张子龙，陈敏，王昭生. 基于频率-强度联合分类的中国极端降水及人口暴露度时空演变特征[J]. 水利水电技术(中英文)，2026，57(9)：89-103. DOI：10. 13928/j. cnki. wrahe. 2026. 09. 007
ZHANG Zilong，CHEN Min，WANG Zhaosheng. Spatiotemporal evolution of extreme precipitation and population exposure in China based on a frequency-intensity combination classification[J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2026，57(9)：89-103. DOI：10. 13928/j. cnki. wrahe. 2026. 09. 007

基于频率-强度联合分类的中国极端降水及人口暴露度时空演变特征

张子龙[1]，陈　敏[1,2]，王昭生[3]

(1. 三峡大学 水利与环境学院，湖北 宜昌　443002；2. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心，湖北 宜昌　443002；3. 中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室，北京　100101)

摘　要：【目的】极端降水的演变及其引发的人口暴露风险是全球气候变化研究的重要议题。传统的单一维度(频率或强度)评估难以全面揭示极端降水演变的复杂性，旨在从“频率-强度”双重维度视角，解析中国区域极端降水演变格局，并定量识别人口暴露度变化及其驱动因素，为制定精准防灾策略及气候变化适应方案提供科学参考。【方法】基于多源融合降水产品(MSWEP)和中国历史人口空间分布千米网格数据集，采用 *K*-means 聚类方法构建了极端降水频率-强度联合分类体系。对比 1981—1999 年与 2000—2020 年两个时期，识别了极端降水类型的不同转变模式，并探讨了人口暴露度演变特征并量化气候、人口因子等的贡献。【结果】研究结果表明：极端降水强度与频率的演变呈现明显非对称性特征，全国约 23%的区域发生了极端降水类型转变，其中以频率或强度单方面为主导的演化模式(如强度增强而频率不变)最为常见，而强度与频率同步变化的区域仅占约 1%。此外，两个时期极端降水人口暴露度变化也表现出显著的空间异质性，全国约 70%的区域暴露度呈上升趋势，华南和华东沿海地区增幅尤其明显。全国范围来看，人口变化是驱动暴露度变化的主要因素(贡献率约 67%)，气候变化的贡献次之(约 30%)，但在我国东北和西北地区，气候因子对暴露度变化的主导作用明显。【结论】研究成果揭示出我国极端降水在频率、强度两个维度上差异化演变的复杂特征，单一维度的传统评估可能低估或错估灾害风险，未来极端天气灾害风险管理需要基于极端降水类型演化的异质性制定差异化的防灾减灾及适应性策略。

关键词：极端降水类型；人口暴露度；时空演变；强度；频率；气候变化；防灾减灾；时空演变

DOI：10. 13928/j. cnki. wrahe. 2026. 09. 007　　**开放科学(资源服务)标志码(OSID)**：

中图分类号：P426. 62　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-0860(2026)09-0089-15

听语音　与作者互动　聊科研

收稿日期：2026-02-24；**修回日期**：2026-04-30；**录用日期**：2026-05-07；**网络出版日期**：2026-05-21

基金项目：国家自然科学基金项目(41807513)；2025 年秦岭气候经济研究中心(院)开放研究基金项目(202503)

作者简介：张子龙(1997—)，男，硕士研究生，主要从事全球气候变化、极端降水研究。E-mail：songsong1682020@163. com

通信作者：陈　敏(1985—)，女，副教授，博士，主要从事生态水文方面的研究。E-mail：minchen@ctgu. edu. cn

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

Spatiotemporal evolution of extreme precipitation and population exposure in China based on a frequency-intensity combination classification

ZHANG Zilong[1], CHEN Min[1,2], WANG Zhaosheng[3]

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China; 2. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Yichang 443002, Hubei, China; 3. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: [Objective] The evolution of extreme precipitation and the result ing population exposure risks are critical issues in global climate change studies. However, traditional assessments focusing solely on frequency or intensity cannot fully capture the complexity of these evolutionary processes. The evolving pattern of extreme precipitation across China from a dual-dimensional perspective of frequency and intensity is analyzed, and quantitatively identify changes in population exposure and the underlying drivers, thereby providing a scientific reference for formulating precise disaster prevention strategies and climate change adaptation plans. [Methods] The Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP) dataset and the China Historical Population Spatial Distribution Kilometer-Grid Dataset were employed. The K-means clustering method was adopted to establish an integrated classification system for extreme precipitation based on frequency and intensity. By comparing the periods of 1981—1999 and 2000—2020, different shifts in extreme precipitation type were identified, and the evolutionary pattern of population exposure as well as the contributions of distinct factors (e.g. climate, population) were quantitatively assessed. [Results] The results revealed that approximately 23% of the area in China experienced a shift extreme precipitation types, dominated by changes in either frequency or intensity alone (e.g., intensified intensity with unchanged frequency), whereas synchronous alterations in these two aspects only accounted for about 1%. Furthermore, changes in population exposure to extreme precipitation across the two periods displayed marked spatial heterogeneity, with an increase of exposure occurring in around 70% of the whole country, especially in southern and eastern coastal regions. At the national scale, population change dominated the change in exposure with national average contribution rate of 67% followed by climate change (~30%). However, in northeastern and northwestern China, climatic factor exerted a dominant influence on the changes in population exposure. [Conclusion] The findings reveal the complex characteristics of divergent evolution of extreme precipitation in China across both frequency and intensity. Traditional assessments relying on a single dimension might underestimate or misjudge disaster risks. Future management of extreme weather risks requires formulation of differentiated strategies for disaster mitigation, prevention and adaptation based on the spatial heterogeneity of evolution in extreme precipitation type.

Keywords: extreme precipitation type; population exposure; spatiotemporal evolution; intensity; frequency; climate change; disaster prevention and mitigation; spatiotemporal evolution

0 引 言

在全球变暖背景下，极端降水事件频率与强度已经发生显著变化，成为了气象学、水文学及灾害风险管理领域的核心研究议题[1]。由克劳修斯-克拉佩龙方程可知，气温每升高 1 ℃可使大气持水能力增强约 7%，这直接加剧了大气中的水循环过程，显著提高了强降水事件的发生概率[2]，同时改变了极端降水频率与强度的时空分布[3-4]，对人类社会和自然生态系统构成严峻威胁。因此，准确认识极端降水的演变规律，对评估气候风险与制定有效适应策略具有重要意义。

现有研究广泛采用气候变化检测与指数专家组(ETCCDI)开发的指标体系，对极端降水频率和强度进行量化分析[5-6]。该指标体系提供了诸如强降水日数($R20\ mm$)等频率相关指标，以及最大 1 日降水量($RX1day$)、极强降水量占比($R99pTOT$)等强度指标，已成为极端降水研究的标准工具，能够有效揭示极端降水各方面特征要素的时空格局。基于这一系列标准化指标，大量研究揭示出在全球与区域尺度上极端降水总体呈现增强趋势，但表现出显著空间异质性[7-8]。例如，北美西海岸、东南部以及南美洲东部，极端降水的频率与强度均呈现增强趋势[9]，而北美中部部分地区则表现为下降趋势[10]；澳大利亚东部极端降水强度和频率增强，在中部地区减弱[11]。在中国，极端降水频率与强度总体上呈现“东南高、西北低”的空间格局[12]，但局部变化趋势较为复杂且空间差异性明显[13-14]。除极端降水指标方法，也

有学者探索不同方法对极端降水时空格局展开研究。例如，GAO 等[15]基于广义极值分布发现 1960—2010 年间长江流域内干流和主要支流附近区域极端降水强度显著增强；WANG 等[16]基于百分位数法的分析表明，我国小时尺度极端降水的频率和强度高值区域在空间上并不重合，呈现差异化空间格局；YANG 等[17]通过将水文学中的“重现期阈值”引入极端降水定义，发现中国六大江河流域极端降水变化呈显著空间分异。国内外研究虽广泛揭示出极端降水频率和强度演变的多尺度时空特征，但多数研究对极端降水的频率和强度两个维度分别讨论，对频率和强度协同演变的探讨相对较少。有研究表明极端降水频率和强度受大气环流与局地热力学条件的协同调控机制影响[18]，其变化模式复杂多样，孤立分析可能会掩盖二者间“此消彼长”或“协同增强”等不同形式的变化特征，从而限制对极端降水演变模式以及灾害风险的深入理解。

此外，理解极端降水特征的变化格局，其重要目的在于科学评估其导致的社会经济影响与风险。其中，人口暴露度作为联系致灾因子与承载体的关键指标，被广泛应用于量化气候风险[19-21]。已有研究表明，全球极端降水人口暴露的热点区域集中于东南亚以及北美东部[22]。中国区域人口暴露度呈现“东南高、西北低”的分布格局[23]。其中，粤港澳大湾区与京津冀及北京周边地区为高暴露风险区[24-25]。也有预测研究表明，至 21 世纪末，中国大部分地区极端降水人口暴露度将下降，华中局部地区除外[26]，且人口变化与气候变化的主导作用将随时间发生变化[27]。尽管已有研究在暴露度总体格局识别和驱动因素解析等方面取得了显著进展，但仍存在一定的局限。极端降水人口暴露度的计算往往是由极端降水强度或频率乘以人口数量得到，这种方法无法准确识别频率和强度共同改变导致的暴露度变化。

综上所述，现有研究在极端降水特征要素与人口暴露度时空格局刻画方面已形成较为成熟的技术路线，但对极端降水频率和强度双重维度的结构性演变及其人口暴露度分析仍缺乏探讨。基于此，本研究突破以往单一指标分析的局限性，从“频率-强度”综合视角出发，通过 *K*-means 聚类将极端降水划分为三个频率等级（高、中、低）和三个强度等级，进而构建九类频率-强度组合类型并系统分析 1981—2020 年间两个时期（1981—1999 年和 2000—2020 年）中国极端降水及人口暴露度的时空演变特征。本研究构建了极端降水频率-强度联合分类体系，旨在揭示极端降水类型转变模式与人口暴露度空间格局演化特征，从而有助于精准识别极端降水灾害风险，为防灾减灾与适应性策略的制定提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源及研究时期划分

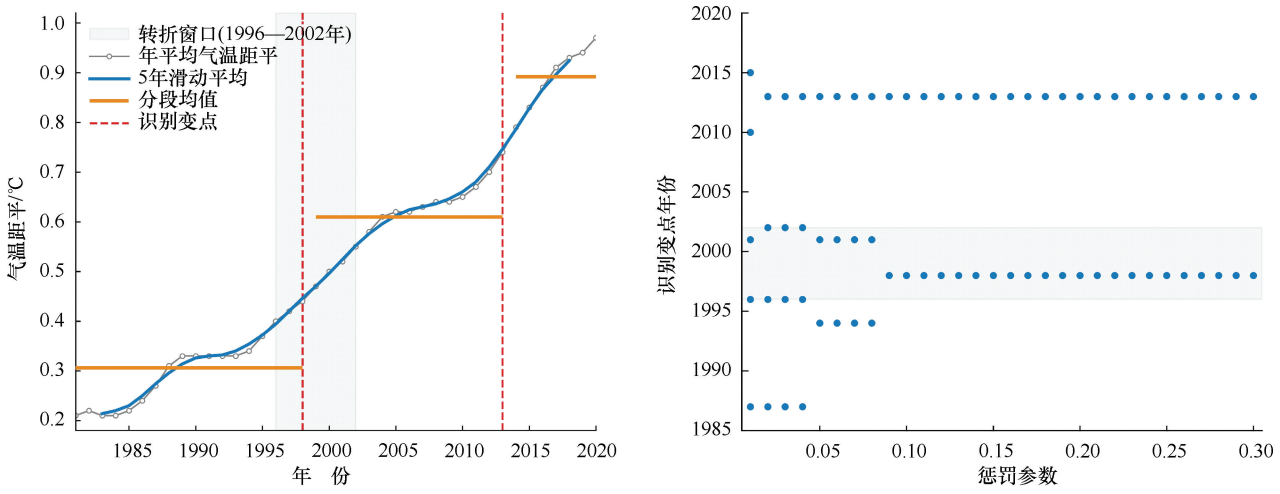
降水数据采用普林斯顿大学土木与环境工程系 BECK 博士团队公开发布的多源融合降水产品（MSWEP）[28]，使用时段为 1981—2020 年，空间分辨率为 0.1°。为评估 MSWEP 产品在极端降水分析中的适用性，本文采用基于全球地面雨量站观测资料生成的 GPCC 网格化日降水数据集（1982—2020 年，1.0°×1.0°）进行验证。人口数据源自中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境科学数据中心研制的中国历史人口空间分布千米网格数据集，该数据集提供 1990—2015 年逐年数据，空间分辨率为 0.01°。因人口数据集缺失台湾地区数据，为保证数据分析的一致性，本研究区域仅为中国大陆地区。

研究时期划分依据基于 PELT 方法[29]检测得到的全球气温变化点。气温数据源自美国国家海洋和大气管理局（NOAA）发布的全球地表平均温度距平序列[30]。PELT 方法识别出两个变点（见图 1），分别出现在 1998 年前后和 2013 年，考虑到温度突变的程度差异以及研究时期划分的均衡性，将研究时期以 1999 年为分界点，划分为基准期（1981—1999 年）与近期（2000—2020 年）两个阶段。因人口数据集长度未能覆盖整个研究期，故本文采用 1990—1999 年和 2000—2015 年平均人口数量分布分别代表基准期和近期的人口格局，用于人口暴露度计算分析。

1.2 极端降水定义、数据验证与分类

为关注更强、更罕见的极端降水事件，本文采用 99%分位数法[31]识别各格点上的极端降水事件，即剔除 0 mm 降水数据后，以 1981—2020 年各格点日降水量序列的 99%分位值作为阈值，日降水量超过阈值则定义为在该格点上发生一次极端降水事件。

为评估 MSWEP 产品在极端降水分析中的适用性，分别计算 MSWEP 与 GPCC 的 99%分位数日降水量（1982—2020 年），并统计各格点超过该阈值的极端降水总频次。将 MSWEP 的计算结果通过双线性插值升尺度至 1.0°网格，与 GPCC 匹配一致，进一步采用相关系数（*R*）、均方根误差（*RMSE*）、平均绝对误差（*MAE*）、纳什效率系数（*NSE*）四项指标对 MSWEP 识别的 99%分位数降水量和极端降水频次进行验证。



(a) 气温距平　　(b) 变点检测

图 1　基于 PELT 方法的全球气温变化点检测

Fig. 1　Change-point detection analysis of global temperature based on the PELT method

基于 *K*-means 聚类方法，分别针对极端降水强度和频率进行分类，依据肘部法与轮廓系数评估，*K* 取值均为 3。在强度分类方面，对每一个格点内所有研究时段内识别出的极端降水强度样本数据采用 *K*-means 方法聚类为高、中、低强型 3 类，以每一类强度范围作为该格点的极端降水强度分类阈值(见图 2)。由于采用的是格点独立聚类方式，不同格点高、中、低强度所对应的绝对降水量级不同，因此该分类反映的是各地气候背景下的相对强度类型。在频率分类方面，使用极端降水强度数据统计出 1981—2020 年间每年极端降水事件发生频率，基于完整研究期内所有网格的极端降水频次数值，采用 *K*-means 方法聚类为高、中、低频型 3 类，频率分类阈值如表 1 所列。

表 1　基于 *K*-means 聚类的极端降水频率类型划分阈值

Table 1　Classification thresholds for three frequency-based types of extreme precipitation

类　型	频　次	类　型	频　次	类　型	频　次
低频型	(0，2]	中频型	(2，8]	高频型	(8，34]

进一步将年均极端降水强度和年极端降水频数进行组合，得到极端降水频率-强度分类格点数据，包括高频-高强(HH)、高频-中强(HM)、高频-低强(HL)、中频-高强(MH)、中频-中强(MM)、中频-低强(ML)、低频-高强(LH)、低频-中强(LM)、低频-低强(LL)9 种类型。针对每个格点，统计各时期中出现频次最高的类型，定义为主导极端降水类型。

1.3　极端降水人口暴露度分析

极端降水人口暴露度是指将极端降水危险性与人口空间分布叠加后得到的受影响人口规模，用于衡量人口对极端降水事件的潜在暴露程度[32]。本文参考 IPCC SREX 风险矩阵的基本思想，将极端降水的发生频率和事件强度视为危险性的两个维度，低、中、高三个等级赋值为 1、2、3，采用二维等级组合方式构建频率-强度综合评分

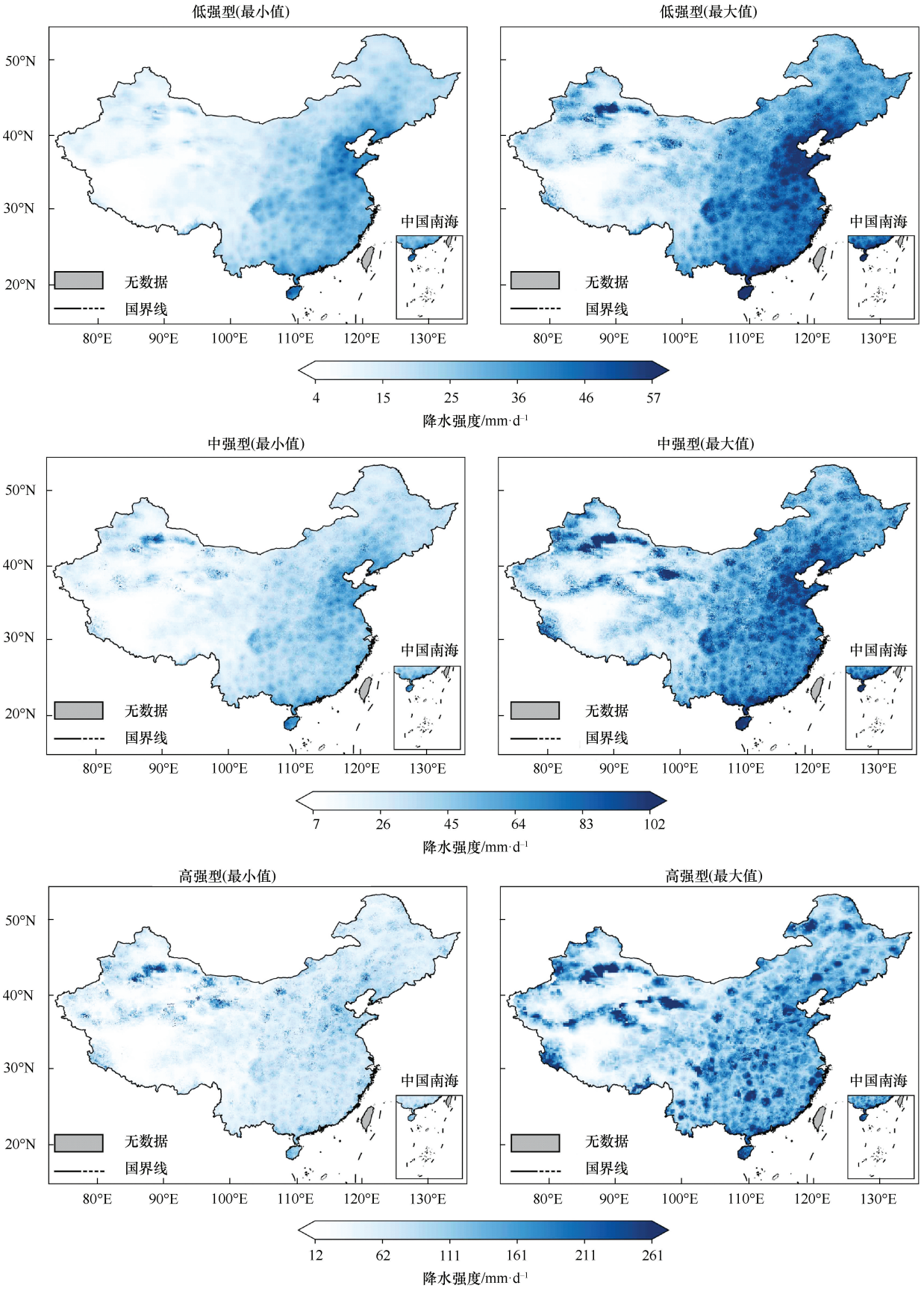
$$C = F + I - 1 \tag{1}$$

式中，F 为极端降水频率等级值；I 为极端降水强度等级值；C 为频率-强度组合类型对应的综合评分。

基于此，LL、LM、LH、ML、MM、MH、HL、HM、HH 九种类型极端降水评分值分别为 1、2、3、2、3、4、3、4、5 的评分，数值越大表示气候风险水平越高。针对每个研究时期，利用人口数据计算各格点在该时期的人口平均值。将较高分辨率人口网格数据升尺度至 0.1°，即累加同一降水网格内的所有人口格点，保持区域总人口数量不变，与 MSWEP 降水产品空间分辨率一致，并对两类数据的纬度方向进行一致性校正，以确保空间匹配准确。格点 i 的极端降水人口暴露度(E_i)通过该格点的平均人口(P_i)与其主导的极端降水频率 - 强度组合类型所对应的评分(C_i)相乘得到 E_i，计算公式为

$$E_i = P_i \times C_i \tag{2}$$

需要指出的是，该计算框架中假设频率和强度对暴露度具有同等贡献。该设置是基于暴露度对极端降水频率、强度不同赋权的敏感性分析结果(见图 3)。四种非等权重方案与等权重方案下暴露度的相关系数均大于 0.97，非等权重方案下两个时期之间全国暴露度变化量相对于等权重方案的偏差约为±1.78%，表明等权重计算方案能够有效反映我国极端降水人口



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(2024)0650 号的标准地图制作，底图边界无修改。下同

图 2　基于 *K*-means 聚类的极端降水强度类型划分阈值

Fig. 2　Classification thresholds for three intensity-based types of extreme precipitation

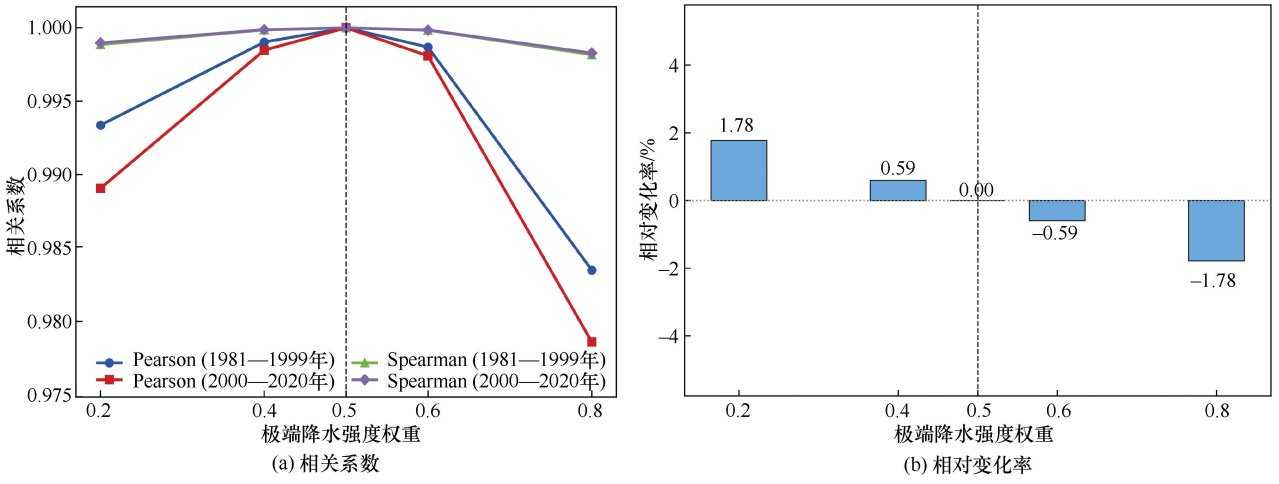


图 3　极端降水人口暴露度对频率和强度赋权方案的敏感性分析

Fig. 3　Sensitivity analysis of population exposure to extreme precipitation to the weighting scheme for frequency and intensity

暴露的时空特征。

基于人口暴露度计算结果，进一步采用因子分解方法[33]量化不同因素(人口、气候及其相互作用)对极端降水人口暴露度变化的相对贡献率

$$\Delta E_i = E_{t2} - E_{t1} \tag{3}$$

$$CR_{pop} = \frac{C_{i,\,t1} \times \Delta P_i}{\Delta E_i} \times 100 \tag{4}$$

$$CR_{clim} = \frac{P_{i,\,t1} \times \Delta C_i}{\Delta E_i} \times 100 \tag{5}$$

$$CR_{int} = \frac{\Delta P_i \times \Delta C_i}{\Delta E_i} \times 100 \tag{6}$$

式中，ΔE_i 为第 i 个格点极端降水人口暴露度的变化；E_{t1} 和 E_{t2} 分别为该格点在基准期和近期的人口暴露度值；CR_{pop}、CR_{clim} 和 CR_{int} 分别为人口因子、气候因子以及人口 — 气候相互作用因子的相对贡献率；$C_{i,\,t1}$ 为第 i 个格点在时期 t_1 的主导极端降水类型所对应的赋值；$P_{i,\,t1}$ 为该格点在时期 t_1 的平均人口数量；ΔP_i 和 ΔC_i 分别为第 i 个格点在两个时期之间的人口变化量和气候风险水平变化量。

1.4　其他统计分析

本文对各类型极端降水事件覆盖面积进行了统计，每种类型极端降水事件单个格点面积由球面投影公式计算

$$Area_{ij} = R^2 \times \Delta\lambda_{rad} \times (\sin\phi_{j+1} - \sin\phi_j) \tag{7}$$

式中，ϕ_j 为某一类极端降水 i 格点的下边线纬度；ϕ_{j+1} 为 i 格点的上边线纬度；$\Delta\lambda_{rad}$ 为 i 格点的左右边线经度差。

每种类型极端降水事件的面积由所有格点的面积求和计算所得。

此外，本文采用 Mann-Kendall 趋势检验识别每一类极端降水事件覆盖面积在研究时期内的变化趋势及其显著性。

2　结果与分析

2.1　极端降水事件识别的验证分析

极端降水 99%分位数日降水量与频率的验证结果如图 4 所示。基于 GPCC 日降水数据计算的 99%分位数降水量与本文所用 MSWEP 降水数据的计算结果总体一致，R 达到 0.87，NSE 为 0.76，表明本文采用的 99%分位数阈值能够较好地表征极端降水的空间分布特征。此外，MSWEP 与 GPCC 识别的极端降水总频次空间格局也表现出良好的一致性($R=0.95$，$NSE=0.78$)。总体而言，基于 GPCC 站点数据的验证结果能够较好地支撑本文采用 MSWEP 产品以及 99%分位数法定义极端降水的合理性和稳健性。

2.2　不同极端降水类型空间分布及其变化

图 5 和表 2 显示了各类型极端降水覆盖面积占比的变化及其趋势。基准期(1981—1999 年)内，各类型所涉面积均未表现出显著的变化。近期(2000—2020 年) LL 和 LM 型面积分别以 −0.54%/a ($p<0.001$)和−0.07%/a ($p<0.05$)的速率显著减少，而 MM、MH、HL、HM 和 HH 五种类型呈现显著上升趋势，其变化速率分别为 0.06%/a ($p<0.05$)、0.01%/a ($p<0.01$)、0.27%/a ($p<0.01$)、0.03%/a ($p<0.05$)和 0.001%/a ($p<0.05$)。

从各时期主导极端降水类型的空间分布来看(见图 6)，基准期内极端降水类型以 LL 型(56.55%)和 ML 型(35.38%)为主，分别集中分布于我国北方和南方地区。LM 型和 HL 型分别占总面积的 4.52%和

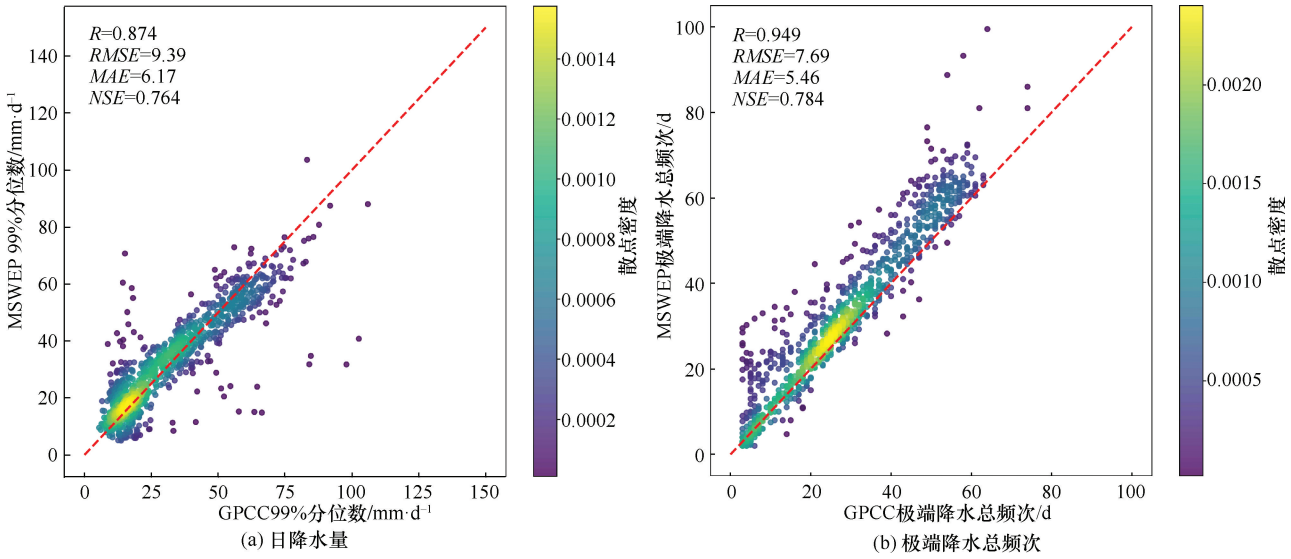


图 4　基于 MSWEP 与 GPCC 计算的 99%分位数日降水量与极端降水总频次散点图

Fig. 4　Scatterplots of the 99th percentile of daily precipitation and extreme precipitation frequency derived from MSWEP and GPCC

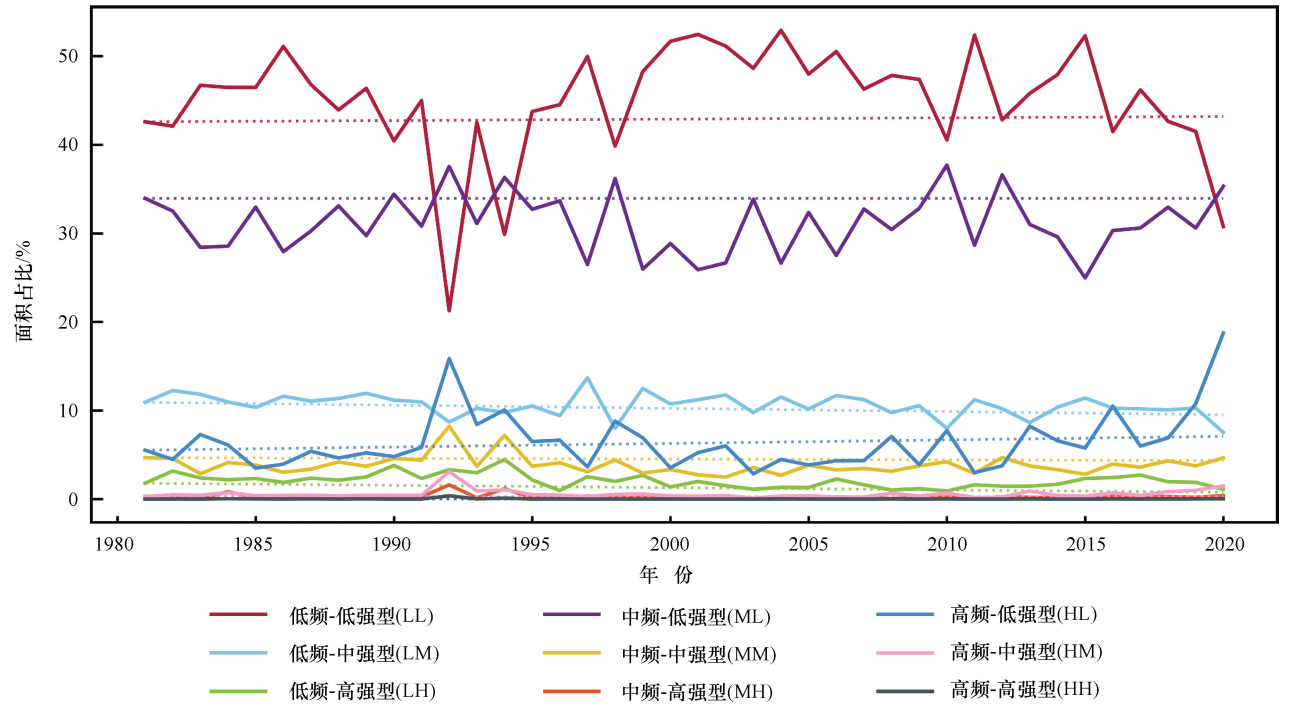


图 5　两个时期(1981—1999 年和 2000—2020 年)各极端降水类型覆盖面积占比变化情况

Fig. 5　Variations in the area proportion of different extreme precipitation types (1981—1999 and 2000—2020)

2.21%，其中 LM 型主要出现在华北和西北部分地区，HL 则集中分布于西南地区中部。近期极端降水类型总体空间格局并未发生显著变化，但 LL 型面积比例增加了 4.19%，而 ML、LM 和 HL 三种类型面积占比分别下降了 1.14%、1.28%和 1.16%。

两个时期极端降水空间格局的变化如图 7 所示，极端降水主导类型发生变化的区域占全国总面积的 22.92%，其中，我国东北、西北地区发生变化的区域占比最大，华南地区占比最小(见图 8)。变化区域中，以频率或强度单方面为主导的演化模式最为常见。频率主导型变化占比高达 70.34%，包括“频率降低而强度不变”方向的转变(F-I=，43.36%)和“频率升高、强度不变”(F+I=，26.98%)两大转变路径，集中分布于我国中、西部和东北部地区。其次为强度主导型转变，表征为“频率不变，强度减少”(F=I-，17.17%)和“频率不变，强度增大”(F=I+，9.44%)，主要分布于我国北方地区。频率与强度均发生改变的区域仅占 3.05%，其中频率-强度同

表 2　不同极端降水类型面积占比变化趋势分析

Table 2　The trend analysis of area proportion of various extreme precipitation types

	1981—1999 年	2000—2020 年
LL	$y=-0.122x+42.58$（$p=0.529$）	$y=-0.544x+42.51$（$p=0.001$）
LM	$y=-0.112x+10.92$（$p=0.208$）	$y=-0.070x+10.73$（$p=0.050$）
LH	$y=0.017x+1.79$（$p=0.576$）	$y=0.028x+1.37$（$p=0.156$）
ML	$y=0.131x+33.93$（$p=0.624$）	$y=0.231x+28.84$（$p=0.124$）
MM	$y=-0.010x+4.68$（$p=0.780$）	$y=0.060x+3.34$（$p=0.017$）
MH	$y=-0.001x+0.288$（$p=1.000$）	$y=0.010x+0.15$（$p=0.009$）
HL	$y=0.155x+5.52$（$p=0.080$）	$y=0.267x+3.53$（$p=0.004$）
HM	$y=0.009x+0.26$（$p=0.124$）	$y=0.029x+0.35$（$p=0.010$）
HH	$y=-0.001x+0.01$（$p=0.624$）	$y=0.001x+0.01$（$p=0.032$）

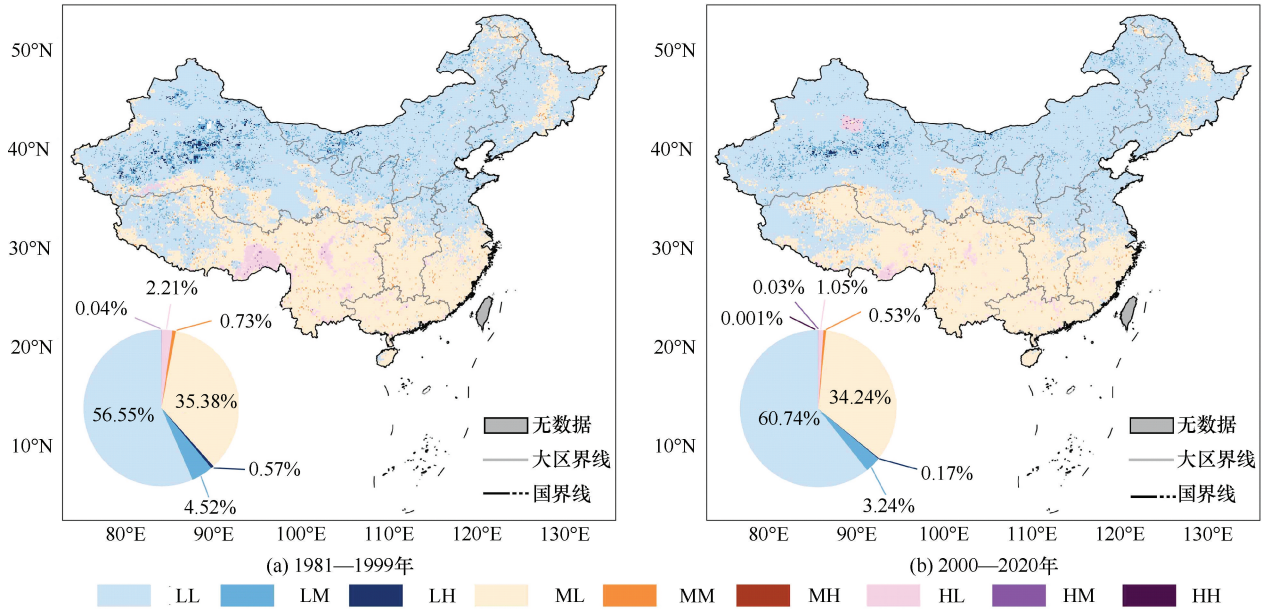


图 6　两个时期(1981—1999 年和 2000—2020 年)极端降水主导类型空间分布

Fig. 6　Spatial distributions of the dominant extreme precipitation types in the two periods (1981—1999 and 2000—2020)

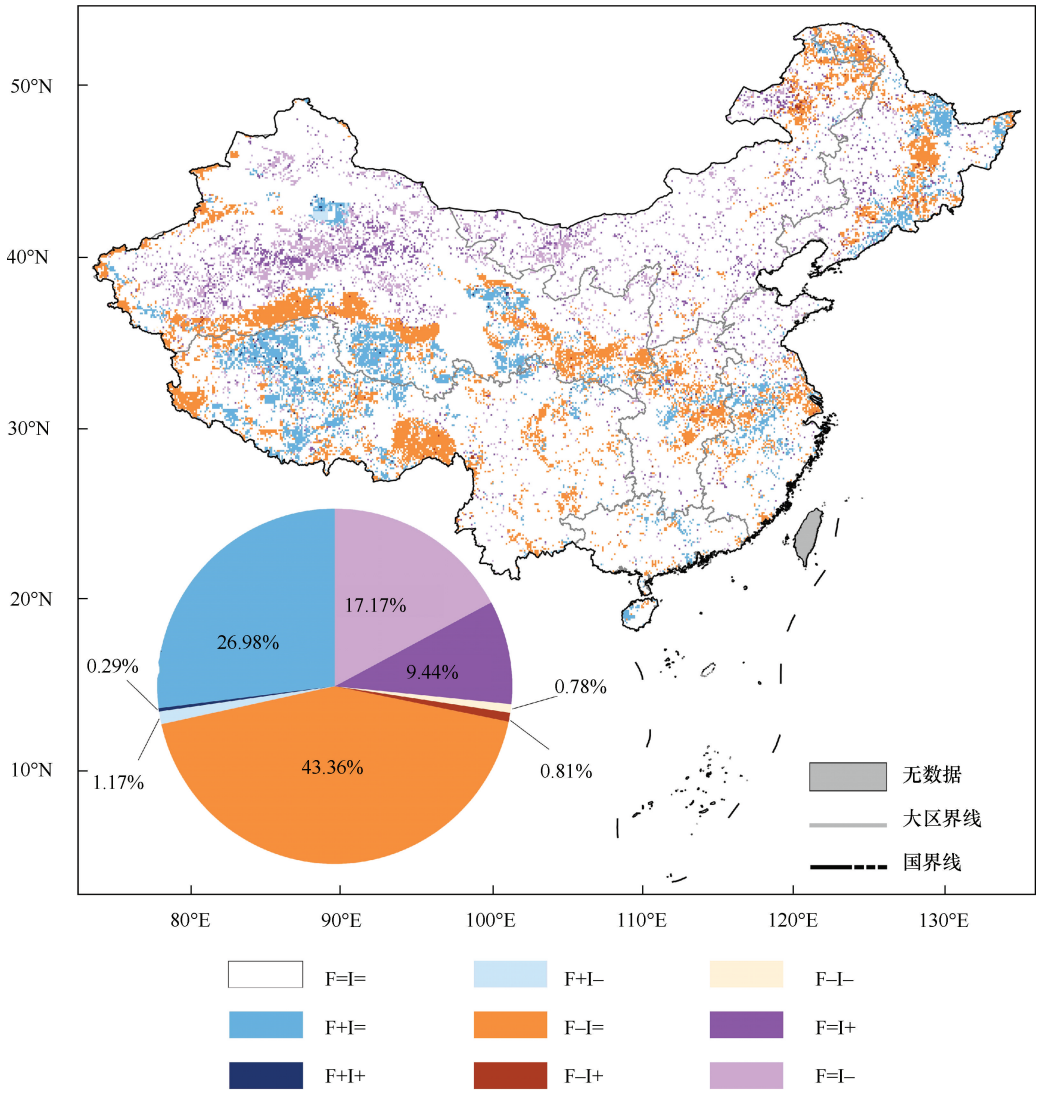
向变化型(F+I+、F-I-)仅 1.07%(见图 7)。从不同区域来看，全国大部分地区极端降水演变均以频率主导型(F±I=)为主(占比 60.97%~89.06%)，但在华北地区强度主导型(F=I±)面积占比高达 65.56%，不同地区频率-强度共同变化的区域面积占比范围为 1.27%~3.77%(见图 8)，表明我国极端降水频率-强度双重维度的演变呈现出较明显空间分异性。以上结果反映出，极端降水危险性的变化不只体现为单一频率或强度的增减，评估极端降水灾害风险及其演变需要考虑频率和强度两个维度的共同影响。

2.3　极端降水人口暴露度空间格局及其演变

基于极端降水频率-强度组合分类及变化分析，进一步将主导极端降水类型与人口空间分布进行叠加分析，分别评估 1990—2015 年期间极端降水人口暴露度的年际变化，以及两个时期(1981—1999 年与 2000—2020 年)中国极端降水人口暴露度的演变特征，旨在从承灾体视角揭示极端降水结构性变化下的灾害风险时空格局。

1990—2015 年期间全国及各地区的极端降水人口暴露度年际变化如图 9 所示。结果表明，全国整体极端降水人口暴露度呈现一定上升趋势但并不显著(6.82×10^6/a，$p>0.1$)。对不同区域而言，除华南地区的极端降水人口暴露度表现出显著上升趋势(3.69×10^6/a，$p<0.001$)，其他地区均未呈现出显著趋势。

基准期和近期极端降水人口暴露度的空间格局如图 10 所示。两个时期的人口暴露度总体上保持一致，高暴露热点区域集中于我国中部、东部和南部沿海地区。图 11 展示了两个时期之间极端降水人口暴露度的具体差异。全国约 70.62%的区域人口暴露度呈现



图中 F=、F+、F–分别表示频率类型未发生改变、向更高频率类型转变和向更低频率类型转变；I=、I+、I–分别表示强度类型未发生改变、向更高强度类型转变和向更低强度类型转变。

图 7　两个时期极端降水主导类型转变的空间格局及面积占比

Fig. 7　Spatial pattern and area proportions of changes in dominant extreme precipitation types across the two periods

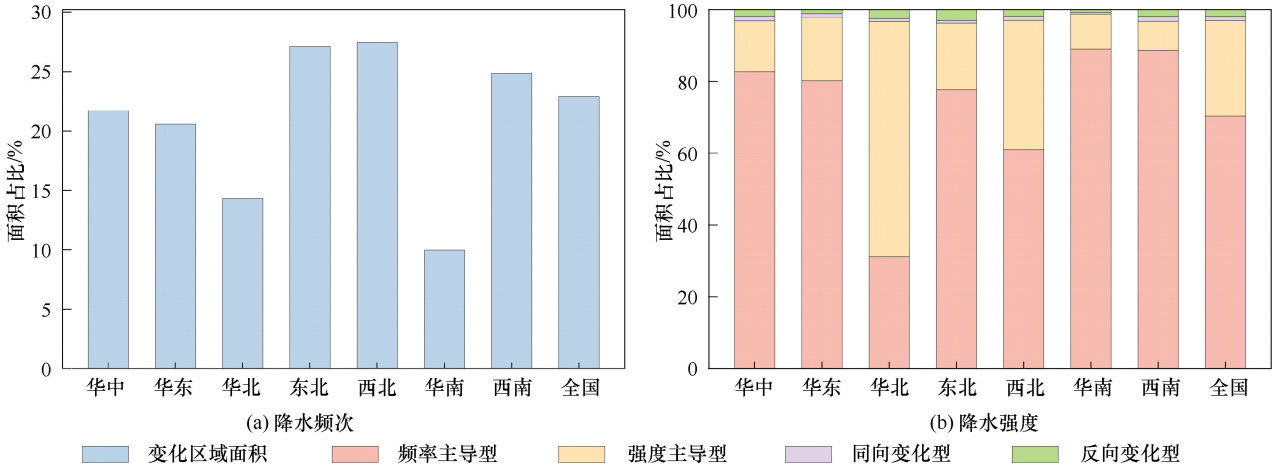


图 8　两个时期不同地区极端降水频率-强度类型发生变化的面积占比

Fig. 8　Area proportion of changes in extreme precipitation frequency-intensity types across two periods in different regions

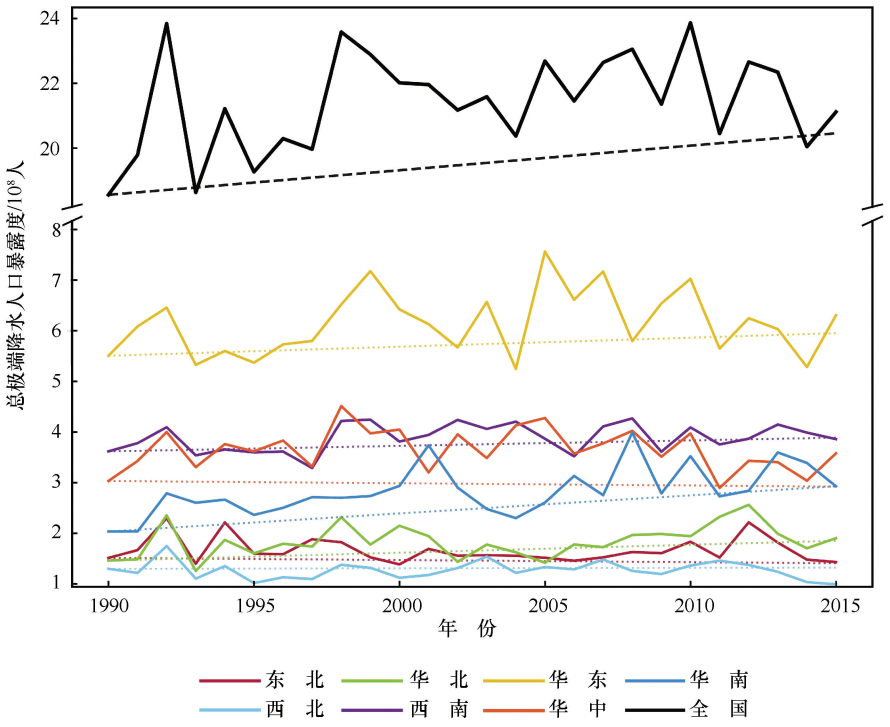


图 9　1990—2015 年全国及各区域极端降水人口暴露度的变化情况

Fig. 9　Temporal variations of population exposure to extreme precipitation in China nationwide and across different regions during 1990—2015

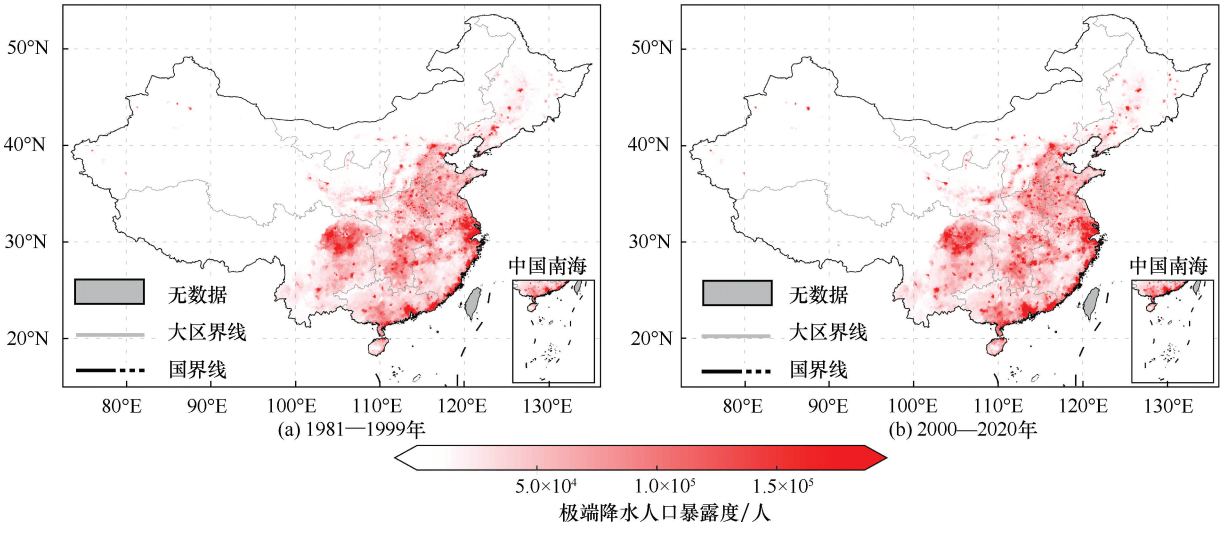


图 10　两个时期极端降水人口暴露度及其变化的空间分布

Fig. 10　Spatial patterns of population exposure to extreme precipitation

上升趋势，其中以人口密集、经济发达的东南沿海地区增幅最为显著。其余 29.38%的区域暴露度有所下降，呈零散分布，主要集中在华中、西北以及东北部分地区。

极端降水人口暴露度演变呈现出明显的地域性差异，为进一步探究极端降水不同地区人口暴露度变化的驱动因素，本文采用因子分解方法，分析了人口、气候及其相互作用三种因素对暴露度变化的相对贡献率。结果表明，人口因素影响对极端降水人口暴露度变化贡献最大，其次为气候因素，而两者的相互作用影响最小，三者全国平均贡献率分别为 67.36%、30.20%和 2.44%(见图 12)。

从不同区域上看，人口因素为华北、华中、华东、华南及西南地区暴露度变化的主要驱动因素，而在东北和西北地区气候因素占据主导。在典型的一线城市中，人口暴露度变化归因也存在显著差异。北京

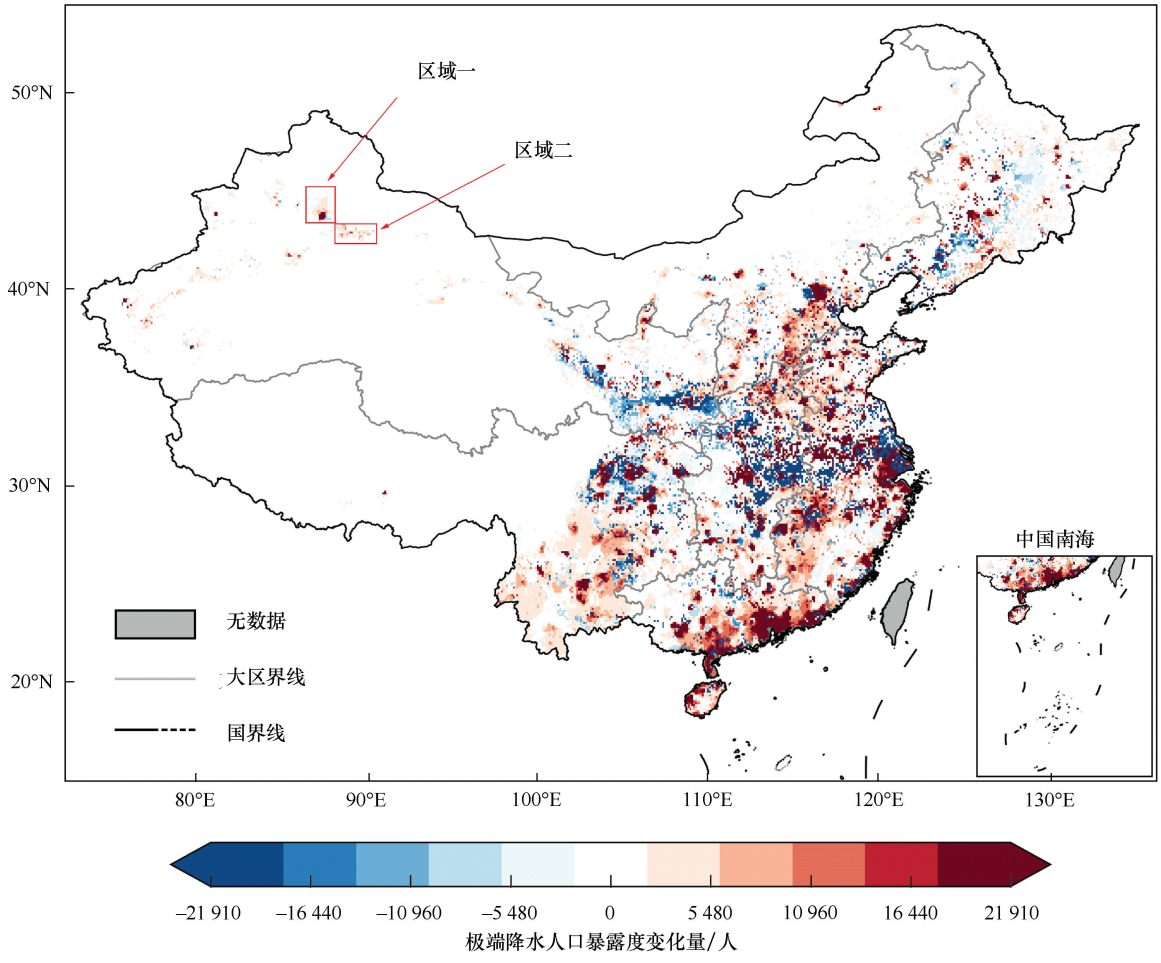


图 11　两个时期极端降水人口暴露度变化的空间分布

Fig. 11　Spatial distribution of changes in population exposure to extreme precipitation across the two periods

和广州的暴露度变化主要由人口因素驱动(贡献率约85%)，上海则表现出气候因子的主导性影响(贡献率约 95%)，而深圳的暴露度变化则主要受人口-气候相互作用主导，其贡献率约为 68%(见图 12)。

3　讨　论

3.1　不同类型极端降水时空演变及灾害风险

本研究结果显示，近期(2000—2020 年)相较于基准期(1981—1999 年)，全国约 23%区域发生了主导极端降水类型的转变。发生转变的区域中，70.34%仅频率类型变化(F±I=)，26.61%的区域表现为单一强度类型变化(F=I±)，而只有约 3%的区域同时出现频率与强度均发生改变，频率-强度同向变化(F+I+、F-I-)仅约 1%(见图 7)，这反映出极端降水特征演变具有明显的非对称性。已有部分研究也从侧面反映出极端降水强度与频率的非同步变化[34-35]。例如，在黄河流域东北部，极端降水频率呈上升趋势，而强度却呈下降趋势[36]。此外，本研究还揭示出，我国极端降水频率-强度演变存在着空间异质性(见图 8)。华南、西南、华中和华东等大部分地区的极端降水演变均以频率主导型为主，而华北是唯一以强度主导型变化为明显特点的地区(F=I+占比 24.21%，F=I-占比 41.35%)，反映出该地区极端降水特征变化的明显差异。

虽然基于传统极端降水指数的大量研究已揭示出我国极端降水强度与频率变化呈现显著的空间差异性[37-38]，但较难以直观捕捉极端降水在两个维度上差异化演变的复杂特征。这种强度与频率演化的差异性，很可能源于两者驱动机制的差异。有研究指出，极端降水强度主要受热力学因素控制[39]，而频率变化则可能与动力学因素相关[40]。因此，极端降水类型的转变，可能是大气热力学与动力学因素在不同配置情况下共同作用的结果。此外，地形也能够通过动力抬升、调节水汽输送及局地热力结构等影响极端降水及其空间分布[41]。例如，在频率增加、强度不变的地区(F+I=)，极端降水事件增多可能主要源于天

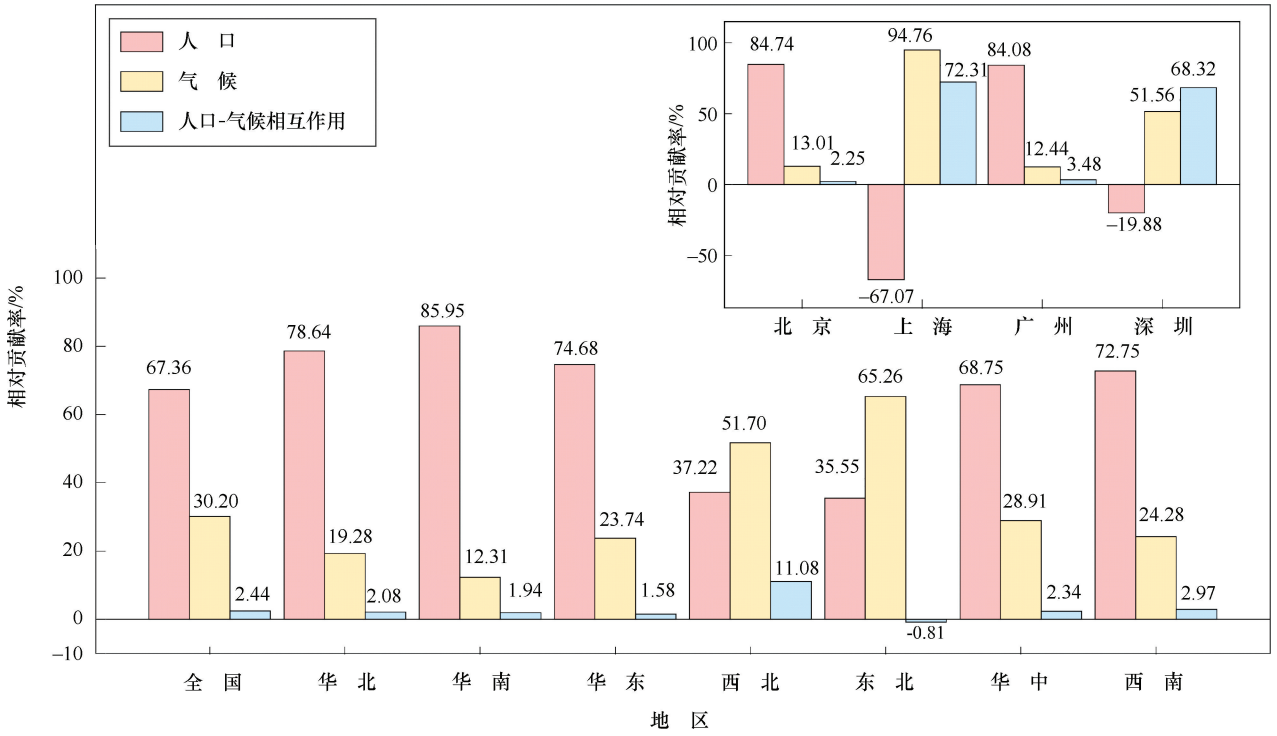


图 12　不同区域和城市两个时期极端降水人口暴露度变化的影响因素贡献率

Fig. 12　Contribution rates of varied factors to changes in population exposure to extreme precipitation for different regions and cities

气系统频率增加或持续性环流异常，而非局地水汽条件的明显增强[18]，若存在复杂地形条件，则可能通过增强局地辐合、延长系统滞留时间或促进地形性触发等提高极端降水事件发生概率[42]；在强度增加、频率不变的地区(F=I+)，则主要可能与大气饱和水汽压升高有关[43-44]，同时地形抬升和迎风坡效应可叠加热力增湿增强极端降水过程[45]；在频率与强度均增加的区域(F+I+)，可能是由大气持水能力增强与低空急流输送或垂直上升运动加强共同所致[46]；在频率减少、强度不变的地区(F-I=)，可能与华南地区低层西南风减弱、西太平洋副热带高压东退及东亚大槽减弱有关[40]。

上述极端降水频率和强度的不同演变模式对应着差异化的灾害风险。例如，在 F+I= 区域，尽管极端降水强度未显著增强，但频率增加会缩短极端事件的重现期，减少承灾体在连续事件间的恢复时间。尤其在山区，多次极端降水事件是诱发山区滑坡等滞后性地质灾害的重要诱因，其主要机理在于降水对岩体和土体造成的累积损伤效应[47]。同时，可能造成的洪峰频次的增加也为水库调度带来更大不确定性[48]。在 F=I+区域，极端降水强度的增强直接对防洪排涝系统构成了更大压力，其影响因地区发展水平而异[49]。在高度城市化地区，尽管排水系统相对完善，但极端降水仍可能超出设计标准，加之大面积的不透水下垫面加速产汇流，会显著加剧内涝风险[50-51]。在基础设施薄弱的欠发达地区，强降水则更易引发山洪，且小型或老化水利设施在极端冲击下可能出现溃决，严重威胁下游安全[52]。

因此，忽视极端降水频率与强度非对称协同演变特征，可能导致灾害防控与适应策略缺乏针对性，从而影响其实际成效。基于频率-强度联合分类对极端降水演变格局进行分析能够有效识别不同地区极端降水主导类型及转变路径，为区域防洪排涝标准制定、山区地质灾害预警、水库运行管理等提供更具针对性的科学依据。然而，本研究基于 *K*-means 聚类构建的频率-强度分类框架相对简单，仍有必要进一步探索更精细化的频率-强度联合分类方法。此外，本研究仅针对极端降水进行了日尺度分析，后续研究可细化至日以内、甚至小时尺度，能够从降雨过程的角度揭示极端降水的演变特征。

3.2　极端降水人口暴露度时空演变及归因分析

本研究发现，极端降水人口暴露度的空间格局呈现“东南高、西北低”的特征(见图 10)，与我国人口分布格局高度一致，也与以往基于单一极端降水强度或频率计算的研究结论相符[23,53]。我国东部和南部地区为暴露度增长的热点区域，这一现象在相关研究中也有发现[54-55]；同时，本研究也观察到华中及东北部分地区暴露度有所下降，主要归因于当地人口

数量和气候风险水平的降低。对极端降水人口暴露度宏观格局和热点区域的准确捕捉，也印证了本研究基于频率-强度联合分类的人口暴露度计算方法具有良好的可靠性。

为进一步量化人口变化、气候变化及其交互作用对人口暴露度变化的相对贡献，本研究对人口暴露度变化影响因素贡献率进行了分析(见图 12)。结果显示，近期相较于基准期，极端降水人口暴露度演变主要呈现出三种模式。在大部分区域，人口因子对暴露度变化的贡献占主导地位(相对贡献率>50%)，表现为“人口驱动型”模式。华南地区是典型代表，其人口因子的贡献率超过 85%。这些地区暴露度的上升主要源于快速城镇化进程中人口向经济更发达地区的集聚。部分区域则表现为“气候主导型”模式，气候因子的相对贡献率超过 50%。高密度城市人口暴露度的增长也可能存在明显的气候缓冲效应。例如在上海，尽管人口呈净流入状态[56]，而该地区在两个时期间的主导极端降水类型由 ML 型转变为 LL 型，气候风险显著降低使得其整体暴露度反而下降。此外，少数区域呈现出“气候-人口共同调控”模式，其中人口与气候的交互作用贡献最为突出。例如深圳，其暴露度变化受气候-人口交互作用的贡献达 68.32%。

值得注意的是，不同的极端降水类型转变可能表现出相似的暴露度演变特征。以我国西北部两个局部区域(见图 11)为例，区域一和区域二均表现为极端降水人口暴露度上升，且气候因子对暴露度变化的贡献率相近(分别为 70.94%和 65.62%)。然而，两个地区在主导极端降水类型转变上存在明显差异，一个区域转向高频类型(F+I=)，另一个则转向高强度类型(F=I+)(见图 7)。这表明，即使同为由气候因素驱动导致的暴露度增加，也可能对应着不同的极端降水类型转变路径，其背后的物理机制及关联的灾害风险也可能不同。

现有的极端降水人口暴露度研究通常只将频率或强度单一指标纳入考虑，无法准确识别频率和强度共同改变导致的暴露度变化，而本研究基于新的极端降水分类框架探讨了人口暴露度的演变格局，从“频率-强度”双重维度视角，解析了区域极端降水的结构性转变对暴露度变化的影响。因极端降水频率-强度演变与人口暴露度变化之间并非简单的对应关系，在制定防灾减灾策略时，不应仅关注暴露度总量的增减，还应重视极端降水频率-强度具体演变模式。在频率升高型暴露度增加区域，应重视持续监测、预警预报及流域联合调度；而在强度增强型暴露度增加区域，则应重点加强排水系统设计标准提升、关键基础设施防护加固以及极端事件的应急响应能力建设。需要指出的是，本研究主要聚焦人口暴露度变化及其归因，但其分析尚可进一步细化，如考虑人口年龄结构、流动特征及空间分布精度等因素。未来研究可以纳入更高分辨率的人口数据与人口结构特征，以提升极端降水人口暴露度评估的精细化水平。

4 结 论

本文系统分析了 1981—2020 年间两个时期中国不同类型极端降水及人口暴露度的时空演变特征。主要结论如下：

(1)极端降水频率与强度的演变呈现出非对称性。约 23%的研究区域在两个时期(1981—1999 年和 2000—2020 年)之间发生了主导极端降水类型的转变。这些转变存在多种路径，其中以频率或强度单方面主导的演化模式(如频率增加而强度不变)最为常见，而频率与强度同向变化的比例仅为约 1%。极端降水频率与强度的不同协同演化模式可能源于热力学和动力因子不同配置的影响，同时也可导致不同的灾害风险。有必要考虑极端降水频率与强度的非对称演变特征，制定差异化、有针对性的减灾与适应策略。

(2)两个时期之间，全国约 70%的区域极端降水人口暴露度有所上升，尤以华南和华东沿海地区最为显著。暴露度的变化受人口、气候及其交互作用共同影响，全国平均贡献率分别为 67.36%、30.20%和 2.44%。空间上看，极端降水人口暴露度演变主要呈现三种模式。“气候主导型”模式出现在东北和西北地区，而其余地区则以“人口驱动型”为主，华南地区表现尤为突出。相似的暴露度变化可能对应着不同类型的极端降水结构性转变，这表明在开展灾害风险管理时，除关注人口暴露度变化，有必要额外考虑极端降水演变的非对称特征。

参考文献(References)：

[1] COLOGNA V, MEILER S, KROPF C M, et al. Extreme weather event attribution predicts climate policy support across the world [J]. Nature Climate Change, 2025, 15(7): 725-735.

[2] IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups Ⅰ, Ⅱ and Ⅲ to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Geneva: IPCC, 2023.

[3] HORAN M F, KUCHARSKI F, JOHNSON N, et al. Winter precipitation predictability in Central Southwest Asia and its representation in seasonal forecast systems [J]. NPJ Climate and

Atmospheric Science，2024，7(1)：80.

[4] 贾朝阳，郭亮，崔嵩，等. 松花江流域 NPP 时空演变及其对极端气候的响应机制[J]. 南水北调与水利科技(中英文)，2024，22(1)：131-147.
JIA Z Y，GUO L，CUI S，et al. Spatial-temporal evolution of NPP and its response to extreme climate in Songhua River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology，2024，22(1)：131-147.

[5] 刘彦宏，李泽霖，张磊，等. 1961—2020 年陕南地区极端降水的时空变化特征[J]. 西北林学院学报，2024，39(6)：207-215.
LIU Y H，LI Z L，ZHANG L，et al. Spatial-temporal variation of extreme precipitation in southern Shaanxi during 1961—2020 [J]. Journal of Northwest Forestry University，2024，39(6)：207-215.

[6] 王军德，苏振娟，张丽娜，等. 甘肃省极端降水指数时空变化特征[J]. 水土保持研究，2022，29(4)：270-276.
WANG J D，SU Z J，ZHANG L N，et al. Characteristics of temporal and spatial variation of extreme precipitation index in Gansu Province [J]. Research of Soil and Water Conservation，2022，29(4)：270-276.

[7] WEI W，ZOU S，DUAN W L，et al. Spatiotemporal variability in extreme precipitation and associated large-scale climate mechanisms in Central Asia from 1950 to 2019 [J]. Journal of Hydrology，2023，620：129417.

[8] SUN N，YAN H X，WIGMOSTA M S，et al. Datasets for characterizing extreme events relevant to hydrologic design over the conterminous United States [J]. Scientific Data，2022，9(1)：154.

[9] ZHANG W X，ZHOU T J. Significant increases in extreme precipitation and the associations with global warming over the global land monsoon regions [J]. Journal of Climate，2019，32(24)：8465-8488.

[10] YANG Y，GAN T Y，TAN X Z. Spatiotemporal changes in precipitation extremes over Canada and their teleconnections to large-scale climate patterns [J]. Journal of Hydrometeorology，2019，20(2)：275-296.

[11] ALEXANDER L V，ARBLASTER J M. Historical and projected trends in temperature and precipitation extremes in Australia in observations and CMIP5 [J]. Weather and Climate Extremes，2017，15：34-56.

[12] 赵珊珊，陈鲜艳，邹旭恺，等. 1961—2022 年中国极端连续降水过程的时空格局特征[J]. 水利水运工程学报，2026(1)：23-33.
ZHAO S S，CHEN X Y，ZOU X K，et al. Spatiotemporal characteristics of extreme continuous precipitation processes in China during 1961—2022 [J]. Hydro-Science and Engineering，2026(1)：23-33.

[13] 王倩，翟盘茂，张强. 1961 年以来中国区域性气候与极端事件变化格局[J]. 气象学报，2025，83(4)：980-989.
WANG Q，ZHAI P M，ZHANG Q. Regional patterns of climate change and extreme events in China since 1961 [J]. Acta Meteorologica Sinica，2025，83(4)：980-989.

[14] 梅超，刘家宏，王佳，等. 极端天气频发背景下超大城市洪涝韧性提升探析[J]. 水利发展研究，2026，26(2)：1-11.
MEI Chao，LIU Jiahong，WANG Jia，et al. Analysis on improving flood resilience of megacities against the background of frequent extreme weather [J]. Water Resources Development Research，2026，26(2)：1-11.

[15] GAO T，XIE L. Spatiotemporal changes in precipitation extremes over Yangtze River basin，China，considering the rainfall shift in the late 1970s [J]. Global and Planetary Change，2016，147：106-124.

[16] WANG X Y，JIANG W G，WU J J，et al. Extreme hourly precipitation characteristics of China's mainland from 1980 to 2019 [J]. International Journal of Climatology，2023，43(6)：2989-3004.

[17] YANG Y C，YANG H W，MA Y，et al. Extreme precipitation in Eastern China：A centennial-scale analysis across multiple river basins based on return period thresholds [J]. Journal of Hydrology，2026，669：135058.

[18] JIANG Q，CIOFFI F，GIANNINI M，et al. Analysis of changes in large-scale circulation patterns driving extreme precipitation events over the central-eastern China [J]. International Journal of Climatology，2023，43(1)：519-537.

[19] 林文青，陈活泼，徐慧文，等. 西南地区未来极端降水增加将导致其人口暴露风险加剧[J]. 大气科学学报，2023，46(4)：499-516.
LIN W Q，CHEN H P，XU H W，et al. Significant increase of precipitation extremes will enlarge its population exposure over Southwest China in the future [J]. Transactions of Atmospheric Sciences，2023，46(4)：499-516.

[20] 景丞，姜彤，王艳君，等. 中国区域性极端降水事件及人口经济暴露度研究[J]. 气象学报，2016，74(4)：572-582.
JING C，JIANG T，WANG Y J，et al. A study on regional extreme precipitation events and the exposure of population and economy in China [J]. Acta Meteorologica Sinica，2016，74(4)：572-582.

[21] 罗兴树，章数语，郭园，等. 极端降水对陕西省农业生产的影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文)，2024，22(2)：339-347.
LUO X S，ZHANG S Y，GUO Y，et al. The impact of extreme precipitation on agricultural production in Shaanxi province [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology，2024，22(2)：339-347.

[22] LIAO X L，XU W，ZHANG J L，et al. Global exposure to rainstorms and the contribution rates of climate change and population change [J]. Science of the Total Environment，2019，663：644-653.

[23] MA Y R，LYU Y R，WANG Y，et al. Trends and spatial distribution of population exposure to extreme precipitation in China during 2000—2019 [J]. Environment International，2025，204：109793.

[24] WANG Y J，ZHAI J Q，GAO G，et al. Risk assessment of rainstorm disasters in the Guangdong-Hong Kong-Macao greater Bay area of China during 1990—2018 [J]. Geomatics，Natural Hazards and Risk，2022，13(1)：267-288.

[25] LIN H，YU X，LIN Y M，et al. Spatiotemporal variations of precipitation extremes and population exposure in the Beijing-Tianjin-Hebei Region，China [J]. Water，2024，16(24)：3594.

[26] SHENG Y，SHEN C H，LI Y，et al. Projected population exposure to precipitation extremes in China by the end of the twenty-first century：trends，change points，and spatial variability [J]. Regional Environmental Change，2024，24(4)：163.

[27] JIN K，WU Y J，SUN X L，et al. Spatial-temporal assessment of future extreme precipitation and extreme high-temperature exposure across China [J]. International Journal of Climatology，2024，44

(7)：2265-2282.

[28] BECK H E, VAN DIJK A I J M, LARRAONDO P R, et al. MSWX: Global 3-hourly 0.1° bias-corrected meteorological data including near-real-time updates and forecast ensembles [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2022, 103(3): 710-732.

[29] KILLICK R, FEARNHEAD P, ECKLEY I A. Optimal detection of changepoints with a linear computational cost [J]. Journal of the American Statistical Association, 2012, 107(500): 1590-1598.

[30] NOAA. Climate at a glance: Global time series [EB/OL]. (2025-10-10) [2025-11-20]. https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series.

[31] FLANAGAN P X, MAHMOOD R. Spatiotemporal analysis of extreme precipitation in the southern great plains hydroclimate region [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2023, 62(3): 393-409.

[32] 廖春贵，秦年秀，胡宝清，等. 基于GIS和加权综合指数模型的2015年广西旱灾风险暴露度评估[J]. 安徽农业科学，2017，45(8)：69-73.
LIAO C G, QIN N X, HU B Q, et al. Risk exposure assessment of drought disaster in 2015 based on GIS and weighted composite index model [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(8): 69-73.

[33] JONES B, O'NEILL B C, MCDANIEL L, et al. Future population exposure to US heat extremes [J]. Nature Climate Change, 2015, 5(7): 652-655.

[34] ZHANG S H, LI W D, AN W J, et al. Temporal and spatial evolutionary trends of regional extreme precipitation under different emission scenarios: Case study of the Jialing River Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2023, 617: 129156.

[35] ZHANG X Y, CONG Z T. Trends of precipitation intensity and frequency in hydrological regions of China from 1956 to 2005 [J]. Global and Planetary Change, 2014, 117: 40-51.

[36] GAO T, WANG H L. Trends in precipitation extremes over the Yellow River Basin in North China: Changing properties and causes [J]. Hydrological Processes, 2017, 31(13): 2412-2428.

[37] SHI J, WEI P P, CUI L L, et al. Spatio-temporal characteristics of extreme precipitation in East China from 1961 to 2015 [J]. Meteorologische Zeitschrift, 2018, 27(5): 377-390.

[38] WANG Y N, PENG Z Y, WU H, et al. Spatiotemporal variability in precipitation extremes in the Jianghuai Region of China and the analysis of its circulation features [J]. Sustainability, 2022, 14(11): 6680.

[39] LIN Z Y, GE F, CHEN Q L, et al. Projected changes in precipitation extremes over Southeast Asia: Unraveling the roles of thermodynamic and dynamic contributions [J]. Climate Dynamics, 2024, 63(1): 1.

[40] WU R G, ZHU P J, ZHANG W J. Subseasonal changes and causes of trends of extreme precipitation frequency during June and July in Central Eastern China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2025, 130(13): e2025JD043880.

[41] ZHAO R Y, CHEN B, ZHANG W, et al. Formation mechanisms of persistent extreme precipitation events over the eastern periphery of the Tibetan Plateau: Synoptic conditions, moisture transport and the effect of steep terrain [J]. Atmospheric Research, 2024, 304: 107341.

[42] YANG J, HUANG Y, LUO L P, et al. The role of Changbai Mountain in an extreme precipitation event in Liaoning Province, China [J]. Remote Sensing, 2023, 15(18): 4381.

[43] GONG D Y, WANG S W. Severe summer rainfall in China associated with enhanced global warming [J]. Climate Research, 2000, 16(1): 51-59.

[44] PAPALEXIOU S M, MONTANARI A. Global and regional increase of precipitation extremes under global warming [J]. Water Resources Research, 2019, 55(6): 4901-4914.

[45] MIN Y F, HUANG W L, MA M J, et al. Simulations in the topography effects of Tianshan Mountains on an extreme precipitation event in the Ili River Valley, China [J]. Atmosphere, 2021, 12(6): 750.

[46] SUN Q H, ZHANG X B, ZWIERS F, et al. A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipitation [J]. Journal of Climate, 2021, 34(1): 243-258.

[47] LI X X, LIU J H, ZHANG Z Y, et al. Geological disaster risk assessment under extreme precipitation conditions in the Ili River Basin [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2025, 14(9): 346.

[48] QIN P C, XU H M, LIU M, et al. Climate change impacts on Three Gorges Reservoir impoundment and hydropower generation [J]. Journal of Hydrology, 2020, 580: 123922.

[49] FAN J, LIU B Y, LEI T J, et al. Exploring how economic level drives urban flood risk [J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 4857.

[50] BAO Z D, WU Y X, HE W N, et al. Intensified rainfall, growing floods: Projecting urban drainage challenges in South-Central China under climate change scenarios [J]. Applied Sciences, 2025, 15(21): 11577.

[51] PAL L, SAKSENA S, DEY S, et al. An integrative framework for assessment of urban flood response to changing climate [J]. Water Resources Research, 2023, 59(8): e2023WR034466.

[52] GÜNERALP B, GÜNERALP İ, LIU Y. Changing global patterns of urban exposure to flood and drought hazards [J]. Global Environmental Change, 2015, 31: 217-225.

[53] SHEN L C, WEN J H, ZHANG Y Q, et al. Changes in population exposure to extreme precipitation in the Yangtze River Delta, China [J]. Climate Services, 2022, 27: 100317.

[54] ZHAN M J, WU Q, ZHAN L F, et al. Change in extreme precipitation events: Exposure and vulnerability in the Poyang Lake Basin, China [J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11: 1125837.

[55] QI Z X, SUN L, CAI Y P, et al. Spatial-temporal dynamics of population exposure to compound extreme heat-precipitation events under multiple scenarios for Pearl River Basin, China [J]. Climate Services, 2024, 34: 100477.

[56] 王桂新. 中国省际人口迁移变化特征：基于第七次全国人口普查数据的分析[J]. 中国人口科学，2022，36(3)：2-16.
WANG G X. Research on characteristics of China's inter-provincial migration: Based on the data of China's seventh population census [J]. Chinese Journal of Population Science, 2022, 36(3): 2-16.

（责任编辑　王海锋）