

邹炽导, 陆华忠, 吕恩利, 等. 荔枝冷库贮藏风险识别与分析[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(16): 161–165.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.16.041

# 荔枝冷库贮藏风险识别与分析

邹炽导<sup>1,2,3</sup>, 陆华忠<sup>1,2</sup>, 吕恩利<sup>1,2</sup>, 曾志雄<sup>1,2</sup>, 杨松夏<sup>1</sup>

(1. 华南农业大学工程学院, 广东广州 510642; 2. 广东省农产品冷链物流工程技术研究中心, 广东广州 510642;

3. 广东省教育考试院, 广东广州 510631)

**摘要:**对荔枝冷库贮藏的风险进行识别与分析, 有助于控制风险事故发生概率, 提高荔枝的销售品质。首先建立荔枝冷库贮藏的霍尔三维因素空间模型, 结合实际得到安全事件、时空结构(工位)、事故致因的因素集, 然后建立风险因素关系矩阵, 计算得出不同工位下荔枝冷库贮藏的风险基本事件。根据分析结果, 建立荔枝冷库贮藏的故障树模型, 求解得到最小割集。针对风险基本事件难以量化的现状, 进行专家问卷评价。采用梯形模糊数及左右模糊排序法, 将专家的评判语言转化为风险概率值。计算荔枝冷库贮藏事故发生概率( $g=0.028$ )及风险基本事件的概率重要度, 分析并提出防范风险事故发生的措施。

**关键词:**霍尔三维结构; 因素空间; 荔枝; 冷库贮藏; 模糊故障树; 风险分析

**中图分类号:** S667.109+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)16-0161-05

我国是荔枝的主产区, 其产量占世界总产量的 65%~70%。荔枝属于无呼吸高峰期果实, 若采摘后置于常温下其呼吸强度将会直线上升, 并失水变褐, 当褐变指数 $>2$ 时, 失去商品性。低温冷库贮藏能显著抑制荔枝果实的呼吸强度和乙烯释放量, 在 0℃下果实几乎不产生乙烯, 且能抑制多酚氧化酶的活性和微生物的活动, 延长荔枝果实的贮藏期。荔枝贮藏期间的温度、湿度须保持相对稳定, 不宜多变或骤变<sup>[1-2]</sup>。

近年来, 关于荔枝冷库贮藏的研究主要集中在不同贮藏技术条件下荔枝衰老指标的变化方面, 研究重点主要是荔枝的内外品质、营养物质、呼吸作用、果皮褐变机制、自由基衰老理论、细胞结构理论等<sup>[3-6]</sup>。从系统角度构建模型, 对荔枝冷库贮藏过程进行风险识别、风险分析、风险控制的研究成果尚不多见。

本研究运用系统安全工程思想将霍尔三维结构模型、因素空间数学方法、故障树分析方法、模糊数学等结合起来, 通过构建霍尔三维因素空间模型及模糊故障树模型, 实现对冷库贮藏的风险识别与分析。根据风险识别及分析结果, 提出荔枝冷库贮藏的风险防控措施, 以期达到降低食品安全风险的目的。

## 1 荔枝冷库贮藏霍尔三维因素空间模型

### 1.1 荔枝冷库贮藏概述

荔枝保鲜主要采用低温冷藏, 目前低温冷库和低温气调库是被广泛应用的低温贮藏设施。在贮藏过程中, 荔枝品质变化主要表现为机械损伤、失水增多、果皮褐变、可滴定酸含量和可溶性固形物含量下降等。对于多数荔枝品种而言, 适

宜的保鲜参数分别是温度为 1~5℃,  $O_2$  浓度为 3%~5%,  $CO_2$  浓度为 3%~5%, 相对湿度为 90%~95%; 保鲜参数中优先级最高的是温度<sup>[7]</sup>。

### 1.2 霍尔三维结构及因素空间理论

霍尔三维结构是系统工程的分析方法, 它为了解决大型复杂系统的分析、规划、组织、协调、控制问题提供了一种统一的思想方法, 已被广泛应用于工程设计、系统管理等<sup>[8]</sup>。霍尔三维结构将系统工程整个活动过程分为前后紧密衔接的多个阶段和相关的影响因素, 形成了由时间维、逻辑维、知识维所组成的三维空间结构<sup>[9]</sup>, 该三维空间结构体系形象地描述了系统工程研究的框架, 对其中任一阶段和每一个步骤又可进一步展开, 形成分层次的立体结构体系。

因素空间是一种建立在模糊数学基础上的新型知识信息表示方法, 将可观测与分析的事物信息作为知识概念的表现外延, 对概念进行量化描述, 进而可以采取一系列数学方法进行处理, 这就为系统安全的风​​险识别提供了基础<sup>[10-11]</sup>。因此, 因素空间在事件描述、风险识别、故障诊断等方面均有良好的应用前景。

### 1.3 荔枝冷库贮藏霍尔三维因素空间模型构建

荔枝冷库贮藏是一个比较复杂的系统, 包含较多的时空结构(工位)及影响因素。生产活动安全事件的发生分布在不同的工位上, 而且不同工位事故致因也不相同<sup>[12]</sup>。依据霍尔三维结构, 将荔枝冷库贮藏的风险情况划分为事故致因( $X$ 轴)、时空结构( $Y$ 轴)、安全事件( $Z$ 轴)等 3 个维度(图 1), 这 3 个维度在空间上存在着互相映射的关系。荔枝冷库贮藏的安全事件发生在一定的时空结构中, 并且由某个事故致因造成。

在霍尔三维结构划分(图 1)中,  $X$ 轴为事故致因维度, 表示荔枝冷库贮藏中造成事故损伤的致因因素, 设事故致因的因素集为  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 。在  $X$ 轴事故致因维度上有  $U = \{\text{处理速度, 荔枝待处理量, 挤压, 碰撞, 震动, 温度, 湿度, 风度, } \dots, \text{卫生状况}\}$ 。

收稿日期: 2017-03-14

基金项目: 国家科技支撑计划(编号: 2013BAD19B01); 现代农业产业技术体系建设专项资金(编号: CARS-33-13)。

作者简介: 邹炽导(1983—), 男, 广东梅州人, 博士研究生, 研究方向为果蔬包装及冷链技术。E-mail: zcd83@163.com。

通信作者: 陆华忠, 博士, 教授, 研究方向为农业工程。E-mail: huazlu@scau.edu.cn。

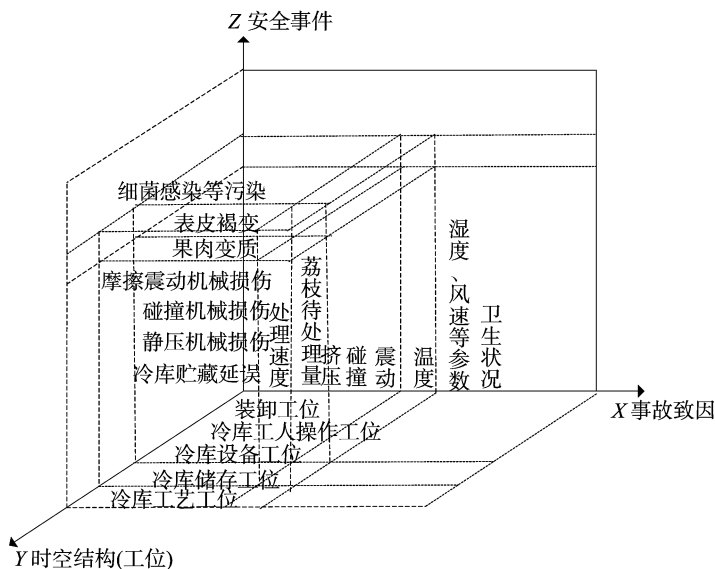


图1 冷库贮藏霍尔三维结构

生产流程中的不同工位同时具有时间及空间特征,因此  $Y$  轴表示时空结构(工位)维度,设工位的因素集为  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_i\}$ 。在  $Y$  轴时空结构(工位)维度上有  $W = \{\text{装卸工位, 冷库工人操作工位, 冷库设备工位, 冷库储存工位, 冷库工艺工位}\}$ 。

$Z$  轴表示生产环节中具体的安全事件维度,设安全事件的因素集为  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 。在  $Z$  轴的安全事件维度上有  $V = \{\text{冷库贮藏延误, 静压机械损伤, 碰撞机械损伤, 摩擦震动机械损伤, 果肉变质, 表皮褐变, 细菌感染等污染}\}$ 。

$X$  轴坐标与  $Z$  轴坐标的交叉点表示事故致因的因素造成了安全事件的发生; $Y$  轴坐标与  $Z$  轴坐标的交叉点表示某一个工位上发生的安全事件。 $X$  轴坐标与  $Y$  轴坐标的交叉点表示在某一个工位上存在造成安全事件的事故致因。任何一个危险源事件,可以在三维结构空间中找到它对应的坐标。

#### 1.4 荔枝冷库风险识别

设  $F(v, u)$  为安全事件集  $V$  到事故致因的因素集  $U$  的关系,  $v \in V, u \in U$ 。关系  $F(v, u)$  可以用一个矩阵  $F(v, u) = [f_{ij}]_{m \times n}$  来描述,称之为安全事件—事故致因因素关系矩阵。类似地,建立  $V$  到  $W$  的关系矩阵  $P(v, w) = [p_{ij}]_{m \times q}$ ,称之为安全事件—工位关系矩阵。

$$F(v, u) = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{m1} & f_{m2} & \cdots & f_{mn} \end{bmatrix};$$

$$f_{ij} = \begin{cases} 1, & u_j \text{ 是 } v_i \text{ 可能发生的安全事故致因因素} \\ 0, & u_j \text{ 不是 } v_i \text{ 可能发生的安全事故致因因素} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。

$$P(v, w) = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1q} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mq} \end{bmatrix};$$

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & w_j \text{ 是 } v_i \text{ 可能发生的工位} \\ 0, & w_j \text{ 不是 } v_i \text{ 可能发生的工位} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, q$ 。

根据实地调研分析冷库的各个风险事件集与事故致因集的关系及风险事件集与工位集的关系,建立因素关系矩阵  $F(v, u)$  与  $P(v, w)$ :

$$F(v, u) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$P(v, w) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}。$$

因为  $P(v, w)$  是集合  $V$  到  $W$  的关系,  $F(v, u)$  是集合  $V$  到  $U$  的关系,于是,  $P(v, w)$  的转置  $P^T(v, w)$  是集合  $W$  到  $V$  的关系。合成  $P^T(v, w)$  与  $F(v, u)$  得到安全事件关键工位集合  $W$  到事故致因  $U$  的工位—事故致因关系  $S(w, u)$ 。

$$P^T(v, w) = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{21} & \cdots & p_{m1} \\ p_{12} & p_{22} & \cdots & p_{m2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{1q} & p_{2q} & \cdots & p_{mq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1m} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{q1} & t_{q2} & \cdots & t_{qm} \end{bmatrix}。 \quad (3)$$

记  $P^T(v, w)$  与  $F(v, u)$  的合成关系:

$$S(w, u) = P^T(v, w) \times F(v, u) = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1m} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{q1} & t_{q2} & \cdots & t_{qm} \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{m1} & f_{m2} & \cdots & f_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{q1} & s_{q2} & \cdots & s_{qn} \end{bmatrix} \circ \quad (4)$$

其中,  $S_{ij} = (t_{i1} \wedge f_{1j}) \vee (t_{i2} \wedge f_{2j}) \vee \cdots \vee (t_{im} \wedge f_{mj}) = V_{k=1}^m (t_{ik} \wedge f_{kj})$ ;  $a \wedge b = \min\{a, b\}$ ,  $a \vee b = \max\{a, b\}$ 。

根据前面分析得到的  $F(v, u)$  及  $P(v, w)$ , 对矩阵进行布尔运算得到:

$$S(w, u) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \circ$$

根据上面分析得到的矩阵  $S(w, u)$  所体现的关系, 结合对荔枝冷库各环节的调研及小组讨论, 分析各个工位事故致因活动因素, 得到基本风险事件。例如, 装卸工位主要事故致因有碰撞、震动, 主要原因是装卸操作流程不规范。依次类推, 得到的风险基本事件为冷库设备故障 ( $D_1$ )、冷库设备不足 ( $D_2$ )、冷库环境参数不适宜 ( $D_3$ )、冷库卫生环境状况差 ( $D_4$ )、装卸操作流程不规范 ( $D_5$ )、温度监控缺失 ( $D_6$ )、冷库操作失误 ( $D_7$ )、冷库堆放方式不当 ( $D_8$ )、违反冷库操作规程 ( $D_9$ )、冷库作业管理松散 ( $D_{10}$ )、冷藏流程衔接不畅 ( $D_{11}$ ) 等。

## 2 荔枝冷库贮藏故障树模型分析

### 2.1 荔枝冷库贮藏故障树模型构建

故障树分析方法是一种演绎推理法, 把系统可能发生的某种事故与导致事故发生的各种原因之间的逻辑关系通过树形图表示出来, 通过对故障树的定性定量分析找出事故发生的主要原因, 为确定安全对策、提高系统可靠性提供依据, 以达到预测与预防事故发生的目的<sup>[13-14]</sup>。根据前面分析得到的风险基本事件, 结合冷库贮藏的实际生产情况, 构建荔枝冷库贮藏故障树。通过对冷库生产环节进行分析得到中间事件为冷库延误 ( $M_1$ )、冷藏损伤 ( $M_2$ )、冷藏品质变质 ( $M_3$ )、冷藏操作因素 ( $M_4$ )、冷库环境因素 ( $M_5$ )。构建顶事件为荔枝冷库贮藏事故 ( $T$ ) 的故障树 (图 2), 该故障树由前面分析得到的 11 个基本风险事件及 5 个中间事件组成。

### 2.2 荔枝冷库贮藏故障树最小割集

根据布尔运算规则<sup>[15]</sup>, 运算得到 10 个最小割集, 具体的割集为  $\{D_2\}$ 、 $\{D_5\}$ 、 $\{D_1, D_6\}$ 、 $\{D_{11}\}$ 、 $\{D_{10}\}$ 、 $\{D_4\}$ 、 $\{D_6, D_7\}$ 、 $\{D_6, D_9\}$ 、 $\{D_6, D_8\}$ 、 $\{D_3\}$ 。对这 10 个事件而言, 只要任意 1 个最小割集发生, 就会导致顶事故发生。

表 1 模糊数形式和截集

模糊语言	模糊数形式	$\lambda$ 截集
小	$f_L = (0.00, 0.00, 0.10, 0.25)$	$f_L^\lambda = [0, 0.025 - 0.150\lambda]$
较小	$f_{FL} = (0.10, 0.25, 0.35, 0.50)$	$f_{FL}^\lambda = [0.10 + 0.15\lambda, 0.50 - 0.15\lambda]$
中等	$f_M = (0.35, 0.45, 0.55, 0.65)$	$f_M^\lambda = [0.35 + 0.15\lambda, 0.65 - 0.15\lambda]$
较大	$f_{FH} = (0.50, 0.65, 0.75, 0.90)$	$f_{FH}^\lambda = [0.50 + 0.15\lambda, 0.90 - 0.15\lambda]$
大	$f_H = (0.75, 0.90, 1.00, 1.00)$	$f_H^\lambda = [0.75 + 0.15\lambda, 1.00]$

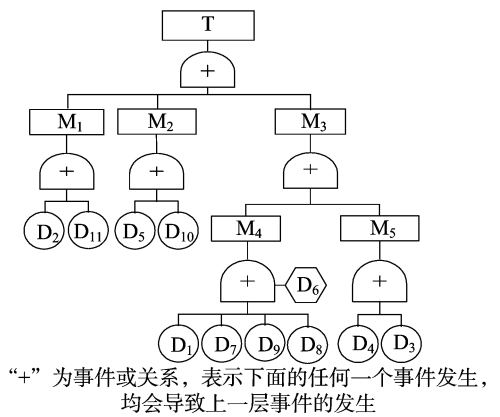


图2 冷库贮藏故障树

## 3 荔枝冷库贮藏模糊故障树分析

### 3.1 专家评判语言的梯形模糊数构建

由于冷库贮藏危险事件发生致因的复杂性及偶然性, 即使专家也难以对其风险发生概率给出精确的数值表征, 因此, 采用主观的语言对风险概率进行描述并建立模糊集进行处理往往具有独到的优势。本研究采用梯形模糊数方法将专家对冷库贮藏危险事件发生概率的主观评价语言转化为定量表征, 构建风险低、风险较低、风险中、风险较高、风险高等 5 个评价指标。根据指标的隶属习惯, 采用梯形模糊数表示这些语言变量。

根据语言变量的模糊数形式 (图 3), 得到隶属函数梯形模糊数  $f = (x, a, b, c, d)$  的隶属函数, 其表达式为

$$f(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b < x < c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x \leq d \\ 0 & d < x \end{cases} \quad (5)$$

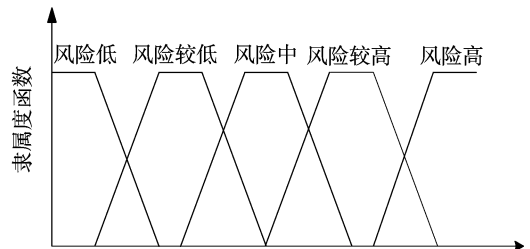


图3 表示语言变量的模糊数

模糊数形式和模糊截集如表 1 所示, 其中下标 L、FL、M、FH、H 分别表示小、较小、中等、较大、大。

3.2 模糊数转化为风险事件发生概率

选择该领域的高校、科研院所以及企业的专家共发放 24 份专家调查问卷,专家对各个基本事件进行评价,通过计算评价数据的平均值形成各个基本事件在评价标准上的隶属度。如对事件  $D_1$  的专家权重为 (0. 292, 0. 250, 0. 208, 0. 167, 0. 083);通过对专家权重与  $\lambda$  截集的合成,可以得到  $D_1$  事件的截集合成为  $W_1 = [0. 244 + 0. 106\lambda, 0. 567 - 0. 138\lambda]$ 。

根据模糊扩展理论<sup>[16-17]</sup>可知,  $W_1$  也是模糊集,因此  $W_{1\lambda} = [0. 244 + 0. 106\lambda, 0. 567 - 0. 138\lambda]$ ;则  $\lambda$  分别为:  
 $\lambda = \frac{z_1 - 0. 244}{0. 106}, \lambda = \frac{0. 567 - z_2}{0. 138}$ ,其中  $z_1, z_2$  分别为  $W_{1\lambda}$  的集合  $[z_1, z_2]$  的 2 个边界,  $W_{1\lambda}$  表示  $W_1$  的截集。

平均模糊数  $W_1$  的关系函数为

$$fW(z) = \begin{cases} \frac{z_1 - 0. 244}{0. 106}, & 0. 244 < x \leq 0. 35 \\ 1, & 0. 35 < x \leq 0. 429 \\ \frac{0. 567 - z_2}{0. 138}, & 0. 429 < x \leq 0. 567 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

根据左右模糊排序法,把  $D_1$  的模糊数转化为一个清晰的数值,称为模糊可能性值 (fuzzy possibly set, 简称 FPS),则建立的最大模糊集和最小模糊集分别为<sup>[18-19]</sup>

$$f_{\max} = \begin{cases} x & (0 < x \leq 1) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}; \quad (7)$$

$$f_{\min} = \begin{cases} 1 - x & (0 < x \leq 1) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (8)$$

则模糊数  $W_1$  的左 (FPSR)、右 (FPSL) 模糊可能性值分别为

$$FPSR(W_1) = \sup_x [fw(x) \wedge f_{\max}(x)] = 0. 498;$$

$$FPSL(W_1) = \sup_x [fw(x) \wedge f_{\min}(x)] = 0. 684。$$

模糊数  $W_1$  的可能性值为

$$FPS(W_1) = \{FPSR(W_1) + [1 - FPSL(W_1)]\} / 2 = 0. 407。$$

把模糊可能性值 FPS 转化为模糊失效概率 (fuzzy failure greater than R, 简称 FFR)<sup>[20]</sup>:

$$FFR = \begin{cases} \frac{1}{10^K} (FPS \neq 0) \\ 0 (FPS = 0) \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $K = \left[ \frac{1 - FPS}{FPS} \right]^+$  计算可得:  $K = 2. 607$ ;

$$FFR = 2. 468 \times 10^{-3}。$$

以此类推,计算出其他风险基本事件的发生概率 (表 2)。

表 2 风险基本事件发生概率

事件	事件发生概率
$D_1$	$2. 468 \times 10^{-3}$
$D_2$	$4. 746 \times 10^{-3}$
$D_3$	$4. 525 \times 10^{-3}$
$D_4$	$3. 817 \times 10^{-3}$
$D_5$	$4. 748 \times 10^{-3}$
$D_6$	$5. 858 \times 10^{-3}$
$D_7$	$2. 539 \times 10^{-3}$
$D_8$	$3. 051 \times 10^{-3}$
$D_9$	$3. 017 \times 10^{-3}$
$D_{10}$	$4. 724 \times 10^{-3}$
$D_{11}$	$5. 857 \times 10^{-3}$

4 荔枝冷库贮藏风险评价及优化

4.1 荔枝冷库贮藏风险评价

在求出各基本事件发生概率的情况下,计算或估算系统顶事件发生的概率以及与系统有关的可靠性特征。设荔枝冷库贮藏风险事故发生概率为  $g$ ,由于最小割集中存在重复事件,因此,通过最小割集计算顶事件发生概率的公式为<sup>[21-22]</sup>:

$$g = \sum_{i=1}^{N_g} \prod_{j \in G_i} q_j - \sum_{1 \leq r < s \leq N_g} \prod_{j \in G_r \cup G_s} q_j + \cdots + (-1)^{N_g-1} \prod_{j=1}^{N_g} q_j \quad (10)$$

式中:  $q_i$  表示第  $i$  基本事件的发生概率;  $i$  表示基本事件序号;

$r, s$  分别表示最小割集序号;  $\sum_{i=1}^{N_g}$  表示求  $N$  项代数数和;

$\sum_{1 \leq r < s \leq N_g} \prod_{j \in G_r \cup G_s}$  表示属于任意 2 个不同最小割集基本事件发生概率的代数数和。  $X_i \in G_r \cup G_s$ , 表示第  $i$  基本事件或属于第  $r$  最小割集,或属于第  $s$  最小割集;  $1 \leq r < s \leq N_g$  表示任意 2 个最小割集的组合顺序。

将得到的各个风险基本事件发生概率代入上述公式,经过计算得出顶事故发生概率为  $g = 0. 028$ 。根据食品安全事故风险等级划分<sup>[23-24]</sup>,荔枝冷库贮藏的风险等级为低风险。

4.2 荔枝冷库贮藏风险基本事件概率重要度

基本事件发生概率的变化会给顶事件发生概率以多大影响,就要分析基本事件的概率重要度<sup>[25]</sup>。利用顶事件发生概率  $Q$  函数的多重线性函数性质,只要对自变量  $q_i$  求一次偏导数,就可得出该基本事件的概率重要度系数<sup>[26]</sup>。公式为

$$I_{q(i)} = \frac{\partial Q}{\partial q_i} \quad (8)$$

根据公式 (8) 求得各个风险基本事件概率重要度 (表 3)。

表 3 风险基本事件概率重要度

事件	概率重要度
$D_1$	0. 005 7
$D_2$	0. 976 4
$D_3$	0. 976 2
$D_4$	0. 975 6
$D_5$	0. 976 4
$D_6$	0. 010 7
$D_7$	0. 005 7
$D_8$	0. 005 7
$D_9$	0. 005 7
$D_{10}$	0. 976 4
$D_{11}$	0. 977 6

4.3 荔枝冷库贮藏风险防范对策

由表 3 可知,在荔枝冷库贮藏风险基本事件的概率重要度中大于 0. 900 的有 6 个事件,占风险事件总数的比例为 54. 5%,主要有冷库设备不足 ( $D_2$ )、冷藏流程衔接不畅 ( $D_{11}$ )、装卸操作流程不规范 ( $D_5$ )、冷库作业管理松散 ( $D_{10}$ )、冷库卫生环境状况差 ( $D_4$ )、冷库环境参数不适宜 ( $D_3$ )。

4.3.1 加强安全培训,提高工人技能 装卸操作流程不规范 ( $D_5$ ) 主要是由于员工安全意识薄弱、生产技能低下、违章作业等造成的。首先应加强员工安全意识教育,让员工牢固树立安全生产意识,对荔枝冷库贮藏中事故造成的损失有深入的认识。其次要加强技能培训,围绕荔枝冷库贮藏作业的流程、工艺要求和设备设施操作规范等加强对员工安全生产技能培训。

4.3.2 加大设备投入,提高冷库技术水平 冷库设备不足( $D_2$ )、冷库卫生环境状况差( $D_4$ )、冷库环境参数不适宜( $D_3$ ),这些风险基本事件主要是由于冷库设施投入不足,技术及作业水平偏低造成的。冷库设备投入不足是制约冷库贮藏质量水平的首要影响因素,加大冷库设备投入能提高冷库的贮藏质量水平。其次,冷库卫生状况、环境参数的调节与冷库作业水平息息相关,提高冷库作业的标准化水平有助于降低冷库风险事故的发生。

4.3.3 加强信息化建设,提高冷库管理水平 冷藏流程衔接不畅( $D_{11}$ )、冷库作业管理松散( $D_{10}$ ),这些风险基本事件主要是由管理水平不高造成的。在现代冷库的建设中,应加强信息化建设,通过计算机辅助管理,能有效克服流程衔接不畅,冷库作业管理松散等问题。

## 5 结论

针对荔枝冷库贮藏的危险源风险识别,构建霍尔三维因素空间模型,将荔枝冷库贮藏的系统风险通过由安全事件、时空结构(工位)、事故致因组成的三维因素集进行有效刻画。通过危险源因素集之间的映射矩阵关系,形成反映荔枝冷库贮藏系统安全状态的因素空间结构,实现对风险基本事件的识别。

构建荔枝冷库贮藏故障树模型,将荔枝冷库贮藏事故的内在逻辑关系进行有效描述,克服了风险评价过程中由于危险源信息庞杂、积聚与耦合状态下难以分析的问题。

针对荔枝冷库贮藏危险源难以量化分析的现状,将故障树模型与模糊数学理论融合,构建模糊故障树模型。通过对 24 位专家进行问卷调查,得到荔枝冷库贮藏事故发生概率( $g=0.028$ )及风险基本事件概率重要度。通过对计算结果的分析,提出有效促进荔枝冷库贮藏现场安全管理工作的建议。

荔枝冷库贮藏安全属于食品安全范畴,本研究对荔枝冷库贮藏的风险识别与分析所构建的模型可以为食品安全领域的研究提供新的参考视角。

## 参考文献:

- [1] 费帆,王则金,王雅立,等. 荔枝采后生理及保鲜技术研究进展[J]. 热带农业工程,2006(2):29-34.
- [2] 张昭其,庞学群,段学武,等. 荔枝果皮褐变过程中花色苷含量的变化及测定[J]. 华南农业大学学报,2002,23(1):16-19.
- [3] 黄伟锋,唐宇,王克强,等. 荔枝果品质量检测图像采集平台的研制与试验[J]. 江苏农业科学,2016,44(7):381-384.
- [4] 刘春丽,杨跃寰. 荔枝果肉贮藏过程中酶促褐变物质的变化规律[J]. 江苏农业科学,2011,39(3):355-356.
- [5] Jiang Y M, Duan X W, Joyce D, et al. Advances in understanding of enzymatic browning in harvested litchi fruit[J]. Food Chemistry, 2004,88(3):443-446.
- [6] Yang Y C, Sun D W, Wang N N, et al. Real-time evaluation of polyphenol oxidase (PPO) activity in lychee pericarp based on weighted combination of spectral data and image features as determined by fuzzy neural network[J]. Talanta,2015,139:198-207.
- [7] 郭嘉明,吕恩利,陆华忠,等. 荔枝保鲜环境参数的研究现状与分析[J]. 广东农业科学,2012,39(18):105-107.
- [8] 王微,聂树平. 基于霍尔三维模型的大学生社会责任感培养体系构建[J]. 重庆理工大学学报(社会科学),2014,28(7):156-159.
- [9] 阮中和. 基于霍尔三维模式的中小水电站 PROT 项目的特许经营期风险研究[J]. 昆明理工大学学报(社会科学版),2013,13(1):64-71.
- [10] 汪培庄,郭嗣琮,包研科,等. 因素空间中的因素分析法[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2014,33(7):865-870.
- [11] 汪培庄. 因素空间与数据科学[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2015,34(2):273-280.
- [12] 金智新. 安全结构理论[M]. 北京:科学出版社,2012:175.
- [13] 郭永晋,孙丽萍. 基于矩阵的故障树分析方法[J]. 哈尔滨工程大学学报,2016,37(7):896-900.
- [14] 胡玉娟,钱伟. 基于 FTA 法的电动车火灾事故的分析[J]. 防灾科技学院学报,2011,13(1):23-26.
- [15] Ruijters E, Stoelinga M. Fault tree analysis; a survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools[J]. Computer Science Review,2015,15/16(3):29-62.
- [16] 王开义,赵春江,张方田. 模糊故障树分析方法在 HACCP 中的应用研究[J]. 农业工程学报,2007,23(5):164-167.
- [17] Yuhua D, Datao Y. Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2005,18(2):83-88.
- [18] Chen S J, Hwang C L. Fuzzy multiple attribute decision making methods [M]//Fuzzy Multiple Attribute Decision Making. Heidelberg:Springer,1992:289-486.
- [19] 孟爱国,庄红军,王池. 矿用重型汽车作业现场碰撞事故模糊故障树分析[J]. 中国安全生产科学技术,2011,7(1):107-111.
- [20] Onisawa T. An approach to human reliability in man-machine systems using error possibility[J]. Fuzzy Sets and Systems,1988,27(2):87-103.
- [21] 谢尚,孙建华,姜天文,等. 事故树定量分析法在煤矿中的应用[J]. 北京联合大学学报(自然科学版),2010,24(4):56-59.
- [22] Dugan J B, Sullivan K J, Coppit D. Developing a low-cost high-quality software tool for dynamic fault-tree analysis[J]. IEEE Transactions on Reliability,2000,49(1):49-59.
- [23] 陈洪根. 基于故障树分析的食品安全风险评价及监管优化模型[J]. 食品科学,2015,36(7):177-182.
- [24] 张红霞,安玉发,张文胜. 我国食品安全风险识别、评估与管理——基于食品安全事件的实证分析[J]. 经济问题探索,2013(6):135-141.
- [25] 王佳,杨金生. 基于 ATA 的起重机械金属结构安全性评价研究[J]. 机械研究与应用,2013,26(1):10-14,17.
- [26] 滕洪辉,王继库. 基于事故树的二次供水水量水压不足风险分析[J]. 工业安全与环保,2013,39(11):36-38.