

基于物元理论的自然灾害损失等级划分方法^{*}

代博洋, 李志强, 李晓丽

(中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要: 基于“灾度”概念及其改进算法, 结合物元理论, 提出了自然灾害损失等级划分的可拓学算法, 建立了基于物元理论的自然灾害损失等级划分模型, 将物元分析方法应用于自然灾害损失等级划分, 作为灾害损失等级评估方法的一种补充, 并与之前算法互为验证。不仅论证了物元理论应用于灾害等级划分的可行性, 阐述了自然灾害损失评估物元模型的算法过程, 而且利用该模型正确评估了2008年中国南方冰冻灾害的损失等级。经过反复验证, 证实了该方法的科学性, 同时提出了该模型尚存在的细节问题, 如灾度上限的取值, 权重确定的方法等问题, 以便于更好的完善该模型算法。

关键词: 灾度; 物元理论; 物元分析模型; 自然灾害; 损失评估; 可拓学

中图分类号: X43; O159 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2009)01-0001-05

0 引言

自然灾害损失包括自然变异事件所造成的人员伤亡和社会财产损失以及修复被破坏的灾区的投入。自然灾害损失评估是一项综合性的测算和统计工作, 其难点之一在于评定因子的选定与权重的确定。而量化评估与等级划分是灾害评定工作中的又一个难题, 如何划分自然灾害等级是进行灾害评估和灾害分级管理的关键, 同时, 等级量化的确定性描述, 关系到灾害损失评估的精确度问题。

1988年, 马宗晋、李闽峰等结合重大灾害研究提出了“灾度”“灾损率”的概念, 将自然灾害损失绝对度量的分级标准定义为“灾度”, 以人口的直接死亡数和社会财产损失值做双因子判定为分级标准, 将灾害损失划分为微灾(E级)、小灾(D级)、中灾(C级)、大灾(B级)、巨灾(A级)5个等级。灾度的提出首次使国内对自然灾害灾情等级的划分有了明确的量化标准。1992年, 高建国根据我国各类灾害分级管理的实践, 提出在使用灾度概念时, 要注意不同类型灾害的差异性, 根据不同的灾种, 确定判别灾度等级的判别指标, 进一步完善了灾度概念^[1]。但灾度等级划分仍存在着一些模糊的地方, 在评定巨灾时, 是要求死

亡人数与直接经济损失这两个因子同时达到巨灾等级, 还是二者之一达到即可; 且灾度等级判别方法并不适用于所有灾害的灾度等级判定。比如, 死亡2 000人, 财产损失超过1亿元, 这种情况应判定为大灾还是巨灾呢? 随着科技水平的进步, 灾害中直接死亡人数呈下降趋势, 有很多时候, 直接死亡人数可降为零, 而直接经济损失巨大, 这些灾害恐怕不能都评定为微灾。

鉴于此类问题, 许多学者提出了灾度改进方法。于庆东提出了圆弧判别方法, 以死亡人数和经济损失的平方和表示灾度, 使灾度在整个象限空间内无缝分布, 从而改进后的灾度可以对所有的灾害进行等级判定^[2]。1993年冯利华将死亡人数、受伤人数和直接经济损失的数量折算为规范化指数, 提出灾害损失的定量计算方法^[3]。1994年冯志泽等根据地震成灾机制, 将直接经济损失、间接经济损失和救灾投入作为经济损失, 用一次地震造成的死亡、重伤人数和经济损失3个因子计算出灾害指数, 并依据灾害指数将灾害损失划分为I~XI级^[4]。

“灾度”及其后的改进算法, 虽然确定并完善了灾害损失等级划分的量化标准, 但量化划分后的结果却存在着模糊性, 无论采用哪种方法进行灾害等级的划分, 都将丢失灾害损失特征方面的一部分信息, 诸如突出了位于等级划分临界

^{*} 收稿日期: 2008-05-16

基金项目: “十一五”国家科技支撑项目(2006BAC13B03-02)

作者简介: 代博洋(1981-), 女, 河北张家口人, 硕士研究生, 主要研究地震工程及防震减灾工程。E-mail: ts99dby@126.com

值附近两侧的危害损失的差异,同时会减弱位于一个灾害损失等级范围两端的灾害损失的差异。例如,死亡 11 人和死亡 99 人同属小灾,而死亡 101 人属于中灾,显然 99 与 11 的差异远大于 99 与 101 的差异。基于这种情况,任鲁川提出借助模糊数学方法用隶属度来判断灾害属于灾度等级的程度有一定的启发作用^[5]。本文在这些研究的基础上,将尝试基于可拓学方法,提出基于物元理论的危害损失等级判定模型,以期为此类问题的研究和实际的损失评估工作提供一些借鉴。

1 可拓学与物元理论

可拓学创立于 1983 年,是以蔡文教授为首的我国学者们创立的新学科。可拓学研究事物的数量关系及其变化、事物之间的关系及其变化,研究事物不相容问题的转化规律与解决方法,并用形式化的模型处理矛盾问题。

可拓学是以物元理论和可拓数学作为其理论框架,其中,物元理论是可拓学的逻辑细胞,物元理论主要研究物元的可拓性及基于物元可拓性产生的物元变换方法;在可拓数学中,建立了关联函数这一概念,通过关联函数可以定量描述元素具有某一性质的程度及其变化^[6,7]。

2 物元分析

物元分析方法是可拓学中重要的分析方法,它研究现实世界中普遍存在的矛盾问题,并探讨矛盾问题出现的原因和处理的对策。在物元分析中,最基本的元素就是物元:以事物的名称、特征和量值为 3 个基本素的事物称为物元,即 (N, c, v) ,其中, R 称为事物, N 称为事物的名称, c 表示事物的性质(又称特征), v 表示 N 关于 c 所取的量值, v 也可用 $c(N)$ 来表示。如果事物的特征表现在多个方面,即一个事物 N 需用 n 个特征 c_1, c_2, \dots, c_n 及其相对应的量值 $V_{01}, V_{02}, \dots, V_{0n}$ 描述,则称为 n 维物元,可用矩阵表示:

$$R(N, c, v) = \begin{pmatrix} N & c_1 & V_{01} \\ & c_2 & V_{02} \\ & \dots & \dots \\ & c_n & V_{0n} \end{pmatrix}。$$

为了把人们解决矛盾问题的过程量化,并最后用计算机处理矛盾问题,物元分析必须建立

相适应的数学工具,即可拓集合论。当可拓集合的元素是物元时,则构成可拓物元集。

可拓集合和物元概念可根据事物特征的量值来判断事物隶属于某个集合的程度,而关联函数能使识别精确化、量化。

3 自然灾害损失评估的物元模型

马宗晋提出的灾度等级划分标准中,把死亡人数 10 万以上,直接经济损失 100 亿元以上的灾害列为巨灾;死亡人数达 1 万至 10 万人,直接经济损失在 10 亿元至 100 亿元之间的灾害称为大灾;依此类推,人口死亡数和直接经济损失值每降低一个数量级,相应降低一个灾度,对这两项指标分别取以 10 为底的对数,分别记为 $\lg c_1$ 和 $\lg c_2$ (c_2 以万元为单位),则相应的指标换算为自然数 1, 2, 3, 4(表 1)。

表 1 基于灾度物元模型的危害等级划分标准

灾度等级	人口死亡(人)	财产损失
巨灾	>4	>4
大灾	3~4	3~4
中灾	2~3	2~3
小灾	1~2	1~2
微灾	0~1	0~1

随着科技水平的进步,灾害中直接死亡人数呈下降趋势,如果一次灾害中,直接死亡人数为零,而经济损失却超过 1 亿元,这类灾害用传统的双因子等级判别方法判定,其结果存在模糊性。鉴于在灾度物元模型中,巨灾等级区间的上限属不定值,取值问题仍存在争议,而物元模型算法要求区间的上下限为定值,故应用灾度物元模型进行灾度等级判定时,此类灾害需单独先进行判定。因此,灾害判别分为两个步骤:其一:首先判定该灾害是否属于巨灾;其二:若不是,则判定属于上述等级中哪一级别。对于判别双因子都属于巨灾区间内的灾害,用上述两个步骤进行判定仍是有效的。

3.1 判断灾害是否属于巨灾

判别双因子中是否有一因子属于巨灾等级,如果 $\lg c_1 > 4$, 或 $\lg c_2 > 4$, 则该灾害属于巨灾;如果否,则依据以下步骤通过建立物元模型判定属于非巨灾外的哪个灾害等级。

3.2 其它灾害等级的判定方法

(1) 确定经典域和节域

设 P_0 是 P 的一个子集, $P_0 \in P$, 对 $p \in P_0$, 试

判断 p 是否属于 P_0 , 并计算 p 属于 P_0 的程度。经典域:

$$R_{0j}(N_{0j}, C, V_{0j}) = \begin{pmatrix} N_{0j} & c_1 & V_{01} \\ & c_2 & V_{02} \\ & \dots & \dots \\ & c_n & V_{0n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_{0j} & c_1 & (a_{0j1}, b_{0j1}) \\ & c_2 & (a_{0j2}, b_{0j2}) \\ & \dots & \dots \\ & c_n & (a_{0jn}, b_{0jn}) \end{pmatrix},$$

式中: N_{0j} 为灾害损失划分的等级标准, 根据表 1, $j=4$; $c_i (i=1, 2)$ 为 N_{0j} 的特征, 即灾害损失等级划分所依据的各项指标; V_{0j} 为 N_{0j} 关于特征 c_i 所规定的量值范围, 指灾害损失等级划分所规定的取值范围 (表 1), 即经典域, 且有: $V_{0j} = (a_{0j1}, b_{0j1})$ 。令

$$R_p(p, C, V_p) = \begin{pmatrix} p & c_1 & V_{p1} \\ & c_2 & V_{p2} \\ & \dots & \dots \\ & c_n & V_{pn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N & c_1 & (a_{p1}, b_{p1}) \\ & c_2 & (a_{p2}, b_{p2}) \\ & \dots & \dots \\ & c_n & (a_{pn}, b_{pn}) \end{pmatrix};$$

式中: R_p 为灾害损失等级评估物元模型的节域, P 为灾害损失的全体, $V_{p1}, V_{p2}, \dots, V_{pn}$ 分别是 P 关于 c_1, c_2, \dots, c_n 所取的量值的范围, 即 P 的节域。

记: $V_{pi} = (a_{pi}, b_{pi})$, ($i=1, 2; j=1, 2, 3, 4$), 其中, $i=1, 2$, 分别表示直接死亡人数、直接社会财产损失; $j=1, 2, 3, 4$, 分别对应于微灾、小灾、中灾、大灾。

(2) 确定关联函数

距的计算式:

$$\rho(v_{ki}, V_{0ji}) = \left| V_{ki} - \frac{a_{0ji} + b_{0ji}}{2} \right| - \frac{b_{0ji} - a_{0ji}}{2}$$

($i=1, 2; j=1, 2, 3, 4$),

$$\rho(v_{ki}, V_{pi}) = \left| V_{ki} - \frac{a_{pi} + b_{pi}}{2} \right| - \frac{b_{pi} - a_{pi}}{2}$$

($i=1, 2; j=1, 2, 3, 4$)。

关联函数计算:

$$K_j(v_{ki}) = \begin{cases} \frac{\rho(v_{ki}, V_{0ji})}{\rho(v_{ki}, V_{pi}) - \rho(v_{ki}, V_{0ji})}, & v_{ki} \notin V_{0ji}; \\ -\frac{\rho(v_{ki}, V_{0ji})}{|V_{0ji}|}, & v_{ki} \in V_{0ji}, \text{ 且 } \rho(v_{ki}, V_{0ji}) = \rho(v_{ki}, V_{pi})。 \end{cases}$$

(3) 确定权系数

根据灾害中因子的重要性确定权重, 具体算法:

① 如果, $\lg c_1$ 或 $\lg c_2$ 为临界值, 即 $\lg c_1 = a_{0j1}$ 或 b_{0j1} , 或 $\lg c_2 = a_{0j2}$ 或 b_{0j2} , 则 c_1 的重要性: $a = j/4$; c_2 的重要性: $b = j/4$, ($j=1, 2, 3, 4$) 则 c_1 的权重值 $\lambda_1: a/(a+b)$; c_2 的权重值 $\lambda_2: b/(a+b)$ 。

② 如果, $\lg c_1 \neq a_{0j1}$, 或 b_{0j1} , $\lg c_2 \neq a_{0j2}$ 或 b_{0j2} , 则:

判断因子 c_1 所属死亡人数等级 j , 计算重要性:

$$a = (\lg c_1 - a_{0j1}) / (b_{0j1} - a_{0j1}) \quad (j=1, 2, 3, 4);$$

判断因子 c_2 所属经济损失等级 j , 计算重要性:

$$b = (\lg c_2 - a_{0j2}) / (b_{0j2} - a_{0j2}) \quad (j=1, 2, 3, 4);$$

则 c_1 的权重值 $\lambda_1: a/(a+b)$; c_2 的权重值 $\lambda_2: b/(a+b)$, 见表 2。

表 2 权重值计算

特征 character	c_1	c_2
权重 ($\sum_{i=1}^2 \lambda_i = 1$)	$a/(a+b)$	$b/(a+b)$

其中, c_1 表示死亡人数, c_2 表示直接经济损失。

(4) 确定灾害损失各等级的关联度公式

$$K_i(p_k) = \sum_{i=1}^2 \lambda_i (v_{ki})。$$

(5) 灾害损失等级的评定

若 $K_j = \max_{j \in (1, 2, 3, 4)} K_i(p_k)$, 则评定 p 属于等级 j 。

在灾度物元模型中, 用灾害损失等级的关联度值判定灾度等级。判断关联度值最大程度隶属于某一灾害等级, 则灾害属于该灾度等级。

4 灾害损失评估等级物元模型的应用

例 1 假定某一灾害造成的直接死亡为 90 人, 社会财产损失 120 万元, 判别其所属的灾度等级。

因为 $\lg 90 = 1.95 < 4$, $\lg 120 = 2.08 < 4$,

故, 建立物元模型, 如下:

(1) 确定其经典域和节域物元模型, c_1 为直接死亡, c_2 为财产损失。

$$R = \begin{pmatrix} p & c_1 & 1.95 \\ & c_2 & 2.08 \end{pmatrix}$$

$$R_p = \begin{pmatrix} p & c_1 & V_{p1} \\ & c_2 & V_{p2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p & c_1 & (0, 4) \\ & c_2 & (0, 4) \end{pmatrix}$$

$$R_{04} = \begin{pmatrix} N_{04} & c_1 & V_{041} \\ & c_2 & V_{042} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_{04} & c_1 & (3, 4) \\ & c_2 & (3, 4) \end{pmatrix}$$

$$R_{03} = \begin{pmatrix} N_{03} & c_1 & V_{031} \\ & c_2 & V_{032} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_{03} & c_1 & (2, 3) \\ & c_2 & (2, 3) \end{pmatrix}$$

$$R_{02} = \begin{pmatrix} N_{02} & c_1 & V_{021} \\ & c_2 & V_{022} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_{02} & c_1 & (1, 2) \\ & c_2 & (1, 2) \end{pmatrix}$$

$$R_{01} = \begin{pmatrix} N_{01} & c_1 & V_{011} \\ & c_2 & V_{012} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_{01} & c_1 & (0, 1) \\ & c_2 & (0, 1) \end{pmatrix}$$

(2) 根据灾度物元模型, 得出关联矩阵 K :

$$K = \begin{pmatrix} -0.350 & -0.324 \\ -0.025 & 0.080 \\ 0.050 & -0.040 \\ -0.328 & -0.360 \end{pmatrix}$$

(3) 确定权系数:

$\lg 90 = 1.95 \neq 1 \parallel 2$, 或 $\lg 120 = 2.08 \neq 2 \parallel 3$, 则判断死亡人数为 90 人时所属死亡人数等级为 2, 该区间为 $[1, 2)$, 计算其重要性:

$$a = (\lg c_1 - a_{0j1}) - (b_{0j1} - a_{0j1}) = (1.95 - 1) / (2 - 1) = 0.95 \quad (j=1, 2, 3, 4);$$

判断直接经济损失为 120 万元时所属经济损失等级为 3, 该区间为 $[2, 3)$, 计算其重要性:

$$b = (\lg c_2 - b_{0j2}) - (b_{0j2} - a_{0j2}) = (2.08 - 2) / (3 - 2) = 0.08 \quad (j=1, 2, 3, 4)。$$

根据权值计算公式, 得权重系数, 见表 3。

表 3 确定权重系数

特征 character	c_1	c_2
权重 $(\sum_{i=1}^2 \lambda_i = 1)$	$a/(a+b) = 0.9223$	$b/(a+b) = 0.0777$

(4) 综合评判指标的权重, 得出灾度等级和综合关联度(表 4):

$$K_i = (p_k) = \begin{pmatrix} -0.350 & -0.324 \\ -0.025 & 0.080 \\ 0.050 & -0.040 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.9223 \\ 0.0777 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.348 \\ -0.029 \\ 0.043 \end{pmatrix}$$

表 4 灾度等级综合关联计算结果

等级 class	N_{04}	N_{03}	N_{02}	N_{01}
关联度值 K_j	-0.348	-0.029	0.043	-0.331

表 4 中, 负数表示综合关联度不属于该等级, 值为不属于该等级的程度; 正数表示综合关联度属于该等级, 值表示属于该等级的程度。根据 $K_j = \max_{j \in (1,2,3,4)} K_i(p_k)$, 可判定关联度值 $K_j = 0.043$ 所对应的灾度等级为该灾害的等级, 即该灾害损失属于小灾。

于庆东在“灾度等级判别方法的局限性及其改进”^[2]中提到算法改进, 灾度等级判别标准中, y 轴以亿元为单位长度, x 轴以 1 000 人为单位长度, 灾害等级计算过程:

$$(90/1\ 000)^2 + (120/1\ 000)^2 = 0.0225$$

$0.02 \leq 0.0225 < 2$, 故该灾害属于小灾, 与上述计算结果一致。

例 2 2008 年我国南方低温雨雪冰冻灾害造成了巨大的损失, 据民政部李立国副部长在“全国灾区群众生活安排和恢复重建工作会议”上的讲话材料^[8], 截至 2008 年 2 月 22 日, 这场巨灾导致 129 人死亡, 因灾造成直接经济损失约 1 516.5 亿元^[8]。判别这次雪灾的灾害等级如下。

$\lg 129 = 2.11$, $\lg 1\ 516.5 \times 10^7 = 7.18$, 建立物元模型:

$$R = \begin{pmatrix} p & c_1 & 2.11 \\ & c_2 & 7.18 \end{pmatrix}$$

因为, $7.18 > 4$, 故, 南方低温雨雪冰冻灾害属于巨灾, 与实际结果相一致。

5 结论和讨论

本文提出的灾度物元模型, 将可拓学与灾害学相结合, 理论上具有可行性。通过 2008 年我国南方低温雨雪冰冻灾害, 进一步论证了该模型的可行性, 并通过其他方法进行验证, 该模型的判定结果合理。在判定灾害损失研究中, 该方法可以作为其他方法的补充, 并互为验证。

马宗晋等最先提出的双因子判定“灾度”, 给出了自然灾害损失等级划分的定量化标准, 随着人们对灾害认识的加深, 及更多灾害形式的出现, 之后更多学者将精力投入到自然灾害损失评估领域, 提出新的概念及数学模型, 希望使灾害损失评估体系更精确, 更完善^[9-14]。

人们对精确性的追求, 导致了模糊数学的诞生。任鲁川将模糊数学应用于自然灾害损失等级评估, 提出了模糊灾度的概念和模糊灾度等级划分方法, 与之前相比, 可以提取更多的灾害损失信息, 简单易行。

而可拓数学又将数学的研究领域扩展到研究矛盾问题, 扩展到质与量相结合的物元。可拓数学描述的是事物的可拓性, 以关联函数作为定量化工具^[15]。将可拓学应用于自然灾害等级判定中, 建立基于物元理论的灾害损失等级划分模型, 在

前人的理论基础之上, 更进一步地描述了灾害损失的等级, 该模型在距^①的基础上建立的关联函数把“具有某损失等级 P ”的自然灾害从定性描述拓展到“具有该损失等级 P 的程度”的定量描述。

同时, 该模型仍存在一些细节问题:

(1) 因子权重的确定方法是否合理, 仍需进一步探讨;

(2) 灾度的上限是否可取值为 $+\infty$, 仍存在争议;

(3) 如果灾害损失值处于两相邻等级分界位置, 如死亡人数为 10 人, 直接经济损失为 10 万元, 则灾害等级微灾和小灾的关联度是一样的。

以上细节问题仍需进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] 高建国. 确定灾害评估标准是我国“国际减灾十年”目标的重要问题[J]. 自然灾害学报, 1992, 1(1): 50-58.
- [2] 于庆东. 灾度等级判别方法的局限性及其改进[J]. 自然灾害学报, 1993, 2(2): 8-11.
- [3] 冯利华. 灾害损失的定量计算[J]. 灾害学, 1993, 8(2): 17-19.
- [4] 冯志泽, 胡政, 何钧. 地震灾害损失评估及灾害等级划分[J]. 灾害学, 1994, 9(1): 13-16.
- [5] 任鲁川. 灾害损失等级划分的模糊灾度判别法[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(3): 13-17.
- [6] 蔡文. 从物元分析到可拓学[J]. 吕梁学刊: 自然科学版, 1996, (2): 1-9.
- [7] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994: 1-51.
- [8] 李立国. 全国灾区群众生活安排和恢复重建工作会议[EB/OL]. <http://www.mca.gov.cn/article/ccc/200802/20080200011958.shtml>. 2008-02-23.
- [9] 冯志泽. 自然灾害等级划分及灾害分段管理研究[J]. 灾害学, 1995, 11(1): 34-37.
- [10] 任鲁川. 灾害损失定量评估的模糊综合评判方法[J]. 灾害学, 1996, 11(4): 5-10.
- [11] 孙卫东, 彭子成. 灾度指数及其意义[J]. 灾害学, 1995, 10(2): 16-20.
- [12] 魏庆朝, 张庆珩. 灾害损失及灾害等级的确定[J]. 灾害学, 1996, 11(1): 1-5.
- [13] 冯利华, 赵浩兴, 瞿有甜. 灾害等级的综合评价[J]. 灾害学, 2002, 17(4): 16-20.
- [14] 冯利华. 灾害等级研究进展[J]. 灾害学, 2002, 15(3): 72-76.
- [15] 蔡文. 可拓学概述[J]. 系统工程理论与实践, 1998, (1): 76-84.

A Method of Classing Natural Disaster Loss Based on Matter-element Theory

Dai Boyang, Li Zhiqiang and Li Xiaoli

(Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on the definition of “disaster degree” and its relative modified methods, an extenics method of the natural disaster loss grade is put forward by use of the matter-element theory, and a model based on matter-element theory is established, in which the matter-element analysis method is recommended to classify the natural disaster loss. As the complement of the existent assessment model, they could be identified and replenished with each other. In this paper, not only the feasibility of matter-element theory classing the disaster loss is verified, but also the loss of the snowstorm disaster in South China in 2008 is evaluated correctly. Then, repeated verifications have proved that the matter-element method is scientific. Moreover, the defects of the model are proposed to be improved perfectly, such as the validity of the upper limit and the method of the weight determination.

Key words: disaster degree; matter-element theory; matter-element analysis model; natural disaster; loss evaluation; extenics

① 在 3.2 节中, 确定关联函数时定义了距的计算, 灾度物元模型是在距的基础上进行判定的。