引用格式: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 H W, Wang Q. 2017. Study on rainfall index selection for hazard analysis of mountain torrents disaster of small watersheds. Journal of Geo-information Science, 19(3):425-435.] DOI:10.3724/SP.J.1047.2017.00425

小流域山洪灾害危险性分析之降雨指标选取的初步 研究

李华威1,3,万 庆1,2,3*

1. 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; 2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心,南京 210023; 3. 中国科学院大学,北京 100049

Study on Rainfall Index Selection for Hazard Analysis of Mountain Torrents Disaster of Small Watersheds

LI Huawei^{1,3} and WAN Qing^{1,2,3*}

1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Mountain torrents are one of the most dangerous weather-related natural disasters in the world. As the direct driving force and inducing factor of mountain torrent disasters, rainfall can be used as an indispensable index in the hazard analysis of flash flood. In different study areas, the rainfall with different return periods and durations may affect mountain torrent disasters differently and would be therefore selected disparately for the hazard analysis. However, there is little quantitative research on the principles of rainfall index selection in the previous literatures. Based on the small watershed map (1:50,000 scale), the rainstorm atlas and the spatial distribution of mountain torrent disasters, this paper focused on the small watersheds in Wuyuan County in Jangxi Province and used GIS (Geographic Information System), Correlational Analysis, Spatial Cluster and Geographical Detector to obtain the rainfall indices which had great impact on the mountain torrent disasters of the small watersheds. The selected rainfall indices will take part in the hazard analysis of mountain torrent disasters in the study area. The conclusion is drawn as follows: (1) Seven uncorrelated rainfall indices have been obtained from the original 24 rainfall indices by the correlational analysis method. This means that in order to avoid the information overlap, we need to analyze the correlation between pairs of the rainfall indices before the hazard analysis of mountain torrent disaster. (2) By using the Optimized Hot Spot Analysis tool based on Local Getis-Ord Gi* Algorithm to get the estimated hazard values of the mountain torrent disasters of small watersheds, the calculation results are in line with the spatial distribution of mountain torrent disasters in this study area. (3)It's better to introduce geographical detector to quantify the relevance between rainfall indices and mountain torrent disasters of small watersheds. Through the comprehensive analysis, the final rainfall factors, which cause mountain torrent disasters of the small watersheds with a great probability, will be derived and will participate in the hazard analysis of flash flood. The finally selected rainfall factors of small watersheds in Wuyuan County are the maximum rainfall with 100-year return period and 6-hour duration and the maximum rainfall with 100-year re-

基金项目:资源与环境信息系统国家重点实验室自主创新项目"重大地表灾害动力学过程研究"(O88RAA02YA)。 作者简介:李华威(1984-),男,硕士生,研究方向为山洪灾害风险分析。E-mail: lihw@lreis.ac.cn

收稿日期:2016-06-13;修回日期:2016-08-26.

^{*}通讯作者:万 庆(1964-),男,研究员,研究方向为GIS应用、智慧城市、防洪减灾等。E-mail: wanq@lreis.ac.cn

turn period and 24-hour duration. The technical method in this paper possesses an important reference value and guidance to the quantitative selection of rainfall indices in the hazard analysis of flash flood of small watersheds. **Key words:** GIS; rainfall index; correlational analysis; spatial cluster; geographical detector

*Corresponding author: WAN Qing, E-mail: wanq@lreis.ac.cn

摘要:降雨是诱发山洪灾害的直接动力和激发条件,是山洪灾害危险性分析中不可或缺的重要指标。对于不同的研究区,不同频次和历时的降雨对山洪灾害的影响不同,危险性分析所选取的降雨指标也可能不同。本文基于1:5万小流域数据、历史山洪灾害空间分布数据和暴雨图集资料,以江西省婺源县小流域为例,采用相关分析法对初步选取的24个降雨指标进行相关性分析,筛选出相关性不强的降雨指标;利用GIS技术和基于局部Getis-Ord Gi*算法的优化热点分析工具对历史山洪灾害点进行空间聚类分析,获得研究区每个小流域山洪灾害危险度的估值,该值能够较好地反映小流域山洪灾害危险性的空间分布;通过地理探测器模型中的因子探测器和交互探测器对已筛选出的降雨指标和小流域山洪灾害危险度进行综合探测分析,从而获取对该研究区小流域山洪灾害危险性影响较大的降雨指标,即100年一遇最大6h降雨和100年一遇最大24h降雨。本文研究对小流域山洪灾害危险性分析降雨指标的定量选取具有参考和指导意义。

关键词:GIS;降雨指标;相关性分析;空间聚类;地理探测器

1 引言

中国是一个多山的国家,高强度的降雨、复杂 的地形地貌及山区河道较弱的调蓄能力导致山洪 灾害的频繁发生,严重威胁着山区人民生命的安全 和制约着山区经济的发展。山洪灾害的形成机理 非常复杂,影响因子很多。国内外许多专家、学者[1-8] 在山洪灾害成因研究的基础上,从自然和社会2个方 面归纳了山洪灾害的一级影响因子:气象水文、地形 地貌和人类活动。其中,作为气象水文的二级因子, 降雨是诱发山洪灾害的直接动力和激发条件¹⁹¹,是山 洪灾害危险分析中不可或缺的重要指标,其值的正 确与否直接决定了山洪灾害危险分析的精度。国 内外学者在进行山洪灾害危险性分析时所选取的 降雨指标不尽相同:黄理军等100选取了年平均降雨 量、年最大24h降雨量和年最大6h降雨量作为致 灾因子对湖南进行防治区划分;岳琦等凹选取了年 平均降雨量作为致灾因子对福建闽江上游进行山 洪灾害风险区划;黄国如等¹¹²选取了最大3d降雨 量作为致灾因子对清远市瑶安小流域进行山洪灾 害风险评价;唐余学等四利用山洪灾害点发生时的 日降雨量算出24h的临界降雨量对重庆市山洪灾 害危险分析;管珉四选取了年平均降雨量和年平均 暴雨日数作为致灾因子对江西省山洪灾害进行风 险区划;陆桂华等¹¹⁵选取了20年一遇年最大6h降 雨量和20年一遇年最大1h降雨量作为致灾因子对 中小流域进行山洪危险性区划:丁文峰等109选取最 大24h暴雨极值、最大24h暴雨极值变差系数、最 大1h暴雨极值和最大1h暴雨极值变差系数作为 致灾因子参与了四川省山洪灾害风险评估与区划; 马建华等¹¹⁷建议用年最大6h降雨量和6h临界雨 量作为致灾因子参与中国山洪灾害防治区划;杜 俊,任洪玉等¹¹⁸对选取的最大10min、1h和6h多年 暴雨极值年均雨量及对应的变差系数分别进行主 成分分析,把获得的2个综合降雨指标作为中国大 尺度山洪灾害危险性评估的致灾因子;Youssef 等 ¹¹⁹选取重现期为25、50、100和200年的最大24h降 雨量参与了沙特阿拉伯吉达市2009年和2011年山 洪灾害的成因分析;Zeleňáková等¹²⁰利用100年一遇 最大24小时降雨量作为致灾因子对斯洛伐克的博 德瓦河的山洪灾害进行风险分析;Mandal等¹²¹以6 h降雨量作为HMS模型的雨量输入值对印度的提 斯塔小流域上游进行山洪风险评估。

对于不同的研究区,不同频次和历时的降雨对 山洪灾害的影响可能不同。受制于山区小流域资料 和历史山洪灾害空间分布信息资料的匮乏,现有的 山洪灾害危险性分析对降雨指标的选取原则并没有 给出具体的理由,主要依据经验和以往的文献选取。 这种选择本身具有较强的主观性和模糊性,且由于 降雨指标通常在山洪灾害危险性分析中被赋予很大 的权重,如果错误地选择了相应频次和历时的降雨 量,就会产生错误的分析结果。因此,本文以江西省 婺源县为例,根据婺源县详细的历史山洪灾害资料 和各频次和历时的降雨,以小流域为基本单元,利用 GIS技术、相关分析法、空间聚类分析和地理探测器 模型,定量地筛选出与婺源县山洪灾害危险性分析 密切相关的降雨指标,筛选出的结果可为婺源县山 洪灾害危险性的准确分析提供数据支撑。

2 研究区概况

婺源县位于江西省东北部,赣、浙、皖3省交界处,东边与浙江省开化县相邻,北边与安徽省休宁 县接壤,西边是本省的景德镇市(图1(a))。全县总 面积为2948 km²,其中山区面积为2337 km²,占总面 积的79.3%。

县域属亚热带东南季风气候,年均降雨量 1800 mm,4-6月为汛期,平均月雨量200~300 mm。 地形以中低山、丘陵为主,地势由东北向西南倾斜, 境内最高海拔1564 m,最低海拔35 m(图1(b))。县 内天然水系发育,属饶河水系(图1(c)),各河流均由 东北流向西南,注入乐安河,向西汇入鄱阳河^[22]。

2001年以来,旅游产业已成为婺源县经济的主导产业和战略性支柱产业,2011年该县旅游产业增加值占全县GDP的41.6%^[23]。发达的旅游产业会带来大量的人口,安全也必然成为第一关注要素。由于该县发达的水系、充沛的雨量和复杂的地形地貌导致了山洪灾害的多次发生,据历史山洪灾害数据显示:1955-2014年婺源县共发生了179次较大型山洪灾害,累积经济损失达到7856万元人民币。

3 数据与研究方法

3.1 数据来源

研究区主要数据类型及来源如表1所示。

3.2 数据处理

3.2.1 投影变换

在对数据进行操作和综合分析之前,需要将不同坐标系下的空间数据转换到统一坐标系中。本 文利用投影变换将所有的源数据都转换到Beijing_ 1954_3_Degree_GK_CM_117E的坐标系统下。 3.2.2 空间插值处理

江西省暴雨图集提供的是等值线矢量图,需要 通过空间插值计算,才能获得整个研究区的降雨分 布情况。本文借助于ArcGIS 10.3提供的地形转栅 格(Topo to Raster)插值模块对降雨等值线进行空 间插值,从而获取整个研究区的降雨量,插值的分 辨率为90 m×90 m。

3.2.3 标准化处理

不同变量常常具有不同的单位或不同的变异 程度,取值范围也相差较大,为了消除量纲的影响 和变量自身变异大小的影响,需要对数据进行标准



Fig. 1 Map of the study area

表1	研究区主要数据类型、	、格式、坐标系及来源

Tab. 1 Main data type, format, coordinate system and source

数据类型	格式	空间坐标系	来源
江西省暴雨图集	SHAPEFILE	GCS_China_Geodetic_Coordinate_System_2000	全国山洪灾害调查评价数据
DEM(90 m)数据	TIF	GCS_WGS_1984	SRTM
1:5万小流域数据	SHAPEFILE	GCS_WGS_1984	全国山洪灾害调查评价数据
1955-2014年婺源县 历史山洪灾害数据	SHAPEFILE	Beijing_1954_3_Degree_GK_CM_117E	全国山洪灾害调查评价数据

化处理。本文采用z-score标准化方法对数据进行 处理,公式如下:

$$a_i = \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (i = 1, 2, \cdots, k) \tag{1}$$

式中: a_i 为标准化后的数列; x_i 为原始数列; μ_i 为 x_i 的平均值; σ_i 为 x_i 的标准差。

3.3 研究方法

3.3.1 降雨指标体系的初步构建

由于山丘区沟道短,比降大,一旦发生暴雨, 洪水汇流速度快,从降雨到形成山洪,一般只需几 小时甚至几分钟,至灾害发生时间一般仅为5-6 h,最多不超过24 h^[24-25]。全国山洪灾害防治规划 研究表明,诱发中国山洪灾害主要以短历时、高强 度降雨为主^[3]。因此,本文主要从江西省暴雨图集 中初选了重现期为1、5、10、20、50和100年,历时 为10 min、1 h、6 h、24 h的降雨量,经过组合获得 24个降雨指标(表2)。

3.3.2 相关性分析

山洪灾害的危险性分析通常以小流域为基本 单元,婺源县共包含了217个、面积一般在25~50 km² 小流域。由于把降雨等值线进行空间插值处理后,

表2 初步构建的降雨指标体系

Tab. 2 The preliminarily constructed rainfall index system

历时	编号	指标/mm
10 min	S11	年均最大10 min降雨量
	S12	5年一遇最大10 min降雨量
	S13	10年一遇最大10 min降雨量
	S14	20年一遇最大10 min 降雨量
	S15	50年一遇最大10 min降雨量
	S16	100年一遇最大10min降雨量
1 h	S21	年均最大1h降雨量
	S22	5年一遇最大1h降雨量
	S23	10年一遇最大1h降雨量
	S24	20年一遇最大1h降雨量
	S25	50年一遇最大1h降雨量
	S26	100年一遇最大1h降雨量
6 h	S31	年均最大6h降雨量
	S32	5年一遇最大6h降雨量
	S33	10年一遇最大6h降雨量
	S34	20年一遇最大6h降雨量
	S35	50年一遇最大6h降雨量
	S36	100年一遇最大6h降雨量
24 h	S41	年均最大24h降雨量
	S42	5年一遇最大24h降雨量
	S43	10年一遇最大24h降雨量
	S44	20年一遇最大24h降雨量
	S45	50年一遇最大24h降雨量
	S46	100年一遇最大24h降雨量

所得到的是每个栅格点的雨量值,因此需要计算出 婺源县每个小流域内的每个降雨指标的平均值作 为该小流域的一个降雨指标值。根据评价指标之 间的独立性原则,小流域降雨指标之间需要进行相 关分析,整合相关性较大的降雨指标,消除信息的 重叠对山洪灾害危险性分析造成的影响。本文采 用皮尔逊相关系数法计算各降雨指标之间的相关 系数 ρ_i(式(2))。

$$\rho_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{n} (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^{n} (x_{ki} - \bar{x}_i)^2 (x_{kj} - \bar{x}_j)^2}}$$
(2)
(n = 217, i,j = 1, 2, ..., 24)

式中: ρ_{ij} 为第i个降雨指标和第j个降雨指标的相 关系数; x_{ki} 为第k个小流域第i个降雨指标的值; \bar{x}_i 为第i个降雨指标的平均值。

根据文献[26]可知,相关系数的绝对值在0.8以 上的是高度相关,需加以合并。合并原则为^[27]:①对 于同类型指标(指同为效益型或成本型指标,效益 型指标是指越大越好的指标,成本型指标是指越小 越好的指标),相关系数为正是真相关,相关系数为 负是假相关;②对于同一层次的指标(指标之间是 并列关系,非上下级隶属关系),比较其平均相关系 数,平均相关系数大者优先保留。

3.3.3 空间聚类分析

空间聚类分析作为空间数据挖掘的一个分支, 对于揭示地理空间自然现象的分布、变化等具有十 分重要的作用。详细的历史山洪灾害统计资料在 一定程度上能反映山洪灾害的空间分布特征,通过 对研究区山洪灾害进行空间聚类分析,可以获取该 区域山洪灾害的空间分布趋势。本文采用基于局 部Getis-Ord Gi*算法的优化热点分析工具,先对婺 源县1955-2014年的179个历史山洪灾害点进行空 间聚类,然后计算出小流域山洪灾害的相对危险度 估值。具体操作步骤如下:

(1)利用ArcGIS 10.3提供的优化热点分析工具 (Optimized Hot Spot Analysis) 以 渔 网 面 (FISH_NET_POLYGONS)为聚合面对山洪灾害点 进行空间聚类分析,获取渔网面每个格网的*G*^{*}_i值 (式(3)),*G*^{*}_i值按式(1)标准化后即为*z*得分。*z*得 分越高,山洪灾害高值区(热点)越紧密;*z*得分越 低,山洪灾害低值区(冷点)越紧密。*z*得分不仅反 映了单个格网与周围格网山洪灾害的聚集程度,也 反映了山洪灾害在整个渔网面中的空间分布趋 势。因此,可以用z得分表示单个格网在整个研究 区渔网面中的相对危险程度,这比用山洪灾害频次 量化会更符合山洪灾害的空间分布。

$$G_{i}^{*} = \frac{\sum_{j=1}^{n} w_{ij}x_{j} - \bar{X}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}}{S\sqrt{\frac{\left[n\sum_{j=1}^{n} w_{ij}^{2} - \left(\sum_{j=1}^{n} w_{ij}\right)^{2}\right]}{n-1}}} (i,j=1,2,\cdots,n) \quad (3)$$

$$\overline{X} = \frac{\sum_{j=1}^{n} x_{j}}{n-1} \quad (4)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{x_{j}^{*}}}{n} - (\bar{X})^{2}}$$
(5)

式中: G^{*}_i 表示格网*i*的山洪灾害统计量; x_j 是格网 *j*所包含的山洪灾害事件个数; w_{ij} 是格网*i*和格网*j* 的空间权重;优化热点分析工具默认采用固定距离 阈值(FIXED_DISTANCE_BAND)进行要素之间的 权重计算,当格网 *j* 与格网*i*的距离在阈值范围内 时, w_{ij} =1,当超出距离阈值, w_{ij} =0,距离阈值是由 优化热点分析工具自动生成的最优的距离; n 是渔 网面所有格网的个数。

(2)小流域山洪灾害危险度估值的获取。在 步骤(1)中,优化热点分析工具根据山洪灾害点自 动生成的最优格网的尺寸一般较大。为了方便把 格网的z得分统计到小流域单元,本文将其转化为 分辨率90 m×90 m的栅格单元,栅格单元值为格网 的z得分;然后,统计出婺源县每个小流域内所有 栅格单元值的平均值 z*,即小流域的山洪灾害危 险度估值。

3.3.4 地理探测器模型

地理探测器模型是基于地理空间分异理论,探 测风险的地理位置、风险的决定因素、因素之间的 相对重要性以及因素的作用方式,最初主要用于地 方疾病和地理环境因子相关关系的研究^[28-29]。由于 没有同方差性、正态性等过多的假设条件,以及克 服了处理类别变量的局限性,近年来该模型作为一 种探测要素空间分布成因的重要方法在与经济、考 古、气象、地质等领域相关的地理学研究中得到了 广泛应用^[30-33]。地理探测器模型的基本思想是:一 种现象的产生总是和某些因子有关,通过分析它们 的空间分布趋势,可以找出与该现象在空间变化上 具有显著一致性的因子,这些因子对这种现象的发 生及发展具有较强的解释力^[28]。 本文将采用地理探测器模型中的因子探测器 和交互探测器对婺源县小流域山洪灾害危险度和 筛选出的降雨指标进行探测分析,获取对山洪灾害 危险性影响较大的降雨指标。

(1)因子探测器用因子解释力(Power of Determinant, PD)来量化降雨指标对小流域山洪灾害危 险性的解释程度,计算模型如式(6)所示。

$$P_{D,H} = 1 - \frac{1}{n\sigma^2} \sum_{h=1}^{L} n_h \sigma_h^2$$
(6)
$$(n = 217, L = 5, h = 1, 2, \dots, L)$$

式中: $P_{D,H}$ 为降雨指标D 对小流域山洪灾害危险性 H的解释力; $n \in J$ 、流域的总个数; $L \in L$ 降雨指标 分类数; $n_h \in h$ 类中小流域的个数; $\sigma^2 \in D$ 不流 域山洪灾害危险度的离散方差; $\sigma_h^2 \in L$ 人本中小流域 危险度的离散方差。 假设 $\sigma^2 \neq 0$, 模型成立, $P_{D,H} \in [0,1]$, 数值越大说明降雨指标D 对小流域山 洪灾害危险性的解释力越强,影响度越高。

(2)交互探测器通过对多个降雨指标交互后的 因子解释力和单个降雨指标的因子解释力的比较, 来探测降雨指标交互后对小流域山洪灾害危险性 的影响模式。设 *P*(*D*₁)、*P*(*D*₂)分别是降雨指标 *D*₁、*D*₂对小流域山洪灾害危险性的解释力, *P*(*D*₁∩*D*₂)是降雨指标 *D*₁、*D*₂交互后的因子解释 力,则影响模式主要有以下5种:

① 非线性减弱: $P(D_1 \cap D_2) < \min(P(D_1), P(D_2))$ ② 单线性减弱: $\min(P(D_1), P(D_2)) < P(D_1 \cap D_2)$ $< \max(P(D_1), P(D_2))$

③ 双线性增强:

 $P(D_1 \cap D_2) > \max(P(D_1), P(D_2))$

④相互独立: $P(D_1 \cap D_2) = P(D_1) + P(D_2)$

⑤ 非线性增强: $P(D_1 \cap D_2) > P(D_1) + P(D_2)$

影响因子的交互模型在 GIS 环境中很容易实 现。将分类后的降雨指标 D₁、D₂进行叠加后 (C=D₁∩D₂),每个小流域就得到一个新的综合指 标C,其类别为该小流域降雨指标 D₁、D₂子类别的 叠加,分类数为所有小流域综合指标C的类别种类 数。然后,把综合指标C和降雨指标 D₁、D₂代入 式(6)计算并进行影响模式的判断。这种模型可以 扩展到3个或更多指标之间的交互分析,随着指标 的增加,交互分析将会变得更加复杂^[28]。由于本文 目标是选取影响小流域山洪灾害的主要降雨指标 作为山洪灾害危险性分析的致灾因子,所以只进行 了2个降雨指标的交互分析。

4 结果与分析

4.1 降雨指标的初步筛选结果及分析

对初步构建的24个降雨指标(表2)进行相关 分析,获取了婺源县小流域各个降雨指标之间的相 关系数,组成的相关矩阵(图2)中,红色点表示2个 降雨指标相关系数的绝对值大于或等于0.8,绿色 点相关系数的绝对值小于0.8。由于已构建的24 个降雨指标属于同类型、同层次指标,根据指标的 合并原则,共筛选出7个相关程度较小的降雨指 标(表3),其空间分布状况如图3所示。



图 2 初步选取降雨指标的相关系数矩阵图 Fig. 2 The correlation coefficient matrix of initially selected rainfall indices

表 3 初步筛选的降雨指标 Tab. 3 The preliminarily screened rainfall indices

	-	·
历时	编号	指标/mm
10 min	S13	10年一遇最大10 min降雨量
	S14	20年一遇最大10 min降雨量
1 h	S26	100年一遇最大1h降雨量
6 h	S34	20年一遇最大6h降雨量
	S36	100年一遇最大6h降雨量
24 h	S41	年均最大24h降雨量
	S46	100年一遇最大24h降雨量

从图3可看出,初步筛选的降雨指标在空间分 布上存在显著的差异:① 婺源县小流域10年一遇 最大10min降雨量和20年一遇最大6h降雨量均从 西部向东部逐渐减小,但前者主要集中在高值和低 值两端,后者分布比较均匀;② 20年一遇最大10min 降雨从西向东先减小后增大,降雨量主要集中在中 间段;③ 100年一遇最大1h降雨和100年一遇最大 24h降雨都是从西北向东南逐渐减小,雨量分布也 较均匀,但前者的高值和低值主要集中在西部和南 部,而后者的高值集中在北部,低值均匀分布在东 南沿线上;④100年一遇最大6h降雨从西南向东 北逐渐减小,分布较均匀,而年均最大24h降雨的 空间分布相反,从西南向东北逐渐增大,且雨量主 要集中在较低段。

4.2 小流域山洪灾害危险度估算结果与分析

利用优化热点分析工具对婺源县1955-2014年 179个历史山洪灾害点进行空间聚类分析,生成了 652个渔网面格网,格网的大小为2.3 km×2.3 km, 最优的固定距离阈值(FIXED_DISTANCE_BAND) 为6901 m。把获取的z得分作为渔网面格网的山洪 灾害危险度,继而得到217个小流域的山洪灾害危 险度估值z*。数值越大,表明该小流域发生山洪灾 害的几率越大,危险性越高,其空间分布状况如图4 所示。从图4(c)可知:山洪灾害危险度高的小流域 主要集中在婺源县的北方(H1区)和西南方(H2 区);山洪灾害危险度低的小流域以"凹"字形分布 在H1区的周围。





Fig. 3 Spatial distributions of the preliminarily screened rainfall indices of small watersheds in Wuyuan County



图4 婺源县山洪灾害危险性空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of the hazard of mountain torrent disaster in Wuyuan County

4.3 降雨指标的最终选取结果与分析

自然断点分级法是为减少同一级中差异、增加 不同级间差异而采用统计公式确定属性值的自然 聚类,刘彦随等^[34]利用地理探测器分析中国县域城 镇化的空间特征和形成机理时对各要素进行了自 然聚类的分级分区。本文将采用自然断点法把初 步筛选出的各降雨指标值分为5类(级别从低到高 为1、2、3、4、5),然后利用因子探测器分别计算反映 各降雨指标(表3)对小流域山洪灾害危险性影响能 力的 *P*_{D,H} 值以及反映 *P*_{D,H} 值显著性的*p* 值(表4)。

由表4可知:①100年一遇最大1h降雨指标的 p值为0.08(>0.05),说明该降雨指标对山洪灾害的

Tab. 4 Detected result of the preliminarily screened rainfall indices					
历时	编号	指标/mm	$P_{\scriptscriptstyle D,H}$	排序(从大到小)	Р
10 min	S13	10年一遇最大10min降雨量	0.1676	4	0.00
	S14	20年一遇最大10min降雨量	0.1008	6	0.00
1 h	S26	100年一遇最大1h降雨量	0.0414	7	0.08
6 h	S 34	20年一遇最大6h降雨量	0.4276	1	0.00
	S 36	100年一遇最大6h降雨量	0.3923	2	0.00
24 h	S41	年均最大24h降雨量	0.2546	3	0.00
	S46	100年一遇最大24h降雨量	0.1570	5	0.00

表4 初步筛选降雨指标的探测结果

解释力不显著,无法作为致灾因子,而其他降雨指 标的解释力都具有显著性;②尽管20年一遇最大 10 min降雨指标的解释力具有显著性,但 PnH 值很 小,说明其对婺源县小流域山洪灾害危险性的解释 力很低,无法作为该县山洪灾害危险性分析的致灾 因子;(3)20年一遇最大6h降雨指标、100年一遇最 大6h降雨指标和年均最大24h降雨指标的PDH值 排在前三位,说明它们对婺源县山洪灾害危险性空 间分布的影响较大,即关联性较强。但从图5来看, 年均最大24h降雨指标和小流域山洪灾害危险度 估算值呈负相关。对于同类型的指标,这属于假相

关现象,表明年均最大24h降雨指标无法解释婺源 县小流域山洪灾害危险性空间分布差异,也不能作 为致灾因子。

实际上诱发山洪灾害是多种降雨类型共同作 用的结果,不可能只存在单一的降雨指标影响山洪 灾害的空间分布。利用交互探测器对10年一遇最 大10min降雨指标、20年一遇最大6h降雨指标、 100年一遇最大6h降雨指标和100年一遇最大24h 降雨指标进行探测分析,再结合表4,获取交互后对 小流域山洪灾害危险性的影响模式(表5)。从表5 可以看出:①降雨指标对山洪灾害危险性的影响是





Fig. 5 Scatter plots and linear fits of rainfall indices and estimated hazard value of small watersheds in Wuyuan County

	表5 4种降雨指标之间的父互作用
Tab. 5	Interaction between pairs of the four rainfall indices

交互指标(C)	解释力(P _{C,H})	结果	影响模式
10年一遇最大10min降雨∩20年一遇最大6h降雨	0.4820	$\max(P_{_{\rm S13,H}},P_{_{\rm S34,H}}) < P_{_{C,H}} < P_{_{\rm S13,H}} + P_{_{\rm S34,H}}$	双线性增强
10年一遇最大10min降雨∩100年一遇最大6h降雨	0.4808	$\max(P_{{}_{\rm S13,H}}, P_{{}_{\rm S36,H}}) < P_{{}_{C,H}} < P_{{}_{\rm S13,H}} + P_{{}_{\rm S36,H}}$	双线性增强
10年一遇最大10min降雨∩100年一遇最大24h降雨	0.5281	$P_{C,H} > P_{S13,H} + P_{S46,H}$	非线性增强
20年一遇最大6h降雨∩100年一遇最大6h降雨	0.6430	$\max (P_{\rm S34,H}, P_{\rm S36,H}) < P_{\rm C,H} < P_{\rm S34,H} + P_{\rm S36,H}$	双线性增强
20年一遇最大6h降雨∩100年一遇最大24h降雨	0.6660	$P_{C,H} > P_{S34,H} + P_{S46,H}$	非线性增强
100年一遇最大6h降雨∩100年一遇最大24h降雨	0.7211	$P_{_{C,H}} > P_{_{\rm S36,H}} + P_{_{\rm S46,H}}$	非线性增强

注: S13、S34、S36、S46是相应降雨指标的编号,具体见表4

432

非独立的,相比单个降雨指标,4种降雨指标两两交 互后对山洪灾害危险性的影响都起到了协同增强 的作用。②解释力较大的2个降雨指标20年一遇 最大6h降雨(0.4276)、100年一遇最大6h降雨 (0.3923)分别和10年一遇最大10min降雨(0.1676) 交互后增强度都较弱,说明无论在整体还是局部10 年一遇最大10 min 降雨指标对山洪灾害危险性的 影响都较小,无法作为婺源县小流域山洪灾害危险 性分析的致灾因子。③ 100年一遇最大 24 h 降雨 (0.1570)分别和其他3个降雨指标交互后对山洪灾 害危险性影响的增强度都较大,表明虽然在整个研 究区范围内100年一遇最大24h降雨指标对小流域 山洪灾害危险性的解释力较小,但在某些局部地区 的解释力很大,可以作为主要降雨指标的辅助因子 参与山洪灾害的危险性分析。④100年一遇最大6h 降雨和100年一遇最大24h降雨的协同作用最为显 著(0.7211),远大于单个降雨指标的最大解释力 (0.4276),说明在这些降雨指标中,婺源县小流域山 洪灾害危险性受100年一遇最大6h降雨和100年 一遇最大24h降雨共同作用的影响最大,可以把这 2个降雨指标作为该县小流域山洪灾害危险性分析 的致灾因子。

5 结论与讨论

目前,在山洪灾害危险性分析中,由于选取降 雨指标的主观性较强,可能会导致降雨指标之间有 较大的相关性,造成信息重叠,或选取的降雨指标 对山洪灾害的影响力很弱,造成降雨指标的错选, 这些都会对小流域山洪灾害危险性分析的正确性 产生很大的影响。本文基于1:5万小流域数据、历 史山洪灾害空间分布数据和暴雨图集资料,以江西 省婺源县小流域为例,采用GIS技术、相关分析法、 空间聚类法和地理探测器模型筛选出与小流域山 洪灾害密切相关的降雨指标,为山洪灾害危险性分 析致灾因子的客观选取提供了一种新的思路。研 究发现:

(1)初步选取的24个降雨指标经过相关性分析 后,获得了7个相关性不强的降雨指标,说明在进行 山洪灾害危险性分析之前,需要对所选的降雨指标 进行相关分析,以避免信息的重叠。

(2)运用 GIS 技术和基于局部 Getis-Ord Gi*算 法的优化热点分析工具对研究区的历史山洪灾害 点进行空间聚类分析,获得研究区每个小流域山洪 灾害危险度的估值,该值能够较好的反映小流域山 洪灾害危险性的空间分布。

(3)利用地理探测器模型中的因子探测器和交 互探测器对已筛选出的降雨指标和小流域山洪灾 害危险度进行探测分析,不仅能够获得单个降雨指 标对小流域山洪灾害的影响力,还能获得两个降雨 指标交互后对山洪灾害危险性的解释力。通过综 合比较分析,选取对小流域山洪灾害影响最大的降 雨指标作为山洪灾害危险性分析的致灾因子。对 于婺源县小流域而言,100年一遇最大6h降雨和 100年一遇最大24h降雨的交互作用对山洪灾害的 解释力(0.7211)远大于单个降雨指标的最大解释力 (0.4276),可以把它们作为致灾因子参与该研究区 山洪灾害的危险性分析。

(4)本文着眼于小流域山洪灾害危险性分析之 降雨指标的选取,用一系列算法定量的筛选出与山 洪灾害密切相关的降雨指标,为山洪灾害危险性分 析致灾因子的客观选取提供了参考和指导作用。 其中,用优化热点分析工具对山洪灾害点进行空间 聚类能够较好的反映山洪灾害的空间分布趋势,这 种连续性的空间分布比离散的山洪灾害频次既能 更好的反映地理事物的空间自相关性,又能方便的 与降雨指标的空间分布进行比较分析。同时,用地 理探测器模型的因子探测器筛选出的两个降雨指 标(20年一遇最大6h降雨指标和100年一遇最大6 h降雨指标)和用主成分分析法筛选出的降雨指标 一样,但地理探测器模型的交互探测器能进一步筛 选出交互作用后对山洪灾害影响最大的降雨指标, 这说明地理探测器模型能够有效的诊断影响山洪 灾害的主要降雨指标,可应用于山洪灾害危险性分 析中。

致谢:感谢全国山洪灾害防治项目组在数据资料方面给予 的支持,感谢中国科学院地理科学与资源研究所王劲峰老 师给予方法上的指导和帮助!

参考文献(References):

- [1]黄国如,程国栋,冼卓雁,等.清远市瑶安小流域山洪灾害成因分析[J].水资源与水工程学报,2015,26(3):136-141.
 [Huang G R, Cheng G D, Xian Z Y, et al. Analysis of causes of mountain flood disaster at Yaoan small watershed of Qingyuan[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015,26(3):136-141.]
- [2]周存旭,金世海.河南省山洪灾害的危害、成因及防治对策[J].自然灾害学报,2008,17(3):148-151. [Zhou C X,

Jing S H. Cause, damage and control measures of mountain flood hazard in Henan Province[J]. Journal of Natural Disasters, 2008,17(3):148-151.

- [3] 李中平,毕宏伟,张明波.我国山洪灾害高易发降雨区分 布研究[J].中国水利,2007(14):25-27. [Li Z P, Bi H W, Zhang M B. Studies on precipitation distribution in mountain flood-prone areas in China[J]. China Water Resources, 2007,14:25-27.]
- [4] 任洪玉,邹翔,张平仓.我国山洪灾害成因分析[J].中国水 利,2007(14):18-20. [Ren H Y, Zou X, Zhang P C. An elementary study on causing-factors of Chinese mountain torrents disaster[J]. China Water Resources, 2007,14:18-20.]
- [5] 樊建勇,单九生,管珉,等.江西省小流域山洪灾害临界雨量计算分析[J].气象,2012,38(9):1110-1114. [Fan J Y, Shan J S, Guan M, et al. Research on analysis and calculation method of critical precipitation of mountain torrents in Jiangxi Province[J]. Meteorological Monthly, 2012,38 (9):1110-1114.]
- [6] Špitalar M, Gourley J J, Lutoff C, et al. Analysis of flash flood parameters and human impacts in the US from 2006 to 2012[J]. Journal of Hydrology, 2014,519:863-870.
- [7] Youssef A M, Sefry S A, Pradhan B, et al. Analysis on causes of flash flood in Jeddah city (Kingdom of Saudi Arabia) of 2009 and 2011 using multi-sensor remote sensing data and GIS[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016,7(3):1018-1042.
- [8] Modrick T M, Georgakakos K P. The character and causes of flash flood occurrence changes in mountainous small basins of Southern California under projected climatic change[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2015,3:312-336.
- [9] Douinot A, Roux H, Garambois PA, et al. Accounting for rainfall systematic spatial variability in flash flood forecasting[J]. Journal of Hydrology, 2016,541:359-370.
- [10] 黄理军,王辉,张文萍,等.湖南山洪灾害成因及防治区划研究[J].农业现代化研究,2007,28(4):483-486. [Huang L J, Wang H, Zhang W P, et al. Research on origin of mountain torrents disaster and preventing and controlling regionalization in Hunan Province[J]. Research of Agricultural Modernization, 2007,28(4):483-486.]
- [11] 岳琦,张林波,刘成程,等.基于 GIS 的福建闽江上游山洪灾害风险区划[J].环境工程技术学报,2015,5(4):293-298. [Yue Q, Zhang L B, Liu C C, et al. GIS-based risk zoning of flood disasters in upstream of the Minjiang River[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2015,5(4):293-298.]
- [12] 黄国如,程国栋,冼卓雁,等.基于GIS的清远市瑶安小流 域山洪灾害风险评价[J].水电能源科学,2015,33(6):43-

47. [Huang G R, Cheng G D, Xian Z Y, et al. Risk assessment of mountian torrent disaster at yaoan small watershed in qingyuan city based on GIS technique[J].Water Resources and Power, 2015,33(6):43-47.]

- [13] 唐余学,廖向花,李晶,等.基于GIS 的重庆市山洪灾害区 划[J].气象科技,2011,39(4):423-428. [Tang Y X, Liao X H, Li J, et al. Regionalization of torrential flood disasters in Chongqing based on GIS[J]. Meteorology Science and Technology, 2011,39(4):423-428.]
- [14] 管珉,陈兴旺.江西省山洪灾害风险区划初步研究[J].暴雨灾害,2007,26(4):339-343. [Guan M, Chen X W. Research of regional torrent risk zonation in Jiangxi Province[J]. Torrential Rain and Disasters, 2007,26(4):339-343]
- [15] 陆桂华,钟凌,吴志勇,等.中小流域山洪危险性区划[J].地 球科学-中国地质大学学报,2014,39(10):1538-1544.
 [Lu G H, Zhong L, Wu Z Y, et al. Zoning of mountain torrent hazards in medium-small river basins[J]. Earth Science- Journal of China University of Geosciences, 2014,39(10):1538-1544.]
- [16] 丁文峰,杜俊,陈小平,等.四川省山洪灾害风险评估与区划[J].长江科学院院报,2015,32(12):41-45,97. [Ding WF, Du J, Chen XP, et al. Risk assessment and regionalization of mountain torrent disaster in Sichuan Province[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015,32(12):41-45,97.]
- [17] 马建华,张平仓,任洪玉.我国山洪灾害防治区划方法研究[J].中国水利,2007(14):21-24. [Ma J H, Zhang P C, Ren H Y. The study on the method of Chinese mountain torrents disaster prevention regionalization[J]. China Water Resources, 2007,14:21-24.]
- [18] 杜俊,任洪玉,张平仓,等.大空间尺度山洪灾害危险评估的比较研究[J].灾害学,2016,31(3):66-72. [Du J, Ren H Y, Zhang P C, et al. Comparative study of the hazard assessment of mountain torrent disasters in macro scale[J]. Journal of Catastrophology, 2016,31(3):66-72.]
- [19] Youssef A M, Sefry S A, Pradhan B, et al. Analysis on causes of flash flood in Jeddah city (Kingdom of Saudi Arabia) of 2009 and 2011 using multi-sensor remote sensing data and GIS[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016,7(3):1018-1042.
- [20] tZeleňáková M, Gaňová L, Purcz P, et al. Flood risk assessment from flash floods in Bodva River Basin, Slovakia [A]. In Zamojski W, Mazurkiewicz J, Sugier J, et al. Dependability Engineering and Complex Systems[C]. Cham: Springer International Publishing, 2016:583-593.
- [21] Mandal S P, Chakrabarty A. Flash flood risk assessment for upper Teesta river basin: using the hydrological mod-

eling system (HEC- HMS) software[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2016,2(2):1-10.

- [22] 张爱华.江西省婺源县地质灾害现状与形成机制研究
 [J].资源调查与环境,2010,31(3):221-229. [Zhang A H. Study on geologic disaster status and formation mechanism in Wuyuan, Jiangxi Province[J]. Resources Survey & Environment, 2010,31(3):221-229.]
- [23] 把多勋,徐金海.基于社区参与的乡村旅游研究-以江西 婺源县为例[J].资源开发与市场,2013,29(8):867-869.
 [Ba D X, Xu J H. Based on community participation in rural tourism research: A case study of Wuyuan County in Jiangxi Province[J]. Resource Development &Market, 2013,29(8):867-869.]
- [24] 徐晶,李伟华.台风强降雨诱发地质灾害的雨量特征 分析[J].气象,2009,35(8):42-48. [Xu J, Li W H. Characteristics of rainfall for typhoon rainstorm induced geological hazards[J]. Meteorological Monthly, 2009,35(8):42-48.]
- [25] Gaume E, Bain V, Bernardara P, et al. A compilation of data on European flash floods[J]. Journal of Hydrology, 2009,367(1):70-78.
- [26] 张娟,许金泉,马琼瑜,等.大学课程的相关分析[J].云南大 学学报(自然科学版),2008,30(S2):160-164. [Zhang J, Xu J Q, Ma Q Y, et al. The analysis of university course interdependency[J]. Journal of Yunnan University (Science and Technology), 2008,30(S2):160-164.]
- [27] 曹利军,王东华.可持续发展评价指标体系建立原理与方法研究[J].环境科学学报,1998,18(5):526-532. [Cao L J, Wang D H. A study on the principle and method of installation of sustainable development assessment Index[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1998,18(5):526-532.]
- [28] Wang J F, Li X H, 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.

- [29] Wang J F, Hu Y. Environmental health risk detection with GeogDetector[J]. Environmental Modelling & Software, 2012,33:114-115.
- [30] 胡丹,舒晓波,尧波,等.江西省县域人均粮食占有量的时 空格局演变[J].地域研究与开发,2014,33(4):157-162.
 [Hu D, Shu X B, Rao B, et al. The evolvement of spatio-temporal pattern of per capita grain possession in Counties of Jiangxi Province[J]. Areal Research And Development, 2014,33(4):157-162.
- [31] 毕硕本,计哈,陈昌春,等.地理探测器在史前聚落人地关系研究中的应用与分析[J].地理科学进展,2015,34(1):
 118-127. [Bi S B, Ji H, Chen C C, et al. Application of geographical detector in human-environment relationship study of prehistoric settlements[J]. Progress in Geography, 2015,34(1):118-127.]
- [32] 于佳,刘吉平.基于地理探测器的东北地区气温变化影响因素定量分析[J].湖北农业科学,2015,54(19):4682-4687. [Yu J, Liu J P. Quantitative analysis with geographical detector on the influence factor of temperature variation in Northeast China[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015,54(19):4682-4687.]
- [33] Luo W, Jasiewicz J, Stepinski T, et al. Spatial association between dissection density and environmental factors over the entire conterminous United States[J]. Geophysical Research Letters, Available Online, 2016,43(2):692-700.
- [34] 刘彦随,杨忍.中国县域城镇化的空间特征与形成机理
 [J].地理学报,2012,67(8):1011-1020. [Liu Y S, Yang R. The spatial characteristics and formation mechanism of the county urbanization in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2012,67(8):1011-1020.]