

Using Information Diffusion to Analyze the Membership Degree in Risk Assessment of Flash Flood

Longjian Zou¹, Ming Zhong^{2,3*}, Xiaohong Yang⁴, Xiaofei Liu⁵

¹Qingyuan Water Conservancy Construction Management Office, Qingyuan Guangdong

²Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou Guangdong

³Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Sun Yat-sen University, Guangzhou Guangdong

⁴National Engineering Research Center of Geographic Information System, China University of Geosciences, Wuhan Hubei

⁵School of Hydropower and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei
Email: *zhongm37@mail.sysu.edu.cn

Received: Nov. 25th, 2016; accepted: Dec. 8th, 2016; published: Dec. 19th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Flash flood often occurs at small watershed, its forming condition is uncertain and multi-factorial. Considering the uncertainty of probability distribution and the incompleteness of disaster data at small watershed, a method of membership degree analysis based on information diffusion is proposed in this study. Firstly, the risk indicators of flash flood are quantified, using normal information diffusion function, the original information matrix of risk indicators in study grid is established, and the control point is calculated. Based on one-dimensional linear information distribution function, the membership degree is calculated and the fuzzy relation matrix is established. Finally, case study of flash flood in research grid is present, the membership degree of the risk indicators is calculated, which describe the membership relationship of risk indicators and risk grades. Different from the membership function using empirical formulas, membership function using information diffusion presents a quantitative risk assessment based on limited knowledge. Results show an increased scientific and robustness on membership degree, and contribute to risk assessment of flash flood disaster.

Keywords

Flash Flood, Information Diffusion, Membership Degree, Diffusion Function, Uncertainty

作者简介: 钟鸣(1987-), 女, 江西赣州人, 讲师, 主要从事自然灾害风险评估及其不确定性研究。

*通讯作者。

基于信息扩散理论的山洪灾害 风险因子隶属度分析

邹隆建¹, 钟 鸣^{2,3*}, 杨小红⁴, 刘笑飞⁵

¹清远市水利枢纽建设管理处, 广东 清远

²中山大学水资源与环境系, 广东 广州

³中山大学华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室, 广东 广州

⁴中国地质大学国家地理信息系统工程技术研究中心, 湖北 武汉

⁵华中科技大学水电与数字化工程学院, 湖北 武汉

Email: *zhongm37@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2016年11月25日; 录用日期: 2016年12月8日; 发布日期: 2016年12月19日

摘 要

山洪灾害多发生于山丘区小流域, 其环境条件因素受多方面影响且具有不确定性。针对小流域山洪灾害风险因子概率分布未知, 样本数量较少的特点, 本研究提出了一种基于信息扩散理论的风险因子隶属度分析方法。首先对各山洪灾害风险因子进行量化, 利用正态扩散函数, 构造研究网格内风险因子的原始信息矩阵, 并确定控制点; 在此基础上, 根据一维线性信息分配函数, 计算各风险因子的隶属度, 从而构造相应的模糊关系矩阵。最后, 应用信息扩散方法对山洪灾害实验网格内的风险因子状态进行实例应用, 构建了实验网格内各山洪风险因子的隶属度, 反映了风险因子状态与山洪风险等级的隶属关系。不同于传统的隶属度经验公式, 基于信息扩散理论的山洪灾害风险因子隶属度分析, 通过有限的知识快速地进行风险定量化评估, 极大提高了隶属度计算的科学性和鲁棒性, 为山洪灾害的风险评估提供科学依据。

关键词

山洪, 信息扩散, 隶属度, 扩散函数, 不确定性

1. 引言

经过几十年的建设, 大江大河的防洪体系框架基本建成, 我国的主要流域已经具有较强的防洪能力。但与大江大河相比, 我国中小河流的防洪基础设施还非常薄弱, 许多中小河流的防洪标准只有 3~5 年一遇[1]。然而, 中小河流覆盖我国国土面积达 85%, 使得小流域山洪灾害的防御工作逐渐成为防洪减灾的重点。根据中国水旱灾害公报统计显示, 2013 年强降雨引发局地山洪灾害致 560 人死亡, 占洪涝灾害总死亡人数的 72.4%; 2014 年中小河流和山洪灾害共造成 340 人死亡, 死亡人数虽为 2000 年统计以来最低, 但山洪灾害仍是死亡的主要原因, 占洪涝灾害死亡总人数的 70%。然而, 山洪灾害形成条件复杂, 是一个与防洪、水文、气象、灾害、地质、环境等多领域相关的重要基础课题。研究小流域山洪灾害的风险评价, 不仅是自然灾害研究中的一项重要基础研究课题, 为山洪灾害防治工作提供决策支持, 而且是变化条件下流域防灾减灾工作中的重要研究方面, 更是当前水文地质、灾害地质等相关领域的研究热点课题[2]。

山洪灾害的发生地点多在山丘区的小流域, 难免会遭遇“小样本”的不完备信息问题。灾害的复杂性和交叉性特点要求必须考虑各致灾因子之间的关联关系, 因而更增加了山洪灾害风险评价的不确定性[3] [4]。合理地

量化不确定性是解决不确定问题的重要思路，因此统计理论、数理方法得到了快速的发展[5] [6]。然而，在成灾机理尚未理清的条件下，难以使用概率统计的方法实现对山洪灾害的完整描述。此外，越来越多软计算理论也被应用到洪水灾害研究领域，包括神经网络、层次分析法、模糊逻辑、灰色理论、粗糙集理论、集对分析等，为小流域的山洪风险评估研究提供了更多的选择和方法。对于概率分布未知，样本数量较少的小流域山洪灾害，信息扩散理论展现了更好的适用性[7] [8]。为了提高风险评价的可靠性和准确性，本研究引入信息扩散理论，将不完备信息条件下的样本转变为具有模糊不确定性的样本，使具有单值观测值的样本转化为具有模糊集值的样本，构建基于复杂多维的信息扩散矩阵，分析风险评价指标体系中下级叶结点对上级父结点的隶属度，构建相应的模糊关系矩阵，从而实现有限的知识条件下的风险定量化评价。基于信息扩散理论的隶属度分析方法是信息扩散理论在不确定分析领域的一种新尝试，也是山洪灾害风险不确定性问题的一种新思路，为山洪灾害风险评估提供理论依据，能够提高山洪灾害风险评估结果的客观性和科学性。

2. 理论与方法

2.1. 隶属度

在模糊集合论中，元素 x 与集合 U 之间的关系不同于经典集合论中的“包含”与“不包含”，它可以用隶属度来表示，如图 1 所示。

设给定论域 U ， U 到 $[0,1]$ 闭区间的任意一个映射 $\mu(x):U \rightarrow [0,1]$ 使得：

$$\mu(x):x \rightarrow \mu_A(x)$$

对于论域 U 上的一个模糊子集 A ， μ_A 叫做 A 的隶属函数， $\mu_A(x)$ 就叫 x 对应于 A 的隶属度。

若隶属度 $\mu_A(x)$ 越接近于 1，表示因素 x 对集合 A 的隶属程度越高；反之，若隶属度 $\mu_A(x)$ 越接近于 0，表示因素 x 对集合 A 的隶属程度越低。

2.2. 信息扩散理论

设 $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_i\}$ 是一个样本集， U 是 X 的一个离散论域， μ 是 $X \times U$ 到 $[0,1]$ 的一个映射

$$\begin{aligned} \mu: X \times U &\rightarrow [0,1] \\ (x, u) &\rightarrow \mu(x, u), \forall (x, u) \in X \times U \end{aligned}$$

如果 $\mu(x, u)$ 满足以下条件：

- (1) 自反性： $\forall x \in X$ ，若 $\exists u \in U$ ，有 $x = u$ ，则 $\mu(x, u) = 1$ ；
- (2) 连续且单调递减：对于 $x \in X$ ， $\forall u_1, u_2 \in U$ ，若 $\|u_1 - x\| \leq \|u_2 - x\|$ ，则 $\mu(x, u_1) \geq \mu(x, u_2)$

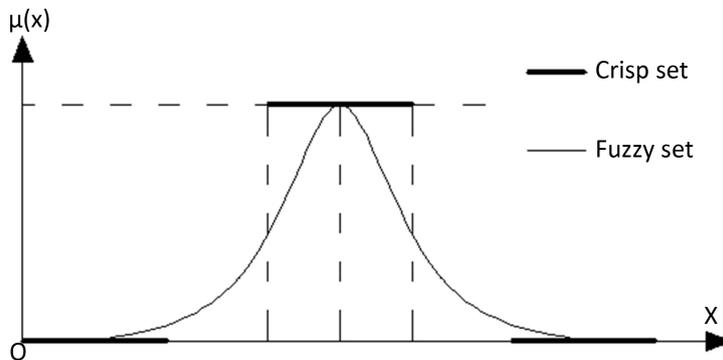


Figure 1. Crisp set and fuzzy set

图 1. 实数集和模糊集

(3) 信息守恒: $\sum_{j=1}^m \mu(x_i, u_j) = 1$

则称 $\mu(x, u)$ 为 X 在 U 上的信息分配(Information Distribution), μ 为分配函数。

假设 V 是论域 U 的一个子集, μ 是 $X \times V$ 到 $[0,1]$ 的一个映射假设:

$$\begin{aligned} \mu: X \times V &\rightarrow [0,1] \\ (x, v) &\rightarrow \mu(x, v), \forall (x, v) \in X \times V \end{aligned}$$

则称 $\mu(x, v)$ 为 X 在 V 上的一个信息扩散(Information Diffusion), μ 为扩散函数, V 为监控空间[9]。

如果把信息分配的模糊分类函数平移至注入信息的扩散点, 这时信息分配就转化成了信息扩散。可见, 信息分配是信息扩散在离散情形下的一种特例。通过信息扩散可将一个给定样本 X 转换成模糊样本 X' , 将一个分明观测值 x_i 映射到隶属度为 $\mu_{x_i}(u)$ 的一个模糊集 x'_i 。常见的扩散函数有正态扩散函数、三角扩散函数、一次扩散函数、二次扩散函数等, 不同的扩散函数可对应不同的分配函数。

3. 实例应用

3.1. 山洪灾害风险指标选取及风险因子量化

山洪的形成条件复杂, 一方面, 局地强降雨事件是主要动力因素, 对山洪灾害起直接作用; 另一方面, 地形地貌、植被情况、人类活动也将影响山洪灾害的发生, 对山洪灾害起间接作用[10]。它们相互联系, 共同作用, 因此可从主要动力因素和间接影响因素两个方面总结归纳可能诱发暴雨山洪灾害的环境影响因素, 包括降雨因素(如雨量、雨强、降雨历时、累积雨量), 土壤因素(如土壤类型、前期湿润度等), 地形地貌(如微地貌类型、地形坡位等), 河段信息(如河道长度、糙率、断面形状、宽度等), 人类活动(如土地利用类型、人口密度、经济数据等) [11] [12]。为了更好地区分定性指标与定量指标的隶属度计算方法, 本研究选取微地貌类型、土地利用、累积雨量和人口密度作为风险指标因子, 其中两个为定性指标, 两个为定量指标。分别对风险因子的状态划分阈值, 并将山洪灾害风险划分为微危险区、低危险区、中危险区、高危险区四个等级, 如表 1 所示。

3.2. 信息扩散法在隶属度计算中的应用

将研究区域中的所有风险因子状态视为论域 U , 对其划分 r 个网格, 假设选定 t 个环境因素作为山洪灾害风险因子, 每个研究网格内各风险因子状态用随机样本 X 表示。通过正态扩散函数 $\mu(x_i, u_j)$, 如式(1)所示, 样本中的每一个观测点 x_i 都将转换成模糊集 $\mu(x_i, u)$

$$\mu(x_i, u_j) = \prod_{k=1}^r \frac{1}{h_k \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(u_{kj} - x_{ij})^2}{2h_k^2} \right] \tag{1}$$

式中: h_k 是第 k 个扩散系数。

Table 1. Risk grades of flash flood and risk indicators quantification

表 1. 山洪灾害风险等级分区及指标量化表

| 指标 | 微危险区 I | 低危险区 II | 中危险区 III | 高危险区 IV |
|---------|--------|---------|----------|---------|
| 微地貌类型 A | 河源 | 开阔山坡 | 浅山谷 | 峡谷 |
| 土地利用 B | 林地 | 草地 | 旱地 | 水田 |
| 累积雨量 C | <150 | 150~155 | 155~160 | >160 |
| 人口密度 D | <35 | 35~150 | 150~250 | >250 |

对于信息不完备区域, 设 U 为 X 的输入论域, V 为 X 的输出论域, 通过信息扩散函数可产生二维空间 $U \times V$ 上的山洪灾害原始信息矩阵 $Q_{r \times t}$, 如下所示。

$$Q_{r \times t} = \begin{matrix} & v_1 & v_2 & \cdots & v_t \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_r \end{matrix} & \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1t} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{2t} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ q_{r1} & q_{r2} & \cdots & q_{rt} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

设

$$q'_j = v_a + \frac{\sum_{i=1}^r q_{ij}}{r} (v_b - v_a) \tag{2}$$

其中, v_a, v_b 为输出论域的区间边界。

在此基础上, 构造相应的信息矩阵 $Q'_{1 \times t}$ 。通过 $Q'_{1 \times t}$, 则任一样本 x_i , 都可以由一个模糊集表示出来。设

$$R = \{r_j\}_{1 \times t}$$

$$r_j = u_k(u_j), k = 1, 2, \dots, t$$

根据一维线性信息分配函数, 如式(3)所示, 从而可以得到一个因果型模糊关系矩阵 $R_{1 \times t}$ 。

$$r_j = \begin{cases} 1 - \frac{|x_i - u_j|}{\Delta}, & \text{如果 } |x_i - u_j| \leq \Delta \\ 0, & \text{如果 } |x_i - u_j| > \Delta \end{cases} \quad x_i \in X, u_j \in U \tag{3}$$

其中, x_i 为样本点, u_j 为控制点, Δ 为信息矩阵 $Q'_{1 \times t}$ 的区间平均长度。

本文以山区小流域的山洪灾害风险评价为研究目标, 以网格为研究对象, 如图 2 所示, 所取网格内的微地貌类型为 85%河源、15%开阔山坡, 土地利用为 68%林地、32%草地, 累计雨量为 157 mm, 人口密度为 41%。

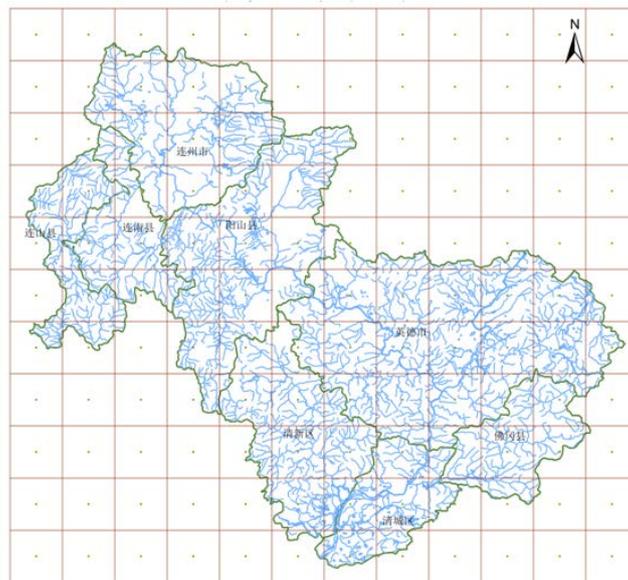


Figure 2. The sketch of research area
图 2. 研究区域概况图

Step 1: 由研究区域微地貌类型、土地利用、累积雨量、人口密度的状态构成样本点集合, $X_A = \{x_{A1}, x_{A2}, x_{A3}, \dots, x_{Ar}\}$, $X_B = \{x_{B1}, x_{B2}, x_{B3}, \dots, x_{Br}\}$, $X_C = \{x_{C1}, x_{C2}, x_{C3}, \dots, x_{Cr}\}$, $X_D = \{x_{D1}, x_{D2}, x_{D3}, \dots, x_{Dr}\}$, 待评价网格的风险因子状态样本为 $X = \{85\% \text{河源} 15\% \text{开阔山坡}, 68\% \text{林地} 32\% \text{草地}, 157, 41\}$;

Step 2: 对于定性指标, 根据指标状态的比例将信息扩散给控制区间; 对于定量指标 C 和 D, 本研究采用正态扩散函数计算原始信息矩阵。通过正态信息分配函数, 将 r 个单值观测点所携带的信息扩散给集合区间内的所有点, 构造各风险因子的原始信息矩阵 $Q_{r \times t}$, 分别用 Q_C, Q_D 表示, 并计算相应的 Q_C', Q_D' 。

$$Q_C = \begin{matrix} & C1 & C2 & C3 & C4 \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_r \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.9192 & 0.0808 & 0 & 0 \\ 0.7881 & 0.2119 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0228 & 0.9772 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \end{matrix} \quad Q_D = \begin{matrix} & D1 & D2 & D3 & D4 \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_r \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0.2810 & 0.6572 & 0.0618 \\ 0.500 & 0.4893 & 0.0107 & 0 \\ 0 & 0.1635 & 0.6826 & 0.1539 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$Q_C' = C[144 \quad 151 \quad 156 \quad 163] \quad Q_D' = D[5 \quad 90 \quad 180 \quad 255]$$

Step 3: 获取控制区间和相应的控制点, $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$, 对于微地貌类型, $U_A = \{\text{河源}, \text{开阔山坡}, \text{浅山谷}, \text{峡谷}\}$, 对于土地利用, $U_B = \{\text{林地}, \text{草地}, \text{旱地}, \text{水田}\}$, 对于累积雨量, $U_C = \{144, 151, 156, 163\}$, 对于人口密度, $U_D = \{5, 90, 180, 255\}$;

Step 4: 分析山洪灾害风险因子对风险等级之间的隶属度, 通过一维线性信息分配函数, 构建山洪灾害风险评价的模糊关系矩阵 R , 如下所示。

$$R = \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \end{matrix} \begin{bmatrix} 0.85 & 0.15 & 0 & 0 \\ 0.68 & 0.32 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0764 & 0.3810 & 0.0764 \\ 0.0146 & 0.0009 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Step 5: 归一化, 得

$$R = \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \end{matrix} \begin{bmatrix} 0.85 & 0.15 & 0 & 0 \\ 0.68 & 0.32 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1431 & 0.7138 & 0.1431 \\ 0.9419 & 0.0581 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

图 3 是三种常见的隶属度函数, 分别是降半梯形函数, 三角形函数, 升半梯形函数。传统的隶属度函数多依赖于经验公式, 常用的隶属度计算方法有模糊统计法、专家评分法、二元对比排序法等。

与其他隶属度计算方法比较, 本研究提出的基于信息扩散理论的山洪灾害风险因子隶属度计算方法, 不仅完善了模糊数学中隶属度函数的构造方法, 并且突破了对资料要求高, 客观性不强的壁垒, 更加适用于中小河

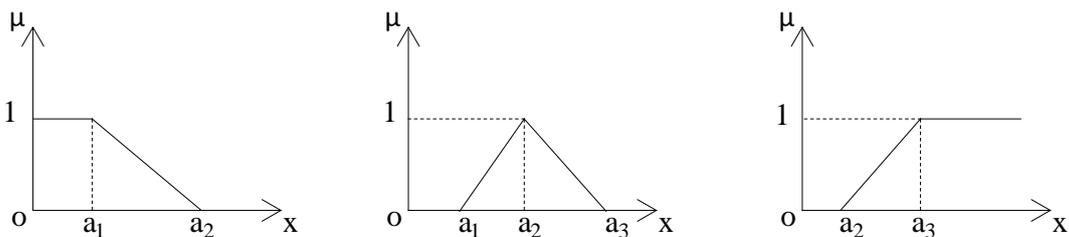


Figure 3. Three types of membership functions
图 3. 三种常见的隶属度函数

流山洪灾害研究区域的实际情况。

4. 结论

基于对山洪灾害成因机制和风险因子关联关系认识的有限性,加之小流域的山洪灾害数据资料时间序列短、精度低的特点,本文将信息扩散理论引入山洪灾害风险评价中,重点探讨了山洪灾害风险因子的隶属度计算问题。采用正态扩散函数和一维线性信息分配函数,对现有的资料进行扩充和拓展,充分考虑了小流域信息不完备、小样本等问题,将指标因子多维化,极大提高了隶属度计算过程中的鲁棒性,为山洪灾害风险的定量评价提供了一种简单有效的新方法。本文只是初步尝试将信息扩散理论应用于隶属度分析中,并对山洪灾害风险评价进行了应用研究,但该方法在处理不完备信息中的独特优势,将使当前的灾害风险评价模型更加客观精确。

参考文献 (References)

- [1] 李兴荣, 刘宇, 黄程, 么振东. 广东省山区中小河流治理理念及典型治理措施探讨[J]. 广东水利水电, 2015(8): 57-63.
LI Xiongrong, LIU Yu, HUANG Cheng and YAO Zhendong. Discussion on management concepts and typical control measures for middle and small mountain-rivers in Guangdong province [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2015(8):57-63.
- [2] 崔鹏. 中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问题[J]. 地理科学进展, 2014, 33(2): 145-152.
CUI Peng. Progress and prospects in research on mountain hazards in China. Progress in Geography, 2014, 33(2):145-152.
- [3] BORGA, M., ANAGNOSTOU, E. N., BLÖSCHL, G., et al. Flash flood forecasting, warning and risk management: the HYDRATE project. Environmental Science & Policy, 2011, 14(7): 834-844. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.05.017>
- [4] 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. Journal of Hydrology Regional Studies, 2015(3): 312-336. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.02.003>
- [5] 吴燕华, 曹叔尤, 杨奉广. 集对分析方法在区域泥石流危险性评价中的应用研究[J]. 四川大学大学学报(工程科学版), 2012, 44(Z1): 54-59.
WU Yanhua, CAO Shuyou and YANG Fengguang. A new approach to regional debris flow risk assessment based on set pair analysis. Journal of Sichuan University, 2012, 44(Z1): 54-59.
- [6] 周峰, 许有鹏, 石怡. 基于 AHP-OWA 方法的洪涝灾害风险区划研究——以秦淮河中下游地区为例[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(6): 83-90.
ZHOU Feng, XU Youpeng and SHI Yi. Risk zoning study of flood/waterlogging disaster based on AHP-OWA method: a case study on middle and lower reaches of Qinhuai River. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(6): 83-90.
- [7] 毛熙彦, 蒙吉军, 康玉芳. 信息扩散模型在自然灾害综合风险评估中的应用与扩展[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, 48(3): 513-518.
MAO Xiyan, MENG Jijun and KANG Yufang. Natural disasters risk assessment based on information diffusion model: Application and improvement. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48(3): 513-518.
- [8] 张丽娟, 李文亮, 张冬有. 基于信息扩散理论的气象灾害风险评估方法[J]. 地理科学, 2009, 29(2): 250-254.
ZHANG Lijuan, LI Wenliang and ZHANG Dongyou. Meteorological disaster risk assessment method based on information diffusion theory. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(2): 250-254.
- [9] 黄崇福. 自然灾害风险评价: 理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
HUANG Chongfu. Risk assessment of natural disaster: Theory and Disaster. Beijing: China Science Publishing, 2005.
- [10] GHONEIM, E., FOODY, G. M. Assessing flash flood hazard in an arid mountainous region. Arabian Journal of Geosciences, 2013, 6(4): 1191-1202. <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0411-7>
- [11] 黄国如, 陈真莲. 基于前期有效雨量的山洪灾害临界雨量探讨[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(5): 192-197.
HUANG Guoru, CHEN Zhenlian. Research on critical rainfall of mountain torrent disasters based on effective antecedent rainfall. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(5): 192-197.
- [12] 林孝松, 林庆, 王梅力, 赵燕, 李溢龙. 山区镇域山洪灾害危险性分区研究——以跳石镇为例[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(3): 90-96.
LIN Xiaosong, LIN Qing, WANG Meili, ZHAO Yan and LI Yilong. Hazard zoning of flash flood in mountainous administrative region of town: a case study on Tiaoshi Town. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(3): 90-96.