

doi:10.3799/dqkx.2014.136

# 中小流域山洪危险性区划

陆桂华<sup>1,2</sup>, 钟凌<sup>1,2</sup>, 吴志勇<sup>1,2</sup>, 何海<sup>1,2</sup>

1. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098

2. 河海大学水问题研究所, 江苏南京 210098

**摘要:** 山洪危险性区域划分是一种行之有效的防洪减灾非工程措施, 是防洪减灾体系中的重要组成部分. 利用 GIS 技术和模糊数学方法建立山洪危险性评价模型, 从山洪危险性定义出发, 利用正交设计方法, 考察降雨量和单位面积汇流时间等对山洪影响的敏感性, 确定了合理的山洪危险性评价指标体系并结合层次分析法确定了评价指标权重. 选择淮河上游息县流域进行了实证应用分析, 对研究区域山洪危险性空间分布进行划分. 研究表明: 单位面积汇流时间短、地势起伏较大的地区是山洪危险性较大的区域, 需要加强防治.

**关键词:** 洪水灾害; 评价模型; 危险性分析; 正交设计; 水文地质.

**中图分类号:** P343

**文章编号:** 1000-2383(2014)10-1438-07

**收稿日期:** 2014-02-27

## Zoning of Mountain Torrent Hazards in Medium-Small River Basins

Lu Guihua<sup>1,2</sup>, Zhong Ling<sup>1,2</sup>, Wu Zhiyong<sup>1,2</sup>, He Hai<sup>1,2</sup>

1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. Institute of Water Problems, Hohai University, Nanjing 210098, China

**Abstract:** As one of the effective non-engineering measurements, zoning of mountain torrent hazards is an important part of flood prevention and disaster mitigation system. A torrent hazard evaluation model is built by using GIS spatial analysis and modeling techniques and fuzzy mathematics method in this paper, in which the evaluation index weight is determined with analytic hierarchy process according to the results of orthogonal analysis. In addition, seven factors are chosen as the new evaluation index system to evaluate the torrent hazards, combined with the definition of mountain torrent hazard and the analysis of factors causing mountain torrent disaster, with the application of orthogonal design method, and the observed influence degree of rainfall and conflux time on mountain torrent. The areas of the upper reach of the Huaihe River were chosen as the case study area of mountain torrent hazards zonation. The results show that areas with the shortest confluence time and the largest hypsographic feature are the most dangerous areas.

**Key words:** flood damage; evaluation model; hazard analysis; orthogonal design; hydrogeology.

## 0 引言

山洪灾害是山区由于突发强降雨导致的一种洪水灾害, 具有突发性、强破坏性、时空性(季节性和地域差异)等特点. 山洪灾害成因极其复杂, 受流域地质地貌因素、气象水文因素和人类影响因素的共同作用(李林涛等, 2012).

山洪灾害预警的重要工作之一是山洪危险性区

域划分, 国内外众多学者在这方面已经做了大量的研究工作. 黄诗峰等(2001)利用 GIS 技术对山区河网与洪水危险性之间的关系进行了分析, 认为河网密度越大的地方其山洪危险性也越高. 周成虎等(2000)在各省区已有的暴雨灾情历史资料基础上, 构建了以综合危险度和相对危险度为主要内容的洪灾危险性评价方法. Ghoneim and Foody(2011)利用 HEC-HMS 模型计算了英国一个干旱山区 25 个子流域在不同暴雨中

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划项目(No.2010CB428405); 水利部公益性行业科研专项经费项目(Nos.201301040, 201301070); 青蓝工程和新世纪优秀人才支持计划资助.

**作者简介:** 陆桂华(1962-), 男, 教授, 主要从事水文水资源和水文气象方面研究. E-mail: lugh@hhu.edu.cn

心位置条件下的洪峰流量,并对 25 个子流域进行了山洪危险分级。Furdada *et al.* (2008) 在尼加拉瓜资料稀缺的 La-Trinidad 流域利用航拍图片和历史洪水调查资料,以洪水重现期作为危险性划分标准绘制了该流域的洪水危险图。受制于山区小流域水文资料的精度不高和匮乏,现有的山洪危险性评价分析工作对于山洪灾害影响因素,如流域前期土壤含水量等考虑欠全面。因此,本文在简要论述山洪危险性相关理论的基础上,进行了指标体系的优选,利用模糊综合评价法在 ArcGIS 平台上采用栅格计算的方法建立了山洪危险性评价模型,采用正交分析法优选出指标体系,并结合层次分析法确定评价权重因子,对准河息县上游区域进行了山洪危险性评价并绘制该区山洪危险性评价图。

## 1 山洪危险性概述

### 1.1 山洪危险性概念

大多数学者和机构都认为风险定义应该包含 3 个方面的含义(管珉和陈兴旺,2007):不利事件、发生概率和可能产生的后果。并采用下列表达式来计算自然灾害风险度(Sinha *et al.*,2008):

$$R = H \times V, \quad (1)$$

式中: $R$  为风险度; $H$  为危险度; $V$  为易损度。可见山洪灾害风险分析应该包括 3 个方面:山洪危险性分析,山洪灾害承灾体易损性分析和山洪灾害损失评估,其中山洪危险性分析是后两者的前提和基础。本文中所研究的山洪危险性主要是在不考虑过境流量的情况下,流域出口处流量达到或超过一定标准时(如漫滩流量)不利事件发生的可能性。

### 1.2 山洪危险性评价

山洪危险性评价的实质就是分析山洪危险评价指标体系中各个指标的相对重要性,一般采用多目标评价方法(如模糊综合评价法等),即把待评价的山洪危险性系统中各个评价指标按照一定的原则和方法转化成单一的指标形式,从而实现山洪危险性以某种单一的评价形式进行分类和排序(魏一鸣等,2002;Georgakakos,2006;谢圣,2007)。

## 2 山洪危险性评价模型建立

### 2.1 指标选取

山洪危险性评价指标的选取是在分析山洪致灾

因子、孕灾环境和承灾体的基础上,结合流域本身特点和已有资料进行的。何报寅等(2002)考虑了降水、地形、河网及历史上洪灾发生频次情况这 4 个影响因素;唐川和朱静(2005)在研究中所涉及的山洪危险指标主要有地形特征、河网分布、暴雨特征、标准面积洪峰模数、泥石流密度和综合灾度共 6 个。蒋卫国等(2008)选择最大 3 日降雨量、暴雨次数、植被覆盖度、河网密度、高程标准差、单位面积总人口数和单位面积老少人口数等 7 个要素作为洪水灾害风险评价指标。本文在前人研究基础上,结合评价目的,选择 20 年一遇最大 6 h 降雨量、1 h 降雨量(二者对比进行指标筛选)、单位面积汇流时间(20 年一遇降雨强度条件下)、高程标准差、土壤类型、前期土壤含水量、河网密度和植被覆盖率等因素作为危险性评价指标集。

由于影响山洪危险性评价的不确定因素很多,所选取的指标影响可能是交叉、综合存在的,故在筛选危险评价指标时,若某个因素的变动对评价结果影响较大,则可认为该因素是主要因素,其应被选作评价指标。为此,引入正交设计方法进行指标体系优选,以期得到所考察指标影响的大小顺序和合理的指标体系。

将正交设计用在山洪危险性指标筛选中,根据实际情况,选择一张合适的正交表记为  $L_c(t^q)$ 。其中: $L$  为正交表符号, $t$  为水平个数(即因素状态的个数), $c$  为正交表行数(即安排的计算次数), $q$  为正交表列数(即最多可安排因素的个数)。然后,按照所确定的计算方案严格进行山洪危险评价,并记录评价结果。最后采用极差分析法分析这些结果,并得出优选结论(倪恒等,2002)。

### 2.2 指标的量化处理

影响山洪危险性的因素具有各自的内涵,要想把它们纳入统一的评价体系,必须将其统一进行标准化(Islam and Sado,2000;Creutin and Borga,2003;Nayak *et al.*,2005)。一般把指标量化为正相关性的数值形式,即指标值越大,山洪发生的可能性越大,例如:植被覆盖率(植被覆盖面积与总的土地面积的比值),植被覆盖率越大,雨量损失增大,山洪发生的可能性越小,量化时取其倒数,在 ArcGIS 中利用统计工具处理植被覆盖数据可以得到量化值;单位面积汇流时间采用地貌单位线结合经验公式计算而得;降雨量由水文站点历史雨量资料时段降雨量获取;利用 ArcGIS 统计工具,统计流域 DEM 各个网格高程值,通过方差分析得到高程标准差指标

值;采用水文模型计算流域前期土壤含水量(体积含水量),取其数值作为前期土壤含水量指标值;在流域土壤类型数据上根据沙壤土、壤土、淤泥黏壤土、黏土和不透水层的入渗能力的不同分别赋予其1~5不同的数值,而得到土壤类型指标值。

2.3 模型建立

本模型是在模糊综合评价方法、层次分析法及正交分析基础上,再利用 ArcGIS 软件中 Arc/Info 提供的栅格叠加和空间分析功能建立起来的,具体流程如下(胡继才等,1998;王新洲等,2003;Sanyal and Lu,2005;蒋卫国等,2008):

(1)建立评价指标数据集.设有  $m$  个山洪危险性评价指标,每个指标都是栅格数据,构成的评价指标数据集为  $\{G_1, G_2, \dots, G_i, \dots, G_m\}$ 。

(2)建立评价集.设评价等级数为  $n$ ,则评价集为  $\{V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_n\}$ 。

在本文中,将山洪危险划分 5 个评价等级( $n = 5$ ):低危险区(1)、较低危险区(2)、中等危险区(3)、较高危险区(4)、高危险区(5)。统计各栅格数据层的标准差、均值来确定等级划分间隔值,取标准差与均值的中最小值作为栅格数据评价集分级的间隔值( $\Delta$ ),各栅格数据都按照相同的间隔值进行等间隔划分, $D_1$ 是根据最小值及间隔值来进行相对划分,其他间隔点都是按照间隔值确定.以息县流域为例,其评价指标数据层的间隔点设置见表 1。

(3)确定隶属度函数及隶属度矩阵.隶属函数确定方法有多种,本文评价指标与评价等级存在正相关性,例如 20 年一遇最大 6 h 降雨量,值越大,山洪发生可能性越大.经统计,20 年一遇最大 6 h 降雨量小于 74 mm 时,认为山洪危险性很小,此时降雨量对等级 1 级的隶属度为 1,对其他等级的隶属度为 0;当降雨量处于 74~84 mm 之间时,隶属于 1 级的程度随降雨量的增大而减小,采用下降线性函数表示,隶属于 2 级的程度随降雨量的增大而增大,

采用上升线性函数表示;当降雨量大于 114 mm,山洪危险性很大,即隶属于最大危险等级,其他指标规律相同,为此建立起来的隶属函数为:

$$U_{i1}(g_i) = \begin{cases} 1, & 0 \leq g_i \leq D_{i1}, \\ \frac{D_{i2} - g_i}{D_{i2} - D_{i1}}, & D_{i1} < g_i < D_{i2}, \\ 0, & g_i > D_{i2}, \end{cases} \quad (2)$$

$$U_{ij}(g_i) = \begin{cases} 0, & g_i \leq D_{i(j-1)} \text{ 或 } g_i \geq D_{i(j+1)}, \\ \frac{g_i - D_{i(j-1)}}{D_{ij} - D_{i(j-1)}}, & D_{i(j-1)} < g_i < D_{ij}, \\ 1, & g_i = D_{ij}, \\ \frac{D_{i(j+1)} - g_i}{D_{i(j+1)} - D_{ij}}, & D_{ij} < g_i < D_{i(j+1)}, \end{cases} \quad (3)$$

$$U_{in}(g_i) = \begin{cases} 0, & g_i \leq D_{i(n-1)}, \\ \frac{g_i - D_{i(n-1)}}{D_{in} - D_{i(n-1)}}, & D_{i(n-1)} < g_i < D_{in}, \\ 1, & g_i \geq D_{in}, \end{cases} \quad (4)$$

式中: $U_{ij}$ 为评价指标  $G_i$ 对  $j$  级危险度的隶属度函数; $g_i$ 为评价指标  $G_i$ 的量化值; $D_{ij}$ 为评价指标  $G_i$ 的第  $j$  级危险性标准值, $j = 2, 3, 4, \dots, n-1, n$  为评价等级数。

任何一个栅格图像(评价指标数据)按照其隶属函数将生成  $j$  个栅格图像,将所有隶属度栅格图像按照一定规则组合在一起就构成栅格图像矩阵,即隶属度矩阵  $R$ 。

$$R = \begin{pmatrix} U_{11}(g_1) & \dots & U_{i1}(g_i) & \dots & U_{m1}(g_m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{1j}(g_1) & \dots & U_{ij}(g_i) & \dots & U_{mj}(g_m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{1n}(g_1) & \dots & U_{in}(g_i) & \dots & U_{mn}(g_m) \end{pmatrix} \quad (5)$$

表 1 评价指标数据层的间隔点设置

Table 1 The interval of evaluation index

评价指标	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$
20 年一遇最大 6 h 降雨量(mm)	74	84	94	104	114
20 年一遇最大 1 h 降雨量(mm)	23	38	53	68	83
植被覆盖(取倒)	1.23	1.37	1.51	1.65	1.79
河网密度( $m \cdot m^{-2}$ )	0.001 8	0.002 9	0.004 0	0.005 1	0.006 2
高程标准差(m)	7.34	14.62	21.90	29.18	36.46
土壤类型指数	1	2	3	4	5
前期土壤含水量(%)	20	40	60	80	100
单位面积汇流时间(取倒数)( $km^2 \cdot h^{-1}$ )	178.57	196.42	214.27	232.12	249.97

注: $D_1, D_2, D_3, D_4$ 和  $D_5$ 为各评价指标间隔设置;前期土壤含水量为土壤实际水分含量占田间持水量的百分比。

(4)确定权重向量.为反映各评价指标间的相对重要程度,给各评价指标分配一个相应的权数  $a_i$ ,  $\sum a_i=1$ ,组成权重向量  $\mathbf{A}=[a_1 a_2 \dots a_i \dots a_m]$ .

权重向量的确定方法是综合评价的关键,层次分析法是确定权重系数的有效方法,但其中人的主观对比会起很大的作用,很多情况下构造判断矩阵时两两指标的重要程度判断无经验可依,例如:单位面积汇流时间和前期土壤含水量相比哪个对山洪发生可能性影响较大.因此,这里引入正交设计思想,在正交设计主次因素分析基础之上,再采用层次分析法来进行权重向量的确定,在采用正交设计方案危险性评价时,各评价指标权重相等.

(5)综合评价.将  $\mathbf{A}$  与  $\mathbf{R}$  进行乘运算,得到模糊综合评价结果向量  $\mathbf{B}$ :

$$\mathbf{B}=\mathbf{A} \cdot \mathbf{R}=\left[b_1 b_2 \dots b_i \dots b_n\right] . \quad (6)$$

对模糊综合评价结果向量  $\mathbf{B}$  进行处理,利用最大隶属度法判断山洪危险等级  $r$ .

$$b_r=\max \left(b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_n\right) . \quad (7)$$

### 3 案例分析

本研究选取息县上游流域作为研究流域,流域内地形呈西高东低趋势,高程范围在 15~839 m 之

间,平均高程 142 m,流域辖区的中山区及低山区、丘林区,主要土壤类型为黄棕壤土类,土体有明显的粘化过程,呈酸性和微酸性,生长有松、杉等针、阔叶林及漆树、油桐、油茶等经济林木(李永涛,2008).

#### 3.1 数据处理

前期土壤含水量值栅格化是根据量化的前期土壤含水量值在 ArcGIS 软件中实现的;查阅研究流域历史水文年鉴获取流域 20 年一遇年最大 6 h 和 1 h 降雨量数据并在 ArcGIS 软件中栅格化;单位面积汇流时间采用地貌单位线结合经验公式计算,具体是将 20 年一遇的降雨条件下各个子流域的单位面积汇流时间取倒数;把土壤类型数据按照沙壤土、壤土、淤泥黏壤土、黏土、不透水层 5 种类型分别赋予 1~5 数值得到土壤类型指数数据;利用 DEM 模拟生成流域水系地形,再利用 DEM 模拟生成的水系土壤质地分布和植被分布栅格图.

在 30 m × 30 m DEM 数据基础上按照流域自然水系特征将息县上游流域划分为 48 个子流域,划分好的各个子流域的不同指标值为流域内所有网格值的平均值.各个指标处理图见图 1.

#### 3.2 正交设计考察指标

由于常用指标如:植被覆盖、河网密度及土地类型已被应用于洪水风险评价中(Georgakakos,2006;管珉和陈兴旺,2007;Sinha *et al.*,2008),故本文选

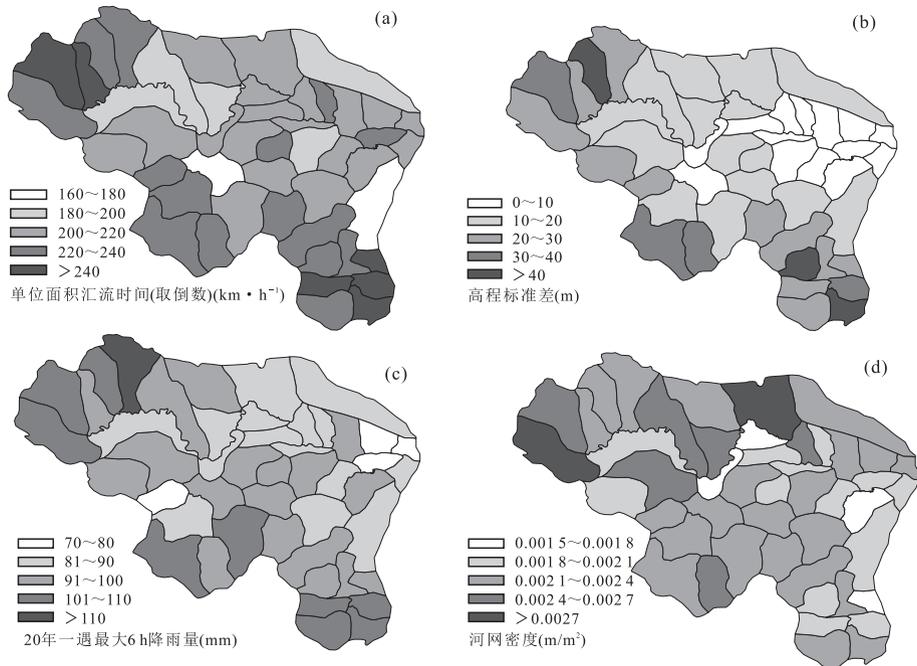


图 1 指标处理结果

Fig.1 Results of index processing

a.各子流域单位面积汇流时间(取倒数);b.高程标准差;c.20年一遇年最大6h降雨量;d.河网密度

择降雨量、单位面积汇流时间及高程标准差 3 个因素进行敏感性分析,以考察其影响大小及其优选方案.由正交设计的思想,选取  $L_4(2^3)$  正交表,因素水平表如表 2 所列.根据正交表设计计算方案,各指标选取相同的权重值,利用山洪危险性评价模型计算危险等级.

### 3.3 结果分析

**3.3.1 指标敏感性分析结果** 采用 4 种设计方案(4 方案中植被覆盖、河网密度、前期土壤含水量及土壤类型为固定指标,其数值为量化数据)对山洪危险性进行评价,结果见表 3.

使用极差分析法对评价结果进行分析(表 3),其中  $K_i$  这一行分别为因素 A、B、C 的第  $i$  个水平对应评价之和, $k_i$  为  $i$  水平的平均值,极差是同一列  $k_1, k_2$  这两数中最大值减去最小值,反映了因素水平对结果的影响程度.从分析结果来看,因素高程标准差的极差为 1.5,单位面积汇流时间和 1 h 和 6 h 降雨量的极差均为 0.5,说明高程标准差是敏感度较高的评价指标,为主要因素;6 h 降雨量相比 1 h 降雨量而言,敏感度更大;单位面积汇流时间跟高程差、降雨量有很大的相关性,相对而言是影响的次要因素.通过对比可知,该分析的最优的指标方案为考虑高程标准差、6 h 最大降雨量和单位面积汇流时间的指标体系.

**3.3.2 息县上游流域危险评价图分析** 经过对指标筛选,本文最终确定的指标体系为前期土壤含水、植被覆盖率、河网密度、土地类型、高程标准差、20 年一遇最大 6 h 降雨量和单位面积汇流时间,记为指标体系 A,同时选取洪水危险性评价中常用的指标体系(植被覆盖、河网密度、土地类型、高程、6 h 最大降雨量,记为指标体系 B)来进行对比分析.采用 2 套指标体系分别对整个息县流域进行山洪危险性评价,评价过程中,以整个流域为研究对象根据正交分析结果采用层次分析法确定的 2 套指标体系权重分别为(0.059, 0.082, 0.061, 0.048, 0.366, 0.216, 0.168)和(0.146, 0.174, 0.089, 0.136, 0.455).将评价结果绘制成危险性评价图,其中使用指标体系 A 所得危险性评价图见图 2a,使用指标体系 B 所得危险性评价图见图 2b.

从息县上游流域山洪危险性评价图(图 2a)可以看出:下游地区(如竹竿铺、息县子流域等)为危险等级较低的地区,一般其危险等级为 3 级,上游地区(如桐柏子流域,卡房子流域,黄岗子流域等)危险等级较高,一般危险等级为 4 级,其中桐柏、黄岗子流

表 2 因素水平

Table 2 The factor level

水平	A(mm)	B(km <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	C(m)
1	1 h 降雨量	无	无
2	6 h 降雨量	计算值	实际值

注:因素 A、B 和 C 分别为降雨量、单位面积汇流时间(取倒数)和高程标准差,且因素 B 和 C 的第一个水平“无”表示评价时不考虑该指标.

表 3 正交设计结果及分析

Table 3 The results and analysis of orthogonal design

方案/其他	A(mm)	B(km <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	C(m)	评价结果
1	1 h	无	无	2
2	1 h	计算值	实际值	4
3	6 h	无	实际值	4
4	6 h	计算值	无	3
$K_1$	6	6	5	
$K_2$	7	7	8	
$k_1$	3	3	2.5	
$k_2$	3.5	3.5	4.0	
极差	0.5	0.5	1.5	
最优方案	A2	B2	C2	

注:1、2、3、4 为 4 种方案的编号,因素 A、B 和 C 含义同表 2, A2 表示降雨量的第 2 个水平,即 6 h 降雨量, B2, C2 含义类似;因素主次顺序为 C、A、B.

域,南湾水库子流域、卡房子流域及其临近子流域危险等级为 5 级.图 2b 中在下游地区出现了 2 个高危等级的子流域,其余子流域山洪危险等级与图 2a 基本相同.

地形起伏较大的桐柏、黄岗、卡房地区山洪危险性等级较其他地区要高,即其遭遇山洪的可能性要大.经考察 1998—2008 这 11 年历史洪水资料(温克刚和庞天荷, 2005;水利部水文局, 2008;部分资料为息县上游各水文站点实测数据),上述地区遭遇山洪次数为 5 次,而其他地区遭遇次数为 3 次,并且息县上游流域有记载洪水资料也表明上游山区洪灾程度和破坏程度比下游相对平坦地区要严重的多.高程标准差这个指标能显著影响山洪危险等级评价结果,对比 A、B 两种评价指标体系的山洪危险图, A 评价指标体系所得结果与流域历史上实际发生的洪灾情况更吻合.可见本文选择 A 评价指标体系得到的山洪危险性评价结果是合理的,可为当地山洪防治、山洪预警提供科学参考.

另外,山洪危险性评价图中处于高危区域的还有南湾子流域及其上游的一个子流域,这 2 个子流域周边的危险性等级都较低.出现这种情况的原因是南湾水库位于其中,水库水域面积约 70 km<sup>2</sup>,其量化评价指标(子流域植被覆盖,河网密度、标准

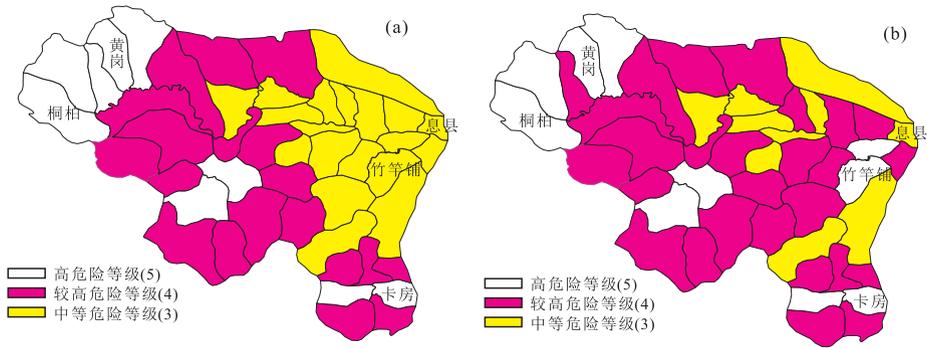


图 2 息县上游流域山洪危险性评价

Fig.2 The torrent hazard evaluation map of the upper reach of the Xixian  
a.使用指标体系 A 的山洪危险性评价结果;b.使用指标体系 B 的山洪危险性评价结果

高程差等)和周边子流域有着明显的差异,致使其评价等级也有较大的不同。

## 4 结论

本文从山洪危险性定义和影响因素分析出发,在前人研究基础之上,引入正交设计筛选了一套科学合理的山洪危险评价指标体系,并利用模糊数学原理,在 GIS 平台上建立山洪危险模糊评价模型,开展流域山洪危险性评估研究。

与以往的山洪危险性研究很少考虑流域前期土壤含水量和单位面积汇流时间因素不同,本文较为全面地考虑了小流域的水文气象、地形地质、流域特征因子,得出的息县上游流域山洪危险性空间分布与研究区域现有的实测历史洪水资料反映的山洪空间分布基本吻合,评价结果相对更为科学合理,证明了本文所采用方法的合理性。

## References

Creutin, J. D., Borga, M., 2003. Radar Hydrology Modifies the Monitoring of Flash-Flood Hazard. *Hydrological Processes*, 17(7): 1453–1456. doi: 10.1002/hyp.5122

Furdada, G., Calderón, L. E., Marqués, M. A., 2008. Flood Hazard Map of La Trinidad (NW Nicaragua). Method and Results. *Natural Hazards*, 45(2): 183–195. doi: 10.1007/s11069-007-9156-8

Georgakakos, K. P., 2006. Analytical Results for Operational Flash Flood Guidance. *Journal of Hydrology*, 317(1–2): 81–103. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.05.009

Ghoneim, E., Foody, G. M., 2011. Assessing Flash Flood Hazard in an Arid Mountainous Region. *Arabian Journal of Geosciences*, 29(9): 505–514. doi: 10.1007/s12517-

011-0411-7

Guan, M., Chen, X. W., 2007. Research of Regional Torrent Risk Zonation in Jiangxi Province. *Torrential Rain and Disasters*, 26(4): 339–343 (in Chinese with English abstract).

He, B. Y., Zhang, H. L., Zhang, S., et al., 2002. GIS-Based Risk Evaluation for Flood Disaster in Hubei Province. *Journal of Natural Disasters*, 11(4): 84–89 (in Chinese with English abstract).

Hu, J. C., Wan, F. J., Wu, Z. Q., 1998. Application of Fuzzy Mathematics. Press of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, Wuhan, 20–187 (in Chinese).

Huang, S. F., Xu, M., Chen, D. Q., 2001. GIS-Based Extraction of Drainage Network Density and Its Application to Flood Hazard Analysis. *Journal of Natural Disasters*, 10(4): 129–132 (in Chinese with English abstract).

Islam, M. M., Sado, K., 2000. Development of Flood Hazard Maps of Bangladesh Using NOAA-AVHRR Images with GIS. *Hydrological Sciences Journal*, 45(3): 337–355. doi: 10.1080/02626660009492334

Jiang, W. G., Li, J., Li, Z. W., et al., 2008. Fuzzy Assessment of the Population Risk of Flood Disaster. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 35(9): 84–87 (in Chinese with English abstract).

Jiang, W. G., Li, J., Wu, J. J., et al., 2008. Risk Assessment System for Regional Flood Disaster (II): Model and Application. *Journal of Natural Disasters*, 17(6): 105–109 (in Chinese with English abstract).

Li, L. T., Xu, Z. X., Pang, B., et al., 2012. Flood Risk Zoning in China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 43(1): 22–30 (in Chinese with English abstract).

Li, Y. T., 2008. Study on Evaluation of Precision and Hydrologic Simulation in Ungauged River Basins Based on TRMM Satellite Precipitation Product (Dissertation). Hohai University, Nanjing, 22 (in Chinese with English

abstract)

Nayak, P. C., Sudheer, K. P., Ramasastri, K. S., 2005. Fuzzy Computing Based Rainfall-Runoff Model for Real Time Flood Forecasting. *Hydrological Processes*, 19 (4): 955—968. doi:10.1002/hyp.5553

Ni, H., Liu, Y. R., Long, Z. G., 2002. Application of Orthogonal Design to Sensitivity Analysis of Landslide. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 21(7): 989—992 (in Chinese with English abstract).

Sanyal, J., Lu, X. X., 2005. Remote Sensing and GIS Based Flood Vulnerability Assessment of Human Settlements: A Case Study of Gangetic West Bengal, India. *Hydrological Processes*, 19 (18): 3699—3716. doi: 10.1002/hyp.5852

Sinha, R., Bapalu, G. V., Singh, L. K., et al., 2008. Flood Risk Analysis in the Kosi River Basin, North Bihar Using Multi-Parametric Approach of Analytical Hierarchy Process (AHP). *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 36(4): 335—349. doi:10.1007/s12524-008-0034-y

Tang, C., Zhu, J., 2005. A GIS Based Regional Torrent Risk Zonation. *Acta Geographica Sinica*, 60(1): 87—94 (in Chinese with English abstract).

Wang, X. Z., Shi, W. Z., Wang, S. L., 2003. Treatment of Fuzzy Space Information. Wuhan University Press, Wuhan (in Chinese).

Water Resources Information Center of the Ministry of Water Resources, 2008. Water Year Book of PRC: Hydrological Data of Huaihe River. Water Resources Information Center of the Ministry of Water Resources, Beijing, 60—104 (in Chinese).

Wei, Y. M., Jin, J. L., Yang, C. J., et al., 2002. Theoretics of Flood Disaster Risk Management. Science Press, Beijing, 64—125 (in Chinese).

Wen, K. G., Pan, T. H., 2005. China Meteorological Disaster Authority (Henan Volume). China Meteorological Press, Beijing, 163—232 (in Chinese).

Xie, S., 2007. Study on the Hazard Mapping and Risk Management of the Small Watershed Torrents (Dissertation). Zhejiang University, Hangzhou, 18—27 (in Chinese with English abstract).

Zhou, C. H., Wan, Q., Huang, S. F., et al., 2000. A GIS-Based

Approach to Flood Risk Zonation. *Acta Geographica Sinica*, 55(1): 15—24 (in Chinese with English abstract).

### 附中中文参考文献

管珉, 陈兴旺, 2007. 江西省山洪灾害风险区划初步研究. 暴雨灾害, 26(4): 339—343.

何报寅, 张海林, 张穗, 等, 2002. 基于 GIS 的湖北省洪水灾害危险性评价. 自然灾害学报, 11(4): 84—89.

胡继才, 万福钧, 吴珍权, 1998. 应用模糊数学. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 20—187.

黄诗峰, 徐美, 陈德清, 2001. GIS 支持下的河网密度提取及其在洪水危险性分析中的应用. 自然灾害学报, 10(4): 129—132.

蒋卫国, 李京, 李忠武, 等, 2008. 洪水灾害人口风险模糊评价. 湖南大学学报(自然科学版), 35(9): 84—87.

蒋卫国, 李京, 武建军, 等, 2008. 区域洪水灾害评估体系(II)——模型与应用. 自然灾害学报, 17(6): 105—109.

李林涛, 徐宗学, 庞博, 等, 2012. 中国洪灾风险区划研究. 水利学报, 43(1): 22—30

李永涛, 2008. TRMM 卫星测雨产品精度评价及其在无资料地区水文模拟中的应用研究(硕士学位论文). 南京: 河海大学, 22.

倪恒, 刘佑荣, 龙治国, 2002. 正交设计在滑坡敏感性分析中的应用. 岩石力学与工程学报, 21(7): 989—992.

唐川, 朱静, 2005. 基于 GIS 的山洪灾害风险区划. 地理学报, 60(1): 87—94.

王新洲, 史文中, 王树良, 2003. 模糊空间信息处理. 武汉: 武汉大学出版社.

中华人民共和国水利部水文局. 2008. 中华人民共和国水文年鉴: 淮河流域水文资料. 北京: 中华人民共和国水利部水文局, 60—104.

魏一鸣, 金菊良, 杨存建, 等, 2002. 洪水灾害风险管理理论. 北京: 科学出版社.

温克刚, 庞天荷, 编, 2005. 中国气象灾害大典: 河南卷. 北京: 气象出版社, 163—232.

谢圣, 2007. 小流域山洪风险图及风险管理研究(硕士学位论文). 杭州: 浙江大学, 18—27.

周成虎, 万庆, 黄诗峰, 等, 2000. 基于 GIS 的洪水灾害风险区划研究. 地理学报, 55(1): 15—24.