建国以来中国山洪灾害时空演变格局及驱动因素分析

刘业森¹, 杨振山^{2*}, 黄耀欢³, 刘昌军¹

1. 中国水利水电科学研究院, 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院区域可持续发展分析与模拟实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

* 通讯作者, E-mail: yangzs@igsrr.ac.cn

收稿日期: 2017-12-19; 收修改稿日期: 2018-03-22; 接受日期: 2018-06-14; 网络版发表日期: 2018-11-08

中国科学院战略性先导科技专项项目(编号: XDA19040402)、2016年全国山洪灾害防治项目建设与管理(中央本级)(编号: 126301001000150068)、中国科学院青年创新促进研究会会员项目(编号: 2014042)、中国科学院地理科学与资源研究所可桢杰出青年学者计划(编号: 2016RC101)、时空变源混合产流模型与机理研究(编号: JZ0145B2017)、北京市水土保持遥感技术应用研究与示范(编号: Z161100001116102)资助

摘要 本文揭示了建国以来中国山洪灾害时空演变格局, 探测了影响历史山洪灾害空间分布的驱动因子. 采用6万多个山洪灾害历史记录数据, 利用重心对比方法, 从重心地理位置、聚集程度、移动趋势3个方面揭示了1951~2015年中国山洪灾害时空演变特征, 初步分析了降雨、人口与山洪灾害之间时空演变的关系. 进一步选取2000~2015年间相关数据, 基于自然流域单元, 构建了降雨、人类活动、地表环境相关因子, 利用地理探测器分析方法, 探测影响历史山洪灾害空间分布的驱动因子. 分析结果表明, 建国以来, 中国历史山洪灾害空间分布转移与降雨和人口分布的变化趋势呈现出明显的相关性; 2000~2015年间山洪灾害空间分布呈现出区域分异特征, 降雨因子的驱动大于人类活动因子和地表环境因子, 地表环境和人类活动在成灾环境中具有交互作用. 研究结果揭示了山洪灾害驱动因子具有明显的时空异质性, 中国山洪高风险区包括川渝生态区、华南生态区、云贵高原和长江中下游地区; 低风险度区包括西北干旱区、青藏高原、内蒙古高原和东北生态区. 研究结果有助于科学理解山洪成灾环境、山洪灾害风险度分区, 也为进一步做好治灾防灾工作提供了科学依据.

关键词 山洪灾害, 重心, 驱动因子, 人类活动, 降雨

1 引言

中国是山地大国, 山地面积约占国土面积的69.4%(崔鹏, 2014), 是受山洪威胁最严重的国家之一.

2010~2016年间, 全国发生山洪灾害1万多起, 年均死亡或失踪800多人(Liu等, 2017). 山洪灾害已成为中国导致人员伤亡的主要自然灾害之一(Sun等, 2012). 近年来, 随着人口增长、城市化快速推进、社会经济高速

中文引用格式: 刘业森, 杨振山, 黄耀欢, 刘昌军. 2019. 建国以来中国山洪灾害时空演变格局及驱动因素分析. 中国科学: 地球科学, 49: 408–420, doi: 10.1360/N072017-00328

英文引用格式: Liu Y, Yang Z, Huang Y, Liu C. 2018. Spatiotemporal evolution and driving factors of China's flash flood disasters since 1949. Science China Earth Sciences, 61: 1804–1817, <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9238-7>

发展, 人类活动对自然环境的负面效应逐渐显现(崔鹏, 2014; 崔鹏等, 2015), 科学分析并理解山洪灾害的时空演变格局及其驱动因素成为从地球表层理解成灾环境的重要工作, 对治灾防灾工作具有重要意义.

现有山洪灾害时空分布以及成灾环境研究主要集中在以下几个方面: 一是从历史灾害特征, 分析山洪灾害时空布局 and 影响因素, 此类研究空间上以省级尺度为主(万石云等, 2015; 杜俊等, 2015; Liu等, 2017); 二是利用山洪灾害影响因素, 包括下垫面条件、人口分布和降雨特征等, 进行山洪灾害风险评估, 为山洪灾害防治提供参考(唐川和朱静, 2005; 赵健和范北林, 2006; 赵刚等, 2016), 此类研究空间上以全国或省级以上尺度为主; 三是从灾害发生机理角度, 研究灾害发生、发展及影响, 此类研究以山洪沟或流域尺度为主(Sangati和Borga, 2009; Lian等, 2017). 以上研究从不同角度和尺度一定程度上揭示了山洪灾害的时空分布规律, 但受限于数据条件, 基于精确山洪灾害数据的全国长时间序列系统化研究很少. 首先, 建国以来, 有准确位置和时间记录的山洪灾害一共发生了6万多次, 但其发生的时空格局尚不清楚; 其次, 山洪灾害分布规律和影响因素评价以定性分析为主, 或者通过专家打分法、层次分析法等进行定量分析, 缺少客观的量化分析; 第三, 忽略山洪灾害影响因素的时空异质性, 时间尺度上, 忽略时空变化因素的时间变异, 空间尺度上, 按相同标准对待不同的空间分布因素, 这必然会造成分析评估结果的不确定性(Hallegatte, 2014; 赵思健, 2016).

2012~2015年, 在全国范围内开展了“全国山洪灾害调查评价项目”(郭良等, 2012; Yuan等, 2017), 调查范围包括全国30个省305个市2058个防治县(区), 涉及国土面积7550000km², 人口近9亿. 这是迄今为止涉及范围最广、时间跨度最大, 山洪灾害事件收集最全的一次调查. 在此基础上, 本文就山洪灾害时空分布规律展开研究.

2 研究设计

2.1 研究区域

综合国内外研究观点(Rozalis等, 2010; 刘志雨等, 2010; Schröder和Omran, 2015), 本文选择中国科学院资源环境数据中心提供的二级流域作为基本空间分析

单元(张国平等, 2010), 该数据将全国划分为39279个流域. 除去无人区和平原区, 共有23167个流域为有人居住的山丘区, 将其作为研究区域, 其中82%的流域面积在100~300km², 见图1.

2.2 研究数据及处理

山洪灾害数据主要来自“全国山洪灾害调查评价项目”调查成果. 包括建国以来发生的6万多条山洪灾害事件记录, 以及灾害事件的发生时间、发生地点等信息. 文章首先分析了各年代山洪灾害事件的空间格局, 其次考虑到GDP、人口等相关数据的匹配性, 选取2000~2015年发生的11083次山洪灾害事件分析近期时间段中国山洪灾害空间分布的驱动因素(图2).

现有研究表明, 人类活动一方面改变了人口分布、经济布局等承灾体分布特征(苑全治等, 2017), 另一方面又影响孕灾环境和致灾因子. 山洪灾害影响因素可归纳为降雨因子、人类活动因子以及地表环境因子(刘毅和杨宇, 2012; Špitalar等, 2014; 史培军和孔锋, 2016), 本文主要从这几个方面来收集数据(表1).

2.2.1 降雨因子

短时强降雨是山洪灾害主要致灾因素(崔云等, 2011; 孙军和张福青, 2017). 为了检验不同雨强对山洪灾害空间分布的影响, 按雨强分级标准(降雨量等级(GB/T 28592-2012)), 建立了5个降雨因子(表2).

首先计算气象站点各降雨因子值, 见式(1):

$$P_{i-\text{station}} = \left(\sum_{a=1}^{65} \sum_{d=1}^{365} (C_d) \right) / 65, \quad (1)$$

$$C_d = \begin{cases} 1, R_d > R_i \\ 0, R_d \leq R_i \end{cases}$$

式中, $P_{i-\text{station}}$ 为降雨因子*i*的值, a 为年份, d 为日期; R_d 为*d*日降雨量, R_i 为降雨因子*i*的降雨量阈值.

利用空间插值得到各降雨因子的连续分布数据, 见图3.

2.2.2 人类活动因子

人类活动与山洪灾害的响应关系很复杂(方一平和陈国阶, 2003; 刘毅和杨宇, 2012; Špitalar等, 2014), 一方面, 人类活动影响山洪灾害的孕灾环境, 另一方面, 人类又是主要的承灾对象(Liu等, 2017). 为了充分

图1 流域分区示意图

体现人类活动的影响, 本文选择了4个人类活动相关因子。人口密度: 在 $1\text{km}\times 1\text{km}$ 格网人口空间化数据基础上统计分析单元内的平均值, 体现承灾对象的区域差异; 山丘区村落密度: 每百平方公里内的村落数, 体现人口居住特征; 耕地比例: 耕地面积占分析单元总面积的百分比, 体现人类对下垫面条件的影响; GDP: 在 $1\text{km}\times 1\text{km}$ 格网GDP空间化数据基础上统计分析单元内的平均值, 体现社会经济发展程度。考虑到人类活动影响的滞后性, 选择2000年的人口密度、耕地比例和GDP作为人类活动因子。人类活动因子分布情况见图4。

2.2.3 地表环境因子

根据前人研究成果(赵健和范北林, 2006; 赵刚等, 2016), 选择NDVI、土壤类型、坡度和高程差作为地表环境因子。NDVI反映地表植被覆盖情况, 见图5a;

土壤类型影响降雨的产汇流过程, 根据吕贻忠和李保国(2006)的土壤质地分类标准, 根据黏土含量和砂粒含量, 将土壤质地分为黏土、壤土、砂土, 与下覆基岩类型进行空间叠加, 形成新的土壤类型图, 见图5b, 如“壤土(沉积岩)”表示下覆基岩类型为沉积岩的壤土; 坡度反映地表的陡缓程度, 按水土保持综合治理规划通则(GB/T 15772-2008)分为6级, 见图5c; 高程差为一定范围内的高程变化, 反映地形起伏度, 影响汇水, 见图5d。

2.2.4 空间分区

考虑到降雨等因子与山洪灾害响应关系的空间异质性, 加入空间分区作为影响因子可提高分析合理性。生态分区综合考虑了地形地貌、植被、降雨和生态等因素, 可体现区域的综合特征, 选择傅伯杰等(2013)提出的生态分区方案作为空间分区因子, 并研究不同区

图 2 2000~2015年山洪灾害分布

域的山洪灾害风险程度及其主控因子(图6).

2.3 研究方法

本文首先根据“全国山洪灾害调查评价项目”收集的历史山洪灾害数据进行时空分析, 然后从降雨、人类活动和地表环境3方面进行成灾环境分析, 同时评价不同区域山洪灾害驱动因子的空间差异.

2.3.1 山洪灾害时空格局分析

重心变化是研究海量时空数据演变趋势的有效手段(杨格等, 2011; 樊杰等, 2010). 本文按照年代间隔, 将1951~2015共65年按年代分为7个时段, 计算各时段山洪灾害发生位置的重心点坐标. 某时段山洪灾害重心坐标 $G_F(x)$ 、 $G_F(y)$ 计算方法见式(2):

$$\begin{aligned} G_F(x) &= \frac{\sum_{i=1}^n F_i(x)}{n}, \\ G_F(y) &= \frac{\sum_{i=1}^n F_i(y)}{n}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中, n 为该时段山洪灾害事件数, $F_i(x)$ 、 $F_i(y)$ 为 i 次事件的 x 、 y 坐标.

另外, 为了比较山洪灾害的空间移动是否与人口

和降雨具有相同的移动趋势, 我们还计算了各时段全国人口重心和降雨重心. 人口重心点坐标 $G_P(x)$ 、 $G_P(y)$ 以省级行政区划为单元、年末人口数作为权重进行计算, 见式(3).

$$\begin{aligned} G_P(x) &= \frac{\sum_{j=y1}^{y2} \sum_{i=1}^m P(j,i) \times F_i(x)}{(y2-y1) \times m}, \\ G_P(y) &= \frac{\sum_{i=1}^m P_m F_i(y)}{m}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中, m 为省级行政区划数, $y1$ 、 $y2$ 分别为起止年份, $P(j, i)$ 为行政区划 i 在 j 年的年末人口数, $F_i(x)$ 、 $F_i(y)$ 分别为行政区划 i 的形心点 x 、 y 坐标. 降雨重心点坐标采用降雨监测站点坐标为基础、降雨天数作为权重进行计算, 计算公式同人口重心计算公式.

2.3.2 成灾空间驱动因素探测

各影响因素对山洪灾害的影响可能相互加强、抵消或独立, 本文主要使用地理探测器模型对山洪灾害成灾空间驱动因素开展研究. 地理探测器模型(Wang等, 2010; 王劲峰和徐成东, 2017)以地理空间分异理论为基础, 通过诊断各种影响因子的空间分区和地理现象变化的关联程度, 分析该现象背后产生的机理,

表 1 数据资料来源^{a)}

数据名称	时间	数据来源	数据格式	说明
历史山洪灾害数据	1951~2015	全国历史山洪灾害调查评价项目	点状图层	发生地点、发生时间等.
日降雨量数据	1951~2015	国家气象科学数据共享服务平台 (http://data.cma.cn)	文本格式	全国175个气象共享站点逐日降雨量
人口统计数据	1951~2015	国家统计局	表格	各省年末总人口
人口分布	2000	RESDC	1km×1km格网	格网值为人口数
村落点	2000	RESDC	点状图层	全国1:25万基础地理图层中的村落图层
GDP	2000	RESDC	1km×1km格网	格网值为空间化的GDP数值 (杨小唤等, 2006)
耕地	2000	RESDC	1km×1km格网	格网值为耕地百分比(刘纪远等, 2002)
地形数据	2003	NASA	90m×90m格网	STRM
NDVI	2000	RESDC	1km×1km格网	在每10天合成的最大化NDVI基础上综合
土壤类型	2010	RESDC	面图层	根据1:100万土壤类型图和第二次土壤 普查数据编制而成
地质类型	1990	RESDC	面图层	地质出版社, 1:5000000
生态分区	2013	傅伯杰等(2013)	—	分为11个生态区(傅伯杰等, 2013)
流域分区	2010	RESDC	面图层	详细说明参见文献(张国平等, 2010)

a) RESDC, 中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)

表 2 降雨因子分级说明

降雨因子	24h降雨量	雨强级别
P10	>10mm	中雨以上
P25	>25mm	大雨以上
P50	>50mm	暴雨以上
P100	>100mm	大暴雨以上
P250	>250mm	特大暴雨

从而探测出对该地理现象的发生具有决定作用力的影响因子. 该模型最早用于地方疾病和相关地理影响因素的研究, 随后被广泛的应用于其他科学领域(王劲峰和徐成东, 2017). 本文将利用地理探测器模型中的因子探测器和交互探测器开展研究. 首先, 采用Getis-Ord Gi*空间密度分析方法(Ord和Getis, 1995)将山洪灾害离散点数据转换为渔网面连续数据, 统计各分析单元(流域)内渔网面均值作为灾害强度值(Liu等, 2017). 其次, 对连续型因子数据进行离散化处理, 根据已有研究和试验结果(王劲峰和徐成东, 2017; 刘彦随和李进涛, 2017), 本文对降雨、人口密度、GDP、村落密度、高程差、耕地比例, 按自然分类法, 分为10级.

(1) 单因子驱动分析. 因子探测器通过因子解释力来定量判定自变量因子对因变量变化的贡献大小, 从而检验某地理因素是否为形成地理现象空间分异的原

因. 通过比较因变量在自变量各类别中的方差与全局方差的关系来计算因子解释力的大小, 见式(4).

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad (4)$$

式中, q 为解释力, 为某影响因子在多大程度上解释了山洪灾害强度的空间分布; $h=1, \dots, L$, 为变量因子的分区数; N_h 和 N 分别为分区 h 和全部区域的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是分区 h 和全局的山洪灾害强度方差. q 的值域为[0, 1], q 值越大, 说明影响因子对山洪灾害强度空间分布的影响越大.

(2) 因子交互驱动分析. 交互探测器是利用空间叠加技术识别不同影响因子之间的交互模式, 即通过比较两个影响因子独立作用时的解释力之和与交互后共同作用的解释力, 以判别交互后对地理现象的影响形

图 3 中国降雨因子分布

式. X_1 和 X_2 为两个分区因子, 将 X_1 和 X_2 进行空间叠加, 形成新的空间因子 $X_1 \cap X_2$, 利用式(5)分别计算 X_1 , X_2 和 $X_1 \cap X_2$ 的解释力, 然后通过对比3个解释力的大小关系, 判断因子的交互关系, 见表3.

2.3.3 山洪灾害主控风险因素分析方法

降雨、人类活动、地表环境及其相互作用的异质性会导致山洪灾害呈现出时空分布、危害程度及主控

图 4 中国人类活动因子分布

表 3 交互探测关系对应表^{a)}

关系示意	描述	关系类型	图例
	$PD(X1 \cap X2) < \min(PD(X1), PD(X2))$	非线性减弱	
	$\min(PD(X1), PD(X2)) < PD(X1 \cap X2) < \max(PD(X1), PD(X2))$	单因子非线性减弱	●: $\min(PD(X1), PD(X2))$
	$PD(X1 \cap X2) > \max(PD(X1), PD(X2))$	双因子增强	●: $\max(PD(X1), PD(X2))$
	$PD(X1 \cap X2) = PD(X1) + PD(X2)$	独立	●: $PD(X1) + PD(X2)$
	$PD(X1 \cap X2) > PD(X1) + PD(X2)$	非线性增强	▼: $PD(X1 \cap X2)$

a) 王劲峰和徐成东(2017)

因素的差异。地理探测器分析方法以方差和统计分析等数学理论作支撑，驱动因子解释力的大小表示该因子对山洪灾害空间分布的解释程度，作为进行山洪灾害风险评价的因子权重设置依据，可避免层次分析法、经验分析法等人为设定因子权重容易造成的主观

影响。通过归一化处理，可得到各驱动因子的权重，见式(5)。

$$w_i = \frac{q_i}{\sum_{j=1}^n q_j}, \quad (5)$$

图 5 中国地表环境因子分布

式中, ω_i 为第 i 个因子的权重, q_i 为第 i 个因子对山洪灾害空间分布的解释力。以此为基础, 某区域影响因子 i 的灾害风险贡献度计算方法见式(6)。

$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^m V_j \times w_i}{m}, \quad (6)$$

式中, m 为该区域内的分析单元(流域)数量, V_j 为分析单元 j 的风险值。

3 建国以来山洪灾害时空演变格局

为了研究山洪灾害、降雨和人口的时空格局变化规律, 首先对1951~2015年各年代的三者重心进行了测算(图7)。从各年代重心位置来看, 三者重心位置并不重叠。降雨重心偏西北, 山洪灾害重心偏西南, 人口分布重心偏东北。降雨重心较山洪灾害偏西北, 应该是与西北地区人口稀少, 承灾对象分布稀疏有关; 人口分布

重心较山洪灾害重心偏东北, 则是由于人口密集的华北平原、长江三角洲人口体量大, 但属于平原地区, 未受山洪灾害威胁。

从重心聚集程度来看, 历史山洪灾害重心移动幅度最大, 降雨次之, 人口分布重心移动幅度最小, 三者从20世纪50年代到21世纪10年代的移动幅度分别为480、112和54km。山洪灾害重心的移动幅度是人口重心移动幅度的近9倍, 是降雨重心移动幅度的4倍多。按本文采用的65年数据样本的统计结果, 我们初步判断认为, 山洪灾害空间分布变化特征, 对降雨分布和人口分布变化有放大效应。当然, 此现象需要结合灾害发生发展机理, 进一步深入研究解释。

从重心移动方向来看, 降雨重心向西北方向移动, 相关学者已通过历史数据分析确认西北地区降雨量增加的现象(靳立亚等, 2004; 吴娴等, 2014), 在全球变暖背景下, 中亚干旱区降雨增加趋势明显(陈发虎等, 2011)。人口重心向西南方向移动, 但移动幅度较小。

图 6 中国生态分区

山洪灾害重心向西南方向移动, 表明西、南部灾害相较东、北部有增加趋势。山洪灾害重心的移动方向介于降雨与人口之间, 山洪灾害移动趋势线与降雨重心移动趋势线的夹角接近 90° , 与人口分布重心的夹角在 45° 左右, 一定程度上体现出山洪灾害重心移动是降雨与人口共同影响的结果。

4 成灾空间驱动因素分析

4.1 主要成灾驱动因素分析

从宏观分布来看(图2), 最近16年历史山洪灾害与人口分布存在高度相关性, 根据调查数据统计, 92%的山洪灾害发生在胡焕庸线以东地区(胡焕庸, 1935; 李佳洺等, 2017)。利用地理探测器定量评价相关影响因子对山洪灾害空间分布的影响, 分析结果见表4。生态分区的解释力最高, 达到0.644, 表明生态分区能解释64.4%的历史山洪灾害空间变化, 说明历史山洪灾害空间分布具有明显的区域分异特征。三类影响因子按解释力排序, 依次为降雨因子(0.317~0.440)、人类活动因子(0.175~0.299)、地表环境因子(0.066~0.193)。5个降雨因子的解释力随着雨强增加, 逐渐增加, 说明不同雨强对山洪灾害分布的驱动作用明显。坡度和高

程差解释力最低, 说明地表环境只是山洪灾害发生的载体, 既不是降雨那样的必要条件, 也弱于人类活动干扰对成灾环境的影响。

交互探测结果见表5。各因子与生态分区叠加后, 解释力明显提高, 其中P50与生态分区交互后的解释力高于其他因子, 达到0.721, 说明大于50mm的日降雨与山洪灾害的空间响应关系的异质性最明显, 因此进行空间分区后, 解释力提高最大。坡度、高程差单因子的解释力最低, 但是与人口密度、耕地比例、GDP三个人类活动因子叠加后, 解释力呈非线性增长, 说明地形条件与人类活动因子对山洪灾害空间分布的解释作用是交互增强的, 提醒我们在自然条件较差的区域, 人类活动加剧, 会造成山洪灾害事件的非线性增加。

综合分析以上结果, 在年代尺度, 人类活动对历史山洪灾害的影响大于降雨因素; 在具体时段(2000~2015), 则降雨对历史山洪灾害的影响要高于人类活动, 而相对稳定的地表环境因子对山洪灾害分布的解释力最小。分析其中原因, 年代尺度上, 人口增长、经济发展等人类活动变化剧烈, 造成承灾对象、下垫面条件的明显变化, 引起降雨致灾力的变化, 因此人类活动成为主要影响因素; 在具体时段内, 人类

图 7 各年代山洪灾害、降雨、人口重心点移动趋势

表 4 各因子解释力

因子	解释力	因子	解释力
生态分区	0.644	耕地比例	0.175
P10	0.317	村落密度	0.299
P25	0.315	GDP	0.242
P50	0.349	坡度	0.072
P100	0.424	高程差	0.066
P250	0.440	NDVI	0.193
人口密度	0.287	土壤类型	0.037

活动变化相对较小，山洪灾害空间分布的变化主要是由降雨的空间分布变化决定。地形条件虽然是山洪灾害发生的必要条件，但是人类活动、降雨空间差异非常大，造成相同地形条件下灾害分布差异明显，从统计上就表现为地形因素的解释力较低。

4.2 分区域主控风险因素分析

进一步将各驱动因子进行一归一化处理后，在中

国11个生态分区(傅伯杰等, 2013)的基础上，统计了各分区山洪灾害风险度以及主要因素(表6)。其中，风险度最高的四区包括川渝生态区(9.6)、华南生态区(8.2)、云贵高原(7.4)和长江中下游地区(7.0)。这4个区域里，降雨、尤其是年均极端降雨(P250)天数明显多于其他区域，极端降雨是这几个区域山洪风险度高的主要因素；另外人口密度较高、地形起伏较大，也是山洪风险高的重要原因，区域内只有云贵高原人口密

表 5 交互探测结果^{a)}

	生态分区	P10	P25	P50	P100	P250	人口 密度	耕地 比例	村落 密度	GDP	坡度	高程差	NDVI	土壤 类型
生态分区	0.644													
P10	0.704	0.317												
P25	0.714	0.364	0.315											
P50	0.721	0.399	0.361	0.349										
P100	0.718	0.485	0.459	0.446	0.424									
P250	0.717	0.552	0.538	0.537	0.543	0.440								
人口密度	0.673	0.506	0.513	0.533	0.530	0.481	0.287							
耕地比例	0.671	0.478	0.494	0.514	0.521	0.480	0.372	0.175						
村落密度	0.674	0.500	0.493	0.518	0.537	0.514	0.356	0.341	0.299					
GDP	0.676	0.510	0.505	0.526	0.550	0.522	0.343	0.295	0.349	0.242				
坡度	0.666	0.363	0.364	0.402	0.472	0.494	0.448	0.350	0.367	0.384	0.072			
高程差	0.666	0.370	0.367	0.408	0.472	0.494	0.401	0.289	0.351	0.351	0.099	0.066		
NDVI	0.661	0.404	0.412	0.438	0.480	0.477	0.360	0.310	0.368	0.334	0.328	0.320	0.193	
土壤类型	0.673	0.345	0.352	0.410	0.487	0.496	0.305	0.202	0.316	0.273	0.113	0.107	0.216	0.037

a) 黑体表示两个变量交互为非线性增强

度相对较低,为126人 km⁻²,其他3个区域均高于250人 km⁻²,人类活动强强烈地干扰着地表环境和气候变化,成为引起山洪灾害的重要原因之一。

生态分区中风险度低的区域包括西北干旱区、青藏高原、内蒙古高原和东北生态区。其中西北干旱区、青藏高原风险度最低,这些区域人口稀疏、极端降雨较少,因此山洪的风险度最低。相比之下,黄土高原和横断山脉山洪灾害风险度处于中间水平,分别为4.5和3.6。黄土高原山洪风险主要影响因素为村落密度和人口密度,这与黄土高原由于人类活动造成的严重水土流失等生态问题密切相关。横断山区人口稀少,但是连续降水多,P10为每年93天,另外坡度也较大,成为致灾的主要原因。

5 结论

山洪是中国最主要的自然灾害之一,本文利用历史山洪灾害数据对中国山洪成灾驱动因素进行初步分析。首次利用重心对比方法和地理探测器模型,基于年代尺度研究了1951~2015时段历史山洪灾害与降雨、人口的重心移动趋势关系;基于流域分析单元,定量分析了2000~2015年历史山洪灾害空间分布驱动因子。分

析结果表明,2000~2015年间,降雨对山洪灾害空间分布的驱动作用大于人类活动,地表环境与人类活动叠加,对历史山洪灾害空间分布的解释力呈非线性增长。

研究结果表明,山洪灾害驱动因素具有明显的时空异质性,提醒我们在山洪灾害评价和防治工作中,需要从不同时空尺度具体分析相应措施的有效性;本文研究结果揭示了中国山洪高风险区包括川渝生态区、华南生态区、云贵高原和长江中下游地区,风险度高于7.0,风险度低值区包括西北干旱区、青藏高原、内蒙古高原和东北生态区。研究揭示了不同区域的主要风险因子(表6),对因地制宜的采取措施防控山洪灾害具有一定的意义。不过,今后还需在以下两个方面进一步加强研究。一是加强数据时效性,降雨数据与社会经济数据的采集手段造成了两者在时间精度、空间尺度的差异,在现有数据条件下,很难达到完全匹配;有效的收集和匹配降雨和社会经济数据将会大幅提高研究的精度。二是要注意研究结果的尺度适宜性,受数据限制,本文在宏观尺度上对全国历史山洪灾害进行研究,降水、人类活动及地表因子重要性的强弱只是在宏观尺度上揭示山洪灾害成灾因素具有意义,但在微观尺度,特别是某个具体的灾害事件而言,还需具体问题具体对待。总之,受制于数据可获得性,本文

表 6 分区山洪灾害风险分析

分区	风险度	P10 (天/年)	P25 (天/年)	P50 (天/年)	P100 (天/年)	P250 (天/年)	人口密度 (人/km ²)	耕地 比例	村落密度 (个/百km ²)	GDP (万元/km ²)	坡度	高程差 (m)	NDVI
川渝生态区	9.6	90.2	66.6	46.8	27.9	10.0	268	37.21%	53	89	5.3°	1077.5	0.72
华南生态区	8.2	104.4	83.4	64.4	43.9	18.5	278	22.26%	54	287	3.5°	797.9	0.72
云贵高原	7.4	95.3	72.1	53.0	33.5	11.5	126	20.65%	35	57	6.0°	1265.6	0.71
长江中下游 地区	7.0	95.3	76.6	59.0	38.9	14.9	357	38.30%	66	359	2.4°	621.2	0.70
黄土高原	4.5	54.7	39.2	26.0	14.2	3.6	185	37.88%	40	101	3.0°	828.3	0.51
横断山区	3.6	93.2	68.3	45.1	22.5	3.3	15	3.07%	8	4	11.6°	2164.4	0.64
华北生态区	3.3	49.7	37.5	27.0	16.7	6.1	468	45.92%	45	486	2.2°	593.7	0.66
东北生态区	2.6	59.2	41.6	27.6	15.0	3.9	98	28.81%	16	70	1.8°	458.2	0.75
内蒙古高原	2.3	39.2	26.2	16.5	8.2	1.6	50	16.84%	13	33	1.2°	404.4	0.38
青藏高原	1.8	62.5	44.6	28.6	13.1	1.2	14	2.42%	5	4	6.5°	1390.8	0.42
西北干旱区	1.7	28.0	16.9	8.9	3.2	0.3	44	14.61%	6	17	3.0°	1245.1	0.31

在全国范围内对山洪灾害空间分异以及驱动因子进行了初步的探讨, 希望对今后类似研究提供一些借鉴, 并为中国山洪灾害风险管控提供一定的科学依据.

参考文献

- 陈发虎, 黄伟, 靳立亚, 陈建徽, 王劲松. 2011. 全球变暖背景下中亚干旱区降水变化特征及其空间差异. 中国科学: 地球科学, 41: 1647–1657
- 崔吉, 孔纪名, 田述军, 阿发友. 2011. 强降雨在山地灾害链成灾演化中的关键控制作用. 山地学报, 29: 87–94
- 崔鹏. 2014. 中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问题. 地理科学进展, 33: 145–152
- 崔鹏, 苏凤环, 邹强, 陈宁生, 张懿铨. 2015. 青藏高原山地灾害和气象灾害风险评估与减灾对策. 科学通报, 32: 3067–3077
- 杜俊, 丁文峰, 任洪玉. 2015. 四川省不同类型山洪灾害与主要影响因素的关系. 长江流域资源与环境, 24: 1977–1983
- 方一平, 陈国阶. 2003. 四川省水土流失的人类活动响应及其防治策略. 中国科学E辑: 技术科学, 33: 47–60
- 樊杰, 陶岸君, 吕晨. 2010. 中国经济与人口重心的耦合态势及其对区域发展的影响. 地理科学进展, 29: 87–95
- 傅伯杰, 刘国华, 欧阳志云. 2013. 中国生态区划研究. 北京: 科学出版社. 137
- 郭良, 刘昌军, 丁留谦, 孙东亚. 2012. 开展全国山洪灾害调查评价的工作设想. 中国水利, 23: 10–12
- 胡焕庸. 1935. 中国人口之分布——附统计表与密度图. 地理学报, 2: 33–74
- 靳立亚, 李静, 王新, 陈发虎. 2004. 近50年来中国西北地区干湿状况时空分布. 地理学报, 59: 847–854
- 李佳泓, 陆大道, 徐成东, 李扬, 陈明星. 2017. 胡焕庸线两侧人口的空间分异性及其变化. 地理学报, 72: 148–160
- 刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 张增祥, 邓祥征. 2002. 中国近期土地利用变化的空间格局分析. 中国科学D辑: 地球科学, 32: 1031–1040.
- 刘志雨, 杨大文, 胡健伟. 2010. 基于动态临界雨量的中小河流山洪预警方法及其应用. 北京师范大学学报(自然科学版), 46: 317–321
- 刘毅, 杨宇. 2012. 历史时期中国重大自然灾害时空分异特征. 地理学报, 67: 291–300
- 刘彦随, 李进涛. 2017. 中国县域农村贫困化分异机制的地理探测与优化决策. 地理学报, 72: 161–173
- 吕贻忠, 李保国. 2006. 土壤学. 北京: 中国农业出版社. 26–29
- 史培军, 孔锋. 2016. 1951–2010年中国年代际累积暴雨时空格局变化的相关因素研究. 地理科学, 36: 1457–1465
- 孙军, 张福青. 2017. 中国日极端降水和趋势. 中国科学: 地球科学, 47: 1469–1482
- 唐川, 朱静. 2005. 基于GIS的山洪灾害风险区划. 地理学报, 60: 87–94
- 万石云, 赵宁坤, 段玮. 2015. 云南省滑坡泥石流与强降水的相关性和多时间尺度特征研究. 灾害学, 30: 45–50
- 王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 72: 116–134
- 吴炯, 黄伟, 陈发虎. 2014. 1951–2012年中国大陆0.025°×0.025°高分辨率月气温和降水量格点数据集的建立及其初步应用. 兰州大学学报(自然科学版), 50: 213–220
- 苑全治, 吴绍洪, 戴尔阜, 赵东升, 张学儒, 任平. 2017. 1961–2015年

- 中国气候干湿状况的时空分异. 中国科学: 地球科学, 47: 1339–1348
- 杨格格, 杨艳昭, 游珍, 张小咏. 2011. 中国陆域地震灾害的时空分布格局. 地球科学进展, 26: 548–555
- 杨小唤, 刘业森, 江东, 罗春, 黄耀欢. 2006. 一种改进人口数据空间化的方法: 农村居住地重分类. 地理科学进展, 25: 62–69
- 赵健, 范北林. 2006. 全国山洪灾害时空分布特点研究. 中国水利, 13: 45–47
- 张国平, 赵琳娜, 许凤雯, 徐新良. 2010. 基于流域结构分析的中国流域划分方案. 北京师范大学学报(自然科学版), 46: 417–423
- 赵刚, 庞博, 徐宗学, 王子丰, 史蓉. 2016. 中国山洪灾害危险性评价. 水利学报, 47: 1133–1142
- 赵思健. 2016. 再论自然灾害风险的时空尺度. 灾害学, 31: 1–10
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2012. 降雨量等级(GB/T 28592-2012). 北京: 中国标准出版社
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2008. 水土保持综合治理规划通则(GB/T 15772-2008). 北京: 中国标准出版社. 21
- Hallegatte S. 2014. Modeling the role of inventories and heterogeneity in the assessment of the economic costs of natural disasters. *Risk Anal*, 34: 152–167
- Lian J J, Yang W C, Xu K, Ma C. 2017. Flash flood vulnerability assessment for small catchments with a material flow approach. *Nat Hazards*, 88: 699–719
- Liu Y S, Yuan X M, Guo L, Huang Y H. 2017. Driving force analysis of the temporal and spatial distribution of flash floods in Sichuan Province. *Sustainability*, 9: 1527
- Ord J K, Getis A. 1995. Local spatial autocorrelation statistics: Distributional issues and an application. *Geogr Anal*, 27: 286–306
- Rozalis S, Morin E, Yair Y, Price C. 2010. Flash flood prediction using an uncalibrated hydrological model and radar rainfall data in a Mediterranean watershed under changing hydrological conditions. *J Hydrol*, 394: 245–255
- Sangati M, Borga M. 2009. Influence of rainfall spatial resolution on flash flood modelling. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 9: 575–584
- Sun D Y, Zhang D W, Cheng X T. 2012. Framework of national Non-Structural measures for flash flood disaster prevention in China. *Water*, 4: 272–282
- Špitalar M, Gourley J J, Lutoff C, Kirstetter P E, Brilly M, Carr N. 2014. Analysis of flash flood parameters and human impacts in the US from 2006 to 2012. *J Hydrol*, 519: 863–870
- Schröder D, Omran A. 2015. Automated geoprocessing workflow for watershed delineation and classification for flash flood assessment. *Int J Geoinform*, 11: 31–38
- Wang J F, Li X H, Christakos G, Liao Y L, Zhang T, Gu X, Zheng X Y. 2010. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China. *Int J Geogr Inf Sci*, 24: 107–127
- Yuan X M, Liu Y S, Huang Y H, Tian F C. 2017. An approach to quality validation of large-scale data from the Chinese flash flood survey and evaluation (CFFSE). *Nat Hazards*, 89: 693–704

(责任编辑: 王宁练)