

引用格式:张凯玥,王中根,唐寅. 1950—2015年青藏高原山洪灾害分布及演变特征[J]. 山地学报, 2025, 43(5): 697-708.

ZHANG Kaiyue, WANG Zhonggen, TANG Yin. Spatial distribution and evolution of historical flash floods on the Qinghai-Tibet Plateau from 1950 to 2015 [J]. Mountain Research, 2025, 43(5): 697-708.

1950—2015年青藏高原山洪灾害分布及演变特征

张凯玥^{1,3}, 王中根^{2,3*}, 唐寅^{1*}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 青藏高原地区山洪灾害风险持续上升,但缺乏基于整体地貌单元的、长序列、高分辨率数据的山洪研究,难以满足小尺度风险评估与工程规划的需求。本文基于1950—2015年青藏高原地区山洪灾害记录,以25.52 km × 25.52 km 网格为单元,综合运用热点分析、空间自相关与标准差椭圆方法,系统解析青藏高原地区山洪灾害的空间格局与演化特征。结果表明:(1)青藏高原地区山洪灾害呈显著空间分异与聚集分布,藏东南、青海东部—甘肃西部及横断山区为三大高发区,其中藏东南“一江两河”(雅鲁藏布江、拉萨河和年楚河)流域聚集度最高;阿里南部、仲巴—申扎—安多一带、石渠—若尔盖、同德—刚察以及祁连山北麓等低发区存在潜在风险。(2)1950—2015年灾害频次在年代际尺度上呈指数增长($y = 89.85e^{0.44x}$, $R^2 = 0.99$),空间扩展由横断山区向“一江两河”及河湟谷地推进,扩展的方向性显著增强,主要分布方向由东北—西南转向东—西;灾害重心持续西移,移动路径与主要交通干线走向基本一致。结论可为青藏高原山洪监测预警、重大工程布设与政策制定提供科学依据。

关键词: 山洪灾害;时空演变;热点分析;空间自相关;标准差椭圆;青藏高原

中图分类号: K903

文献标志码: A

青藏高原是中国西部生态安全屏障和战略资源储备核心区,也是国家重大工程建设关键承载区。在全球气候变化背景下,高原环境表现出高度敏感性与显著放大效应,其脆弱的生态环境、频发的自然灾害对经济社会发展产生制约,已成为西藏绿色发展的核心议题^[1-3]。

山洪灾害是中国山区普遍发育的突发性灾种^[4-7]。随着“一带一路”高质量发展持续推进,山区空间约束叠加气候变化影响,人口与经济高密度区的山洪灾害危险性持续攀升,青藏高原自然灾害

风险愈发凸显^[8]。

国内外关于山洪灾害的研究主要聚焦灾害特征^[9-10]、时空演变与驱动机制^[11-16]以及风险评估与预警^[4,17-19]。在中国山洪灾害的研究领域,全国山洪灾害调查评价项目(2013—2016年)为相关研究提供了统一数据基础^[20],进而不同学者采用多样化的研究方法与分析单元,取得了丰富的研究成果。其一,运用重心迁移模型与地理探测器,以生态功能分区为单元,系统梳理1949年以来全国山洪灾害的时空演变脉络,解析总体风险格局和空间分异驱动

收稿日期(Received date): 2025-01-13; 改回日期(Accepted date): 2025-10-21

基金项目(Foundation item): 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0903)。[The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (2019QZKK0903)]

作者简介(Biography): 张凯玥(2000-),女,山东泰安人,硕士研究生,主要研究方向:山洪灾害及其风险。[ZHANG Kaiyue (2000-), female, born in Taian, Shandong Province, M. Sc. candidate, research on flash flood disaster and its risk] E-mail: zhangkaiyue3329@igsrr.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 王中根(1973-),男,博士,研究员,主要研究方向:流域水循环机理与过程模拟、水旱灾害防治。[WANG Zhonggen (1973-), male, Ph. D., professor, research on mechanisms and processes simulation of watershed hydrological cycle, flood and drought disaster prevention and control] E-mail: wangzhonggen@163.com。

唐寅(1986-),女,博士,副研究员,主要研究方向:水文水资源、山洪灾害风险评估及预测。[TANG Yin (1986-), female, Ph. D., associate professor, research on hydrology and water resources, flash flood disaster risk assessment and prediction] E-mail: tangyin@igsrr.ac.cn

机制^[13,21-22]。其二,选取一级地貌大区,揭示灾害频次、密度与高程、降雨量的耦合关系,阐明不同地貌单元内山洪灾害的分布规律^[5]。其三,综合热点分析、空间自相关、核密度估计及标准差椭圆等方法,聚焦西南地区的西藏、四川、云南和重庆,剖析山洪灾害的时空特征及其驱动力^[12,14,23-25]。其四,基于 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 网格尺度与参数最优地理探测器,对江西省山洪灾害进行精细解析,为长江中下游相关研究提供了重要补充^[11]。

地貌单元能够综合反映降雨、地形等因子的影响,比行政单元更适合刻画山洪灾害的空间分异^[5]。然而,现有工作多集中于全国或省级行政区^[5,9,12,15-17,23-26],针对青藏高原这一巨型地貌单元的研究明显不足,尤其缺乏基于长序列、高分辨率数据的山洪灾害精细刻画,难以满足小尺度风险评估与工程规划的需求。

本文依托1950—2015年青藏高原历史山洪灾害数据,借助优化的热点分析工具,将点数据转换为网格数据,并运用空间自相关模型,识别灾害高发地区及隐藏于低发地区的潜在风险区;采用标准差椭圆方法,深入分析青藏高原地区历史山洪灾害的空间分布及演变特征,以期从高原整体视角出发,为未来青藏高原山洪灾害预测、工程建设、政策制定等提

供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

青藏高原作为全球海拔最高的一个巨型构造地貌单元,其山洪灾害风险在复杂孕灾环境与多样致灾因子的共同作用下尤为突出。本文研究区涵盖中国境内青藏高原主体及其向周边区域的过渡地带,即广义的青藏高原地区,跨越西藏、四川、云南、青海、甘肃、新疆六个省级行政区,经纬度范围为 $73^{\circ}29'56''\text{E} \sim 105^{\circ}40'33''\text{E}$, $24^{\circ}16'28''\text{N} \sim 40^{\circ}01'09''\text{N}$,面积约为 $286 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。该区域地形复杂,边缘高山环绕,内部地貌形态多样,山脉、宽谷与湖泊、盆地交错分布,是众多大江大河的发源地。此外,高原构造活动强烈、对气候变化敏感,导致全球变暖背景下藏东南等地区的高强度水分供给增加,山洪灾害危险性增大^[1,27-28]。由于高原地区人口、经济高密度区与灾害高风险区重合^[1,19,29-30],以及川藏铁路等重大工程持续推进^[27,31-32],区域灾害风险不断上升。研究区内山洪灾害分布集中,历史灾害点分布如图1所示。

1.2 数据来源

本研究所用历史山洪灾害点数据来源于“全国

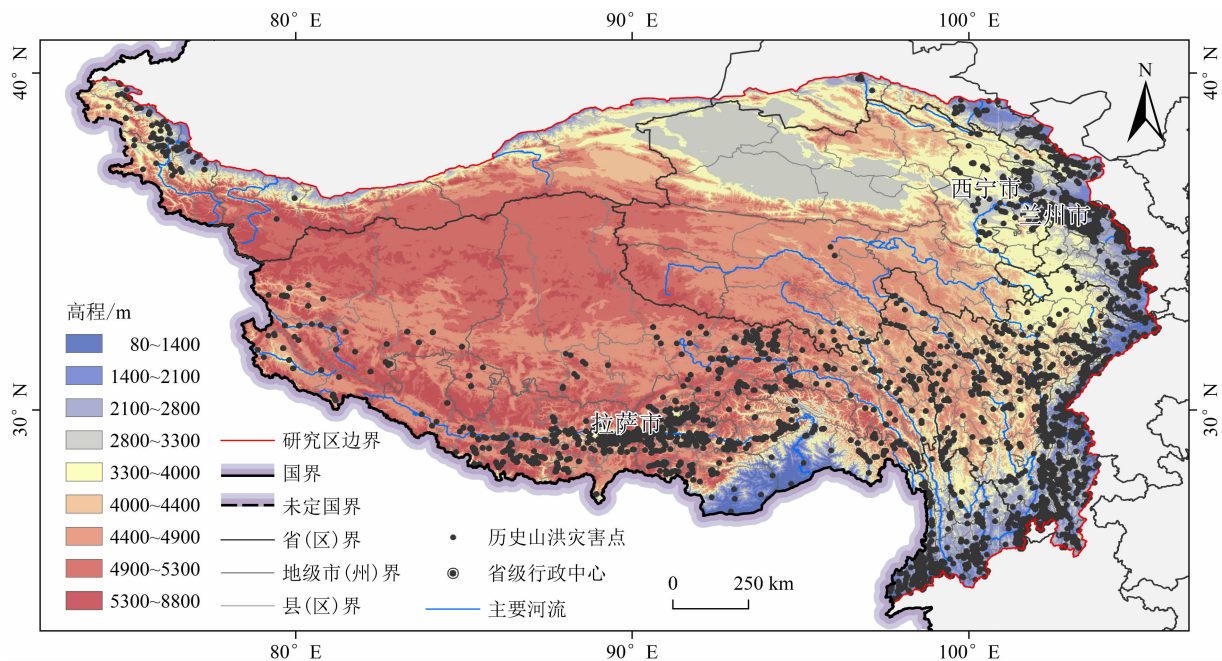


图1 研究区概况及1950—2015年历史山洪灾害分布

Fig. 1 Overview of study area and distribution of historical flash floods from 1950 to 2015

(审图号:GS(2024)0650号)

山洪灾害调查评价项目”^[20]以及第二次青藏高原科学考察研究“重大山洪灾害与风险”专题,主要为专题实施过程中从业务部门、实地调查及文献中获取的资料^[33-36]。将上述多源数据经过合并、去重等处理,辅以实际案例的交叉检验,保证数据的准确性、完整性和一致性。数据的时间跨度为1950—2015年,总计5262个山洪灾害点,每个点代表一次山洪灾害事件,其属性数据记录了山洪灾害事件发生的时间、地点等信息。

本文研究区参考第二次青藏高原科学考察的科考区域划定,参考的边界数据由第二次青藏高原科学考察办公室提供。主要河流和高程(DEM)数据获取自中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。

2 研究方法

由于山洪灾害数据为典型的点数据,本文采用典型的针对点数据的空间统计方法——热点分析方法,识别山洪灾害高发区;同时为了更精准进行后续聚类特征分析,根据热点分析的结果,将山洪灾害点数据转化为网格尺度,每个网格值就代表该网格中包含的山洪灾害点个数,基于该网格灾害频次数据,采用空间自相关模型识别青藏高原山洪灾害事件的聚类特征;最后,对不同年代际山洪灾害的标准差椭圆进行对比分析,揭示山洪灾害空间分布及重心点的时空演变特征。

2.1 热点分析

热点分析(Getis-Ord G_i^*)通过构建局部的标准化统计量,识别具有统计显著性的高值(热点)和低值(冷点)的空间聚类,在地理现象的空间分布研究中应用广泛^[37]。相关公式如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^N w_{ij} v_j - \bar{v} \sum_{j=1}^N w_{ij}}{S \sqrt{[N \sum_{j=1}^N w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^N w_{ij})^2] / (N-1)}} \quad (1)$$

$$\bar{v} = \frac{\sum_{j=1}^N v_j}{N} \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N v_j^2}{N} - \bar{v}^2} \quad (3)$$

式中, G_i^* 为网格*i*的标准化统计量; w_{ij} 为网格*i*和*j*

间的空间权重(距离阈值范围内为1,超出阈值为0); v_j 为网格*j*内山洪灾害点的数量; \bar{v} 为山洪灾害点数量的平均值; N 为网格单元总数。通过ArcGIS 10.8平台中优化的热点分析工具(Optimized Hot Spot Analysis)获取最优距离阈值和网格尺寸。

G_i^* 即*Z*得分(表示标准差的倍数),其综合考虑了相邻区域的聚集特征与全局分布模式,可表征山洪灾害的相对强度^[14,22,38]。对于显著的正*Z*值,判断为热点区域,即该网格及其附近网格为山洪灾害事件高发的密集区域,*Z*值越大,表示该区域山洪灾害越易发;相反,显著的负*Z*值指示冷点区域,*Z*值越小,灾害越不易发^[11]。本文基于优化的热点分析得到的网格数据进行后续空间自相关分析。

2.2 空间自相关分析

空间自相关分析在统计学意义上定量化空间聚类关系并给出空间聚类类型,是对热点分析结果的有效补充^[14]。其中,全局自相关(Global Moran's *I*)衡量空间随机变量整体自相关程度;局部莫兰指数(Local Moran's *I*)作为局部空间关联指标(Local Indicators of Spatial Association, LISA),可将空间单元与其邻近单元的相关性划分为五类,从而识别聚集或异常发生的具体空间位置。这五类分别为高-低聚集(高值被低值围绕,即该区域山洪灾害事件发生频率显著高于其相邻区域)、低-高聚集(低值被高值围绕,即该区域山洪灾害事件发生频率显著低于其相邻区域)、高-高聚集、低-低聚集和不显著^[11]。为与热点分析结果进行比较分析,本文进行空间自相关分析时设定空间关系概念化的标准为固定距离带宽,距离阈值设定为优化的热点分析工具得到的最佳搜索半径^[39]。

2.3 标准差椭圆分析

标准差椭圆分析法(Standard Deviational Ellipse, SDE)可以描述山洪灾害点要素的中心位置、离散和方向趋势等空间特征^[12]。标准差椭圆的定义公式为:

$$C = \frac{1}{n} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2 & \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i \\ \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i & \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \tilde{x}_i = (x_i - \bar{x}) \\ \tilde{y}_i = (y_i - \bar{y}) \end{cases} \quad (5)$$

式中, C 为每个山洪灾害点与平均中心点的偏移量协方差矩阵, 其特征向量和特征值定义椭圆的方向和轴长; \bar{x}_i 和 \bar{y}_i 分别为山洪灾害点 i 与平均中心横坐标、纵坐标的差值; x_i 和 y_i 为山洪灾害点 i 的横、纵坐标; (\bar{x}, \bar{y}) 为山洪灾害点的平均中心; n 为山洪灾害点的总数。

标准差椭圆的中心为山洪灾害点集的平均中心, 椭圆的方向角度表示山洪灾害分布的方向, 长、短半轴的长度表示山洪灾害分布的范围, 以扁率表示长、短半轴的长度差, 扁率越大, 表明山洪灾害点沿长轴的条带状分布越明显。本文基于不同年代山洪灾害数据分别构建标准差椭圆。

3 结果分析

3.1 山洪灾害整体空间分布特征

根据 1950—2015 年青藏高原地区历史山洪灾害数据, 针对研究区全域进行优化的热点分析, 最佳搜索距离为每个点与其临近 30 个点间平均距离的全局平均值 (83.63 km), 网格单元大小为 $25.52 \text{ km} \times 25.52 \text{ km}$ 。

分析结果表明, 研究区山洪灾害整体呈现东南高、西北低的空间分布特征, 并高度聚集于三个热点区域 (图 2)。首先是藏东南的“一江两河” (雅鲁藏布江、拉萨河和年楚河) 及其周边地区, 包括拉萨市及其周边的那曲市东部、日喀则市中部和东部、山南市北部和林芝市西部。其次是青海省东部河湟谷地及金昌市往南的甘肃省西部地区, 主要包括兰州-西宁城市群及其周边的武威市、天水市、陇南市等。第三是研究区东南部的横断山脉地区, 包括川西地区的阿坝州南部、甘孜州东部、雅安市、乐山市、眉山市、凉山州、攀枝花市, 以及云南省的楚雄州、大理州、保山市。此外, 高原西部的塔里木河流域、阿里地区的狮泉河、象泉河流域也有少量山洪灾害发生。

3.2 山洪灾害聚集特征及潜在风险

全局莫兰指数为 0.26, Z 得分为 73.70, 表明青藏高原地区历史山洪灾害点的分布在空间上呈现极显著的聚集性分布, 定量验证了前文的热点分析结果。

基于局部莫兰指数绘制 LISA 集聚图, 在网格尺度上识别具体的空间关联模式, 结果如图 3 所示。高-高聚集区域 (图 3 中红色网格) 揭示了三大热点

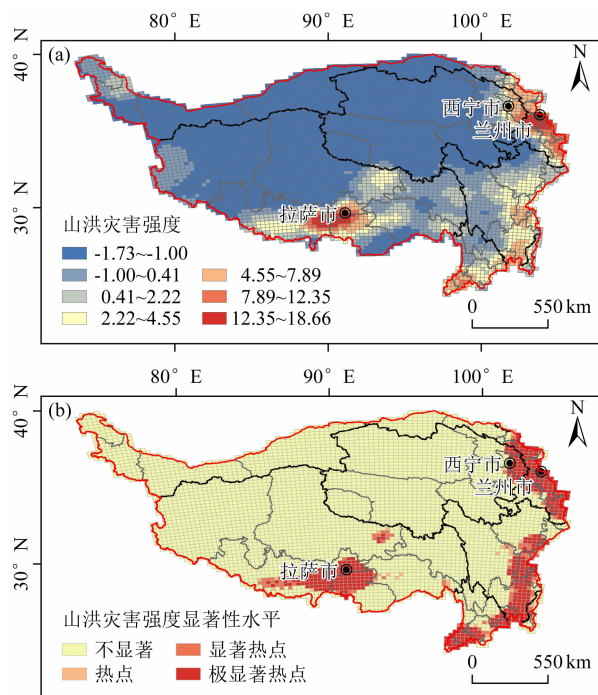


图 2 1950—2015 年研究区山洪灾害热点分析结果:

(a) 山洪灾害强度; (b) 山洪灾害强度显著性水平

Fig. 2 Results of hot spot analysis of flash floods in study area from 1950 to 2015: (a) flash flood intensity; (b) significance level of flash flood intensity

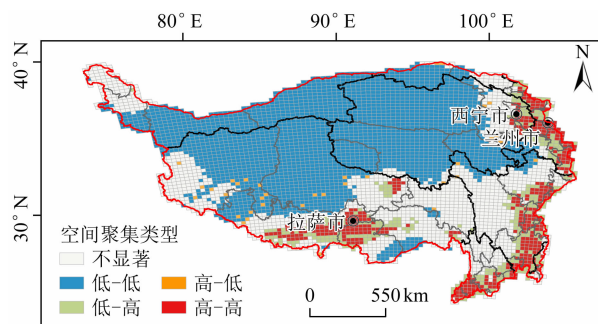


图 3 1950—2015 年研究区网格单元山洪灾害 LISA 集聚图

Fig. 3 LISA map of flash floods in grid cells in study area from 1950 to 2015

区中的山洪灾害核心发生位置, 是防灾减灾工作的重点区域。而绿色网格为热点区域中山洪灾害的相对低发区, 白色网格为热点区域与冷点区域之间的过渡区, 虽有少量灾害发生, 但在该研究尺度下未达到统计显著性水平, 需防范这些区域灾害风险升高的可能。蓝色网格为低-低聚集区, 位于藏北高原和柴达木盆地等高原腹地, 研究时段内几乎没有山洪灾害记录。需要格外注意的是高-低聚集区域 (橙色网格), 这些区域所处位置整体上山洪灾害强度低,

易在常规评估中被忽视,但历史记录表明其仍有发生山洪灾害的风险,是精准化区域防灾策略的难点。这些零星的风险区主要位于阿里地区的南部,日喀则市和那曲市的仲巴—申扎—安多一带,川西地区的石渠—若尔盖,青海省西部的同德—刚察以及祁连山北麓的疏勒河流域。

3.3 山洪灾害分布特征变化及重心迁移

利用标准差椭圆综合分析 1950—2015 年山洪灾害点的分布与方向特征。研究时段共计 66 年,每 10 年划分为一个年代。例如,1950—1959 年称为“1950 年代”。需要说明的是,在本文叙述中,“2010 年代”仅指 2010—2015 年。趋势分析表明(图 4),研究时段青藏高原地区历史山洪灾害呈指数趋势增长($y = 89.85e^{0.44x}$, $R^2 = 0.99$,其中 x 为年代序数,规定 1950 年代对应 $x = 1$,后续年代依次递增; y 表示山洪灾害频次),由 1950 年代的 180 次增长到 2010 年代的 1975 次,1980 年代起灾害频次的增长速率显著加快。

各年代标准差椭圆的分布与参数(图 5、图 6)揭示了山洪灾害空间分布的演变特征。建国初期的山洪灾害点主要分布在四川省内的横断山高山峡谷

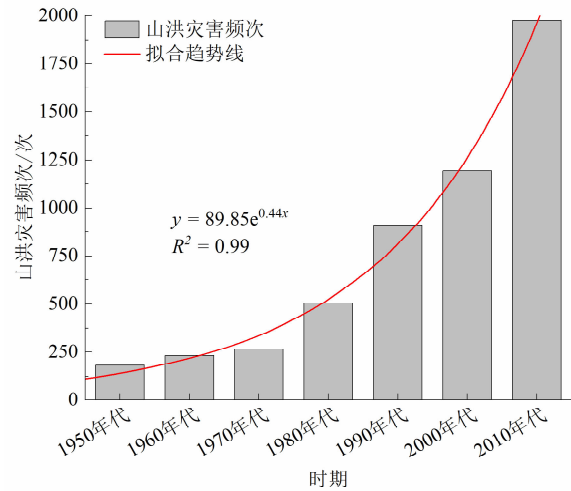


图 4 1950—2015 年研究区年代际山洪灾害频次分布及变化特征
Fig. 4 Interdecadal distribution and variation of flash floods in study area from 1950 to 2015

区,随后主要向西边的“一江两河”流域以及北边的河湟谷地扩展(图 5)。各椭圆的长半轴长度为 567.75 ~ 899.21 km(图 6a),呈显著增大趋势,短半轴长度为 342.81 ~ 688.46 km(图 6b),波动较大,整体增大趋势较长半轴弱,长、短半轴最大值均出现在

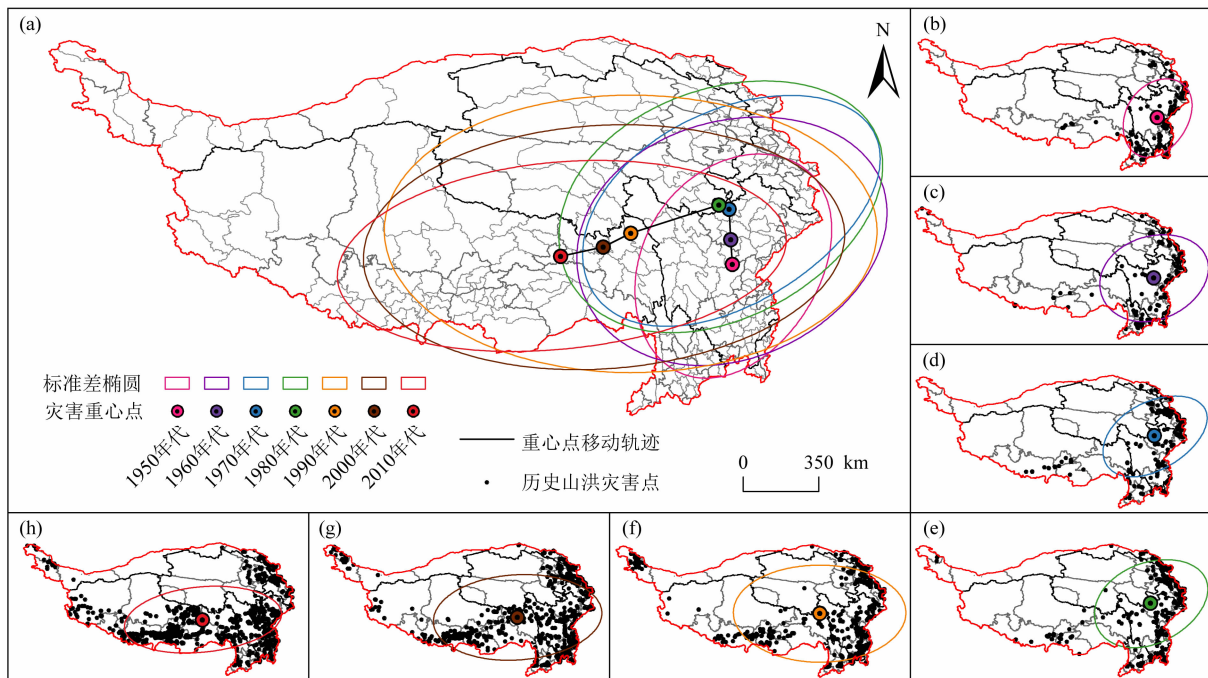


图 5 1950—2015 年研究区年代际山洪灾害演变特征:
(a) 年代际山洪灾害的重心点迁移及标准差椭圆分布;(b—h) 依次对应 1950 年代至 2010 年代山洪灾害、灾害重心点及标准差椭圆分布
Fig. 5 Interdecadal evolution of flash floods in study area from 1950 to 2015;
(a) centroid migration and SDE distribution of interdecadal flash floods;
(b—h) distribution of flash floods, centroid, and SDE of each decade from the 1950s to the 2010s, respectively

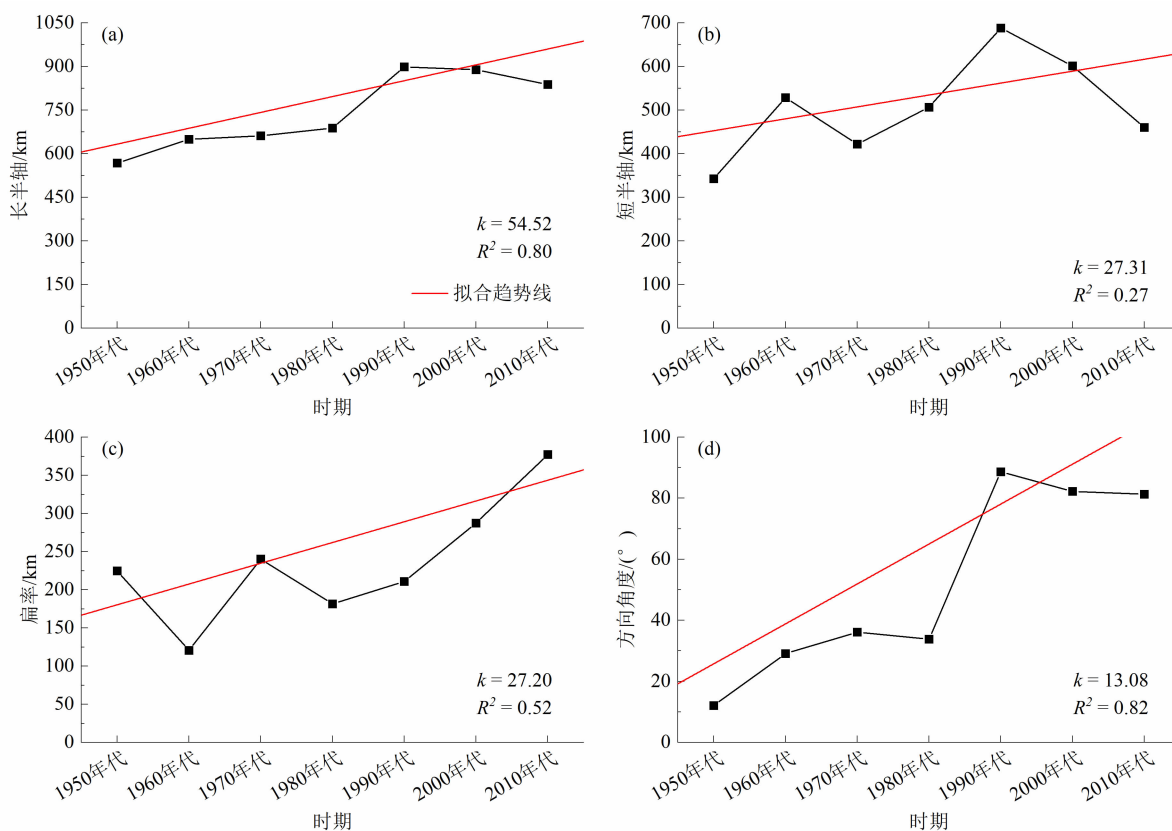


图6 1950—2015年研究区年代际山洪灾害标准差椭圆参数变化:(a)长半轴;(b)短半轴;(c)扁率;(d)方向角度

Fig. 6 Interdecadal variation of SDE parameters of flash floods in study area from 1950 to 2015:

(a) semi-major axis; (b) semi-minor axis; (c) oblateness; (d) orientation

1990年代;同时,扁率以每年代27.20 km的趋势增大(图6c)。这表明各年代山洪灾害点分布范围呈现总体扩大趋势,且条带状空间分布特征增强。

分布方向上,各椭圆的方向角度在 $12.08^{\circ} \sim 88.63^{\circ}$ 范围内(图6d),且总体呈增大趋势,1980年代后方向角度由 33.85° 增大至1990年代的 88.63° ,随后的2000年代、2010年代方向角度在 80.00° 左右,表明山洪灾害的主要分布方向由东北—西南方向逐渐转变为东—西方向。可见1980年代后拉萨及其周边的“一江两河”地区灾害点增长速率相对更大,山洪灾害点也扩展至阿里地区的西部,标准差椭圆明显西移。

标准差椭圆的中心可以看作山洪灾害的重心,其移动路径指示了灾害核心区域的演变方向(图5、表1)。研究时段内山洪灾害重心在 $96^{\circ}32'47''E \sim 101^{\circ}55'24''E, 30^{\circ}32'23''N \sim 33^{\circ}00'37''N$ 范围内变化,且移动距离较大,起点至终点的直线距离为638.04 km,总移动轨迹长951.78 km,平均每时期

移动158.63 km。灾害重心总体由东向西移动,移动趋势与该地区主要交通干线的走势基本一致。1980年代及之前,重心点主要在四川省内的横断山高山峡谷区,1990年代、2010年代期间位于西藏自治区东部的三江流域。具体迁移轨迹为1950年代重心点在甘孜州康定市北部,随后北移至阿坝州,1960年代在金川县,1970年代、1980年代在阿坝县;1980年代后重心移动的方位角由北偏西转为西偏南,先移动至西藏自治区昌都市,后在昌都市北部继续西移,由江达县经类乌齐县移动至边坝县。

4 讨论

本研究系统揭示了1950—2015年青藏高原地区山洪灾害“东南高、西北低”的整体空间格局及其显著的时空演变趋势。作为典型多因素、多尺度的复杂问题,山洪灾害分布受区域环境特征影响显著^[40],其中人类活动和气候变化是决定其空间分布及演变的关键驱动力。

表 1 各年代山洪灾害重心坐标、移动方位角及移动距离

Tab. 1 Centroid coordinates, moving azimuth angle and moving distance of historical flash floods in study area for each decade

时期	重心点坐标	方位角/(°)	移动距离/km
1950 年代	101°55'24"E,30°32'23"N		
1960 年代	101°51'18"E,31°34'12"N	北偏西 6.83	123.07
1970 年代	101°47'12"E,32°50'30"N	北偏西 6.23	152.38
1980 年代	101°21'51"E,33°00'37"N	西偏北 25.14	41.74
1990 年代	97°41'39"E,31°50'20"N	西偏南 26.36	348.91
2000 年代	96°32'47"E,31°15'47"N	西偏南 35.47	122.30
2010 年代	94°46'39"E,30°52'49"N	西偏南 16.62	163.39

本研究识别的山洪灾害高发区与既有的对青藏高原部分热点地区的研究结果^[12,14-15,24-25]基本一致,但提供了更为整体、系统的视角。总体上,青藏高原地区山洪灾害强度东南高、西北低,三大灾害热点地区与人类活动空间分布格局基本一致(图 2),即东部沿线城市群和西藏境内“一江两河”沿线市州^[41]。而青藏高原地区人口和城镇空间分布的基本格局极大取决于自然本底^[42],水热充足、土地资源丰富的河谷是人口高密度区,同时在大地形起伏度下也是灾害高风险区^[43]。可见,在自然本底的影响下,人类活动主导的承灾体分布,是塑造青藏高原地区山洪灾害宏观空间格局的首要因素。

从动态视角看,研究区内人类活动的时空演变与山洪灾害格局的演化高度同步,进一步印证了承灾体的关键影响。1949 年以来,青藏高原地区人口数量与人类活动不断提升^[44-46],城镇体系呈现西移态势,具体表现为“祁吉线”(祁连县与吉隆县)西北部人口持续微增^[47],以及 2000 年以后西藏中东部地区城镇密度不断提高,形成以拉萨市和日喀则市为中心的较高密度集聚格局^[48]。上述过程与主要交通干线等基础设施的拓展具有较强的空间耦合性^[49-50],而本研究中山洪灾害重心移动趋势也与主要交通干线走势基本吻合(图 5)。表明人类活动的空间拓展,不仅增加了承灾体的暴露度,也驱动了山洪灾害的空间演变方向。

上述讨论可知,人类活动变化对青藏高原地区山洪灾害的空间分布、演变有决定性作用。气候变化则在此基础上进一步增加山洪灾害风险^[51]。相关研究^[52-57]表明,受气候变化影响,本文灾害热点

地区的极端降水事件呈现增多趋势。短时强降雨是山洪灾害的最主要致灾因子^[58],极端降水的增加直接导致山洪灾害增加。青藏高原作为典型高寒区,其山洪灾害高发区域广泛分布着冰川与冻土^[59]。在高原持续加速变暖的背景下^[60],气温上升通过影响冰冻圈的冻融过程改变水文环境^[61],可能进一步促使山洪灾害发生。青藏高原变暖始于 1950 年代中期,自 1980 年代中期以来变暖速度显著加快^[1],这与本文统计得到的山洪灾害频次增长趋势类似(图 4)。异常升温背景下,藏东南等地区的冰川加速退缩,加之雨量丰富、地形高差大,导致冰湖溃决、冰川泥石流堵江等链式灾害频发,往往规模巨大、灾情严重^[62]。值得注意的是,该类山洪灾害热点区域内对于山洪灾害规模效应的认识尚未形成,研究灾害事件规模与其造成的综合影响(如经济损失、人员伤亡、社会混乱等)之间的非线性关系将是下一步研究的重点之一。

综上所述,在青藏高原地区独特的自然条件下,人类活动与气候变化叠加效应塑造了当地特殊的灾害过程。首先,在人类活动主导空间格局的基础上,升温加速冰雪消融和冻土退化,进而导致极端降水致灾力增强、山洪灾害事件增加。与此同时,人类活动的聚集与增强进一步放大了承灾体暴露度,最终形成当前的山洪灾害空间格局及演变特征。

本文仅探讨了历史时期青藏高原地区山洪灾害的空间格局及演变特征,尚未充分考虑未来气候变化和人类活动因素的影响。后续研究应结合气象观测数据及社会经济数据,定量归因气候变化和人类活动对山洪灾害变化的影响,进一步揭示未来气候

情景下山洪灾害的活动趋势,为防灾减灾提供更全面的科学支撑。

5 结 论

(1)青藏高原地区山洪灾害存在明显的空间分异,空间分布聚集性显著,山洪灾害多发于青藏高原的南部和东部,“一江两河”及其周边地区、青海东部—甘肃西部地区、横断山区为山洪灾害的主要聚集区,其中又以“一江两河”地区最为高发。阿里南部、仲巴—申扎—安多一带、石渠—若尔盖、同德—刚察以及祁连山北麓等地区虽灾害低发,但仍存在潜在灾害风险。

(2)1950—2015年青藏高原地区山洪灾害频次在年代际尺度上呈现指数增长($y = 89.85e^{0.44x}$, $R^2 = 0.99$)。空间分布范围扩张,主要由横断山区向“一江两河”、河湟谷地两个方向拓展,1990年代后主要分布方向由东北—西南转变为东—西,同时沿东—西方向的聚集性增强,空间分布的方向性越来越明显。灾害重心总体呈现明显的西移趋势,移动距离大(合计951.78 km),移动路径与该地区主要交通干线的走势基本一致。

参考文献 (References)

- [1] KUANG Xingxing, JIAO Jiu Jimmy. Review on climate change on the Tibetan Plateau during the last half century [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2016, **121**(8): 3979–4007. DOI: 10.1002/2015JD024728
- [2] YANG Kun, WU Hui, QIN Jun, et al. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle: A review [J]. *Global and Planetary Change*, 2014, **112**: 79–91. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2013.12.001
- [3] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. *地理学报*, 2012, **67**(1): 3–12. [SUN Honglie, ZHENG Du, YAO Tandong, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(1): 3–12] DOI: 10.11821/xb201201001
- [4] 刘樟漪, 程维明, 孙东亚, 等. 中国历史山洪灾害分布特征研究[J]. *地球信息科学学报*, 2017, **19**(12): 1557–1566. [LIU Qiangyi, CHENG Weiming, SUN Dongya, et al. Distribution characteristics of historical mountain flood in China [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, **19**(12): 1557–1566] DOI: 10.3724/SP.J.1047.2017.01557
- [5] 郭良, 丁留谦, 孙东亚, 等. 中国山洪灾害防御关键技术[J]. *水利学报*, 2018, **49**(9): 1123–1136. [GUO Liang, DING Liuqian, SUN Dongya, et al. Key techniques of flash flood disaster prevention in China [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, **49**(9): 1123–1136] DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20180728
- [6] 孙厚才, 沙耘, 黄志鹏. 山洪灾害研究现状综述[J]. *长江科学院院报*, 2004, **21**(6): 77–80. [SUN Houcai, SHA Yun, HUANG Zhipeng. Review of present situation in studying mountain torrent disaster [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2004, **21**(6): 77–80] DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2004.06.021
- [7] 崔鹏, 陈容, 向灵芝, 等. 气候变暖背景下青藏高原山地灾害及其风险分析[J]. *气候变化研究进展*, 2014, **10**(2): 103–109. [CUI Peng, CHEN Rong, XIANG Lingzhi, et al. Risk analysis of mountain hazards in Tibetan Plateau under global warming [J]. *Climate Change Research*, 2014, **10**(2): 103–109] DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2014.02.004
- [8] 姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 等. 从青藏高原到第三极和泛第三极[J]. *中国科学院院刊*, 2017, **32**(9): 924–931. [YAO Tandong, CHEN Fahu, CUI Peng, et al. From Tibetan Plateau to Third Pole and Pan-Third Pole [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Science*, 2017, **32**(9): 924–931] DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2017.09.001
- [9] MA Meihong, HE Bingshun, WAN Jinhong, et al. Characterizing the flash flooding risks from 2011 to 2016 over China [J]. *Water*, 2018, **10**(6): 704. DOI: 10.3390/w10060704
- [10] HE Bingshun, HUANG Xianlong, MA Meihong, et al. Analysis of flash flood disaster characteristics in China from 2011 to 2015 [J]. *Natural Hazards*, 2018, **90**(1): 407–420. DOI: 10.1007/s11069-017-3052-7
- [11] 张若婧, 陈跃红, 张晓祥, 等. 基于参数最优地理探测器的江西省山洪灾害时空格局与驱动力研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2021, **37**(4): 72–80. [ZHANG Ruojing, CHEN Yuehong, ZHANG Xiaoxiang, et al. Spatial-temporal pattern and driving factors of flash flood disasters in Jiangxi Province analyzed by optimal parameters-based geographical detector [J]. *Geography and Geo-information Science*, 2021, **37**(4): 72–80] DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2021.04.011
- [12] 熊俊楠, 李进, 程维明, 等. 西南地区山洪灾害时空分布特征及其影响因素[J]. *地理学报*, 2019, **74**(7): 1374–1391. [XIONG Junnan, LI Jin, CHENG Weiming, et al. Spatial-temporal distribution and the influencing factors of mountain flood disaster in southwest China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, **74**(7): 1374–1391] DOI: 10.11821/dlxb201907008
- [13] LIU Yesen, YANG Zhenshan, HUANG Yaohuan, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of China's flash flood disasters since 1949 [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, **61**(12): 1804–1817. DOI: 10.1007/s11430-017-9238-7

- [14] 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] DOI: 10.12082/dqxxkx.2018.180193
- [15] 熊俊楠, 龚颖, 程维明, 等. 西藏自治区近30年山洪灾害时空分布特征[J]. 山地学报, 2018, **36**(4): 557 - 570. [XIONG Junnan, GONG Ying, CHENG Weiming, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of mountain floods in Tibet, China in recent 30 years [J]. Mountain Research, 2018, **36**(4): 557 - 570] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 - 2786.000352
- [16] LI Chanjuan, CHAI Yuanqing, YANG Linsheng, et al. Spatio-temporal distribution of flood disasters and analysis of influencing factors in Africa [J]. Natural Hazards, 2016, **82**(1): 721 - 731. DOI: 10.1007/s11069 - 016 - 2181 - 8
- [17] CAO Yifan, JIA Hongliang, XIONG Junnan, et al. Flash flood susceptibility assessment based on geodetector, certainty factor, and logistic regression analyses in Fujian Province, China [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020, **9**(12): 748. DOI: 10.3390/ijgi9120748
- [18] 赵刚, 庞博, 徐宗学, 等. 中国山洪灾害危险性评价[J]. 水利学报, 2016, **47**(9): 1133 - 1142 + 1152. [ZHAO Gang, PANG Bo, XU Zongxue, et al. Assessment on the hazard of flash flood disasters in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, **47**(9): 1133 - 1142 + 1152] DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20150501
- [19] 崔鹏, 苏凤环, 邹强, 等. 青藏高原山地灾害和气象灾害风险评估与减灾对策[J]. 科学通报, 2015, **60**(32): 3067 - 3077. [CUI Peng, SU Fenghuan, ZOU Qiang, et al. Risk assessment and disaster reduction strategies for mountainous and meteorological hazards in Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2015, **60**(32): 3067 - 3077] DOI: 10.1360/N972015 - 00849
- [20] 郭良, 张晓蕾, 刘荣华, 等. 全国山洪灾害调查评价成果及规律初探[J]. 地球信息科学学报, 2017, **19**(12): 1548 - 1556. [GUO Liang, ZHANG Xiaolei, LIU Ronghua, et al. Achievements and preliminary analysis on China national flash flood disasters investigation and evaluation [J]. Journal of Geo-Information Science, 2017, **19**(12): 1548 - 1556] DOI: 10.3724/SP.J.1047.2017.01548
- [21] LIU Yesen, HUANG Yaohuan, WAN Jinhong, et al. Analysis of human activity impact on flash floods in China from 1950 to 2015 [J]. Sustainability, 2021, **13**(1): 217. DOI: 10.3390/su13010217
- [22] 刘业森. 中国山洪灾害时空分布格局及驱动力异质性评价研究[D]. 天津: 天津大学, 2017: 1 - 171. [LIU Yesen. Study on spatio-temporal distribution and heterogeneity of driving forces of flash flood in China [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017: 1 - 171]
- [23] XIONG Junnan, PANG Quan, FAN Chunkun, et al. Spatiotemporal characteristics and driving force analysis of flash floods in Fujian Province [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020, **9**(2): 133. DOI: 10.3390/ijgi9020133
- [24] 熊俊楠, 李进, 朱吉龙, 等. 重庆市山洪灾害时空格局及影响因素研究[J]. 地球信息科学学报, 2019, **21**(10): 1550 - 1564. [XIONG Junnan, LI Jin, ZHU Jilong, et al. Spatial-temporal distribution and the influencing factors of mountain torrent disasters in Chongqing [J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, **21**(10): 1550 - 1564] DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.180442
- [25] XIONG Junnan, YE Chongchong, CHENG Weiming, et al. The spatiotemporal distribution of flash floods and analysis of partition driving forces in Yunnan Province [J]. Sustainability, 2019, **11**(10): 2926. DOI: 10.3390/su11102926
- [26] SUN Xiaoyun, ZHANG Guotao, WANG Jiao, et al. Spatiotemporal variation of flash floods in the Hengduan Mountains region affected by rainfall properties and land use [J]. Natural Hazards, 2022, **111**(1): 465 - 488. DOI: 10.1007/s11069 - 021 - 05061 - 5
- [27] 崔鹏, 贾洋, 苏凤环, 等. 青藏高原自然灾害发育现状与未来关注的科学问题[J]. 中国科学院院刊, 2017, **32**(9): 985 - 992. [CUI Peng, JIA Yang, SU Fenghuan, et al. Natural hazards in Tibetan Plateau and key issue for feature research [J]. Bulletin of Chinese Academy of Science, 2017, **32**(9): 985 - 992] DOI: 10.16418/j.issn.1000 - 3045.2017.09.008
- [28] 莫中国, 张百平, 程维明, 等. 青藏高原的主要环境效应[J]. 地理科学进展, 2004, **23**(2): 88 - 96. [MO Shenguo, ZHANG Baiping, CHENG Weiming, et al. Major environmental effects of the Tibetan Plateau [J]. Progress in Geography, 2004, **23**(2): 88 - 96] DOI: 10.11820/dlkxjz.2004.02.011
- [29] 张懿鲤, 李炳元, 刘林山, 等. 再论青藏高原范围[J]. 地理研究, 2021, **40**(6): 1543 - 1553. [ZHANG Yili, LI Bingyuan, LIU Linshan, et al. Redetermine the region and boundaries of Tibetan Plateau [J]. Geographical Research, 2021, **40**(6): 1543 - 1553] DOI: 10.11821/dlyj020210138
- [30] 许长军, 金孙梅, 王英. 基于GIS的青藏高原人居环境自然适宜性评价[J]. 生态科学, 2020, **39**(6): 93 - 103. [XU Changjun, JIN Sunmei, WANG Ying. Natural suitability evaluation of human settlements in Qinghai-Tibet Plateau based on GIS [J]. Ecological Science, 2020, **39**(6): 93 - 103] DOI: 10.14108/j.cnki.1008 - 8873.2020.06.013
- [31] 汪东川, 王思润, 王志恒, 等. 青藏高原人类工程活动强度定量评价及时空格局演变分析[J]. 生态学报, 2024, **44**(10): 4142 - 4156. [WANG Dongchuan, WANG Sirun, WANG Zhiheng, et al. Quantitative evaluation and spatio-temporal pattern evolution of human engineering activities on the Qinghai-Tibet

- Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44** (10): 4142 – 4156] DOI: 10.20103/j.stxb.202307031430
- [32] 薛翊国, 孔凡猛, 杨为民, 等. 川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, **39**(3): 445 – 468. [XUE Yiguo, KONG Fanmeng, YANG Weimin, et al. Main unfavorable geological conditions and engineering geological problems along Sichuan-Tibet railway [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, **39**(3): 445 – 468] DOI: 10.13722/j.cnki.jme.2019.0737
- [33] 王中根. 怒江历史 1:100 万山洪灾害点数据集[DB]. 国家青藏高原数据中心, 2024. [WANG Zhonggen. Nujiang historical 1:100000 mountain flood damage point dataset [DB]. National Tibetan Plateau / Third Pole Environment Data Center, 2024] DOI: 10.11888/Terre.tpdc.301015
- [34] 王中根. 喜马拉雅山区山洪灾害分布数据(1840—2019) [DB]. 国家青藏高原数据中心, 2022. [WANG Zhonggen. Distribution of flash flood disaster in Himalayas (1840 – 2019) [DB]. National Tibetan Plateau / Third Pole Environment Data Center, 2022] DOI: 10.11888/HumanNat.tpdc.272450
- [35] 王中根. 川藏铁路沿线重大山洪灾害案例汇编(1840—2019) [DB]. 国家青藏高原数据中心, 2022. [WANG Zhonggen. Compilation of cases of major mountain torrents along the Sichuan-Tibet line and surrounding areas (1840 – 2019) [DB]. National Tibetan Plateau / Third Pole Environment Data Center, 2022] DOI: 10.11888/Terre.tpdc.272399
- [36] 宋进喜. 青藏高原东北部历史山洪数据集[DB]. 国家青藏高原数据中心, 2025. [SONG Jinxi. A dataset of historical flash floods in the northeast of the Qinghai-Tibet Plateau [DB]. National Tibetan Plateau / Third Pole Environment Data Center, 2025] DOI: 10.11888/HumanNat.tpdc.302378
- [37] MURAD A, KHASHOGGI B F. Using GIS for disease mapping and clustering in Jeddah, Saudi Arabia [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, **9**(5): 328. DOI: 10.3390/ijgi9050328
- [38] 李华威, 万庆. 小流域山洪灾害危险性分析之降雨指标选取的初步研究[J]. *地球信息科学学报*, 2017, **19**(3): 425 – 435. [LI Huawei, WANG Qing. Study on rainfall index selection for hazard analysis of mountain torrents disaster of small watersheds [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, **19**(3): 425 – 435] DOI: 10.3724/SP.J.1047.2017.00425
- [39] SANCHEZ-MARTIN J, RENGIFO-GALLEGO J, BLAS-MORATO R, et al. Hot spot analysis versus cluster and outlier analysis: An enquiry into the grouping of rural accommodation in Extremadura (Spain) [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, **8**(4): 176. DOI: 10.3390/ijgi8040176
- [40] 李怡帆, 张晨笛, 张国涛. 横断山区暴雨型山洪灾害发育特征与形成模式[J]. *地理学报*, 2024, **79**(3): 600 – 616. [LI Yifan, ZHANG Chendi, ZHANG Guotao. The development characteristics and formation modes of rainstorm-triggered flash flood disasters in the Hengduan Mountains [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, **79**(3): 600 – 616] DOI: 10.11821/dlxb202403004
- [41] 郑诚蔚. 青藏高原人类活动时空分异特征研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2024: 1 – 66. [ZHENG Chengwei. Characterization of spatial and temporal variability of human activities on the Tibetan Plateau [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2024: 1 – 66] DOI: 10.27410/d.cnki.gxbfu.2024.002299
- [42] 樊杰, 王海. 西藏人口发展的空间解析与可持续城镇化探讨[J]. *地理科学*, 2005, **25**(4): 3 – 10. [FAN Jie, WANG Hai. Spatial analysis of population development and discussion of sustainable urbanization in Tibet [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, **25**(4): 3 – 10] DOI: 10.3969/j.issn.1000 – 0690.2005.04.001
- [43] 牛方曲, 封志明, 刘慧. 资源环境承载力综合评价方法在西藏产业结构调整中的应用[J]. *地理学报*, 2019, **74**(8): 1563 – 1575. [NIU Fangqu, FENG Zhiming, LIU Hui. Evaluation of resources environmental carrying capacity and its application in industrial restructuring in Tibet, China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, **74**(8): 1563 – 1575] DOI: 10.11821/dlxb201908006
- [44] 王世金, 强文丽, 陆志波, 等. 冰冻圈人文地理环境研究: 文献分析与主要研究领域特点[J]. *气候变化研究进展*, 2025, **21**(1): 32 – 43. [WANG Shijin, QIANG Wenli, LU Zhibo, et al. Cryosphere human geography environment: Literature analysis and key field characteristics [J]. *Climate Change Research*, 2025, **21**(1): 32 – 43] DOI: 10.12006/j.issn.1673 – 1719.2024.213
- [45] 李士成, 张镫锂, 何凡能. 过去百年青海和西藏耕地空间格局重建及其时空变化[J]. *地理科学进展*, 2015, **34**(2): 197 – 206. [LI Shicheng, ZHANG Yili, HE Fanneng. Reconstruction of cropland distribution in Qinghai and Tibet for the past one hundred years and its spatiotemporal changes [J]. *Progress in Geography*, 2015, **34**(2): 197 – 206] DOI: 10.11820/dlkxjz.2015.02.008
- [46] 方创琳, 李广东. 西藏新型城镇化发展的特殊性与渐进模式及对策建议[J]. *中国科学院院刊*, 2015, **30**(3): 294 – 305. [FANG Changlin, LI Guangdong. Particularities, gradual patterns and countermeasures of new-type urbanization in Tibet, China [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Science*, 2015, **30**(3): 294 – 305] DOI: 10.16418/j.issn.1000 – 3045.2015.03.002
- [47] 戚伟, 刘盛和, 周亮. 青藏高原人口地域分异规律及“胡焕庸线”思想应用[J]. *地理学报*, 2020, **75**(2): 255 – 267. [QI Wei, LIU Shenghe, ZHOU Liang. Regional differentiation of population in Tibetan Plateau: Insight from the “Hu Line” [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, **75**(2): 255 – 267] DOI: 10.11821/dlxb202002004

- [48] 鲍超, 刘若文. 青藏高原城镇体系的时空演变[J]. 地球信息科学学报, 2019, **21**(9): 1330 - 1340. [BAO Chao, LIU Ruowen. Spatiotemporal evolution of the urban system in the Tibetan Plateau [J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, **21**(9): 1330 - 1340] DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.180681
- [49] 王超, 阚瑗珂, 曾业隆, 等. 基于随机森林模型的西藏人口分布格局及影响因素[J]. 地理学报, 2019, **74**(4): 664 - 680. [WANG Chao, KAN Aike, ZENG Yelong, et al. Population distribution pattern and influencing factors in Tibet based on random forest model [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, **74**(4): 664 - 680] DOI: 10.11821/dlxb201904004
- [50] 高兴川, 曹小曙, 李涛, 等. 1976—2016 年青藏高原地区通达性空间格局演变[J]. 地理学报, 2019, **74**(6): 1190 - 1204. [GAO Xingchuan, CAO Xiaoshu, LI Tao, et al. Evolution of accessibility spatial pattern of the Qinghai-Tibet Plateau in 1976 - 2016 [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, **74**(6): 1190 - 1204] DOI: 10.11821/dlxb201906009
- [51] 郑菲, 孙诚, 李建平. 从气候变化的新视角理解灾害风险、暴露度、脆弱性和恢复力[J]. 气候变化研究进展, 2012, **8**(2): 79 - 83. [ZHENG Fei, SUN Cheng, LI Jianping. Climate change: New dimensions in disaster risk, exposure, vulnerability, and resilience [J]. Climate Change Research, 2012, **8**(2): 79 - 83] DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2012.02.001
- [52] 李朝月, 崔鹏, 郝建盛, 等. 1960 年以来藏东南地区气温和降水的变化特征[J]. 高原气象, 2023, **42**(2): 344 - 358. [LI Chaoyue, CUI Peng, HAO Jiansheng, et al. Variation characteristics of temperature and precipitation over the southeast Xizang since 1960 [J]. Plateau Meteorology, 2023, **42**(2): 344 - 358] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2022.00010
- [53] 张仪辉, 刘昌明, 梁康, 等. 雅鲁藏布江流域降水时空变化特征[J]. 地理学报, 2022, **77**(3): 603 - 618. [ZHANG Yihui, LIU Changming, LIANG Kang, et al. Spatio-temporal variation of precipitation in the Yarlung Zangbo river basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, **77**(3): 603 - 618] DOI: 10.11821/dlxb202203008
- [54] 冯晓莉, 申红艳, 李万志, 等. 1961—2017 年青藏高原暖湿季节极端降水时空变化特征[J]. 高原气象, 2020, **39**(4): 694 - 705. [FENG Xiaoli, SHEN Hongyan, LI Wanzhi, et al. Spatiotemporal changes for extreme precipitation in wet season over the Qinghai-Tibetan Plateau and the surroundings during 1961 - 2017 [J]. Plateau Meteorology, 2020, **39**(4): 694 - 705] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00029
- [55] 马伟东, 刘峰贵, 周强, 等. 1961—2017 年青藏高原极端降水特征分析[J]. 自然资源学报, 2020, **35**(12): 3039 - 3050. [MA Weidong, LIU Fenggui, ZHOU Qiang, et al. Characteristics of extreme precipitation over the Qinghai-Tibet Plateau from 1961 to 2017 [J]. Journal of Natural Resources, 2020, **35**(12): 3039 - 3050] DOI: 10.31497/zrzyxb.20201218
- [56] 冀钦, 杨建平, 陈虹举. 1961—2015 年青藏高原降水量变化综合分析[J]. 冰川冻土, 2018, **40**(6): 1090 - 1099. [JI Qin, YANG Jianping, CHEN Hongju. Comprehensive analysis of the precipitation changes over the Tibetan Plateau during 1961 - 2015 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, **40**(6): 1090 - 1099] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0415
- [57] 杜军, 路红亚, 建军. 1961—2012 年西藏极端降水事件的变化[J]. 自然资源学报, 2014, **29**(6): 990 - 1002. [DU Jun, LU Hongya, JIAN Jun. Change in extreme precipitation events over Tibet from 1961 to 2012 [J]. Journal of Natural Resources, 2014, **29**(6): 990 - 1002] DOI: 10.11849/zrzyxb.2014.06.008
- [58] 崔云, 孔纪名, 田述军, 等. 强降雨在山地灾害链成灾演化中的关键控制作用[J]. 山地学报, 2011, **29**(1): 87 - 94. [CUI Yun, KONG Jiming, TIAN Shujun, et al. The critical role for heavy rainfall in the evolution of the mountain hazards chains [J]. Mountain Research, 2011, **29**(1): 87 - 94] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2011.01.013
- [59] 姚檀栋, 秦大河, 沈永平, 等. 青藏高原冰冻圈变化及其对区域水循环和生态条件的影响[J]. 自然杂志, 2013, **35**(3): 179 - 186. [YAO Tandong, QIN Dahe, SHEN Yongping, et al. Cryospheric changes and their impacts on regional water cycle and ecological conditions in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Nature, 2013, **35**(3): 179 - 186] DOI: 10.3969/j.issn.0253-9608.2013.03.004
- [60] YOU Qinglong, MIN Jinzhong, KANG Shichang. Rapid warming in the Tibetan Plateau from observations and CMIP5 models in recent decades [J]. International Journal of Climatology, 2016, **36**(6): 2660 - 2670. DOI: 10.1002/joc.4520
- [61] 程国栋, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响[J]. 科学通报, 2019, **64**(27): 2783 - 2795. [CHENG Guodong, ZHAO Lin, LI Ren, et al. Characteristic, changes and impacts of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, **64**(27): 2783 - 2795] DOI: 10.1360/TB-2019-0191
- [62] 姚檀栋, 余武生, 邬光剑, 等. 青藏高原及周边地区近期冰川状态失常与灾变风险[J]. 科学通报, 2019, **64**(27): 2770 - 2782. [YAO Tandong, YU Wusheng, WU Guangjian, et al. Glacier anomalies and relevant disaster risks on the Tibetan Plateau and surroundings [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, **64**(27): 2770 - 2782] DOI: 10.1360/TB-2019-0246

Spatial Distribution and Evolution of Historical Flash Floods on the Qinghai-Tibet Plateau from 1950 to 2015

ZHANG Kaiyue^{1,3}, WANG Zhonggen^{2,3*}, TANG Yin^{1*}

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

2. *National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: The risk of flash floods on the Qinghai-Tibet Plateau continues to increase, but the demands of small-scale risk assessment for flash floods on the Plateau and associated engineering plans have not been met because there is a lack of flash flood research based on integrated geomorphological units with long-term, high-resolution data.

Based on flash flood records across the Qinghai-Tibet Plateau from 1950 to 2015, this study characterized the spatial patterns of flash floods by integrating optimized hotspot analysis and spatial autocorrelation methods. Both methods were applied using the 25.52 km × 25.52 km grid scale identified by optimized hotspot analysis. Furthermore, the spatiotemporal evolution of the flash floods was clarified via the standard deviational ellipse method across decades. It has conclusions as list below.

(1) The flash floods exhibited significant spatial differentiation and clustering. Three high-incidence zones were southeastern Xizang, eastern Qinghai Province-western Gansu Province and the Hengduan Mountains, with the highest density in the One River, Two Tributaries (the Yarlung Zangbo River, and two tributaries: the Lhasa River and the Nianchu River). Potential-risk areas within low-incidence regions included southern Ali region, the Zhongba-Shenzha-Amdo corridor, Shiqu-Zoige area, Tongde-Gangcha area and the northern piedmont of the Qilian Mountains.

(2) From 1950 to 2015 flash flood frequency grew exponentially on a decadal scale ($y = 89.85e^{0.44x}$, $R^2 = 0.99$), expanding from the Hengduan Mountains toward the One River, Two Tributaries and the Hehuang Valley; the distribution ellipse rotated from NE-SW to E-W with increasing directional concentration, while the flash flood centroids shifted westward, tracking major transport corridors.

The observed patterns suggest that human activities and climate change can provide a plausible explanation for the distribution and evolution of flash floods. The findings provide a scientific basis for flash-flood monitoring and early warning, major-engineering layout and policy formulation on the Qinghai-Tibet Plateau.

Key words: flash flood; spatial-temporal evolution; hotspot analysis; spatial autocorrelation; standard deviation ellipse; the Qinghai-Tibet Plateau

(责任编辑 朱颖彦 钟雨倩)