降水变化的研究是很有必要的, 有助于认识全球变暖背景下东南亚地区极端降水的变化规律。关于泰国基本的降水气候特征, 已有研究指出其气候特点是热带季风气候, 且各个地区季节分明。北部、东北部、中部和东部地区有明显的三季, 包括干季 (11 月至 2 月)、热季 (3~5 月) 和雨季 (6~10 月), 而南部地区只有雨季 (6~12 月) 和热季 (1~5 月) 之分。泰国降水主要受到季风系统的影响。在雨季, 泰国受到西南季风带来的印度洋上水汽的影响, 而在干季, 主要受到东北季风的影响, 这有利于南部东海岸发生强降水。雨季的结束由北向南推进, 与热带辐合带的移动有密切关系 (Chokngamwong and Chiu, 2008)。针对降水变化特征, 部分学者进行了相关研究, 其结果表明, 泰国降水事件的频次在变少, 但强度在增强, 具体表现为全国范围内极端降水事件强度和频次的增加趋势 (Endo et al., 2009; Limjirakan et al., 2010; Limsakul et al., 2010; Limsakul and Singhruck, 2016) 与泰国西部地区极端降水指数的下降趋势 (Sharma and Babel, 2014)。这些研究结果有利于认识全球变暖背景下泰国极端降水的变化特征, 为该区域相关的研究和预测提供了有益的参考。然而, 现有研究中针对极端降水变化趋势的分析仅限于泰国的部分地区, 且对降水极值空间分布的变化趋势未有涉

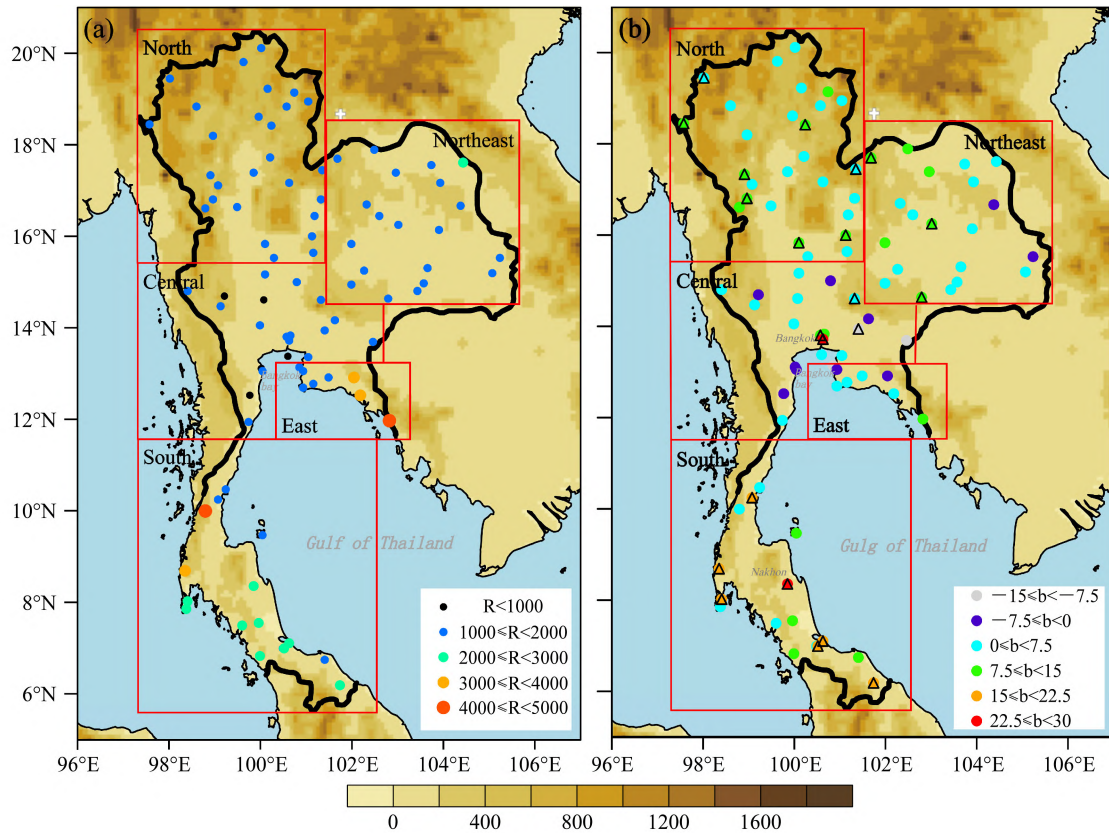


图 1 1981~2012 年泰国 (a) 年均降水量 (R , 单位: mm)、(b) 年降水量线性趋势 (b , 单位: mm/a) 的空间分布。阴影代表地形高度; 红色线框将泰国分为 5 个区域 (北部、东北部、中部、东部和南部)。图 b 中, 三角形代表该站点线性趋势通过 95% 置信水平的显著性 t 检验

Fig. 1 Geographical distributions of (a) the 32-year average and (b) linear trend (b , units: mm/a) of annual precipitation (R , units: mm) in Thailand during 1981–2012. The shadings indicate the terrain (units: m), the red lines divide Thailand into five regions (North, Northeast, Central, East, and South Thailand). In Fig. b, the triangles indicate that the linear trends for stations reach the 95% confidence level using the t test

及。此外, 持续时间也是降水的一个重要指标 (持续性强的降水更容易引发洪涝及其次生灾害), 而对于东南亚/泰国地区强降水持续性特征变化的研究目前较为罕见。综合上述, 本文将针对现有研究的不足, 利用 1981~2012 年共 32 年的降水资料, 重点分析近几十年内泰国降水量、降水日数以及降水持续性等主要特征的变化, 由此深入揭示全球变暖背景下泰国降水特别是极端降水的变化规律, 从而为应对泰国的暴雨灾害及有效地防洪救灾提供科学依据。

2 资料和方法

2.1 资料

本文选用泰国气象局 (Thailand Meteorological Department, TMD) 提供的 120 站逐日降水资料, 其时段为 1981 年 1 月至 2012 年 12 月, 共 32 年。

考虑到数据的缺测会影响最终降水趋势的研究结果 (Karl et al., 1996), 本文剔除了缺测率达到 5% 的站点, 最终选取了 120 个站中的 91 个站点进行研究, 站点的具体分布如图 1a 所示。

2.2 方法

为了研究泰国地区降水主要特征在 32 年内的变化趋势, 本文参考翟盘茂等 (1999) 研究中国降水特征变化的方法, 选取了 10 个相关的降水统计量 (表 1)。在此基础之上, 考虑到持续性暴雨更易于引发洪涝灾害, 本文又加入了描述强降水持续性的 2 个统计量, 包括逐年暴雨级别以上持续降水量和非持续降水量。以上 12 个统计量可以分为五个组: (1) 逐年降水量 (annual precipitation; AP) 和降水日数 (precipitation days; PD); (2) 逐年中雨级别以上 (日降水量 ≥ 10 mm)、暴雨级别以上 (日降水量 ≥ 50 mm)、大暴雨级别以上 (日降

表 1 12 个降水统计量的名称、缩写及算法

Table 1 Names, abbreviations, and calculation algorithms of the 12 precipitation statistics

降水统计量名称	缩写	算法
逐年降水量	AP (Annual precipitation)	站点上有效降水的逐年总和
逐年降水日数	PD (Precipitation days)	站点上有效降水日数的逐年总和
中雨级别以上降水量	AP-moderate	站点上中雨级别以上(10 mm/d以上)降水的逐年总和
中雨级别以上降水日数	PD-moderate	站点上中雨级别以上降水日数的逐年总和
暴雨级别以上降水量	AP-heavy	站点上暴雨级别以上(50 mm/d以上)降水的逐年总和
暴雨级别以上降水日数	PD-heavy	站点上暴雨级别以上降水日数的逐年总和
大暴雨级别以上降水量	AP-storm	站点上大暴雨级别以上(100 mm/d以上)降水的逐年总和
大暴雨级别以上降水日数	PD-storm	站点上大暴雨级别以上降水日数的逐年总和
逐年平均降水强度	MI (Mean intensity)	站点上AP除以PD
逐年最长持续降水日数	AMD (Annual maximum duration)	站点上逐年时段内最长的持续降水维持的日数
逐年暴雨级别以上持续性降水量	APP (Annual persistent precipitation)	站点上暴雨级别以上(50 mm/d以上)持续降水的逐年总和
逐年暴雨级别以上非持续性降水量	ANP (Annual non-persistent precipitation)	站点上暴雨级别以上(50 mm/d以上)非持续降水的逐年总和

水量 ≥ 100 mm)降水量(AP-moderate, AP-heavy, AP-storm)及降水日数(PD-moderate, PD-heavy, PD-storm); (3) 逐年平均降水强度(mean intensity; MI); (4) 逐年最长持续降水日数(annual maximum duration; AMD); (5) 逐年暴雨级别以上持续降水量(annual persistent precipitation; APP)和非持续降水量(annual non-persistent precipitation; ANP)。其中, 逐年暴雨级别以上持续性降水量定义为达到暴雨级别以上的持续性降水(单站2天及以上不中断)造成的降水量。逐年暴雨级别以上非持续性降水量定义为达到暴雨级别以上的非持续性降水(单站未能达到两天及以上不中断)造成的降水量(贺冰蕊和翟盘茂, 2018)。这两个降水量被用于分析持续性和非持续性暴雨级别以上降水量的变化趋势, 及其相对贡献的变化。

本文为了分析表1中各个特征量的变化趋势, 首先在每个测站上建立某个特征量的时间序列。考虑到泰国独特的地理分布和气候特征, 本文按照Chokngamwong and Chiu (2008)的方法将泰国划分为5个区域(图1), 包括北部(27个站)、东北部(20个站)、中部(20个站)、东部(8个站)和南部(16个站)。针对某个具体的特征量, 其极值的选取采用相对阈值的方法。本文将研究时段内泰国整个区域内所有站点该特征量的第95百分位值作为此特征量极值的阈值, 当某个站点该特征量不小于这个阈值时, 则判定为该站点上此特征量出现正异常。某个区域内出现正异常的站点占该区域内所有站点的比例可以用于近似描述正异常的

覆盖范围(即覆盖率), 这是本文主要的研究内容之一。本文采用了线性趋势(黄嘉佑, 1999)和集合经验模态分解(Ensemble empirical mode decomposition, EEMD)(Wu and Huang, 2009)两种方法来综合分析降水各个特征量的变化特征。线性趋势主要通过建立一元回归模型 $y=b_0+bx$ (b 代表线性趋势系数, x 为时间, y 为占比时间序列), 应用最小二乘法计算线性趋势系数, 并采用学生 t 检验进行线性趋势的显著性检验。EEMD主要是通过通过在原始信号序列中加入白噪声序列, 再利用经验模态分解方法(empirical mode decomposition, EMD)(Huang et al., 1998)分离出不同的时间尺度, 对EMD方法做了改进, 避免了模态混叠现象(Wu and Huang, 2009)。

3 结果分析

3.1 年降水量和降水日数

图1为1981~2012年泰国境内91个站点的32年逐年降水量及逐年降水量的线性趋势分布。从年均降水量的空间分布图(图1a)中可以看出, 泰国南部狭长地带与北部地区的年均降水量有明显的差别, 总体而言, 南部马来半岛上的降水较多, 而北部中南半岛上的降水较少。北部、东北部和中部地区年均降水量大多在2000 mm以下。年均降水量相对较多的地区主要是东部地区和泰国南部地区, 其强度可达到2000 mm以上, 有两个站点甚至超过了4000 mm。从逐年降水量的变化趋势(图1b)可以看出, 除中部沿海和东部沿海地区

外，泰国大部分地区的站点表现出年均降水量上升的趋势。其中，北部、东北部和中部地区有部分站点具有显著的上升趋势（增加速率不低于 7.5 mm/a），其在各自地区对应的覆盖率分别为 0.3、0.15 和 0.2，且最快的逐年降水量增加出现在泰国中部的沿海地区（曼谷），其增幅高达 22.7 mm/a。泰国南部地区具有更显著的降水增加趋势，其增幅可达 15 mm/a，且覆盖率达 0.44，且最快的逐年降水量增加出现在泰国南部地区的洛坤，其增幅高达 24.4 mm/a。此外，泰国中部和东部地区还有 10 个站点表现出了较弱的逐年降水量下降的趋势，其主要集中在中南半岛上，尤其是曼谷湾沿岸地区，然而，下降的趋势并未通过显著性检验。

从逐年降水量（AP）出现正异常站点的覆盖率（图 2a）来看，其具有显著的上升趋势（通过 90% 置信水平的显著性 t 检验），其中不低于 0.1 的年份有 3 年，尤其是 2011 年，其占比高达 0.24。而逐年降水日数（PD）出现正异常站点所占的比例变化（图 2b）可以看出，其并未表现出显著的变化趋势。在 1999 年以前，PD 正异常的站点所占

比例较小且变化不大（最多 6 个站点），在 1999 年以后，PD 正异常的情况明显增多，尤其在 1999 年，其覆盖率达到 0.15。

由表 2 可知，泰国整体和北部地区逐年降水量（AP）正异常站点的覆盖率呈现出显著的上升趋势。而其他地区则表现出不显著的变化趋势，以上升趋势为主，仅有中部地区为下降趋势。在逐年降水日数（PD）上，泰国整体和各个区域正异常站点的比例具有上升趋势，但这种趋势仅在东部地区通过了 95% 置信水平的显著性检验。

3.2 分级降水量与降水日数

为了分析各个等级强度降水的变化情况，本文分别计算了中雨级别以上、暴雨级别以上及大暴雨级别以上逐年降水量（AP-moderate、AP-heavy、AP-storm）正异常站点的覆盖率。由表 2 可知，AP-moderate 和 AP-heavy 正异常站点在泰国大部分地区均具有占比增大的趋势，其在泰国整体和北部地区均超过了 90% 置信水平的显著性检验（AP-heavy 超过 95% 置信水平）。而 AP-storm 正异常站点仅在泰国南部地区具有显著（置信水平超过

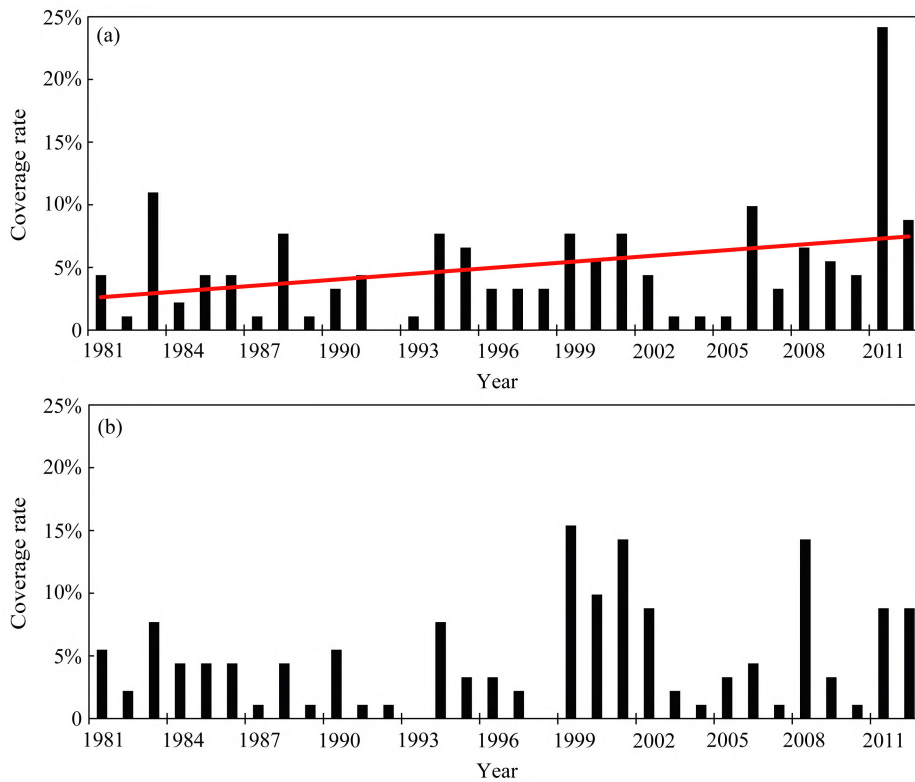


图 2 1981~2012 年整个泰国 (a) 年降水量及 (b) 年降水日数正异常覆盖率的变化。红线是线性趋势线，通过了 90% 置信水平的 t 检验
Fig. 2 Variations in the coverage rate of positive abnormal (a) annual precipitation amount and (b) annual precipitation days in whole Thailand during 1981–2012. The red line indicates the linear trend reaching the 90% confidence level using t test

表 2 1981~2012 年泰国整体及各个区域 12 个降水统计量出现正异常站点覆盖率的线性趋势 (单位: a^{-1})Table 2 Linear trend (units: a^{-1}) of coverage rate of positive abnormal values of the 12 precipitation statistics in whole Thailand and its regions during 1981–2012

	正异常站点覆盖率的线性趋势/ a^{-1}											
	AP	PD	AP-moderate	PD-moderate	AP-heavy	PD-heavy	AP-storm	PD-storm	MI	AMD	APP	ANP
整体	0.16%*	0.1%	0.13%*	0.12%*	0.15%**	0.13%**	0.04%	0.04%	0.09%	0.05%	0.09%	0.06%
北部	0.33%**	0.08%	0.26%*	0.29%**	0.26%**	0.25%**	0.05%	0.07%	0.27%**	-0.07%	0.16%*	0.12%*
东北	0.11%	0.03%	0.07%	-0.01%	0.12%	0.12%	-0.07%	0.06%	0.05%	0.11%	0.08%	0.15%*
中部	-0.01%	0.04%	0.05%	0.01%	0.06%	0.09%	-0.05%	-0.01%	0.01%	0.03%	-0.09%	0.04%
东部	0.09%	0.32%**	0.05%	0.22%*	0	0	0.08%	0.05%	-0.23%	0.22%	-0.09%	-0.08%
南部	0.16%	0.18%	0.15%	0.06%	0.19%	0.05%	0.24%**	0.04%	0.12%	0.14%	0.28%**	-0.06%

注: *表示通过90%置信水平的显著性 t 检验, **表示通过95%置信水平的显著性 t 检验。

95%)的扩张趋势,其他地区没有明显的变化趋势。从 AP-moderate 正异常的站点所占比例变化趋势(表 2)来看,泰国整体和各个区域均具有上升趋势,尤其在整体(0.13%/a)和北部(0.26%/a)地区超过了 90%的置信水平。从 PD-moderate 正异常的覆盖率变化趋势(表 2)来看,除东北地区,泰国整体和各个区域均具有上升趋势,其中整体(0.12%/a)、北部(0.29%/a)和东部(0.22%/a)地区超过了 90%的置信水平。AP-heavy 正异常的扩张情况与以上的类似,而 AP-storm 正异常情况只在南部有显著扩张趋势,说明此地区的极端暴雨影响范围有所扩大。泰国整体的 AP-moderate、AP-heavy、PD-moderate 及 PD-heavy(图 3a、b)正异常的覆盖率变化情况和年降水量的变化情况较一致,具有显著的上升趋势;大暴雨级别以上(图 3c)的变化没有表现出显著的趋势。

为了研究 AP-heavy 正异常站点所占比例变化的主要模态,采用 EEMD 方法对泰国整体 AP-heavy 正异常站点所占比例时间序列进行分解,得到 3 个固有模态函数(Intrinsic mode functions, IMF)和 1 个趋势项(图 4)。IMF 是具有不同振幅和频率的变化序列,是通过在原始信号序列中加入白噪声序列之后,利用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)将信号中不同尺度的波动和趋势逐级分解,从而得到的不同尺度的数据序列,可以反映不同时间尺度的波动特征。从图 4 可以看出,IMF 分量呈现出从高频到低频,围绕 0 值振荡的分布形态。其中,IMF1 分量为最高频分量,方差贡献率为 51%,在所有分量中振幅最大,且在 2009 年以后,有较大波动;IMF2 分量的振荡周期相对变大,方差贡献率为 9%,振幅相对较小,20

世纪 90 年代以前波动较小,90 年代以后波动加剧;IMF3 分量在整个时段呈现出正、负和正的位相分布,方差贡献率为 6%,振幅相对较小;趋势项分量方差贡献率为 32%,这说明 AP-heavy 正异常的情况具有扩张的趋势。此外,前两个 IMF 分量具有不同的波动周期(IMF1、IMF2 分量分别呈现出 2~3 a 和 7~8 a 的周期性特征),但并不显著,表明 AP-heavy 正异常站点所占比例在年际尺度上的周期变化并不明显。总体而言,AP-heavy 正异常站点所占比例的变化主要由第一个高频分量和趋势项分量所决定的。

3.3 降水强度

从平均降水强度(MI)(表 2)来看,只有北部地区 MI 正异常站点所占比例具有显著的扩张趋势,达到 0.27%/a,其他地区的扩张或萎缩趋势并不显著。从泰国整体的 MI 正异常覆盖率的具体变化情况(图 5)来看,1993 年以前,覆盖率具有下降的趋势,1993 年以后,覆盖率逐渐增加,在 2011 年达到 0.14。

3.4 最长持续降水日数

由表 2 的最长持续降水日数(AMD)来看,除北部地区,泰国整体和各个地区 AMD 正异常覆盖率均具有扩张趋势,但并不显著,就泰国整体而言(图 6),其覆盖率在 1999 年以后与以前相比有增加的趋势,说明 1999 年后持续性降水日数极端偏多的情况出现在了更多的站点上。

3.5 暴雨级别以上持续性降水量和非持续性降水量

由表 2 中的暴雨级别以上的持续性降水量(APP)可知,泰国整体、北部、东北部和南部地区正异常站点所占比例具有扩张趋势,但只在北部和南部超过了 90%的置信水平;中部和东部地区

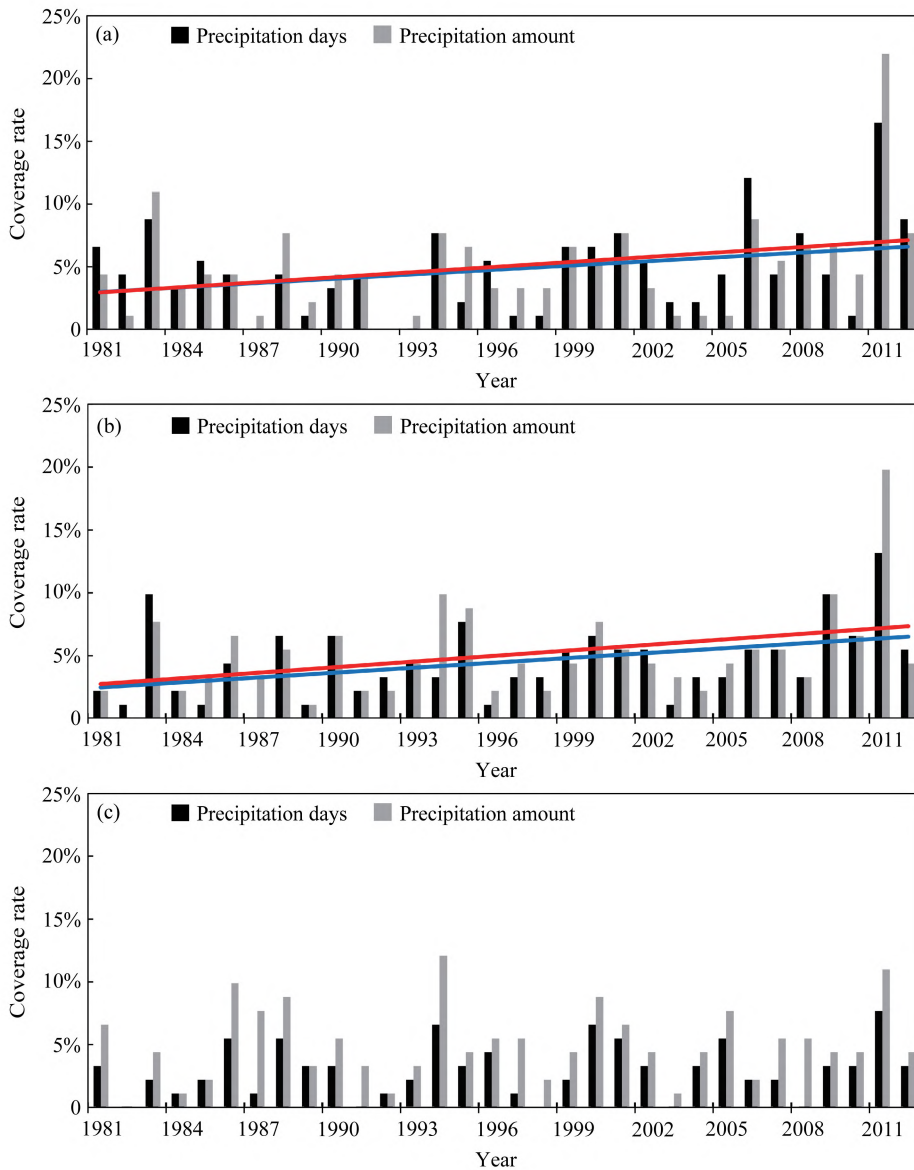


图3 1981~2012年整个泰国 (a) 中雨级别以上、(b) 暴雨级别以上、(c) 大暴雨级别以上降水量 (灰色柱状) 及降水日数 (黑色柱状) 正异常覆盖率的变化。图 a、b 中, 红 (蓝) 线表示降水量 (降水日数) 的线性趋势, 线性趋势通过 90% 置信水平的显著性 t 检验
Fig. 3 Variations in the coverage rate of the positive abnormal annual precipitation amount (gray bars) and precipitation days (black bars) above (a) moderate rain level, (b) heavy rain level, and (c) storm level in whole Thailand during 1981–2012. In Figs. a and b, the blue (red) lines indicate the linear trend of precipitation days (precipitation amount), linear trends reaching the 90% confidence level using t test

的覆盖率具有下降的趋势, 但并不显著。图 7 显示泰国整体 APP 正异常覆盖率在 1999 年以后相比之前有扩张的趋势, 即 APP 的极值出现在更多的站点上。从暴雨级别以上的非持续性降水量 (ANP) 正异常站点的覆盖率来看, 泰国整体、北部、东北部和中部地区均有扩张的趋势, 但只在北部和东北部超过了 90% 的置信水平; 东部和南部的覆盖率有下降的趋势, 但并不显著 (表 2)。ANP 正异常覆盖率在 1999 年以后也有所提高 (图 7)。

本文对不同地区 APP 及 ANP 对暴雨级别以上总降水量 (APP 与 ANP 之和) 的贡献 (图 8 和图 9) 进行分析时, 采用区域平均的方法, 即将各区域相应的所有测站的时间序列进行区域平均作为该区域的时间序列, 利用各区域 APP、ANP 时间序列占区域平均暴雨级别以上总降水量的比例, 分析 APP 和 ANP 相对贡献的演变。从图 8 和图 9 可以看出, 北部、东北部和中部地区 ANP 贡献明显高于 APP 的贡献, 即这三个地区的暴雨级别以上降

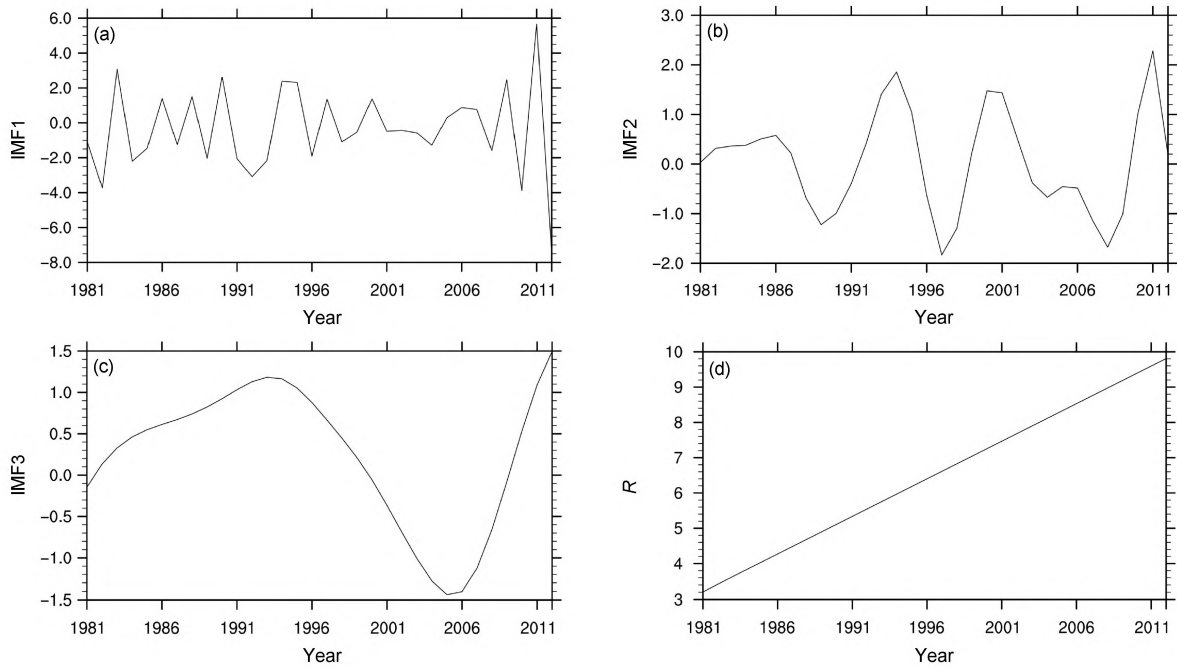


图 4 基于 EEMD (Ensemble empirical mode decomposition) 方法分解 1981~2012 年整个泰国暴雨级别以上降水量 (AP-heavy) 正异常覆盖率时间序列得到的前三个 IMF (Intrinsic mode functions) 分量 (a) IMF1、(b) IMF2、(c) IMF3 及 (d) 趋势项

Fig. 4 The first three IMF (Intrinsic mode functions) components (a) IMF1, (b) IMF2, (c) IMF3, and (d) the trend component of the coverage rate of positive abnormal annual precipitation above heavy rain level in whole Thailand based on EEMD (ensemble empirical mode decomposition) method during 1981–2012

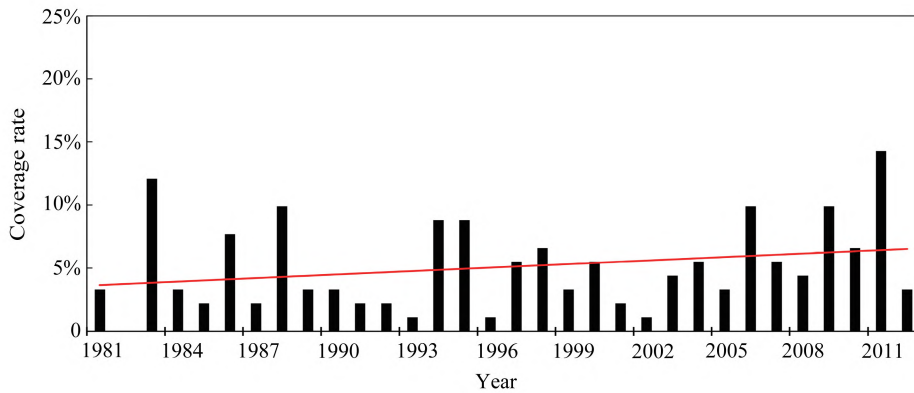


图 5 1981~2012 年整个泰国逐年平均降水强度正异常覆盖率的变化。线性趋势 (红线) 未通过 90% 置信水平的显著性 *t* 检验

Fig. 5 Variations in the coverage rate of positive abnormal mean intensity in whole Thailand during 1981–2012. The linear trend (red line) fails to reach the 90% confidence level using *t* test

水主要是非持续性降水占主导地位, 这表明, 这些地区受稳定系统 (移动性较弱) 影响而发生的暴雨较少, 且北部、东北部和中部地区的持续性降水量贡献依次提高。相比较而言, 南部和东部地区 APP 贡献明显提升, 分别达到 0.46 和 0.44, 这表明由稳定系统所引发降水的贡献十分重要。此外, 北部和南部地区的 APP 贡献有显著上升趋势, 通

过 95% 置信水平的显著性检验 (这表明, 持续性降水变得越来越重要), 而东北部、中部和东部地区上升或下降趋势不显著。总体而言, 泰国北部、东北部和中部地区暴雨级别以上的降水是非持续性降水占主导, 东部和南部地区暴雨级别以上的降水特点是持续性和非持续性降水的贡献相当, 且北部和南部地区 APP 贡献具有显著上升趋势。

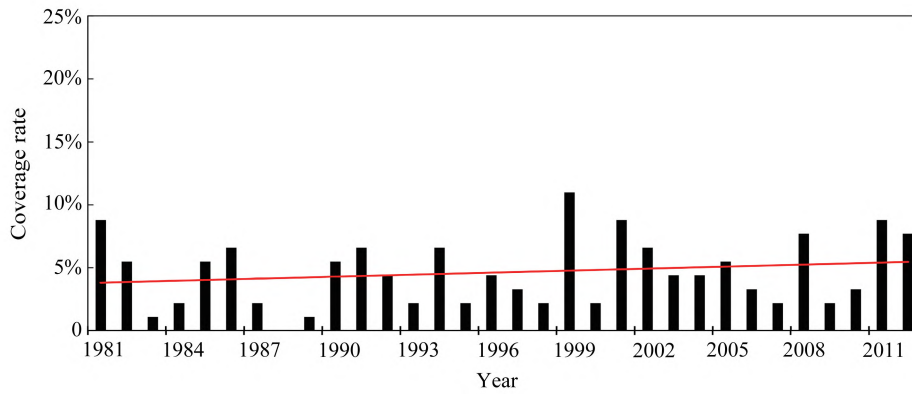


图 6 1981~2012 年整个泰国最长持续降水日数正异常覆盖率的变化。线性趋势（红线）未通过 90% 置信水平的显著性 t 检验
Fig. 6 Variations in the coverage rate of positive abnormal annual maximum duration in whole Thailand during 1981–2012. The linear trend (red line) fails to reach the 90% confidence level using t test

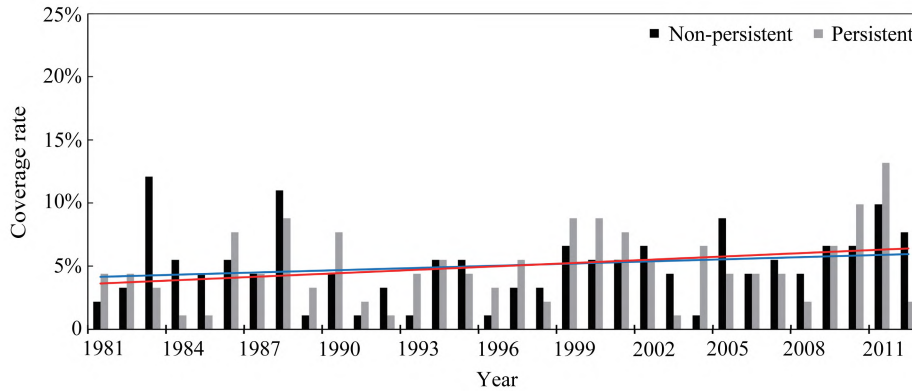


图 7 1981~2012 年整个泰国暴雨级别以上非持续性（黑色柱状）及持续性（灰色柱状）降水量正异常覆盖率的变化。蓝色线表示暴雨级别以上非持续性降水量的线性趋势，红色线表示暴雨级别以上持续性降水量的线性趋势，线性趋势均未通过 90% 置信水平的显著性 t 检验
Fig. 7 Variations in the coverage rate of positive abnormal annual nonpersistent (black bars) and persistent (gray bars) precipitation above heavy rain level in whole Thailand during 1981–2012. The blue (red) line indicates the linear trend of the covering range of positive abnormal annual nonpersistent (persistent) precipitation above heavy rain level. All linear trends fail to reach the 90% confidence level using t test

4 总结与讨论

本文基于泰国气象局提供的 32 年（1981~2012）逐日降水资料，采用 EEMD 及线性趋势等分析方法重点研究了泰国及其五个分区内多个降水特征量出现正异常的站点比例变化。此外，本文还进一步分析了暴雨级别以上持续性和非持续性降水量相对贡献的变化趋势。研究结果表明，从逐年降水量来看，泰国南部狭长地带与北部地区有明显差别，东部和南部地区总体降水较强，而北部地区较弱。其 32 年的变化趋势表明，泰国有 87% 的站点出现了增多的趋势，曼谷和洛坤地区的增大趋势最显著，可达 22.5 mm/a，而除曼谷和洛坤外的泰国湾沿岸地区，未有显著的变化趋势。大部分地区降水的增

多趋势可能与热带气旋、城市化效应及西南季风有关，而曼谷湾沿岸地区可能受到植被覆盖情况的影响，使部分地区降水呈现不显著的减少趋势（Sharma and Babel, 2014）。

从多个等级降水量和降水日数来看，泰国北部地区出现正异常站点的覆盖率都显著增加，这可能与当地中雨级别以上降水量（AP-moderate）的增加有关。此外，南部地区大暴雨级别以上降水量（AP-storm）出现正异常站点的比例显著增加。从平均降水强度（MI）来看，泰国北部地区 MI 正异常的情况有显著的扩张趋势（逐年降水量正异常覆盖率的较强上升趋势与逐年降水日数正异常范围的较弱上升趋势均为有利因子）。这可能会导致泰国北部地区降水愈发集中，更易于引发洪涝及其次生

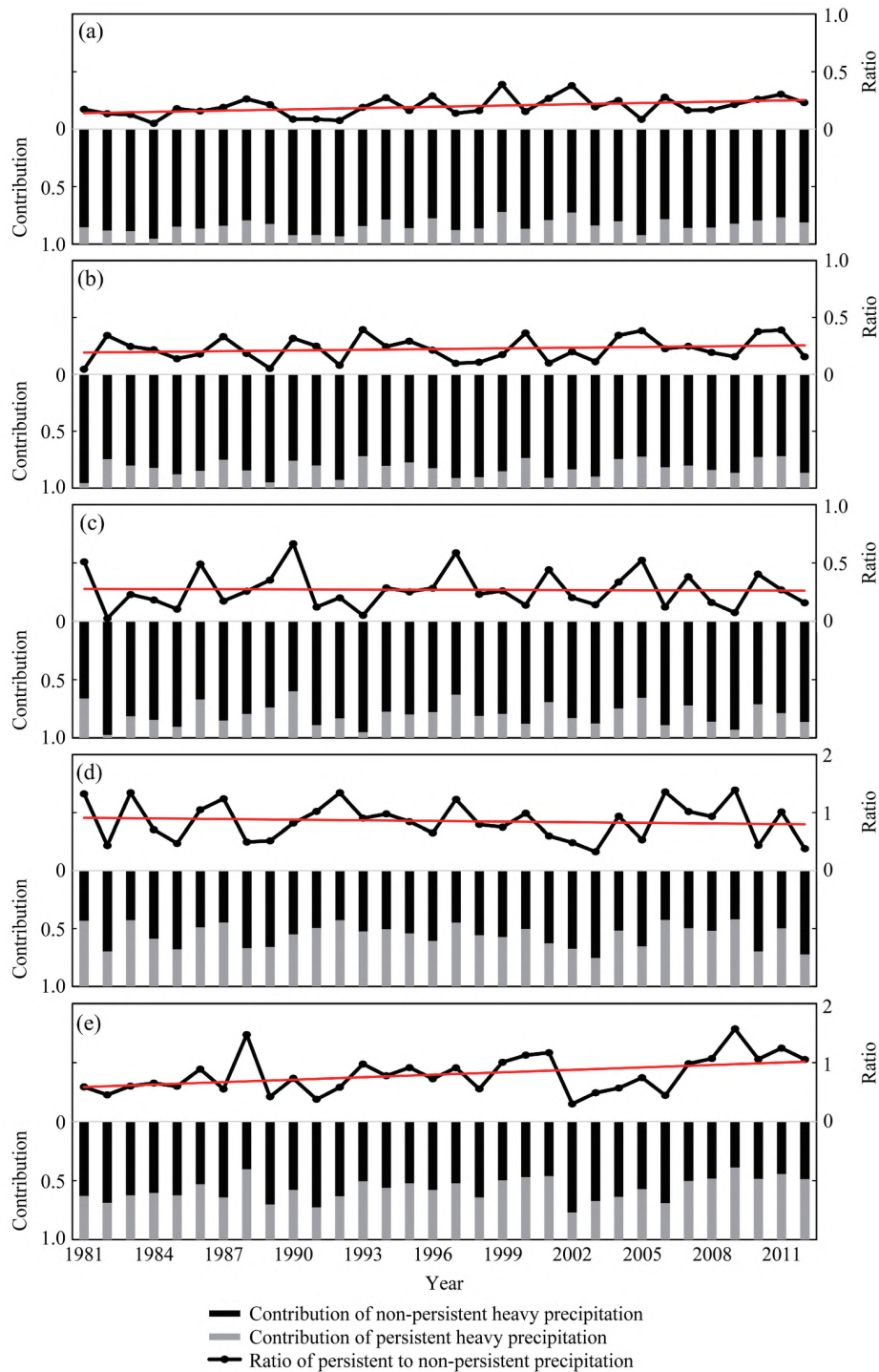


图8 1981~2012年泰国(a)北部、(b)东北部、(c)中部、(d)东部、(e)南部地区暴雨级别以上持续性(黑色柱状)及非持续性(灰色柱状)降水量对暴雨级别以上总降水量的相对贡献(左侧纵坐标)。黑色线和红色线分别代表逐年持续和非持续降水量之比及其线性趋势(右侧纵坐标)

Fig. 8 Relative contributions (left y-axis) of annual persistent (black bars) and nonpersistent (gray bars) precipitation to annual precipitation above heavy rain level in (a) northern, (b) northeastern, (c) central, (d) eastern, and (e) southern Thailand during 1981–2012. The black lines represent the ratio of persistent to nonpersistent precipitation, the red lines indicate linear trends, corresponding to the right y-axis

灾害(翟盘茂等, 1999)。相比之下, 东部地区MI正异常站点的比例有明显的下降趋势。

泰国暴雨级别以上降水在不同地区存在显著的差异, 在泰国北部、东北部和中部地区主要是非持

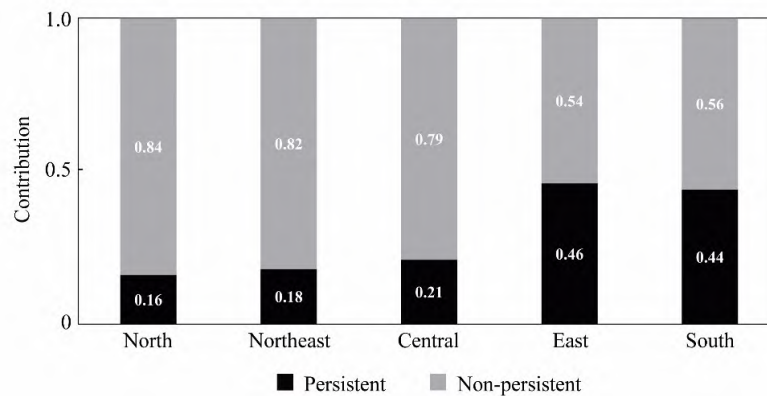


图 9 1981~2012 年泰国各个地区暴雨级别以上持续性和非持续性降水量对总暴雨级别以上降水量的相对贡献
Fig. 9 Relative contributions of annual persistent and nonpersistent precipitation to annual precipitation above heavy rain level in different regions of Thailand during 1981–2012

持续性降水，而泰国东部和南部地区则是持续性和非持续性降水量相当。这可能与引发降水系统的性质有关，持续性降水占主导的地区可能受稳定系统（降水的环流形势较稳定）影响的比例更高，而非持续性降水占主导的地区可能受稳定系统影响的比例较少。暴雨级别以上持续性降水量（APP）极端偏多的情况在泰国北部和南部地区有显著扩张的趋势，暴雨级别以上非持续性降水量（ANP）极端偏多范围在泰国北部和东北部地区也有显著扩张的趋势。这与平均降水强度在泰国南部与东北地区的表现有所不同。

在认识泰国各个地区总体降水变化趋势的基础上，本文发现曼谷与洛坤的年降水和变化趋势与泰国其他地区有明显差异，这可能是由于曼谷与洛坤地势独特，经济发达且城市化影响显著（蒙伟光等，2012；韩瑞丹等，2017；Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (ESCAP), 2020）。对此开展进一步的研究，用于解释此处与众不同的降水变化特征具有重要的科学意义。此外，降水极值和持续时间变化可能是大尺度环流变化和气候变化（温度与水汽变化等）综合影响的结果（Trenberth, 1998；Dai, 2013；贺冰蕊和翟盘茂，2018）。泰国地区极端降水和持续性的变化是否与这些因子有关，如何受之影响，还需进一步的深入研究。

参考文献 (References)

Chokngamwong R, Chiu L S. 2008. Thailand daily rainfall and comparison with TRMM products [J]. *J. Hydrometeorol.*, 9(2):

256–266. doi:10.1175/2007JHM876.1
Dai A G. 2013. Increasing drought under global warming in observations and models [J]. *Nature Climate Change*, 3(1): 52–58. doi:10.1038/nclimate1633
Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (ESCAP). 2020. Nakhon Si Thammarat, Thailand [EB/OL]. <https://www.unescap.org/sites/default/files/Closing%20the%20Loop%20-%20Nakhon%20Si%20Thammarat%20City%20Profile.pdf>. [2022-01-12]
Endo N, Matsumoto J, Lwin T. 2009. Trends in precipitation extremes over Southeast Asia [J]. *Sola*, 5: 168–171. doi:10.2151/sola.2009-043
韩瑞丹, 张黎, 郑艺, 等. 2017. 曼谷城市扩张生态环境效应 [J]. *生态学报*, 37(19): 6322–6334. Han Ruidan, Zhang Li, Zheng Yi, et al. 2017. Urban expansion and its ecological environmental effects in Bangkok, Thailand [J]. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese), 37(19): 6322–6334. doi:10.5846/stxb201607191470
贺冰蕊, 翟盘茂. 2018. 中国 1961~2016 年夏季持续和非持续性极端降水的变化特征 [J]. *气候变化研究进展*, 14(5): 437–444. He Bingrui, Zhai Panmao. 2018. Characteristics of the persistent and non-persistent extreme precipitation in China from 1961 to 2016 [J]. *Climate Change Research* (in Chinese), 14(5): 437–444. doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2018.016
黄嘉佑. 1999. 气象统计分析与预报方法 [M]. 北京: 气象出版社. Huang Jiayou. 1999. *Statistic Analysis and Forecast Methods in Meteorology* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454(1971): 903–995. doi:10.1098/rspa.1998.0193
IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Summaries, Frequently Asked Questions, and Cross-Chapter Boxes. A Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Field C B, Barros V R, Dokken D J, et al. Eds. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 190 pp.

- 江志红, 陈威霖, 宋洁, 等. 2009. 7 个 IPCC AR4 模式对中国地区极端降水指数模拟能力的评估及其未来情景预估 [J]. *大气科学*, 33(1): 109–120. Jiang Zhihong, Chen Weilin, Song Jie, et al. 2009. Projection and evaluation of the precipitation extremes indices over China based on seven IPCC AR4 coupled climate models [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33(1): 109–120. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.01.10
- Karl T R, Knight R W, Easterling D R, et al. 1996. Indices of climate change for the united states [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77(2): 279–292. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0279:IOCCFT>2.0.CO;2
- 李铭宇, 韩婷婷, 郝鑫. 2020. 欧亚大陆极端降水事件的区域变化特征 [J]. *大气科学学报*, 43(4): 687–698. Li Mingyu, Han Tingting, Hao Xin. 2020. Regional characteristics of extreme precipitation events in Eurasia [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 43(4): 687–698. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191202001
- Limjirakan S, Limsakul A, Sriburi T. 2010. Trends in temperature and rainfall extremes changes in Bangkok metropolitan area [J]. *J. Environ. Res.*, 32(1): 31–48.
- Limsakul A, Singhruck P. 2016. Long-term trends and variability of total and extreme precipitation in Thailand [J]. *Atmospheric Research*, 169: 301–317. doi:10.1016/j.atmosres.2015.10.015
- Limsakul A, Limjirakan S, Sriburi T. 2010. Observed changes in daily rainfall extreme along Thailand's coastal zones [J]. *J. Environ. Res.*, 32(1): 49–68.
- 刘学华, 季致建, 吴洪宝, 等. 2006. 中国近 40 年极端气温和降水的分布特征及年代际差异 [J]. *热带气象学报*, 22(6): 618–624. Liu Xuehua, Ji Zhijian, Wu Hongbao, et al. 2006. Distributing characteristics and interdecadal difference of daily temperature and precipitation extremes in China for latest 40 years [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 22(6): 618–624. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2006.06.015
- Manton M J, Della-Marta P M, Haylock M R, et al. 2001. Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961–1998 [J]. *International Journal of Climatology*, 21(3): 269–284. doi:10.1002/joc.610
- 蒙伟光, 李昊睿, 张艳霞, 等. 2012. 珠三角城市环境对对流降水影响的模拟研究 [J]. *大气科学*, 36(5): 1063–1076. Meng Weiguang, Li Haorui, Zhang Yanxia, et al. 2012. A modeling study of the impacts of Pearl River Delta urban environment on convective precipitation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36(5): 1063–1076. doi:10.3878/j.issn.1006-9895
- Sharma D, Babel M S. 2014. Trends in extreme rainfall and temperature indices in the western Thailand [J]. *International Journal of Climatology*, 34(7): 2393–2407. doi:10.1002/joc.3846
- Trenberth K E. 1998. Atmospheric moisture residence times and cycling: Implications for rainfall rates and climate change [J]. *Climatic Change*, 39(4): 667–694. doi:10.1023/A:1005319109110
- Wu Z H, Huang N E. 2009. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method [J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 1(1): 1–41. doi:10.1142/S1793536909000047
- 杨涵涌, 龚志强, 王晓娟, 等. 2020. 中国东部夏季极端降水年代际变化特征及成因分析 [J]. *大气科学*, 45(3): 683–696. Yang Hanwei, Gong Zhiqiang, Wang Xiaojuan, et al. 2020. Analysis of the characteristics and causes of interdecadal changes in the summer extreme precipitation over eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 45(3): 683–696. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.19247
- 翟盘茂, 潘晓华. 2003. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化 [J]. *地理学报*, 58(S1): 1–10. Zhai Panmao, Pan Xiaohua. 2003. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 58(S1): 1–10. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2003.z1.001
- 翟盘茂, 章国材. 2004. 气候变化与气象灾害 [J]. *科技导报* (7): 11–14. Zhai Panmao, Zhang Guocai. 2004. Climate change and meteorological disasters [J]. *Science & Technology Review* (in Chinese)(7): 11–14. doi:10.3321/j.issn:1000-7857.2004.07.004
- 翟盘茂, 任福民, 张强. 1999. 中国降水极值变化趋势检测 [J]. *气象学报*, 57(2): 208–216. Zhai Panmao, Ren Fumin, Zhang Qiang. 1999. Detection of trends in China's precipitation extremes [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 57(2): 208–216. doi:10.11676/qxxb1999.019