

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 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% 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% 的信度检验), 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以上的极端降水出现了范围扩大的趋势。(3) 暴雨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

中图分类号

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

收稿日期 2021-01-04; 网络预出版日期

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。Email: yangwenting@mail.iap.ac.cn

通信作者 傅慎明, E-mail: fusm@mail.iap.ac.cn

资助项目 本研究受到国家自然科学基金项目 (41861144015 和 41775046) 及国家重点研发项目 (2018YFC0809400) 资助。

Funded by the National Natural Science Foundation of China (grant numbers 41861144015 and 41775046) and the National Key R&D Program of China (grant number 2018YFC0809400).

Study on main trend of precipitation in Thailand in recent 32 years

Yang Wen-Ting^{1,2}, Fu Shen-Ming^{2,3}, Sun Jian-Hua^{1,2}, Zheng Fei^{2,3}, 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 Based on 32-yr daily precipitation observation data from Thailand's meteorological department during 1981-2012, by using linear trend and ensemble empirical mode decomposition (EEMD), this study focused on the changes in the proportion of stations with abnormally high (95 percentiles and above) of 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 relative contribution of annual persistent and non-persistent precipitation-heavy to annual precipitation-heavy. The main conclusions are as follows: 1) Annual precipitation is strongest in East and South Thailand, while weakest in North Thailand. And during the study period of 32 years, it shows an increasing trend on 87% of stations (with 22 stations reach the significance level of 90% T test), showing the fastest increase in South Thailand and the least increase in East Thailand. In Thailand, annual precipitation in Bangkok station and Nakhon Si Thammarat station on the Coast of the Gulf of Thailand shows the most significant increasing trend. 2) The proportion of stations with abnormally high of annual precipitation, annual precipitation days and mean precipitation intensity increase significantly in North Thailand, which indicates the range of extreme precipitation is expanding, while in South Thailand, only the range of extreme precipitation for precipitation-storm increases significantly. 3) In Thailand, precipitation-heavy varies significantly in different regions. In North, Northeast and Central Thailand, precipitation-heavy is more of non-persistent form, while in East and South Thailand, two forms (non-persistent and persistent) of precipitation are balanced. The proportion of stations with abnormally high of persistent precipitation-heavy 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.

Key words 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; 刘兴华等, 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-2 月)、热季(3 月-5 月)和雨季(6 月-10 月), 而南部地区只有雨季(6 月-12 月)和热季(1 月-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的水汽的影响, 而在干季, 主要受到东北季风的影响, 但这有利于南部的东海岸发生强降水。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 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-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，本文参考翟盘茂和任福民 (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，如下：(1) 逐年降水量 (annual precipitation; AP) 和降水日数 (precipitation days; PD)；(2) 逐年中雨以上 (日降水量超过 10mm)、暴雨以上 (日降水量超过 50mm 以上)、大暴雨以上 (日降水量超过 100mm) 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，逐年暴雨以上持续性降水量定义为达到暴雨以上的持续性降水（单站 2 天及以上不中断）造成的降水量。逐年暴雨以上非持续性降水量定义为达到暴雨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, 2011）两种方法来综合分析降水各个特征量的变化特征。具体的，线性趋势主要通过建立一元回归模型 $y = b_0 + bx$ （其中， 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 student 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, 2011）。

表 1 12 个降水统计量的名称、缩写及算法

Table.1 Abbreviations and calculation algorithms of 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

逐年降水日数	PD (Precipitation days)	总和 站点上有效降水日数的逐年总和
中雨以上降水量	AP-moderate	站点上中雨以上 (10 mm/d 以上) 降水的逐年总和
中雨以上降水日数	PD-moderate	站点上中雨以上降水日数的逐年总和
暴雨以上降水量	AP-heavy	站点上暴雨以上 (50 mm/d 以上) 降水的逐年总和
暴雨以上降水日数	PD-heavy	站点上暴雨以上降水日数的逐年总和
大暴雨以上降水量	AP-storm	站点上大暴雨以上 (100 mm/d 以上) 降水的逐年总和
大暴雨以上降水日数	PD-storm	站点上大暴雨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
逐年暴雨以上持续性降水量	APP (Annual persistent precipitation)	站点上暴雨以上 (50 mm/d 以上) 持续降水的逐年总和
逐年暴雨以上非持续性降水量	ANP (Annual non-persistent precipitation)	站点上暴雨以上 (50 mm/d 以上) 非持续降水的逐年总和

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 2000mm 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 7.5mm/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 22.7mm/a 。泰国南部地区具有更显著的降水增加趋势，其增幅可达 15mm/a ，且覆盖率高达 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 24.4mm/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信度检验。

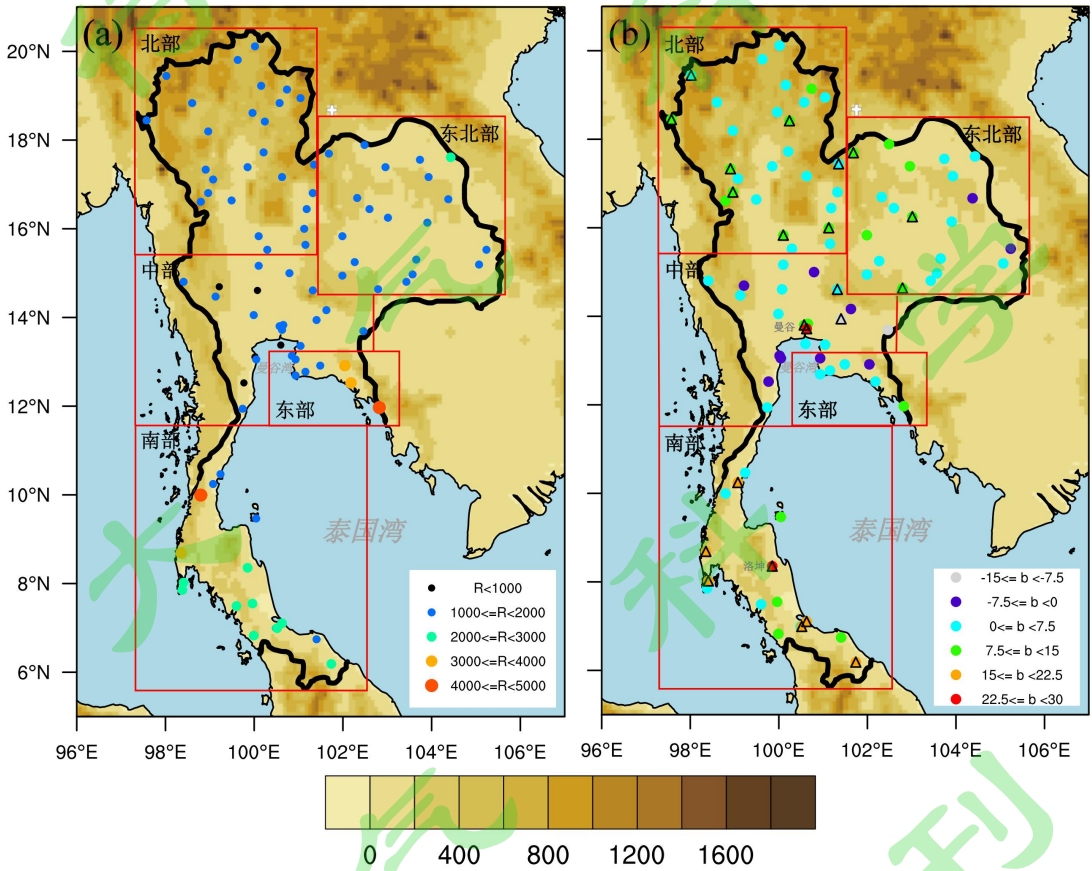


图 1 泰国 (a) 32 年年均降水量及 (b) 年降水量线性趋势的空间分布 (阴影代表地形高度; 三角形代表线性趋势通过信度水平 95% 的 t 检验; 红色线将泰国框分为 5 个区域, 包括北部、东北部、中部、东部和南部。)

Fig.1 Geographical distributions of (a) the 32-yr average and (b) temporal linear trend of yearly precipitation in Thailand. The shaded indicates the terrain characteristics (m). Triangle indicates the linear trend reaches the significance level of 95% T test. The red line divides Thailand into five regions (North, Northeast, Central, East, and South Thailand).

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 t 检验 90%信度检验），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。而从泰国（1981-2012）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，泰国 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%的信度检验。

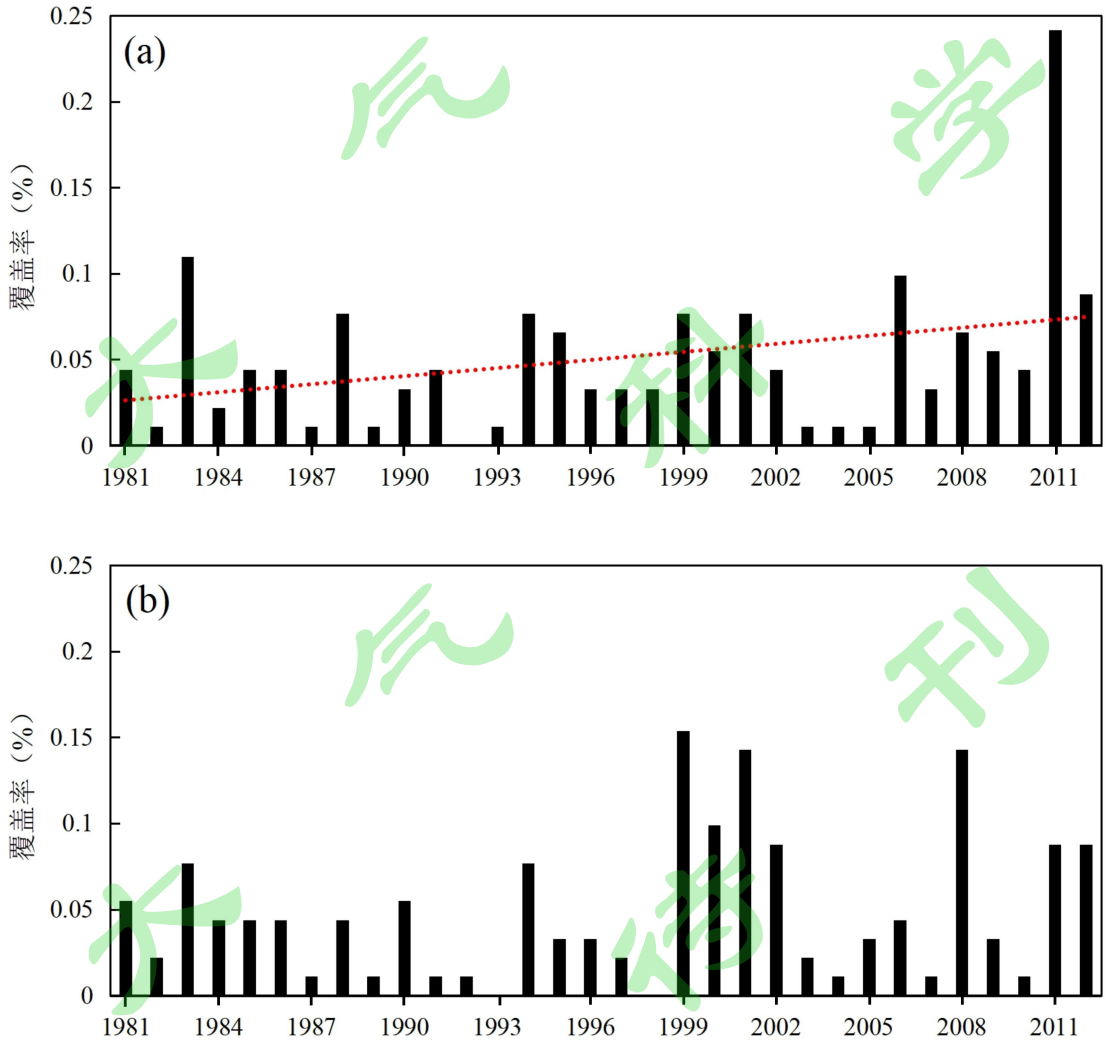


图 2 1981-2012 年整个泰国 (a) 年降水量及 (b) 年降水日数的正异常覆盖率的变化（红色点线是线性趋势线，通过了信度水平 90%的 t 检验）

Fig.2 Variation in covering range of abnormally high of (a) yearly precipitation amount and (b) precipitation days in Thailand as a whole during 1981-2012. Red dotted line indicates linear trend (it reaches the significance level of 90% *t* test).

表 2 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：1%/a；*表示通过信度水平 90%的 *t* 检验，**表示通过信度水平 95%的 *t* 检验。）

Table.2 The linear trend (units: 1%/a) of covering range of abnormally high of 12 precipitation statistics in the whole Thailand and various regions. * indicates reaching the significance level of 90% T test. ** indicates reaching the significance level of 95% T test.

降水统计量	整体	北部	东北	中部	东部	南部
AP	0.16*	0.33**	0.11	-0.01	0.09	0.16
PD	0.1	0.08	0.03	0.04	0.32**	0.18
AP-moderate	0.13*	0.26*	0.07	0.05	0.05	0.15
PD-moderate	0.12*	0.29**	-0.01	0.01	0.22*	0.06
AP-heavy	0.15**	0.26**	0.12	0.06	0	0.19
PD-heavy	0.13**	0.25**	0.12	0.09	0	-0.05
AP-storm	0.04	0.05	-0.07	-0.05	0.08	0.24**
PD-storm	0.04	0.07	0.06	-0.01	0.05	0.04
MI	0.09	0.27**	0.05	0.01	-0.23	0.12
AMD	0.05	-0.07	0.11	0.03	0.22	0.14
APP	0.09	0.16*	0.08	-0.09	-0.09	0.28**
ANP	0.06	0.12*	0.15*	0.04	-0.08	-0.06

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、暴雨及大暴雨以上逐年降水量（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%的信度检验（AP-heavy 信度超过 95%）。而 AP-storm 正异常站点仅在泰国南部地区具有显著（信度超过 95%）的扩张趋势，其它地区没有明显的变化趋势。从泰国 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%的信度。从泰国

PD-moderate 正异常的覆盖率变化趋势来看（表 2），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%的信度检验。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，具有显著上升趋势；大暴雨以上（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了分解，得到 3 个固有模态函数（Intrinsic mode functions, IMFS）和 1 个趋势项（图 4）。IMFS 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，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（IMF1-2 分量分别呈现出 2~3a 和 7~8a 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。

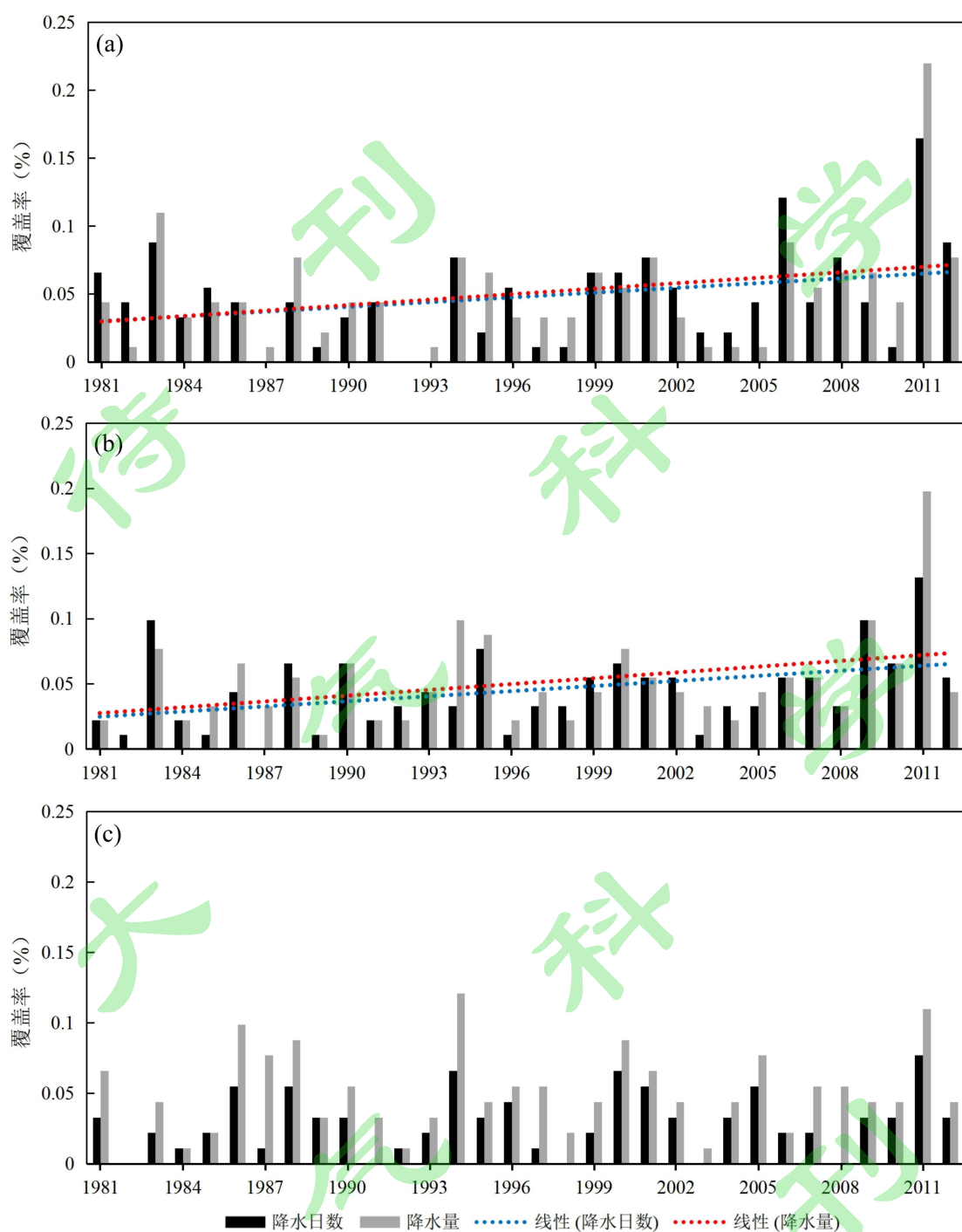


图 3 1981-2012 年整个泰国 (a) 中雨以上、(b) 暴雨以上及 (c) 大暴雨以上降水量 (灰色柱状) 及降水日数 (黑色柱状) 正异常覆盖率的变化及其通过信度水平 90% 的 t 检验的线性趋势线 (降水量的线性趋势: 红色点线; 降水日数的线性趋势: 蓝色点线)

Fig.3 Variation in covering range of abnormally high and linear trend (it reaches the significance level of 90% T test) of annual precipitation amount (black column) and precipitation days (gray column) for three levels ((a) moderate, (b) heavy, and (c) storm) in Thailand as a whole during 1981-2012. The blue (red) dotted line indicates linear trend of precipitation days (precipitation amount).

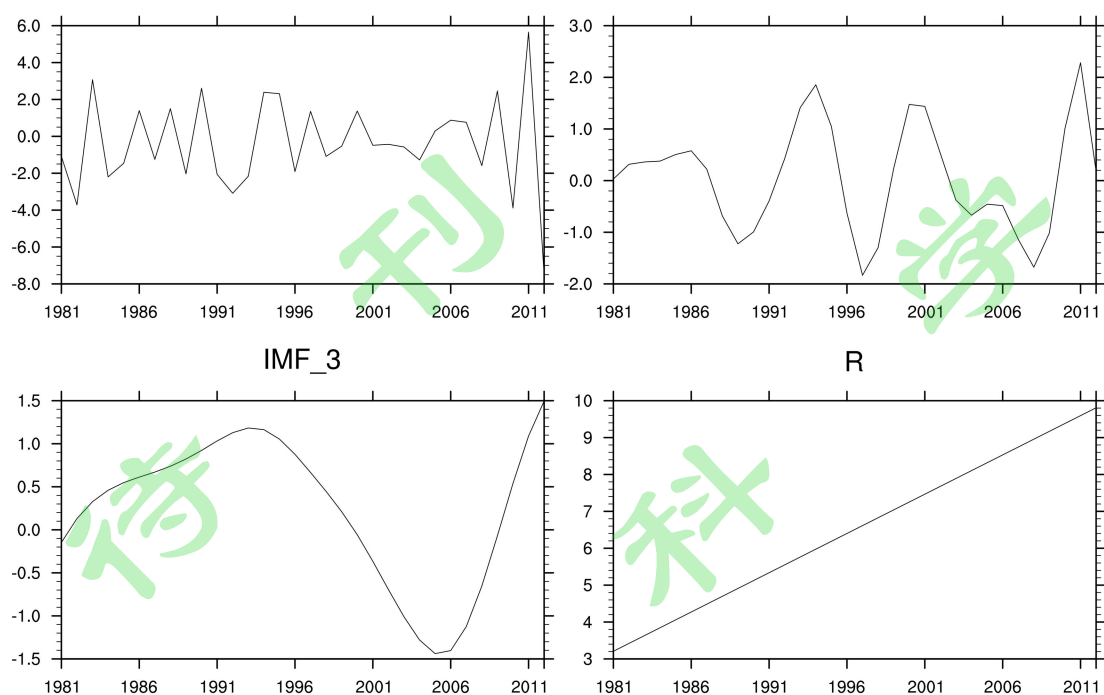


图 4 基于 EEMD 分解整个泰国暴雨以上降水量正异常覆盖率时间序列得到的前三个 IMFS 分量及趋势项

Fig.4 The first three IMFs and trend component of covering range of abnormally high of AP-heavy in Thailand as a whole based on ensemble empirical mode decomposition (EEMD) method.

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。

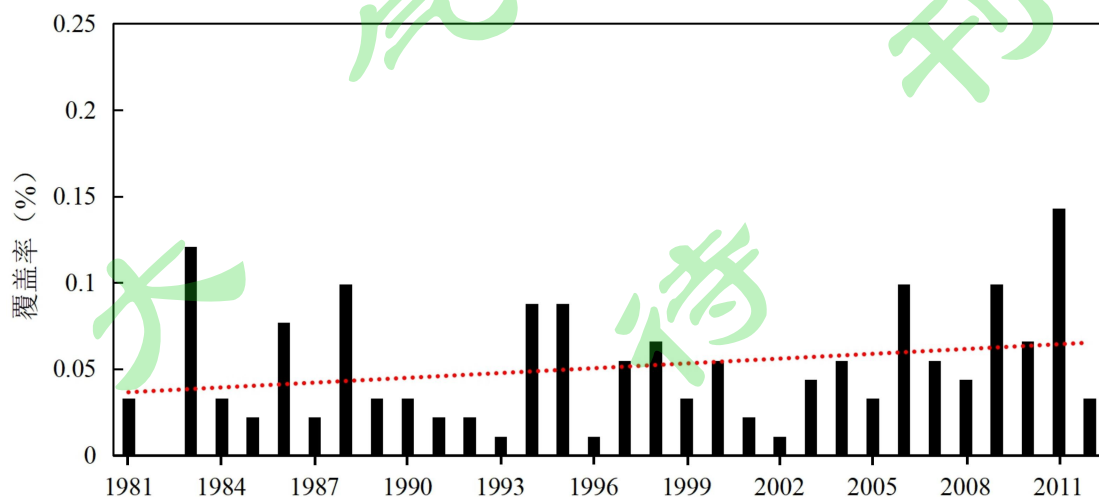


图 5 1981-2012 年整个泰国逐年平均降水强度正异常覆盖率的变化（线性趋势：红色点线，未通过信度水平 90%的 t 检验）

Fig.5 Variation in covering range of abnormally high of mean intensity in Thailand as a whole during 1981-2012. A linear trend (red dotted line) fails to reach the significance level of 90% T test.

3.4 最长持续降水日数

由表 2，从最长持续降水日数（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，其中，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。

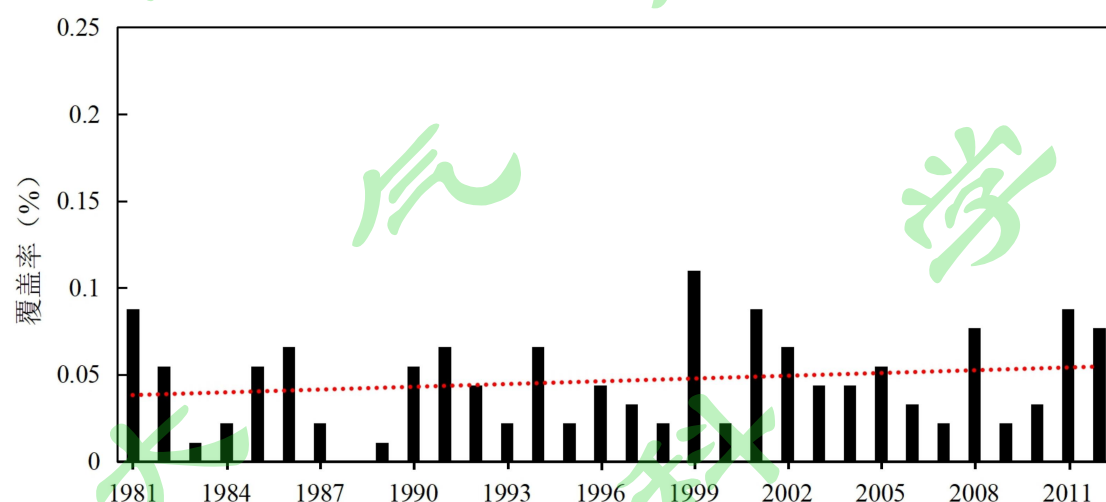


图 6 1981-2012 年整个泰国最长持续降水日数正异常覆盖率的变化（线性趋势：红色点线，未通过信度水平 90%的 t 检验）

Fig.6 Variation in covering range of abnormally high of annual maximum duration in Thailand as a whole during 1981-2012. A linear trend (red dotted line) fails to reach the significance level of 90% T test.

3.5 暴雨以上持续性降水量和非持续性降水量

由表 2 中的暴雨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% 的信度；中部和东部地区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%的信度；东部和南部的覆盖率有下降的趋势，但并不显著（表 2）。从图 7 可以看 ANP 正异常覆盖率在 1999 年以后也有所提高。

本文对不同地区 APP 及 ANP 对暴雨以上总降水量（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以上的降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%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以上的降水是非持续性降水占主导，东部和南部地区暴雨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。

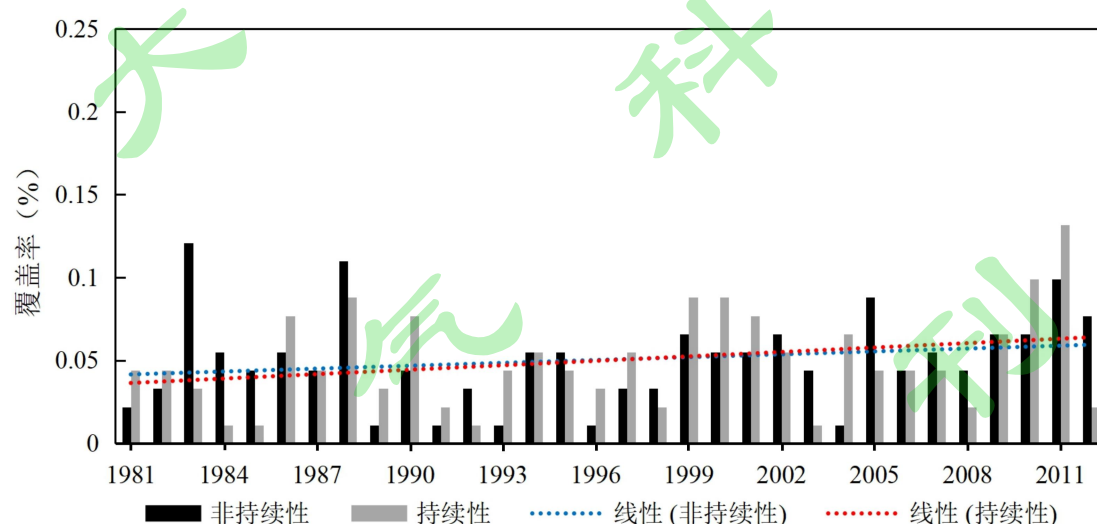


图 7 1981-2012 年整个泰国暴雨以上非持续性（黑色柱状）及持续性（灰色柱状）降水量正异常覆盖率的变化（暴雨以上非持续性降水量的线性趋势：蓝色点线；暴雨以上持续性降水量的线性趋势：红色点线；线性趋势都未通过信度水平 90%的 t 检验）

Fig.7 Variation in covering range of abnormally high of annual non-persistent (black column) and persistent (gray column) precipitation in Thailand as a whole during 1981-2012. The blue (red) dotted line indicates linear trend of covering range of abnormally high of annual non-persistent

(persistent precipitation). The linear trends all fail to reach the significance level of 90% T test.

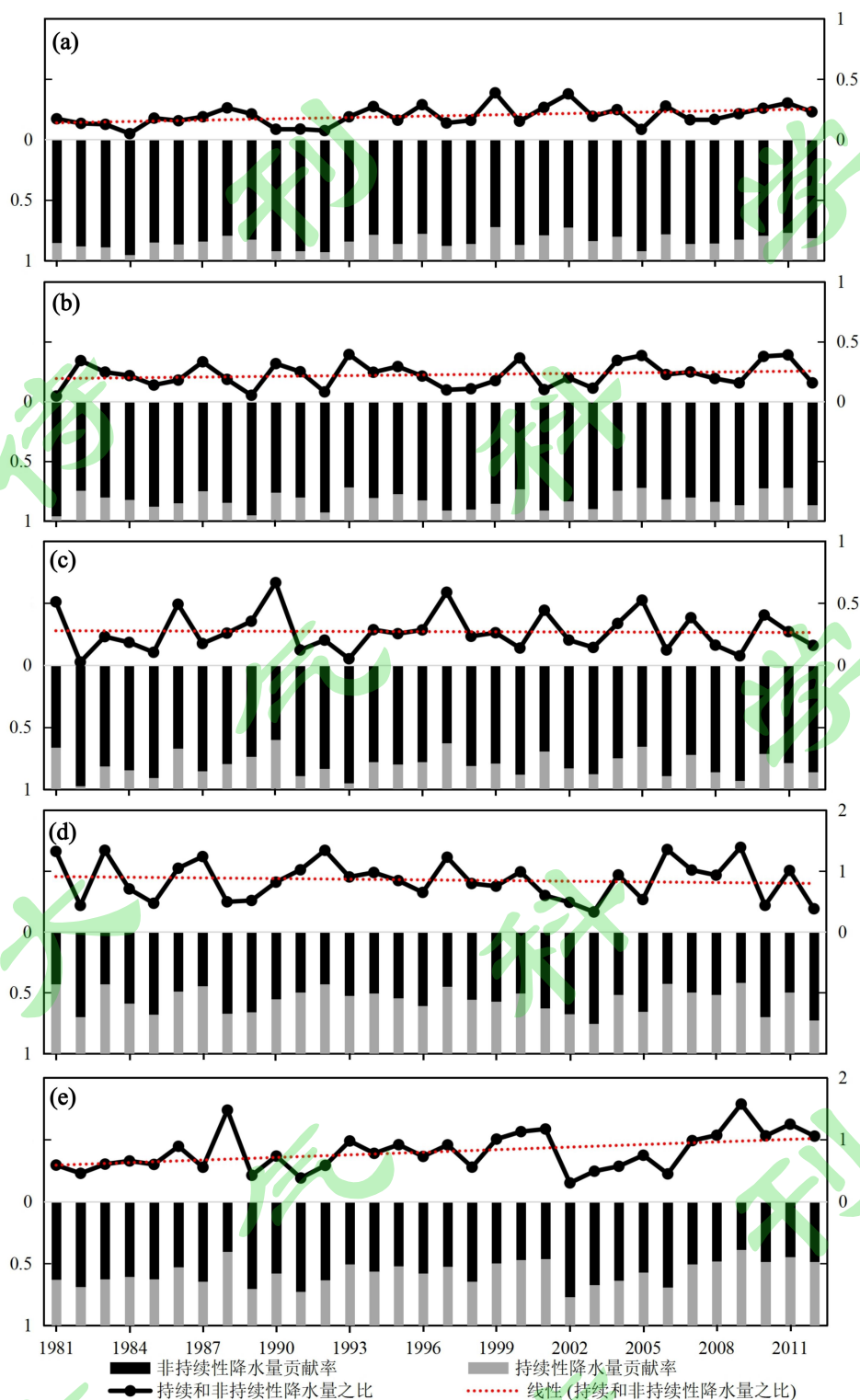


图 8 1981-2012 年泰国 (a) 北部、(b) 东北部、(c) 中部、(d) 东部和 (e) 南部地区暴雨以上持续性及非持续性降水量对暴雨以上总降水量的相对贡献(黑色和灰色柱状分别代表非持续性和持续性降水贡献,对应左纵坐标轴;黑线和红线分别代表逐年持续和非持续降水量之比及其线性趋势,对应右纵坐标轴)

Fig.8 The relative contribution of annual persistent and non-persistent heavy precipitation to

annual precipitation-heavy in (a) North, (b) Northeast, (c) Central, (d) East, and (e) South Thailand during 1981-2012. The black and gray columns represent the contributions of non-persistent and persistent precipitation respectively, and correspond to the left vertical axis. The black line represents the ratio of persistent to non-persistent precipitation, and the red dotted line indicates ratio's linear trend, and correspond to the right vertical axis.

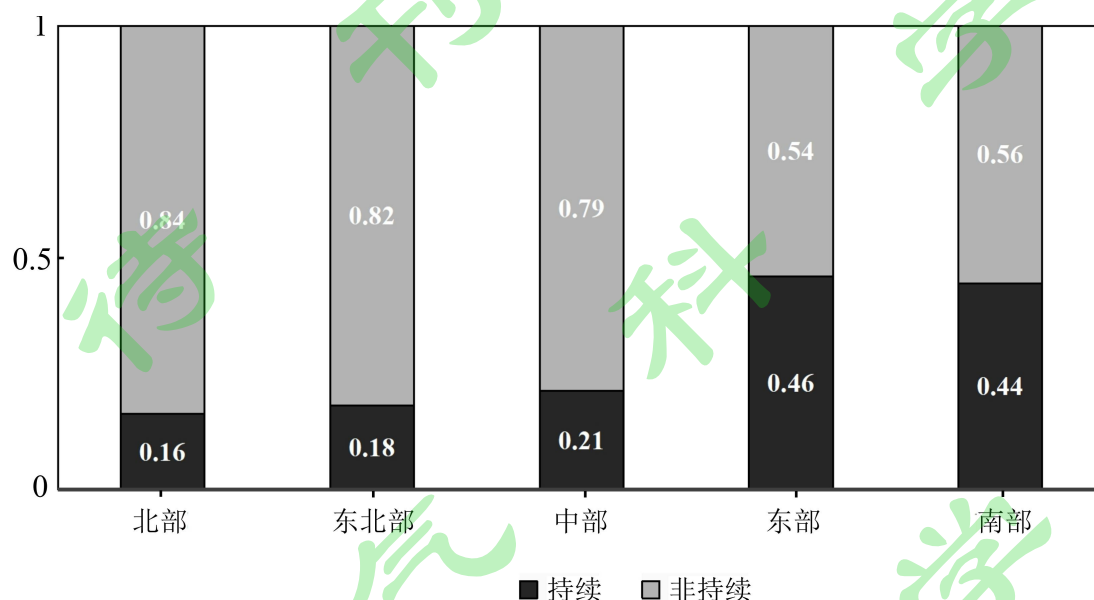


图9 泰国各个地区暴雨以上持续性和非持续性降水量对总暴雨以上降水量的相对贡献

Fig.9 The relative contribution of annual persistent and non-persistent heavy precipitation to annual precipitation-heavy in various regions of Thailand.

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 22.5mm/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，这可能与当地中雨以上降水量（AP-moderate）的增加有关。此外，南部地区大暴雨以上降水量（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灾害（翟盘茂和任福民, 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。

泰国暴雨以上的降水在不同地区存在显著的差异，其中在泰国北部、东北部和中部地区主要是非持续性降水，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它地区有明显差异，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; 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的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. Hydrometeorology*, 9: 256-266.
- Dai, A G. 2013. Increasing drought under global warming in observations and models [J]. *Nature Climate Change*, 3(2): 52-58.
- Endo N, Matsumoto J, Lwin T. 2009. Trends in precipitation extremes over Southeast Asia [J]. *Sola*, 5, 168-171.
- 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 [J], Thailand. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese), 37(19): 6322-6334.
- 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.
- 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* [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 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: 903-995.
- IPCC 2014, Summary for Policymakers. *Climate Change 2014. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [R], <https://ipcc-wg2.gov/AR5/>
- 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*, 033(001): 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]. *Chin. J. Atmos. Sci* (in Chinese). 33, 109 - 120.
- 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.
- 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*, 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), 4: 687-698.
- Limjirakan S, Limsakul A, Sriburi T. 2010. Trends in temperature and rainfall extremes in bangkok metropolitan area [J]. *J. Environ. Res.*, 32: 31-48.
- Limsakul A, Limjirakan S, Sriburi T. 2010. Observed changes in daily rainfall extremes along Thailand's coastal zone [J]. *J. Environ. Res.*, 32: 49-68.
- Limsakul A, Singhruck P. 2016. Long-term trends and variability of total and extreme precipitation in Thailand [J]. *Atmospheric Research*, 169: 301-317.
- 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*, 22:618-624. Liu Xuehua, Ji Zhijian, Wu Hongbao, et al. 2006. Characteristics and interdecadal difference of daily temperature and precipitation extremes in China for the last 40 years [J]. *J Trop Meteorol* (in Chinese), 22: 618-624.
- 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: 269-284.
- 蒙伟光, 李吴睿, 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 Wurui, 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.

- Sharma D, Babel M S. 2014. Trends in extreme rainfall and temperature indices in the western Thailand [J]. *International Journal of Climatology*, 34: 2393–2407.
- The Economic and Social Commission for Asia and the Pacific(ESCAP). 2020. Nakhon Si Thammarat, Thailand. <https://www.unescap.org/sites/default/files/Closing%20the%20Loop%20-%20Nakhon%20Si%20Thammarat%20City%20Profile.pdf>
- Trenberth K E. 1998. Atmospheric moisture residence times and cycling: implications for rainfall rates and climate change [J]. *Climatic Change*, 39(4): 667-694.
- Wu Z, Huang N E. 2011. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method [J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 1(01).
- 杨涵洧, 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): 685. 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): 685.
- 翟盘茂, 任福民. 1999. 中国降水极值变化趋势检测 [J]. *气象学报*, 057(002): 208-216. Zhai Panmao, Ren Fumin. 1999. Detection of Trends in China's Precipitation Extremes [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 057(002): 208-216.
- 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*, 058(0z1): 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), 058(0z1): 1-10.
- 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]. *Sci Tech Rev* (in Chinese), 7: 11–14.