

基于 FTA 模型的荔枝冷藏运输环节风险分析

曾志雄^{1,2}, 邹焯导^{1,3}, 吕恩利^{1,2}, 陆华忠^{1,2}, 郭嘉明²

(1.华南农业大学 工程学院, 广州 510642; 2.广东省农产品冷链物流工程技术研究中心, 广州 510642; 3.广东省教育考试院, 广州 510631)

摘要: **目的** 解决荔枝冷藏运输环节中安全风险识别及定性分析的难题。**方法** 基于因素空间及故障树分析模型 (FTA), 分析荔枝冷链运输环节的安全事件集、空间结构 (工位) 集和简约因素集, 建立荔枝冷藏运输环节风险因素关系矩阵, 通过矩阵运算获取不同空间结构下荔枝运输安全事故发生的基本事件。**结果** 根据运算求解结果, 构建荔枝运输环节的故障树模型, 获取了运输环节故障树的最小割集。荔枝冷藏运输事故最小割集数为 13 个, 并分析了各个基本事件的结构重要度。**结论** 通过研究最小割集及事件的结构重要度, 进行荔枝冷链运输环节的安全分析, 并提出了促进现场安全管理的对策及建议。

关键词: 荔枝; 冷藏运输; 因素空间; 故障树; 风险分析

中图分类号: TB487; TB485.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2018)17-0084-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.17.014

Risk of Refrigerated Transportation of Litchi Based on FTA Model

ZENG Zhi-xiong^{1,2}, ZOU Chi-dao^{1,3}, LYU En-li^{1,2}, LU Hua-zhong^{1,2}, GUO Jia-ming²

(1.College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2.Guangdong Engineering Research Center of Agricultural Product Cold Chain Logistics, Guangzhou 510642, China;

3.Education Examinations Authority of Guangdong Province, Guangzhou 510631, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problem of safety risk identification and qualitative analysis during the refrigerated transportation of litchi. Based on factor spaces and fault tree analysis (FTA) model, the relation matrix of risk factors in the refrigerated transportation of litchi was constructed based on the analysis of the security event set, spatial structure (work positions) set and simplified factor set in the refrigerated transportation of litchi. Then, the basic events of accidents in the transportation of litchi under different work positions were obtained by matrix operation. With the calculation results, the fault tree model for the litchi transportation was constructed to obtain the minimal cut sets of fault tree during the transportation. There were 13 minimal cut sets for the refrigerated transportation of litchi, and the structural importance of each basic event was analyzed. According to the research on the structural importance of the minimal cut sets and the events, the security in the refrigerated transportation of litchi is analyzed, and the countermeasures and suggestions on promoting the site safety management are put forward.

KEY WORDS: litchi; refrigerated transport; factor spaces; fault tree; risk analysis

荔枝属于易腐水果, 产果期是南方的高温季节。据报道^[1-3], 我国荔枝在采后运输环节中的损耗可达 20%。冷藏运输是连接产地和销地的纽带, 在荔枝采

后流通产业具有重要意义。荔枝陆地运输包括公路运输和火车运输, 现以公路运输居多^[4-5]。国内荔枝冷藏运输率低, 且影响运输安全的风险较多。

收稿日期: 2018-03-19

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0701002); 现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-33-13); 广东省科技计划 (2017B020206005); 广东省省级 (基础研究及应用研究) 重大项目 (2016KZDXM028); 广州市科技计划 (201704020067)

作者简介: 曾志雄 (1989—), 男, 华南农业大学博士生, 主要研究方向为农产品冷链物流技术。

通信作者: 吕恩利 (1979—), 男, 博士, 华南农业大学副教授, 主要研究方向为农业工程。

冷藏运输系统安全涉及空间结构、事故载体等多种因素,采用因素空间分析方法能有效分析荔枝冷藏运输系统的基本事件。故障树分析方法(Fault Tree Analysis, 简称 FTA)是一种演绎推理法^[6-7],将荔枝冷藏运输过程中可能发生的某类事故和触发事故产生的各种基础事件之间的关联逻辑采用事故树的树形图进行展示,通过对事故树的定性和量化分析获取事故产生的核心因素,为确认安全应对策略和提高控制可靠性提供依据,从而达到预测与预防事故发生的目的。

荔枝冷链运输系统的风险因素普遍存在,且存在动态积聚、累加与耦合等情况^[8],会导致事故发生。FTA 模型在过程控制的风险分析领域有一定应用,但融合 FTA 模型和因素空间理论研究荔枝冷藏运输环节风险的分析尚未见报道^[6-9]。文中基于因素空间理论与 FTA 模型,研究荔枝冷链物流系统危险源信息,并运用最小割集和结构重要度求解计算,进行荔枝冷链物流环节的安全分析,计算结果供荔枝冷链运输环节的现场安全管理提供参考。

1 荔枝冷藏运输环节

1.1 运输方式

目前,荔枝冷藏运输主要有泡沫箱加冰、冷藏、气调等保鲜运输方式^[5,9-11]。

1) 泡沫箱加冰运输。泡沫箱加冰保鲜运输,具有操作便捷、成本低等特点,是国内荔枝中短途运输常用的简易物流方式^[4]。在 3 个昼夜的运输中,荔枝能保持鲜红果色,风味不受损,好果率达 80%以上^[9,12]。缺点是保鲜期较短,冰块融化后泡沫箱内温度快速上升,易导致箱内细菌繁殖和果实腐烂变质^[13-14]。荔枝送达销售现场后易产生褐变,货架期较短,影响销售价格。

2) 冷藏保鲜运输。在荔枝保鲜运输过程中采用制冷设备进行温控和运输,具有较好的保鲜效果^[14-16]。冷藏保鲜在运输过程中的温度控制在适宜范围,相比于普通货车,冷藏车的成本较高^[16-18]。

3) 气调保鲜运输。通过控制运输过程中保鲜箱内的温度、相对湿度和气体浓度,抑制果实呼吸强度,延长保鲜时间^[19-20]。目前,由于国内荔枝运输所需时间较短,且气调运输装备还未得到广泛应用,采用气调运输装备运输荔枝的情况较少。

1.2 运输流程及安全事故

荔枝冷藏运输流程见图 1,可以看出,荔枝包装后由装卸工人进行装车,包括搬运、堆放等。装车以后,冷藏车辆由司机操作,运输过程中要注意交通安全,防止中途断冷及频繁打开冷藏车厢的车门。

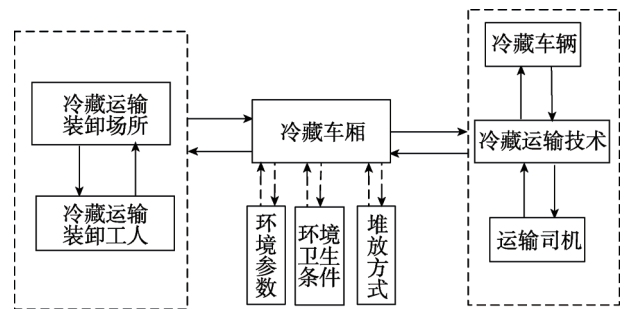


图 1 荔枝冷藏运输流程

Fig.1 Refrigerated transport process of litchi

通过对果场及运输企业的调研,荔枝冷藏运输的安全事故包括以下几个方面:冷藏运输延误造成的荔枝品质下降;运输过程的机械损伤,在装卸、搬运和运输过程中,荔枝由于碰撞、挤压、震动等造成的果实损伤;运输过程变质,由于运输设备故障、操作失误、管理失误等原因,造成运输过程中贮藏条件恶劣,荔枝品质急剧恶化的安全事故。

2 荔枝冷藏运输事故风险分析

因素空间是构建在模糊数学基础上的知识信息展示方法,将可获取的事件作为知识概念外延,对概念量化并采用相应数学方法进行处理,为系统安全的风险识别提供基础。通过风险识别得到风险基本事件,运用故障树分析方法对运输事故进行分析研究,从而为荔枝冷藏运输的风险预防提供对策。

2.1 风险识别

荔枝冷藏运输系统不仅包含较多相互关联的工序,而且不同工序活动的工位(地点)也不相同。根据因素空间理论,通过建立荔枝运输过程中的安全事件、工位、事故致因的集合,依据矩阵之间的映射变换关系分析荔枝冷链物流得出风险基本事件。通过模型的分析,可获得安全事件可能发生的工位,以及该工位重点关注的安全事件关联因素。

用 $V_{\Omega} = \{v_1, v_2 \dots v_m\}$ 表示运输过程中可能触发的所有安全事件的集合。根据荔枝运输的具体情况,将运输的安全事件集合定义为 $V_{\Omega} = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7\} = \{\text{运输延误, 静压机械损伤, 碰撞机械损伤, 摩擦震动机械损伤, 果肉变质, 表皮褐变, 细菌感染}\}$ 。

设工位集合 $W = \{w_1, w_2 \dots w_n\}$, 称 W 为活动载体安全事件的关键工位。通过实际调研,得到荔枝运输的工位集合 $W = \{w_1, w_2, w_3, w_4\} = \{\text{装卸工位, 运输车辆工位, 运输车辆冷藏设备工位, 运输工人操作工位}\}$ 。

设事故致因的因素集 $U(\Omega) = \{u_1, u_2 \dots u_p\}$ 。根据实际调研及分析,定义荔枝冷藏运输的事故致因的因

素集 $U(\Omega) = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8\} = \{\text{处理速度, 荔枝待处理量, 挤压, 碰撞, 震动, 温度, 湿度和风速, 卫生状况}\}$ 。

设 $R(v, u)$ 为安全事件集 V_Ω 到事故致因的因素集 $U(\Omega)$ 的关联, $v \in V_\Omega, u \in U_\Omega$ 。关联 $R(v, u)$ 可以采用矩阵 $R(v, u) = [r_{ij}]_{m \times n}$ 进行表述, 称作安全事件的因素关系矩阵。

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

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & u_j \text{ 是 } v_i \text{ 可能发生的事事故致因} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

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

分析荔枝冷链运输环节每个安全事件与事故致因的关系, 构建关系矩阵 $R(v, u)$ 。

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

同样地, 构建 V_Ω 到 W 的关系矩阵 $Q(v, w) = [q_{ij}]_{m \times p}$, 称作事件工位关系矩阵。

$$Q(v, w) = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1p} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ q_{m1} & q_{m2} & \cdots & q_{mp} \end{bmatrix}$$

$$q_{ij} = \begin{cases} 1, & w_j \text{ 是 } v_i \text{ 可能发生的事事故工位} \\ 0, & w_j \text{ 不是 } v_i \text{ 可能发生的事事故工位} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i=1, 2 \dots m; j=1, 2 \dots p$ 。

根据实地调研, 得到各个安全事件与工位因素的关系, 建立关系矩阵 $Q(v, w)$ 。

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

$Q(v, w)$ 是集合 V_Ω 到 W 的关系, $R(v, u)$ 是集合 V_Ω 到 $U(\Omega)$ 的关系。矩阵因素空间的映射关系见图 2。 $Q(v, w)$ 的转置 $Q^T(v, w)$ 是集合 W 到 V_Ω 的关系合成。令 $S(w, u)$ 为工位与载体事故致因的关系, 依据因素空

间的映射关系, 可知 $Q^T(v, w) \cdot R(v, u) = S(w, u)$ 。由此, 能获得安全事件关键工位集合 W 到载体的事故致因的因素 $U(\Omega)$ 的关系。

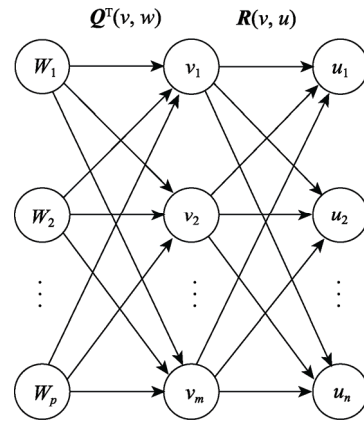


图 2 因素空间影射关系
Fig.2 Mapping relationship of factor space

$$Q^T(v, w) = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{21} & \cdots & q_{m1} \\ q_{12} & q_{22} & \cdots & q_{m2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ q_{1p} & q_{2p} & \cdots & q_{mp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1m} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ t_{p1} & t_{p2} & \cdots & t_{pm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

记 $Q^T(v, w)$ 与 $R(v, u)$ 的合成关系为:

$$S(w, u) = Q^T(v, w) \cdot R(v, u) = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1m} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ t_{p1} & t_{p2} & \cdots & t_{pm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{p1} & s_{p2} & \cdots & s_{pn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $s_{ij} = (t_{i1} \wedge r_{1j}) \vee (t_{i2} \wedge r_{2j}) \vee \cdots \vee (t_{im} \wedge r_{mj}) = \bigvee_{k=1}^m (t_{ik} \wedge r_{kj})$, 其中 $a \wedge b = \min\{a, b\}$, $a \vee b = \max\{a, b\}$ 。

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

根据上面分析得到的矩阵 $S(w, u)$ 所体现的关系, 结合运输环节分析各个工位的载体活动因素, 得到基本风险事件。以装卸工位为例, 主要影响因素为碰撞和震动, 由装卸操作流程中不可避免的碰撞及震动作用造成。依次类推, 可得其他工位的基本风险事件: 运输场所环境参数不适宜、运输场所卫生状况差、运输场所堆放方式不当、冷藏车辆不足、运输工具故障、

运输路况差、运输制冷设备故障、运输流程衔接不畅、温度监控缺失、运输操作失误、违反运输操作规程、运输作业管理松散、运输调度不当。

2.2 故障树模型求解

通过上述分析获得的基本事件，结合荔枝冷链运输环节的特点，建立运输环节子故障树。该故障树由 14 个基本安全事件及 5 个中间事件组成，具体的事件见表 1，荔枝冷藏运输故障树见图 3。

表 1 荔枝冷链运输环节的子故障树事件
Tab.1 Incidents of sub-fault tree during refrigerated transportation of litchi

代码	事件名称	代码	事件名称
T	荔枝运输环节事故	D ₅	运输场所卫生状况差
M ₁	运输延误	D ₆	运输路况差
M ₂	运输机械损伤	D ₇	装卸操作流程不规范
M ₃	运输变质	D ₈	温度监控缺失
M ₄	冷藏车辆温度因素	D ₉	运输操作失误
M ₅	其他环境状况	D ₁₀	运输堆放方式不当
D ₁	运输工具故障	D ₁₁	违反运输操作规程
D ₂	运输制冷设备故障	D ₁₂	运输流程衔接不畅
D ₃	冷藏车辆不足	D ₁₃	运输作业管理松散
D ₄	运输场所环境参数不适宜	D ₁₄	运输调度不当

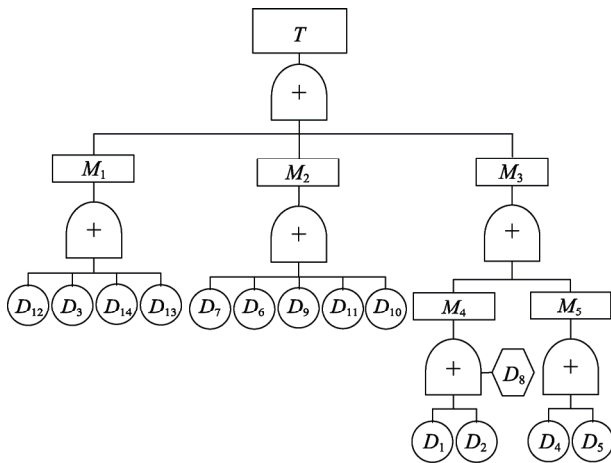


图 3 荔枝冷藏运输故障树

Fig.3 Fault tree of refrigerated transportation for litchi

在研究故障树时，需计算出最小割集^[21]。假设运输过程的事件只有 2 种状态，并且事故的发生相互独立，分析由 n 个相互独立的底层事件组成的故障树。设 $x_i (i=1,2,\dots,n)$ 为底层事件的状态变量，取为 0 或 1。 $x_i = 0$ 表示底层事件 i 不会发生， $x_i = 1$ 表示底层事件 i 将会发生。割集 C 为故障树中底层事件集合 $\{x_1, x_2 \dots x_n\}$ 的子集，当底层事件全部发生时，顶层事件一定发生。如果割集中任意删除其中 1 个底层事件后，那么 C 称作最小割集。

根据故障树模型，采用布尔运算规则可以算出荔枝冷藏运输事故最小割集数量为 13 个： $\{D_{12}\}$ ， $\{D_7\}$ ， $\{D_1, D_8\}$ ， $\{D_3\}$ ， $\{D_{14}\}$ ， $\{D_{13}\}$ ， $\{D_6\}$ ， $\{D_9\}$ ， $\{D_{11}\}$ ， $\{D_{10}\}$ ， $\{D_4\}$ ， $\{D_2, D_8\}$ ， $\{D_5\}$ 。针对这 13 个事件，如果任意一个最小割集发生，就会造成顶层事故出现。

3 荔枝冷链运输的结构重要度分析

一个基本事件或最小割集对顶上事件发生的贡献程度称作重要度^[22-24]。结构重要度分析是在事故树结构上研究每个基本事件的贡献程度，即在不考虑每个基本事件的发生概率，或者说假设每个基本事件的发生概率都一样的情况下，研究每个基本事件对顶上事件所造成的影响^[22-25]。

基本事件 i 和顶上事件存在 2 种状态：

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{基本事件发生} \\ 0, & \text{基本事件不发生} \end{cases}$$

$$\Phi(x) = \begin{cases} 1, & \text{顶上事件发生} \\ 0, & \text{顶上事件不发生} \end{cases}$$

当 x_i 的状态由 0 变为 1，即由不发生变为发生时，顶上事件的状态也由不发生变为发生，说明 x_i 对顶上事件有影响，这种情况出现的频率越高，说明 x_i 越重要。n 个事件 2 种状态的组合有 2^n 个， x_i 作为变量，维持不变的对照组有 2^{n-1} 个。在 2^{n-1} 个对照组中发生多少次使顶上事件改变的现象，其结构重要度即为该次数与 2^{n-1} 的比值。 $I_{\Phi}(i)$ 为第 i 个基本事件的结构重要度：

$$I_{\Phi}(i) = \frac{1}{2^{n-1}} \sum [\Phi(1_i, x) - \Phi(0_i, x)] \quad (5)$$

根据故障树模型及结构重要度公式，通过计算出荔枝冷藏运输环节结构重要度大小，见表 2。

表 2 荔枝冷藏运输环节结构重要度
Tab.2 Structural importance of refrigerated transportation of litchi

事件	数值	事件	数值	事件	数值
I[D ₁]	0.5	I[D ₆]	1.0	I[D ₁₁]	1.0
I[D ₂]	0.5	I[D ₇]	1.0	I[D ₁₂]	1.0
I[D ₃]	1.0	I[D ₈]	0.75	I[D ₁₃]	1.0
I[D ₄]	1.0	I[D ₉]	1.0	I[D ₁₄]	1.0
I[D ₅]	1.0	I[D ₁₀]	1.0		

4 荔枝冷藏运输环节的风险控制对策

从故障树结构重要度可以看到， $I[D_3]$ ， $I[D_4]$ ， $I[D_5]$ ， $I[D_6]$ ， $I[D_7]$ ， $I[D_9]$ ， $I[D_{10}]$ ， $I[D_{11}]$ ， $I[D_{12}]$ ， $I[D_{13}]$ ， $I[D_{14}]$ 在系统中的结构重要度较高，因此在荔枝冷藏运输环节故障树风险模型中比较容易发生风险。根据结构重要度的结果分析，提出降低冷藏运输

环节安全风险的措施。

1) 加强运输管理、提高工人技能。依据故障树结构重要度可看出,易造成的事故有装卸操作流程不规范 D_7 、运输操作失误 D_9 、违反运输操作规程 D_{11} 、运输作业管理松散 D_{13} 和运输调度不当 D_{14} 。上述环节的改善需要加强运输操作管理,例如加强作业的标准化、提高流程的严谨度等。运输企业应当促使运输工人发挥主观能动性,提高专业水平和职业素质,使其主动在车辆运行前、中、后全过程开展检查检修。管理人员应当深入车队、路途和装卸点寻找问题,分析对策,消除运营隐患。

2) 加强冷链运输环境的管理。从故障树重要度可以看出,运输场所环境参数不适宜 D_4 、运输场所卫生状况差 D_5 和运输场所堆放方式不当 D_{10} ,在运输贮藏存储中容易对荔枝造成影响,提高运输场所的卫生环境质量和加强堆放管理能有效防范事故的发生,还应强化现场管理,提高冷藏车辆仓储管理的水平。荔枝冷藏运输企业的管理人员应常态化检查运输现场,督促、检查和落实现场管理工作,发现问题后应现场解决。

3) 加强运输车辆及其冷藏设备管理。冷藏车辆不足 D_3 、运输流程衔接不畅 D_{12} 对荔枝运输冷藏事故的发生有重要作用,因此要合理分配冷藏车辆,定期维护车辆及冷藏设备,避免运输过程中由于设备问题导致流程衔接不畅。强化车辆维修和检验的全过程管理工作,加强自检、过程检验和出厂检验的全方位检查。维修保养期间,应把控更换配件、润滑油及其附件的质量。

5 结语

1) 针对荔枝冷藏运输的危险源辨识,结合荔枝冷藏运输生产作业流程与因素空间理论,构建危险源因素集的映射矩阵关系模型,形成反映荔枝冷藏运输生产系统安全状态的因素空间结构。

2) 运用故障树理论对各个风险源与事故之间的关系进行了因果分析,将荔枝冷藏运输风险事故的内在逻辑关系进行了有效的描述。

3) 在构建荔枝冷藏运输因素空间及故障树模型的基础上完成风险事故发生的最小割集及结构重要度计算,对风险源进行了定性分类及分析,并提出降低风险发生的系列措施。

参考文献:

[1] 陈厚彬. 荔枝产业综合技术[M]. 广州: 广东科技出版社, 2010.
CHEN Hou-bin. The Comprehensive Technology of Litchi Industry[M]. Guangzhou: Guangdong Science

and Technology Press, 2010.

- [2] 黄循精. 世界荔枝生产与贸易综述[J]. 世界热带农业信息, 2007, 44(5): 1—4.
HUANG Xun-jing. A Summary of Production and Trade of Litchi in the World[J]. World Tropical Agriculture Information, 2007, 44(5): 1—4.
- [3] 林河通, 陈绍军, 习珂芳. 荔枝果实采后商品化处理 and 贮藏技术[J]. 农业工程学报, 2003, 19(5): 126—134.
LIN He-tong, CHEN Shao-jun, XI Yu-fang. Commercial Postharvest Handling and Storage Technology of Litchi Fruit[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(5): 126—134.
- [4] 杨松夏, 吕恩利, 陆华忠, 等. 荔枝物流中保鲜技术的应用现状与分析[J]. 广东农业科学, 2012, 27(16): 196—199.
YANG Song-xia, LYU En-li, LU Hua-zhong, et al. Present Situation Analysis on Litchi Cold Chain Logistics[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012, 27(16): 196—199.
- [5] 杨松夏, 吕恩利, 陆华忠, 等. 不同保鲜运输方式对荔枝果实品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 225—232.
YANG Song-xia, LYU En-li, LU Hua-zhong, et al. Effects of Different Fresh-keeping Transportation Modes on Quality of Litchi Fruit[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(10): 225—232.
- [6] 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, 12(1): 23—26.
HU Yu-juan, QIAN Wei. Analysis of the Fire Caused by Electric Bike Based on FTA[J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2011, 12(1): 23—26.
- [7] 邱仕奎, 张斌. 金属非金属矿山冒顶片帮事故的事故树分析[J]. 中国矿业, 2012, 20(5): 115—117.
QIU Shi-kui, ZHANG Bin. Accident Tree Analysis of Metal and Nonmetal Mine Roof Fall Accident[J]. China Mining Magazine, 2012, 20(5): 115—117.
- [8] 高晓旭, 张旭, 董丁稳, 等. 煤矿危险源多层递阶模型及风险评价[J]. 西安科技大学学报, 2015, 34(2): 175—180.
GAO Xiao-xu, ZHANG Xu, DONG Ding-wen, et al. Multi-layer Hierarchical Structure Model and Risk Evaluation for Mine Hazards[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2015, 34(2): 175—180.
- [9] 黄欣. 冷链中易腐食品冷藏运输品质安全与能耗分析[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
HUANG Xin. Quality Safety and Energy Consumption Analysis of Perishable Food in Refrigerated Chain during Refrigerated Transportation[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [10] 陈洪国, 彭永宏. 常温泡沫箱加冰运输条件下荔枝的温度、品质、呼吸和乙烯释放变化[J]. 果树学报, 2018, 35(1): 1—6.

- 2001, 18(3): 155—159.
- CHEN Hong-guo, PENG Yong-hong. Study on the Fruit Temperature, Quality, Carbon Dioxide and Ethylene Evolution of Litchi Subjected to Ambient Ice-added Transportation in Foam Box[J]. *Journal of Fruit Science*, 2001, 18(3): 155—159.
- [11] 陆华忠, 李源泉, 吕恩利, 等. 不同温度和包装方式对荔枝保鲜品质的影响[J]. *现代食品科技*, 2013, 28(10): 2330—2334.
- LU Hua-zhong, LI Yuan-quan, LYU En-li, et al. Effect of Different Temperature and Packing on Fresh-keeping Quality of Litchi[J]. 2013, 28(10): 2330—2334.
- [12] GARCIA R M, PAUL S, VICENTE-AGUTSTIN C M, et al. Influence of Harvest Maturity on Quality and Shelf-life of Litchi Fruit(Litchi Chinensis Sonn)[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2010, 57(3): 162—175.
- [13] DONG Hua-qiang, CHENG Liang-ying, TAN Jia-hou, et al. Effects of Chitosan Coating on Quality and Shelf Life of Peeled Litchi Fruit[J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 64(3): 355—358.
- [14] JIANG Y M, ZHU X R, LI Y B. Post-harvest Control of Litchi Fruit Rot by *Bacillus Subtilis*[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2001, 34(7): 430—436.
- [15] 谢晶, 邱伟强. 我国食品冷藏链的现状与展望[J]. *中国食品学报*, 2013, 13(3): 1—7.
- XIE Jing, QIU Wei-qiang. Recent Situation and Development of Food Cold Chain in China[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2013, 13(3): 1—7.
- [16] 周家华, 常虹, 赵毅, 等. 中国果蔬冷链物流的发展现状及建议[J]. *食品工业科技*, 2012, 32(6): 8—10.
- ZHOU Jia-hua, CHANG Hong, ZHAO Yi, et al. Current Situation and Suggestions on the Development of Cold Chain Logistics for Fruits and Vegetables in China[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 32(6): 8—10.
- [17] YANG Song-xia, LU Hua-zhong, LYU En-li, et al. Strategies on Fruits and Vegetables Cold Chain Logistics in China[C]// *World Automation Congress, Mexico*, 2012.
- [18] DUTILH C E, KRAMER K J. Energy Consumption in the Food Chain[J]. *A Journal of the Human Environment*, 2000, 29(2): 98—101.
- [19] 吕恩利, 陆华忠, 罗锡文, 等. 果蔬气调保鲜运输车的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(19): 9—16.
- LYU En-li, LU Hua-zhong, LUO Xi-wen, et al. Design and Experiment of Fresh-keeping Transportation Vehicle with Controlled Atmosphere for Fruits and Vegetables[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(19): 9—16.
- [20] 吕恩利, 陆华忠, 杨松夏, 等. 气调运输包装方式对荔枝保鲜品质的影响[J]. *现代食品科技*, 2016, 31(4): 156—160+93.
- LYU En-li, LU Hua-zhong, YANG Song-xia, et al. Effects of Packaging Methods on Fresh-keeping Quality of Litchi during Controlled Atmosphere Transport[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 31(4): 156—160.
- [21] 邵正荣, 贾仁甫. 故障树分析法在大型泵站辅机系统中的应用研究[J]. *水泵技术*, 2004, 32(5): 43—46.
- SHAO Zheng-rong, JIA Ren-fu. Application of Fault Tree Analysis in the Auxiliary System of Large Pumping Station[J]. *Pump Technology*, 2004, 32(5): 43—46.
- [22] 陈家旺. 柴油-LNG内河散货船风险识别研究[J]. *中国海事*, 2013, 21(2): 45—49.
- CHEN Jia-wang. Research on Risk Identification for Diesel-LNG Inland Water Bulk Carriers[J]. *China Maritime Safety*, 2013, 21(2): 45—49.
- [23] 张雪峰. FTA法在浅埋小净距隧道下穿铁路中的应用[J]. *山西建筑*, 2015, 40(19): 135—136.
- ZHANG Xue-feng. FTA Applied in the Shallow Tunnels with a Small Clear Distance Beneath Railways[J]. *Shanxi Architecture*, 2015, 40(19): 135—136.
- [24] 曹文晖, 于孝春. 波纹管失效故障树分析[J]. *化工装备技术*, 2010, 31(2): 8—10.
- CAO Wen-hui, YU Xiao-chun. Failure Tree Analysis of Bellows Failure[J]. *Chemical Equipment Technology*, 2010, 31(2): 8—10.
- [25] NOURBAKHS S M, BAI Y, MAIA G D N, et al. Grain Supply Chain Network Design and Logistics Planning for Reducing Post-harvest Loss[J]. *Biosystems Engineering*. 2016, 151: 105—115.