



城市洪涝易损性评价可变集方法

陈守煜, 薛志春*, 李敏, 祝雪萍

大连理工大学水利工程学院水资源与防洪研究所, 大连 116024

* E-mail: xuezhichun2012@163.com

收稿日期: 2013-04-02; 接受日期: 2013-09-22

国家自然科学基金(批准号: 51209032, 51379027, 51109025)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20100041120004)和中央高校基本科研业务费专项(批准号: DUT13JS06)资助项目

摘要 根据可变集的辩证法基本规律数学定理, 提出城市洪涝易损性评价可变集方法. 提出以指标相对差异度表示的综合相对隶属度多指标非线性模型, 其特点是以辩证哲学与数学为指导, 依据质量互变定理给出城市洪涝易损性评价中相邻两级(h 与 $h+1$ 级)指标标准区间值交点的相对差异度等于零. 依据对立统一定理给出落入 h 与 $h+1$ 相邻两级的相对隶属度之和等于 1. 方法依据的理论严谨, 计算简便. 列举了湖南省 29 座城市的洪涝易损性评价实例, 并与模糊综合评判法、模糊集对评价法的评价结果进行了比较与分析, 指出其存在的问题及原因.

关键词
可变集
城市洪涝
易损性
评价

1 引言

城市化是 20 世纪后期世界最引人瞩目的问题之一. 21 世纪伊始, 全世界人口中有 50% 分布在城市, 城市(尤其是大城市)作为巨大自然灾害的承灾体, 已经成为世界灾害防御的重点. 1999 年联合国通过的日内瓦战略进一步明确了城市是 21 世纪全球减灾的重点^[1]. 21 世纪城市综合防灾减灾的能力, 将成为衡量城市整体功能及其安全防卫能力的标志^[2].

易损性概念由 Timmerman^[3] 在 1981 年正式提出. 1992 年 Kates 等人^[4] 结合社会易损性对地质、水文和技术等不同类型的灾害进行减灾分析. 1994 年联合国在世界减灾大会上通过宣言《建立更安全的环境——横滨战略和行动计划》, 宣言十分重视城市易损性评价, 以适应城市可持续发展的需要.

近 20 年来, 灾害易损性研究日益引起国际上的普遍重视, 随着城市化趋势的加快, 全球许多城市被洪涝问题所困扰; 2013 年截至 7 月底国内多个城市,

如北京、南京、广州、大连、西安、武汉等出现城区内涝现象, 导致了大量生命与财产的损失. 从问题的出现到认识、研究并生成解决方案的一系列过程中, 国内外学者从不同角度对城市洪涝问题作了大量研究与探索, 不断揭示出其发生的内在机理, 逐渐提高城市防洪软硬件技术措施, 在洪水发生前进行预报预警, 在洪水发生后进行灾害评价, 为完善防洪体系, 加强防洪减灾能力积累经验^[5~10]. 城市洪涝灾害易损性评价涉及人口、经济、环境、财产、基础设施等一系列社会经济因素, 易损性与承灾体之间关系复杂, 其评价方法与模型的科学性与合理性至关重要, 但近期发表的城市洪涝易损性评价的模糊综合评判法与模糊集对评价法^[11, 12]均存在问题. 本文在应用可变集理论提出城市洪涝易损性评价方法与比较分析中, 指出其存在问题的原因, 以利于城市洪涝易损性评价方法的进一步发展.

文献[13]于 2005 年建立可变模糊集, 2007 年在可变模糊集的基础上提出了可变模糊清晰混合集(简称

可变集)并给出辩证法三大基本规律的数学定理——对立统一、质量互变、否定的否定定理^[14, 15], 并在水资源系统进行了应用研究^[16~18]. 本文进一步应用三大基本规律数学定理的综合定理, 研究提出城市洪涝易损性评价方法, 为了论述的需要, 先简述对立统一、质量互变与否定的否定综合定理.

2 对立统一、质量互变与否定的否定综合定理

2.1 对立统一定理

设 U 为论域, u 为 U 中的任一元素, $u \in U$. u 的对立属性, 记以对立符号 A 与 A^c . 在连续统的两个端点 P_l, P_r 赋以 1 与 0, 0 与 1 的数. 对于 U 中的任一元素 u , 都在该连续统的任一点上确定了一对对立测度值 $\mu_A(u)$, $\mu_{A^c}(u)$, 称为 u 对 A 与 A^c 的对立相对隶属度. 映射

$$\mu_A, \mu_{A^c}: U \rightarrow [0, 1], u \mapsto \mu_A(u), \mu_{A^c}(u) \in [0, 1] \quad (1)$$

称为 u 对 A, A^c 的对立相对隶属函数, 无论对立测度值呈现何种变化, 其和等于 1 不变, 即

$$\mu_A(u) + \mu_{A^c}(u) = 1. \quad (2)$$

设

$$D_A(u) = \mu_A(u) - \mu_{A^c}(u). \quad (3)$$

$D_A(u)$ 称为 u 对 A, A^c 的对立相对差异度. 映射

$$D_A: U \rightarrow [-1, 1], u \mapsto D_A(u) \in [-1, 1] \quad (4)$$

称为 u 对 A, A^c 的对立相对差异函数, 如图 1 所示.

(2)和(3)式相加, 得相对隶属函数与相对差异函数的关系式

$$\mu_A(u) = \left[1 + D_A(u) \right] / 2. \quad (5)$$

再设

$$D_{A^c}(u) = \mu_{A^c}(u) - \mu_A(u). \quad (6)$$

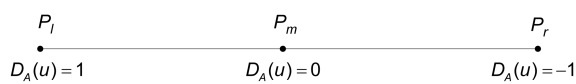


图 1 对立相对差异函数变化图

映射

$$D_{A^c}: U \rightarrow [-1, 1], u \mapsto D_{A^c}(u) \in [-1, 1] \quad (7)$$

称为 u 对 A^c, A 的对立相对差异函数.

由(3)和(6)式, 得到

$$D_{A^c}(u) = -D_A(u). \quad (8)$$

(2)式称为可变集的对立统一定理.

2.2 质量互变定理

论域 U 中元素 u 的变化, 记以 $C(u)$, 设 $C_1(u)$, $C_2(u)$, $C_3(u)$ 分别表示 u 随时间、空间、条件的变化

$$C(u) = \{C_1(u), C_2(u), C_3(u)\}. \quad (9)$$

设 $D_A(u) \neq 0$, $D_A(C(u))$ 表示 $D_A(u)$ 的变化.

1) 如有不等式

$$D_A(u) \cdot D_A(C(u)) < 0, D_A(C(u)) \neq 1, 0, -1, \quad (10)$$

则为渐变式质变.

2) 如有不等式

$$D_A(u) \cdot D_A(C(u)) > 0, D_A(C(u)) \neq 1, 0, -1, \quad (11)$$

则为量变.

(10)和(11)式称为可变集的质变、量变定理, 统一称为质量互变定理.

2.3 否定的否定定理

由图 1 可见, $D_A(u)$ 由 1 变化到 -1 称为一个周期, 设有 N 个周期, N 为正整数, $N \in [1, \infty]$, 设变化前初始状态在 P_l 点 (A).

若变化为一个周期, $N=1$. 变化后终了状态在 P_r 点 (A^c), 即一次否定, 有 $D_A(C(u)) = -1$, 则

$$D_A(u) \cdot D_A(C(u)) = 1 \cdot (-1) = (-1)^1.$$

若变化为 N 个周期, 变化后终了状态在 P_r 点 (N 为奇数)或 P_l 点 (N 为偶数), 即 N 次否定 (A^{c^N}), 则有

$$D_A(u) \cdot D_A(C(u)) = (-1)^N. \quad (12)$$

(12)式当 N 为奇数, $D_A(u) \cdot D_A(C(u)) = -1$; 当 N 为偶数, $D_A(u) \cdot D_A(C(u)) = 1$. 当 $N=2$ 时, 即两次否定

$$D_A(u) \cdot D_A(C(u)) = 1. \quad (13)$$

(13)式称为可变集的否定的否定定理.

2.4 对立统一、质量互变与否定的否定综合定理

根据对立统一、质量互变与否定的否定定理, 事物相对差异度 $D_{\hat{A}}(u)$ 的 N 次否定演变过程可用向量表示如下:

$$D_{\hat{A}-\hat{A}^c}^{\hat{A}-\hat{A}^c}(u) = (1, 0, -1, 0, 1, 0, -1, \dots, 1, 0, -1). \quad (14)$$

由图 1 可见(14)式表示变化前 $D_{\hat{A}}(u)$ 的初始状态在连续统的左极点 $P_{l1}(\hat{A})$, 向量(14)式中第一个“-1”对应于变化后 $D_{\hat{A}}(C(u))$ 的右极点 $P_{r1}(\hat{A}^c)$, 该点是 $N=1$ 变化的终了状态, 又是 $N=2$ 变化的初始状态 P_{l2} . 把(14)式中每一个变化周期终了状态所对应的“-1”, 变为下一个变化周期初始状态所对应的“1”, 则在 N 个周期变化中, (14)式变为

$$D_{\left(\hat{A}-\hat{A}^c\right)^N}(u) = (1, 0, 1, 0, 1, \dots, 1, 0, 1). \quad (15)$$

向量(15)式清晰地表达了 N 个变化周期中事物、现象及其反映(思维与概念)对立属性相对差异度从量变到质变的动态过程, 称为对立统一、质量互变与否定的否定综合定理, 是城市洪涝易损性评价可变集方法的理论基础.

3 城市洪涝易损性可变集评价方法

3.1 指标相对差异度公式

引入级别变量 $h, h=1, 2, \dots, c$ (c 为级别总数); 首先将指标 i ($i=1, 2, \dots, m, m$ 为指标总数)按拟定的标准区间值 $[a_{ih}, b_{ih}]$ 分级, a_{ih}, b_{ih} 分别为指标 i 级别 h 标准值的上、下界, 对于越小越优指标, $a_{ih} < b_{ih}$; 对于越大越优指标 $a_{ih} > b_{ih}$, 相邻两级指标 i 标准区间值的交点 b_{ih} , 相当于对立统一与质量互变定理中 h 向 $(h+1)$ 级转化的渐变式质变点, 即交点的相对隶属度 $\mu(b_{ih}) = \mu(a_{i(h+1)}) = 0.5$.

设对象 u 依据多个级别 h 多个指标 i 的标准值区间矩阵

$$Y = ([a_{ih}, b_{ih}]), \quad i = 1, 2, \dots, m; h = 1, 2, \dots, c, \quad (16)$$

进行识别. 指标 i 的 h 与 $h+1$ 级, 由于存在渐变式质变点 $\mu(b_{ih}) = 0.5$, 根据对立统一定理, 质变点两侧必存在两级(两极)对立, 即 h 与 $h+1$ 级构成对立级别, 故 $\hat{A}, \hat{A}^c$ 可分别以 $i_h, i_{(h+1)}$ 替代. 根据对立统一定理,

对象 u 指标 i 对 h 与 $(h+1)$ 级的相对隶属度之和为 1, 有

$$\mu_{i_h}(u) + \mu_{i_{(h+1)}}(u) = 1. \quad (17)$$

因此只需计算(17)式中的 $\mu_{i_h}(u)$ 就可.

据此, 可根据级别 h 、指标 i 的标准区间矩阵 Y 确定相对差异度 $D_{i_h}(u)$ 与 $D_{i_{(h+1)}}(u)$ 等于 1 所对应的点值矩阵 K , 根据文献[19]有

$$\begin{cases} k_{i1} = a_{i1}, \\ k_{ih} = \frac{a_{ih} + b_{ih}}{2}, h = 2, 3, \dots, c-1, \\ k_{ic} = b_{ic}. \end{cases} \quad (18)$$

根据标准值区间矩阵 Y 与(18)式, 可得点值映射矩阵

$$K = (k_{ih}). \quad (19)$$

设已知对象 u 的指标特征值矩阵为

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_m) = (x_i), \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (20)$$

设 u 的指标 i 特征值 x_i 落入矩阵 K 中 h 与 $h+1$ 级指标 i 的特征值相对差异度 $D_{i_h}(u)$, $D_{i_{(h+1)}}(u)$ 等于 1 对应的点值区间 $[k_{ih}, k_{i_{(h+1)}}]$ 内, 且区间内同时存在 $D_{i_h}(u)=0$ 渐变式质变点 b_{ih} , 则 x_i 对 h 级, $h+1$ 级的相对差异度 $D_{i_h}(u)$ 可按下式计算

$$D_{i_h}(u) = \begin{cases} \frac{b_{ih} - x_i}{b_{ih} - k_{ih}}, & x_i \in [k_{ih}, b_{ih}], \\ -\frac{b_{ih} - x_i}{b_{ih} - k_{i_{(h+1)}}}, & x_i \in [b_{ih}, k_{i_{(h+1)}}]. \end{cases} \quad (21)$$

$D_{i_{(h+1)}}(u)$ 按(8)式确定. 根据物理概念, 对于小于 h 级、大于 $(h+1)$ 级指标 i 的相对差异度均应等于 -1, 即

$$\begin{cases} D_{i_{(<h)}}(u) = -1, \\ D_{i_{(>h+1)}}(u) = -1. \end{cases} \quad (22)$$

(21)和(22)式是单指标相对差异度公式, 但城市洪涝易损性评价是多指标识别, 下面来导出以指标相对差异度表示的多指标综合相对隶属度非线性模型.

3.2 综合相对隶属度模型

根据图 1 指标 i 对对立级别 $h, h+1$ 的相对差异函数 $D_{i_h}(u)$ 的定义域为 $[1, -1]$, 若指标权向量为 $\bar{w} = (w_1, w_2, \dots, w_m)$, 由图 1 可知, 识别对象 u 的相对差异度 $D_{i_h}(u)$ 距左、右端点 P_l, P_r (即 $h, h+1$ 级)的广义权距离分别为

$$d_{ih}(u_j) = \left\{ \sum_{i=1}^m [w_i (1 - D_{ih}(u_j))]^p \right\}^{\frac{1}{p}}, \quad (23)$$

$$d_{i(h+1)}(u_j) = \left\{ \sum_{i=1}^m [w_i (D_{ih}(u_j) - (-1))]^p \right\}^{\frac{1}{p}}, \quad (24)$$

其中 p 为距离参数, $p=1$ 为海明距离, $p=2$ 为欧氏距离.

设 $v_h(u)$ 为识别对象 u 对级别 h 的多指标综合相对隶属度, 建立目标函数

$$\min \left\{ F(v_h(u)) = (v_h(u))^2 (d_{ih}(u))^\alpha + (v_{h+1}(u))^2 (d_{i(h+1)}(u))^\alpha \right\}, \quad (25)$$

其中 α 为优化准则参数, 当 $\alpha=2$, (25) 式为最小二乘方优化准则, 当 $\alpha=1$ 则相当于最小一乘方准则.

根据对立统一定理

$$v_h(u) + v_{h+1}(u) = 1. \quad (26)$$

对(25)式求关于变量 $v_h(u)$ 的导数, 并令导数为零, 即

$$\frac{dF(v_h(u))}{dv_h(u)} = 2[d_{ih}(u)]^\alpha v_h(u) - 2[1 - v_h(u)][d_{i(h+1)}(u)]^\alpha = 0.$$

则有

$$v_h(u) = \frac{1}{1 + \left[\frac{d_{ih}(u)}{d_{i(h+1)}(u)} \right]^\alpha} = \frac{1}{1 + \left[\frac{\sum_{i=1}^m [w_i (1 - D_{ih}(u))]^p}{\sum_{i=1}^m [w_i (1 + D_{ih}(u))]^p} \right]^\alpha}. \quad (27)$$

(27) 式称为以指标相对差异度表示的级别 h 的多指标综合相对隶属度非线性模型.

设 $\alpha=1$, $p=1$, (27) 式变为计算十分简单的线性模型

$$v_h(u) = \left[1 + \sum_{i=1}^m [w_i D_{ih}(u)] \right] / 2. \quad (28)$$

应用文献[20]中的级别特征值公式

$$H(u) = \sum_{h=1}^c v_h(u) \cdot h, \quad h=1, 2, \dots, c, \quad (29)$$

根据级别特征值对城市洪涝易损性给出评价.

4 评价实例与分析比较

4.1 评价对象与评价指标

为了与文献[11, 12]城市洪涝易损性评价方法比较, 以湖南省 29 座城市为评价对象. 湖南省地处长江中游地区, 为大陆性亚热带季风湿润气候, 常年多降水, 年均降水量 1200~1700 mm, 雨量充沛, 是我国雨水较多的省区之一. 城市地区高密度的集中了大量人口, 集工业、商业、教育、人文等功能于一身, 随着经济不断发展与城镇化不断加快, 城市自身的安全性问题日益突出, 特别是地震、洪涝等重大自然灾害的易损性尤为重要. 基于此, 应用可变集理论对湖南省城市洪涝易损性进行评价研究.

关于指标体系的设置, 首先引用文献[11]的 5 项确定性指标: 1) 人口密度(x_1), 2) 工业产值密度(x_2), 3) 道路网密度(x_3), 4) 排水管道密度(x_4), 5) 建成区绿地率(x_5)为城市洪涝易损性的确定性指标, 根据湖南省 1999 年统计年鉴, 省内 29 个主要城市的确定性指标值如表 1 所示. 同时增加反映系统应急反应能力和心理有关的 3 项模糊性指标: 6) 信息通讯保障(x_6), 7) 洪涝风险综合管理能力(x_7), 8) 系统调用效率(x_8), 从确定性与模糊不确定性两个方面来研究设置城市洪涝易损性评价指标体系.

4.2 评价标准与等级

据已有的研究成果, 城市洪涝易损性通常分为 5 个级别: 1 级为高度易损性; 2 级为较高易损性; 3 级为中度易损性; 4 级为较低易损性; 5 级为低度易损性. 引用文献[12]中 5 项确定性指标的分级标准如表 2 所示.

4.3 指标权重

为了与模糊综合评判、模糊集对评价方法进行比较, 并进行指标权重敏感性分析, 引用文献[11, 12]不同的 5 项确定性指标权重如表 3 所示.

表 1 湖南省城市洪涝易损性确定性指标值

City	x_1 (person km ²)	x_2 (10 Thousand (a km ²) ⁻¹)	x_3 (km km ⁻²)	x_4 (km km ⁻²)	x_5 (%)
Changsha	11749	16243	8.47	5.45	25.9

注: 限于篇幅, 只列出省会城市——长沙市数据, 其他城市数据可参阅 1999 年湖南省统计年鉴

表 2 湖南省城市洪涝易损性评价指标等级标准

Levels	x_1 (person km^2)	x_2 (10 Thousand (a km^2) $^{-1}$)	x_3 (km km^{-2})	x_4 (km km^{-2})	x_5 (%)
Level 1	>11400	>19000	>8.3	<3.2	<12
Level 2	[10100, 11400]	[15700, 19000]	[7.3, 8.3]	[3.2, 3.7]	[12, 17]
Level 3	[7400, 10100]	[9100, 15700]	[5.4, 7.3]	[3.7, 5.9]	[17, 26]
Level 4	[6100, 7400]	[5800, 9100]	[4.5, 5.4]	[5.9, 7.0]	[26, 31]
Level 5	<6100	<5800	<4.5	>7.0	>31

表 3 湖南省洪涝易损性评价确定性指标权重

Certainty indices	x_1 (person km^2)	x_2 (10 Thousand (a km^2) $^{-1}$)	x_3 (km km^{-2})	x_4 (km km^{-2})	x_5 (%)
Ref. [11] (weight 1)	0.211	0.255	0.137	0.149	0.248
Ref. [12] (weight 2)	0.151	0.263	0.147	0.22	0.219

4.4 评价流程及计算过程

根据提出的城市洪涝易损性可变集评价方法, 按以下基本流程图 2 进行计算.

下面分别从确定性指标分系统 I 与模糊不确定性指标分系统 II, 按照以上基本计算流程, 进行有关

指标相对差异度矩阵、综合相对隶属度以及级别特征值的计算, 过程如下.

4.4.1 分系统 I

根据表 2 各级指标标准区间值得到 5 级指标标准值区间矩阵

$$Y = \begin{bmatrix} \geq 11400 & [11400, 10100] & [10100, 7400] & [7400, 6100] & \leq 6100 \\ \geq 19000 & [19000, 15700] & [15700, 9100] & [9100, 5800] & \leq 5800 \\ \geq 8.3 & [8.3, 7.3] & [7.3, 5.4] & [5.4, 4.5] & \leq 4.5 \\ \leq 3.2 & [3.2, 3.7] & [3.7, 5.9] & [5.9, 7.0] & \geq 7.0 \\ \leq 12 & [12, 17] & [17, 26] & [26, 31] & \geq 31 \end{bmatrix}.$$

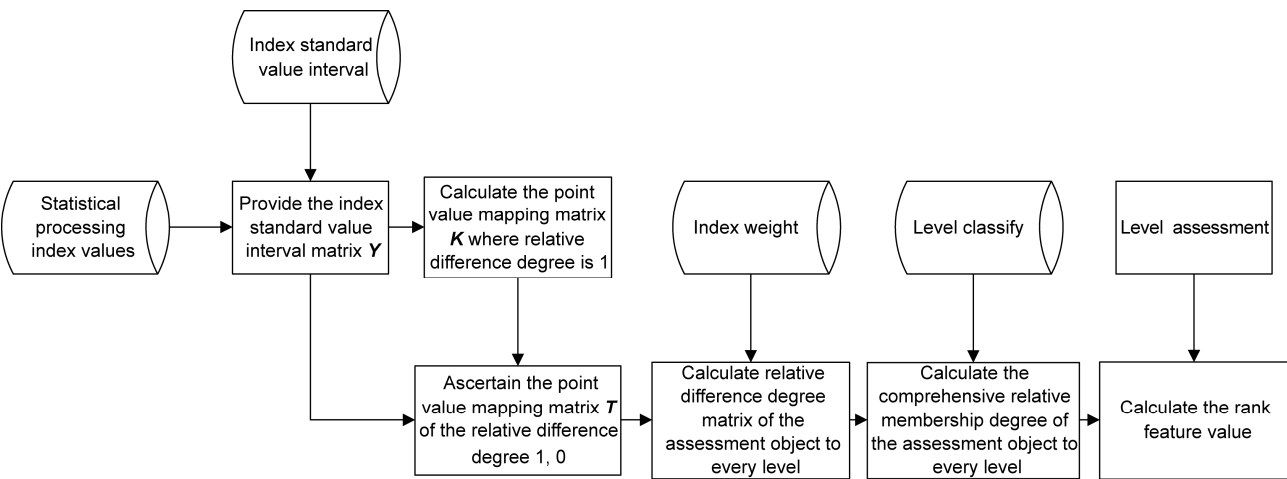


图 2 城市洪涝易损性可变集评价基本流程

应用(18)式与矩阵 Y 得到相对差异度为 1 的点值映射矩阵

$$K = \begin{bmatrix} 11400 & 10750 & 8750 & 6750 & 6100 \\ 19000 & 17350 & 12400 & 7450 & 5800 \\ 8.3 & 7.8 & 6.35 & 4.95 & 4.5 \\ 3.2 & 3.45 & 4.8 & 6.45 & 7 \\ 12 & 14.5 & 21.5 & 28.5 & 31 \end{bmatrix}.$$

应用矩阵 Y 中渐变式质变点 b_{ih} 得到相对差异度 1, 0 点值映射矩阵

$$T = \begin{bmatrix} (k_{i1}) & (b_{i1}) & (k_{i2}) & (b_{i2}) & (k_{i3}) & (b_{i3}) & (k_{i4}) & (b_{i4}) & (k_{i5}) \\ 11400 & 11075 & 10750 & 10100 & 8750 & 7400 & 6750 & 6425 & 6100 \\ 19000 & 18175 & 17350 & 15700 & 12400 & 9100 & 7450 & 6625 & 5800 \\ 8.3 & 8.05 & 7.8 & 7.3 & 6.35 & 5.4 & 4.95 & 4.725 & 4.5 \\ 3.2 & 3.325 & 3.45 & 3.7 & 4.8 & 5.9 & 6.45 & 6.725 & 7 \\ 12 & 13.25 & 14.5 & 17 & 21.5 & 26 & 28.5 & 29.75 & 31 \end{bmatrix} = (t_{i(2c-1)}).$$

现以长沙市(u_1)为例对计算过程进行说明, 由表 1 知指标特征值向量 $x=(11749, 16243, 8.47, 5.45, 25.90)$, 指标 1)特征值 $x_1=11749$, 大于矩阵 T 的 $k_{11}=11400$, 得 $\mu_{11}(u_1)=1$, 又根据(22)式, 则指标 1)对各级的相对差异度向量为 $D_1(u_1)=(1, -1, -1, -1, -1)$. 指标 2)特征值 $x_2=16243$, 落入矩阵 T 内 k_{22} 与 b_{22} 之间, 应用(21)式得 $D_{22}(u_1)=0.33$, 由(8)式得 $D_{23}(u_1)=-0.33$. 类似地对指标 3)~5)进行计算. 则得长沙市指标 1)~5)对各级的相对差异度矩阵

$$D(u_1) = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 0.33 & -0.33 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 0.41 & -0.41 & -1 \\ -1 & -1 & 0.022 & -0.022 & -1 \end{bmatrix}.$$

应用(28)式与表 3 中文献[11]指标权向量 $w=(0.211, 0.255, 0.137, 0.149, 0.248)$, 得到对各级的相对隶属度向量 $v(u_1)=(0.348, 0.170, 0.317, 0.165, 0)$, 由(29)式得长沙市分系统 I 级别特征值 $H_1(u_1)=2.299$. 类似地, 由表 3 文献[12]指标权向量 $w=(0.151, 0.263, 0.147, 0.220, 0.219)$, 得到 $v(u_1)=(0.298, 0.175, 0.355, 0.172, 0)$. $H_1(u_1)=2.401$. 由两组不同权重的结果可见指标敏感性并不显著.

4.4.2 分系统 II

根据分系统 II 的模糊性指标特点, 可应用文献[20]工程模糊集理论的二元比较法来确定指标 6)~8)

的权重, 为此进行 3 项模糊性指标的重要性二元比较. 考虑系统应急反应与人们的心理有关, 可以认为指标 7)洪涝风险综合管理能力, 比指标 6)信息通讯保障、8)系统调用效率都较为重要. 应用文献[20]中语气算子与定量标度相对隶属度关系, 表(文献[20]表 5-1)中语气算子“较为”对应的相对隶属度为 0.538, 得到模糊性指标 6)~8)的非归一化权向量(0.538, 1.0, 0.538), 则指标归一化权向量为(0.259, 0.482, 0.259).

根据 1999 年, 长沙市信息通讯铺设、洪涝风险综合管理能力、系统调用效率均在日益加强, 但尚未完善的情况, 模糊性指标 6)~8)特征值分别给以 0.75, 0.70, 0.65. 根据我国传统的优、良、中、差、劣 5 级评定标准以及模糊性指标在[0,1]区间取值的特点, 应用文献[21]模糊识别方法确定模糊性指标 6)~8)的 5 级标准值为[0, 0.3], [0.3, 0.6], [0.6, 0.8], [0.8, 0.9], [0.9, 1]. 应用与上述确定性指标系统相同的可变集评价计算方法, 得到模糊性指标系统 II 级别特征值 $H_2(u_1)=3.0$.

考虑确定性指标系统 I 有 3 项为工程型指标, 属于城市抗击洪涝的基础设施, 给系统 I 权重为 0.7, 则模糊性指标系统 II 的权重为 0.3, 采用权重 1 时有 $H(u_1)=0.7 \times 2.299 + 0.3 \times 3.0 = 2.509$, 采用权重 2 时有 $H(u_1)=2.581$, 两组确定性指标权重均评价湖南省长沙市洪涝易损性为 2 与 3 级之间, 即较高与中度易损性之间. 上述评价结果符合实际情况. 1998 年长江流域发生全流域特大洪水, 洪灾损失严重, 湖南省长沙市地处长江中游, 且长江支流湘江位于长沙市内, 同样遭受洪涝灾害的损失. 由于 1999 年长沙市抗洪涝

灾害的能力已经达到如文中所评价的 2 与 3 级之间, 根据有关资料[22], 长沙市并未出现特大洪涝灾害的相应级别.

4.5 评价结果与比较分析

将可变集与文献[11, 2]的评价结果列于表 4, 进行比较与分析(限于篇幅只列出长沙市).

文献[11]应用模糊综合评判方法对湖南省 29 座城市洪涝易损性进行了评价, 与本文成果有较大差别. 其主要原因在于文献[11]错误地应用了最大隶属度原则(参见文献[20]). 如文献[11]给出长沙市洪涝易损性为 1 级的评价, 其依据是该市洪涝易损性对 1 级的隶属度最大为 0.251, 见该文第 4 页中模糊综合评判值 $\tilde{B}=(0.251,0.224,0,0.156,0.125)$. (注: 该文 $\tilde{B}$ 的计算有误, 应该是 $\tilde{B}=(0.462,0.257,0,0.247,0.034)$). 长沙市洪涝易损性对 1 级的隶属度虽然最大, 但对 2 至 5 级的隶属度之和还大于对 1 级的隶属度, 显然在物理概念上评价该市洪涝易损性为 1 级有误. 在长沙市 5 项确定性指标的特征值中有 2 项指标(指标 1)和 3))处于 1 级, 指标权重和为 0.348, 1 项指标(指标 2))处于 2 级, 指标权重和为 0.255, 有 2 项指标(指标 4)和 5))处于 3 级, 指标权重和为 0.397, 由这些数据可见确定性系统 I 的级别特征值属于 2 级是合理的. 当

表 4 湖南省城市洪涝易损性评价结果与比较

City	VS		Ref. [11]	Ref. [12]
	Weight 1	Weight 2		
Changsha	2-3	2-3	1	2

进一步考虑了模糊性指标系统 II, 最后评价长沙市洪涝易损性介于 2 与 3 级之间, 使易损性等级有所增加, 是考虑了长沙市城市洪涝易损性管理与设备能力的结果.

文献[12]应用模糊集对评价法提出的湖南省 29 座城市洪涝易损性评价与本文成果同样有差别, 其原因文献[19]已作了详细的论述与分析, 这里不再重复, 本文只作一补充, 指标 5)的特征值 $x_5=25.6$, 由指标标准值区间表 2 可见 x_5 落入 3 级标准值区间[17, 26]内, 但文献[22]应用模糊集对评价法却得到指标 5)对 3 级的联系度等于 0.371, 对 4 级的联系度为 0.629(参见文献[12]97 页表 4~28), 显然有违物理概念. 因此文献[11, 12]得到的湖南省 29 座城市洪涝易损性评价成果缺乏科学性.

5 结语

随着我国城市化进程的发展, 城市人口日益增长, 资产更加集中, 城市洪涝灾害损失不断加大, 城市洪涝易损性评价作为城市洪涝灾害防治与减灾的基础内容, 显得更加重要. 文中根据作者 2007 年提出的可变集以及辩证法三大基本规律数学定理, 第一次运用辩证法哲学与数学思维研究城市洪涝易损性评价, 提出可变集评价方法, 方法理论严谨, 概念清晰, 计算简便, 在理论方法上有突破. 为城市洪涝灾害易损性评价提供了新的方法, 对城市洪涝易损性评价, 运用辩证思维具有启迪意义, 且可推广应用于多指标识别系统, 但在展延应用中需要注意指标体系的构建与分析, 尤其是关于模糊不确定性指标的构建.

参考文献

1 唐川. 城市减灾研究综述. 云南地理环境研究, 2003, 3: 1-6
2 金磊. 城市灾害学原理. 北京: 气象出版社, 1997. 118-157
3 Timmerman P. Vulnerability, Resilience and the Collapse of Society: A Review of Models and Possible Climatic Applications. Toronto: Institute for Environmental Studies, University of Toronto, 1981
4 Kates R W, Clark W C, Corell R, et al. Environment and development: Sustainability science. Science, 2001, 292: 641-642
5 Theo G S, Martin T, Norman E. Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. J Hydrol, 2004, 299: 300-311
6 Barroca B, Bernardara P, Mouchel J M, et al. Indicators for identification of urban flooding vulnerability. Nat Hazards Earth Syst Sci, 2006, 6: 553-561
7 Fedeski M, Gwilliam J. Urban sustainability in the presence of flood and geological hazards: The development of a GIS-based vulnerability and risk assessment methodology. Landscape Urban Plan, 2007, 83: 50-61
8 Pandey A C, Singh S K, Nathawat M S. Waterlogging and flood hazards vulnerability and risk assessment in Indo Gangetic plain. Nat Hazards, 2010, 55: 273-289

- 9 Adelekan I O. Vulnerability assessment of an urban flood in Nigeria: Abeokuta flood 2007. *Nat Hazards*, 2011, 56: 215–231
- 10 Kuniyoshi M M, Takeuchi K. Assessment of flood hazard, vulnerability and risk of mid-eastern Dhaka using DEM and 1D hydrodynamic model. *Nat Hazards*, 2012, 61: 757–770
- 11 毛德华, 王立辉. 湖南城市洪涝易损性诊断与评估. *长江流域资源与环境*, 2002, 1: 89–93
- 12 王文圣, 李跃清, 金菊良, 等. 水文水资源集对分析. 北京: 科学出版社, 2010
- 13 陈守煜. 可变模糊集理论与模型及其应用. 大连: 大连理工大学出版社, 2009
- 14 陈守煜. 模糊可变集合的拓展: 可变集合——兼论可拓零界关联函数等于零的错误. In: 数学及其应用. 北京: 原子能出版社, 2007
- 15 陈守煜. 可变集—可变模糊集的发展及其在水资源系统中的应用. *数学的实践与认识*, 2012, 1: 92–101
- 16 陈守煜. 可变集及水资源系统优选决策可变集原理与方法. *水利学报*, 2012, 43: 1066–1074
- 17 陈守煜. 基于可变集的水资源系统可持续发展态势预测原理与方法. *大连理工大学学报*, 2013, 53: 107–113
- 18 Chen S Y, Xue Z C, Li M. Variable sets principle and method for flood classification. *Sci China Tech Sci*, 2013, 56: 2343–2348
- 19 陈守煜. 水资源系统可变集评价原理与方法. *水利学报*, 2013, 44: 134–142
- 20 陈守煜. 工程模糊集理论与应用. 北京: 国防工业出版社, 1998
- 21 陈守煜. 复杂水资源优化模糊识别理论与应用. 长春: 吉林大学出版社, 2002
- 22 郑双治. 98 长江大水和长江中下游地区的洪涝灾害. *中国减灾*, 1998, 8: 24–28