

基于可变模糊集理论的洪水灾害风险分析

邹强¹, 周建中^{1,*}, 周超², 宋利祥¹, 郭俊¹, 杨小玲¹

(1. 华中科技大学水电与数字化工程学院, 武汉 430074; 2. 华中科技大学控制科学与工程系, 武汉 430074)

摘要: 依据灾害系统理论, 综合考虑洪水灾害系统的自然和社会属性, 构建了洪水灾害风险综合评价指标体系, 制定了相应指标的评价标准; 在此基础上, 以乡镇行政单元为基本评价单元, 基于可变模糊集理论, 采用可变模糊评价模型确定评价单元指标对各级指标标准区间的相对差异函数和相对隶属度, 并通过变换组合参数进行综合评价, 计算得到各评价单元的危险等级和易损等级, 并结合风险等级分区矩阵, 将研究区域划分为极高风险、高风险、中等风险、较低风险和低风险 5 个等级。最后, 以荆江分洪区为典型研究区域, 实例研究表明, 该方法计算简便, 评价结果可信用度高, 与实际调研情况一致, 为洪水灾害风险评价提供了新思路, 可推广到其他自然灾害的风险分析中。

关键词: 洪水灾害, 风险评价, 指标化, 可变模糊集, 风险等级, 荆江分洪区

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.05.021

中图分类号: X43, TV873

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-05-0126-07

邹强, 周建中, 周超, 等. 基于可变模糊集理论的洪水灾害风险分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 126-132.

Zou Qiang, Zhou Jianzhong, Zhou Chao, et al. Flood disaster risk analysis based on variable fuzzy set theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(5): 126-132. (in Chinese with English abstract)

0 引言

中国是一个洪涝灾害频繁发生的国家, 并且以其发生频率高、分布范围广、灾害程度重、经济损失大而成为最为严重的自然灾害, 每年洪水灾害所造成的损失呈上升趋势^[1-2]。截止 2011 年 6 月 21 日, 6 月 3 日以来的中国南方暴雨洪涝灾害共造成 175 人死亡, 86 人失踪, 3657 万人次受灾, 紧急转移安置 164.2 万人次, 直接经济损失 350.2 亿元, 严重威胁国民经济和人民生命财产安全^[3]。因此, 开展洪水灾害风险分析对于有效减免洪灾损失具有重要意义。

洪水灾害风险分析是洪水灾害风险管理的基础性工作, 是科学有效地防洪减灾的重要决策依据, 一直是国内外灾害学研究的热点和难点问题^[4]。有研究学者将模糊数学^[5-6]、突变理论^[7]、信息扩散理论^[8]等应用到洪水灾害风险分析, 取得了一些研究成果。然而, 洪水灾害风险受致灾因子、孕灾环境及承灾体等众多不确定因素影响, 而且表达这些因素的地理信息、遥感信息以及统计信息本身就存在多重性、复杂性、不确定性^[5], 各评价方法的评价结果易产生不相容性而常常令决策者遭遇困惑, 需要探索简单实用结果稳定性高且又能充分反应洪水灾害

复杂系统特性的风险分析方法, 以便能处理涉及到的模糊及不确定信息。

针对洪水灾害风险评价指标体系及影响因素的非统一性、随机性和模糊性, 结合陈守煜教授创立的可变模糊集理论^[9-10], 提出了基于可变模糊集理论的洪水灾害风险分析方法, 能够科学、合理地确定评价单元指标对各级指标标准区间的相对隶属度和相对隶属函数, 通过变化模型的参数组合综合计算评价单元所属的危险等级和易损等级, 从而有效提高风险等级评价结果的可信用度与可靠性, 为研究洪水灾害风险分析提供新的方法。

1 材料与方法

可变模糊集理论的核心是相对隶属函数、相对差异函数与模糊可变集合的概念与定义, 它们是描述事物量变、质变时的数学语言和量化工具, 为工程领域变化模型及模型参数的必要性与可能性提供新的思路, 以增加评价识别与决策的可信用度与可靠性, 已经成功应用于防洪体系安全评价^[11]、土地适宜性评价^[12]、生态环境质量评价^[13]、旱涝灾情等级评价^[1]、农业旱灾脆弱性评估^[14]等领域。因此, 研究工作尝试将可变模糊集理论应用到洪水灾害风险分析中, 以荆江分洪区为研究对象, 对荆江分洪区进行危险、易损和风险评价, 实现风险评价和区划, 为洪水风险管理和防洪减灾规划等提供科学依据。

荆江分洪区(如图 1)位于荆江南岸, 是荆江地区防洪系统的主要组成部分, 其主要作用是当长江出现特大洪水时, 为缓解长江上游洪水来量与荆江河槽安全泄量不相适应的矛盾, 开启北闸分蓄洪水, 确保荆江大堤, 保证江汉平原和武汉市的安全。分洪区是洪水风险最大的地区, 对荆江分洪区进行洪水灾害风险分析, 具有显著的现实意义。

收稿日期: 2011-07-01 修订日期: 2011-12-27

基金项目: 国家“973”重点基础研究发展计划项目(2007CB714107); 水利部公益性行业科研专项(201001080); 高等学校博士学科点专项科研基金(20100142110012)

作者简介: 邹强(1987-), 男, 湖北潜江人, 博士生, 主要从事洪水灾害评估与风险分析研究。武汉 华中科技大学水电与数字化工程学院, 430074。Email: zouqianghust@163.com

*通信作者: 周建中(1959-), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士生导师, 从事复杂环境下水科学的先进理论与方法研究。武汉 华中科技大学水电与数字化工程学院, 430074。Email: jz.zhou@hust.edu.cn

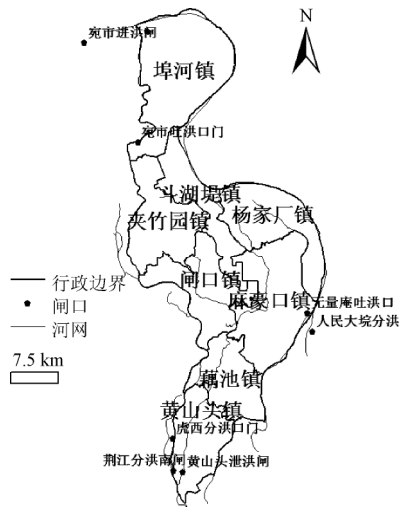


图 1 荆江分洪区基础信息数据

Fig.1 Basic information of Jingjiang flood diversion district

洪水灾害风险评价涉及致灾因子、孕灾环境及承灾体等众多因素的影响，这些因素在不同区域间有较强的空间差异性，同时许多因子尚无统一的定量标准，使得评价指标体系很复杂，难以操作^[5-7]。本文从洪水灾害风险形成机制的角度出发，借鉴目前比较成熟的灾害风险评估方法，遵循系统性、科学性、结构层次、定量化、可操作性、兼容性和普适性的原则^[15]，以洪水灾害危险性和易损性分析为出发点^[6]，建立了洪水灾害风险评价指标体系（如图 2）。以乡镇为基本评价单元，洪水灾害危险性评价指标包括平均最大水深、平均最大流速、到达时间、洪水淹没范围、多年平均降雨量、平均地面高程、地物覆盖率共 7 个指标；洪水灾害危险性评价指标包括人口密度、工业产值密度、农业产值密度、养殖面积百分比、道路网密度和单位面积牲畜数等 6 个指标。在洪水灾害危险性和易损性评价中，研究工作均以可变模糊集理论为指导，采用可变模糊评价模型进行分析和计算，从而得到各评价单元的危险等级和易损等级。在此基础上，根据风险等级分区矩阵^[6]（如图 3）得到最终的风险等级，实现荆江分洪区风险分析和区划。

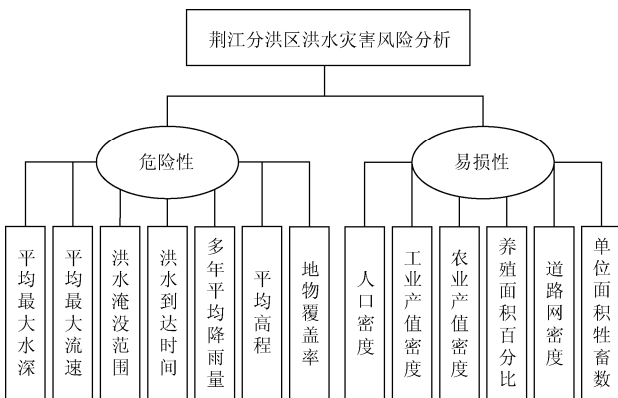


图 2 洪水灾害风险评价指标体系

Fig.2 Flood risk assessment index system

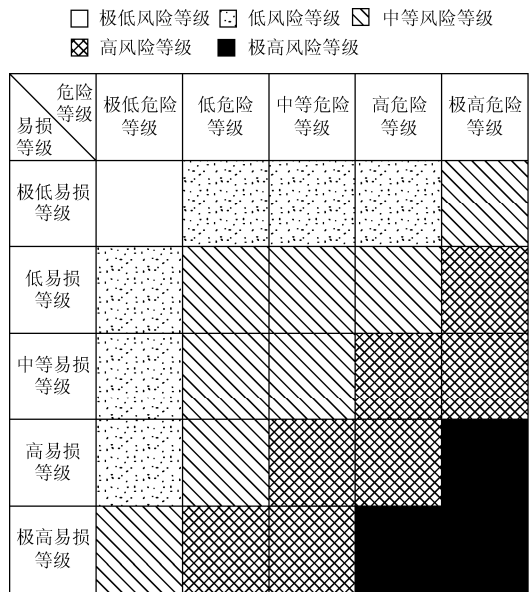


图 3 洪水灾害风险等级分区矩阵

Fig.3 Classification matrix of flood risk grade

本文以洪水灾害危险性评价为例，直接根据陈守煜教授对可变模糊集、相对差异函数等相关概念的定义^[9-10]，详细给出可变模糊评价模型在洪水灾害危险性评价中的具体应用步骤：

步骤 1：在洪水灾害危险性评价中，已知待评价单元的 m 个指标 $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ ，根据 c 个危险等级的标准值构造区间矩阵 $I_{ab} = ([a, b]_{ih})$ ，式中， $i=1, 2, \dots, m; h=1, 2, \dots, c$ 。 m 和 c 分别是洪水灾害危险性评价指标数目和危险性等级评价级别数目。

步骤 2：根据已知的 c 个危险等级的标准区间矩阵 I_{ab} ，构造变动区间的范围域矩阵 $I_{cd} = ([c, d]_{ih})$ 。

步骤 3：根据对指标 i 的物理分析与实际情况，确定指标 i 级别 h 的点值矩阵 $M = (m_{ih})$ 。

步骤 4：采用梯形模糊数与层次分析法相结合的方法^[16-17]确定危险性权重向量 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$ ， $\sum_{i=1}^m \omega_i = 1$ 。

步骤 5：根据相对差异模型计算相对隶属度矩阵。可变集合相对差异函数定义为：设 $X_0 = [a, b]$ 为实轴上模糊可变集合 V 的吸引域，即 $D_A(u) \in (0, 1]$ 区间， $X = [c, d]$ 为包含 $X_0 (X_0 \subset X)$ 的某一上、下界范围域区间，如图 4 所示。

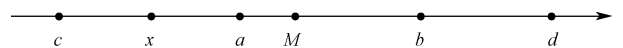


图 4 点 x, M 与区间 X_0, X 的位置关系

Fig.4 Location relationship between points x, M and X_0, X

根据模糊可变集合 V 定义可知， $[c, a]$ 与 $[b, d]$ 均为 V 的排斥域，即 $D_A(u) \in [-1, 0]$ 区间。设 M 为吸引域区间 $[a, b]$ 中 $D_A(u) = 1$ 的点值，按物理分析确定。 x 为 X 区间内的任意点的量值，则 x 落入 M 左侧时，其相对差异函数模型为

$$\begin{cases} D_A(u) = \left(\frac{x-a}{M-a}\right)^\beta & x \in [a, M] \\ D_A(u) = -\left(\frac{x-a}{c-a}\right)^\beta & x \in [c, a] \end{cases} \quad (1)$$

当 x 落入 M 右侧时, 其相对差异函数模型为

$$\begin{cases} D_A(u) = \left(\frac{x-b}{M-b}\right)^\beta & x \in [M, b] \\ D_A(u) = -\left(\frac{x-b}{d-b}\right)^\beta & x \in [b, d] \end{cases} \quad (2)$$

x 落入 $[c, d]$ 外时

$$D_A(u) = -1 \quad (3)$$

式 (1) ~ (3) 中, β 为非负指数, 通常取 $\beta=1$, 即线性函数。且式 (1) ~ (3) 满足如下条件

- ① 当 $x=a$ 或 $x=b$ 时, $D_A(u)=0$;
- ② 当 $x=M$ 时, $D_A(u)=1$;
- ③ 当 $x=c$ 或 $x=d$ 时, $D_A(u)=-1$ 。

当 $D_A(u)$ 确定以后, 根据下式 (4) 求解相对隶属度

$$\mu_A(u) = [1 + D_A(u)]/2 \quad (4)$$

这样得到待评价单元的各危险性评价指标的相对隶属度矩阵 $\mu = [\mu_A(u)_{ih}]$ 。

步骤 6: 计算待评价单元对于级别 h 的综合相对隶属度向量 $U' = (u'_h)$, 其中

$$u'_h = \left\{ 1 + \frac{\left[\sum_{i=1}^m [\omega_i \cdot (1 - \mu_A(u)_{ih})]^p \right]^{\frac{a}{p}}}{\left[\sum_{i=1}^m [\omega_i \cdot \mu_A(u)_{ih}]^p \right]^{\frac{a}{p}}} \right\}^{-1} \quad (5)$$

式中, u'_h 为非归一化的综合相对隶属度; a 为模型优化准则参数, 当 $a=1$ 时为最小一乘方准则, 当 $a=2$ 为最小二乘方准则; p 为距离参数, $p=1$ 为海明距离, $p=2$ 为欧氏距离。显然, 参数 a 和 p 可有 4 种搭配。

步骤 7: 对综合相对隶属度向量 U 进行归一化处理, 得到最终的归一化综合相对隶属度向量 $U=(u_h)$, 其中

$$u_h = u'_h / \sum_{h=1}^c u'_h, h=1, 2, \dots, c. \quad (6)$$

针对模糊概念在分级条件下最大隶属度原则的不适用性问题, 应用级别特征公式^[9-10]计算待评价单元的危险等级特征值

$$H = \sum_{h=1}^c u_h \cdot h \quad (7)$$

式中, u_h 为归一化相对隶属度, H 为待评价单元的危险等级特征值。

步骤 8: 根据可变模糊集合关于变换模型、变换模型中参数有关原理, 改变参数 a 和 p , 重复以上步骤 5 到 7, 即可得到待评价单元危险等级特征值的变动范围, 分析等级特征值的稳定性, 最终确定待评价单元的危险等级。

限于篇幅, 与之类似的可变模糊评价模型计算各评价单元洪水灾害易损等级的步骤不再赘述。最后, 根据

风险等级分区矩阵 (如图 3) 得到各评价单元的风险等级, 实现荆江分洪区风险分析和区划。本文基于可变模糊集理论的洪水灾害风险分析的技术路线详见图 5。



图 5 洪水灾害风险评价技术路线

Fig.5 Technical route of flood disaster risk assessment

2 实例应用

本文以荆江分洪区为研究对象, 应用可变模糊集理论, 对荆江分洪区洪水灾害风险分析, 以详细说明可变模糊集理论在洪水灾害风险分析中的应用步骤, 并验证可变模糊评价模型的合理可行性。

2.1 基于可变模糊理论的荆江分洪区洪水灾害危险性评价

根据水动力学数值模拟^[18]、水文信息数据以及 GIS 统计结果, 得到荆江分洪区内 8 个评价单元的危险性指标评价数据 (如表 1)。同时, 荆江分洪区是一个自然-经济-社会的复合系统, 指标尚无明确的统一标准, 本文在参考国家、行业及地方规定或颁布的有关标准或文件基础上, 引用相关文献中确定标准的方法, 结合研究区自然地理、水文气象条件、社会经济及其对洪灾影响的实际情况和特点, 确定各项评价指标的分级标准, 见表 2。

表 1 荆江分洪区危险性评价数据

Table 1 Data for hazard assessment of Jingjiang flood diversion district

乡镇名称	平均最大流速 / (m·s ⁻¹)	平均最大水深 / m	洪水淹没范围 / km ²	洪水到达时间 / h	年平均降雨量 / mm	平均高程 / m	植被覆盖率 / %
埠河镇	0.43	1.85	177.73	0.00	1064	36.19	2.36
斗湖堤镇	0.31	2.30	84.61	10.42	1125	33.27	4.01
杨家厂镇	0.04	0.70	61.35	36.67	1125	33.77	3.71
麻豪口镇	0.20	3.14	169.15	37.92	1125	32.28	5.37
藕池镇	0.28	3.26	93.01	48.75	1211	32.27	13.93
黄山头镇	0.33	3.89	89.76	59.58	1400	33.68	7.95
闸口镇	0.35	3.45	125.75	28.33	1125	32.11	6.99
夹竹园镇	0.37	2.15	128.54	15.83	1125	33.51	4.95

表 2 荆江分洪区危险性评价标准

Table 2 Criteria for hazard assessment of Jingjiang flood diversion district

危险性指标	1 (极低危险等级)	2 (低危险等级)	3 (中等危险等级)	4 (高危险等级)	5 (极高危险等级)
平均最大流速/(m·s ⁻¹)	0~0.05	0.05~0.15	0.15~0.25	0.25~0.35	0.35~0.45
平均最大水深/m	0~0.5	0.5~1.5	1.5~3.0	3.0~5.0	5.0~7.0
洪水淹没范围/km ²	0~50	50~100	100~150	150~200	200~250
洪水到达时间/h	120~180	72~120	24~72	6~24	0~6
年降雨量/mm	0~800	800~1 000	1 000~1 200	1 200~1 400	1 400~1 600
平均高程/m	40~42	38~40	36~38	34~36	32~34
植被覆盖率/%	13.33~16.67	10~13.33	6.67~10	3.33~6.67	0~3.33

根据表 1 和表 2, 可确定危险性评价中评价单元数目为 8, 评价指标数目和评价级别数目分别为 7 和 5; 同时, 确定可变模糊评价模型的吸引域矩阵 I_{ab} 与范围域矩阵 I_{cd} 。同时, 依据对指标的物理分析与实际情况, 构造点值矩阵 M

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0.05 & 0.2 & 0.35 & 0.45 \\ 0 & 0.5 & 2.25 & 5 & 7 \\ 0 & 50 & 125 & 200 & 250 \\ 180 & 120 & 48 & 6 & 0 \\ 0 & 800 & 1100 & 1400 & 1600 \\ 42 & 40 & 37 & 34 & 32 \\ 16.67 & 13.33 & 8.335 & 3.33 & 0 \end{bmatrix}$$

采用梯形模糊数与层次分析法相结合的方法构造判断矩阵, 克服传统层次分析法标度法比较简单、不能完全反映实际判断过程的缺陷, 并选用一致性充要条件检验判断矩阵的一致性, 进而给出评价指标的权重, 更全面和准确反映专家意见^[16-17]。在确定了洪水灾害危险性评价指标数据后, 构建梯形模糊数判断矩阵 R , 采用文献[16]中表 2 梯形模糊数所表示的新标度, 新标度分别记为 $1', 2', \dots, 9'$, 相应的互反标度为 $(1')^{-1}, (2')^{-1}, \dots, (9')^{-1}$ 。由文献[17]中定理 1 成功通过一致性检验后, 最后由文献[16]中式 (2) ~ (5) 计算得到最终的评价指标权重。限于篇幅, 本文直接给出危险性评价指标权重向量, 与之相应的计算过程不再赘述。

$$R = \begin{bmatrix} 1' & 1' & 3' & 2' & 4' & 6' & 8' \\ (1')^{-1} & 1' & 3' & 2' & 4' & 6' & 8' \\ (3')^{-1} & (3')^{-1} & 1' & (2')^{-1} & 2' & 4' & 5' \\ (2')^{-1} & (2')^{-1} & 2' & 1' & 3' & 5' & 6' \\ (4')^{-1} & (4')^{-1} & (2')^{-1} & (3')^{-1} & 1' & 3' & 4' \\ (6')^{-1} & (6')^{-1} & (4')^{-1} & (5')^{-1} & (3')^{-1} & 1' & 2' \\ (8')^{-1} & (8')^{-1} & (5')^{-1} & (6')^{-1} & (4')^{-1} & (2')^{-1} & 1' \end{bmatrix}$$

危险性指标权重向量 ω_1

$$\omega_1 = (0.229, 0.229, 0.138, 0.172, 0.110, 0.071, 0.051)$$

对于每个评价单元, 根据式 (1) ~ (3) 计算相对差异矩阵, 再由式 (4) 计算相对隶属度矩阵, 并采取不同的组合参数 a 和 p , 由式 (5) ~ (6) 求得综合相对隶属度矩阵并作归一化处理, 再由式 (7) 得到不同组合参数下的危险等级特征值。

逐次进行如此计算, 重复可变模糊评价模型的步骤 5 到 7, 得到各评价单元在不同 a 和 p 组合参数下的危险等级特征值, 并计算不同组合参数下特征值的平均值以提高评价结果的可靠性, 实现荆江分洪区洪水灾害危险性评价, 各评价单元的最终危险等级计算结果见表 3。

表 3 基于可变模糊集理论的危险性评价结果

Table 3 Results of hazard grades based on variable fuzzy set theory

受灾区域	$a=1, p=1$	$a=1, p=2$	$a=2, p=1$	$a=2, p=2$	均值	危险等级
埠河镇	3.68	3.67	3.74	3.84	3.73	高危险等级
斗湖堤镇	3.53	3.44	3.60	3.53	3.52	高危险等级
杨家厂镇	2.42	2.42	2.12	2.07	2.26	低危险等级
麻豪口镇	3.42	3.43	3.32	3.33	3.37	中等危险等级
藕池镇	3.35	3.33	3.38	3.43	3.37	中等危险等级
黄山头镇	3.66	3.58	3.83	3.77	3.71	高危险等级
闸口镇	3.71	3.76	3.67	3.79	3.73	高危险等级
夹竹园镇	3.61	3.62	3.52	3.60	3.58	高危险等级

注: 表中 a 为模型优化准则参数, p 为距离参数。

2.2 基于可变模糊集理论的荆江分洪区洪水灾害易损性评价

在洪水灾害易损性评价中, 主要结合 GIS 统计各评价单元的易损性指标, 社会经济数据主要来自当地 2010 年最新统计数据, 并采用与危险性评价类似的方式确定洪水灾害易损性评价标准, 见表 4。依次执行可变模糊评价模型的步骤, 同样采用梯形模糊数与层次分析法相结合的方法确定易损性评价指标权重向量, 其中点值矩阵 M 和易损性指标权重向量 ω_2 为

$$M' = \begin{bmatrix} 0 & 330 & 390 & 460 & 2000 \\ 0 & 975 & 1525 & 2075 & 4000 \\ 0 & 98 & 110 & 122 & 140 \\ 0 & 2.835 & 4.5 & 6.165 & 8.67 \\ 0 & 150 & 250 & 350 & 500 \\ 0 & 150 & 250 & 350 & 500 \end{bmatrix}$$

$$\omega_2 = (0.353, 0.225, 0.190, 0.094, 0.069, 0.069)$$

表 4 荆江分洪区易损性评价标准

Table 4 Criteria for vulnerability assessment of Jingjiang flood diversion district

易损性指标	1 (极低易损等级)	2 (低易损等级)	3 (中等易损等级)	4 (高易损等级)	5 (极高易损等级)
人口密度/(人·km ⁻²)	0~300	300~360	360~420	420~500	500~2000
工业产值密度/(万元·km ⁻²)	0~700	700~1250	1250~1800	1800~2350	2350~4000
农业产值密度/(万元·km ⁻²)	0~92	92~104	104~116	116~128	128~140
养殖面积百分比/%	0~2	2~3.67	3.67~5.33	5.33~7	7~8.67
单位面积牲畜数/(头·km ⁻²)	0~100	100~200	200~300	300~400	400~500
道路网密度/(m·km ⁻²)	0~100	100~200	200~300	300~400	400~500

得到各评价单元在不同组合参数下的易损等级特征值, 各评价单元的易损性评价计算结果见表 5。

表 5 基于可变模糊集理论的易损性评价结果
Table 5 Results of hazard grades based on variable fuzzy set theory

乡镇名称	$a=1, p=1$	$a=1, p=2$	$a=2, p=1$	$a=2, p=2$	均值	易损等级
埠河镇	2.81	3.00	2.75	3.11	2.92	中等易损等级
斗湖堤镇	4.43	4.28	4.89	4.85	4.61	极高易损等级
杨家厂镇	2.85	2.84	2.96	2.98	2.91	中等易损等级
麻豪口镇	2.43	2.42	2.34	2.28	2.36	低易损等级
藕池镇	3.70	3.78	3.79	3.96	3.81	高易损等级
黄山头镇	2.11	2.21	1.82	1.85	2.00	低易损等级
闸口镇	2.64	2.62	2.75	2.70	2.68	中等易损等级
夹竹园镇	3.15	3.13	3.30	3.32	3.22	中等易损等级

注: 表中 a 为模型优化准则参数, p 为距离参数。

2.3 荆江分洪区洪水灾害风险评价

在以上洪水危险性和易损性评价的基础上, 依据风险等级分区矩阵^[6]得到各评价单元的风险等级(表 6); 最后, 基于 GIS 得到了荆江分洪区风险综合评价图(图 6), 实现了荆江分洪区风险分析和区划。为验证可变模糊评价模型的可靠性, 将普遍应用的模糊综合评价模型^[19]应用到上述风险评价中, 得到各评价单元相应的危险等级、易损等级和风险等级。总体上, 2 种方法的评价结果基本一致。

表 6 荆江分洪区风险评价结果

Table 6 Results of risk grades of Jingjiang flood diversion district

乡镇名称	埠河镇	斗湖堤镇	杨家厂镇	麻豪口镇	藕池镇	黄山头镇	闸口镇	夹竹园镇
风险等级	高风险	极高风险	中等风险	中等风险	高风险	中等风险	高风险	高风险

由实地调研情况可知, 由于斗湖堤镇距离分洪北闸近, 处于高危险等级, 且其人口和财富密集, 社会易损性极高, 故斗湖堤镇属于极高风险区。分洪闸在埠河镇北端, 分洪时最易受到影响, 处于高危险等级; 同时, 对于夹竹园镇和闸口镇而言, 该地区地势低洼, 易形成洪涝, 也处于高危险等级, 但此三镇人口和社会经济分布较为分散, 社会易损性处于中等, 故均属于高风险区。藕池镇地势低, 但造林植被率高, 减缓了洪水行进速度, 处于中等危险等级, 且工业发达, 社会易损性高, 故藕池镇属于高风险区。黄山头镇降雨量充沛, 地势起伏大, 具有高危险, 但经济相对较落后, 社会易损性较低, 故属于中等风险区。麻豪口镇地势低洼, 但区域内修筑了安全区和防洪堤, 处于中等危险等级, 且人口稀少, 社会易损度低, 故属于中等风险区。最后, 杨家厂镇濒临长江, 其内安全台和防洪堤最多, 洪水造成的危险性低, 但该地区社会经济较为发达, 社会易损性处于中等水平, 故该地区处于中等风险区。通过分析和比较, 由表 3, 5, 6 可知, 评价结果能够很好地与实际情况相吻合, 表明了可变模糊理论在洪水灾害风险分析中的可靠适用性。

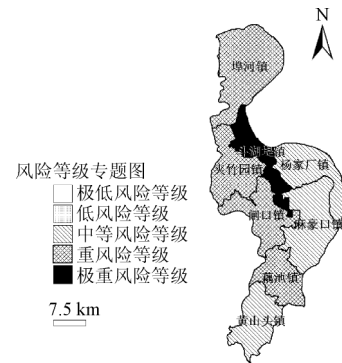


图 6 荆江分洪区洪水灾害综合风险评价图

Fig.6 Integrated flood risk assessment map of Jingjiang flood diversion district

3 结论

1) 在深入分析洪水灾害风险成因的基础上, 结合灾害学理论, 从洪水灾害的致灾因子、孕灾环境的自然状况和承灾体的社会经济状况出发, 构建了分洪区洪水灾害风险评价指标体系。并依据相关行业规范、规程、标准以及分蓄洪区具体情况, 并结合相关文献的研究成果, 制定了洪水灾害风险评价标准, 包括危险性和易损性评价标准。

2) 采用非结构有限体积模型进行洪水演进数值模拟, 结合 GIS 采集和统计危险性和易损性评价指标数据, 避免仅根据 GIS 的空间分析功能进行经验性的洪水灾害风险评价与区划, 具有理论上的严谨性。

3) 将可变模糊集理论引入到洪水灾害风险评价中, 能够较好地处理风险评价指标信息的随机性和不确定性, 通过相对隶属度函数和不同组合参数对危险等级和易损等级做出科学合理的计算, 并由风险等级分区矩阵得到各评价单元的风险等级, 能很好的与实际情况相吻合, 提高了风险评价结果的稳定性和可靠性。

[参考文献]

- [1] 周惠成, 张丹. 可变模糊集理论在旱涝灾害评价中的应用研究[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 56-61.
Zhou Huicheng, Zhang Dan. Assessment model of drought and flood disasters based on variable fuzzy set theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(9): 56-61. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王臻, 张晓东, 苏伟, 等. 中国三大自然灾害空间自相关特征[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 2): 302-306.
Wang Zhen, Zhang Xiaodong, Su Wei, et al. Spatial autocorrelation of three nature disasters in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(Supp.2): 302-306. (in Chinese with English abstract)
- [3] 新华社. 南方暴雨洪涝灾害已致 175 人死亡 86 人失踪[EB/OL]. http://news.xinhuanet.com/photo/2011-06/21/c_121560813.htm, 2011-06-28.

- [4] 王栋, 潘少明, 吴吉春, 等. 洪水风险分析的研究进展与展望[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(1): 103—109.
Wang Dong, Pan Shaoming, Wu Jichun, et al. Review of risk analysis on flood[J]. Journal of Natural Disaster, 2006, 15(1): 103—109. (in Chinese with English abstract)
- [5] 蒋卫国, 李京, 李忠武, 等. 洪水灾害人口风险模糊评价[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2008, 35(9): 84—87.
Jiang Weiguo, Li Jing, Li Zhongwu, et al. Fuzzy assessment of the population risk of flood disaster[J]. Journal of Henan University: Natural Sciences, 2008, 35(9): 84—87. (in Chinese with English abstract)
- [6] 杜鹃, 何飞, 史培军. 湘江流域洪水灾害综合风险评价[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 38—44.
Du Juan, He Fei, Shi Peijun. Integrated flood risk assessment of Xiangjiang River Basin in China[J]. Journal of Natural Disaster, 2006, 15(6): 38—44. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李绍飞, 冯平, 孙书洪. 突变理论在蓄滞洪区洪灾风险评估中的应用[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(3): 132—138.
Li Shaofei, Feng Ping, Sun Shuhong. Application of catastrophe theory to evaluation of flood risk in detention basin[J]. Journal of Natural Disaster, 2010, 19(3): 132—138. (in Chinese with English abstract)
- [8] 刘亚彬, 刘黎明, 许迪, 等. 基于信息扩散理论的中国粮食主产区水旱灾害风险评估[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 1—7.
Liu Yabin, Liu Liming, Xu Di, et al. Risk assessment of flood and drought in major grain-producing areas based on information diffusion theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(8): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [9] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [10] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊及理论与方法[M]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [11] Chen Shouyu, Guo Yu. Variable fuzzy sets and its application in comprehensive risk evaluation for flood-control engineering system[J]. Fuzzy Optim Decis Making, 2006, 5(2): 153—162.
- [12] 陈守煜, 柴春岭, 苏艳娜. 可变模糊集方法及其在土地适宜性评价中的应用[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 95—97.
Chen Shouyu, Chai Chunling, Sun Yanna. Variable fuzzy sets methods and the application on land suitability evaluation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(3): 95—97. (in Chinese with English abstract)
- [13] 苏艳娜, 柴春岭, 杨亚梅, 等. 常熟市农业生态环境质量的
可变模糊评价[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 245—248.
Su Yanna, Chai Chunling, Yang Yamei, et al. Variable fuzzy assessment on agricultural eco-environmental quality of Changshu City[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(11): 245—248. (in Chinese with English abstract)
- [14] 邱林, 王文川, 陈守煜. 农业旱灾脆弱性定量评估的可变模糊分析法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊2): 61—65.
Qiu Lin, Wang Wenchuan, Chen Shouyu. Quantitative estimation for vulnerability of agricultural drought disaster using variable fuzzy analysis method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(Supp.2): 61—65. (in Chinese with English abstract)
- [15] 魏一鸣, 金菊良, 杨存建, 等. 洪水灾害风险管理理论[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [16] 刘雨华. 基于梯形模糊数的指标权重确定方法的应用研究[J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2009(4): 369—372.
Liu Yuhua. Study on application of the method of determining index weights based on trapezoidal fuzzy numbers[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition, 2009(4): 369—372. (in Chinese with English abstract)
- [17] 罗志猛, 周建中, 张勇传, 等. 基于支持向量机和模糊层次分析法的虚拟研究中心合作伙伴优选决策[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(11): 2266—2271, 2279.
Luo Zhimeng, Zhou Jianzhong, Zhang Yongchuan, et al. Partners optimum decision-making of virtual research center based on support vector machine and fuzzy analytic hierarchy process[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(11): 2266—2271, 2279. (in Chinese with English abstract)
- [18] 宋利祥, 周建中, 王光谦, 等. 溃坝水流数值计算的非结构有限体积模型[J]. 水科学进展, 2011, 22(3): 373—381.
Song Lixiang, Zhou Jianzhong, Wang Guangqian, et al. Unstructured finite volume model for numerical simulation of dam-break flow. Advances in Water Science, 2011, 22(3): 373—381. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈思宁, 申双和, 刘敏, 等. 湖北省茶树气象灾害模糊综合评价及区划[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 298—303.
Chen Sining, Shen Shuanghe, Liu Min, et al. Fuzzy synthetical evaluation of meteorological disasters to Camellia Sinensis (L.O.Ktze) and its regionalization in Hubei Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(12): 298—303. (in Chinese with English abstract)

Flood disaster risk analysis based on variable fuzzy sets theory

Zou Qiang¹, Zhou Jianzhong^{1,*}, Zhou Chao², Song Lixiang¹, Guo Jun¹, Yang Xiaoling¹

(1. School of Hydropower and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on the disaster system theory and the consideration of natural properties of hazard and environmental as well as socioeconomics of hazard-affected bodies, the primary risk assessment system and grading standard for flood diversion district were established. Then taking the towns as the basic assessment units, on the basis of variable fuzzy sets theory, the corresponding model for variable fuzzy assessment was established, which could reasonably identify the relative membership degree between the index of assessment unit and its standard interval, thus properly determine the comprehensive assessment grade of each unit by varying the parameters of the model. In this way, the flood hazard grade and flood vulnerability grade for each unit could be calculated, respectively. After that, the flood risk grade for each unit was achieved from flood hazard and vulnerability grade with the flood risk grade classification matrix, which was divided into five grades, i.e. very high, high, medium, low, and very low respectively. Finally, taking the case study in Jingjiang flood diversion district for example, the practical application showed that the method was flexible and its results fitted with the actual situations. The method can also be applied for risk assessment of other natural disasters.

Key words: flood damage, risk assessment, indexing, variable fuzzy sets theory, flood risk grade, Jingjiang flood diversion district