

王慧杰, 逯家宝, 周君, 等. 1961—2014年中国洪水-热浪复合极端事件特征的时空演变规律[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(6): 13-25. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.002

WANG Huijie, LU Jiabao, ZHOU Jun, et al. Spatiotemporal evolution patterns of successive flood-heat extreme events in China from 1961 to 2014[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(6): 13-25. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.002

1961—2014年中国洪水-热浪复合极端事件特征的时空演变规律

王慧杰¹, 逯家宝², 周君³, 武传号^{4,5}, 黎梓涛²

(1. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120; 2. 暨南大学 环境与气候学院, 广东 广州 511443; 3. 暨南大学 生命科学技术学院, 广东 广州 510632; 4. 河海大学 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 5. 河海大学 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098)

摘要:【目的】全球气候变暖加剧了洪水和热浪等极端事件发生的频率, 导致洪水热浪复合极端事件(Successive flood-heat extreme, SFHE)风险上升, 研究SFHE事件的时空演变规律, 对复合灾害风险防控及应对具有重要的科学意义。【方法】基于观测和再分析数据, 采用多种统计分析方法, 分析了过去54 a(1961—2014)中国九大流域SFHE特征(频次、历时、洪水和热浪的间隔IFH、覆盖面积)的时空演变规律, 探讨了不同地区洪水和热浪对SFHE发生的影响。【结果】结果表明:(1)中国SFHE频次、历时和土地覆盖面积整体呈显著增加趋势, 而IFH呈显著减少趋势;(2)空间上, 西南诸河中部、长江流域南部和珠江流域北部SFHE发生的频次较高(>34次/10 a), 而历时在长江下游、东南诸河和淮河流域南部较长(>13 d);(3)不同流域SFHE频次的周期性差异较大, 但整体存在2.8 a的主周期, 该周期在1990 s至2000 s前期最为显著;(4)九大流域SFHE发生的频次由洪水频次主导, 其影响在淮河流域最大。【结论】研究结果表明中国地区发生SFHE的风险呈显著上升趋势, 其突发性增强, 总的来看洪水对SFHE的发生起主导作用。

关键词: 洪水热浪复合事件; 洪水; 热浪; 演变特征; 中国; 长江流域; 气候变化; 时空变化

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.002

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)06-0013-13



与作者互动
请扫码
聊科研

Spatiotemporal evolution patterns of successive flood-heat extreme events in China from 1961 to 2014

WANG Huijie¹, LU Jiabao², ZHOU Jun³, WU Chuanhao^{4,5}, LI Zitao²

(1. Water Resources and Hydropower Planning and Design General Institute, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China; 2. College of Environment and Climate, Jinan University, Guangzhou 511443, Guangdong, China; 3. College of Life Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China; 4. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 5. Yangtze Institute for Conservation

收稿日期: 2024-08-27; 修回日期: 2024-10-01; 录用日期: 2024-10-08; 网络出版日期: 2024-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(52279016); 广东省自然科学基金项目(2023A1515011760)

作者简介: 王慧杰(1987—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事水文水资源、水利规划及战略研究。E-mail: wanghuijie@giwp.org.cn

通信作者: 武传号(1985—), 男, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: wuch0907@hotmail.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Abstract: [Objective] Global warming has intensified the frequency of extreme events such as floods and heat waves, leading to an increased risk of successive flood-heat extreme (*SFHE*) events. Studying the spatiotemporal evolution of *SFHE* events has important scientific significance for the prevention and response to composite disaster risks. [Methods] Based on observation and reanalysis data, multiple statistical analysis method were used to analyze the spatiotemporal evolution of *SFHE* characteristics (frequency, duration, interval between floods and heat waves *IFH*, coverage area) in nine major river basins in China over the past 54 years (1961—2014), and explore the relative impact of floods and heatwaves on *SFHE* occurrence. [Results] The result indicate that: (1) The frequency, duration, and land coverage area of *SFHE* show a significant increasing trend, while *IFH* has a significant decreasing trend in China. (2) Spatially, the risk of *SFHE* is higher in the middle of the Southwest River basin, the south of the Yangtze River basin and the north of the Pearl River basin (>34 times/decade), while the duration is longer in the lower reaches of the Yangtze River basin, the Southeast River basin and the south of the Huaihe River basin (>13 d). (3) The periodicity of *SFHE* frequency varies in different watersheds, but there is a main cycle of 2.8a in China, which is most significant from the 1990s to the early 2000s. (4) The frequency of *SFHE* occurrence in the nine river basins is dominated by flood frequency, with the greatest impact in the Huaihe River basin. [Conclusion] The research result demonstrate that the risk of *SFHE* occurrence is significantly increasing, and the suddenness of *SFHE* is increasing in China. Overall, floods play a dominant role in the occurrence of *SFHE*.

Keywords: successive flood-heat extreme events; flood; heatwave; evolutionary characteristics; China; Yangtze River Basin; climate change; spatiotemporal changes

0 引言

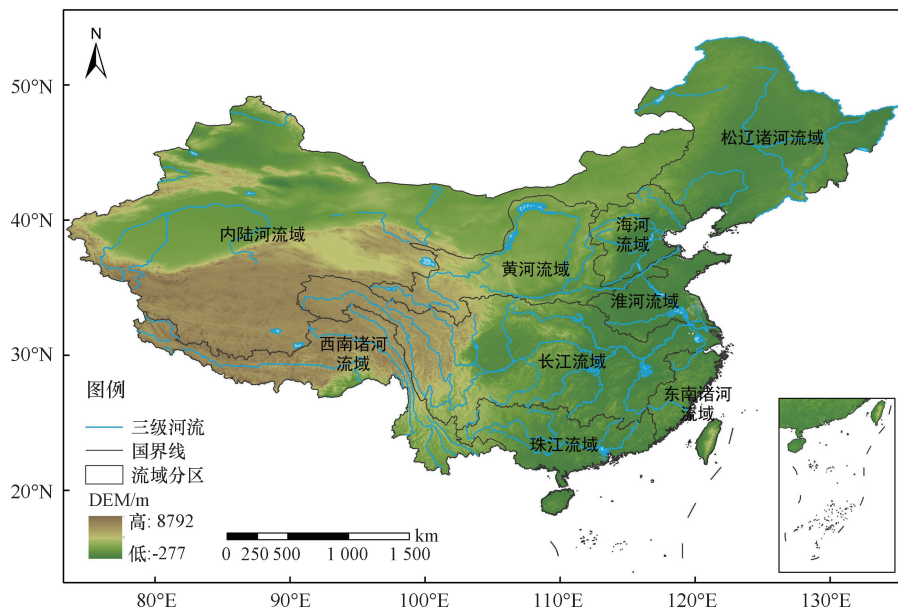
洪水和热浪作为两种常见的极端气候事件, 对人类社会和生态环境造成了严重影响, 近年来随着全球气候变化加剧, 这两种极端事件发生的频次呈现不断上升的趋势^[1-3], 由两者同时遭遇造成的复合灾害也越来越受到关注^[4-6]。研究表明, 洪水和热浪发生的机制可能存在联系, 并且可以复合事件的形式同时或连续发生^[7]。与单一洪水和热浪事件相比, 洪水热浪复合极端事件 (Successive flood-heat extreme, *SFHE*) 对人类健康、社会经济、作物产量和生态环境所造成的损害更严重^[8]。如 2018 年 7 月日本发生了严重的 *SFHE* 事件, 共造成 300 多人死亡和超过 100 亿美元的经济损失^[12]; 2019 年澳大利亚昆士兰州发生的 *SFHE* 事件, 导致超过 12 亿美元的经济损失^[13]。随着气候变化的加剧, *SFHE* 事件发生的风险也将加剧^[3,8-11]。

SFHE 因其发生机制的复杂性和对社会经济、生态环境的严重破坏性吸引了国内外学者的广泛关注。CHEN 等^[14]首次给出了 *SFHE* 事件的定义: 在短时间内 (如 7 d) 连续发生洪水和热浪灾害。YANG 等^[15]研究发现, 北方夏季季内振荡可以加剧中国南方的极端降水和极端高温发生概率, 进而加大 *SFHE* 事件发生的概率。刘慕嘉等^[16]基于中国 639 个气象站点 1961—2020 年逐日降水和最高气温数据, 分析了中

国洪水-热浪复合极端事件总频次及发生概率等时空变化特征。结果表明, *SFHE* 平均发生概率呈现显著上升趋势, 且与洪水及热浪独立极端事件相比, *SFHE* 事件增长幅度最快。WANG 等^[17]研究发现, 人为影响导致 2020 年长江中下游地区的极端梅雨增加了 6.5%, 华南极端高温增加了 1 °C, 加剧了华东地区的 *SFHE* 事件。在预测方面, GU 等^[8]利用 CMIP6 气候模式和水文模型定量评估了未来全球 *SFHE* 事件的变化特征, 发现到 21 世纪末 *SFHE* 事件的覆盖面积将增加 2~6 倍, 且极端热浪是 *SFHE* 事件加剧的主导因素。

目前, 针对中国地区的 *SFHE* 研究尚处于初级阶段, 主要关注 *SFHE* 发生概率及其影响, 很少关注 *SFHE* 其他特征 (如历时、洪水和热浪的间隔天数、覆盖面积等) 的变化, 限制了对 *SFHE* 多属性特征变化的理解; 另一方面, 关于中国不同地区 *SFHE* 与洪水和热浪之间影响关系尚不明晰, 此方面的分析有助于加深对 *SFHE* 事件演化机制的理解。

鉴于此, 本文以中国九大流域片区 (长江、黄河、珠江、海河、淮河、松辽诸河、内陆河、西南诸河和东南诸河^[18]) 为研究区域, 基于观测、再分析等多源数据, 采用多种分析方法, 系统评估过去 54 a (1961—2014) *SFHE* 频次、历时、*SFHE* 期间洪水和热浪的间隔以及土地覆盖面积等重要特征的时空演变规律, 定量解析中国不同地区 *SFHE* 与洪水和热浪之



该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2020)4630 号的标准地图制作, 底图无修改

图 1 中国九大流域片区分布

Fig. 1 Spatial distribution of the nine major river basins in China

间关系, 评估洪水和热浪对 $SFHE$ 发生的相对影响。研究结果有助于更好理解全球变暖背景下中国地区 $SFHE$ 的演化机制, 为灾害防范和应对措施提供科学支持。

1 数据与方法

1.1 资料数据

本文的研究时段为 1961—2014 年, 日观测气象数据(日最高、最低气温和日降水)来自中国科学院气候变化研究中心 CN05 格点化观测数据集^[19], 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。该数据集基于中国 2 400 个气象站点的观测资料, 通过距平逼近法, 由气候场和距平场分别插值后叠加得到。

日径流量数据来自美国国家航空航天局(NASA)全球陆地数据同化系统 GLDAS-2.0 驱动 CLSM (Catchment Land Surface Model) 陆面模型生成的数据集^[20] (https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GLDAS_CLSM025_D_2.0/)。该产品利用先进的陆地表面建模和数据同化技术, 生成陆地表面状态和通量的最佳场, 集成全球高分辨率 (2.5° 至 1 km) 的数据产品^[21]。本研究下载的 GLDAS 径流数据的空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 通过线性插值方法将该数据插值到与气象数据同一分辨率网格点上。

1.2 研究方法

1.2.1 $SFHE$ 定义

本文利用阈值的方法识别热浪、洪水事件, 将日

径流量超过研究期的 99th 分位数且至少持续一天定义为洪水事件^[10], 至少连续三天的日最高气温或日最低气温超过研究期 (1961—2014 年) 95th 分位数定义为热浪事件^[10,22]。根据所定义的洪水和热浪事件, 采用基于事件巧合率分析方法^[23], 将 7 d 内连续发生洪水和热浪事件定义为 $SFHE$ 事件^[14]

$$SFHE = \sum_{j=1}^{N_F} \theta \left[\sum_{i=1}^{N_H} I_{[0, \Delta T]}(t_i^H - t_j^F) \right] \quad (1)$$

式中, t_i^H 、 t_j^F 分别为热浪事件和洪水事件的序列集; N_F 、 N_H 分别为洪水和热浪事件的数量; θ 为 Heaviside 函数, 当 $x \leq (>) 0$ 时, $\theta(x) = 0(1)$; $I_{[0, \Delta T]}$ 的计算公式为

$$I_{[0, \Delta T]}(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [0, \Delta T] \\ 1, & x \in [0, \Delta T] \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\Delta T = 7$ 。如果在 7 d 内发生多次洪水或热浪事件, 则只考虑第一次洪水或热浪事件, 以避免重复计算^[14]。识别完一次 $SFHE$ 后, 将该复合事件中的热浪和洪水事件排除掉后继续识别 $SFHE$, 以确保 $SFHE$ 事件的完整性。

根据 $SFHE$ 事件识别结果, 进一步提取 $SFHE$ 特征, 包括事件频次(研究期内发生 $SFHE$ 事件的数量)、土地覆盖面积(一年内至少发生一次 $SFHE$ 事件的网格占总网格数的比值)、 $SFHE$ 事件期间洪水和热浪间隔的天数 IFH (Interval between Flood and Heatwave) 和 $SFHE$ 历时(d)。

1.2.2 趋势检验

Mann-Kendall (M-K) 趋势检验是世界气象组织推荐的一种分析气象和水文序列趋势的非参数方法^[24-25], 其优点是不需要遵循任何特定的分布, 且不受非平稳数据和缺失值的干扰^[26-27]。Sen's 斜率估计是一种估算时间序列趋势变化幅度的非参数方法^[28]。目前, M-K 趋势检验和 Sen's 斜率估计被广泛用于水文气象趋势研究中^[29-31]。本研究采用 M-K 趋势检验法和 Sen's 斜率估计法对热浪、洪水和 $SFHE$ 等特征变量进行趋势分析, 显著性水平设为 0.05。

1.2.3 小波分析

小波分析是傅里叶变换的替代方法, 通过将信号分解成不同频率的子信号, 并对子信号进行分析, 在时域和频域上提取信号中的局部特征信息, 捕捉到信号的瞬态变化和非平稳特征, 能够识别出气象水文序列中不同频率成分和不同时间尺度的主要周期变化, 已广泛应用于气象水文领域的周期性变化特征的研究^[32-33]。连续小波变换是 Morlet 提出的一种时域和频域分析方法^[34], 该方法对任意的 $f(t) \in L^2(R)$, 定义为^[35]

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

式中, $W_f(a, b)$ 为小波变换系数; a 和 b 分别为尺度因子和平移因子; $\psi(t)$ 为基小波; t 为时间; $f(t)$ 为原始信号。本研究选用 Morlet 子波作为小波变换的基小波, 采用红噪声作为背景谱对小波谱进行检验^[36]。

小波方差是小波系数模离差的平方和, 表现了波动能量随尺度的变化, 可以用来识别时间序列中各尺度扰动的相对强度, 对应峰值处的尺度为该时间序列的主要周期, 其表达式为^[37]

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{u})^2 \quad (4)$$

式中, S^2 为小波方差; c_i 为小波系数; u 为小波系数的均值; n 为小波系数的个数。

1.2.4 偏相关分析

本文利用偏相关分析评估 *SFHE* 频次与洪水和热浪频次之间的关系。偏相关分析方法可以通过控制一个或多个额外变量的影响, 量化两个或多个变量之间的关系^[38]

$$r_{12,3} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{1-r_{12}^2}\sqrt{1-r_{13}^2}} \quad (5)$$

式中, $r_{12,3}$ 为保持变量 3 不变的情况下变量 1 和 2 之间的偏相关系数 ($0 \sim 1$); r_{12} 、 r_{13} 、 r_{23} 分别为变量 1 和 2、变量 1 和 3、变量 2 和 3 之间的相关系数。

在计算偏相关系数之前, 首先对 *SFHE*、洪水和热浪频次的时间序列进行去趋势处理, 以消除趋势变化对相关性的干扰^[39]。以热浪为控制变量, 计算 *SFHE* 频次与洪水频次之间的偏相关系数; 以洪水为控制变量, 计算 *SFHE* 频次与热浪频次之间的偏相关系数, 相关性的显著性水平设置为 0.05。当洪水(热浪)频次与 *SFHE* 频次的偏相关系数大于热浪(洪水)频次与 *SFHE* 频次的偏相关系数时, 则认为 *SFHE* 发生受洪水(热浪)影响更大。

2 结果分析

2.1 *SFHE* 特征空间分布特征

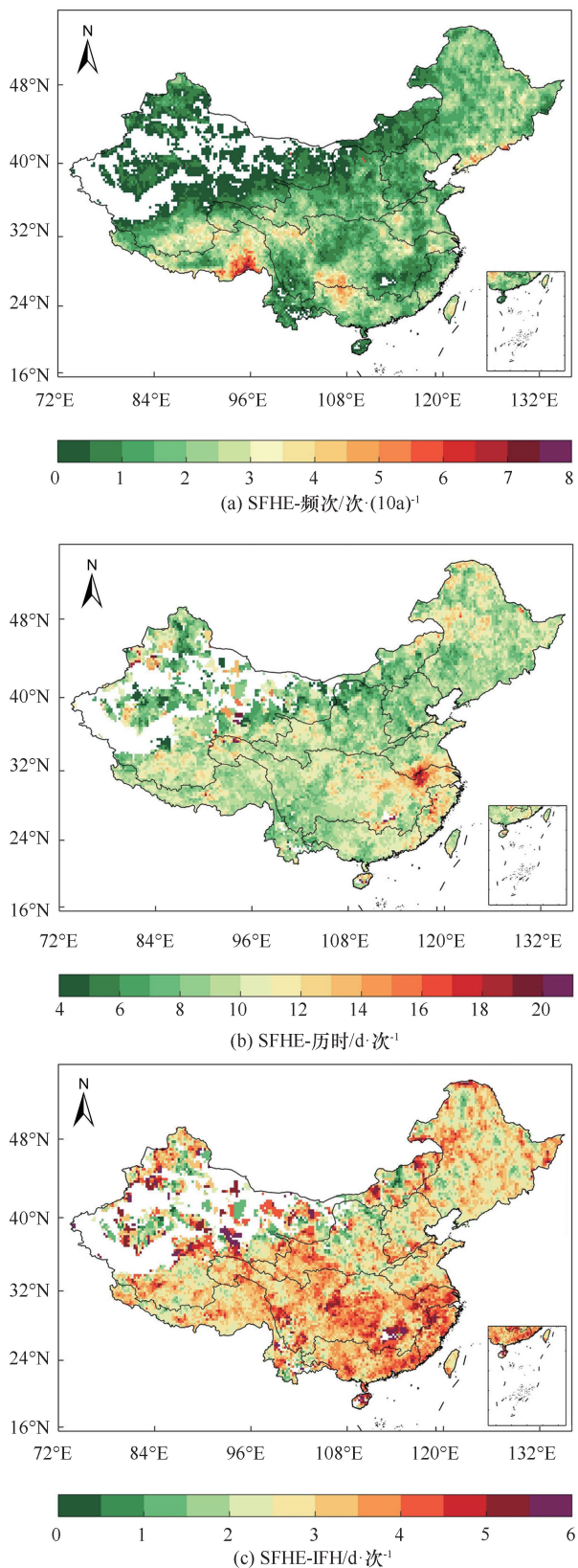
图 2 为 1961—2014 年 *SFHE* 频次、历时和 *IFH* 的空间分布。从图 2(a) 可以看出, 西南诸河中部、长江流域南部和珠江流域北部频次较高 (> 3 次/10 a), 而西北内陆河流域等地区发生的 *SFHE* 频次较低 (≤ 1 次/10 a), 其原因可能是这些地区发生洪水发生的频次较少。中国大部分地区 *SFHE* 历时在 7~13 d 之间, 其中长江下游、东南诸河和淮河流域南部历时较长 (> 13 d), 西北内陆河流域历时较短, 大部分地区小于 10 d [见图 2(b)]。从图 2(c) 可以看出, *SFHE* 的 *IFH* 在华南和西南大部分地区较长 (> 3 d), 而在华北部分地区较短 (< 3 d), 最小的 *IFH* 集中分散在内陆河流域、黄河中游、海河流域中部和松辽河流域南部等小部分地区 (< 2 d), *IFH* 越小表明 *SFHE* 的突发性越强。

图 3 为 1961—2014 年中国及九大流域 *SFHE* 频次、历时和 *IFH* 的小提琴图 (图中小提琴区域为核密度曲线, 白色方块为 25%、75% 分位数, 中间水平线为平均值, 黑点为离群点)。从图 3(a) 可以看出, *SFHE* 频次的平均值从高到低依次为西南诸河 (2.43 次/10 a)、珠江 (2.14 次/10 a)、淮河 (1.96 次/10 a)、东南诸河 (1.95 次/10 a)、松辽河 (1.92 次/10 a)、长江 (1.80 次/10 a)、海河 (1.46 次/10 a)、黄河 (1.43 次/10 a) 和内陆河 (0.53 次/10 a)。其中, 内陆河流域 *SFHE* 频次变化范围更集中, 可能是由于该流域内大部分地区未发生过 *SFHE* 事件有关; 而西南诸河的 *SFHE* 频次分布差异较大, 表现出较强的异质性。

图 3(b) 显示, *SFHE* 平均历时由长到短依次为东南诸河 (11.05 d)、淮河 (10.52 d)、长江 (10.19 d)、珠江 (9.65 d)、松辽河 (9.48 d)、西南诸河 (9.3 d)、黄河 (8.81 d)、内陆河 (8.78 d) 和海河 (8.54 d)。 *IFH* 的均值由大到小依次为东南诸河 (3.70 d)、珠江 (3.45 d)、长江 (3.45 d)、西南诸河 (2.94 d)、淮河 (2.91 d)、松辽河 (2.83 d)、海河 (2.71 d)、黄河 (2.68 d) 和内陆河 (2.64 d), 其中内陆河流域 *IFH* 变化的范围最大, 主要与该地区较大的空间异质性相关 [见图 2(c)]。

2.2 *SFHE* 特征趋势分析

SFHE 历时和 *IFH* 的 M-K 趋势的空间分布如图 4 所示 (由于 *SFHE* 频次趋势变化不显著且大部分为 0, 故没有绘图)。 *SFHE* 的历时和 *IFH* 趋势根据 *SFHE*



该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4630号的标准地图制作, 底图无修改

图2 1961—2014年SFHE频次、历时和IFH的空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of SFHE frequency, duration, and IFH during 1961—2014

事件序列计算得到。从图4(a)看出, 中国大部分地区SFHE历时呈不显著的上升趋势, 但在空间上展现出具有较强的异质性, 其中内陆河流域南部、西南诸河西部和松辽河流域西北部的小部分地区SFHE历时呈显著增加趋势(0.5~3 d/次), 下降的趋势主要分散在东北、华中和华南部分地区。IFH趋势变化无明显空间分布规律, 大部分地区IFH呈不显著的上升趋势, 同样展现出较强的空间异质性, 如图4(b)所示。

2.3 SFHE特征的年际变化分析

图5为1961—2014年中国及九大流域SFHE频次、历时、IFH和土地覆盖面积的年际变化序列。图5(a)显示, SFHE的平均频次在0.03~0.45次/a, 总体呈显著增加趋势(0.0027次/a)。其中, 内陆河(0.0013次/a)、长江(0.003次/a)、黄河(0.0022次/a)、西南诸河(0.0058次/a)、珠江(0.0029次/a)和东南诸河(0.0065次/a)增加趋势显著。

如图5(b)所示, SFHE平均历时总体呈显著上升趋势(0.0234 d/次), 其中内陆河(0.0125 d/次)、长江(0.0242 d/次)、松辽河(0.0187 d/次)、黄河(0.0206 d/次)、西南诸河(0.0437 d/次)、珠江(0.0263 d/次)和东南诸河(0.0605 d/次)增加趋势显著。相比之下, 九大流域中除内陆河流域的IFH呈不显著增加趋势(0.0024 d/次)以外, 其他八个流域均呈现不显著下降趋势[见图5(c)]。IFH总体表现出显著下降趋势(-0.0094 d/次), 表明中国地区的SFHE的突发性有上升的态势。

中国地区SFHE事件的土地覆盖面积比在3.18%~31.18%之间, 总体呈显著增加趋势(0.2163%/a), 最大和最小的覆盖面积比分别出现在1998和1976年[见图5(d)]。各大流域的SFHE的土地覆盖面积比均呈现增加趋势, 且内陆河(0.1159%/a)、长江(0.2392%/a)、黄河(0.1958%/a)、西南诸河(0.4302%/a)、珠江(0.2603%/a)和东南诸河(0.585%/a)增加趋势显著。从年际变化来看, 珠江流域最高的覆盖面积比发生在1998年(74.85%), 是所有流域中SFHE的土地覆盖面积比最高的一年。

2.4 SFHE频次的周期变化分析

图6为中国及九大流域SFHE发生频次时间序列的小波功率谱和全局小波谱图。

从图6(a)可以看出, 中国SFHE频次序列存在2.3~2.8 a的显著性周期变化, 主周期约为2.8 a, 该周期在1990s至2000s前期最为显著。内陆河流

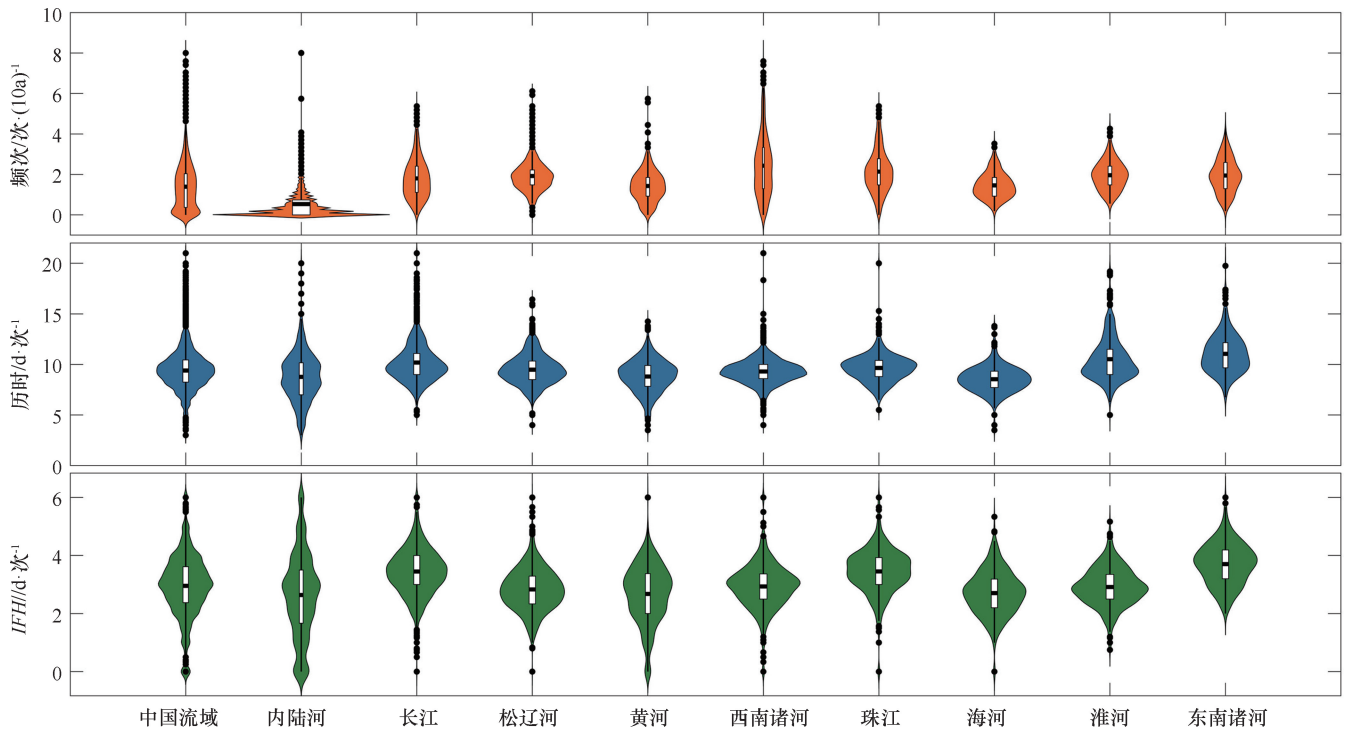


图3 1961—2014年中国及九大流域SFHE频次、历时和IFH的小提琴图

Fig. 3 Violin plots of SFHE frequency, duration and IFH in China and nine major river basins during 1961—2014

域的SFHE频次存在约3.3~4.5 a的周期变化,其主周期约为4.5 a,该周期在2000 s后期变化显著[见图6(b)]。长江流域存在约2.8 a的频次,该周期在1990 s至2000 s前期最为显著[见图6(c)]。松辽河和黄河流域分别存在约30.1 a和18.1 a的周期变化,但未通过显著性检验[见图6(d)、(e)]。西南诸河存在约2.3~2.8 a的显著性周期变化,主周期约为2.8 a,在2000年前后显著[见图6(f)]。珠江、海河和淮河流域分别存在约30.1 a、18.1 a和30.1 a的显著周期变化特征,但各周期变化的数据边缘效应较大[见图6(g)、(h)、(i)]。东南诸河存在约2.3~2.8 a的显著周期变化,其主周期约为2.8 a,该周期在1995年前后、2000 s—2010 s前期显著[见图6(j)]。

2.5 SFHE与洪水和热浪的偏相关分析

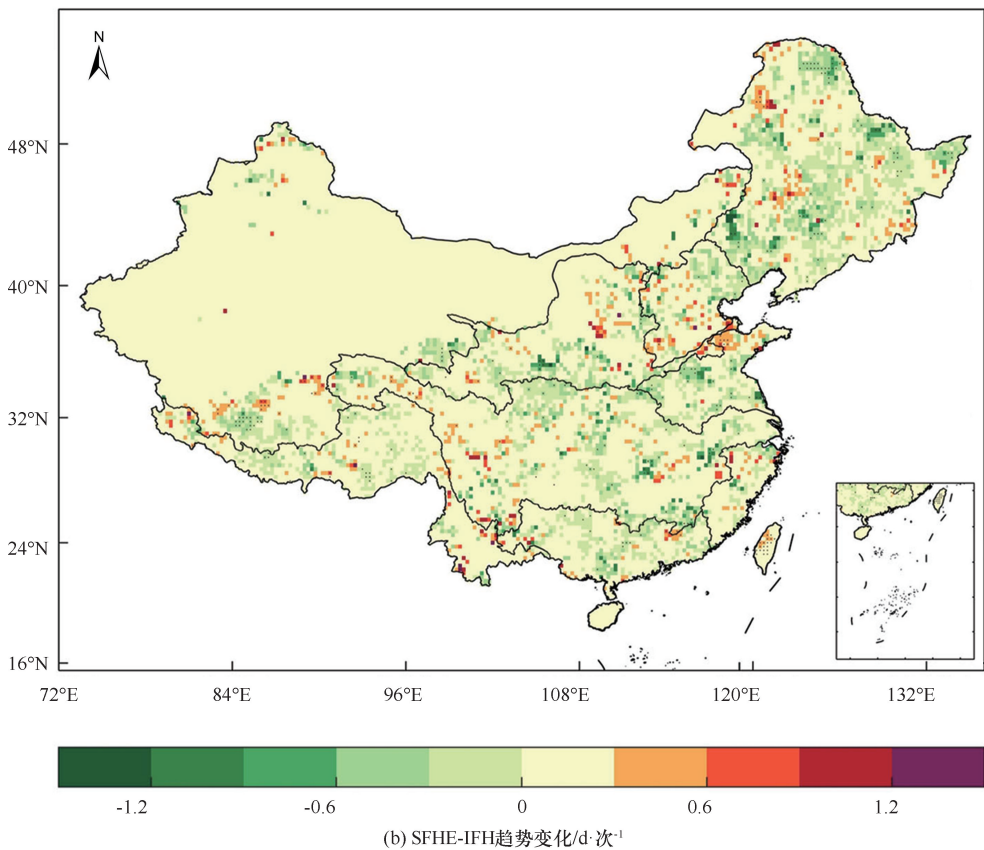
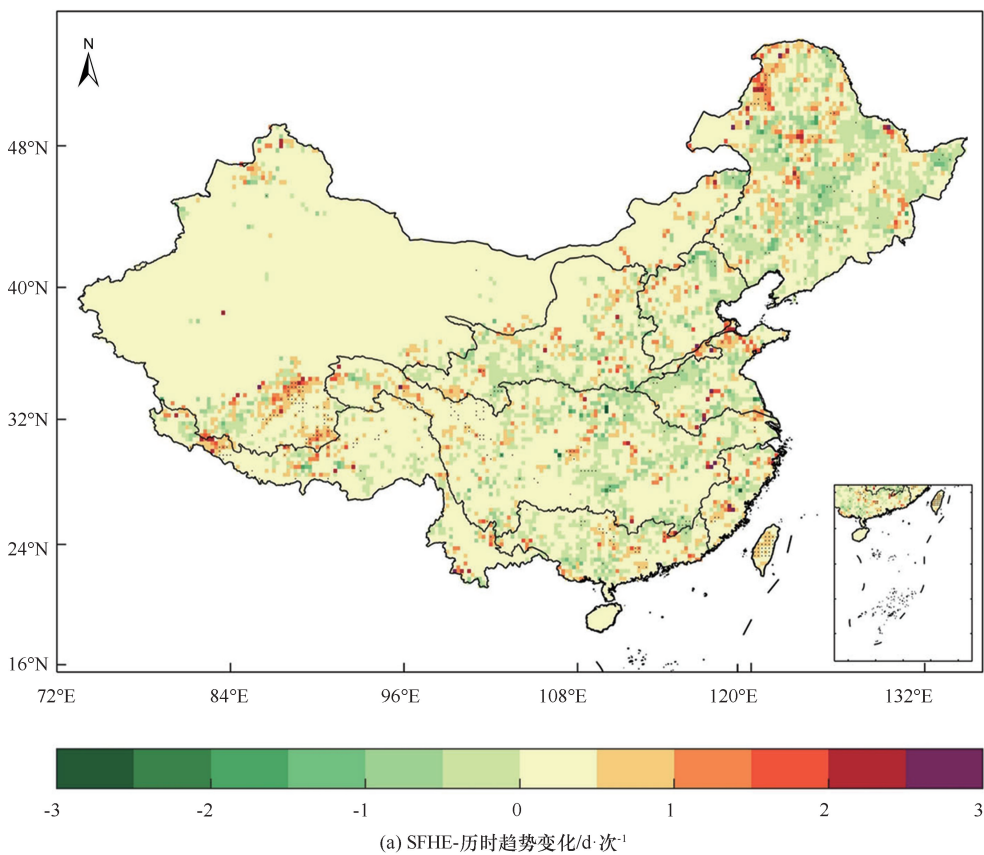
图7(a)为中国及九大流域洪水和热浪频次与SFHE频次正相关的空间分布图,绿色(红色)表示洪水(热浪)频率与SFHE频率正相关区域。从图7(a)可以看出,中国大部分区域的洪水频次与SFHE频次的偏相关系数大于热浪频次与SFHE频次的偏相关系数。其中内流河流域南部、西南诸河西部、松辽河、海河、黄河流域上中游部分地区、淮河、长江流域上游南部和珠江流域的洪水与SFHE频次的偏相关系数

大于0.4,表明这些区域洪水对SFHE发生的影响更大。而西南诸河南部、长江流域上游中部和下游南部、东南诸河中部、松辽河流域零散区域、海河流域南部和黄河流域部分区域的热浪与SFHE频次的偏相关系数更高(>0.2),表明在这些区域热浪对SFHE发生的影响更大。

根据偏相关系数的大小,进一步统计了中国及九大流域洪水和热浪主导SFHE发生的流域面积百分比,如图7(b)所示。九大流域均是洪水对SFHE发生的贡献大于热浪。其中,淮河流域的洪水贡献最大(97.6%),内陆河流域洪水的贡献最小(59.1%)。热浪对SFHE发生贡献最大发生在东南诸河(14.7%),而内陆河流域最小(0.9%),几乎可以忽略不计。总体来看,中国地区由洪水主导SFHE发生的面积占比为78.5%,热浪占比为4.1%。

3 讨论

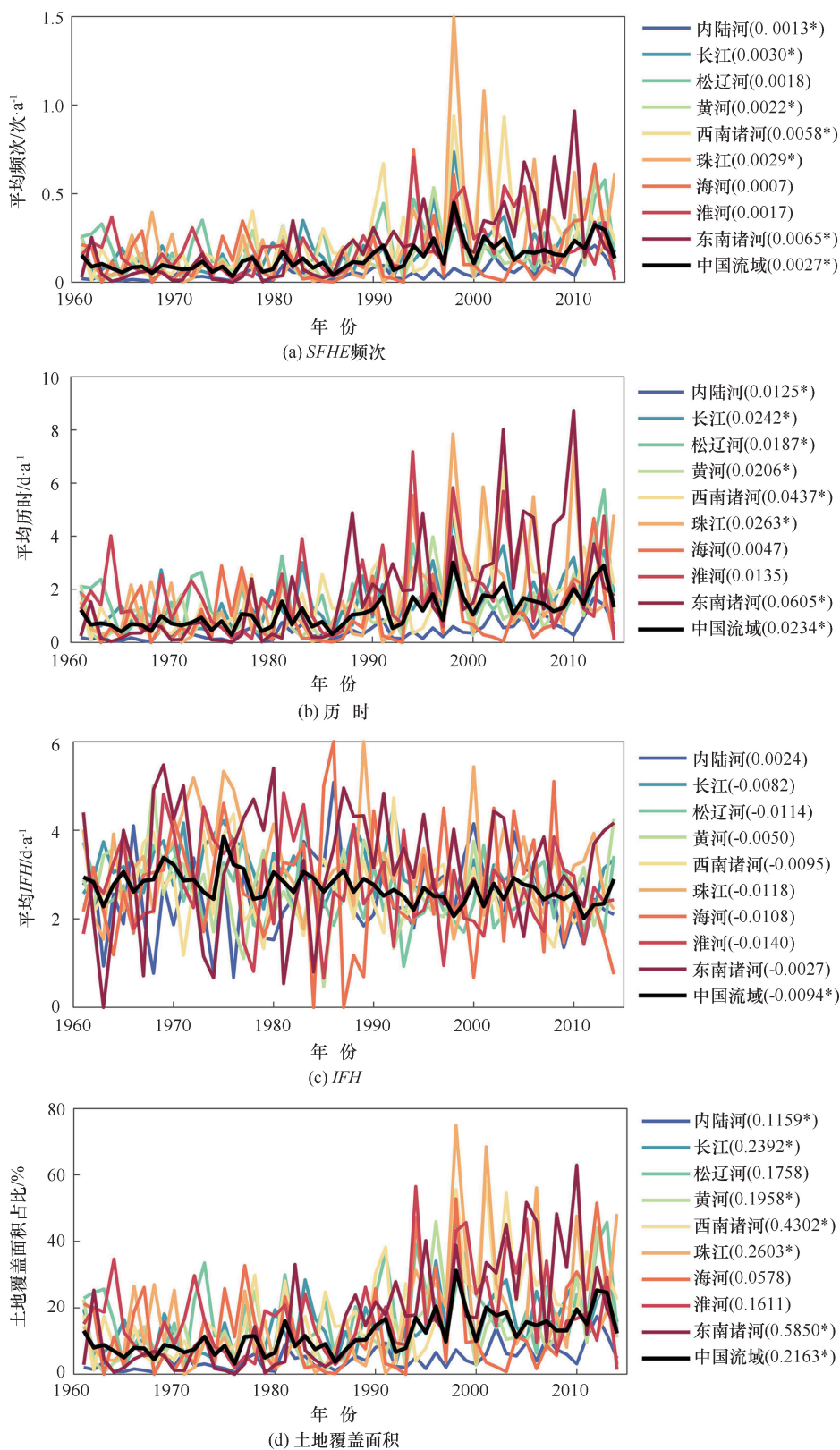
SFHE的发生机制复杂多样,与陆地-大气反馈、热带气旋、大气环流等密切相关^[12-14]。全球变暖背景下,热浪频发,地表温度升高,感热通量增加,对流可用势能增强,太阳向下辐射减少,可降水量增加,为极端降水的发展提供了有利条件^[40-42]。另一方面,强热带气旋的大气记忆通过其释放的非绝热加热对高空反气旋加强和稳定的滞后效应,为洪水后的



该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4630号的标准地图制作, 底图无修改。图中黑色的点表示通过了5%的显著性水平检验

图4 1961—2014年中国SFHE历时和IFH趋势变化的空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of trend magnitudes in SFHE duration and IFH in China during 1961—2014



图例括号中的数字表示趋势值, *表示通过了5%的显著性水平检验

图5 1961—2014年中国及九大流域 *SFHE* 频次、历时、*IFH* 和土地覆盖面积比的年际变化

Fig. 5 Interannual variability of *SFHE* frequency, duration, *IFH*, and land exposure area in China and nine major river basins during 1961—2014

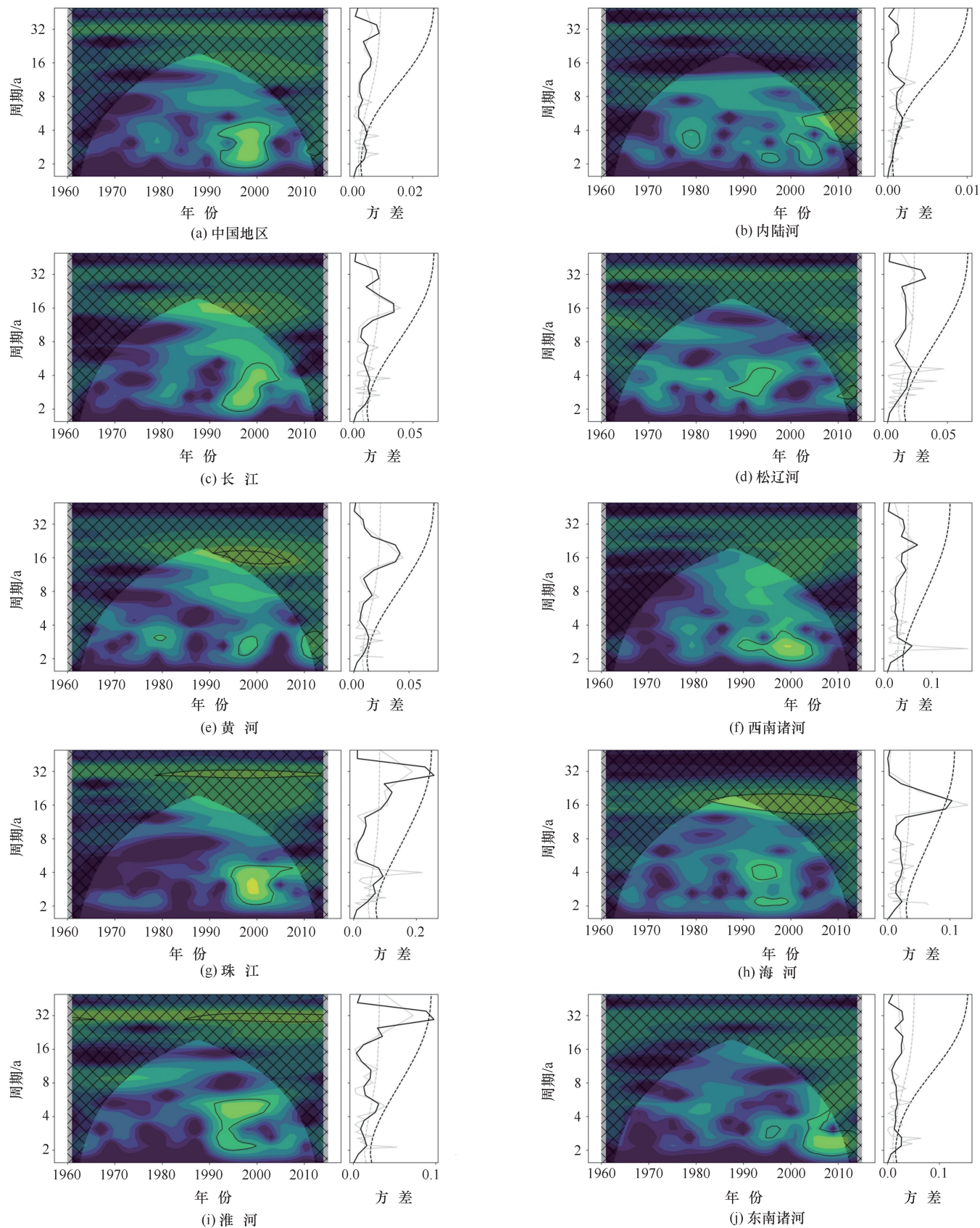
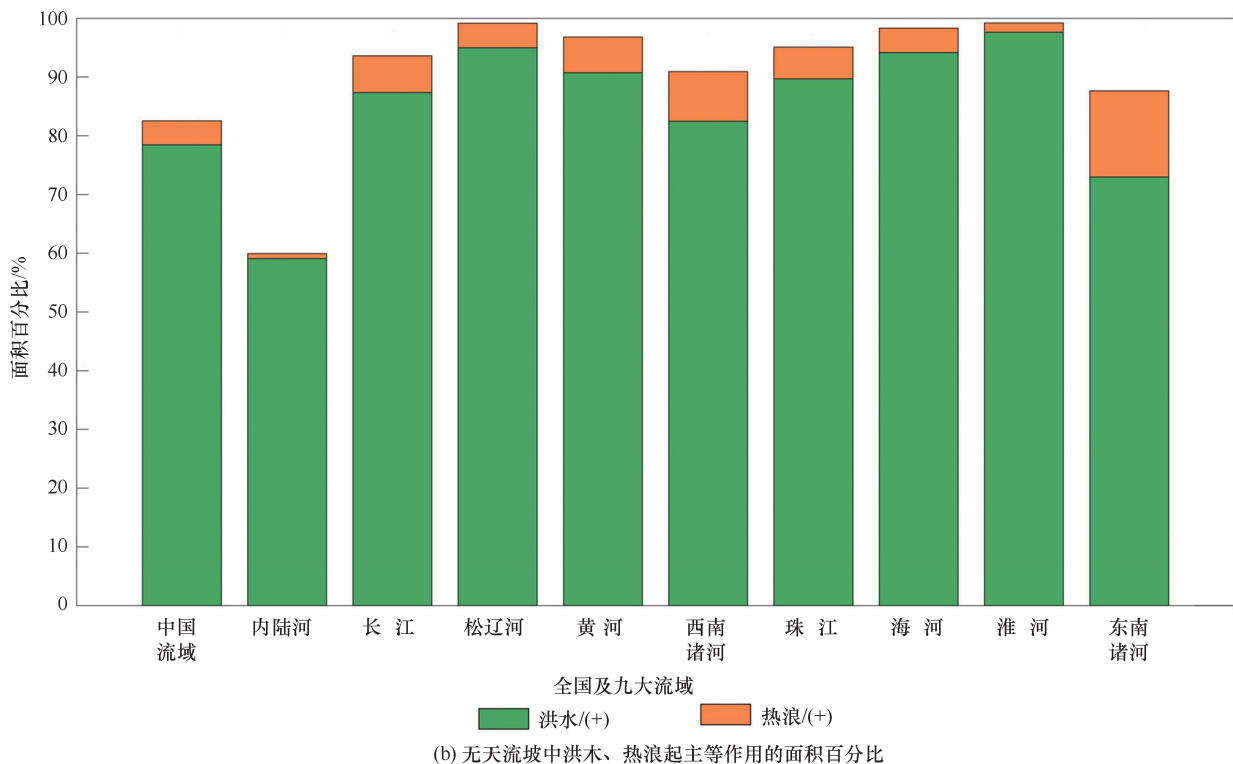
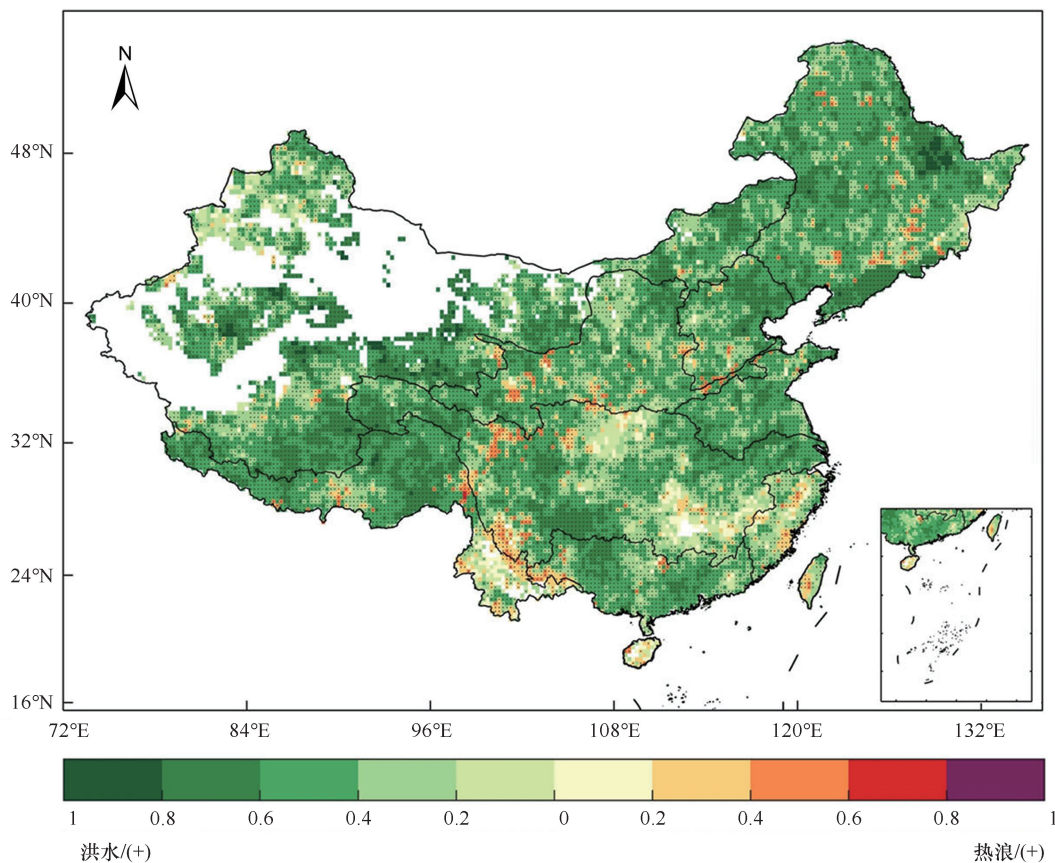


图6 中国及九大流域 SFHE 频次时间序列的小波功率谱和全局小波谱

Fig. 6 The wavelet power spectrum and global wavelet spectrum of SFHE frequency in China and nine river basins



该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4630号的标准地图制作, 底图无修改。图7(a)的图例表示偏相关系数, 黑色的点表示通过5%显著水平检验 ($P < 0.05$); 图7(b)只统计了偏相关系数显著的网格点, $P < 0.05$

图7 洪水和热浪频次与SFHE频次偏相关空间分布以及九大流域中洪水、热浪起主导作用的面积百分比

Fig. 7 Spatial distribution of the partial correlation coefficients between SFHE frequency and flood and heatwave frequency and the percentage of area dominated by floods and heatwaves in nine river basins

热浪提供了途径^[8]。此外, 交替出现气旋和反气旋的相互作用以及厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)引起的季节内振荡也会导致热浪和洪水同时发生^[43-45]。

本文基于径流深数据, 采用相对阈值的方法识别 *SFHE* 事件, 系统分析了中国九大流域 *SFHE* 特征的时空演变规律, 发现中国西南诸河、珠江和长江流域 *SFHE* 风险较高, 这与 CHEN 等^[14] 研究结论一致。需要指出的是, 本文在数据和方法上仍存在一定的局限性: (1)所用的 GLDAS 径流深数据在区域尺度上仍然存在一定的不确定性, 如高估地表径流^[46], 进而影响极端径流识别的准确性; (2)虽然极端径流是表征洪水事件的有效指标^[11], 但在汇流的过程中受流域下垫面和人类活动(如水库调蓄)双重因素影响, 只有大部分极端径流会演化成洪水事件, 这可能会高估洪水频次, 且无法区分江河、城市等不同类型的洪水事件, 限制了对不同类型洪水对未来气候变暖响应机制的理解。针对以上问题, 未来可使用具有物理机制的大尺度水动力模型模拟流域出口断面的洪水事件^[47], 以提高 *SFHE* 特征识别的稳健性。

4 结 论

本文基于 1961—2014 年气象观测和 GLDAS 径流数据, 通过超阈值和事件巧合率分析方法, 在网格尺度上识别中国地区 *SFHE* 事件及其特征(频次、历时、*IFH*、土地覆盖面积), 系统评估了中国及九大流域 *SFHE* 事件的时空变化特征, 探讨了洪水和热浪对 *SFHE* 发生的相对影响。主要结论如下。

(1)在过去 54 a, *SFHE* 发生频次较高的区域主要集中在西南诸河中部, 长江流域南部和珠江流域北部等地区(>3 次/10 a), 并且 *IFH* 较长(>3 d), 大部分地区 *SFHE* 历时在 7~13 d。整体来看, *SFHE* 频次、历时和土地覆盖面积比均呈显著增加趋势(0.002 7 次/a, 0.023 4 d/次, 0.216 3%/a), 而 *IFH* 呈显著减少趋势(-0.009 4 d/次), 意味着 *SFHE* 的突发风险不断增加。

(2)从周期变化看, *SFHE* 在不同流域发生频次的周期性差异较大, 但整体存在 2.8 a 的显著性年际变化主周期, 且该周期在 1990 s 至 2000 s 前期最为显著。

(3)九大流域洪水均对 *SFHE* 的发生起主导影响, 其中影响面积比最大为淮河流域(97.6%), 而热浪起主导作用所贡献的最大面积比发生在东南诸河流域(14.7%)。

参考文献(References):

- [1] GHANBARI M, ARABI M, KAO S C, et al. Climate change and changes in compound coastal-riverine flooding hazard along the U. S. coasts[J]. *Earth's Future*, 2021, 9(5): e2021EF002055.
- [2] 胡义明, 温骥宇, 王静, 等. 欧美亚典型发达国家洪水标准及应对气候变化策略[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(3): 605-617.
HU Y M, WEN Q Y, WANG J, et al. Flood standards and coping strategies for climate change in typical developed countries in Europe, America, and Asia[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(3): 605-617.
- [3] AGHAKOUCHAK A, CHIANG F, HUNING L S, et al. Climate extremes and compound hazards in a warming world[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2020, 48(1): 519-548.
- [4] PERKINS S E. A review on the scientific understanding of heatwaves: Their measurement, driving mechanisms, and changes at the global scale[J]. *Atmospheric Research*, 2015, 164: 242-267.
- [5] XU Z, FITZGERALD G, GUO Y, et al. Impact of heatwave on mortality under different heatwave definitions: A systematic review and meta-analysis[J]. *Environment international*, 2016, 89: 193-203.
- [6] MADSEN H, LAWRENCE D, LANG M, et al. Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 3634-3650.
- [7] HAO Z, SINGH V P, HAO F. Compound extremes in hydroclimatology: a review[J]. *Water*, 2018, 10(6): 718.
- [8] GU L, CHEN J, YIN J, et al. Global increases in compound flood-hot extreme hazards under climate warming[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(8): e2022GL097726.
- [9] 余荣, 翟盘茂. 关于复合型极端事件的新认识和启示[J]. *大气科学学报*, 2021, 44(5): 645-649.
YU Rong, ZHAI Panmao. Advances in scientific understanding on compound extreme events[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2021, 44(5): 645-649.
- [10] LIAO Z, CHEN Y, LI W, et al. Growing threats from unprecedented sequential flood-hot extremes across China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(18): e2021GL094505.
- [11] ZHOU J, WU C, YE P J F, et al. Anthropogenic climate change exacerbates the risk of successive flood-heat extremes: Multi-model global projections based on the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project [J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 889: 164274.
- [12] WANG S S Y, KIM H, COUMOU D, et al. Consecutive extreme flooding and heat wave in Japan: Are they becoming a norm? [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2019, 20(10): e933.
- [13] HAGUE B S. Seasonal climate summary for Australia and the

- Southern Hemisphere (summer 2018—2019): Extreme heat and flooding prominent [J]. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 2021, 71(1): 147-158.
- [14] CHEN Y, LIAO Z, SHI Y, et al. Detectable increases in sequential flood-heatwave events across China during 1961—2018 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(6): e2021GL092549.
- [15] CHEN Y, ZHAI P. Simultaneous modulations of precipitation and temperature extremes in Southern parts of China by the boreal summer intraseasonal oscillation[J]. *Climate Dynamics*, 2017, 49(9/10): 3363-3381.
- [16] 刘慕嘉, 杨秀芹, 姚飞, 等. 1961—2020年中国洪水-热浪复合极端事件时空变化特征[J]. *中国农村水利水电*, 2023(4): 167-176.
- LIU Mujia, YANG Xiuqin Q, YAO Fei, et al. Spatial-temporal changes in compound extreme flood-heatwave events over China during 1961—2020[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023(4): 167-176.
- [17] WANG J, CHEN Y, TETT S F B, et al. Storyline attribution of human influence on a record-breaking spatially compounding flood-heat event [J]. *Science Advances*, 2023, 9(48): eadi2714.
- [18] XU K, XU B, JU J, et al. Projection and uncertainty of precipitation extremes in the CMIP5 multimodel ensembles over nine major basins in China[J]. *Atmospheric Research*, 2019, 226: 122-137.
- [19] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(4): 1102-1111.
- WU Jia, GAO Xuejie. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(4): 1102-1111.
- [20] LI B, RODELL M, SHEFFIELD J, et al. Long-term, non-anthropogenic groundwater storage changes simulated by three global-scale hydrological models[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 10746.
- [21] RODELL M, HOUSER P R, JAMBOR U, et al. The global land data assimilation system [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85(3): 381-394.
- [22] 温昕晟, 杨双艳, 高铭祥, 等. 夏季欧亚中高纬大气 ISO 与欧洲阻塞频率的联系及其对极端高温事件的协同作用 [J]. *大气科学*, 2024, 48(3): 1043-1058.
- WEN Xinsheng, YANG Shuangyan, GAO Mingxiang, et al. Relation of atmospheric ISOs over the mid-high latitudes of Eurasia to the European blocking frequency and their co-effect on extreme hot events during boreal summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2024, 48(3): 1043-1058.
- [23] HE X, SHEFFIELD J. Lagged compound occurrence of droughts and pluvials globally over the past seven decades [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(14): e2020GL087924.
- [24] 王孟浩, 江善虎, 任立良, 等. 渭河流域热浪事件影响下的骤旱评估[J]. *水利发展研究*, 2023, 23(9): 21-28.
- WANG Menghao, JIANG Shanhu, REN liliang, et al. Evaluation of flash drought under the impact of heat waves events in the Weihe River Basin[J]. *Water Resources Development Research*, 2023, 23(9): 21-28.
- [25] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1945, 13: 245-259.
- [26] ALI R, KURIQI A, ABUBAKER S, et al. Long-term trends and seasonality detection of the observed flow in Yangtze River using Mann-Kendall and Sen's innovative trend method[J]. *Water*, 2019, 11(9): 1855.
- [27] DANESHVAR VOUSOUGH F, SAMADI M, et al. Wavelet-based trend analysis of hydrological processes at different timescales [J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2015, 6(3): 414-435.
- [28] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [29] ALMAZROU M, ŞEN Z. Trend Analyses methodologies in hydro-meteorological records[J]. *Earth Systems and Environment*, 2020, 4(4): 713-738.
- [30] DABANLI İ, ŞEN Z, YELEĞEN M Ö, et al. Trend assessment by the innovative-Sen method[J]. *Water Resources Management*, 2016, 30(14): 5193-5203.
- [31] KHALID S, NAZ A, RAHMAN Z, et al. Trend analysis of hydro-meteorological variables of Islamabad, Pakistan: a spatio-temporal view from Pothohar region[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2023, 135(3): 1-14.
- [32] 谢智博, 穆兴民, 高鹏, 等. 基于 R/S 和 Morlet 小波分析的北洛河上游径流变化特征 [J]. *水土保持研究*, 2022, 29(2): 139-144.
- XIE Zhibo, MU Xingmin, GAO Peng, et al. Variation characteristics of run off in the upper reaches of Beiluo River based on R/S and Morlet Wavelet analysis [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(2): 139-144.
- [33] 刘志方, 刘友存, 郝永红, 等. 黑河出山径流过程与气象要素多尺度交叉小波分析[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(6): 1137-1146.
- LIU Zhifang, LIU Youcun, HAO Yonghong, et al. Multi-time scale cross-wavelet transformation between runoff and climate factors in the upstream of Heihe River[J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(6): 1137-1146.
- [34] TORRENCE C, COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(1): 61-78.
- [35] 杨锡震, 陈俊英, 张秋雨, 等. 基于小波特征和冬小麦生理参数的土壤水分高光谱模型优化[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(10): 66-75.
- YANG Xizhen, CHEN Junying, ZHANG Qiuyu, et al. Optimization

- of the soil moisture model based on hyperspectral inversion by integrating wavelet features and growth parameters of winter wheat [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(10): 66-75.
- [36] 郭琳, 宫辉力, 朱锋, 等. 基于小波分析的地下水水位与降水的周期性特征研究[J]. 地理与地理信息科学, 2014, 30(2): 35-38.
- GUO Lin, GONG Huili, ZHU Feng, et al. Cyclical characteristics of groundwater level and precipitation based on wavelet analysis [J]. Geography and Geo-Information Science, 2014, 30(2): 35-38.
- [37] 徐芝英, 胡云锋, 甄霖, 等. 基于小波的浙江省 *NDVI* 与自然-人文因子多尺度空间关联分析[J]. 地理研究, 2015, 34(3): 567-577.
- XU Zhiying, HU Yunfeng, ZHEN Lin, et al. Wavelet-based multi-scale analysis of *NDVI* and background factors in Zhejiang Province [J]. Geographical Research, 2015, 34(3): 567-577.
- [38] BROWN B L, HENDRIX S B. Partial correlation coefficients [J]. Encyclopedia of Statistics in Behavioral Science, 2005, 3: 1518-1523.
- [39] ZHANG H, ZHAN C, XIA J, et al. Responses of vegetation to changes in terrestrial water storage and temperature in global mountainous regions [J]. Science of the Total Environment, 2022, 851: 158416.
- [40] ZHANG W, VILLARINI G. Deadly compound heat stress-flooding hazard across the central United States [J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(15): e2020GL089185.
- [41] NING G, LUO M, ZHANG W, et al. Rising risks of compound extreme heat-precipitation events in China [J]. International Journal of Climatology, 2022, 42(11): 5785-95.
- [42] YOU J, WANG S. Higher probability of occurrence of hotter and shorter heat waves followed by heavy rainfall [J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(17): e2021GL094831.
- [43] CHIANG J C, SOBEL A H. Tropical tropospheric temperature variations caused by ENSO and their influence on the remote tropical climate [J]. Journal of climate, 2002, 15(18): 2616-31.
- [44] JOSEPH D, KUMAR V S. Response of ocean surface waves to the co-occurrence of boreal summer intra-seasonal oscillation and El Niño Southern Oscillation [J]. Climate Dynamics, 2021, 57(3/4): 1155-71.
- [45] SATOH M, OOUCHI K, NASUNO T, et al. The Intra-Seasonal Oscillation and its control of tropical cyclones simulated by high-resolution global atmospheric models [J]. Climate Dynamics, 2011, 39(9/10): 2185-206.
- [46] LV M, LU H, YANG K, et al. Assessment of runoff components simulated by GLDAS against UNH-GRDC dataset at global and hemispheric scales [J]. Water, 2018, 10(8): 969.
- [47] UDDIN S, REVEL M, MODI P, et al. Quantifying the relative contributions of climate change and ENSO to flood occurrence in Bangladesh [J]. Environmental Research Letters, 2023, 18(10): 104027.

(责任编辑 王海锋)