

徐国栋,薄景山,李巨文,等. 2024. 灾度模型的一般表达式及应用. 中国地震, 40(2): 313~325.

灾度模型的一般表达式及应用

徐国栋^{1,2)} 薄景山^{1,2)} 李巨文^{1,2)} 张云霞³⁾

1) 防灾科技学院,地质工程学院,河北三河 065201

2) 河北省地震灾害防御与风险评价重点实验室,河北三河 065201

3) 应急管理部国家减灾中心,北京 100124

摘要 灾害(自然灾害和人为灾害)等级评定有利于灾害分级管理。本文选取直接经济损失相对值(直接经济损失/人均GDP)、死亡人数、受伤(重伤+轻伤)人数、转移安置指标(转移安置人数×平均安置时间)等灾情指标,给出自然灾害等级划分方案,初步建立统一的自然灾害灾度计算模型,通过具体灾例验证本模型适用于地震、洪涝和台风等灾害的等级评定;在此基础上给出灾度计算模型的一般表达式,并将其推广应用到人为灾害(如生产安全事故等)的分级与评价;讨论目前生产安全事故等级评价标准的不足之处,选取死亡人数、重伤人数、轻伤人数、直接经济损失相对值等灾情指标,给出适用于生产安全事故的等级划分方案、灾度计算模型及等级评定工作流程,通过典型生产安全事故等级评定验证了模型的合理性。本文给出的灾害等级划分方案可扩充性好,灾度计算模型有严格的数学推导,具有统一的形式,灾度值受单项评级最高的损失指标控制,并考虑其他损失指标的贡献。对不同的灾害类型,即使选用的损失指标类型和数量不同,也能进行统一的灾害等级评定和比较。本文的灾度模型可视为修正的“或模型”,能考虑多个损失指标的影响和贡献。对自然灾害的灾情统计建议:加强受伤(重伤+轻伤)人员分类统计、转移安置人数及时长的分类统计,以更好地反映自然灾害损失大小、影响程度及范围。

关键词: 自然灾害 人为灾害 灾度 灾害等级 直接经济损失 转移安置指标
生产安全事故

[文章编号] 1001-4683(2024)02-0313-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

灾害等级划分是灾害理论研究和灾害分级管理中的一个关键问题。灾害等级合理划分与评定是灾后损失程度和影响程度评价的基础,也是编制应急预案、进行应急准备、分级响应、救助与恢复等工作的基础。事前分级标准与灾后救援的紧急程度密切相关。

马宗晋(1990)根据我国自然灾害情况,首次引入了“灾度”(disaster magnitude)概念,认为灾度是某次灾害所造成的损失大小和影响程度,是灾害等级大小的定量表述,并将自然灾害根据灾情划分为巨灾、大灾、中灾、小灾、微灾等五个灾度。国家科委全国重大自然灾害综合研究组(1994)建议把死亡达1万人、直接经济损失达100亿元人民币(1990年价格)以上

[收稿日期] 2023-11-27 [修定日期] 2024-02-29

[项目类别] 国家重点研发计划(2022YFC3006400)、防灾科技学院校内项目(2171231018)共同资助

[作者简介] 徐国栋,男,1974年生,博士,副教授,主要从事地震工程、灾害风险等方面的研究。E-mail:gdxu1850@qq.com

的灾害划为巨灾,以下每降低一个数量级,降低一个灾度。于庆东(1993)、冯利华(2000)讨论并建立了灾度评价方法和模型。国家减灾委员会、科学技术部抗震救灾专家组(2008)、史培军等(2009)将灾情指标用于重大灾害事件严重程度的评估,构建了由死亡和失踪人口、房屋倒塌、转移安置人口、平均地震烈度和地质灾害程度等多指标组成的综合灾情指数,利用综合灾情指数来评定2008年汶川地震不同灾区的受灾严重程度,在地震应急、救援和重建过程中发挥了指导作用。

在国际上,目前尝试建立统一或通用的灾害分级及定量评价模型,以便于评定和量度灾害大小和影响程度。Noy(2015)提出聚合灾害影响度量的新方法,用“生命年”作为衡量灾害损失的量化指标,定量评价灾害的影响;Caldera等(2022)建议了通用自然灾害严重程度分类方案,对灾害的影响进行定量和定性的测量、描述、比较、评级和分类,但该方案仅用到死亡失踪人数这一个重要指标,未能给出综合考虑多个损失指标的评级模型。

在前人工作的基础上,徐国栋等(2022、2023)建立了二维和多维灾度计算模型,用来评价地震灾害的严重程度。该灾度模型有严格的数学基础,当评价指标的数量和类型发生变化时,计算模型的形式保持不变,具有较好的适用性和灵活性。本文进一步将这个灾度模型应用于洪涝等自然灾害和生产安全事故(人为灾害)。

本研究采用以下概念和术语:①灾害类型。按成因将灾害类型划分为自然灾害(如地震灾害、气象灾害、地质灾害、海洋灾害等)、人为灾害(如事故灾害、卫生灾害、政治灾害等)和人为-自然灾害(如环境污染引起的酸雨、水库修建引起的诱发地震等)三大类(马宗晋,1990;Below et al,2009)。②灾情(disaster loss)与损失指标。灾情指灾害造成的损失情况,只与损失有关,可由多个损失指标进行表述,如死亡人口、受伤人口、转移安置人口、承灾体破坏程度及其数量、经济损失(直接经济损失、间接经济损失等)、资源与环境破坏等,需要能够定量表示。③各项损失指标之间的独立性和非独立性。损失指标之间没有重复计量,称这两个损失指标是独立的。如死亡人数、受伤人数、直接经济损失、间接经济损失等,这几个指标之间没有重复计量,是相互独立的。而房屋破坏程度及其数量与直接经济损失之间有重复计量,则这两个指标是非独立的。④灾度与灾害等级。灾度是灾情的综合量度,表示灾害的综合损失程度和影响程度,可采用多个独立损失指标给出灾情严重程度的综合定量表达,并根据灾度值综合评定灾害等级。

本文将灾度计算模型应用于洪涝等自然灾害评级,给出了灾度模型的一般表达式,尝试建立通用的灾害分级及定量评价模型;并将灾度模型推广应用到人为灾害(如生产安全事故等)分级与评价;此外,讨论目前生产安全事故评价标准的不足之处,建立合理的生产安全事故分级评价模型及工作流程。

1 灾度模型介绍

灾害等级 i 可划分为若干个等级,从小到大(i 取0~5)依次为极微灾、微灾、小灾、中灾、大灾、巨灾(马宗晋,1990;国家科委全国重大自然灾害综合研究组,1994),如表1所示。其中,极微灾是为满足灾害等级完整性的补充;对巨灾等级,可根据实际灾情大小进一步划分出巨灾Ⅰ、巨灾Ⅱ等。

针对灾害的灾情,可选取直接经济损失相对值、死亡人数、重伤人数、轻伤人数、受伤人

表 1 自然灾害等级及其灾度值下限 D_i 、损失指标分级值下限等参数

等级 i	灾害等级	灾度		指标分级值				
		分级值	直接经济损失	死亡	受伤	重伤	轻伤	转移安置
		下限 D_i	相对值下限 a_i (无量纲)	分级值下限 b_i /人	分级值下限 c_i /人	分级值下限 g_i /人	分级值下限 h_i /人	指标分级值下限 r_i /(人·年)
0	极微灾	0	0	0	0	0	0	0
1	微灾	2	600	1	12	4	20	200
2	小灾	4	6000	10	120	40	200	2000
3	中灾	6	60000	100	1200	400	2000	2000
4	大灾	8	600000	1000	12000	4000	20000	200000
5	巨灾 I	10	6000000	10000	120000	40000	200000	2000000
6	巨灾 II	12	60000000	100000	1200000	400000	2000000	20000000

注：①受伤人数=重伤人数+轻伤人数。在灾度计算和灾害等级评定中，如只有受伤人数数据，则不使用重伤和轻伤人数；如提供了重伤人数和轻伤人数，则不使用受伤人数。②假设 5 人轻伤，当量于 1 人重伤；4 人重伤，当量于 1 人死亡；这样可由死亡分级值下限推导出重伤人数和轻伤人数的分级值下限。③当受伤人数没有区分重伤和轻伤时，假设轻伤、重伤数量比为 5。受伤人数的分级值根据重伤人数分级值、轻伤人数分级值、轻伤重伤数量比推导得出。④单个损失指标，损失增加 10 倍，灾害等级提高 1 级。⑤本表有较好的扩充性：灾度大于等于 10 为巨灾，可根据需要，划分出巨灾 I、巨灾 II、巨灾 III 等等级；损失指标可以根据实际情况进行增减，增加的损失指标分级值下限要合理。

数等损失指标进行灾害等级评估和灾度值计算，用于灾度值计算的损失指标相互独立（即不能重复计量）。

考虑到不同地区、不同年代币值的变化，本文采用直接经济损失相对值作为灾情指标，即：直接经济损失相对值=直接经济损失/人均 GDP。采用直接经济损失相对值可以比较不同国家、不同时间灾害的直接经济损失相对大小或影响程度，避开了汇率、物价指数等不确定因素，简化了灾害等级评估模型。

在对直接经济损失进行无量纲化处理时，如果灾害年的人均 GDP 没有下降或下降轻微，则可直接用“直接经济损失/灾害年人均 GDP”作为直接经济损失相对值（无量纲）；否则需要考虑灾害年的大灾或巨灾对人均 GDP 的影响。借鉴赵阿兴等（1993）灾损率的处理思路，对大灾或巨灾，可采用“直接经济损失/（灾害年前一年人均 GDP×物价指数）”作为直接经济损失相对值（无量纲）。这里的人均 GDP 建议采用所在国的人均 GDP，便于计量和统一标准；如采用当地（如省、县等）的人均 GDP 可能造成标准不统一。另外从损失评估角度看，单位建（构）筑物的维修和重建成本、单位电器（气）和设备等造价，由于市场较统一，落后地区和发达地区没有悬殊的差别；而地区间的人均 GDP 可能相差悬殊。

对于直接经济损失相对值的分级，采用国家科委全国重大自然灾害综合研究组（1994）建议的指标：1990 年 100 亿元的直接经济损失值为巨灾下限损失值，1990 年的人均 GDP 为 1558 元，100 亿元/1558 元=6418485.24，巨灾下限的直接经济损失相对值可近似取 6.0×10^6 单位的人均 GDP；巨灾的死亡人数下限值为 10000 人。本研究改进后的自然灾害损失指标及分级值下限详见表 1。

对于地震灾害，直接经济损失（相对值）、死亡人数、受伤（重伤+轻伤）人数等是几个重要的损失指标；而对于洪涝灾害，如果预警和转移安置及时，死亡人数会明显下降，受伤人

数一般较少,因此直接经济损失(相对值)、死亡人数和转移安置人数则是洪涝灾害的重要损失指标。这里引入转移安置指标(转移安置人数×平均安置时间)作为转移安置的损失指标。对于严重的地震灾害,同样有较多的转移安置人员,转移安置指标也可纳入地震灾害等级的评定。

对于转移安置指标的分级,可参考具体灾例和依据当量等效原则进行分级:1998年的长江和淮河洪水灾害,评定为巨灾(高庆华等,2012),这一灾害持续了50余天,转移安置了1664万人,平均安置时间假设为4个月较合理,得出的转移安置指标为554.7万人·年,可初步设定巨灾的下限转移安置指标为200万人·年,则微灾的转移安置指标下限值为200人·年(当量于1人死亡),基本合理。转移安置指标的分级值见表1。

直接经济损失(相对值)、死亡人数、受伤(重伤+轻伤)人数可视为大部分自然灾害(如地震、洪涝、台风等)重要的损失指标;而转移安置指标(人·年)可视为大部分自然灾害重要的影响程度和范围指标。

自然灾害等级评定可采用表1中灾情指标的分级值,按“或模型”和“就高原则”确定地震灾害的等级。

或模型:如某自然灾害达到大灾及以上等级,直接经济损失相对值达到或超过600000;或死亡人数达到或超过1000人;或受伤人数达到或超过12000人;或重伤人数达到或超过4000人;或轻伤人数达到或超过20000人;或转移安置指标达到或超过20万人·年。

就高原则:按单个损失指标所能达到的最高灾害等级进行确定。

但“或模型”与“就高原则”只能考虑相对损失最大的指标,其他损失指标的贡献则无法计入,这使得不同灾害之间的损失相对大小和影响程度有时难以定量比较。

针对以上问题,本文给出自然灾害灾度*D*的计算模型,即

$$D = \lg \left[\left(\frac{10^{\frac{D_i}{2}}}{a_i} x \right)^2 + \left(\frac{10^{\frac{D_i}{2}}}{b_i} y \right)^2 + \left(\frac{10^{\frac{D_i}{2}}}{c_i} z \right)^2 + \left(\frac{10^{\frac{D_i}{2}}}{r_i} \omega \right)^2 + 1 \right] \\ = \lg [(Ax)^2 + (By)^2 + (Cz)^2 + (R\omega)^2 + 1] \tag{1}$$

其中,*D*为灾度值;*x*为直接经济损失相对值(无量纲),*y*为死亡人数(人),*z*为受伤人数(人),*ω*为转移安置指标(人·年);*i*为分级,*i*=1,2,3,4,5,⋯;*D_i*为*i*分级对应的灾度分级值下限;*a_i*、*b_i*、*c_i*、*r_i*为相应4个主要损失指标第*i*等级的下限值;*A*=0.017(无量纲),*B*=10/人,*C*=0.83/人,*R*=0.05/(人·年),均是与等级*i*无关的常数。*D_i*、*a_i*、*b_i*、*c_i*、*r_i*分级值下限见表1。

如果自然灾害损失数据给出重伤人数*u*(人)和轻伤人数*v*(人),使用下式计算灾度

$$D = \lg \left[\left(\frac{10^{\frac{D_i}{2}}}{a_i} x \right)^2 + \left(\frac{10^{\frac{D_i}{2}}}{b_i} y \right)^2 + \left(\frac{10^{\frac{D_i}{2}}}{g_i} u \right)^2 + \left(\frac{10^{\frac{D_i}{2}}}{h_i} v \right)^2 + \left(\frac{10^{\frac{D_i}{2}}}{r_i} \omega \right)^2 + 1 \right] \\ = \lg [(Ax)^2 + (By)^2 + (Gu)^2 + (Hv)^2 + (R\omega)^2 + 1] \tag{2}$$

其中,*g_i*、*h_i*分别为重伤人数和轻伤人数第*i*等级的下限值(表1);*G*=2.5/人,*H*=0.5/人,也是与等级*i*无关的常数。

采用式(1)或式(2)计算自然灾害灾度值*D*,依据表1用灾度值*D*评定灾害等级。对某例自然灾害可根据需要合理选用损失指标,只要选用的损失指标总体上能反映灾害的损失

大小和影响程度,损失指标选用的数量和类型不影响灾度值 D 的计算。对大部分自然灾害,直接经济损失(相对值)和死亡人数是最重要的两个损失指标,在灾度计算中往往起控制作用;受伤(重伤+轻伤)人数、转移安置指标(人·年)等重要程度不会超过直接经济损失(相对值)和死亡人数这两个指标,在灾度计算中起补充作用。

表 2 给出了 2022 年主要灾害事件和部分典型历史灾害的灾情、灾度值和灾害等级(按灾度值从大到小排序),总体上灾害等级排序和划分合理。从表 2 给出的历史灾例来看,对自然灾害的灾情统计应加强受伤(重伤+轻伤)人员分类统计、转移安置人数及时长的分类统计,以更好地反映自然灾害损失大小、影响程度及范围。

2 灾度模型的一般表达式及应用推广

2.1 自然灾害灾度模型表达式

本研究将直接经济损失(相对值)、死亡人数、受伤(重伤+轻伤)人数、转移安置指标等作为自然灾害的重要损失指标。损失指标可根据自然灾害类型进行适当增减,这里总结 n 个损失指标的自然灾害灾度模型表达式。

如果某一自然灾害灾度模型需要用到 n 个损失指标,划分为 k 个灾害等级,假设这些损失指标为 (x_1, x_2, \dots, x_n) ,第 i 级灾度 D_i 所对应的单损失指标分级值下限分别为 $(a_{1,i}, a_{2,i}, \dots, a_{n,i})$,则第 i 级灾度的下等值面方程为

$$\left(\frac{x_1}{a_{1,i}}\right)^2 + \left(\frac{x_2}{a_{2,i}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{x_n}{a_{n,i}}\right)^2 = 1, i = 1, \dots, k \quad (3)$$

在这个等值面上,要求每点的灾度值相等且为 D_i 。 D_i 为灾害等级 i 的下限灾度值,并规定 D_i 为大于等于 0 的偶数,且 $D_{i+1} - D_i = 2$ 。由此构造的自然灾害灾度 D 计算模型的表达式为

$$D = \lg \left[\left(\frac{10^{\frac{D_i}{2}}}{a_{1,i}} x_1\right)^2 + \left(\frac{10^{\frac{D_i}{2}}}{a_{2,i}} x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{10^{\frac{D_i}{2}}}{a_{n,i}} x_n\right)^2 + 1 \right] \quad (4)$$

式(4)中损失指标 $\{x_j\}$ 的 i 级灾度分级值下限 $\{a_{j,i}\}$ 的取值应符合式(5)和式(6)

$$a_{j,i} = \beta_j \times 10^{m_i}, j = 1, \dots, n; i = 1, \dots, k \quad (5)$$

其中, β_j 是与 i 无关的常数, m_i 为大于等于 0 的整数,且 $m_{i+1} - m_i = 1$ 。简单来说,对单个灾害损失指标,损失值每提高 10 倍,灾度增加一级,即 $\{a_{j,i}\}$ 的取值满足下式

$$\frac{a_{j,i+1}}{a_{j,i}} = 10, i = 1, \dots, k - 1 \quad (6)$$

而式(4)中 $(10^{\frac{D_i}{2}}/a_{j,i})$ 是与 i 无关的常数。如果令

$$A_j = 10^{\frac{D_i}{2}}/a_{j,i} \quad (7)$$

则有

$$D = \lg [(A_1 x_1)^2 + (A_2 x_2)^2 + \dots + (A_n x_n)^2 + 1] \quad (8)$$

在式(4)和式(8)中加 1,是考虑到灾害造成的损失很小或为零时,防止灾度 D 出现负数或灾度 $D = \lg(0)$ 。

本研究模型通用之处在于当自然灾害类型不同、使用的损失指标及个数不同时,依然可

表 2 部分自然灾害的灾情、本研究给出的灾度值及灾害等级

序号	发生时间	灾害事件	直接经济损失/亿元	人均GDP/元	直接经济损失相对值(无量纲)	死亡失踪人数	重伤人数	轻伤人数	受伤人数	转移安置人数/万人	安置时长/月	转移安置指标/(人·年)	灾度	灾害等级
1	1976年7月	唐山地震	132.75	329	40349544.1	242500	167500	541100	708600				12.82	巨灾 II
2	1954年	长江洪水	100.00	144	69444444.4	33000							12.16	巨灾 II
3	2008年5月	汶川地震	8523.09	22698	37549960.3	87150			374643	1510.6207	6.0	7553103.5	12.14	巨灾 II
4	1998年	江淮洪水	2104.40	6392	32922403.0	2291				1664.0000	4.0	5546666.7	11.58	巨灾 I
5	1975年	河南洪水	100.00	329	30395136.8	26000							11.51	巨灾 I
6	1988年11月	澜沧耿马地震	20.50	1366	1500732.1	748	3759	3992	7751	200.0000	3.0	500000.0	9.15	大灾
7	2021年7月	河南暴雨	1200.60	80976	1482661.5	398							8.80	大灾
8	2022年6月	闽赣湘洪涝	433.00	85698	505262.7	29				62.9000	1.0	52416.7	7.89	中灾
9	2022年3月	珠江洪涝	278.20	85698	324628.3	37				50.2000	1.0	41833.3	7.53	中灾
10	2022年9月	泸定地震	154.80	85698	180634.3	117			422	8.0000	1.0	6666.7	7.02	中灾
11	2022年2月	南方冰冻	78.90	85698	92067.5					0.8400	0.5	350.0	6.37	中灾
12	2022年8月	辽宁洪涝	76.00	85698	88683.5					3.4000	1.0	2833.3	6.34	中灾
13	2011年3月	云南盈江地震	23.85	35181	67792.3	25	134	180	314				6.16	中灾
14	2022年7月	暹芭台风	31.20	85698	36406.9					7.0000	0.2	1166.7	5.57	小灾
15	2022年7月	四川洪涝	24.80	85698	28938.8	36				1.4000	1.0	1166.7	5.56	小灾
16	2022年8月	青海大通洪灾	6.90	85698	8051.5	31				0.3300	1.0	275.0	5.06	小灾
17	2008年1月	西藏当雄地震	4.11	22698	18123.6	10	14	46	60				5.01	小灾

注：①本表包括 2022 年主要灾害事件和部分典型历史灾害，并按灾度值从小到大排序。②如果某例灾害有重伤和轻伤数据，则使用重伤和轻伤数据计算灾度值；如果只有受伤数据（没有区分重伤和轻伤），则采用受伤数据计算灾度值。③安置时长为平均值，一般没有统计，只能按灾情进行粗略估计；只要时长估计不是特别离谱，灾度值一般变化不大。如 1998 年的江淮洪水，安置时长从 4 个月增加至 8 个月，灾度值由 11.58 增至 11.78；2008 年汶川地震安置时长从 6 个月增加至 12 个月，灾度值由 12.14 增至 12.26。④在历史灾例中，只要有主要损失指标，就能给出合理的灾度值；部分损失指标统计缺失，如受伤人数、重伤和轻伤人数、转移安置人数等，对灾度值精度稍有影响。

以比较灾度大小和评定灾害等级。

2.2 灾度模型的一般表达式

以上模型的分级指标均采用式(5)的形式,即某一常数乘以 10 的几次方,构建灾度计算模型时也采用以 10 为底的对数。

这里写出更一般的表达式,灾害等级划分数为 k ,损失指标的数量为 n ,分级指标采用某一常数乘以 p 的几次方,即采用更一般的值 p 为对数底,表示某一指标值增加 p 倍,则灾度增加 1 级。灾度分级值下限 $a_{j,i}$ 表示为

$$a_{j,i} = \beta_j \times p^{m_{j,i}}, j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, k \quad (9)$$

其中, j 表示第 j 个损失指标, i 表示第 i 个灾害等级, $m_{j,i}$ 为大于等于 0 的整数,且 $m_{j,i+1} - m_{j,i} = 1$ 。对单个灾害损失指标,损失值每提高 p 倍,灾度增加一级,则 $a_{j,i}$ 的取值需满足下式

$$\frac{a_{j,i+1}}{a_{j,i}} = p, i = 1, 2, \dots, k - 1 \quad (10)$$

相应的灾度 D 计算模型的一般表达式为

$$D = \log_p \left[\left(\frac{p^{\frac{D_i}{2}}}{a_{1,i}} x_1 \right)^2 + \left(\frac{p^{\frac{D_i}{2}}}{a_{2,i}} x_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{p^{\frac{D_i}{2}}}{a_{n,i}} x_n \right)^2 + 1 \right] \quad (11)$$

式(11)即为本研究给出的灾度模型一般表达式,其中 n 是可以大于 p 的。

2.3 生产安全事故分级及评定

2007 年 4 月 9 日发布的《生产安全事故报告和调查处理条例》(国务院令 439 号),根据生产安全事故造成的人员伤亡或直接经济损失对事故进行分级,如表 3 所示。

表 3 生产安全事故分级

事故分级	死亡人数	重伤人数	直接经济损失
特别重大事故	≥30	≥100	≥1 亿元人民币
重大事故	≥10	≥50	≥5000 万人民币
较大事故	≥3	≥10	≥1000 万人民币
一般事故	<3	<10	<1000 万人民币

依据表 3,按“或模型”和“就高原则”确定事故等级。该分级方式简单易操作,但存在以下缺点:

缺点①:三个指标在分界点上数值变化明显不同。如死亡人数分级值为 30、10、3,相邻等级相差约 3 倍,而重伤人数和直接经济损失相邻分级值则相差 5 倍和 2 倍。

缺点②:直接使用直接经济损失这一指标。由于经济发展和通货膨胀等因素,需要每隔几年对该指标进行修正,否则 2007 年的 1 亿元和 2020 年的 1 亿元价值是不相同的。

缺点③:“或模型”与“就高原则”只能考虑损失最大的指标,其他损失指标的贡献则无法计入,导致不同事故之间的损失程度有时难以定量比较。例如死亡 29 人的事故与死亡 29 人且重伤 30 人的事故评级相同,说明“或模型”与“就高原则”有时给出的相对评级是不合理的。按本文的模型,前者为重大事故,而后者为特别重大事故。

缺点④:一些生产安全事故中有轻伤数据,目前的分级没有考虑轻伤人数。

缺点⑤：在某些情况下会出现分级不合理的情况。如某次事故死亡5人、重伤50人，属重大事故；但某一重伤人员不治出现死亡，则变成事故死亡6人、重伤49人，属一般事故；但明显后者损失大于前者。对定量的评估模型，要求后者的评级值要高于前者；但在某些特定的情况下，会出现后者的定量评级值小于前者的不合理情况。

将灾度模型的一般表达式(11)推广应用于事故等级评定，令 $p=3$ ；灾度分级值 D_i 为大于等于0的偶数，且 $D_{i+1}-D_i=2$ ；损失指标可采用死亡人数 x_1 、重伤人数 x_2 、轻伤人数 x_3 和直接经济损失相对值 x_4 。定义灾度 D 来表述生产安全事故(属人为灾害)的损失大小，计算公式为

$$D = \log_3 \left[\left(\frac{3^{\frac{D_i}{2}}}{a_{1,i}} x_1 \right)^2 + \left(\frac{3^{\frac{D_i}{2}}}{a_{2,i}} x_2 \right)^2 + \left(\frac{3^{\frac{D_i}{2}}}{a_{3,i}} x_3 \right)^2 + \left(\frac{3^{\frac{D_i}{2}}}{a_{4,i}} x_4 \right)^2 + 1 \right]$$

$$= \log_3 [(A_1 x_1)^2 + (A_2 x_2)^2 + (A_3 x_3)^2 + (A_4 x_4)^2 + 1] \quad (12)$$

其中， $A_1=3.00/\text{人}$ ； $A_2=0.75/\text{人}$ ； $A_3=0.15/\text{人}$ ； $A_4=0.017$ (无量纲)，与等级 i 无关。生产安全事故损失指标(死亡人数 x_1 、重伤人数 x_2 、轻伤人数 x_3 和直接经济损失相对值 x_4)的分级值下限要满足式(9)和式(10)的要求，因此不能直接采用表3中的分级值。按式(9)和式(10)建立的指标分级值、生产安全事故灾度分级值 D_i ，如表4所示。对数底和指数底为3，表示某一损失指标值增加3倍，灾度增加1级。式(12)使用了4个生产安全事故损失指标，可称为四维事故灾度计算公式，该公式可有效解决缺点①、缺点②、缺点③和缺点④，但不能完全解决缺点⑤(大多数情况下可以解决缺点⑤)。

表4 本研究给出的生产安全事故分级、灾度值下限、损失指标及分级值下限

等级 i	事故等级	灾度分级值 下限 D_i	对数底数 p	分级指标及分级值下限				对应不同年份的直接经济损失	
				死亡分级值 下限 $a_{1,i}$ /人	重伤分级值 下限 $a_{2,i}$ /人	轻伤分级值 下限 $a_{3,i}$ /人	直接经济损失 相对值下限 $a_{4,i}$ (无量纲)	2007年直接 经济损失 /万元	2020年直接 经济损失 /万元
1	安全问题	0		0	0	0	0	0	0
2	一般	2		$1 \times 3^0 = 1$	$4 \times 3^0 = 4$	$20 \times 3^0 = 20$	$0.725 \times 3^3 = 176.175$	333.57	1268.45
3	较大	4		$1 \times 3^1 = 3$	$4 \times 3^1 = 12$	$20 \times 3^1 = 60$	$0.725 \times 3^6 = 528.525$	1000.71	3805.36
4	重大	6	3	$1 \times 3^2 = 9$	$4 \times 3^2 = 36$	$20 \times 3^2 = 180$	$0.725 \times 3^7 = 1585.575$	3002.13	11416.08
5	特别重大 I	8		$1 \times 3^3 = 27$	$4 \times 3^3 = 108$	$20 \times 3^3 = 540$	$0.725 \times 3^8 = 4756.725$	9006.38	34248.23
6	特别重大 II	10		$1 \times 3^4 = 81$	$4 \times 3^4 = 324$	$20 \times 3^4 = 1620$	$0.725 \times 3^9 = 14270.175$	27019.15	102744.69
7	特别重大 III	12		$1 \times 3^5 = 243$	$4 \times 3^5 = 972$	$20 \times 3^5 = 4860$	$0.725 \times 3^{10} = 42810.525$	81057.45	308234.07
8	特别重大 IV	14		$1 \times 3^6 = 729$	$4 \times 3^6 = 2916$	$20 \times 3^6 = 14580$	$0.725 \times 3^{11} = 128431.575$	243172.34	924702.20

注：①表中的分级值和灾度模型采用死亡人数、重伤人数、轻伤人数、直接经济损失相对值这4个指标。②单个损失指标每增加3倍，事故等级增加1级。③为直观给出直接经济损失相对值分级的大小，给出了2007年和2020年对应的直接经济损失值，可以看出，由于2007年和2020年人均GDP变化很大，对应的直接经济损失也有很大变化。④本表有较好的扩展性，生产安全事故的灾度值 D 大于等于8为特别重大事故，可根据灾度值及事故分级需要，划分出特别重大 I、特别重大 II、特别重大 III、特别重大 IV 等级别。

这里采用4个损失指标来确定生产安全事故的灾度值 D ，只要损失指标的分级值下限选取合理，损失指标的个数可以大于3。

若要完全解决缺点⑤,需将死亡人数、重伤人数和轻伤人数合并为人员死亡当量。即

$$\text{人员死亡当量数} = \text{死亡人数} + \text{重伤人数} / 4 + \text{轻伤人数} / 20 \quad (13)$$

根据表 2,1 人死亡相当于 3~5 人重伤,这里取 1 人死亡相当于 4 人重伤;另取 1 人重伤当量于 5 人轻伤。

建议将轻伤人数也纳入生产安全事故等级评估。可采用人员死亡当量和直接经济损失相对值这两个指标来评定生产安全事故等级,这时灾度模型简化为二维表达式,即

$$D = \log_3 \left[\left(\frac{3^{\frac{D_i}{2}}}{a_{1,i}} x_1 \right)^2 + \left(\frac{3^{\frac{D_i}{2}}}{a_{4,i}} x_4 \right)^2 + 1 \right] \quad (14)$$

其中, x_1 为人员死亡当量数, x_4 为直接经济损失相对值。生产安全事故灾度 D 的计算公式形式、灾度分级值下限 D_i 与所用损失指标个数无关。式(12)不能完全消除缺点⑤,式(14)则可完全消除缺点⑤。

采用式(12)出现缺点⑤的可能性很小,因此认为生产安全事故灾度计算模型采用式(12)或式(14)二维退化模型均可以。

建议生产安全事故评级的工作流程可分为两步:

(1) 根据表 4 的指标及分级值,用“或模型”和“就高原则”给出生产安全事故的初步评级;

(2) 在最终事故报告中,采用式(12)或式(14)给出最终的生产安全事故评级。

本文采用假设的试验数据点验证了事故灾度模型的有效性,如表 5 所示。其中序号 1~3 的数据点没有出现损失减小而灾度增加的缺点⑤,而序号 9~12 的数据点则出现了损失减小而灾度增加的缺点⑤。

由于 Δ 个重伤人员因不治而转化为死亡人员,这时式(12)计算的灾度 D 应当有所增加,容易给出灾度 D 合理变化的条件

$$[A_1(x_1 + \Delta)]^2 + [A_2(x_2 - \Delta)]^2 \geq (A_1x_1)^2 + (A_2x_2)^2 \quad (15)$$

即

$$\frac{x_2 - \frac{1}{2}\Delta}{x_1 + \frac{1}{2}\Delta} \leq \frac{A_1^2}{A_2^2} = 16 \quad (16)$$

即当死亡人数 x_1 、重伤人数 x_2 与重伤不治人数 Δ 满足式(16)时,由于重伤不治引起的灾度值变化会合理增加,否则会出现人口损失增加而灾度 D 减少的不合理情况。式(16)和表 5 中序号 9~12 数据试验表明:当重伤人数高于死亡人数 10 倍以上,当少量重伤人员重伤不治时,灾度 D 可能会出现不合理的减少;而这种情况在实际的生产安全事故中,基本不可能出现(当重伤人数超过死亡人数的十倍以上,部分重伤人员不治死亡,可能会出现缺点⑤)。

表 5 还比较了四维事故灾度公式(12)中加 1 和不加 1 的区别:灾度小时加 1 更合理,灾度不出现负值;灾度较大时,加 1 引起的偏差很小可忽略不计。

对自然灾害灾度的计算也有类似特点。当式(1)中死亡人数 y 、受伤人数 z 、受伤不治人数 Δ 满足式(17)时,灾度值是合理的,否则也会出现缺点⑤。同样,在灾度计算时,出现缺

表 5 数据试验(假设生产安全事故损失值,由灾度模型确定事故灾度并评定事故等级)

序号	死亡人数	重伤人数	直接经济损失相对值(无量纲)	直接经济损失(2007年价)/万元	四维事故灾度(加1)	四维事故灾度(不加1)	死亡当量/人	二维事故灾度	评级变化(规范→本文模型)
1	26*	98*	0	0	8.510	8.510	50.50	9.14	重大→特别重大
2	25*	99*	0	0	8.482	8.482	49.75	9.11	重大→特别重大
3	24*	100*	0	0	8.455	8.454	49.00	9.09	特别重大
4	7	30	0	0	6.239	6.238	14.50	6.87	较大→重大
5	2	11	176	333.24	4.311**	4.303**	4.75	4.88	较大
6	0	3	10	18.93	1.645**	1.481**	0.75	1.64	安全问题
7	0	1	1	1.89	0.406**	-0.523**	0.25	0.41	安全问题
8	0	0	10	18.93	0.026**	-3.226**	0	0.03	安全问题
9	4***	97***	0	0	7.829****	7.829****	28.25	8.08	重大→特别重大
10	3***	98***	0	0	7.837****	7.837****	27.50	8.03	
11	2***	99***	0	0	7.848****	7.848****	26.75	7.98	特别重大→重大
12	1***	100***	0	0	7.862****	7.861****	26.00	7.93	

注:①表中试验数据均假设轻伤人数为0,序号1~3(标*数据)表示有重伤人员出现不治死亡的情况。死亡人数与重伤人数相差不悬殊,四维灾度合理,由上至下渐减。②采用公式(12)计算四维事故灾度,比较加1和不加1的区别(标**数据):灾度较大时,加1影响不大;灾度较小时,加1不出现负值。③试验数据序号9~12(标***数据)表示有重伤人员出现不治死亡的情况。死亡人数与重伤人数相差悬殊,四维灾度(标****数据)模型出现不合理,由上至下渐增。使用公式(14)计算二维灾度,数值合理,由上至下渐减。实际灾例中不可能出现数据序号9~12中重伤人数远大于死亡人数的情况。④序号12的试验数据评级为重大,是因为本文模型要求将特别重大事故的重伤人数分级值下限由100人修改为108人。⑤序号9~12试验数据的四维事故灾度大小出现了不合理现象,采用死亡当量代替死亡人数的二维指标,事故灾度消除了不合理现象。

点⑤的可能性很小(当受伤人数超过死亡人数达百倍以上,部分受伤人员不治死亡,可能会出现缺点⑤)。

$$\frac{z - \frac{1}{2}\Delta}{y + \frac{1}{2}\Delta} \leq \frac{B^2}{C^2} = 144 \tag{17}$$

实际评估中,使用本文的灾度计算模型评定自然灾害或人为灾害的等级,缺点⑤基本不可能出现。

表6给出了部分典型生产安全事故的灾情、灾度值和等级评定,并按灾度值从小到大排序。可以看出,本文灾度模型的评价结果合理。

2.4 灾害等级评估中的“或模型”和“并模型”讨论

在灾害(包括自然灾害和人为灾害)等级评估中,“或模型”合理,而“并模型”不合理。于庆东(1993)指出“并模型”的不合理性:在损失指标空间内存在不能划分等级的区域。从实用角度来看,当某一指标出现很大的损失值,而另一项指标的损失值很小,采用“并模型”会出现实际损失很大,但某一指标值达不到评级要求,导致灾害等级评不上去的不合理情况。

本文的灾度模型实际为修正的“或模型”,能考虑多个灾害或事故损失指标的影响和贡

表 6 部分典型型生产安全事故的灾情、灾度值和等级评定

序号	发生时间	事件名称	死亡人数	重伤人数	轻伤人数	直接经济损失 (当年价) /万元	人均 GDP (当年价) /元	直接经济损失 相对值	四维 灾度	死亡 当量 /人	二维 退化 灾度	灾度 变化 /%	规范 分级	本文评级
1	2021 年 6 月	汝城县房屋坍塌	5	0	7	734.00	80976	90.64	4.948	5.35	5.065	2.366	较大	较大
2	2021 年 9 月	大连坤马燃气爆炸	9	0	4	1797.50	80976	221.98	6.019	9.20	6.058	0.644	较大	重大
3	2019 年 5 月	上海厂房坍塌	12	10	3	3430.00	70892	483.83	6.608	14.65	6.919	4.708	重大	重大
4	2020 年 1 月	太原台骀山滑世界火灾	13	0	15	1789.97	72447	247.07	6.684	13.75	6.781	1.466	重大	重大
5	2021 年 7 月	苏州四季开源酒店坍塌	17	0	5	2615.00	80976	322.94	7.169	17.25	7.195	0.364	重大	重大
6	2020 年 8 月	襄阳聚仙饭店坍塌	29	10	18	1164.35	72447	160.72	8.139	32.40	8.333	2.384	重大	特别重大 I
7	2020 年 3 月	泉州欣佳酒店坍塌	29	0	42	5794.00	72447	799.76	8.157	31.10	8.277	1.468	重大	特别重大 I
8	2022 年 4 月	长沙自建房倒塌	54	0	9	9077.86	85698	1059.28	9.273	54.45	9.288	0.160	特别重大	特别重大 I
9	2013 年 11 月	青岛输油管道爆炸	62	0	136	75000.00	41908	17896.34	10.703	68.80	10.756	0.490	特别重大	特别重大 II
10	1989 年 8 月	黄岛油库火灾	19	0	100	3540.00	1410	25106.38	11.046	24.00	11.054	0.075	特大火灾	特别重大 II
11	2015 年 8 月	天津港火灾爆炸	165	58	740	686600.00	49351	139125.85	14.187	216.50	14.212	0.175	特别重大	特别重大 IV

注：①四维灾度采用死亡人数、重伤人数、轻伤人数和直接经济损失相对值 4 个损失指标，按式(12)计算。②二维退化灾度采用死亡当量和直接经济损失相对值 2 个损失指标，按式(14)计算。③二维退化灾度较四维灾度有所增加，增加量最大不超过 4.8%，总体上相差较小，可进一步优化死亡当量的计算参数来减小这个偏差。
 ④2015 年天津港火灾爆炸事故，由于其直接经济损失为 68.66 亿元(相对值为 139125.85 倍人均 GDP)，超过了特别重大 IV 级的直接经济损失相对值下限，至少评为特别重大 IV 级。

献,优于“或模型”+“就高原则”。

3 结语

(1)本文给出的灾度计算模型,其灾度值受单项评级最高的损失指标控制,并考虑其他损失指标的贡献。对不同的自然灾害类型,可根据情况选取不同的损失指标及指标数量,但能进行统一的灾害等级评价。

(2)本文给出了灾度计算模型的一般表达式(11),自然灾害的灾度计算模型可视为 $p=10$ 的情况,而人为灾害(如生产安全事故等)的灾度计算模型可视为 $p=3$ 的情况,其均是灾度模型一般表达式(11)的具体应用。

(3)本文给出的自然灾害灾度计算方法,使用直接经济损失相对值、死亡人数、受伤(重伤+轻伤)人数、转移安置指标(人·年)等作为损失指标,比较适合地震、洪涝、台风等自然灾害。但对旱灾等可能不是很适用,因为旱灾的需救助人数和时长是旱灾的重要影响指标,没有包括在本文的损失指标里。

对自然灾害的灾情统计,应加强受伤(重伤+轻伤)人员分类统计、转移安置人数及时长的分类统计,以更好地反映自然灾害损失大小、影响程度及范围。

(4)本文给出的人为灾害灾度计算方法,使用死亡人数、重伤人数、轻伤人数、直接经济损失相对值等作为损失指标,比较适合生产安全事故等评定。

(5)本文改进了生产安全事故的分级与评价模型,讨论了目前生产安全事故等级评价标准的不足之处,改进了生产安全事故分级评价工作流程。文中建议的生产安全事故的损失指标分级值、死亡当量计算参数等,还需要进行完善和优化。

(6)本文的灾度模型可视为修正的“或模型”,能考虑多个损失指标的影响和贡献,优于单纯的“或模型”+“就高原则”。

参考文献

- 冯利华. 2000. 灾害等级研究进展. 灾害学, **15**(3):72~76.
- 高庆华, 邓砚, 胡俊锋, 等. 2012. 亚洲巨灾事件系统解析. 北京: 气象出版社, 46~58.
- 国家减灾委员会、科学技术部抗震救灾专家组. 2008. 汶川地震灾害综合分析与评估. 北京: 科学出版社, 94~103.
- 国家科委全国重大自然灾害综合研究组. 1994. 中国重大自然灾害及减灾对策(总论). 北京: 科学出版社, 145~185.
- 马宗晋. 1990. 自然灾害与减灾. 北京: 地震出版社, 3~12.
- 史培军. 2009. 五论灾害系统研究的理论与实践. 自然灾害学报, **18**(5):1~9.
- 徐国栋, 薄景山, 李巨文, 等. 2022. 基于双损失指标的地震灾度模型. 中国地震, **38**(2):304~314.
- 徐国栋, 薄景山, 李巨文, 等. 2023. 多维损失指标的灾度计算模型. 地震工程与工程振动, **43**(3):198~207.
- 于庆东. 1993. 灾度等级判别方法的局限性及其改进. 自然灾害学报, **2**(2):8~11.
- 赵阿兴, 马宗晋. 1993. 自然灾害损失评估指标体系的研究. 自然灾害学报, **2**(3):1~7.
- Below R, Wirtz A, Guha-Sapir D. 2009. Disaster category classification and peril terminology for operational purposes. Brussels: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters.
- Caldera H J, Wirasinghe S C. 2022. A universal severity classification for natural disasters. Nat Hazards, **111**(2):1533~1573.
- Noy I. 2015. A non-monetary global measure of the direct impact of natural disasters. Wellington: School of Economics and Finance.

General Expression and Application of Disaster Magnitude Model

Xu Guodong^{1,2)}, Bo Jingshan^{1,2)}, Li Juwen^{1,2)}, Zhang Yunxia³⁾

1) School of Geological Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China

2) Hebei Key Laboratory of Earthquake Disaster Prevention and Risk Assessment, Sanhe 065201, Hebei, China

3) National Disaster Reduction Center of China, Beijing 100124, China

Abstract Disaster (natural and man-made) severity assessment plays a crucial role in effective disaster classification and management. This article introduces a methodology for assessing disaster severity using various indicators such as the relative value of direct economic losses, casualties, injuries (= serious+minor), and relocation indicators (= number of resettlement population × Average resettlement time). A unified natural disaster magnitude calculation model is proposed and demonstrated using specific examples of earthquakes, floods, and typhoons. Furthermore, the model is extended to assess the severity of man-made disasters, particularly production safety accidents. The article discusses the limitations of current severity classification standards for such accidents and presents a tailored severity classification scheme, magnitude calculation model, and workflow. The proposed model is rigorously derived mathematically and offers a unified framework controlled by the highest loss indicator while considering contributions from other indicators. Moreover, it allows for scalable and comprehensive disaster severity assessment across different disaster types. Suggestions are provided to enhance the statistics of injuries and resettlement populations for natural disasters, ensuring a more accurate reflection of the disaster's impact and scope.

Keywords: Natural disaster; Man-made disaster; Disaster magnitude; Severity classification; Direct economic loss; Resettlement indicator; Production safety accident