

杨舒毓. 基于数值模拟的流域水循环变化时空特征分析方法[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S1): 186-201.

YANG Shuyu. Spatial-temporal characteristics analysis method of basin water cycle change based on numerical simulation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S1): 186-201.

# 基于数值模拟的流域水循环变化时空特征分析方法

杨舒毓<sup>1,2</sup>

(1. 上海城投航道建设有限公司, 上海 200020; 2. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

**摘要:** 流域水安全问题关系着粮食安全、人民健康以及社会稳定, 为探究全球变暖和社会经济发展背景下流域水循环的历史演变规律, 建立一套基于数值模拟的流域水循环变化时空特征分析方法, 对制定相关政策来适应和缓解未来可能出现的水灾害具有重要意义。以泰国昭披耶河流域为例, 综合应用实测气象、水文及下垫面数据, 构建了高分辨率的分布式水文模型 GBHM, 对 1985—2014 年昭披耶河流域水文过程进行数值模拟, 分析了水循环要素和植被的时空演变规律, 并基于 EOF 方法阐明了降雨年内分布的“双峰”特征。结果显示: 昭披耶河流域降水空间分布不均, 多集中在东北和东南地区; 过去 30 年, 全流域及上游滨河、汪河、永河和难河四个子流域面平均年降雨量均呈现显著上升趋势, 上升速率分别为 1.25 mm/a、1.06 mm/a、1.50 mm/a、2.61 mm/a 和 0.65 mm/a; 流域年内降水分布呈现双峰形态, 其中 3—5 月出现的第一个峰主要受南亚季风影响, 7—9 月出现的第二个峰主要受西北太平洋季风和热带气旋的影响; 过去 30 年, 昭披耶河流域以及上游四个子流域年径流均呈现显著上升趋势, 上升速率分别为 2.84 亿 m<sup>3</sup>/a、0.62 亿 m<sup>3</sup>/a、0.29 亿 m<sup>3</sup>/a、0.78 亿 m<sup>3</sup>/a 和 1.04 亿 m<sup>3</sup>/a。结果表明, 南亚季风主导了该流域前期降雨峰值、西北太平洋季风及热带气旋主导了后期降雨峰值; 雨季南亚季风和热带气旋显著增强引起暴雨增加, 进而导致洪水加剧。通过对流域水循环过程各类要素时空特征变化分析, 充分展示了基于数值模拟的流域水循环变化时空特征分析方法在流域水循环要素分析中的独特作用, 可为流域水安全政策制定提供分析工具和有益参考。

**关键词:** 东南亚典型热带流域; 水循环变化; 分布式水文模型; EOF 方法

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S1.031

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)S1-0186-16

## Spatial-temporal characteristics analysis method of basin water cycle change based on numerical simulation

YANG Shuyu<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Chengtuo Group Corporation, Shanghai 200020, China;

2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The basin water security is related to food security, people's health, and social stability. To explore the historical evolution law of basin water cycle under the background of global warming and socio-economic development, a set of spatial-

收稿日期: 2024-12-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41661144031); 大芦线航道一体化运行方案研究及应用场景建设(CTKY-ZDZX-2024-011)

作者简介: 杨舒毓(1996—), 男, 工程师, 副总经理, 博士, 主要从事水利、航道工程建设研究。E-mail: yangshuyu165@163.com

temporal characteristic analysis method for basin water cycle changes based on numerical simulation is established, which is of great significance for formulating relevant policies to adapt to and mitigate future possible water disasters. Taking the Chao Phraya River Basin in Thailand as an example, a high-resolution distributed hydrological model GBHM is constructed by comprehensively applying measured meteorological, hydrological and underlying surface data. The hydrological process of the Chao Phraya River Basin from 1985 to 2014 is numerically simulated, the spatial-temporal evolution law of water cycle elements and vegetation is analyzed, and the “double peak” characteristic of annual rainfall distribution is clarified based on the EOF method. The result show that the spatial distribution of precipitation in the Chao Phraya River Basin is uneven, concentrated in the northeast and southeast regions; over the past 30 years, the average annual rainfall in the whole basin and the four sub-basins of the upper reaches, including the Bang River, Wang River, Yong River and Nan River, has shown a significant upward trend, with the increase rates being 1.25 mm/a, 1.06 mm/a, 1.50 mm/a, 2.61 mm/a and 0.65 mm/a respectively; the annual precipitation distribution in the basin shows a double-peak pattern, of which the first peak appearing from March to May is mainly affected by the South Asian monsoon, and the second peak appearing from July to September is mainly affected by the Northwest Pacific monsoon and tropical cyclones; over the past 30 years, the annual runoff of the Chao Phraya River Basin and the four sub-basins in the upper reaches has shown a significant upward trend, with the increase rates being 284 million m<sup>3</sup>/a, 62 million m<sup>3</sup>/a, 29 million m<sup>3</sup>/a, 78 million m<sup>3</sup>/a and 104 million m<sup>3</sup>/a respectively. The result indicate that the South Asian monsoon dominates the early rainfall peak in the basin, while the Northwest Pacific monsoon and tropical cyclones dominate the late rainfall peak; the significant enhancement of the South Asian monsoon and tropical cyclones during the rainy season causes an increase in heavy rain, which in turn leads to intensified floods. Through the analysis of the spatial-temporal characteristic changes of various elements in the basin water cycle process, the unique role of the numerical simulation-based spatial-temporal characteristic analysis method in the analysis of basin water cycle elements is fully demonstrated, which can provide analytical tools and useful references for the formulation of basin water security policies.

**Keywords:** a typical tropical basin in Southeast Asia; water cycle change; a distributed hydrological model; the EOF method

## 0 引言

随着社会经济的加速发展,气候变化和人类活动对全球水循环和水资源演变产生了深刻的影响,高温热浪、干旱以及洪水等极端气象水文事件发生的频率、烈度以及持续时间均产生了变化,在过去几十年里对生物多样性、农作物产量、人类健康以及社会经济产生了负面影响<sup>[1]</sup>。首先,气候变暖带来的降水与气温时空分布特征的改变影响了流域生态以及水文响应,进而导致洪水与干旱等极端水文事件在频率、烈度与持续时间上发生了很大的改变,并因此带来了巨大的人民生命财产和社会经济损失,如持续的强降雨导致的泰国2011年大洪水<sup>[2]</sup>,淹没面积达97 000 km<sup>2</sup>,持续时间长达158 d<sup>[3]</sup>,约950万人受到影响,造成的总经济损失高达约465亿美元,为近50 a来最为严重的洪水事件<sup>[4]</sup>。其次,人类活动带来的水库等水利设施建设以及土地利用变化,导致流域生态水文过程发生了改变<sup>[5]</sup>。昭披耶河流域过去几十年里持续的毁林开荒以及城镇化的发展深刻改变了流域植被分布和下垫面条件。已有文献表明,森林退化会减少蒸散发和植被冠层的储存和截留,增加入渗量,进而导致土壤含水量上升和地下水交换量增加,最终导致河

道径流增加<sup>[6-7]</sup>和洪水风险加剧<sup>[8-10]</sup>,从而影响了流域生态水文过程;而城镇化会改变流域下垫面性质,影响蒸发、下渗以及产汇流等过程,同样会对流域生态水文过程产生影响。变化环境下,气候、生态以及水文响应三者之间存在着复杂的相互作用,综合影响着流域水资源演进以及洪旱灾害,探究三者变化有助于加深对流域水循环规律的理解以及提升水资源管理水平。

变化环境下,准确的水文过程模拟与预报对于流域水资源管理以及极端水文事件的防控十分重要。分布式水文模型通过采用具有物理意义的方程来准确刻画复杂水文现象与过程,能够充分考虑流域的地貌特征以及气象变量的空间异质性,被广泛应用于流域中长期径流模拟与预报、洪旱灾害预警以及缺资料地区水文过程研究等领域,是探究水文变化的重要工具<sup>[11-15]</sup>。

对于本论文研究流域泰国昭披耶河流域在变化环境下的水循环演变,已有研究仍较为有限。RANGSIWANICHONG等<sup>[16]</sup>通过对昭披耶河流域降雨与南方涛动指数、海表温度指数和偶极子模态指数等海洋指数之间的相关关系进行分析来探究流域降雨时空演变规律,指出昭披耶河流域高纬度地区降雨量

与南方涛动指数的相关性较高,而在低纬度地区,降雨同海表温度指数的相关性较大。ZHAO 等<sup>[17]</sup>采用基于 Budyko 框架的气候弹性法对昭披耶河流域过去 35 a 的径流变化进行了归因分析,结果表明昭披耶河流域过去气候变化与森林退化造成了径流在 1993 年前后发生了显著的增加,其中森林退化在上游子流域的径流增加中占据主导地位,而气候变化主导了流域出口处的径流增加,这也表明气候变化和土地利用变化均为昭披耶河流域水循环变化分析中不可忽略的因素。KIGUCHI 等<sup>[18]</sup>通过对河流水文学、泥沙侵蚀、海岸侵蚀、森林水文学、农业水文学和城市水文学领域中研究对象为泰国的文献进行详细的综述和对比,探讨了已有文献中气候变化和人类活动对泰国水资源的影响,该综述指出变化环境引起的泰国(尤其是昭披耶河流域)水循环过程的定量时空变化仍需要进一步探索。

为了定量阐明该流域水循环变化的时空特征,本论文基于历史资料分析和分布式水文模型模拟,揭示了过去三十年变化环境下东南亚热带季风区昭披耶河流域水循环要素以及洪旱事件的演变规律,为气候变化影响下的该流域水资源管理提供了科学依据和有益参考。

论文主要创新点为:阐明了过去 30 a 昭披耶河流域雨季南亚季风和热带气旋显著增强趋势影响下暴雨洪水加剧,揭示了南亚季风主导了雨季前期的降雨峰值、西北太平洋季风及热带气旋主导了雨季后期的降雨峰值,提升了对昭披耶河流域水循环规律的认识。

## 1 研究区域与数据

### 1.1 昭披耶河流域概况

昭披耶河(又称湄南河)发源于泰国北部山区,流经中部肥沃的农业平原,最终经泰国首都曼谷汇入泰国湾,全长约 1 112 km,集水面积约 160 000 km<sup>2</sup>,是泰国长度最长、流域面积最大的河流。流域覆盖了约 35% 的泰国总面积,容纳了约 40% 的人口,为全国提供了约 78% 的劳动力,创造了约 66% 的国内生产总值(GDP),沿河分布着清迈、那空沙旺、大城以及曼谷等众多重要城市,是泰国主要粮食产区 and 最为重要的河流<sup>[19]</sup>。考虑到昭披耶河那空沙旺到泰国湾段会受潮汐影响,而本研究暂不考虑潮汐对流域水循环和水资源的影响,因此本研究选取昭披耶河北部山区到那空沙旺段作为研究区域(见图 1),以下简称昭披耶河流域。

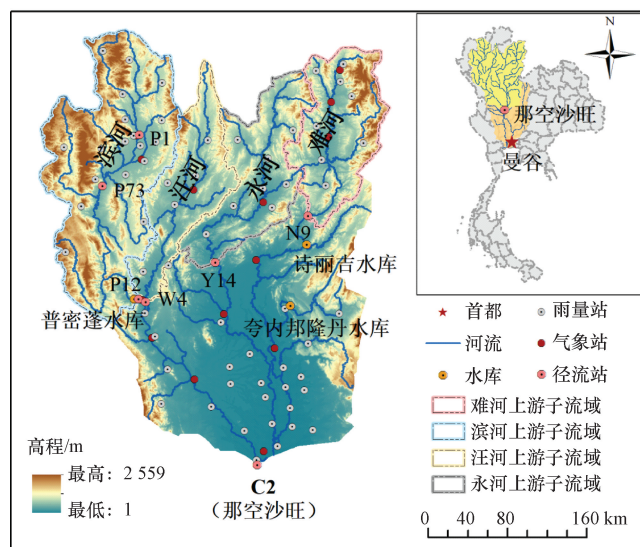


图 1 昭披耶河流域示意

研究流域面积约为 110 569 km<sup>2</sup>,由宾河(Ping 河)、汪河(Wang 河)、永河(Yom 河)和难河(Nan 河)四个子流域组成,覆盖了泰国北部 15 个省。流域在地形、土地利用类型和气象等方面具有显著的空间异质性,北部山区主要被森林所覆盖,人类活动影响相对较少,而中部平原主要以灌溉农田为主,受人类活动影响较大。流域整体属于热带季风型气候,年平均气温为 25.9 ℃,年平均降水量约为 1 200 mm,约 85% 的降水发生在 5 月到 10 月(即雨季),降水的时空分布差异明显。研究流域上游主要有普密蓬水库(Bhumibol 水库)和诗丽吉水库(Sirikit 水库)两座多目标多年调节大型水库,承担着流域内防洪、灌溉、渔业、生态和水力发电等功能<sup>[20]</sup>。

### 1.2 研究采用的数据

本研究所用数据主要分为气象数据、大气环流指示数据、径流数据以及下垫面数据。气象数据由泰国皇家灌溉部(Royal Irrigation Department of Thailand, RID)提供的昭披耶河流域内 15 个气象站和 96 个雨量站观测所得,主要包括:日降水(mm)、日平均气温(℃)、日最高气温(℃)、日最低气温(℃)、日相对湿度(%)、日平均风速(m/s)和日照时长(h)。本研究采用距离方向权重法(Angular Distance Weighting method, ADW)<sup>[21]</sup>对日尺度气象数据进行空间插值,气象插值选择的分辨率 2.5 km×2.5 km。

大气环流指示数据主要包括 ENSO 相关指标以及季风和热带气旋的指示指标。ENSO 相关指标主要包括南方涛动指数(SOI)以及海洋尼诺指数(ONI)。根据以往关于泰国季风影响的研究,本研究选定季风的指示指标包括:印度季风指数(IMI)、西北太平洋季

风指数(*WNPMI*)以及中南半岛季风指数系列(*ICMI-1*、*ICMI-3*和*ICMI-4*)<sup>[22]</sup>,其中*ICMI-1*主要代表了斯里兰卡以东西风带的纬向风的影响,*ICMI-3*主要代表了中国海南岛以东风带纬向风的影响,*ICMI-4*主要代表了斯里兰卡以东的西风带的纬向风和越南以南的南风带的经向风的影响。热带气旋主要采用北纬10°N—20°N和东经100°E范围内700 hPa气压处的相对涡度(*Rvor*)平均值来进行表征<sup>[23]</sup>。其中,*SOI*、*ONI*、*IMI*、*WNPMI*以及*Rvor*均来自NOAA提供的NCEP-NCAR数据集<sup>[24]</sup>。

本研究中用到的实测日径流站点均由泰国皇家灌溉部提供,主要包括:位于滨河出山口的P12站,该站点同时是普密蓬水库的入库站;位于汪河出山口的W4站;位于永河出山口的Y14站;位于难河出山口的N9站,该站点同时是诗丽吉水库的入库站;以及位于那空沙旺的昭披耶河流域出口站点C2站。

本研究中用到的下垫面数据主要包括:地形地貌数据、植被数据、土地利用数据以及土壤性质数据。地形地貌数据主要包括流域坡度、坡长以及高程数据,均由空间分辨率为90 m×90 m的HydroSHEDS数据库<sup>[25]</sup>直接提供或间接计算所得。植被数据主要为流域叶面积指数(Leaf Area Index, *LAI*)数据,由GIMMS遥感数据库第三代植被叶面积指数产品(GIMMS *LAI3g*)<sup>[26]</sup>提供,该产品的空间分辨率为0.083°,时间跨度为1982—2016年,时间尺度为15 d。土地利用数据主要包括2006年、2010年以及2014年三期土地利用地图,空间分辨率为90 m,均由泰国农业合作部土地开发司提供(Land Development Department of Thailand, LDD)。本研究将原始的土地利用数据重新划分为水体、城镇、裸土、森林、灌木、旱地、草地和水田等八类。以上下垫面数据均采用最近邻分配法将其空间分辨率统一为2.5 km×2.5 km。土壤性质数据主要来自SoilGrids数据库<sup>[27]</sup>。SoilGrids数据库由国际土壤参考和信息中心(ISRIC)发布,基于15万个土壤剖面实测数据和遥感观测土壤协变量(数字高程模型、卫星遥感地面产品、2011年全球土地利用图、气候图像以及全球地形和岩性图),采用一种基于机器学习的融合方法,生成了250 m分辨率的土壤类型以及各种土壤物理和生物化学性质的全球分布图。本章水文模拟中主要用到的土壤性质包括:土壤有机碳含量、土壤容重、土壤粘粒、粉砂、砂砾占比以及土壤水力学特性,其中土壤水力学特性采用RAWLS等<sup>[28]</sup>提出的土壤转换函数进行计算。

## 2 研究方法

### 2.1 分布式水文模型 GBHM 概述

基于地貌的分布式水文模型(Geomorphology-Based Hydrological Model, GBHM)是YANG等<sup>[29]</sup>开发的全分布式水文模型,主要由各山坡单元的水文模拟和河道汇流过程组成。各山坡单元的水文模拟主要针对蒸散发、冠层截留、地表径流、下渗、非饱和流和地下径流进行计算;汇流过程主要基于运动波方法进行计算,各子流域出口的总径流量可通过对各栅格的径流贡献量求和得到。模型的输入为流域空间气象驱动数据(日降水、日平均气温、日最高气温、日最低气温、相对湿度、日均风速以及日照时数)、土壤数据、植被*LAI*数据以及土地利用数据,模型参数大部分是基于其物理意义确定,模型中需要率定的参数主要包括土壤饱和导水率、地下水导水率和边坡形状因子,详细的模型参数介绍可以参考缪清华<sup>[30]</sup>中相关介绍。对于GBHM详细的原理和描述可以参考高冰<sup>[31]</sup>和卢伟伟<sup>[32]</sup>的相关介绍。

本研究使用GBHM对昭披耶河流域1985—2014年的日尺度水文过程进行了模拟。模型空间分辨率选择为2.5 km×2.5 km,整个流域被划分为209个子流域,模型反复预热6年以获得稳定的初始状态。由于上游四个子流域受到灌溉和水库等人为干扰较小,子流域出口的实测径流基本属于天然径流,因此本研究选用上游四个子流域出口水文站的实测日径流数据来率定和验证GBHM模型,其中率定期为2000—2004年,验证期为2005—2009年。经过率定和验证的模型基本可以反映昭披耶河流域的自然水文过程,本研究采用GBHM继续模拟流域水文过程到2014年。本研究使用纳什效率系数(*NSE*)<sup>[33]</sup>和百分比偏差(*PBIAS*)<sup>[34]</sup>来评估水文模型的整体性能。*NSE*是一种归一化的统计指标,取值在0~1之间,数值越大,代表模拟效果越好。*PBIAS*反映了多年平均流量的相对误差,值越接近0表示模拟效果越好。一般认为,采用水文模型进行日径流模拟时,当 $NSE > 0.50$ 并且 $-15\% \leq PBIAS \leq 15\%$ ,其模拟效果较为满意<sup>[35]</sup>。本研究采用对数纳什效率系数(*LNSE*)来评价模型低流量模拟效果,*LNSE*即径流取对数后所得到的*NSE*值;采用峰值误差(*PE*)来评价模型对峰值流量模拟的性能,*PE*即峰值流量的相对误差百分比,峰值是采用POT方法提取的洪水事件的洪峰流量,其中POT方法将在2.3节中进行介绍。

## 2.2 基于 EOF 的降水特征分析与暴雨、气象干旱事件提取

EOF(Empirical Orthogonal Function)方法<sup>[36]</sup>是一种在气象学中经常被用来探究气象变量时空变化规律的统计学方法<sup>[37-40]</sup>,该方法通过提取三维目标变量的正交基函数(模式)来较为直观地呈现其主要时空变化特征<sup>[41]</sup>。EOF方法采用单个基函数的方差解释度对所有提取的正交基函数进行排序,排序靠前的正交基函数(即主要模式)通常包含清晰的空间结构和时间变化特征,通过对主要模式的进一步分析可以更加深刻地理解目标气象变量的时空变化规律。

降水在水循环过程中扮演着极为重要的角色,通过对其复杂的空间、时间变化特征进行分析,可以进一步探究热带季风区流域水循环的驱动因素。本研究采用 EOF 方法对昭披耶河流域月降水( $R(x, y, t_i)$ )时空变化特征进行探究,首先将三维降雨变量分解为月降雨平均值( $\bar{R}(x, y)$ )和月降雨波动值( $r(x, y, t_i)$ ),计算公式为

$$R(x, y, t_i) = \bar{R}(x, y) + r(x, y, t_i) \quad (1)$$

其次,得到相关矩阵( $C_{i,j}$ )来对降雨的波动值进行分析,其中  $N$  为三维降雨数据的时间长度,计算公式如下

$$C_{i,j} = \frac{1}{N} \int_{\Omega} r(x, y, t_i) \cdot r(x, y, t_j) d\Omega \quad (2)$$

上述问题可以简化为求解特征向量的问题,即

$$CW = \lambda W \quad (3)$$

假设  $W_k$  为上述问题的特征向量,则可以得到 EOF 模式( $\Phi_k$ ),计算公式为

$$\Phi_k = \sum_{j=1}^N w_k^j r(x, y, t_j) \quad (4)$$

式中,  $w_k^j$  为特征向量  $W_k$  的分量。

所得到的 EOF 模式可以根据其方差贡献度来进行排序,方差贡献度越大的 EOF 模式可以认为越能代表月降水变量的特征。每个 EOF 模式都对应一个时间变量(PC 变量),该变量代表了该模式下的时间变化特征。

本研究中一场降雨事件定义为流域面平均日降雨量超过 1 mm 时降雨开始,小于 1 mm 时降雨结束,并且两场降雨事件间隔需大于等于 1 d,否则认为是一场降雨事件<sup>[32]</sup>。通过该方法可以从上游滨河、汪河、永河以及难河四个子流域和全流域的面平均降雨序列中提取出对应流域的降雨事件,本研究采用降雨历时(d)、降雨总量(mm)、降雨峰值(mm)以及降雨

强度(mm/d)来作为一场降雨事件的特征,其中降雨强度定义为降雨总量与降雨历时的比值。提取完降水事件之后,本研究进一步从中提取暴雨事件来探究其时变规律。如果一场降雨事件的降雨强度大于历史所有降雨事件的降雨强度的 95 分位数值,则该场降雨事件可以被认为是一场暴雨事件。

本研究中气象干旱采用广泛使用的月尺度标准降雨指数( $SPI$ )进行表征, $SPI$  小于 -0.5 一般认为会有气象干旱产生,因此本研究中以 -0.5 为阈值提取气象干旱事件,即当  $SPI$  值小于 -0.5 时认为一场干旱发生,当  $SPI$  值即将超过 -0.5 时认为一场干旱结束。本研究采用干旱历时、干旱峰值以及干旱烈度来描述一场气象干旱事件。

## 2.3 洪水、干旱事件提取方法

本研究采用超阈值洪峰(Peak Over Threshold, 简称 POT)<sup>[42]</sup>方法提取洪水事件。POT 方法通过设置特定的径流阈值来选择洪水事件,以保证该阈值下平均每年会发生特定数量的洪水事件。与采用年最大洪水序列(Annual Maximum Flood series, 简称 AMF)来表征洪水的方法相比,POT 方法具有三个显著的优点:(1)在洪水年能够识别出来更大的洪水事件;(2)在干旱年份能够忽略不重要的小洪水事件;(3)能够提供更加完整的场次洪水特征信息,如洪水的开始和结束时间、洪水历时、洪量和相邻两个洪水事件之间的滞后时间等<sup>[43]</sup>。利用所提取的大量的洪水事件作为样本,POT 方法还可以提高洪水频率分析中参数估计的精度和整体的鲁棒性。已有研究表明当平均每年至少发生 2 到 3 场洪水事件时,POT 方法相比传统的 AMF 方法改善效果更为显著,因此本研究选用 POT3 方法进行洪水事件的提取,即该阈值下平均每年发生三场洪水。在具体提取洪水事件时,为保证提取的场次洪水之间相互独立,POT 方法要求超过阈值的连续两场洪水需要同时满足下列条件,否则合并为一场洪水事件<sup>[42,44]</sup>,即

$$L > 5 + \log(0.3861 \times A) \quad (5)$$

$$Q_{\min} < \frac{3}{4} \min(Q_1, Q_2) \quad (6)$$

式中, $L$ (天)为连续两场超阈值洪水峰值之间的间隔天数, $A$ ( $\text{km}^2$ )为流域面积, $Q_{\min}$ 为连续两个峰值流量  $Q_1$  和  $Q_2$  之间的最小流量。

图 2 更为直观地显示了洪水事件提取方法以及本研究中所采用的洪水特征(洪峰流量、洪水历时和洪量)。本研究采用 Hydrorun 来实现 POT3 洪水事件提取,该工具箱的使用说明和详细介绍可参考 TANG

等<sup>[45]</sup>和卢韦伟<sup>[32]</sup>的研究,在此不再赘述。

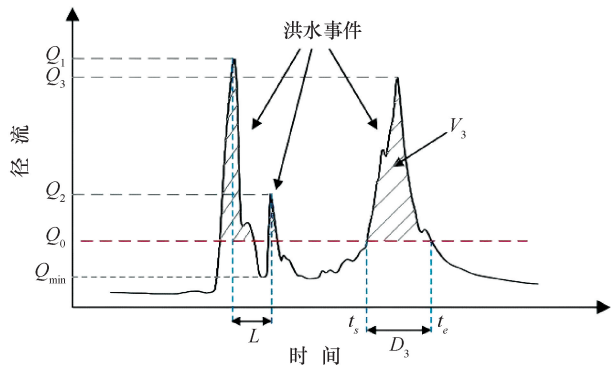


图2 采用 POT3 提取洪水事件及洪水特征  
 $Q_0$ —洪水阈值;  $Q_1$ —洪峰流量;  $V_3$ —洪量;  
 $D_3$ —洪水历时天;  $t_s$ —洪水开始时间;  $t_e$ —洪水结束时间

图2 采用 POT3 提取洪水事件及洪水特征

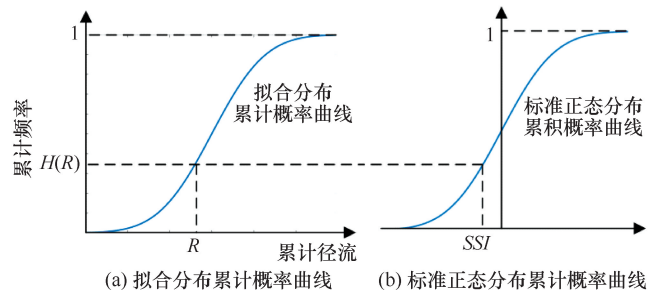
本研究采用标准化径流指数 (SSI) 来对水文干旱进行量化,并进一步提取水文干旱事件。根据月尺度径流序列计算所得的 SSI 是最为常用的表征水文干旱的指标,具有计算简单高效的优点<sup>[46]</sup>。SSI 的计算方法与标准降水指数 (SPI) 的计算方法基本相同,主要分为以下几个步骤: (1) 由于不同月份径流的概率分布具有不同的特征,因此需要对 1—12 月逐月的径流数据分别进行概率分布拟合,一共可以拟合得到 12 个概率分布函数; (2) 根据拟合得到的累积概率分布函数计算月径流所对应的累积概率值; (3) 将累积概率值映射到标准正态分布的累积概率曲线,最终得到标准化的 SSI 指数。在第二步进行概率分布拟合时,本研究中候选的概率分布函数包括:指数分布、伽马分布、逻辑分布、对数正态分布、正态分布以及韦布尔分布,拟合优度指标选用贝叶斯信息准则 (Bayesian Information Criterion, BIC)<sup>[47]</sup>。一般情况下, BIC 越小的模型,拟合效果越好<sup>[48]</sup>,因此本研究选择 BIC 最小的概率分布函数作为最终的拟合函数。BIC 的计算表达式为

$$BIC = k \times \ln(n) - 2 \times \ln(Lm) \quad (7)$$

式中,  $k$  为候选概率分布函数的估计参数个数;  $n$  为样本数量;  $Lm$  为候选概率分布的最大似然值。

当 SSI 大于 0 时,一般认为没有水文干旱发生,对应频率为 50.0%; 当 SSI 位于 0 到 -1 之间时,一般认为发生小型水文干旱事件,对应频率为 34.1%; 当 SSI 位于 -1 到 -1.5 之间时,一般认为发生中型水文干旱事件,对应频率为 9.2%; 当 SSI 位于 -1.5 到 -2 之间时,一般认为发生严重水文干旱事件,对应频率为 4.4%; 当 SSI 小于 -2 时,一般认为发生极端水文干旱事件,对应频率为 2.3%<sup>[49-50]</sup>。据此,本研究中选定水文干旱事件提取的阈值为 0,即一场水文干旱从小

于 0 开始到即将大于 0 时结束。图 3 展示了 SSI 计算原理,图 4 展示了水文干旱事件的提取以及描述一场水文干旱的特征变量(干旱峰值、干旱历时和干旱烈度)。



(a) 拟合分布累积概率曲线 (b) 标准正态分布累积概率曲线

图3 标准化径流指数计算原理

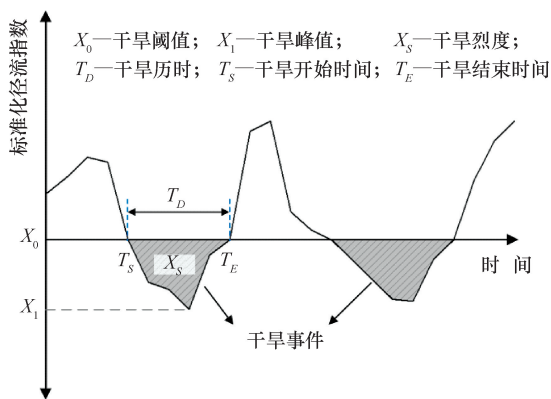


图4 基于标准化径流指数提取水文干旱事件及特征

### 3 结果

#### 3.1 流域水文模拟结果

本研究在昭披耶河流域搭建了高分辨率的 GBHM 模型,并对流域日尺度天然径流进行了模拟,采用上游滨河、汪河、永河以及难河四个受灌溉和水库影响较小的子流域的出山口站点实测径流对 GBHM 进行了率定和验证。图 5 和表 1 给出了模型率定期和验证期的与实测径流的对比结果。GBHM 在率定期和验证期的表现基本上均可以被评价为满意。在验证期,模型在四个出山口站点的 NSE 均大于 0.7, PBIAS 的绝对值基本上都小于 10%。在滨河子流域出口,虽然模型对总水量存在轻微的高估,但 NSE 值最高,整体上模拟效果最好;而在汪河子流域出口,模型在率定期对总水量存在低估现象,在验证期对总水量存在高估现象,而且率定期和验证期的 NSE 值均为最低,整体上模拟效果相对较差,这可能是由于汪河流域气象站和雨量站分布较少,降雨等气象要素空间插值误差较大,模型气象输入不确定性较高导致的。鉴于 GBHM 模型在滨河子流域的模拟表现最好,本研究选用滨河子流域作为后续搭建的 GBHM-ANN-CA-CV 模型的应用流域。图 5 和表 1 同时也给出了滨河子流域

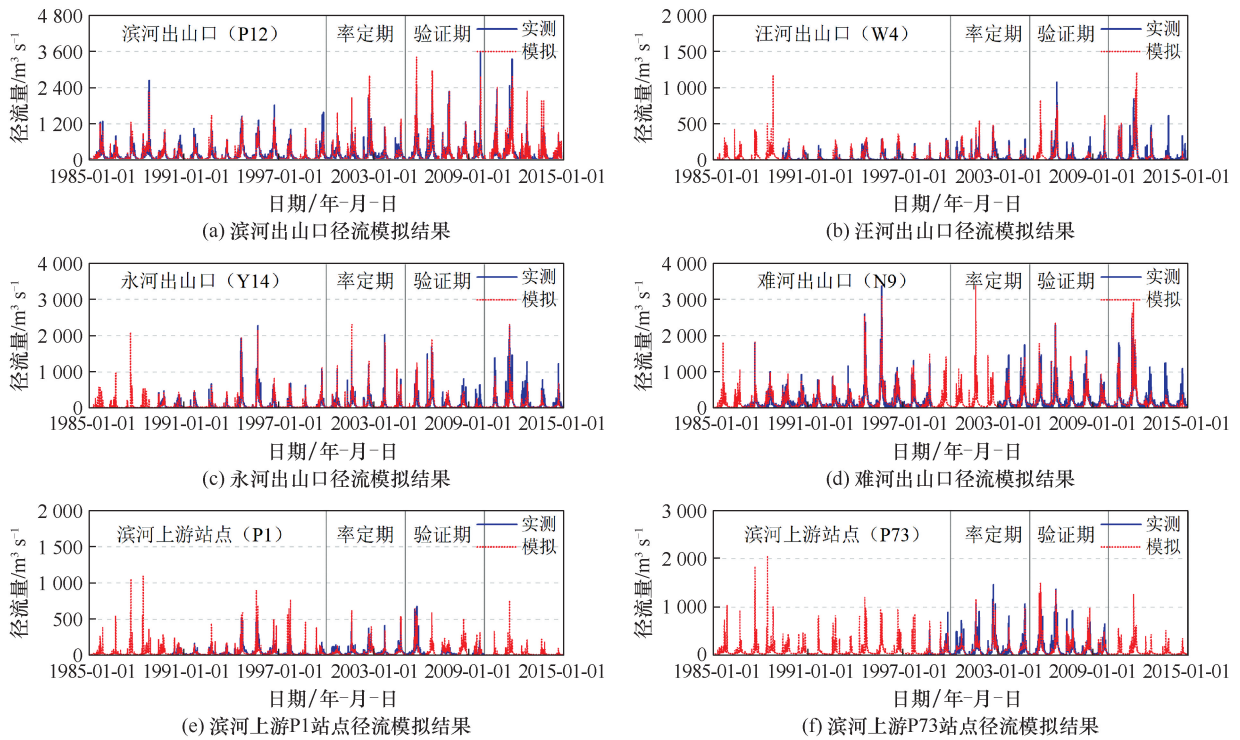


图5 GBHM 模拟昭披耶河流域天然径流过程

表 1 率定期和验证期内 GBHM 模拟昭披耶河流域天然径流过程评价结果

站 点	率定期(2000-01-01 至 2004-12-31)				验证期(2005-01-01 至 2009-12-31)			
	<i>NSE</i>	<i>PBIAS</i> /%	<i>LNSE</i>	<i>PE</i> /%	<i>NSE</i>	<i>PBIAS</i> /%	<i>LNSE</i>	<i>PE</i> /%
P12	0.79	7.8	0.62	-6.8	0.84	4.7	0.81	-11.2
W4	0.83	-14.6	0.77	-15.2	0.83	-8.7	0.56	9.8
Y14	0.86	3.3	0.72	-7.1	0.78	-10.8	0.59	-13.2
N9	0.86	5.4	0.62	-0.4	0.73	0.5	0.63	-1.2
P1	0.79	-9.6	0.58	-20.5	0.68	-4.3	0.74	-6.8
P73	0.80	-9.2	0.78	-20.8	0.78	-12.3	0.80	-20.8

上游的两个站点 P1 和 P73 的 GBHM 模拟效果。GBHM 在滨河子流域上游和中游的整体表现均较为满意, *NSE* 均大于 0.6, *PBIAS* 的绝对值均小于 15%。此外模型在率定期和验证期对六个站点的峰值流量大部分都存在不同程度的低估, 该现象可能一部分是由模型本身的不确定性带来的, 另一部分是气象变量空间插值和下垫面数据的不确定性造成的。

### 3.2 历史降水变化趋势

昭披耶河流域过去 30 a (1985—2014 年) 的降水数据采用 1.2 节中所介绍的实测气象站和雨量站进行空间插值得到的实测降水数据集。过去 30 a, 昭披耶河流域以及上游滨河、汪河、永河和难河四个子流域降雨量均呈现显著上升趋势 ( $P < 0.05$ ), 上升速率分别为 1.25 mm/a、1.06 mm/a、1.50 mm/a、2.61 mm/a 和 0.65 mm/a, 平均每年相对于 1985 年降雨量分别升高 0.11%、0.10%、0.15%、0.22% 和 0.05%。图 6 给出了多年平均年降水量及变化趋势的空间分布

图, 整体上降水空间分布较为不均, 流域东南以及东北地区降水较多, 而流域西部及南部流域出口附近降水分布较少。

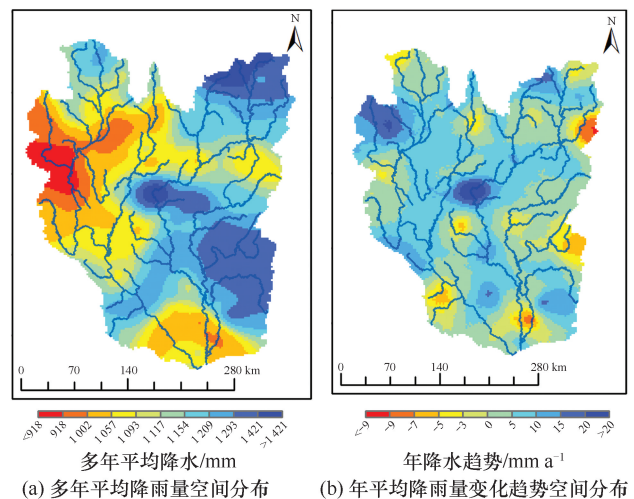


图 6 昭披耶河流域多年平均降雨量及变化趋势空间分布

为了进一步探究降水时空变化规律,本研究采用 EOF 方法对月降水进行了解析。图 7 给出了昭披耶河流域月降雨进行 EOF 分解之后的前三个模态的空间结构特征,图 8 给出了对应的三个模态的年内分布标准化后的时间特征。第 1 模态的方差贡献率为 84.4%,该模态的空间特征和时间特征基本上可以反映整个流域的月降雨时空变化特征。空间特征上来看,该模态均为负值,没有出现相位相反的区域;时间特征上看,昭披耶河流域降水年内分布呈现明显的双峰现象,第一个峰值出现在 5 月,第二个峰值出现在 9 月。第 2 模态的方差贡献率只有 7.1%,从空间分布上来看,该模态主要反映的是流域东北部的时空特征,从时间特征上来看,该模态下降雨年内分布依旧存在明显的双峰现象,峰值分别出现在 4 月和 8 月。第 3 模态的方差贡献率只有 2.3%,该模态反映的降雨时空特征信息已非常有限,该模态下的时空特征也呈现出降雨年内分布双峰现象,并且在 6—7 月出现降雨突然减少的现象,根据 TAKAHASHI 等<sup>[23]</sup>的研究,这一现象可能是由于不同来源的季风以及热带气旋的综合影响下出现的“季风中断”现象。

以往研究表明,泰国地区夏季降水的变化与亚洲-澳大利亚季风系统中的大气环流直接相关<sup>[51-52]</sup>,并且处于南亚季风与西北太平洋季风共同影响的区域<sup>[53-55]</sup>,而这两个季风系统影响下的降水年内和年际变化规律是不同的<sup>[56-57]</sup>。南亚季风一般认为会导致降雨峰值发生时间提前,主要与印度洋季风相关<sup>[23-58]</sup>;而西北太平洋季风一般认为是泰国雨季后期集中降雨的主导因素,主要与西北太平洋副热带高压和向西演进的南海热带气旋相关<sup>[59-60]</sup>。目前大多数研究集中于对泰国整个区域或更大范围进行季风影响下的降水变化规律原因的探究,而具体到昭披耶河流域相关研究还有待进一步完善。为了对昭披耶河流域所表现出的降水年内分布双峰的特征进行进一步探究,本研究分别计算了流域雨季前期 3—5 月(第一个降水峰值出现月份)与雨季后期 7—9 月(第二个降水峰值出现月份)月降水时间序列与南方涛动指数(SOI)、海洋尼诺指数(ONI)、印度季风指数(IMI)、西北太平洋季风指数(WNPMI)、中南半岛季风指数(ICMI-1、ICMI-3、ICMI-4)以及用来表征热带气旋的相对涡度(Rvor)的皮尔逊相关系数,结果如图 9 和

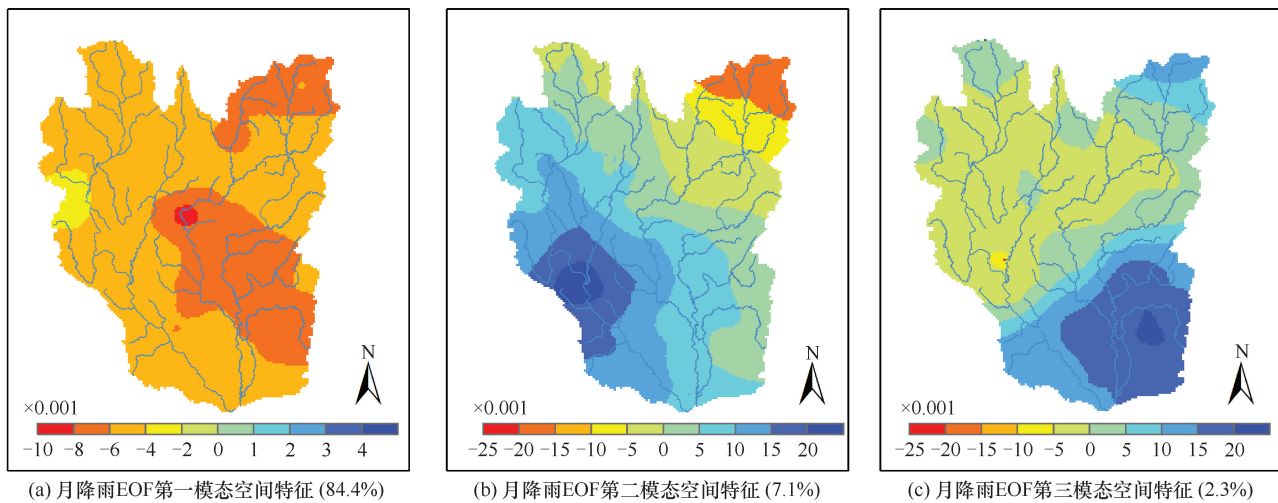


图 7 昭披耶河流域月降雨 EOF 模态空间特征

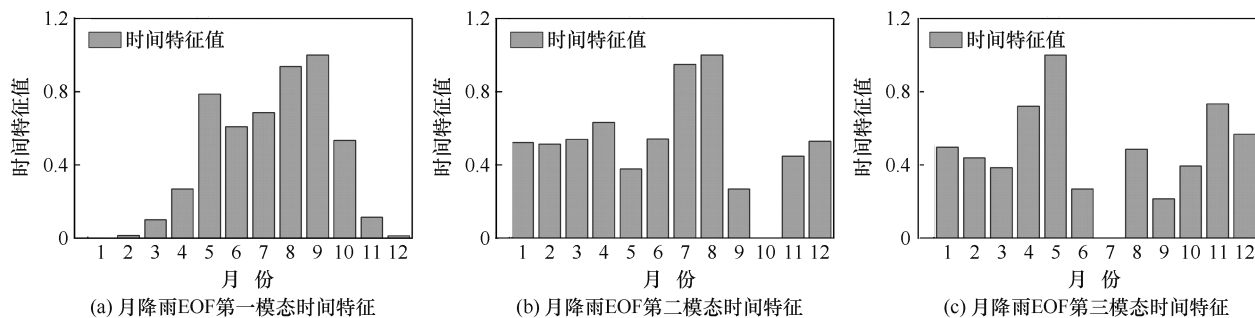


图 8 昭披耶河流域月降雨 EOF 模态时间特征

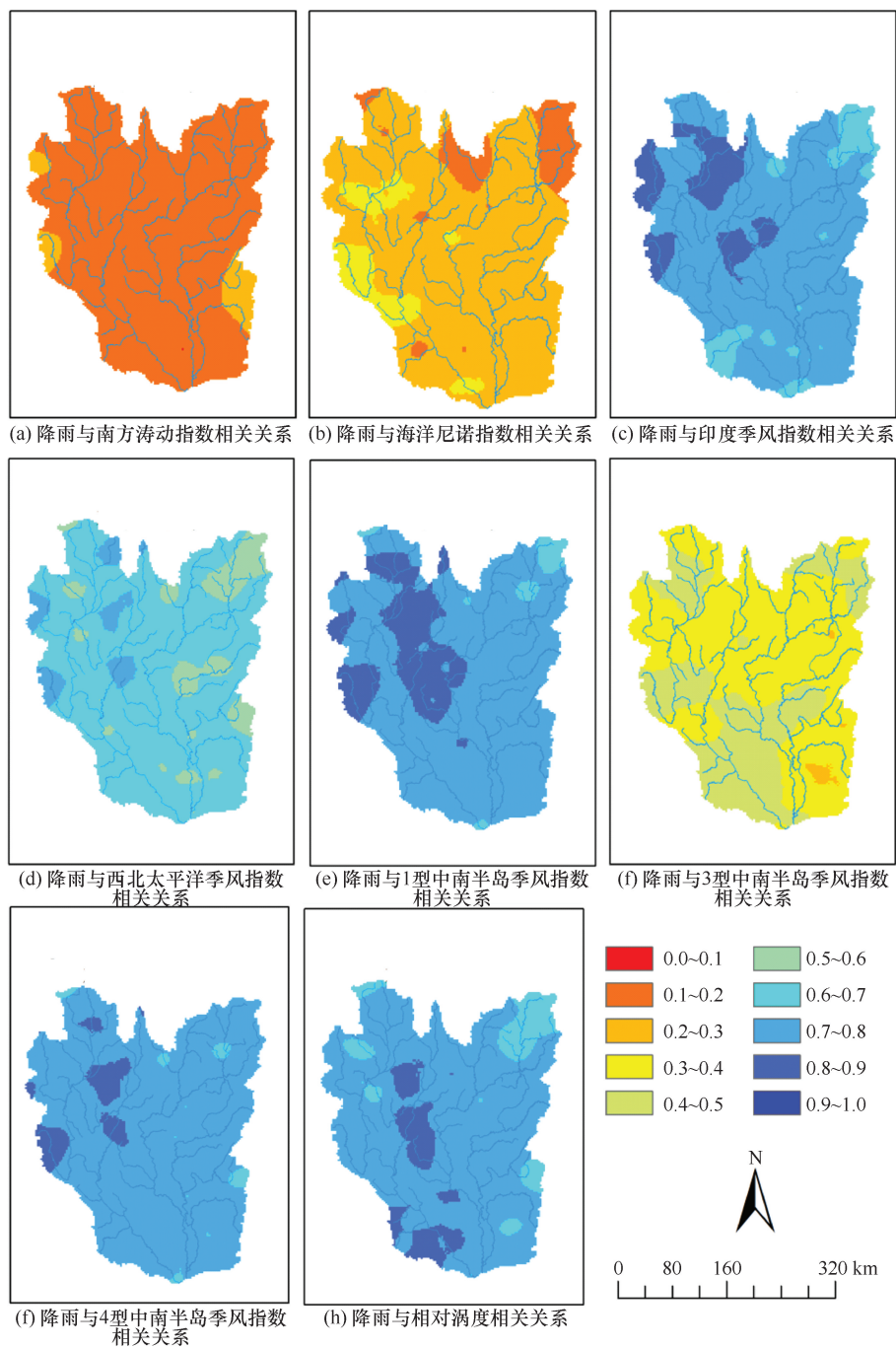


图9 昭披耶河流域雨季前期(3—5月)月尺度降雨序列与各指数的皮尔逊相关系数

图10所示。在降雨第一个峰值出现的3—5月,流域月降雨与表征印度洋季风的 $IMI$ 、表征斯里兰卡以东季风的 $ICMI-1$ 、表征斯里兰卡以东和越南以南季风的 $ICMI-4$ 均呈现出极强的相关关系( $>0.7$ ),这表明昭披耶河流域降雨年内分布中的第一个峰值主要受到南亚季风的影响;流域月降雨同表征热带气旋的 $Rvor$ 相关系数也相对较高,这表明热带气旋对昭披耶河流域3—5月的降雨峰值也起到了一定的加强作用;流域月降雨与 $WNPMI$ 也存在一定的相关性( $0.6\sim 0.7$ ),

表明西北太平洋季风同样对流域雨季前期降雨存在影响;此外,流域月降雨与 $ENSO$ 相关的 $SOI$ 和 $ONI$ 相关系数均较低( $<0.3$ ),这表明昭披耶河流域雨季前期降雨集中现象受 $ENSO$ 影响相对较小。在降雨第二个峰值出现的7—9月,整体上流域月降雨与各气候指标的相关性较3—5月的各相关性均偏低,相对而言雨季后期的集中降雨主要与 $WNPMI$ 、 $ICMI-3$ 以及 $Rvor$ 相关性较高( $0.3\sim 0.5$ ),这表明该现象主要受到了西北太平洋季风、中国海南岛以东季风以及热带气旋的影响,其中 $Rvor$ 的相关性最高,这也表明热带气旋对该期降雨存在相对较强的影响,可以认为是雨季后期降雨集中的主导因素;流域西南区域的月降雨与 $IMI$ 、 $ICMI-1$ 、 $ICMI-4$ 也存在一定的相关性,这表明昭披耶河流域西南区域受南亚季风影响也相对较大。总而言之,昭披耶河流域雨季降雨双峰现象是南亚季风、西北太平洋季风以及南海热带气旋共同作用导致,其中3—5月降雨峰值主要由南亚季风主导,7—9月峰值主要由西北太平洋季风和热带气旋主导。

南亚季风、西北太平洋季风以及南海热带气旋的增强会给昭披耶河流域带来更多的气,进而带来更多的降水,它们的变化趋势会关系到流域洪水的变化趋势。

本研究同样探究了不同季节下季风和热带气旋过去30a的变化趋势。过去30a,在南亚季风占据主导地位的3—5月, $IMI$ 、 $ICMI-1$ 以及 $ICMI-4$ 均表现出显著的增加趋势( $P < 0.05$ ),增加速率分别为0.07、0.05和0.03;在西北太平洋季风和热带气旋占主导的7—9月, $WNPMI$ 呈现出微弱的增加趋势(增加速率为0.004),表征热带气旋的 $Rvor$ 呈现出显著的增加趋势(增加速率为0.05,  $P < 0.05$ )。以上结果表明,过去30年,雨季南亚季风和热带气旋呈

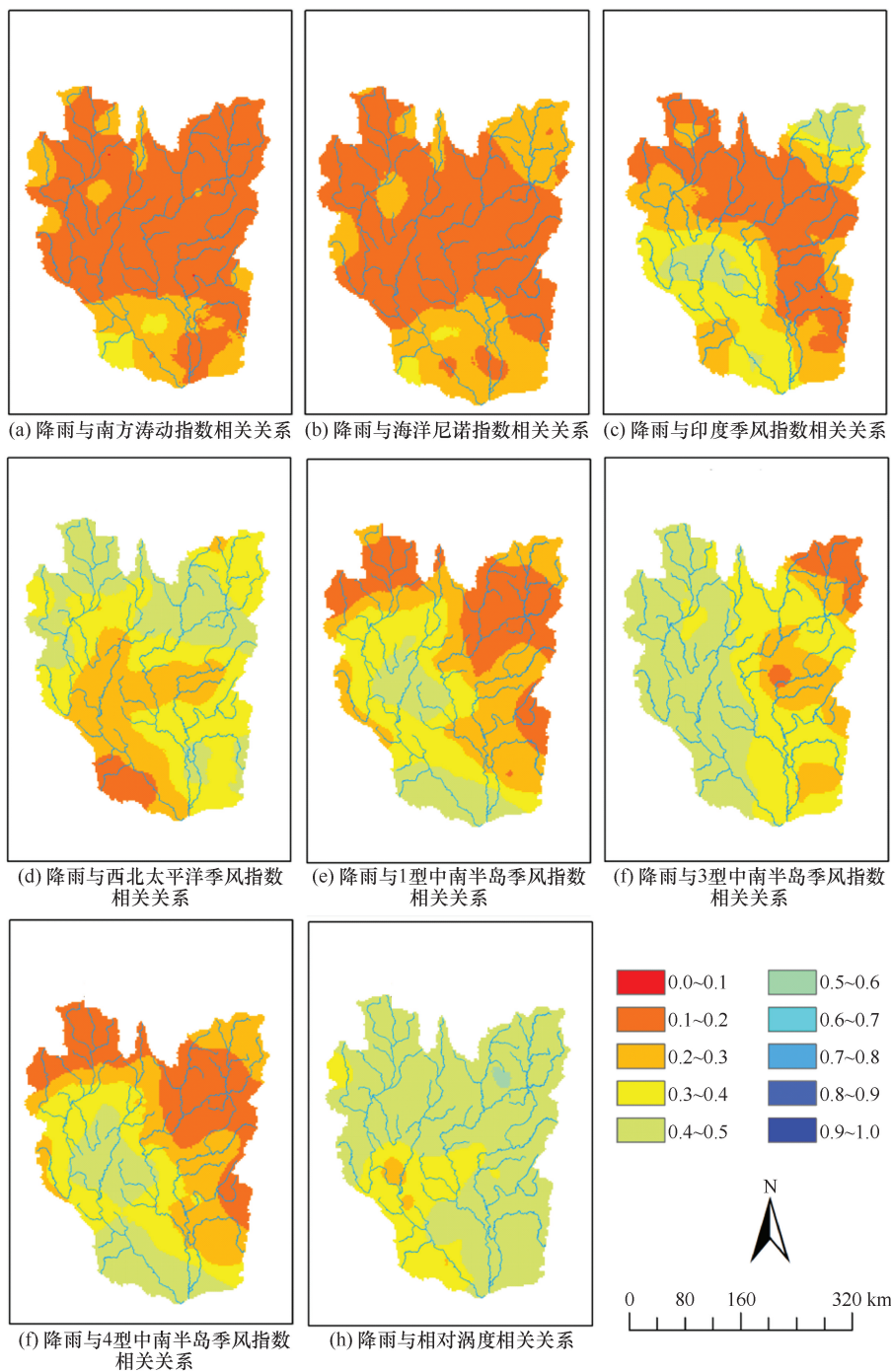


图 10 昭披耶河流域雨季后期(7—9月)月尺度降雨序列与各指数的皮尔逊相关系数

显著增强趋势,可能会导致极端降雨增加,进而导致洪水风险增加。为了对上述分析进行验证,本研究进一步提取了过去30a的暴雨事件,并分析了其变化趋势。

以往研究表明,昭披耶河流域绝大多数洪水是由极端暴雨天气导致,因此本研究提取了过去30a所发生的暴雨事件,并统计了一场暴雨事件的降雨历时、降雨总量、降雨峰值和降雨强度的变化趋势,如表2所列。从表中可以看到,过去30a,昭披耶河流域及上游四个子流域所发生的暴雨事件中降雨历时、总量以及峰值均呈现出不同程度的上升趋势,而降雨强度没有发生明显的变化。其中,昭披耶河全流域面平均降雨所提取暴雨事件的历时、总量及峰值均呈现出显著的上升趋势,这可能意味着流域洪水风险呈现上升趋势,流域洪涝风险在持续增加。过去30a暴雨各特征量的变化趋势与雨季南亚季风和热带气旋的显著增强趋势得到了互相验证,可以初步认为雨季南亚季风和热带气旋的显著加强带来了更剧烈的降雨。

昭披耶河流域同样深受干旱灾害的影响,本研究提取了过去30a所发生的气象干旱事件,并统计了干旱事件的干旱历时、干旱峰值和干旱烈度的变化趋势,如表2所示。从表中可以看到,过去30a,昭披耶河流域及上游四个子流域所发生的气象干旱事

表 2 过去 30 a 昭披耶河流域出口处及上游四个子流域出山口处暴雨和气象干旱事件各特征量的变化速率

流域	暴雨历时 /d·次 <sup>-1</sup>	暴雨总量 /mm·次 <sup>-1</sup>	暴雨峰值 /mm·次 <sup>-1</sup>	暴雨强度 /mm·d <sup>-1</sup> ·次 <sup>-1</sup>	干旱历时 /月·次 <sup>-1</sup>	干旱峰值 /次 <sup>-1</sup>	干旱烈度 /月·次 <sup>-1</sup>
昭披耶河	0.21*	2.14*	0.12*	0.00	0.01	0.03	0.04
滨河	0.09*	0.95*	0.07	-0.01	0.00	-0.03	0.02
汪河	0.02	0.34	0.08	0.02	0.01	0.05	0.05
永河	0.04	0.67*	0.09	0.01	0.01	-0.04	0.03
难河	0.05*	0.77*	0.09*	0.00	0.00	-0.02	0.01

注: \*表示存在显著变化趋势(P<0.05)。

件中干旱历时和干旱烈度均呈现出不同程度的上升趋势。其中,根据昭披耶河全流域面平均降雨所提取的气象干旱事件的历时、峰值和烈度均呈现出上升趋势,这可能意味着流域干旱呈现上升趋势,流域干旱风险在持续增加。

### 3.3 历史气温、实际蒸散发及径流深变化分析

#### 3.3.1 历史气温变化趋势

昭披耶河流域过去 30 a 的日均气温数据采用实测气象站点观测气温进行插值,在插值过程中通过考虑气温直减率来对气温插值结果沿高程进行修正。过去 30 年,昭披耶河流域以及上游滨河、汪河、永河和难河四个子流域均呈现显著上升趋势( $P < 0.05$ ),上升速率分别为  $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.19\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  和  $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。图 11 给出了昭披耶河流域多年平均日气温及变化趋势的空间分布图,整体上气温随海拔的升高而升高,流域上游山区气温偏低,中下游平原区气温偏高。

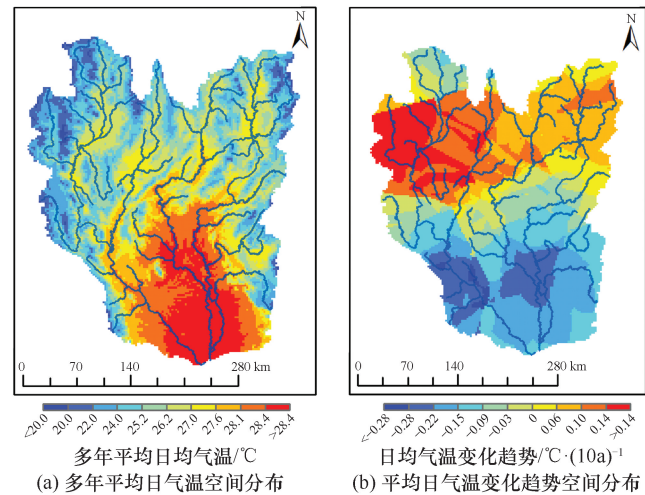


图 11 昭披耶河流域多年平均日气温及变化趋势空间分布

#### 3.3.2 历史实际蒸散发变化趋势

昭披耶河流域过去 30 a 实际蒸散发由 GBHM 模型计算所得,图 12 给出了流域多年平均实际蒸散发以及变化趋势的空间分布图。流域上游森林覆盖率较高,实际蒸散发相对其他区域较高,流域中下游平原以旱地和水田为主,实际蒸散发相对较低。过去 30 a,流域大部分地区年实际蒸散发呈现出并不显著的增加趋势( $P > 0.05$ ),其中上游区域实际蒸散发的增加趋势较大,这也与过去三十年气温和降水的上升趋势相符合。分子流域来统计,过去 30 a,昭披耶河流域以及上游滨河、汪河、永河和难河四个子流域均呈现不显著的上升趋势( $P > 0.05$ ),上升速率分别为  $0.03\text{ mm/a}$ 、 $0.64\text{ mm/a}$ 、 $1.17\text{ mm/a}$ 、 $0.99\text{ mm/a}$  和

$0.17\text{ mm/a}$ 。整体而言,昭披耶河全流域年平均实际蒸散发呈增加趋势,其中上游区域增加趋势更大,中下游平原增加趋势相对较小。

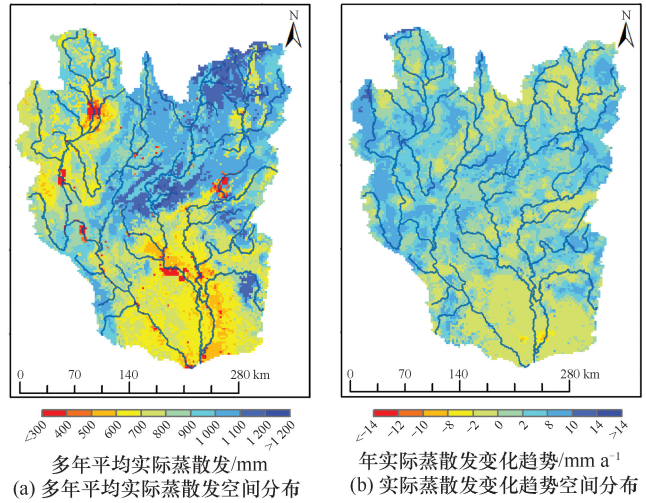


图 12 昭披耶河流域多年平均实际蒸散发及变化趋势空间分布

#### 3.3.3 历史径流深变化趋势

过去 30 a 昭披耶河流域径流深数据由 GBHM 计算得到,图 13 给出了昭披耶河流域多年平均径流深和变化趋势的空间分布图。从图中可以看出,流域上游山区径流深偏小,而中下游平原地区径流深相对较大,径流深空间变化同流域地形地貌分布较为相关。过去 30 a,昭披耶河流域上游山区径流深基本呈现增加趋势,而中下游平原东部地区呈现出显著减少趋势,这可能与上游森林退化导致实际蒸散发减少,同时冠层截留减少,进而导致产流增加有关。分子流域来统计,过去 30 a,昭披耶河流域以及上游滨河、汪河、永河和难河四个子流域均呈现显著上升趋势( $P < 0.05$ ),上升速率分别为  $0.19\text{ mm/a}$ 、 $0.12\text{ mm/a}$ 、 $0.29\text{ mm/a}$ 、 $0.75\text{ mm/a}$  和  $0.75\text{ mm/a}$ 。整体而言,昭披耶河流域大部分地区年平均径流深呈现上升趋势,其中上游山区上升趋势更大,而中下游平原东部地区呈现减少趋势。

### 3.4 历史土地利用与植被变化分析

昭披耶河流域土地利用变化主要由 2006 年、2010 年以及 2014 年三期土地利用地图来反映,本研究按照森林(包括密林和疏林)、农田(包括旱田和水田)以及城镇对三期土地利用地图进行统计分析,图 14 给出了三期土地利用地图。昭披耶河流域的土地利用类型主要以森林为主,上游森林覆盖率较高,沿河分布有农田和城镇,中下游主要以农田为主。昭披耶河流域森林覆盖率由 2006 年的  $62.7\%$  下降到 2014 年的  $57.2\%$ ,森林退化明显;农田面积占比由

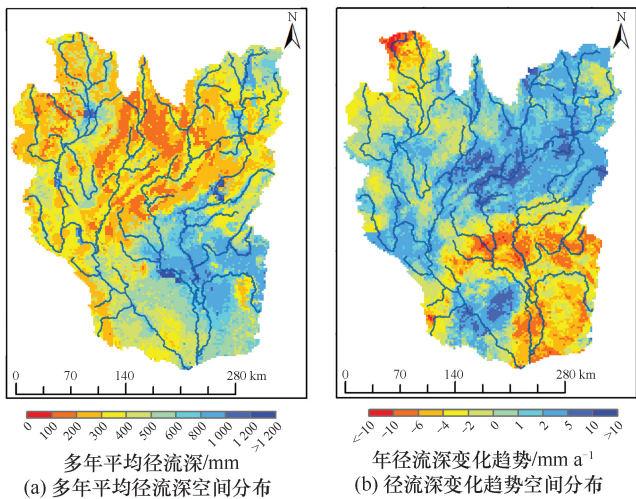


图 13 昭披耶河流域多年平均径流深及变化趋势空间分布

2006 年的 28.3% 上升到 2014 年的 31.2%，农田明显扩张；城镇用地占比由 2006 年的 3.8% 上升到 2014 年的 5.5%，城镇化率明显提高。

叶面积指数 ( $LAI$ ) 作为表征植被冠层叶片数量的重要指标，是生态系统水碳循环的主要驱动力之一，而年最大叶面积指数 ( $LAI_{max}$ ) 可以反映植被生长期的状况，因此本研究中采用年最大叶面积指数的变化来表征植被生长期的变化。过去 30 a，昭披耶河流域以及上游滨河、汪河、永河和难河四个子流域  $LAI_{max}$  均呈现显著下降趋势 ( $P < 0.05$ )，下降速率分别为每 10 年下降 0.13、0.13、0.20、0.38 和 0.11，平均每 10 年相对于 1985 年的  $LAI_{max}$  分别下降 3.9%、3.6%、6.0%、9.3% 和 2.7%。由于森林的  $LAI$  相对于其他植被类型较大，流域面平均  $LAI_{max}$  的下降趋势也反映出了流域土地利用变化中森林覆盖率下降的事实，图 15 给出了昭披耶河流域多年平均的  $LAI_{max}$  以及变化趋势的空间分布图，可以看到昭披耶河流域上游山区多为森林， $LAI_{max}$  较大，而中下游平原区为农业种植

区， $LAI_{max}$  较小，同时流域森林分布的北部地区呈现出减少趋势。

### 3.5 历史年径流、洪水、干旱变化特征

昭披耶河流域年径流、洪水以及干旱历史演变规律主要基于实测水文站点日尺度流量数据。本研究中水资源主要以年径流量表征；洪水采用 POT 方法提取场次洪水，然后分别统计过去 30 a 发生的洪水的洪峰、洪量以及洪水历时的变化；本研究主要关注水文干旱，干旱事件采用基于标准径流指数的干旱事件提取方法提取场次干旱，然后分别统计过去 30 a 发生的干旱的峰值、烈度以及历时。图 16 给出了昭披耶河流域出口及上游四个子流域出口站的年平均径流的变化情况。过去 30 a，昭披耶河流域出口站 (C2 站) 以及上游滨河 (P12 站)、汪河 (W4 站)、永河 (Y14 站) 和难河 (N9 站) 四个子流域出口站的年径流均呈现显著上升趋势 ( $P < 0.05$ )，上升速率分别为 2.84 亿  $m^3/a$ 、0.62 亿  $m^3/a$ 、0.29 亿  $m^3/a$ 、0.78 亿  $m^3/a$  和 1.04 亿  $m^3/a$ ，平均每年相对于 1985 年的年径流量分别升高 1.2%、1.1%、3.1%、3.9% 和 3.1%。整体上，过去 30 a 流域水资源量呈现增加趋势。表 3 给出了过去 30 a 洪水和干旱各个特征量的变化速率，变化速率为正表示呈现增长趋势，变化为负表示呈现减小趋势。过去 30 a，昭披耶河流域以及上游滨河、汪河以及永河洪水历时均呈现减小趋势，而难河呈现微弱的增加趋势；洪峰均呈现增加趋势，其中昭披耶河流域出口和滨河流域出口的增加速率最大；洪量均呈现增加趋势，其中昭披耶河流域出口的增加速率最大。综合来看，过去 30 a 昭披耶河流域洪水历时呈现轻微的减小趋势，而洪峰和洪量均呈现增加趋势，整体上洪水风险在持续增加。对于水文干旱过去 30 a 的变化规律，干旱峰值在昭披耶河、上游滨河和永河均呈现微弱的增加趋势，而在汪河和难河呈现微弱的减小趋

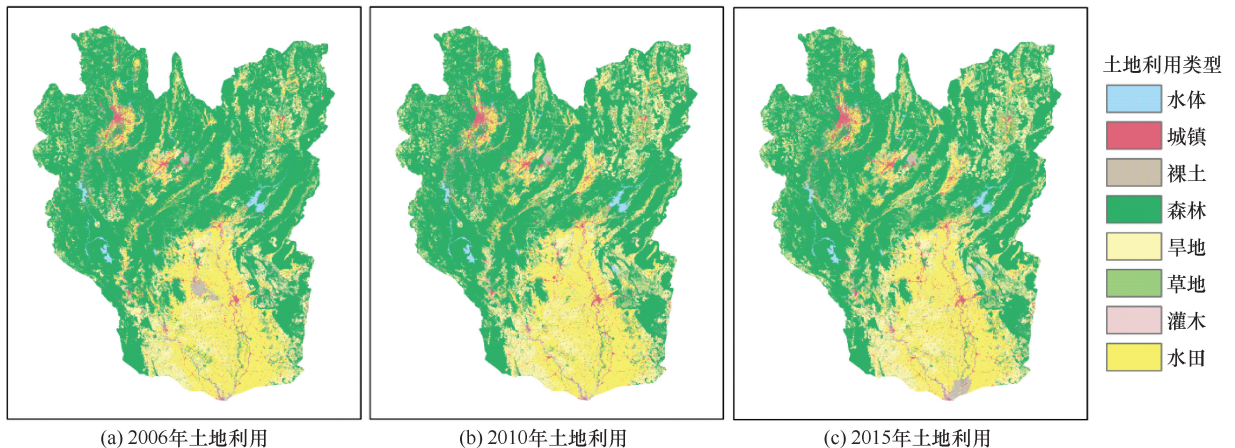


图 14 三期历史土地利用地图

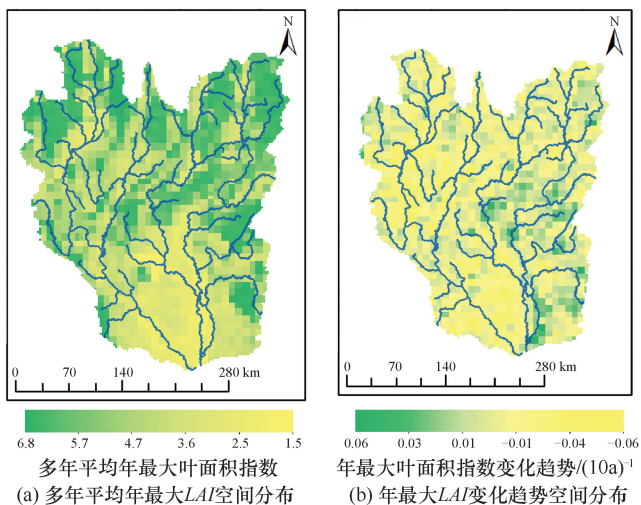


图 15 昭披耶河流域多年平均年最大 LAI 及变化趋势空间分布

势；干旱历时均呈现增加趋势，其中昭披耶河和永河的增加速率较大；干旱烈度均呈现增加趋势，其中永河的增加速率相对较大。综合来看，过去 30 a 昭披耶河流域水文干旱的峰值、历时以及烈度均呈现增加趋势，整体上水文干旱风险在持续增加。

结合之前对于降水变化趋势的分析，可以发现洪

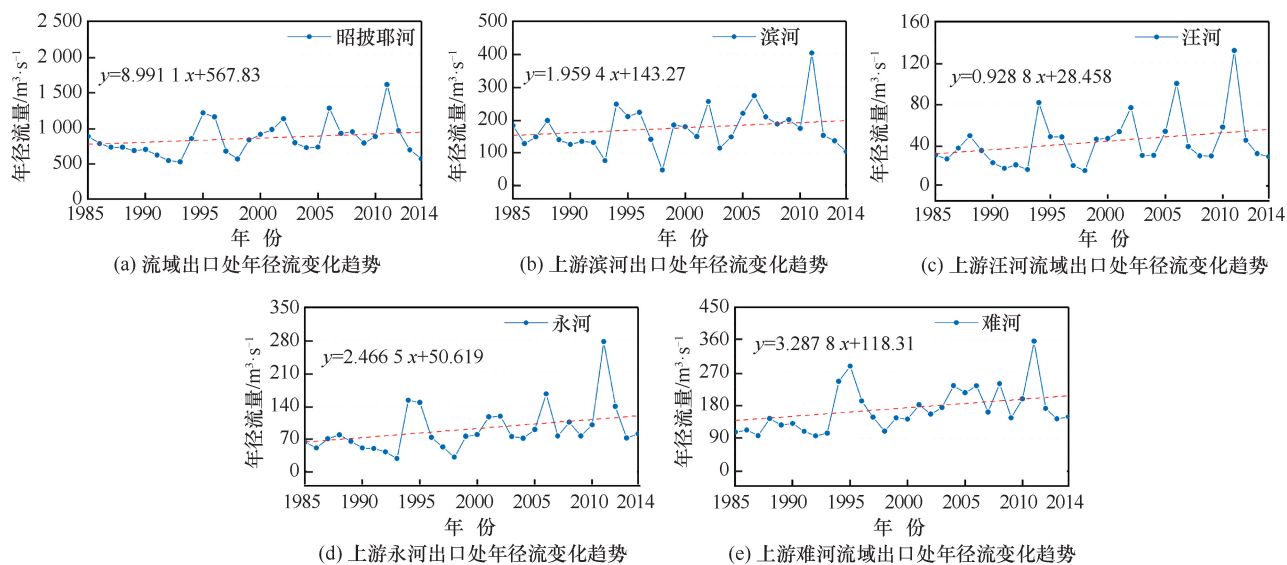


图 16 昭披耶河流域出口处与上游子流域出山口处年径流变化趋势

表 3 过去 30 年昭披耶河流域出口处及上游四个子流域出山口处洪水和水文干旱各特征量的变化速率

流域	洪水历时 /天·次 <sup>-1</sup>	洪峰 /m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ·次 <sup>-1</sup>	洪量 /m <sup>3</sup> ·次 <sup>-1</sup>	干旱峰值 /次 <sup>-1</sup>	干旱历时 /月·次 <sup>-1</sup>	干旱烈度 /次 <sup>-1</sup>
昭披耶河	-0.009	3.049	0.154	0.059	0.170	0.083
滨河	-0.060	3.055*	0.002	0.002	0.065	0.042
汪河	-0.058*	0.439	0.005	-0.009	0.004	0.008
永河	-0.051	1.657*	0.005	0.010	0.259	0.115
难河	0.018	2.474	0.027	-0.002	0.087	0.013

注：\*表示存在显著变化趋势(P<0.05)。

水和水文干旱的加剧趋势也与暴雨和气象干旱的变化趋势相一致，这里我们可以初步认为过去 30 a，雨季南亚季风和热带气旋的显著增强带来了暴雨历时、峰值和总雨量的上升，进而导致了洪水的加剧；气象干旱历时、峰值和烈度的上升，进而导致了水文干旱的加剧。

#### 4 结论

本论文收集整理了昭披耶河流域过去 30 a 的气象、水文以及下垫面实测资料，搭建了昭披耶河流域高时空分辨率的分布式水文模型 GBHM，分析了流域水循环要素、植被以及土地利用的变化趋势和特征，揭示了季风和热带气旋影响下的流域降水时空变化规律；采用 POT 方法和标准径流指数分别提取了洪水和水文干旱事件，进而分析了历史年径流、洪水和干旱特征的变化规律。主要结论如下。

(1)GBHM 模型搭建。本研究搭建的 GBHM 模型可以较好地模拟昭披耶河流域天然水文过程。其中模型在滨河子流域的模拟效果最好，在汪河子流域的模拟效果相对较差，这可能是由于汪河子流域气象站和雨量站分布较为稀疏，气象空间插值不确定性较大导

致的。

(2)降水演变规律。昭披耶河流域降水空间分布不均,多集中在东北和东南地区;过去30 a,全流域及上游滨河、汪河、永河和难河四个子流域面平均年降雨量均呈现显著上升趋势,上升速率分别为1.25 mm/a、1.06 mm/a、1.50 mm/a、2.61 mm/a和0.65 mm/a;流域年内降水分布呈现双峰形态,其中3—5月出现的第一个峰主要受南亚季风影响,7—9月出现的第二个峰主要受西北太平洋季风和热带气旋的影响。过去30 a,在雨季南亚季风和热带气旋的显著增强趋势下,流域暴雨事件的降水历时、降水总量以及降水峰值均呈现显著上升趋势;流域气象干旱事件的历时、峰值和烈度均呈上升趋势。

(3)气温、实际蒸散发以及径流深演变规律。昭披耶河流域气温空间分布随高程变化,北部山区气温偏低,中部平原区气温偏高;过去30 a,全流域以及上游四个子流域面平均年气温均呈现显著增加趋势,增加速率分别为0.89 °C/10 a、1.65 °C/10 a、1.88 °C/10 a、1.66 °C/10 a和1.48 °C/10 a。昭披耶河全流域年平均实际蒸散发呈增加趋势,其中上游区域增加趋势更大,中下游平原增加趋势相对较小;过去30 a,全流域以及上游四个子流域面平均年均实际蒸散发均呈现不显著的上升趋势,上升速率分别为0.03 mm/a、0.64 mm/a、1.17 mm/a、0.99 mm/a和0.17 mm/a。昭披耶河流域大部分地区年平均径流深呈现上升趋势,其中上游山区上升趋势更大,而中下游平原东部地区呈现减少趋势;全流域以及上游四个子流域面平均年径流深均呈现显著上升趋势,上升速率分别为0.19 mm/a、0.12 mm/a、0.29 mm/a、0.75 mm/a和0.75 mm/a。

(4)土地利用与植被变化特征。森林为昭披耶河流域主要土地利用类型,上游山区多被森林覆盖,中下游平原区以农田为主;从2005年至今,流域呈现森林退化、农田扩张以及城镇用地增加的趋势;过去30 a,昭披耶河流域及上游四个子流域面平均年最大叶面积指数均呈现显著下降趋势,下降速率分别为每10年下降0.13、0.13、0.20、0.38和0.11。

(5)年径流、洪水、干旱变化规律。过去30 a,昭披耶河流域以及上游四个子流域年径流均呈现显著上升趋势,上升速率分别为2.84亿m<sup>3</sup>/a、0.62亿m<sup>3</sup>/a、0.29亿m<sup>3</sup>/a、0.78亿m<sup>3</sup>/a和1.04亿m<sup>3</sup>/a。昭披耶河流域以及上游滨河、汪河和永河洪水历时均呈现减小趋势,难河呈现微弱的增加趋势;整个流域和四个子流域的洪峰和洪量均呈现增加趋势,综合来看昭披

耶河流域洪水风险存在变大趋势。昭披耶河、上游滨河和永河干旱峰值均呈现微弱的增加趋势,汪河和难河呈现微弱的减小趋势;整个流域和四个子流域的干旱历时和烈度均呈现增加趋势,综合来看昭披耶河流域水文干旱风险存在变大趋势。

本文针对昭披耶河流域水循环变化规律认识不足的现状,阐明了过去30 a在昭披耶河流域雨季南亚季风和热带气旋显著增强趋势影响下暴雨洪水加剧,揭示了南亚季风主导了雨季前期的降雨峰值、西北太平洋季风及热带气旋主导了雨季后期的降雨峰值,提升了对昭披耶河流域水循环规律的认识。

## 参考文献:

- [1] WANG Y, WANG A, ZHAI J, et al. Tens of thousands additional deaths annually in cities of China between 1.5 degrees C and 2.0 degrees C warming [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 3376.
- [2] 刘宁, 张志彤, 黄金池. 泰国湄南河2011年洪水观察与启示 [J]. *中国工程科学*, 2013, 15(4): 108-112.
- [3] PROMCHOTE P, SIMON WANG S Y, JOHNSON P G. The 2011 great flood in Thailand: Climate diagnostics and implications from climate change [J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(1): 367-379.
- [4] GROUP W B. Thai flood 2011: Rapid assessment for resilient recovery and reconstruction planning: Overview (English) [R]. Washington, D. C.: World Bank Group, 2012.
- [5] 田鹏. 气候与土地利用变化对径流的影响研究 [D]. 西安: 西北农林科技大学, 2012.
- [6] YANG W, LONG D, BAI P. Impacts of future land cover and climate changes on runoff in the mostly afforested river basin in North China [J]. *Journal of Hydrology*, 2019e, 570: 201-219.
- [7] ZHANG M, WEI X. The effects of cumulative forest disturbance on streamflow in a large watershed in the central interior of British Columbia, Canada [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(7): 2021-2034.
- [8] BRADSHAW C J A, SODHI N S, PEH K S H, et al. Global evidence that deforestation amplifies flood risk and severity in the developing world [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(11): 2379-2395.
- [9] KNIGHTON J, CONNEELY J, WALTER M T. Possible increases in flood frequency due to the loss of eastern hemlock in the northeastern United States: observational insights and predicted impacts [J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(7): 5342-5359.
- [10] VILLARREAL-ROSAS J, WELLS J A, SONTER L J, et al. The impacts of land use change on flood protection services among multiple beneficiaries [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 806(Pt 2): 150577.
- [11] ARNOLD J G, FOHRER N. SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling [J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(3): 563-572.
- [12] CHEN W, HONG H, LI S, et al. Flood susceptibility modelling

- using novel hybrid approach of reduced-error pruning trees with bagging and random subspace ensembles[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 575: 864-873.
- [13] JIA Y, NI G, KAWAHARA Y, et al. Development of WEP model and its application to an urban watershed [J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15(11): 2175-2194.
- [14] REFSGAARD J C. Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 198(1): 69-97.
- [15] YANG D, HERATH S, MUSIAKE K. A hillslope-based hydrological model using catchment area and width functions [J]. *International Association of Scientific Hydrology Bulletin*, 2002, 47(1): 49-65.
- [16] RANGSIWANICHPONG P, KAZAMA S, EKKAWATPANIT C. Analysing the relationship between ocean indices and rainfall in the Chao Phraya River Basin [J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(S1): 230-238.
- [17] ZHAO B, LEI H, YANG D, et al. Runoff and sediment response to deforestation in a large Southeast Asian monsoon watershed [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 606: 127432.
- [18] KIGUCHI M, TAKATA K, HANASAKI N, et al. A review of climate-change impact and adaptation studies for the water sector in Thailand [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(2): 023004.
- [19] UNESCO. Water for people, water for life: the United Nations world water development report; a joint report by the twenty-three UN agencies concerned with freshwater[M]. Paris: UNESCO, 2003.
- [20] SUPRATID S, ARIBARG T, SUPHARATID S. An integration of stationary wavelet transform and nonlinear autoregressive neural network with exogenous input for baseline and future forecasting of reservoir inflow[J]. *Water Resources Management*, 2017, 31(3): 1-21.
- [21] YANG D, LI C, HU H, et al. Analysis of water resources variability in the Yellow River of China during the last half century using historical data[J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(6): 308-322.
- [22] TSAI C, BEHERA S K, WASEDA T. Indo-China monsoon indices [J]. *Sci Rep*, 2015, 5: 8107.
- [23] TAKAHASHI H G, YASUNARI T. A climatological monsoon break in rainfall over indochina; A singularity in the seasonal march of the Asian summer monsoon [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(8): 1545-1556.
- [24] KALNAY E, KANAMITSU M, KISTLER R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437-471.
- [25] LEHNER B, VERDIN K L, JARVIS A. New global hydrography derived from spaceborne elevation data [J]. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 2008, 89(10): 93-94.
- [26] ZHU Z, BI J, PAN Y, et al. Global data sets of vegetation leaf area index (LAI) 3g and fraction of photosynthetically active radiation (FPAR) 3g derived from global inventory modeling and mapping studies (GIMMS) normalized difference vegetation index (NDVI3g) for the period 1981 to 2011[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(2): 927-948.
- [27] HENGL T, MENDES DE JESUS J, HEUVELINK G B, et al. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning[J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0169748.
- [28] RAWLS W J, BRAKENSIEK D L, SAXTON K E. Estimation of soil water properties[J]. *Trans. ASAE*, 1982, 25: 1316-1320.
- [29] YANG D, HERATH S, MUSIAKE K. Development of a geomorphology-based hydrological model for large catchments [J]. *Proceedings of Hydraulic Engineering*, 1998, 42: 169-174.
- [30] 缪清华. 基于分布式模型和多源降水的中小河流洪水预警预报方法[D]. 北京: 清华大学, 2019.
- [31] 高冰. 长江流域的陆气耦合模拟及径流变化分析[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [32] 卢韦伟. 我国东南沿海流域的径流和暴雨洪水变化分析[D]. 北京: 清华大学, 2020.
- [33] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles[J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290.
- [34] GUPTA H V, SOROOSHIAN S, YAPO P O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 1999, 4(2): 135-143.
- [35] MORIASI D N, ARNOLD J G, LIEW M W V, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *Transactions of the Asabe*, 2007, 50(3): 885-900.
- [36] SHIROVICH L. Turbulence and the Dynamics of Coherent Structures; Part I: Coherent Structures, Q[J]. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 1987, 45: 561-571.
- [37] 秦宁生, 吴永森. 青海东部春季降水量的经验正交分解特征及与海温和 500 hPa 高度场的相关[J]. *高原气象*, 1994, 13(4): 91-96.
- [38] 任建成, 王峰, 卢晓宁. 基于 EOF 和小波分析的山东省年降水时空变化特征[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(2): 179-183.
- [39] 王佐鹏, 张颖超, 熊雄, 等. 基于 EOF 的南京气温变化特征及热岛效应研究[J]. *陕西气象*, 2019, 326(6): 29-33.
- [40] 余志明, 邹清水, 张雄杰. 基于 EOF 分析方法的闽江下游高潮位时空变化特征分析[J]. *水利科技*, 2021, 172(3): 20-24.
- [41] TOMKRATOKE S, SIRISUP S. Influence and variability of monsoon trough and front on rainfall in Thailand [J]. *International Journal of Climatology*, 2021, 42(1): 619-634.
- [42] LANG M, OUARDA T B M J, BOBÉE B. Towards operational guidelines for over-threshold modeling [J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 225(3): 103-117.
- [43] MEDIERO L, SANTILLÁN D, GARROTE L, et al. Detection and attribution of trends in magnitude, frequency and timing of floods in Spain [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 517: 1072-1088.
- [44] YANG S, YANG D, CHEN J, et al. Real-time reservoir operation using recurrent neural networks and inflow forecast from a distributed hydrological model [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 579: 124229.
- [45] TANG W G, CAREY S K. HydRun: A MATLAB toolbox for rainfall-runoff analysis [J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(15): 2670-2682.
- [46] SHAMSHIRBAND S, HASHEMI S, SALIMI H, et al. Predicting standardized streamflow index for hydrological drought using machine

- learning models[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2020, 14(1): 339-350.
- [47] SCHWARZ M A, OWARIBE K, KARTENBECK J, et al. Desmosomes and hemidesmosomes-constitutive molecular-components [J]. *Annual Review of Cell Biology*, 1990, 6: 461-491.
- [48] AHO K, DERRYBERRY D, PETERSON T. Model selection for ecologists: The worldviews of AIC and BIC[J]. *Ecology*, 2014, 95(3): 631-636.
- [49] NALBANTIS I, TSAKIRIS G. Assessment of hydrological drought revisited[J]. *Water Resources Management*, 2008, 23(5): 881-897.
- [50] TABARI H, NIKBAKHT J, HOSSEINZADEH T P. Hydrological drought assessment in Northwestern Iran based on streamflow drought index(SDI)[J]. *Water Resources Management*, 2012, 27(1): 137-151.
- [51] CHANG C P, WANG Z, MCBRIDE J, et al. Annual cycle of Southeast Asia-Maritime continent rainfall and the asymmetric monsoon transition[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(2): 287-301.
- [52] YANG R W, ZHANG W K, GUI S, et al. Rainy season precipitation variation in the Mekong River basin and its relationship to the Indian and East Asian summer monsoons[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 52(9-10): 5691-5708.
- [53] WANG B, FAN Z. Choice of South Asian summer monsoon indices [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1999, 80(4): 629-638.
- [54] WANG B, WU R G, LAU K M. Interannual variability of the Asian summer monsoon: Contrasts between the Indian and the Western North Pacific-East Asian monsoons[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(20): 4073-4090.
- [55] YANG R W, WANG J. Interannual variability of the seesaw mode of the interface between the Indian and East Asian summer monsoons [J]. *Climate Dynamics*, 2019b, 53(5-6): 2683-2695.
- [56] HUANG R H, CHEN J L, WANG L, et al. Characteristics, processes, and causes of the spatio-temporal variabilities of the East Asian monsoon system [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2012, 29(5): 910-942.
- [57] WANG B. Comments on “Choice of south Asian summer monsoon indices”: Reply [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(4): 822-824.
- [58] SINGHRATTNA N, RAJAGOPALAN B, KUMAR K K, et al. Interannual and interdecadal variability of Thailand summer monsoon season[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(11): 1697-1708.
- [59] CHEN T C, YOON J H. Interannual variation in Indochina summer monsoon rainfall: Possible mechanism[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(11): 1979-1986.
- [60] TAKAHASHI H G, FUJINAMI H, YASUNARI T, et al. Role of tropical cyclones along the monsoon trough in the 2011 Thai flood and interannual variability[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(4): 1465-1476.

(责任编辑 王海锋)