

The Research of a Hail Risk Evaluation under Imperfect Information

Wang wei^{1,2}, Zhou chao², Du xin²

¹ Tianjin Meteorology Science Institute, Tianjin 300074, China

² College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China

Abstract

Based on the situation of the global warming, hail disasters will maybe cause the higher risk of loss in the future. The author established a risk evaluation model of hail disasters in terms of the combination of probabilistic and physical methods. Moreover, a nonlinear finite element analysis software (ANSYS/LS-DYNA) is utilized to simulate the case that hails dash on the steel body and glass material, whose result was one of the parameters of the evaluation model. Finally, the article carried out a simulation using the hail risk evaluation model and the Monte Carlo random simulation method in terms of the historical statistical data in Tianjin. The result shows that this model can effectively assess hail disaster risk under the situation of insufficient data and information on hail disasters.

Keywords: Hail disasters, Risk evaluation, Model, Numerical simulation

冰雹灾害的风险评估方法的建立与风险模拟研究*

王 炜^{1,2} 周超² 杜鑫²

1 天津市气象科学研究所, 天津, 300074

2 南开大学环境与工程学院, 天津, 300071

摘要: 在全球气候变暖日益加剧的情况下, 未来的冰雹灾害造成的各种经济损失风险可能会更加严重。针对社会经济发展中可能遇到的冰雹灾害的损失风险问题, 作者尝试利用概率方法和物理方法相结合的手段, 建立了相应的冰雹灾害损失的评估模型。并且, 利用非线性有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 对冰雹撞击钢板和玻璃材料进行了数值模拟, 使用模拟结果确定冰雹风险评估模型的损失函数参数。最后, 利用天津市的历史统计资料, 将蒙特卡罗随机模拟手段和冰雹风险评估模型相结合, 模拟分析了天津地区冰雹灾害的损失风险。分析结果表明, 在资料信息不足的情况下, 建立的冰雹灾害风险分析模型可以有效地评估冰雹灾害造成的损失。

关键词: 冰雹灾害, 风险评估, 模型, 数值模拟

1. 引言

冰雹是重要的自然灾害之一。冰雹灾害每年都给农业、建筑、通讯、电力、交通以及人民生命财产带来巨大损失。因此, 冰雹灾害的成因和损失情况受到了许多学者的关注^[1-8]。据有关资料统计, 中国每年因冰雹所造成的经济损失达几亿元甚至几十亿元。例如, 内蒙古历史年均雹灾造成牲畜伤亡 2818 头, 年均造成人员伤亡 28 人。最严重的一次是在 1966 年 7 月 23 日, 鄂尔多斯市鄂托克旗, 冰雹砸死 2204 头牲畜, 砸伤 25945 头牲畜^[9]。2006 年 4 月 13-14 日, 在美国中西部地区发生的一场冰雹, 造成了大约 18.22 亿美元的损失^[10]。

在汽车迅速发展的时代, 冰雹对汽车的损害风险也越来越严重。如 2008 年 6 月 22 日, 一场冰雹袭击了德国北部的一个汽车厂。降落

的冰雹导致大约 30,000 新汽车被损害, 经济损失达到 1 亿欧元^[11]。2010 年 5 月 2 日下午, 中国浙江宁波突降冰雹, 降雹时间持续十几分钟。冰雹过去, 部分汽车的引擎盖上被砸出了一个一个小坑, 还有不少车辆的挡风玻璃都被砸坏, 更有甚者天窗都被冰雹打碎。

在当前气候变暖的形势下, 极端气候条件下的冰雹灾害风险会更加严重。但是, 以前的科学工作者对冰雹灾害的研究主要集中在冰雹灾害的成灾机理和冰雹天气预测等方面。由于对于冰雹灾害的潜在危害认识不足, 以前对于冰雹灾害的风险评估方法研究的研究工作开展较少。因此, 针对冰雹灾害的暴露性和承灾体的脆弱性等对象, 开展定量评估冰雹灾害的风险的研究工作, 对有效地减少冰雹造成的经济损失具有实际意义。

*本文得到中国气象局 2010 年软科学重点项目资助 (项目编号 2010007)

作者简介: 王炜 (1965-), 男 (汉族), 内蒙古巴彦淖尔盟人, 博士, 副教授, 主要从事风险分析和大气环境数值模拟。
e-mail: wwwei356@nankai.edu.cn.

2. 冰雹灾害的风险识别

2.1 冰雹灾害的风险成因和风险因素识别

2.1.1 冰雹灾害的风险成因和致灾因子

冰雹是强对流性天气引起的一种剧烈的气象灾害。一般情况下，冰雹灾害发生的范围较小、时间较短，但是它由于具有发生突然、损失强度大的特性，成为严重气象灾害之一。

冰雹灾害的主要风险源是雷暴云中降落的冰雹颗粒。所以冰雹灾害的风险大小同冰雹的粒径大小有关。然而，冰雹的粒径大小又同冰雹的成雹机制密切相关。因为，冰雹形成于一种同时具有上升气流与下沉气流的有组织的积雨云中。在这种积雨云中，强烈的上升气流不仅给雹云输送了充分的水汽，而且支撑着冰雹粒子在云中的滞留。当冰雹颗粒生长到相当大程度，上升气流无法支撑冰雹重量时，冰雹颗粒就会从空中坠落，最后在地面形成了降雹。因此，冰雹粒径的大小决定于积雨云中上升气流大小和温度层结等气象条件。

在气象学中，冰雹的严重程度，有时也用物体的大小来形容。例如，小如绿豆、黄豆，大似栗子、鸡蛋等形象化词语表示冰雹的形态。除使用形态分类方法描述冰雹的严重度外，也可以用定量方法划分降雹的严重度。大致上，气象学中将降雹分成软雹和冰雹。软雹的尺寸是2~5mm，冰雹尺寸大于5mm。也有根据冰雹的直径分为三级：(1)轻雹：多数冰雹直径不超过0.5cm；(2)中雹：多数冰雹直径0.5~2.0cm；(3)重雹：多数冰雹直径2.0cm以上。

总之，冰雹危害程度取决于冰雹尺度大小、冰雹持续时间、冰雹发生频率、冰雹覆盖区域面积等因素。

2.1.2 冰雹灾害的承灾体

冰雹的发生区域一般在地形复杂的北方山区及丘陵地区。冰雹对承灾体的伤害与当地的经济社会情况有密切的关系。在我国经济不发达时期，冰雹主要是对农业危害很大。猛烈的冰雹常常毁坏庄稼、损坏房屋、人被砸伤、打死牲畜等。现在，随着我国经济的发展，城市公共设施和家庭汽车等成为了新的受灾体。综合地分析，我国冰雹灾害的主要危害表现在农作物损失、人员伤亡、牲畜伤亡、汽车损失和建筑物损失等方面。

2.2 冰雹灾害的风险计算方法

2.2.1 单次冰雹过程的风险计算

冰雹灾害的损失的形成，主要取决于冰雹的物理特征和风险单元的暴露性和脆弱性。依靠这些主要的冰雹灾害的风险指标，可以建立下面的冰雹风险评估的数学模型：

$$R_i = A * f(E) * \sum_{i=1}^n (D_i * C_i) \quad (1)$$

上式中，A是冰雹的覆盖面积，D_i是第i种承载体的密度，C_i是第i种承灾体的单位价值，f(E)是依赖于冰雹降落动能的承灾体损失系数。

2.2.2 年均冰雹风险估算

在某地区，一年中可能发生多起冰雹灾害，但是冰雹灾害的发生次数可能是一个随机的过程。那么，一年的冰雹损失风险可以用下式估算：

$$R_a = N_{\max} * p(N < n) * R_i \quad (2)$$

式中，R_a是地区年均冰雹损失，N_{max}是某一地区的最大降雹日数，P(N<n)是小于n天的降雹累积概率，R_i是单次冰雹过程的总损失，可以利用公式(1)计算。式中N_{max}和P(N<n)相乘的结果表示了统计意义上的小于n天的降雹日数的平均值。

3. 冰雹灾害承灾体因子的量化方案

暴露量的评估就是定量地估算孕灾环境中的承灾体暴露程度。在不同的条件下，冰雹致灾因子对承灾体的危害是有差异的。如果用概率风险评估承灾体的暴露量，则暴露量的概率是一个条件概率，即承灾体完全或部分暴露在致灾因子损害范围中的发生概率。

3.1 冰雹灾害发生日数的计算

估算冰雹灾害发生日数的目的是在给定的时间t内估计冰雹事件的发生概率。一般情况下，人为或自然现象产生的灾害事件的发生次数被认为服从泊松概率。因此，冰雹日数的出现概率可以利用Poisson分布模型来模拟。在任意给定时间间隔t发生的事件数N(u)的泊松分布为：

$$P[N(u) = n | \lambda(u), t] = \frac{1}{n!} (\lambda(u), t)^n e^{-\lambda(u)t} \quad (3)$$

式中事件发生次数为n，λ(u)是指阈值超过u的泊松参数。对于单位时间(如一年)中的泊松分布可以简化为下式：

$$P[N(u) = n | \lambda(u)] = \frac{\lambda(u)^n}{n!} e^{-\lambda(u)} \quad (4)$$

在一定周期中，多次发生的冰雹灾害事件可以使用累积分布进行估算。一年中，发生次数小于n次的冰雹发生概率总和可以使用下面的累积分布计算：

$$P[N(u) < n] = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda(u)^i}{i!} e^{-\lambda(u)} \quad (5)$$

3.2 冰雹灾害的暴露量的易损价值估算函数

评估冰雹灾害的风险，首先要估算冰雹灾害的承灾体的经济价值。尤其是冰雹影响区域的承灾体的易损价值评估。

某一个区域中的承载体的易损价值取决于承灾体的数量和承灾体价值的密度。由于区域中承灾体的数量和承灾体的价值分布是一个随机性很大的事件，同时这些承灾的信息在现实世界中具有不完备信息的特征。这中不完备信息特征为灾害损失分析带来了极大的困难。但是，这些信息通常又服从于某种统计分布函数，而且这种分布函数的均值和方差是较好获取的信息。这样就可以利用承灾体的概率分布函数可以解决它的信息不完备性的缺陷。

因此，利用承灾体的价值分布函数可以较好地估算承灾体暴露量的易损价值。如果某一地区的承灾体的价值分布符合正态分布规律，则这个区域的承灾体暴露量的易损价值就可以表示为：

$$C = \int_{x_0}^x \frac{Mx}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (6)$$

在上式中， x 是承担风险的承灾体的数量变量，估算方法为 $x=A*D_i$ ， A 是冰雹致灾因子的覆盖面积， D_i 是某区域中第 i 种承载体的数量密度。 σ 是承灾体数量的方差， μ 是承灾体的数量均值， M 是单个承载体的价值均值。利用这种方法，可以将有限的承灾体易损值信息扩展为较详细的承灾体易损值信息。

3.3 冰雹造成的经济损失率的计算函数

冰雹袭击承灾体后，并非承灾体的全部价值丧失，有时只是部分价值丧失。这样，为了有效地评估冰雹灾害的经济损失，就要建立冰雹灾害的经济损失函数。

冰雹降落对承灾体的损害程度取决于冰雹的降落动能。因为，冰雹较小时，降落动能小，对承灾体的损害的可能性小；冰雹较大时，降落动能大，对承灾体的损害可能性大。这样，可以利用冰雹动能的特性，在冰雹灾害承灾体的损失率和冰雹动能之间建立一种函数关系。冰雹承灾体的经济损失率可以采用 S 型函数表示：

$$f(E) = \begin{cases} 0 & \dots \dots \dots E \leq a \\ \frac{1.0 - e^{-b(E-a)}}{1.0 + e^{-b(E-a)}} & \dots \dots \dots E > a \end{cases} \quad (7)$$

公式中， E 是冰雹的降落动能。 a 、 b 是 S 型的调节参数， a 代表了冰雹对承灾体损害的最小动能， b 是与降雹直径相关的调节参数，它可以根据实际的统计资料将损失率函数调节到符合地区的冰雹灾害的损失率。

单个冰雹的降落动能可以用动能公式

$$E = \frac{1}{2} mu^2 \text{ 计算。在冰雹的动能计算公式中，}$$

一般情况将冰雹颗粒假设为球形。这样，冰雹颗粒的质量为：

$$m = \frac{\rho_i \pi}{12} D^3 \quad (8)$$

式中， D 是冰雹的直径， ρ 是冰雹的密度（取 846kg/m^3 ）。

在冰雹动能计算中的另一个变量是冰雹的速度。冰雹由于受到空气的阻力作用，在快要降落到地面的一段时间内，冰雹颗粒是处于近似匀速运动。这时的冰雹运动速度就是冰雹的降落末速度。冰雹降落末速度公式计算如下：

$$V = \left(\frac{4\rho_i g D}{3\rho_a C_D} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

式中， ρ_a 是空气密度（取 0.9kg/m^3 ）， C_D 是阻力系数（取 0.5）。

综合冰雹颗粒的质量公式和降落末速度公式，单个冰雹的降落动能可以写成下式：

$$E = \frac{\rho_i^2 g \pi}{9\rho_a C_D} D^4 \quad (10)$$

但是在一次冰雹过程中，降落的冰雹颗粒数量很大，而且冰雹的直径大小是不相等的。在冰雹的损失评估中，可以用平均动能计算损失效率。假设冰雹的直径服从正态分布，则冰雹的平均动能为：

$$\bar{E} = \int_{D_1}^{D_2} \frac{\rho_i^2 g \pi D^4}{9\rho_a C_D \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{D-\mu}{\sigma}\right)^2} dD \quad (11)$$

式中 D_1 和 D_2 是某次冰雹天气过程中，可以成灾的冰雹颗粒的最小直径和最大直径。

4. 冰雹灾害的承灾体的损失函数的参数确定

冰雹对承灾体的损害程度取决于冰雹的降落动能和承灾体的材质。一般情况下，承灾体的材质有钢材、玻璃和农作物等。例如，冰雹灾害对汽车的直接破坏主要是车身钢板壳的凹陷或者挡风玻璃的破碎。因此，对于汽车承灾体造成的直接经济损失也就是车身钢板外壳和玻璃的置换费用。

在实际的冰雹灾害的损失评估工作中,冰雹造成的各种经济损失的实际数据不易收集,以及冰雹灾害数据的明显随机特性使得小样本数据的可靠性低。为了能在评估工作中弥补这种信息中的不足,本节利用 ANSYS 软件模拟各种粒径的冰雹以不同的末速度撞击钢板和玻璃,通过模拟得到钢板和玻璃的应力场分布、塑性应变场分布以及变形等多种结果,从而确定冰雹对钢板和玻璃的损伤。

通过数值模拟不同条件下冰雹对承灾体的损伤程度,进一步确定冰雹灾害对承灾体造成的经济损失率函数中的 a 和 b 参数。

4.1 ANSYS 的应力分析原理

4.1.1 冰雹撞击玻璃材料的非线性分析原理

在 ANSYS 程序中,分析冰雹对玻璃材料的伤害效应时,采用了非线性材料的结构分析方法,即牛顿—拉普森迭代法。牛顿—拉普森迭代法通常有三种方法:纯牛顿—拉普森迭代法、修正牛顿—拉普森迭代法和准牛顿—拉普森迭代法。前两者也称为切线刚度法,而准牛顿—拉普森迭代法也称为割线刚度法。在 ANSYS 程序中,割线刚度法被称为弧长法。

在模拟计算中,冰雹对玻璃撞击所造成的损害主要取决于撞击的冲量。这个冲量一般包括两部分:冰雹降落产生的竖直冲量和冰雹相对承灾体的水平冲量。

根据冰雹落到地面时的末速度计算公式,将冰雹的各个物理常量代入公式,可以等到简化后的计算公式:

$$V_{\perp} = \left(\frac{4\rho_i g D}{3\rho_a C_D} \right)^{\frac{1}{2}} \approx 156.7\sqrt{D} \quad (12)$$

式中, V_{\perp} 是冰雹末速度 (m/s), D 是冰雹的直径 (m)。

同样,冰雹的质量 (千克) 也可以简化为:

$$m = \frac{\rho_i \pi}{12} D^3 \approx 221.5D^3 \quad (13)$$

这样,冰雹降落产生的竖直冲量就可以简化为只与冰雹直径有关的函数关系:

$$I_{\perp} = mV_{\perp} = \frac{\rho_i \pi}{12} D^3 \left(\frac{4\rho_i g D}{3\rho_a C_D} \right)^{\frac{1}{2}} \approx 34714 D^{\frac{7}{2}} \quad (14)$$

根据防雷试验的结果,水平风速对于直径小的冰雹影响较大,然而对于直径大于 3cm 冰雹的影响可以忽略。在分析冰雹的竖直冲量时,直径小于 3cm 的冰雹的实际降落末速度可以使用静止大气中冰雹下落的末速度乘以修订系数 1.22。

对于冰雹的水平冲量,可以使用下式计算:

$$I_H = mV_H = \frac{\rho_i \pi}{12} D^3 V_H \approx 221.5D^3 V_H \quad (15)$$

式中的 V_H 是冰雹的水平运动分量。

4.1.2 冰雹撞击玻璃的模拟结果分析

在实际情况中,如果承灾体为汽车时,并假设汽车挡风玻璃的倾角为 α 。则冰雹撞击挡风玻璃的合冲量为:

$$I = I_{\perp} \cos\alpha + I_H \sin\alpha \quad (16)$$

汽车设计中的挡风玻璃倾角 α 一般为 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$, 而且现在轿车挡风玻璃倾角设计得越来越小,有些已经达到 20° 。为了讨论问题的方便,本文后面计算中的倾角 α 取 30° ; 则冰雹撞击汽车挡风玻璃的合冲量:

$$I = I_{\perp} \cos\alpha + I_H \sin\alpha = 0.866I_{\perp} + 0.5I_H \quad (17)$$

冰雹对玻璃的集中载荷 F 可以近似通过冲量与冲力的关系得到,可以表示为:

$$F = \frac{I}{\Delta t} \quad \text{。根据以往的试验结果, } \Delta t \text{ 一般取 } 0.001\text{s} \text{。}$$

当冰雹粒径达到一定直径大小时,冰雹对玻璃的集中载荷 F 使得玻璃的形变会变得很大。当应力达到一定阈值时,会因为应力超过了玻璃的抗压强度,造成玻璃破碎。

使用 ANSYS 的模拟软件,对于 0.5~10.0cm 的冰雹撞击普通玻璃和钢化玻璃进行模拟 (见图 1)。模拟结果表明 (表 1),当冰雹直径达到 4cm 时,钢化玻璃被撞击后产生的形变约为 1mm,可认为此时玻璃产生裂纹,因此,冰雹对钢化玻璃造成破坏的最小粒径为 4cm。

对于普通玻璃,冰雹直径达到 2cm 时,玻璃的形变已经大于 1mm,超出了钢化玻璃的形变量。可以认为 2cm 的冰雹会造成普通玻璃破碎。

表 1 不同粒径冰雹撞击不同速度车辆造成挡风玻璃的形变量

冰雹粒径 (cm)	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	6.0	10.0
普通玻璃 (mm)	0.011	0.111	1.151	4.564	12.228	81.059	—
钢化玻璃 (mm)	0	0.009	0.09	0.365	0.967	5.068	21.953

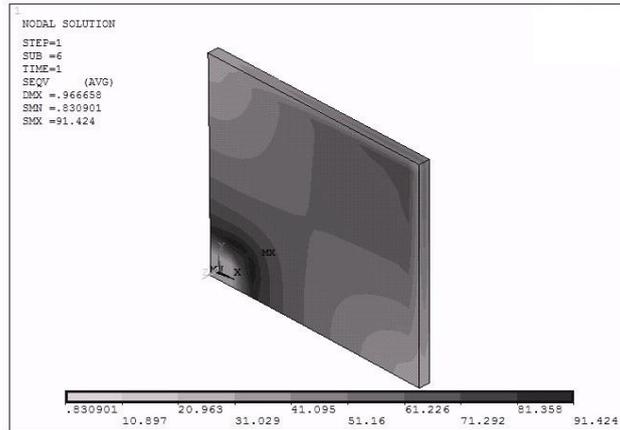


图 1 直径 4cm 冰雹撞击挡风玻璃（钢化玻璃）模拟结果

其中：DMX 为最大形变（单位：mm）；SMX 为最大应力（单位：MPa）

4.2 冰雹撞击钢板的模拟原理和分析

4.2.1 冰雹撞击钢板的显式非线性分析

在 ANSYS 程序中，对于钢板的模拟不同于玻璃的模拟方法。钢板的模拟采用了 LS-DYNA 的方法。LS-DYNA 是一个以显式为主，兼顾隐式的非线性动力有限元分析程序。它主要是在 $t+\Delta t$ 时计算位移和平均加速度：

$$\{u_{t+\Delta t}\} = [K]^{-1} \{F_{t+\Delta t}^a\} \quad (18)$$

对于线性问题，由于 K 是线性的，解是无条件稳定，计算过程可以采用大的时间步。对于非线性问题，通过一系列线性逼近（牛顿-拉普森迭代法）来获取解，要求转置非线性刚度矩阵 K ，收敛需要小的时间步。

LS-DYNA 的显式时间积分采用中心差分法在时间 t 求加速度：

$$\{a_t\} = [M]^{-1} (\{F_t^{ext}\} - \{F_t^{int}\}) \quad (19)$$

式中 F_t^{ext} ——施加外力和体力矢量；

F_t^{int} ——内力矢量，它由下式构成：

$$F_t^{int} = \sum \left(\int_{\Omega} B^T \sigma_n d\Omega + f^{hg} \right) + F^{contact} \quad (20)$$

式中三项依次为当前时刻单元应力场等效节

点力、沙漏阻力（为克服单点高斯积分引起的沙漏问题而引入的粘性阻力）和接触力矢量。

4.2.2 冰雹撞击钢板的模拟试验

冰雹对钢板材料的承灾体撞击时，会对钢板材料的承灾体造成损坏。然而，这种损坏的程度与冰雹的特性（雹的直径、质量、撞击的速度）和被撞击物的特性（几何特性和材料的特性）密切相关。由于真实的损失数据很难获取，同时在实际操作中又存在着各种各样的困难，因此冰雹撞击的数值模拟就非常必要。通过数值模拟实验可以重现撞击过程，分析撞击结果。

本节对钢板材料的实验模拟，材料参数以冰雹的承灾体汽车为对象。实验目的是利用 ANSYS/LS-DYNA 软件，通过计算不同直径冰雹的降落动能，确定不同冰雹动能撞击汽车钢板的损伤程度。同样，利用公式 (16)，可以确定冰雹撞击汽车外壳钢板末速度的计算公式 $V = 0.886V_{\perp} + 0.5V_H$ 。

一般来说，汽车外壳钢板的厚度为 0.6~0.8mm，因此，本文模拟中的钢板厚度取 0.8mm。根据模拟结果，随着冰雹粒径的增大，冰雹颗粒对钢板的撞击形变也增大（见图 2）。当冰雹颗粒直径为 3.0cm 时，钢板形变为 3mm（见表 2）。这种变形已对车辆表面造成伤害，可以认为冰雹对钢板造成破坏的最小粒径为 3.0cm。

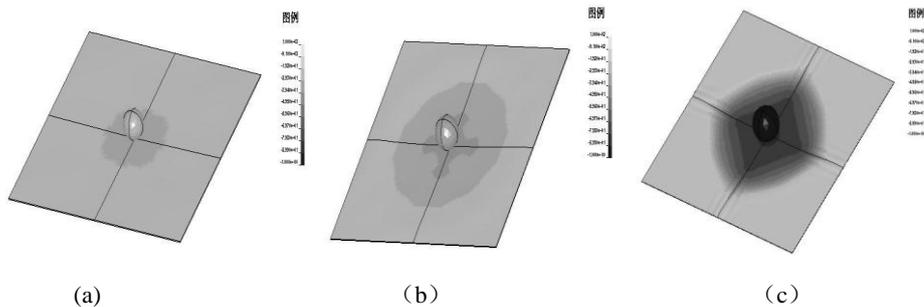


图 2 直径 2.0cm (a)、3.0cm (b) 和 6.0cm (c) 的冰雹撞击钢板的模拟结果

表 2 不同粒径冰雹撞击钢板的形变量

冰雹粒径 (cm)	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	6.0	10.0
钢板型变量 (cm)	0	0.036	0.13	0.30	0.51	1.05	28

4.3 汽车的总损失系数的确定

公式 (7) 的损失率函数是估算冰雹灾害损失的关键性因素。如果确定了冰雹伤害承灾体的最小直径, 就可以确定公式 (7) 中的冰雹最小动能参数 a, 然而参数 b 可以利用已有的数据来确定, 使得损失函数接近于真实的损失情况。

现代化城市中的大量汽车的出现, 增加了城市的冰雹灾害承灾体的类型。冰雹对汽车造成的损害主要包括车身钢板外壳的变形和玻璃破裂。因此, 对于汽车损失的评估分成了钢板表面破坏和玻璃的破碎两部分。因此, 损失率函数也分成了车身钢板表面损失和玻璃的损失。

为了讨论汽车损失率问题的方便, 分别用下标 s 和 g 表示钢板和玻璃。对于挡风玻璃来说, 参数 a_g 取直径为 4cm 的冰雹的降落动能, 则小于 4cm 的冰雹对挡风玻璃造成的损失为零, 即 $f(E)_g=0$ 。而对于车身钢板来说, 参数 a_s 取直径为 3.0cm 的冰雹的降落动能, 则小于 3.0cm 的冰雹对汽车挡风玻璃造成的损失为零, 即 $f(E)_s=0$ 。

由于参数 b 的确定与地区的经济发展水平有密切关系。这里, 作者根据天津市的历史统计数据, 确定公式 (7) 中适合天津市冰雹灾害对车辆挡风玻璃和车身钢板损失率函数的系数 b_g 和 b_s , 这两个值分别值 $0.01D_g$ 和 $0.01D_s$, 其中, D_g 和 D_s 分别是挡风玻璃和汽车钢板的形变量, 直径单位为毫米。这样, 冰雹对汽车造成的损害的总损失系数 $f(E)=f(E)_g+f(E)_s$ 。

4.4 冰雹造成农业损失系数的确定

冰雹对农业生产地区造成的危害主要是农作物, 以及生产农作物的农业设施 (如蔬菜大棚的塑料薄膜和玻璃)。冰雹出现时常与短时大风和强降雨同时出现, 对生长中的农作物破坏极大。

农作物的枝叶、茎秆、果实受到冰雹颗粒的打击, 会因叶子损失、茎秆折断、果粒脱落等伤害而形成减产。苗期的农作物遭受冰雹袭

击后, 可使幼苗受伤而不能正常生长, 若幼苗被砸伤过重, 则需重新播种而延误农事季节。农作物在灌浆成熟期受到冰雹袭击, 会直接影响并阻碍正常灌浆成熟而造成严重减产和品质变劣。果树在开花座果时遭受冰雹灾害, 会形成严重的落花落果现象而导致大幅度减产。虽然有的幼果被冰雹打伤后也可以发育成熟, 但是带有雹伤的果实商品价值会大幅度降低。然而, 果实在成熟期遭受雹灾后, 果实容易腐烂, 也不耐贮存, 常带来无法弥补的经济损失。

冰雹的危害程度主要取决于冰雹的强度、密度、持续时间和降雹的季节。冰雹直径越大, 密度越大, 危害也越严重, 成灾概率越大。

根据以往研究, 当冰雹直径大于 0.5cm 时, 就会对农业造成损失。因此, 对于农作物的雹灾风险, 公式 (7) 中的调节参数 a 就可以取 0.5cm 冰雹的动能。根据天津市冰雹灾害对农业造成损失的历史统计数据, 公式 (7) 中的系数 b 可以取值 0.01。

5. 冰雹灾害的损失风险评估分析

由于冰雹灾害具有明显的地区性特点, 本节将以天津地区为冰雹灾害的孕灾环境, 使用冰雹灾害评估模型对天津市冰雹灾害的损失风险进行评估分析。根据天津市的实际情况, 冰雹灾害的承灾体主要为汽车和农作物。

5.1 风险评估中的数据说明

冰雹的发生天数的数据来自天津市气象部门 1958 年至 2003 年的观测统计数据 (见表 3)。冰雹直径数据也是来自气象部门的观测数据。

轿车统计数量和农业产值来自天津市 2007 年的统计年鉴数据 (见表 4 和表 5)。因为统计年鉴中只将轿车分成微型汽车、小型汽车和中型汽车三类。为了讨论汽车价值的需要, 分别将这三类车作为低价、中价和高价车。

天津市各个区县的农作物的价值, 依据统计年鉴中的农业总产值计算。

表 3 1958 年至 2003 年天津市及郊区的总降雹频率

年次数	0	1	2	3	4	5	合计
总统计数	79	53	32	18	1	1	184
百分比	42.92	28.81	17.39	9.78	0.55	0.55	100.00

表 4 轿车数量统计表 (辆)

车类型	微型	小型	中型
数量	102784	504198	26002

表 5 各区县 2006 年农业总产值 (万元)

东丽区	西青区	津南区	北辰区	武清区	宝坻区	宁河县	静海县	蓟县
43939	64145	22252	52169	274835	167013	126997	126366	178131

5.2 冰雹评估模型的模拟分析

5.2.1 冰雹天气的情景设计

由于某一地区的冰雹发生天数, 以及冰雹的粒径都是一个随机变化的数据。因此, 在风险评估中要考虑这些随机特性。

一般情况下, 冰雹的发生天数服从泊松分布。这样, 依照泊松分布规律, 利用天津市的冰雹发生日数的历史统计数据, 可以确定天津地区的冰雹发生日的泊松分布函数的 λ 参数为 0.978。而且, 表 3 中的历史观测数据表明天津地区的最大年将雹日数是 5 天。

如果在冰雹灾害风险评估中, 假设冰雹的直径服从正态分布规律。这样就可以建立了天津地区的冰雹直径的正态分布模型。通过分析天津的历史降雹的粒径数据, 冰雹灾害的平均冰雹颗粒的直径约 2.5cm, 方差约 3.0,

以冰雹发生天数的泊松分布函数和冰雹直径的正态分布模型, 结合蒙特卡罗随机模拟方法, 生成天津地区冰雹天气的 10 个情景(表 6)。这些以天津市历史统计资料为基础生成的冰雹天气情景, 可以作为分析天津是冰雹灾害风险的致灾因子样本。

表 6 蒙特卡罗模拟的冰雹天气情景

序号	冰雹日数	P (N<n)	雹径 (cm)
1	2	0.548	4.33
2	1	0.368	3.18
3	1	0.368	5.50
4	1	0.368	6.15
5	2	0.548	0.87
6	2	0.548	5.24
7	1	0.368	1.98
8	2	0.548	1.50
9	2	0.548	4.12
10	1	0.368	5.30
平均	1.5	/	4.12

5.2.2 冰雹天气的汽车损失情况评估

根据天津市统计年鉴资料, 估算天津市轿车的价值均值约 7.58 万元, 方差 4.74。使用天津市的 10 个冰雹灾害的天气情景, 并采用蒙特卡罗模拟的方法产生受损的汽车数量, 通过轿车价值的正态分布模型估算出受损汽车的总价值(表 7)。

随机模拟结果显示, 受灾区域的汽车损失情况与车辆的平均价值关系密切。在受灾车辆数变化不大的情况下, 车辆平均价值越大, 冰雹灾害的损失越大。

同时, 模拟结果也显示出冰雹直径的变化对损失率的影响。当冰雹直径大于对承灾体伤害直径时, 相应的损失率函数就为大于 0 的正数。如果冰雹的直径小于对承灾体伤害直径时, 相应的损失率函数就为 0。而且冰雹直径越大, 车辆本身的损失率值也越大。

可以看出, 冰雹灾害的损失评估模型反映了承载体的价值和致灾因子的强度等综合因素的作用。

5.2.3 农作物损失情况评估

对于农业损失情况评估, 使用了天津市的 9 个具有农业生产的区县的统计数据(表 5)。并且假设这 9 个区县中的农作物的产值的面积密度分布为均匀分布。冰雹灾害的影响区域, 以 6km 宽度为基准, 长度是冰雹灾害经过区县的路径长度。

冰雹天气数据仍然使用表 6 的 10 个冰雹天气情景数据。估算的天津地区各个农业生产区的一年内的冰雹灾害造成的损失情况如表 8 所示。

依据表 8 的评估结果和表 6 的冰雹天气情景数据可以看出, 冰雹灾害评估模式评估的农作物的经济损失是随着冰雹的粒径增加, 冰雹

灾害的损失也在增加。而且冰雹天数多的情景 造成的农业损失明显高于发生天数少的情景。

表 7 冰雹天气造成的汽车损失（万元）

序号	$f(E)_g$	$f(E)_s$	$f(E)$	受损车辆数	受灾车辆均价	受灾车辆总损失
1	2.858E-3	4.416E-3	7.274E-3	317	7.58	9.5780
2	0	1.910E-4	1.910E-4	454	6.07	0.1936
3	6.017E-2	1.996E-2	8.013E-2	748	12.77	281.6772
4	1.594E-1	4.036E-2	1.997E-1	366	16.46	442.7544
5	0	0	0	0	0	0
6	3.629e-2	1.574E-2	5.203E-2	436	11.83	147.0581
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	9.350E-4	2.930E-3	3.865E-3	552	7.77	9.0851
10	4.087E-2	1.676E-2	5.763E-2	309	10.79	70.7043
平均	-	-	-	359.3	8.431	96.1

表 8 冰雹天气造成的农业损失（万元）

区县	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
东丽区	4590.4	449.43	3943.7	5992.8	6.6865	9739.8	2680.3	65.503	3766.2	3418.2
西青区	6701.3	656.11	5757.3	8748.7	9.7614	14219	3912.8	95.626	5498.1	4990.1
津南区	2324.7	227.6	1997.2	3034.9	3.3863	4932.5	1357.4	33.173	1907.3	1731.1
北辰区	5450.2	533.61	4682.4	7115.3	7.939	11564	3182.3	77.772	4471.6	4058.5
武清区	28712	2811.1	24668	37485	41.824	60922	16765	409.72	23557	21381
宝坻区	17448	1708.3	14990	22779	25.416	37021	10188	248.98	14315	12993
宁河县	13268	1299	11399	17321	19.326	28151	7746.8	189.32	10885	9879.7
静海县	13202	1292.5	11342	17235	19.23	28011	7708.3	188.38	10831	9830.6
蓟县	18610	1822	15988	24295	27.108	39486	10866	265.55	15268	13858

5.2.4 讨论

模拟实验的结果说明通过概率方法和物理方法结合构建的冰雹灾害的评估模型，能够综合反映致灾因子强度和承灾体价值情况。而且，评估模型可以应用于汽车、建筑玻璃和农作物等损失评估。

但是，评估模型中的承载体的价值损失率函数的准确评估是一个复杂的问题，同承灾体的地理分布关系密切，需要在实际工作中使用实际数据不断地完善。

6. 结论

(1) 针对冰雹灾害对社会经济造成的损失风险问题，作者利用物理方法和概率方法建立了相应的冰雹灾害的风险评估的数学模型。

(2) 利用 ANSYS 软件和 LS-DYNA 软件分别模拟了不同粒径的冰雹撞击汽车挡风玻璃（钢化玻璃）和车身钢板以及建筑物玻璃（普通玻璃）造成的损害情况。模拟结果表明，而当冰雹直径达到 2.0cm 时，冰雹会对建筑物的普通玻璃产生破坏。当冰雹颗粒直径为 3.0cm 时，冰雹可以对汽车外壳钢板造成了损失；而当冰雹直径达到 4.0cm 时，冰雹会对汽车的挡风玻璃产生破坏。

(3) 根据天津市的历史统计资料，利用建立的冰雹灾害风险评估数学模型，对天津市的冰雹灾害损失做了模拟分析。分析结果表

明，在资料信息不足的情况下，本数学模型是有效的冰雹灾害损失的综合评估模型。

本研究只是对冰雹灾害风险评估建模的理论研究，如果将冰雹风险模型与 GIS 系统相结合，可以做到冰雹灾害风险的定点风险分析，这会更加有利于冰雹灾害的风险管理。

参考文献：

1. S. A. Changnon, The scales of hail. *Journal of Applied Meteorology*, 16(1977) 626–648.
2. I. Kuhnelt, The use of a multifactor Southern Oscillation Index for the estimation of annual hailstorm frequencies in the Sydney area, *Int. J. Climatol*, 18(1998) 841–858.
3. W. Wang and H. Z. Jia, Forecasting Hail with Radar Vertically Integrated Liquid Data, *Meteorological Monthly*, 28(1) (2002) 47–48.
4. Y. L. Jin and Q. Zhang, A Case Study of Synoptic Process and Inner Structure of Hails in Beijing, *Meteorological Monthly*, 28(1) (2002) 18–20.
5. A. Bengtsson and C. Nilsson, Extreme value modelling of storm damage in Swedish forests, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 7(2007) 515–521.
6. R. LEIGH and I. KUHNEL, Hailstorm Loss Modelling and Risk Assessment in the Sydney Region, Australia. *Natural Hazard*,

- 24(2001) 171~185.
7. P. DAMIR, Comparison of Hail Characteristics in NW Croatia for Two Periods, *Natural Hazards*, 29(2003) 543~552.
 8. S. Hergarten , Aspects of risk assessment in power-law distributed natural hazards, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 4 (2004) 309~313.
 9. J. W. Han, H. M. Wang and L. Wu, The analysis and assessment on thunderstorm and hail disasters and the counter measures in InnerMongolia, *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 23 (7) (2009)31~38.
 10. A. C. Stanley, Increasing major hail losses in the U.S., *Climatic Change*, 96(2009) 161~166.
 11. M. Julian, Damaging hail hits VW, *weather*,63 (2008),p218.
 12. European Commission (eds.), First Report on the Harmonisation of Risk Assessment Procedures ,(DG Health & Consumer Protection, Brussels,2000).
 13. R. Edmund, F. Peter and R. David, Estimating Injury and Loss of Life in Floods: A Deterministic Framework, *Natural Hazard*, 36(2005) 43-64.
 14. Y. Zhang and Z. Lei, Static Characteristic and Impact Fracture Behavior of Automobile Glass. *Journal of Mechanical Engineering*, 45(2)(2009) 64~75.