

# 巴基斯坦洪涝灾害时空分布特征及其影响因素

信珂莹<sup>1,2</sup>, 苏凤环<sup>1,2,3</sup>, 郭晓军<sup>1,2</sup>, 蒋宁<sup>4</sup>

(1.中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所山地自然灾害与工程安全重点实验室, 四川成都 610299; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.中国-巴基斯坦地球科学研究中心, 巴基斯坦伊斯兰堡 45320; 4.西南石油大学土木工程与测绘学院, 四川成都 610500)

**摘要:** [目的] 分析巴基斯坦洪涝灾害的时空演化特征及影响因素, 为洪灾风险分析与管理提供科学参考依据。[方法] 基于达特茅斯全球洪水数据库(DFO)记录的 1985—2021 年 143 次典型洪涝灾害事件, 结合 ERA5-Land 降水数据、DEM、土地利用、人口密度与 GDP 等多源空间数据, 采用距平分析、重力模型与标准差椭圆等方法分析洪灾的时间变化特征、空间分布特征、重心迁移及分布方向演化, 基于最优参数地理探测器模型(OPGD)定量识别洪涝灾害时空分布的主要影响因子及其交互作用。[结果] 巴基斯坦洪涝灾害在 2005—2010 年进入高发期, 2007 年频数达历史记录峰值。灾害在空间上表现出由广泛分布向印度河中上游高密度、高严重程度区域集聚的演化特征, 灾害重心呈北移趋势, 主分布方向趋于南北, 空间格局趋于集中。地理探测结果显示: 降雨类因子( $R_{x_{sd}}$ ,  $R_{20mm}$ ,  $R_{x_{1d}}$ )解释力显著, 多数因子组合存在显著的交互增强效应。[结论] 巴基斯坦洪涝灾害风险持续上升, 灾害重心和分布方向发生迁移, 空间格局日趋集中。强降雨事件是洪涝灾害发生的关键诱因, 而地形因子与降水相关因子之间的相互作用决定了洪水发生的空间异质性。

**关键词:** 洪涝灾害; 时空格局; 影响因素; 地理探测器; 巴基斯坦

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0316-10

中图分类号: TV122, X43

**文献参数:** 信珂莹, 苏凤环, 郭晓军, 等. 巴基斯坦洪涝灾害时空分布特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 316-325. Xin Keying, Su Fenghuan, Guo Xiaojun, et al. Spatiotemporal distribution characteristics and influencing factors of flood disasters in Pakistan [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 316-325. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.039; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.05.039.

## Spatiotemporal distribution characteristics and influencing factors of flood disasters in Pakistan

Xin Keying<sup>1,2</sup>, Su Fenghuan<sup>1,2,3</sup>, Guo Xiaojun<sup>1,2</sup>, Jiang Ning<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Engineering Resilience, Institute of Mountain Hazards and Environment, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610299, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. China-Pakistan Joint Research Center on Earth Sciences, Islamabad 45320, Pakistan; 4. School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

**Abstract:** [Objective] The spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of flood disasters in Pakistan were analyzed, in order to provide scientific references for flood risk analysis and management. [Methods] Based on 143 typical flood events recorded by the Dartmouth Flood Observatory (DFO) from 1985 to 2021, this study integrated multi-source spatial datasets, including ERA5-Land precipitation, digital elevation model (DEM), land use, population density, and gross domestic product (GDP). The temporal variation, spatial distribution, gravity center migration, and directional evolution of flood disasters were analyzed using methods such as anomaly analysis, the gravity center model, and the standard deviational ellipse. The optimal parameter-

收稿日期: 2025-06-09

修回日期: 2025-07-05

采用日期: 2025-07-09

资助项目: 中国科学院海外科教合作中心部署项目(046GJHZ2023071MI); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0902)

第一作者: 信珂莹(2002—), 女(汉族), 河南省许昌市人, 硕士研究生, 研究方向为自然灾害分布与危险性分析。Email: xinkeying23@mails.ucas.ac.cn.

通信作者: 苏凤环(1977—), 女(汉族), 山东省阳谷县人, 博士, 副研究员, 主要从事灾害遥感与山地灾害风险评估研究。Email: fhsu@imde.ac.cn.

based geodetector (OPGD) model was employed to quantitatively identify the dominant influencing factors and their interactive effects on the spatiotemporal distribution of flood disasters. [Results] Flood disasters in Pakistan entered a period of high occurrence from 2005 to 2010, with the frequency reaching a historical record high in 2007. The disasters exhibited spatial evolutionary characteristics, shifting from widespread distribution to high-density and high-severity concentration in the middle and upper reaches of the Indus River. The disaster centroid migrated northward, the primary distribution axis aligned in a north-south direction, and the spatial pattern became increasingly clustered. The geodetector analysis revealed that precipitation-related factors ( $R_{x_{5d}}$ ,  $R_{20mm}$ , and  $R_{x_{1d}}$ ) possessed strong explanatory power, with most combinations of factors exhibiting significant synergistic effects. [Conclusion] Flood disaster risks in Pakistan steadily increased, characterized by shifting disaster centroid and distribution orientation, while the spatial pattern becomes increasingly concentrated. Extreme precipitation events serve as the key trigger of flood disasters, while the interaction between topographic factors and precipitation-related factors critically shapes the spatial heterogeneity of flood occurrence.

**Keywords: flood disasters; spatiotemporal patterns; influencing factors; geodetector; Pakistan**

洪涝灾害是全球发生频率最高,影响范围最广,破坏性最强的自然灾害之一,频繁造成人员伤亡,基础设施受损和经济社会发展受阻<sup>[1]</sup>。受全球气候变化、极端天气事件增强等因素影响,洪灾在南亚等发展中国家尤为严重<sup>[2-3]</sup>。巴基斯坦作为受气候变化影响最严重的发展中国家之一,在德国观察组织发布的全球气候风险指数(GCRI)中排名第8位,在最易受影响国家中排名第7位<sup>[4]</sup>。地形上,巴基斯坦约60%的国土为山区,其余区域主要为印度河冲积平原,使得洪涝灾害空间分布集中,频次高,影响广。1950—2011年巴基斯坦平均3 a就会发生一次洪灾,已记录的极端洪水多达21次,造成约8 887人死亡,经济损失高达190亿美元<sup>[2]</sup>。尤其是2010年的季风洪灾,被认为是百年一遇的极端事件,淹没了全国近1/5的国土,造成约2 000人死亡,97亿美元直接经济损失,数百万房屋与农田被毁<sup>[5-6]</sup>。2022年再次爆发严重洪灾与冰湖溃决事件,导致3 300万人受灾,1 033人死亡,540万人流离失所<sup>[7-8]</sup>。洪水的发生频率、强度、持续时间与破坏性不断增强,叠加城乡发展不平衡、基础设施薄弱与社会脆弱性上升,使洪灾成为巴基斯坦最具风险的自然灾害<sup>[9]</sup>。

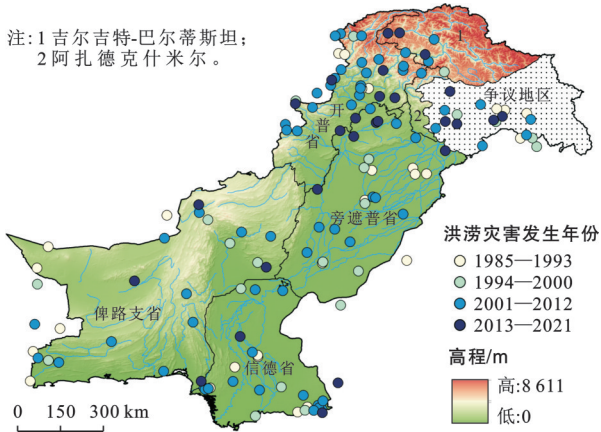
近年来,针对巴基斯坦洪涝灾害的研究多集中于单一洪灾事件,主要围绕灾害发生的气象背景、水文响应、社会经济影响以及应急响应与恢复重建等方面<sup>[7]</sup>。例如,针对2010年特大洪灾,揭示了其成因为异常强烈的西南季风和北部山区的强降雨共同作用所致<sup>[6,10]</sup>;或者集中于某一城市、流域或社区进行分析<sup>[11-12]</sup>。尽管上述研究丰富了对巴基斯坦典型洪涝灾害事件的认知,但大多聚焦于典型灾害事件,缺乏宏观尺度(巴基斯坦全国范围),长时间序列洪涝灾害时空演变规律的综合分析。为此,本文基于达特茅斯

全球洪水数据库(Dartmouth flood observatory, DFO) 1985—2021年巴基斯坦历史洪涝灾害事件,采用距平分析、重力模型和标准差椭圆方法,从时间趋势、空间迁移和分布方向等分析灾害的演变特征;运用最优参数法地理探测器(OPGD)模型定量评估多因子对洪灾空间分布的解释力,识别主要影响因子及其交互影响强度。结果可为巴基斯坦洪灾风险分析、风险管理及灾害防治对策等提供科学依据。

## 1 研究区概况和数据来源

### 1.1 研究区概况

研究区位于南亚次大陆的西北部(61°—78°E, 23°—37°N),由旁遮普省、信德省、俾路支省、吉尔吉特—巴尔蒂斯坦省、开伯尔—普什图省、伊斯兰堡首都区和阿扎德克什米尔地区组成。区域总面积约881 913 km<sup>2</sup>,人口约2.2亿。其东部与印度接壤,西部邻接阿富汗和伊朗,北部毗邻中国,南部濒临阿拉伯海。研究区地形起伏显著,地势整体呈北高南低,西高东低的格局,海拔高度超过8 000 m。全国可分为3类地貌单元:北部与西北部山区,主要包括喀喇昆仑山脉、兴都库什山脉及西段喜马拉雅山脉;西南部俾路支高原,以丘陵为主;以及沿印度河分布的冲积平原,地势低平、土壤肥沃,是全国农业密集区<sup>[9]</sup>。气候方面,研究区地处热带与亚热带过渡区,受南亚季风控制,具有显著的季风型气候特征。年平均气温由北部高山区的0℃递增至南部沿海地区约32℃。年降水量总体上由北向南递减,空间分布不均,且集中在6—9月的西南季风期间<sup>[13]</sup>。印度河作为全国最大水系,自北向南纵贯全境,具有显著的季节性径流特征,且在不同区域表现出明显的空间差异性。研究区历史洪涝灾害点分布如图1所示。



注:①洪涝灾害事件数据来源于达特茅斯全球洪水数据库;②地理底图为自然资源部标准地图服务系统标准地图,审图号为GS(2016)1667,无修改。下同。

图1 巴基斯坦洪1985—2021年涝灾害空间分布  
Fig.1 Spatial distribution of flood disasters in Pakistan from 1985 to 2021

## 1.2 数据来源

本文洪涝灾害事件数据来源于达特茅斯全球洪水数据库(DFO)(<https://floodobservatory.colorado.edu/Archives/index.html>),该数据库系统性收集了1985年1月至2021年10月期间全球共计5 131起大型洪灾事件,涵盖事件发生时间、地点、国家、经纬度、致灾类型、死亡人数、受灾面积及受影响人口等核心要素。本文以巴基斯坦为研究区,筛选获得143条洪涝灾害事件,时间范围为1985—2021年覆盖37 a。地形数据采用地理空间数据云提供的30 m分辨率数字高程模型(DEM, <https://www.gscloud.cn>),用于提取地形起伏度、高程标准差和坡度等因子;降水数据来自欧洲中期天气预报中心ERA5-Land逐日再分析资料(<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets>),空间分辨率为 $0.1^\circ$ ,与洪涝事件时间尺度一致,用于计算年均降水量(PRCPTOT)、最大1 d降水量( $R_{x_{1d}}$ )、最大5 d降水量( $R_{x_{5d}}$ )、大雨日数( $R_{10mm}$ )、极端大雨日数( $R_{20mm}$ )、日降水强度(SDII)。人口数据选用GlobPOP全球网格人口数据集(<https://zenodo.org/records/11179644>),空间分辨率为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ ,栅格值表示每 $\text{m}^2$ 人口密度<sup>[14]</sup>;GDP数据源于全球网格化GDP总量数据集,用以计算1990—2020年GDP多年平均值(<https://zenodo.org/records/13943886>),空间分辨率为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ ,栅格值表示按购买力平价调整的GDP总量(单位:2017年不变价国际美元)<sup>[15]</sup>。土地利用数据来自日本地理空间信息管理局发布的GLCNMO数据(<https://globalmaps.github.io/glcnm.html>),分辨率为500 m,基于FAO土地分类体系划分为20类地表类型,其中自然植被占11类<sup>[16]</sup>。对以上不同分辨率的数据进行重采样至 $0.1^\circ$ 。

## 2 研究方法

### 2.1 时空特征分析方法

#### 2.1.1 核密度分析

核密度分析(kernel density estimation, KDE)是一种非参数统计方法,可对区域内洪涝灾害事件要素的空间分布密度进行探测,从而了解洪涝灾害事件在研究区内的聚集程度,其计算公式为:

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (1)$$

式中, $f(x)$ 为核密度估计值; $K\left(\frac{x-x_i}{h}\right)$ 为核函数; $(x-x_i)$ 表示估值点 $x$ 到样本 $x_i$ 处的距离; $h$ 为宽窗( $h>0$ ),即设定的搜索半径大小; $n$ 为洪涝灾害事件的数量。

#### 2.1.2 重力模型

重心变化是研究时空数据演变趋势的有效手段<sup>[17]</sup>。本文采用重力模型分析巴基斯坦洪灾重心变化,定义巴基斯坦洪灾重心的 $X$ 和 $Y$ 坐标及重心移动距离分别表示为

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times X_i}{\sum_{i=1}^n W_i}, \quad \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times Y_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2)$$

$$D = \sqrt{(\bar{X}_2 - \bar{X}_1)^2 + (\bar{Y}_2 - \bar{Y}_1)^2} \quad (3)$$

式中: $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 巴基斯坦洪水灾害重心的经度和纬度; $n$ 表示洪水灾害次数; $i$ 为灾害序号; $X_i$ 、 $Y_i$ 分别为第 $i$ 次洪水灾害的经纬度; $W_i$ 为权重参数,在点灾害数据中,各次灾害权重为1; $D$ 为灾害重心移动距离。

#### 2.1.3 标准差椭圆

为定量刻画巴基斯坦洪涝灾害事件在空间尺度上的集中趋势、离散特征及主导分布方向,本文使用标准差椭圆(standard deviational ellipse, SDE)方法对洪涝灾害事件点进行空间分布分析。标准差椭圆的长轴和短轴差值越大,表明洪涝灾害事件具有越强的空间方向性,短轴长度反映洪涝灾害事件分布的离散程度,短轴越长,说明空间分布越离散<sup>[18]</sup>。

### 2.2 影响因素分析方法

为定量分析影响因素对巴基斯坦洪涝灾害空间异质性的解释力,本文采用最优参数法地理探测器模型(OPGD)对多源影响因素与洪涝灾害空间异质性的关系进行识别与解释<sup>[1]</sup>。其核心假设为若某自变量对因变量具有显著影响,则二者的空间分布应呈现一致性<sup>[19]</sup>。在模型实施过程中,连续型变量需离散化处理,本文采用系统遍历的方式,分别测试等

距法、自然断点法、分位数法、几何间距法、标准差法5种离散策略,并在分层数设定为4~6类的区间内组合计算,对每种方法与分层数组合,分别计算其对应的 $q$ 值和显著性水平( $p$ 值),最终选取在显著性水平 $p < 0.05$ 前提下 $q$ 值最大的组合作为最优参数输入模型。在此基础上,洪涝灾害密度作为因变量,影响因素作为自变量输入至OPGD模型的因子探测模块,计算各因子对灾害空间分布的贡献率。其计算过程为

$$q = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (4)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad SST = N \sigma^2$$

式中: $h$ 表示属性 $Y$ 或因子 $X$ 的分层; $N_h, N$ 分别为层和全区的单元数; $SSW$ 是层内方差之和; $SST$ 是全区总方差; $q$ 的取值范围为0~1,数值越大表明影响因素对洪涝灾害空间分布的解释力越强。通过比较各影响因素的 $q$ 值,探讨各因素对洪涝灾害空间分布的控制力。

### 3 结果与分析

#### 3.1 巴基斯坦洪涝灾害时间分布特征

图2反映了1985—2021年巴基斯坦洪涝灾害事件的时间变化特征。图2a显示研究区年尺度洪涝灾害事件频次的变化趋势。结果表明,灾害事件在2005—2010年进入高发阶段,尤以2007年最为突出,洪灾事件频数高达15次,为整个研究时段的峰值。图2b进一步以洪涝灾害事件的频数距平(相对于多年均值的偏离程度)及其5 a滑动平均进行分析。结果显示,1985—2000年为相对灾害频次较低的阶段,大多数年份频数低于多年平均;2005—2010年期间则频次显著偏高,滑动平均曲线呈快速上升趋势,表明洪灾进入高发期。图2c对频数距平值进行累计,构建了洪涝灾害频数值的长期积累过程。结果显示,1985—2004年累计距平持续下降,说明该阶段洪灾频率长期处于较低水平;2005年后累计距平迅速反转上升,并于2010年达到最高点。图2d展示了洪涝灾害事件的月度分布及同期降水量的变化。

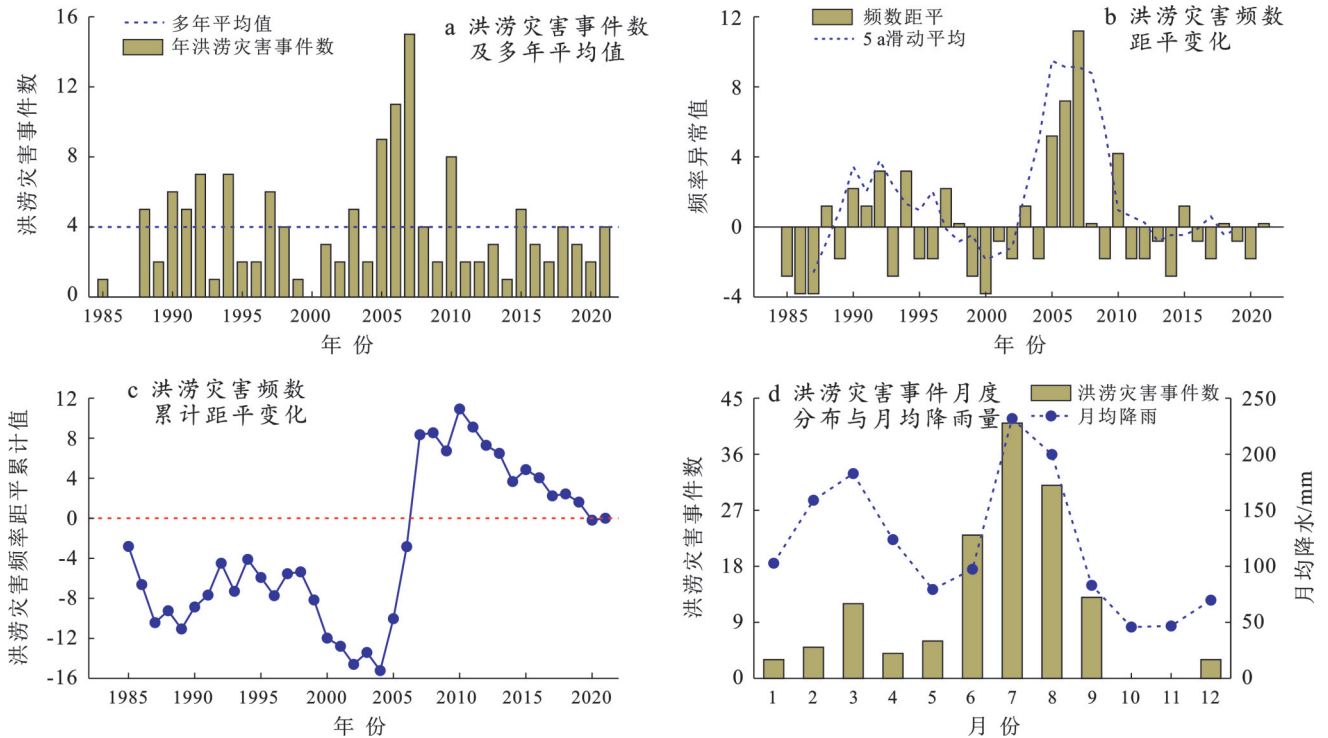


图2 巴基斯坦1985—2021年洪涝灾害的时序变化、频数距平、累计距平与季节分布特征  
Fig.2 Temporal variation, frequency anomalies, cumulative anomalies and seasonal distribution characteristics of flood disasters in Pakistan from 1985 to 2021

结果表明,洪灾主要集中于每年6—9月的夏季主汛期,共记录灾害事件108起,约占总数的75%。

#### 3.2 巴基斯坦洪涝灾害空间分布特征

##### 3.2.1 洪涝灾害频次、密度和严重程度分布特征

为深入揭示巴基斯坦洪涝灾害的时空演化特

征,将1985—2021年巴基斯坦历史洪涝灾害事件与巴基斯坦市县连接,统计每个县域单位洪水事件累计发生次数。

从灾害发生频次与灾害密度对洪涝灾害进行空间分布分析,结果如图3所示。从灾害频次分布来看

(图 3a), 洪涝灾害呈现出明显的区域集聚特征, 高频次区域主要分布在旁遮普省东部、信德省中南部、俾路支省沿海地带以及开伯尔—普赫图赫瓦省北部山区, 灾害发生次数在 4 次及以上的市县数量较多。灾害密度图(图 3b)进一步揭示了单位面积上的灾害烈度差异, 整体呈现“北高南低, 东高西低”的分布格局, 密度最高区域集中在印度河上游流域及其东部平原区。图 3c 为巴基斯坦洪涝灾害严重程度的空间分布特征。基于 DFO 数据库中提供的严重程度等级指标, 本文将洪灾事件划分为 3 个等级。严重程度

1 级表示平均重现期为 10~20 a 的大型洪水事件, 广泛分布于全国多数市县, 尤以信德省、旁遮普省及俾路支东南部等区域最为密集。严重程度 1.5 级对应重现期介于 20~100 a 的特大洪水事件, 主要集中于印度河中游沿线、旁遮普北部平原及信德三角洲地带, 这些区域不仅灾害频繁, 且灾害强度较高, 部分事件与城市集聚区及农业核心区重叠。严重程度 2 级为重现期大于或等于 100 a 的极端洪水事件, 虽数量较少, 但破坏性极强, 主要分布于开普省北部山区、旁遮普省以及信德省部分沿海区域。

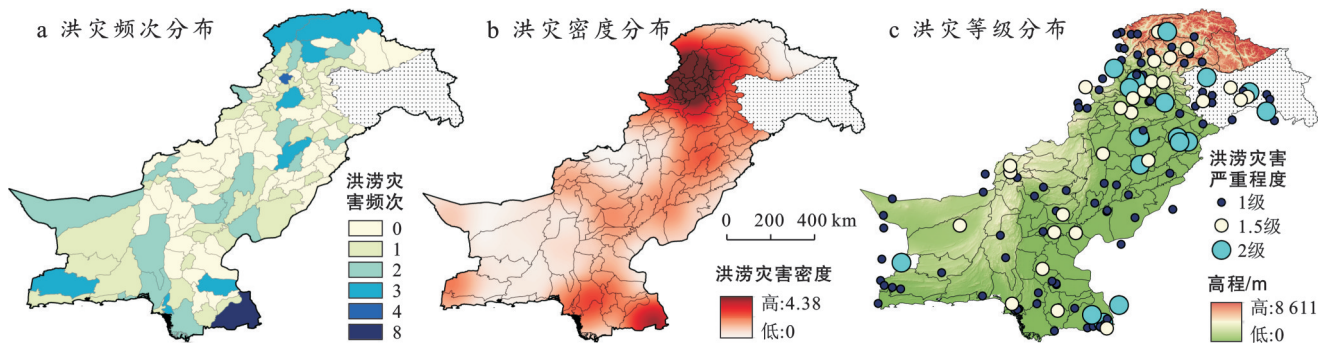


图 3 巴基斯坦 1985—2021 年洪涝灾害、频次和密度严重程度空间分布

Fig.3 Spatial distribution of flood disasters: event frequency, event density and severity in Pakistan from 1985 to 2021

3.2.2 灾害重心及变化趋势

为深入分析巴基斯坦洪涝灾害的空间演化特征, 采用重力模型提取各阶段洪灾重心的位置及其移动轨迹与距离, 并结合标准差椭圆法分析灾害分布的方向性与离散程度。基于年降水量趋势变化特征和累

计距平的转折点(图 4), 将研究时段划分为 4 个气候阶段:  $T_1$ (1985—1993 年)、 $T_2$ (1994—2000 年)、 $T_3$ (2001—2012 年)与  $T_4$ (2013—2021 年)。图 5 与表 1 分别展示了不同阶段的灾害重心位置与空间分布方向的演变过程。

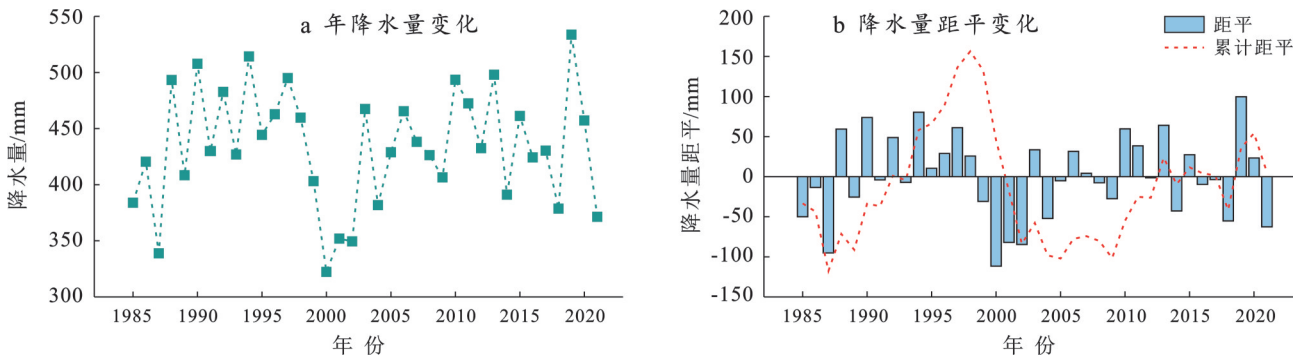


图 4 巴基斯坦年降水量及其距平变化特征

Fig.4 Annual precipitation and its anomaly variation characteristics in Pakistan

由图 5 可知, 1985—2021 年巴基斯坦洪灾重心呈明显向东北迁移的趋势, 整体位置主要分布于旁遮普省西部, 范围集中在  $70^{\circ}04'—71^{\circ}83'E, 30^{\circ}02'—32^{\circ}14'N$ 。  $T_1—T_2$  阶段, 灾害重心以  $16.3^{\circ}$  的方向角由德利伽兹汗市南部向东北方向偏移, 逐渐靠近穆扎法拉汗市;  $T_2—T_3$  阶段以  $100.3^{\circ}$  的方向角回移至德利

伽兹汗市北部;  $T_3—T_4$  阶段以  $50.8^{\circ}$  方向向东北推进, 最终靠近库沙布市。整体来看,  $T_1—T_4$  期间洪灾重心累计迁移距离约 337.4 km。标准差椭圆分析表明,  $T_1—T_4$  阶段灾害分布转向介于  $32.6^{\circ}—54.2^{\circ}$ 。方向角由  $T_1$  阶段的  $54.2^{\circ}$  下降至  $T_4$  阶段的  $32.6^{\circ}$ , 反映出洪灾主分布方向由东北-西南向逐渐转为更接近南

北向,这一变化趋势与印度河流域的纵向水系格局高度吻合。同时,标准差椭圆长半轴由 781.710 km 缩减至 591.084 km;短半轴由 380.582 km 逐步下降

266.035 km,长短轴同时缩减,表明洪灾分布在两个主轴方向均趋于集中,灾害空间分布离散性降低、影响范围明显收敛、空间集中性增强。

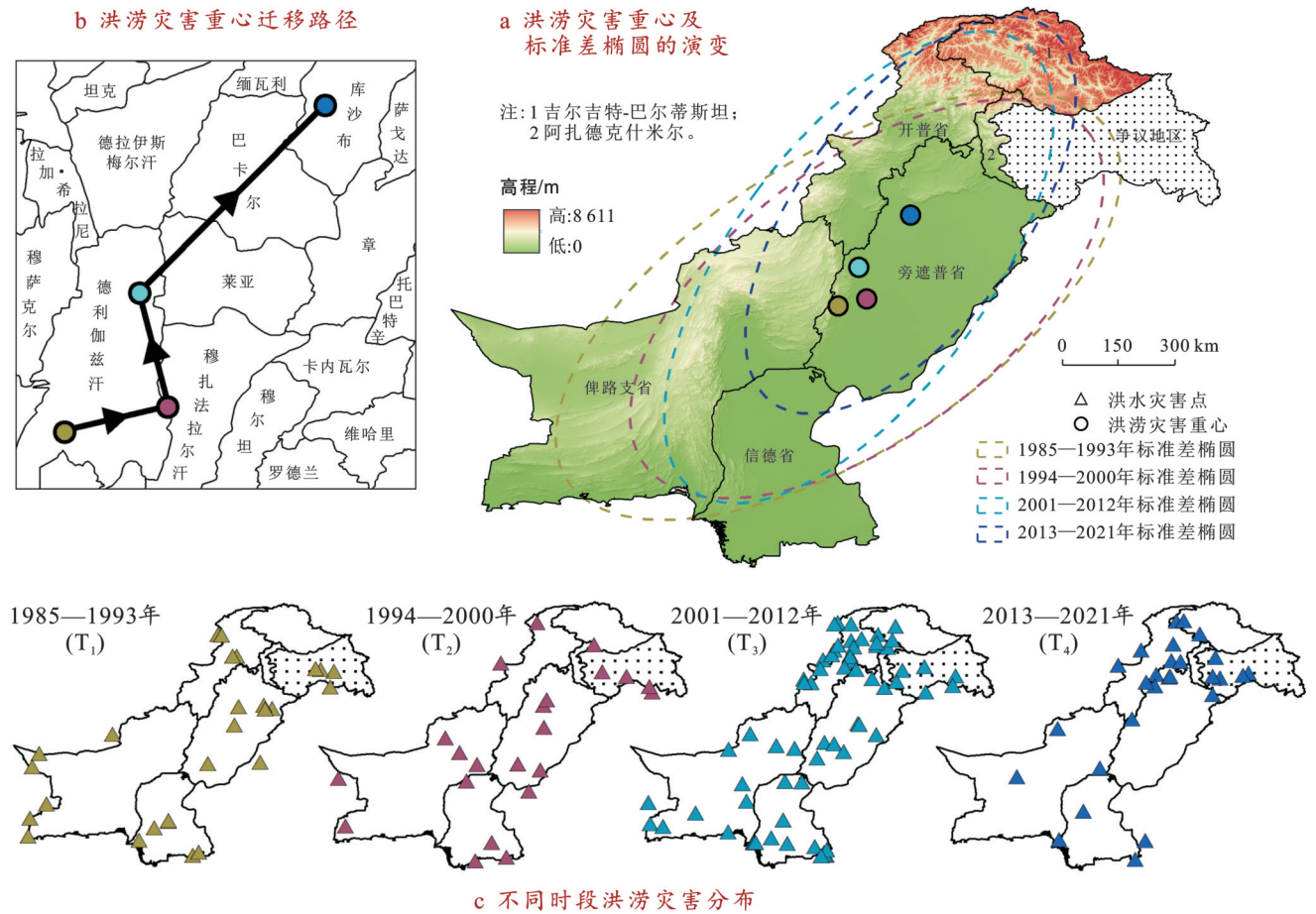


图 5 巴基斯坦洪灾重心及标准差椭圆的演变

Fig.5 Evolution of flood disaster centroid and standard deviation ellipse in Pakistan

表 1 巴基斯坦洪灾重心标准差椭圆的参数变化

Table 1 Parameter variations of flood disaster centroid and standard deviation ellipse in Pakistan

时间段	重心				标准差椭圆		
	重心坐标 X	重心坐标 Y	迁移距离/km	迁移方向/(°)	椭圆长半轴/km	椭圆短半轴/km	长轴转角/(°)
T <sub>1</sub> (1985—1993年)	70°04'E	30°02'N	71.153	16.3	781.710	380.582	54.2
T <sub>2</sub> (1994—2000年)	70°76'E	30°17'N	83.624	100.3	678.411	348.953	48.8
T <sub>3</sub> (2001—2012年)	70°57'E	30°91'N			706.918	311.803	33.4
T <sub>4</sub> (2013—2021年)	71°83'E	32°14'N	182.572	50.8	591.084	266.035	32.6

### 3.3 巴基斯坦历史洪涝灾害时空分布影响因素分析

#### 3.3.1 影响因子选取

巴基斯坦洪涝灾害空间分布差异性显著,成因复杂,影响因素多样。鉴于此,本文主要从降雨、地表环境和人类活动 3 方面来选取巴基斯坦地区洪涝灾害影响因子。

在致灾因子中,强降雨过程被普遍视为洪涝灾害发生的主导驱动因素。依据气候变化检测和指数

专家组(ETCCDI)定义的极端气候指数<sup>[20]</sup>,本研究选取以下 6 类代表性极端降水指标:年均降水量(PRCPTOT)、最大 1 d 降水量(Rx<sub>1d</sub>)、最大 5 d 降水量(Rx<sub>5d</sub>)、大雨日数(R<sub>10mm</sub>)、极端大雨日数(R<sub>20mm</sub>)、日降水强度(SDII)(图 6a—6f),以反映不同强度与历时组合下的降雨触发特征。在地表环境因子方面,地形特征对灾害的空间触发机制具有重要影响,尤其是在山区与高原区<sup>[21]</sup>。地形起伏度(RA)、高程标

准差(STD)与坡度(SLP)是影响坡面汇流与水动力条件的关键参数(图 6g—6i),也是山区洪水灾害频发的地貌基础。在人类活动方面,土地利用方式(land use)、人口密度(PD)与地区生产总值(GDP)

(图 6j—6l)等因素可显著影响暴露程度与灾害响应能力<sup>[22]</sup>,不同类型土地利用对地表径流的调控能力不同,人口和经济密集区则在灾害中表现出更高的潜在损失风险。

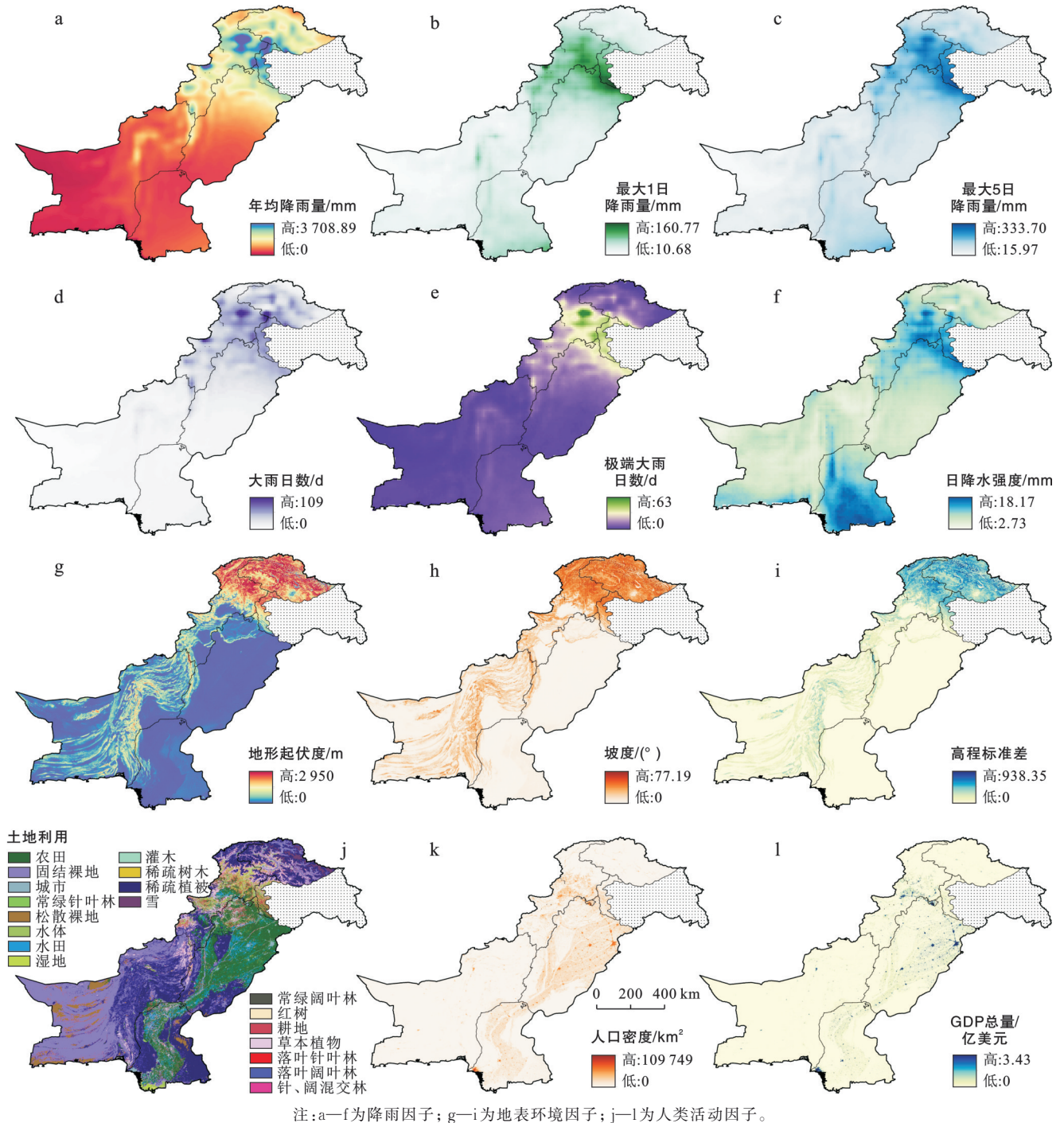


图 6 巴基斯坦历史洪灾害影响因素空间分布

Fig.6 Spatial distribution of influencing factors for historical flood disasters in Pakistan

### 3.3.2 影响因素分析

为揭示巴基斯坦洪涝灾害空间差异性影响因素的贡献率,本文采用OPGD模型因子探测模块对 12 个影响因素进行分析(图 7)。图 7a 显示,所有影响因

子对洪涝灾害密度空间分布均具有显著解释力( $p < 0.01$ ),具体来看,极端降水相关因子具有最高的解释力,最大 5 d 降水量( $R_{x_{5d}}$ )、极端大雨日数( $R_{20mm}$ )和最大 1 d 降水量( $R_{x_{1d}}$ )的  $q$  值分别为 0.540, 0.534 和



高强度地表径流;沟谷区可增强水流汇聚与蓄积,显著提升山洪及局地洪涝风险;而地形起伏大的区域可诱发坡面侵蚀加剧,进一步扰动洪灾路径;同时,降雨类因子与人类活动因子的交互 $q$ 值提升,说明人类活动通过改变下垫面特征和排水能力,对洪涝灾害的发生具有放大效应。在人口密集和经济高度集聚区域,由于不透水面比例高,地表下渗能力弱,强降雨更易转化为地表径流,进而引发城市内涝。由此可见,在区域防灾减灾策略中应重点考虑降雨与地形和人类活动的协同作用。

尽管本文基于多源数据系统分析了巴基斯坦洪涝灾害的时空分布特征及其影响因素,但仍存在一定不足。首先,洪灾事件数据主要来源于DFO公开数据库,其时间跨度虽广,但存在记录不全、属性字段缺失等问题,可能影响灾害频次与强度的准确识别。其次,灾害指标选择相对单一,主要关注灾害频次,未能充分纳入洪峰流量、受灾面积、经济损失等更能全面反映灾害影响程度的参数。最后,由于多源数据存在空间分辨率差异,在重采样过程中可能导致信息损失,从而对分析结果造成一定误差。因此,未来研究可以整合遥感反演、气象再分析数据与社交媒体灾情信息,构建多维度洪灾数据库;融合灾害强度等级、灾害持续时间与经济损失等指标,构建综合风险表征体系;采用多尺度融合方法提高数据一致性和分析精度。

## 5 结论

(1) 巴基斯坦洪涝灾害在2005—2010年进入高发期,2007年频数达历史记录峰值。距平分析显示,2005年后洪灾频率发生突变,累积距平曲线快速上升。

(2) 洪涝灾害空间分布集聚性强,南北差异显著。高频次灾害多集中于旁遮普省、信德省和开普省等区域;密度分布呈“北高南低,东高西低”格局,主要聚集于印度河上游及东部平原;极端洪涝灾害事件主要分布于开普省和旁遮普省北部地区。

(3) 洪涝灾害重心整体向东北方向迁移,分布趋于集中。灾害重心由1985年的德利伽兹汗市逐步迁移至2021年库沙布市附近,累计迁移距离约337.4 km,呈明显的东北方向移动趋势。标准差椭圆分析显示,洪灾的主分布方向由东北—西南逐渐转为南北趋向,同时灾害空间离散程度降低,影响范围呈收敛态势。

(4) 强降雨过程是洪涝灾害的主要致灾因子。OPGD模型因子探测结果表明,极端降水因子( $R_{x_{5d}}$ ,

$R_{20mm}$ ,  $R_{x_{1d}}$ )解释力最强( $q>0.5$ ),人类活动次之,地形因子作用较弱( $q<0.1$ );交互探测器分析表明,地形因子与降雨类因子组合 $q$ 值显著提高。

## 参考文献(References)

- [1] Liu Tian, Shi Peijun, Fang Jian. Spatiotemporal variation in global floods with different affected areas and the contribution of influencing factors to flood-induced mortality (1985-2019) [J]. *Natural Hazards*, 2022, 111(3): 2601-2625.
- [2] Waseem H B, Ahmad Rana I. Floods in Pakistan: A state-of-the-art review [J]. *Natural Hazards Research*, 2023, 3(3): 359-373.
- [3] Kundzewicz Z W, Pińskwar I, Brakenridge G R. Large floods in Europe, 1985—2009 [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2013, 58(1): 1-7.
- [4] Group W B, Bank A D. Climate Risk Country Profile [M]. Washington: World Bank, Washington, D C and Asian Development Bank, Manila, 2021
- [5] Hayat T, Shah H P, Qureshi M U, et al. Attabad landslide-dam disaster in Pakistan 2010 ISSMGE bulletin [J]. *Case Hist. Attabad Landslide-Dam Disaster Pak*, 2010, 4(3): 21-31.
- [6] Martius O, Sodemann H, Joos H, et al. The role of upper-level dynamics and surface processes for the Pakistan flood of July 2010 [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2013, 139 (676): 1780-1797.
- [7] Fu Zhenghang, Zhou Wen, Xie Shangping, et al. Dynamic pathway linking Pakistan flooding to East Asian heatwaves [J]. *Science Advances*, 2024, 10 (17): eadk9250.
- [8] Nanditha J S, Kushwaha A P, Singh R, et al. The Pakistan flood of August 2022: Causes and implications [J]. *Earth's Future*, 2023, 11(3): e2022EF003230.
- [9] Tariq M A U R, van de Giesen N. Floods and flood management in Pakistan [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2012, 47/48: 11-20.
- [10] Sayama T, Ozawa G, Kawakami T, et al. Rainfall-runoff-inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2012, 57(2): 298-312.
- [11] Ahmad Rana I, Routray J K. Integrated methodology for flood risk assessment and application in urban communities of Pakistan [J]. *Natural Hazards*, 2018, 91 (1): 239-266.
- [12] Ahmad Shah A, Ye Jingzhong, Abid M, et al. Flood hazards: Household vulnerability and resilience in disaster-prone districts of Khyber Pakhtunkhwa Province, Pakistan [J]. *Natural Hazards*, 2018, 93(1): 147-165.

- [13] Ahmed K, Shahid S, Nawaz N. Impacts of climate variability and change on seasonal drought characteristics of Pakistan [J]. *Atmospheric Research*, 2018, 214: 364-374.
- [14] Liu Luling, Cao Xin, Li Shijie, et al. A 31-year (1990—2020) global gridded population dataset generated by cluster analysis and statistical learning [J]. *Scientific Data*, 2024, 11:124.
- [15] Kumm M, Kosonen M, Masoumzadeh Sayyar S. Downscaled gridded global dataset for gross domestic product (GDP) per capita PPP over 1990—2022 [J]. *Scientific Data*, 2025, 12:178.
- [16] Tateishi R, Uriyangqai B, Al-Bilbisi H, et al. Production of global land cover data-GLCNMO [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2011, 4(1):22-49.
- [17] 方秀琴,蒋心远,廖美玉,等.1980—2020年全球重大洪灾时空特征探析[J].*水科学进展*,2024,35(2):197-207.  
Fang Xiuqin, Jiang Xinyuan, Liao Meiyu, et al. Spatio-temporal characteristics of global flood disasters during 1980—2020 [J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(2):197-207.
- [18] 熊俊楠,赵云亮,程维明,等.四川省山洪灾害时空分布规律及其影响因素研究[J].*地球信息科学学报*,2018, 20(10):1443-1456.  
Xiong Junnan, Zhao Yunliang, Cheng Weiming, et al. Temporal-spatial distribution and the influencing factors of mountain-flood disasters in Sichuan Province [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2018, 20(10): 1443-1456.
- [19] Wang Jinfeng, Li Xinhui, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1):107-127.
- [20] 尹红,孙颖.基于ETCCDI指数2017年中国极端温度和降水特征分析[J].*气候变化研究进展*,2019,15(4): 363-373.  
Yin Hong, Sun Ying. Characteristics of extreme temperature and precipitation in China in 2017 based on ETCCDI indices [J]. *Climate Change Research*, 2019, 15(4):363-373.
- [21] 杜俊,丁文峰,任洪玉.四川省不同类型山洪灾害与主要影响因素的关系[J].*长江流域资源与环境*,2015,24(11):1977-1983.  
Du Jun, Ding Wenfeng, Ren Hongyu. Relationships between different types of flash flood disasters and their main impact factors in the Sichuan Province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(11):1977-1983.
- [22] 王瑛,林齐根,史培军.中国地质灾害伤亡事件的空间格局及影响因素[J].*地理学报*,2017,72(5):906-917.  
Wang Ying, Lin Qigen, Shi Peijun. Spatial pattern and influencing factors of casualty events caused by landslides [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(5):906-917.

(上接第276页)

- [32] 胡安焱,付稳东,陈云飞,等.毛乌素沙地不同覆被类型土壤水分动态及其对降水的响应[J].*水土保持研究*, 2023, 30(6):133-142.  
Hu Anyan, Fu Wendong, Chen Yunfei, et al. Soil moisture dynamics and its response to precipitation in different cover types of the Mu Us sandy land [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(6): 133-142.
- [33] 李新乐,刘雅婧,孙非,等.乌兰布和沙漠白刺灌丛沙堆丘间地黏土层土壤水分时空格局及其对降雨变化的响应[J].*水土保持通报*,2022,42(6):39-46.  
Li Xinle, Liu Yajing, Sun Fei, et al. Spatial-temporal patterns of soil water in clay layer at inter-dune area of *Nitraria tangutorum* and its response to rainfall changes in Ulan Buh desert [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(6):39-46.
- [34] 朱超凡,黄金柏,顾准,等.基于Hydrus-1D的城市草地土壤水分模拟:以扬州市人工草地为例[J].*水土保持通报*,2021,41(3):118-126.  
Zhu Chaofan, Huang Jinbai, Gu Zhun, et al. Soil moisture simulation in urban grassland using HYDRUS-1D: Taking artificial grassland in Yangzhou City as an example [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(3):118-126.