

基于贝叶斯网络的生鲜物流风险评估^{*}

赵闯 郎坤

(大连海事大学航运经济与管理学院, 大连 116026)

摘要 随着生鲜市场的规模日渐扩大, 如何有效地对生鲜配送过程中各阶段的风险进行评估是一个亟待解决的问题. 文章从信息技术, 设施设备, 人员操作以及外部环境四个方面对生鲜物流配送展开风险评估, 运用模糊集理论消除专家评分的主观性, 结合贝叶斯网络构造风险评估模型, 并采用 GeNIe 软件对模型进行仿真. 最终得到了定量的风险评估结果, 对生鲜企业规避风险具有重要意义.

关键词 生鲜物流, 打分 - 搜索, 贝叶斯网络, 模糊集, 风险评估.

MR(2000) 主题分类号 62C10, 62C12

Fresh Food Logistics Risk Assessment Based on Bayesian Network

ZHAO Chuang LANG Kun

(School of Maritime Economics and Management, Dalian Maritime University, Dalian 116026)

Abstract With the development of Internet e-commerce, how to effectively assess the risks in each stage of the fresh food distribution process is an urgent problem to be solved. The main research content of this paper is the risk assessment of fresh logistics distribution. Four categories are considered, including information technology, facilities and equipment, personnel operation and external environment. It uses fuzzy set theory to eliminate the subjectivity of expert scoring and combines Bayesian network to construct risk model. The Bayes model is simulated by GeNIe software. Finally, quantitative risk assessment results are obtained, which is of great significance for fresh enterprises to avoid risks.

Keywords Fresh food logistics, score and search, bayesian network, fuzzy set, risk assessment.

^{*} 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (3132019353, 3132019226) 资助课题.

收稿日期: 2019-05-18, 收到修改稿日期: 2020-01-30.

通信作者: 郎坤, Email: kun.lang@dlnu.edu.cn.

编委: 房勇.

1 引言

随着互联网浪潮的不断推进,人民生活水平日益提高,消费者对生鲜产品的需求日渐增长. 生鲜产品自身具有易腐烂,不易存储,不易运输等特性所带来的供应链风险受到相关企业和学者的广泛重视. 然而在国内学者的生鲜冷链物流研究中多采用定性的描述,缺少对生鲜物流各风险的定量评估. 更为深入,精确的生鲜物流风险研究可以有效地降低生鲜企业的运营风险,也可以更好地为规避相关风险提出针对性措施.

2 国内生鲜产业发展现状

由于我国生鲜市场激增和冷链物流系统建设的空白,自2010年《农产品冷链物流发展规划》执行后,我国的冷链系统发展进入了高速发展期. 调查数据如图1所示^[1],直至2017年,中国生鲜市场交易总额突破1.7万亿,同比增长6.9%,且从2013年以来持续保持6%以上的增长,预计2018年生鲜市场交易规模将继续增长至1.91万亿. 如图2所示,虽然市场规模增速放缓,仍然高达30%以上. 而生鲜物流配送是这个庞大的供应链中不可缺少的重要一环. 在生鲜配送过程中,需要经过运输,储存,搬运,包装等多道流程,是信息技术,温控技术,人员操作的有机结合. 其易腐烂性,不易存储性给物流运输带来了极大的挑战. 一个供应链节点的失效就会使整个供应链失效.



图1 2011-2018 中国生鲜市场交易额及同比增长率

(Figure 1 Trading volume and year-on-year growth rate of Chinese fresh food market from 2011 to 2018)



图2 2012-2019 中国生鲜电商市场增速

(Figure 2 2012-2019 growth rate of fresh Chinese e-commerce market)

3 国内外研究现状

国外的冷链物流系统已经相当成熟, 国外的学者已经做出了大量的研究. Urien 使用“网络智能卡技术”和无源 RFID 对冷链物流过程中的易腐食品质量进行跟踪^[2]. Kalantari 和 Khoshalhan 使用模糊认知图 FCM 设计和分析来评估供应链的准备状态^[3]. Leat 和 Revoredo-Giha 对苏格兰地区的猪肉供应链进行了考察, 就如何提高供应链弹性和规避风险提出了相关建议^[4]. Sanjay Sharma 和 Pai 利用贝叶斯网络对冷链物流进行研究, 分析了不同地域的冷链运输情况, 帮助投资者更好地进行决策^[5]. Rostamzadeh 等使用 TOPSIS-CRITIC 方法对可持续性供应链风险管理进行评估, 为最终评估 SSCRM 框架制定了七项主要标准和四十四项次级标准^[6]. Can 和 Toktas 提出了一种新型的风险矩阵 RA, 将动态模糊逻辑与多标准决策相结合来克服风险评估的主观性缺陷^[7].

国内对于生鲜供应链失效的风险评估主要使用的方法有模糊层次分析法, TOPSIS 法, 故障树, 灰色关联分析等. 邹毅峰等使用了 GO-FLOW 方法对跨区域蔬菜运输风险进行了评估^[8]. 岑国姬使用模糊层次分析将生鲜供应链风险分为 8 个方面^[9]. 郭茜等结合贝叶斯网络和故障树将冷链运行的故障进一步具象化整理, 综合评估了第三方冷链物流系统的有效性^[10]. 赵矗将贝叶斯网络与层次分析法相结合, 对顺丰生鲜末端环节配送风险展开研究^[11].

依据上述国内外学者的研究, 总结可知, 国外对于生鲜物流的研究大多在新技术的发明和食品的安全控制方面, 对生鲜物流过程的风险评估较少. 由于国内生鲜配送行业起步较晚, 相关学者对于风险方面的研究大多针对于整体的供应链环节, 缺少对生鲜物流配送风险的局部研究.

本文使用模糊集和贝叶斯网络的方法对生鲜物流运输中存在的风险进行定量评估, 避免了先前算法由于样本数据不足, 不确定风险造成的模型评估不准确的问题. 文章首先基于打分-搜索方法对贝叶斯网络进行优化, 寻找最优贝叶斯网络. 接着使用三角模糊数, λ 截集和左右模糊排序法确定精确概率值, 消除专家评分的主观性, 得出条件概率表. 最后, 结合统计数据所得出的先验概率完成模型的构造并使用 GeNIe 对模型进行仿真, 得到各风险节点的后验概率并进行敏感性分析, 最终给出了各风险节点的评估结果.

4 生鲜供应链失效原因及影响因素分析

4.1 生鲜配送物流失效因素分析

根据国家标准《物流术语》规定, 物流是物品从供应地向接收地的实体流动过程. 根据实际需要, 将运输, 储存, 搬运, 包装, 流通加工, 配送, 信息处理等基本功能实施有机结合^[12]. 由于生鲜自身易腐烂, 不易保存的特质, 其在物流配送的各个环节均会受到内, 外部因素的影响, 从而可能导致整个系统失效. 因此, 我们从物流配送的各个环节来分析可能造成整个系统失效的故障事件^[11].

由表 1 可见, 许多配送流程中均存在人为操作问题而导致的故障, 因此我们将其统称为“人员操作问题”. 在运输, 储存, 包装等流程中出现的车辆故障, 拣选设备故障, 可以统称为“设施设备问题”. 交通拥堵, 恶劣天气所造成的故障我们统称为外部环境. 而电子信息系统所造成的系统失效问题我们统称为“信息技术问题”. 综上所述, 为了便于后续的分析, 结合

表 1, 本文将物流配送过程中可能造成系统失效的原因归类为信息技术, 设施设备, 人员操作, 外部环境这四类问题.

表 1 配送过程中的故障事件
(Table 1 Failure events during delivery)

流程	故障
运输	车辆故障; 制冷设备投入率低; 员工问题; 恶劣天气; 交通拥堵
储存	拣选设备故障; 制冷设备故障; 人员管理失误
装卸搬运	人员操作不当
包装	包装材料污染、破损; 包装规格不合理; 人员操作不当
流通加工	操作人员操作失误造成数量有误, 破损, 污染; 未预冷或预冷不合格
信息处理	信息系统处理有误; 人员操作不当; 客户订单有误

4.2 贝叶斯网络节点的确定

结合文献 [11, 13] 的专家建议和统计数据, 以生鲜物流的各个环节的安全性为出发点, 进一步细化四类问题的具体形成原因, 最终确定 22 个风险因子作为本文贝叶斯网络的风险节点, 构成了四级层级网络结构, 如表 2 所示. 因为在本文贝叶斯网络中, 每个节点对生鲜物流配送失效的影响只有 0 与 1 两种可能, 即 0 表示该故障不发生, 1 表示该故障发生.

表 2 贝叶斯网络含义及值域
(Table 2 Meaning and range of Bayesian network)

贝叶斯节点	具体含义	值域
T	生鲜物流配送失效	(0, 1)
A1	信息技术问题	(0, 1)
A2	设备设施问题	(0, 1)
A3	人员操作问题	(0, 1)
A4	外部环境问题	(0, 1)
A5	仓储设备故障	(0, 1)
A6	包装设备故障	(0, 1)
A7	运输设备故障	(0, 1)
B1	信息系统故障	(0, 1)
B2	订单信息失真	(0, 1)
B3	拣选设备故障	(0, 1)
B4	冷库设备故障	(0, 1)
B5	包装材料劣质	(0, 1)
B6	包装规格不当	(0, 1)
B7	运送车辆故障	(0, 1)

续表 2 贝叶斯网络含义及值域
(Table 2 Meaning and range of Bayesian network (Continued))

贝叶斯节点	具体含义	值域
B8	温度失控	(0, 1)
B9	基层员工失误	(0, 1)
B10	管理人员失误	(0, 1)
B11	员工培训不足	(0, 1)
B12	自然灾害	(0, 1)
B13	交通堵塞	(0, 1)
B14	节点故障	(0, 1)

生鲜物流配送失效,指的是在生鲜配送过程中由于外部环境和内部环境的原因导致的货物变质,破损或没有按时送到顾客手中.主要包括信息技术问题,设备设施问题,人员操作问题,外部环境问题等4个方面.

信息技术问题,包括信息系统故障和订单信息失真两种风险.

设备设施问题,指的是在冷链运输中相关设备出现的故障,具体包括仓储,包装,运输过程中的故障.

人员操作问题,含义是由于物流配送中的人员失误造成的供应链失效,主要包括基层员工失误,管理人员失误,员工培训不足等原因.

外部环境问题,主要包括由于自然灾害,交通堵塞,节点故障造成的配送失效.

仓储设备故障,指的是拣货设备和制冷设备的损坏而造成的货物损害.

包装设备故障,具体包括包装材料劣质和包装规格不当两方面的问题.

运输设备故障,具体包括运送车辆的突发性故障和冷链物流中温控系统失衡造成的货物变质和运送延时.

5 生鲜供应链失效风险评估贝叶斯网络模型

5.1 贝叶斯网络概述

贝叶斯网络是 Judea Pearl 于 1988 年提出的一种基于概率不确定性推理网络,有机地结合了贝叶斯方法与图形理论,对不确定性问题的研究有着重要作用^[14].解决了在贝叶斯公式中联合概率难以计算的问题.

1) 贝叶斯公式

$$P(B_i|A) = \frac{P(B_i)P(A|B_i)}{\sum_{j=1}^n P(B_j)P(A|B_j)}, \quad (5.1)$$

其中 $P(A|B)$ 是在 B 事件已经发生的情况下 A 事件发生的可能性. B_1, B_2, \dots, B_n 为完备事件组,即 $\bigcup_{i=1}^n B_i = \Omega, B_i B_j = \phi, P(B_i > 0)$. 其中 $P(B_i)$ 表示先验概率, $P(B_i|A)$ 表示后验概率. 模型主体就是根据贝叶斯公式实现的.

2) 贝叶斯网络特点

贝叶斯网络是将联合概率分布的求解问题转化为先验概率和后验概率的计算, 可将复杂问题大大简化, 而且可以在信息不完全的情况下完成推理过程. 其次, 它不仅仅依赖于专家的经验知识, 而是与统计数据相结合, 消除了专家评估的主观性. 此外, 可以将贝叶斯节点的后验概率设置为 1, 推算该节点的父节点发生的概率, 完成逆向的推理, 得到各个风险节点的发生概率. 并且进行了灵敏度分析, 进一步确定对选定节点的变化程度有很大影响的节点.

3) 贝叶斯建模流程如图 3 所示.

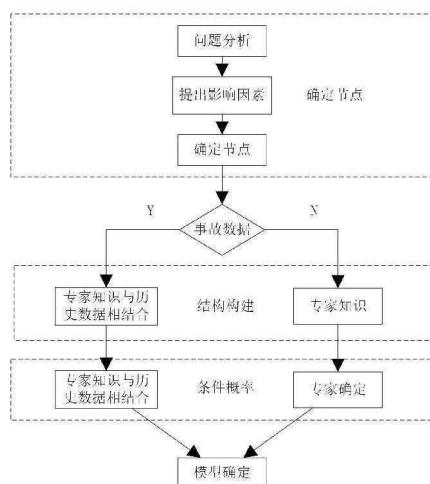


图 3 贝叶斯建模流程

(Figure 3 Bayesian modeling process)

5.2 贝叶斯网络的构建

5.2.1 贝叶斯网络结构的优化

由于基于历史数据和专家建议得到的贝叶斯网络仍然具有一定的主观性, 本文采用打分 - 搜索的方法对网络模型进行优化, 在评分函数的选择中, 选择 BDE 评分法^[1].

Rissanen 首次提出了 MDL 函数这一概念, 起初应用于通用编码的压缩, 目的是寻找一个总描述长度最小的结构, 即最优的数据模型^[14]. 网络结构, 参数, 数据集合三部分共同构成了总描述长度. 本文根据最小总描述长度确定网络优化结果.

$$L_1 = \sum_{i=1}^n k_i \log n, \quad (5.2)$$

$$L_2 = \frac{\log N}{2} \sum_{i=1}^n (|\pi_i| (X_i - 1)), \quad (5.3)$$

$$L_3 = - \sum_{i=1}^N \log P(D_i | G, \theta) = N \sum_{i=1}^n H(X_i | \pi_i), \quad (5.4)$$

$$\text{总的描述长度} = L_1 + L_2 + L_3, \quad (5.5)$$

其中 L_1 为网络结构长度, L_2 表示参数长度, L_3 表示数据集合长度. k_i 表示节点 X 的父节点个

数, n 表示网络中的节点个数, N 表示训练样本总数, $|\pi_i|$ 表示 X 父节点组合个数, $P(D_i|G, \theta)$ 表示编码长度, $H(X_i|\pi_i)$ 为条件熵.

5.2.2 贝叶斯网络结构的确定

以导致生鲜物流配送失效的信息技术问题为例, 基于上一节给出的节点信息系统故障 B1, 订单信息失真 B2, 信息技术问题 A1 为例, 分析因果关系, 二者均会导致信息技术问题, 与此同时, 信息系统故障还会导致订单信息失真, 如图 4 所示, 即

$$L_1 = \sum_{i=1}^3 k_i \log 3 = 3.296, \quad (5.6)$$

$$L_2 = \frac{\log N}{2} \sum_{i=1}^3 (|\pi_i|(|2| - 1)) = 12.966, \quad (5.7)$$

$$L_3 = N \sum_{i=1}^3 H(X_i|\pi_i) = 21.95, \quad (5.8)$$

$$\text{总的描述长度} = L_1 + L_2 + L_3 = 38.212. \quad (5.9)$$

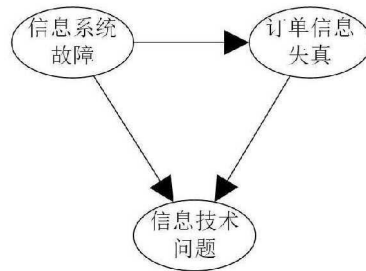


图 4 初始网络
(Figure 4 Initial network)

根据 5.2.1 节进一步优化网络结构, 得到最优的网络结构, 如图 5 所示, 即

$$L_1 = \sum_{i=1}^3 k_i \log 3 = 2.197, \quad (5.10)$$

$$L_2 = \frac{\log N}{2} \sum_{i=1}^3 (|\pi_i|(|2| - 1)) = 8.644, \quad (5.11)$$

$$L_3 = N \sum_{i=1}^3 H(X_i|\pi_i) = 20.73, \quad (5.12)$$

$$\text{总的描述长度} = L_1 + L_2 + L_3 = 31.571. \quad (5.13)$$

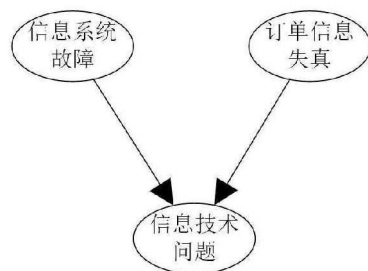


图5 优化网络
(Figure 5 Optimize network)

根据计算结果可知,图5的总描述长度小于图4,即优化后贝叶斯网络优于初始网络.同理,根据总描述长度最小的原则得到总的贝叶斯网络结构见图6.

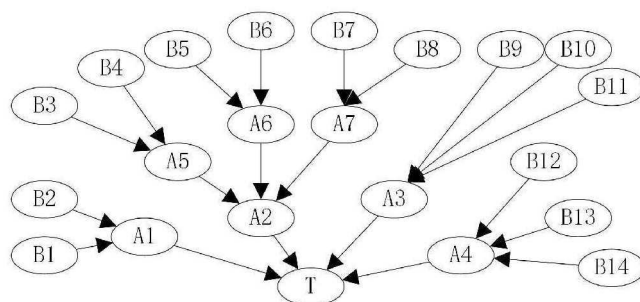


图6 优化后的贝叶斯网络结构
(Figure 6 Optimized Bayesian network structure)

5.3 条件概率表的确定

由于某些因素的评分含有较大的主观成分,例如人为操作问题,很难被量化为一个确切的数值,本文采用将三角模糊数与梯形模糊数结合的方法,将模糊的数据界定相区分.其隶属度函数分别为

$$A(x) = \begin{cases} 0, & x < a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x \leq c, \\ 0, & x > c, \end{cases} \quad (5.14)$$

$$A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b, \\ 1, & b < x \leq c, \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x \leq d, \\ 0, & x > d. \end{cases} \quad (5.15)$$

Wickens 将某事件发生的概率用 7 种模糊语言表示, 其模糊表示和截集如表 3 所示^[15].

表 3 模糊数形式和 λ 截集
(Table 3 Form of fuzzy number and λ cut set)

模糊语言	模糊数形式	λ 截集
非常低	$f_{V_L} = (0, 0, 0.1, 0.2)$	$[0, -0.1\lambda + 0.2]$
低	$f_L = (0.1, 0.2, 0.3)$	$[0.1\lambda + 0.1, -0.1\lambda + 0.3]$
偏低	$f_{F_L} = (0.2, 0.3, 0.4, 0.5)$	$[0.1\lambda + 0.2, -0.1\lambda + 0.5]$
中等	$f_M = (0.4, 0.5, 0.6)$	$[0.1\lambda + 0.4, -0.1\lambda + 0.6]$
偏高	$f_{F_H} = (0.5, 0.6, 0.7, 0.8)$	$[0.1\lambda + 0.5, -0.1\lambda + 0.8]$
高	$f_H = (0.7, 0.8, 0.9)$	$[0.1\lambda + 0.7, -0.1\lambda + 0.9]$
非常高	$f_{V_H} = (0.8, 0.9, 1, 1)$	$[0.1\lambda + 0.8, 1]$

对专家权重的处理使用的是算术平均法, 即

$$P_i = \frac{f_1 + f_2 + \cdots + f_n}{n}, \quad i = 1, 2, \cdots, m, \quad (5.16)$$

其中, P_i 表示第 i 个事件的模糊概率, 表示第 i 个专家针对某事件发生的概率给出的模糊评价结果. 例如, 有四位专家对生鲜物流配送中交通堵塞发生的概率给出评分, 偏高, 高, 高, 偏高. 则, 其平均模糊数为

$$P_i = \frac{f_{F_H} + f_H + f_H + f_{F_H}}{4} = [0.1\lambda + 0.6, -0.1\lambda + 0.85]. \quad (5.17)$$

由模糊集理论可知, 其平均模糊数 W 对应的函数为

$$f_W(z) = \begin{cases} \frac{z - 0.6}{0.1}, & 0.6 < z \leq 0.7, \\ 1, & 0.7 < z \leq 0.75, \\ \frac{0.85 - z}{0.1}, & 0.75 < z \leq 0.85, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (5.18)$$

模糊可能值 FPS 的计算, 采用左右模糊排序法将模糊结果转化为精确的概率值, 最大, 最小模糊集如下所示

$$f_{\max} = \begin{cases} x, & 0 < x < 1, \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (5.19)$$

$$f_{\min} = \begin{cases} 1 - x, & 0 < x < 1, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (5.20)$$

因此左右模糊值计算结果如下

$$FPS_R(W) = \sup_X [f_W(x) \wedge f_{\max}(x)] = 0.773, \quad (5.21)$$

$$FPS_L(W) = \sup_X [f_W(x) \wedge f_{\min}(x)] = 0.636. \quad (5.22)$$

精确概率计算如下

$$FPS(W) = [FPS_R(W) + (1 - FPS_L(W))]/2 = 0.568. \quad (5.23)$$

这里以信息技术问题条件概率表为例(见表4).

表4 信息技术问题条件概率表

(Table 4 Information technology problem condition probability table)

State 0	State 1	平均模糊数	模糊集	State 0	State 1
B2	B1	$0.1\lambda+0.325, -0.1\lambda+0.6$	$[0.675, 0.775, 0.825, 0.9]$	0.228	0.772
B1	B2	$0.1\lambda+0.325, -0.1\lambda+0.6$	$[0.325, 0.425, 0.5, 0.6]$	0.532	0.468
B1, B2	-	$0, -0.025\lambda+0.025$	$[0, 0, 0.025]$	0.976	0.024
-	B1, B2	$0.1\lambda+0.75, -0.1\lambda+0.95$	$[0.75, 0.85, 0.9, 0.95]$	0.161	0.839

6 生鲜供应链失效风险评估模型仿真及推理

6.1 贝叶斯网络模型的仿真

将优化后的贝叶斯网络, 计算得到的条件概率, 及根据统计数据得出的先验概率^[16], 使用GeNIe软件进行仿真, 通过将生鲜物流配送失效节点T的状态设为1, 即设T的State 1 = 100%, 逆向推理当生鲜物流配送已经失效的情况下各个风险节点的后验概率, 从而判定对其影响最大的因素, 仿真结果如图7和8所示.

自然灾害B12 交通堵塞B13 节点故障B14	State0				State1			
	State0	State1	State0	State1	State0	State1	State0	State1
State0	1	0	0.35	0	0.45	0	0.15	0
State1	0	1	0.65	1	0.55	1	0.85	1

图7 以外部环境为例的条件概率输入

(Figure 7 Conditional probability input with external environment as an example)

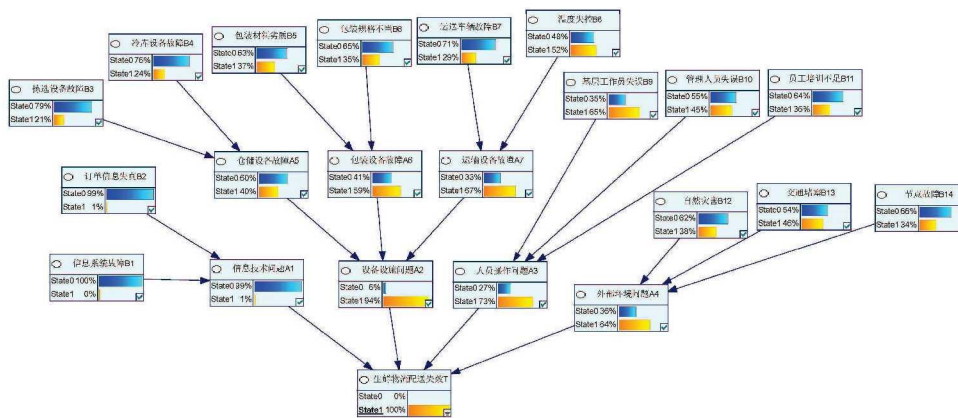


图8 贝叶斯网络仿真结果

(Figure 8 Bayesian network simulation results)

后验概率值如表5所示(State1=100%).

表 5 网络节点的先验概率和后验概率
(Table 5 A priori probability and a posteriori probability of network nodes)

贝叶斯节点	先验概率	后验概率
B1	0.001	0.001
B2	0.010	0.010
B3	0.200	0.209
B4	0.230	0.240
B5	0.350	0.365
B6	0.337	0.352
B7	0.275	0.287
B8	0.500	0.523
B9	0.625	0.646
B10	0.450	0.454
B11	0.360	0.362
B12	0.375	0.380
B13	0.568	0.432
B14	0.330	0.339

根据贝叶斯网络推理结果可以看出,引起生鲜物流供应链失效的主要原因是设施设备问题,其后验概率为 94%,按照仿真结果进一步推理得到最大致因链为温度失控 -> 运输设备故障 -> 设施设备问题 -> 生鲜物流配送失效.

6.2 概率推理检验

分别将信息技术问题 A1, 设施设备问题 A2, 人员操作问题 A3, 外部环境问题 A4 的发生概率改变为 100%, 比较以此观测这四种故障单独变化时对生鲜物流配送失效节点 T 的影响, 从而验证之前的风险评估结果, 如图 9 所示. 以 A1 为例.

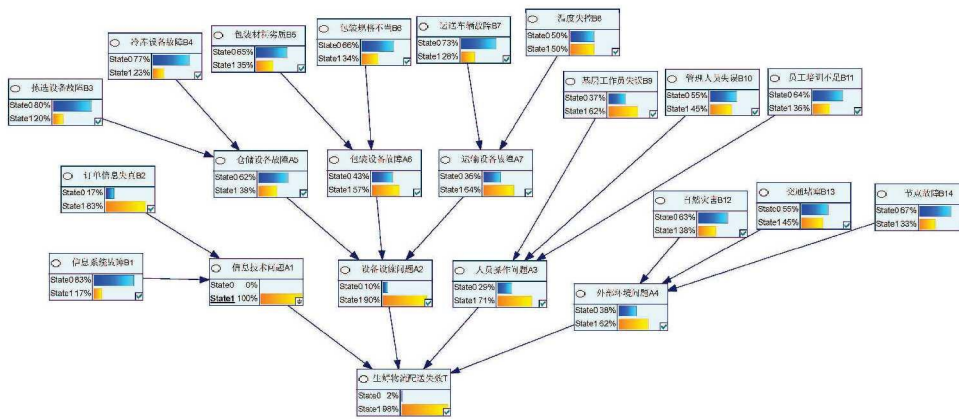


图 9 单独变化 A1 发生概率的仿真结果

(Figure 9 Simulation results of probability of occurrence of single change A1)

同理, 改变 A2, A3, A4 的值.

由表 6 可见, 当 A2 的 $State = 1$ 时, T 失效的概率为 97.82%, 即在其他条件均保持原值的情况下, 设备设施问题对生鲜供应链失效的影响最大. 从而验证了上述结果.

表 6 单独变化节点的概率推理
(Table 6 Probability reasoning of single changing node)

后验概率	T 状态
	State=1
$P(T A1)$	0.9777
$P(T A2)$	0.9782
$P(T A3)$	0.9677
$P(T A4)$	0.9620

6.3 敏感性分析

为了获得更加全面且准确地分析结果, 使用 GeNIe 软件对贝叶斯网络中各类别的各个风险节点概率单独做 0 到 1, 步长 0.1 的变化, 以此观测其对生鲜物流配送失效 T 的影响情况.

如图 10 所示, 当 A1, A2, A3, A4 4 个节点的发生概率分别从 0 到 1 均匀变化时, 系统失效概率均逐渐增加, 其中 $P(T|A2)$ 增长 6.97%, 变化幅度最大.

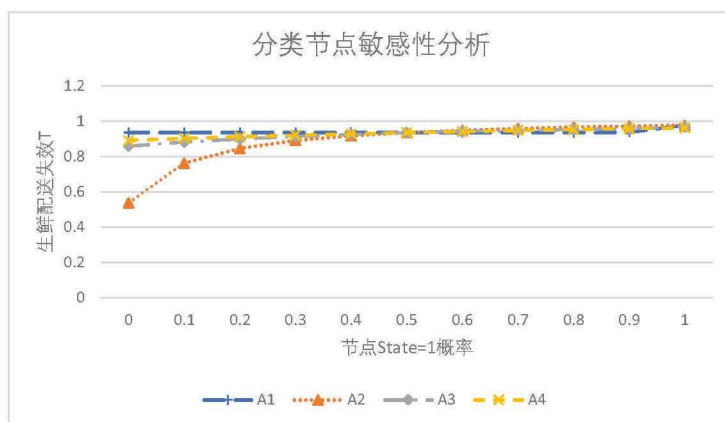


图 10 敏感性分析
(Figure 10 Sensitivity analysis)

如图 11 所示, 当 B1, B2 两个节点的发生概率分别从 0 到 1 均匀变化时, 系统失效概率前期保持平稳, 且两条曲线基本重合, 在发生概率为 0.85 时开始发生显著增长, B1 增长速度明显高于 B2.

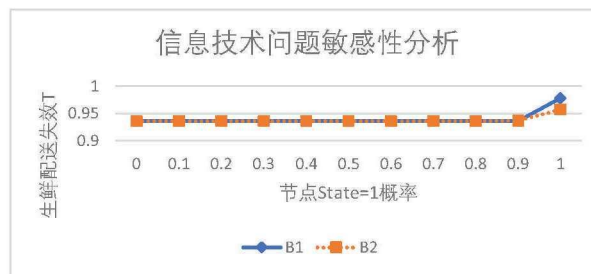


图 11 信息技术问题的敏感性分析

(Figure 11 Sensitivity analysis of information technology problems)

如图 12 所示, 当 A5, A6, A7 3 个节点的发生概率分别从 0 到 1 均匀变化时, 系统失效概率均逐渐增加, 其中 $P(T|A7)$ 由 0.8613 增长到 0.9782, 变化幅度最大.

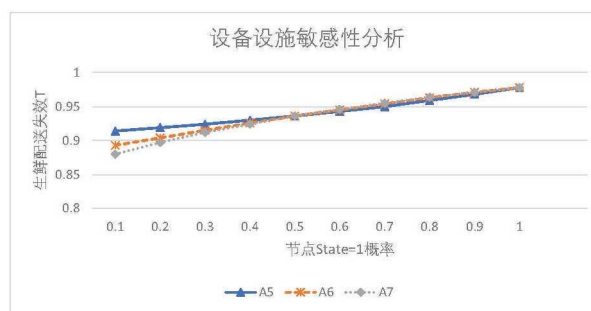


图 12 设备设施的敏感性分析

(Figure 12 Sensitivity analysis of equipment and facilities)

如图 13 所示, 当 B9, B10, B11 3 个节点的发生概率分别从 0 到 1 均匀变化时, 系统失效概率均逐渐增加, 其中由 B9 引起系统失效的概率变化幅度最大.

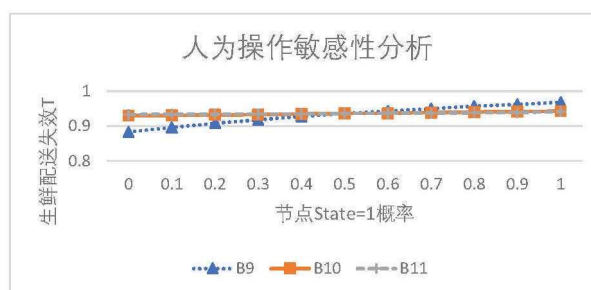


图 13 人为操作的敏感性分析

(Figure 13 Sensitivity analysis of human operation)

如图 14 所示, 当 B12, B13, B14 3 个节点的发生概率分别从 0 到 1 均匀变化时, 系统失效概率均逐渐增加, 其中 $P(T|B14)$ 增长 3.9%, 变化幅度最大。

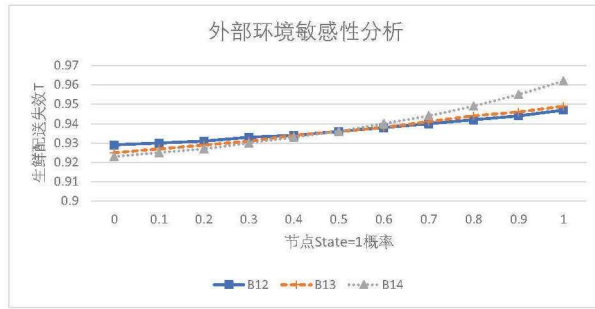


图 14 外部环境的敏感性分析

(Figure 14 Sensitivity analysis of external environment)

综上所述, 可以得到如下结论, 在类别分析中, 设备设施问题对系统失效的影响较大; 在信息技术问题中, 信息系统故障较订单信息失真对系统影响较大; 在设备设施问题中, 运输故障变化幅度最大, 曲线更为陡峭, 所以更加重要; 在人员操作敏感性分析中, 基层人员失误而造成的系统失效概率远大于管理人员失误; 在外界环境敏感性分析中, 节点故障的变化幅度相比于自然灾害的影响较大。

6.4 风险评估排序

仿真示意图如图 15 所示, 仿真数据结果整理得表 7。

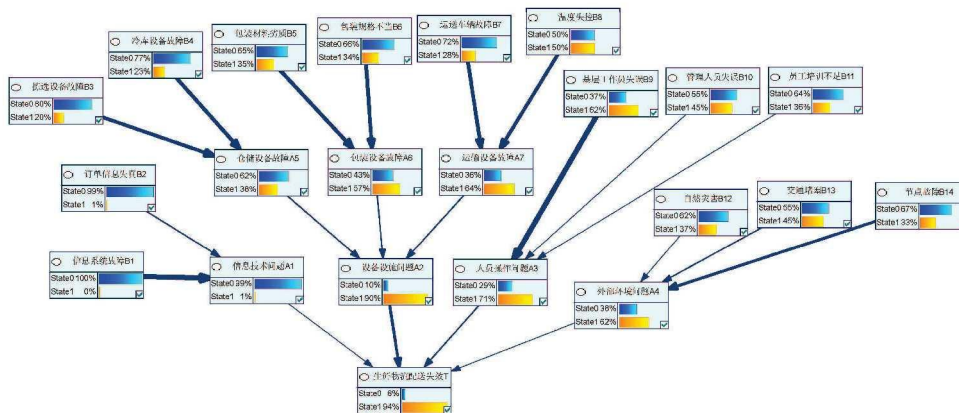


图 15 各节点相对于父节点的风险影响值仿真

(Figure 15 Simulation of risk impact value of each node relative to its parent node)

表 7 各子节点相对于父节点的风险影响值
(Table 7 Risk impact value of each child node relative to the parent node)

节点关系	风险影响值
B1- > A1	0.29045
B2- > A1	0.33233
B3- > A5	0.32271
B4- > A5	0.34974
B5- > A6	0.31952
B6- > A6	0.31055
B7- > A7	0.23284
B8- > A7	0.37733
B9- > A3	0.41533
B10- > A3	0.06839
B11- > A3	0.03519
B12- > A4	0.13146
B13- > A4	0.17861
B14- > A4	0.27216

根据 GeNIe 仿真结果及敏感性分析, 进一步计算其父节点对根节点的风险影响值. 其中 $\omega_{i,j}$ 为子节点对父节点的风险影响值, P_i 为父节点发生的后验概率, ω 为父节点对根节点的风险影响值.

$$\omega = P_i \sum_{j=1}^n \omega_{i,j}. \quad (6.1)$$

以信息技术节点对根节点的风险影响值为例,

$$\omega = P_i \sum_{j=1}^n \omega_{i,j} = 0.29045 \times 0.01 + 0.33233 \times 0.01 = 0.0062278. \quad (6.2)$$

计算各节点相对于根节点风险结果如图 16.

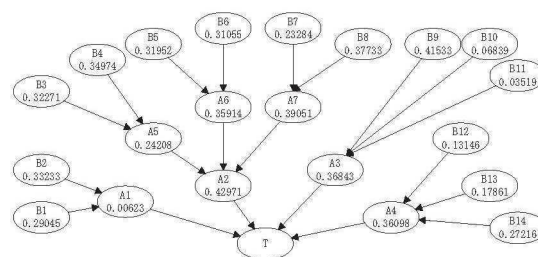


图 16 各节点风险值计算结果

(Figure 16 Calculation results of risk value of each node)

将 A1, A2, A3, A4 对根节点的风险影响值进行归一化处理并排序见表 8.

表 8 归一化风险影响值
(Table 8 Normalized risk impact value)

节点关系	风险影响值
A1- > T	0.005346
A2- > T	0.368740
A3- > T	0.316155
A4- > T	0.283186

7 结论

本文基于模糊集和贝叶斯网络建立了生鲜物流的风险评估, 并通过 GeNIe 对贝叶斯网络进行了仿真, 发现设备设施问题是影响该供应链失效的主要因素. 通过敏感性分析和相关性分析定量地计算出了各个风险因素对供应链失效的影响值. 对生鲜企业而言, 可以根据影响值的大小更为准确地进行风险规避. 例如对运输车辆的温控设备定期检修, 加大基层员工的培训, 选取更为结实的包装材料等措施都可以在一定程度上保证生鲜物流配送的有效性, 从而降低成本, 更好地为消费者服务.

参 考 文 献

- [1] 智研资讯. 2018-2024 年中国生鲜产品行业市场竞争现状及未来发展趋势研究报告. <http://www.chyxx.com/industry/201805/636536.html>. (Zhiyan information. Research Report on the market competition status and future development trend of China's fresh product industry in 2018-2024). <http://www.chyxx.com/industry/201805/636536.html>.)
- [2] Urien P. Internet Smart Card For Perishable Food Cold Supply Chain. *IEEE Eighth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*. 2013, **15**(4): 83-88.
- [3] Kalantari T, Khoshalhan F. Readiness assessment of leagility supply chain based on fuzzy cognitive maps and interpretive structural modeling: A case study. *Journal of Business & Industrial Marketing*, 2018, **33**(4): 442-456.
- [4] Leat P, Revoredo-Giha C. Risk and resilience in agri-food supply chains: The case of the ASDA Pork Link supply chain in Scotland. *Supply Chain Management: An International Journal*, 2013, **18**(2): 219-231.
- [5] Sharma S, Pai S S. Analysis of operating effectiveness of a cold chain model using Bayesian networks. *Business Process Management Journal*, 2015, **21**(4): 722-742.
- [6] Rostamzadeh R, Ghorabae M K, Govindan K, et al. Evaluation of sustainable supply chain risk management using an integrated fuzzy TOPSIS-CRITIC approach. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **175**: 651-669.
- [7] Can G F, Toktas P. A novel fuzzy risk matrix based risk assessment approach, *Kybernetes*, 2018, **47**(9): 1721-1751.

- [8] 邹毅峰, 谢如鹤, 邱祝强. 基于 GO-FLOW 法的荔枝冷链物流安全评价. 工业工程, 2008, **11**(6): 47-49.
(Zou Y F, Xie R H, Qiu Z Q. Safety evaluation of litchi cold chain logistics based on GO-FLOW method. *Industrial Engineering*, 2008, **11**(6): 47-49.)
- [9] 岑国姬. 生鲜农产品供应链风险评估与应对研究. 博士论文. 广西大学, 南宁, 2013.
(Cen G J. Research on risk assessment and response of fresh agricultural products supply chain. Doctor Thesis. Guangxi University, Nanning, 2013.)
- [10] 郭茜, 蒲云, 郑斌. 基于故障贝叶斯网的冷链物流系统可靠性分析. 控制与决策, 2015, **30**(18): 911-916.
(Guo X, Pu Y, Zheng B. Reliability analysis of cold chain logistics system based on fault Bayesian network. *Control and Decision Making*, 2015, **30**(18): 911-916.)
- [11] 赵鑫. 生鲜电商环境下冷链物流末端配送风险研究. 博士论文. 安徽财经大学, 蚌埠, 2017.
(Zhao C. Research on the risk of distribution at the end of cold chain logistics in the environment of fresh E-commerce. Doctor Thesis. Anhui University of Finance and Economics, Bengbu, 2017.)
- [12] 中华人民共和国国家标准物流术语 (节选). 物流技术与应用, 2001, **23**(4): 29-30.
(National standard logistics terminology of the people's Republic of China (excerpt). *Logistics Technology and Application*, 2001, **23**(4): 29-30.)
- [13] 许慎思. 生鲜农产品电子商务的物流系统可靠性分配模型. 硕士论文. 北京工商大学, 北京, 2016.
(Xu S S. Reliability distribution model of logistics system for fresh agricultural products e-commerce. Master Thesis. Beijing Business University, Beijing, 2016.)
- [14] 朱允刚. 贝叶斯网学习中若干问题研究及其在信息融合中的应用. 硕士论文. 吉林大学, 长春, 2012.
(Zhu Y G. Research on some problems in Bayesian network learning and its application in information fusion. Master Thesis. Jilin University, Changchun, 2012.)
- [15] Markov Z. MDL-based Unsupervised Attribute Ranking. The Twenty-Sixth International FLAIRS Conference, 2013.
- [16] Wickens C D, Hollands J G, Banbury S, et al. Engineering psychology and human performance. Psychology Press, 2015.