

引用格式: 石念.贝叶斯网络在消费品安全风险评估中的应用思考[J]. 标准科学,2025(3):106-112.

SHI Nian. Application of Bayesian Networks in Consumer Product Safety and Risk Assessment [J]. Standard Science, 2025(3):106-112.

贝叶斯网络在消费品安全风险评估中的应用思考

石 念

(上海市质量和标准化研究院)

摘 要: 【目的】当前,在消费品安全风险评估实践中,国内外主要采用风险矩阵法来判定风险类别,并以此作为决策参考,然而,该方法在风险等级判定方面存在不足。【方法】引入贝叶斯网络(BNs)的思路,提出一种改进的消费品安全风险评估方法,该方法可解决风险矩阵法在风险等级判定方面的局限性。【结果】通过对比贝叶斯网络与风险矩阵法,详细阐述了贝叶斯网络在消费品安全风险评估中的应用优势,并借助一个简单的贝叶斯网络分析案例,展现了其对欧盟官方典型的消费品风险评估方法(RAPEX风险矩阵法)的优化和改进。【结论】利用贝叶斯网络思路可以优化和改进RAPEX风险矩阵法,提供了量化和可验证的风险等级判定结果,这不仅增强了风险管理决策的科学性和可靠性,还提升了监管资源的利用效率。

关键词: 贝叶斯网络; 消费品安全; 风险评估; RAPEX风险矩阵法; 产品风险

DOI编码: 10.3969/j.issn.1674-5698.2025.03.016

Application of Bayesian Networks in Consumer Product Safety and Risk Assessment

SHI Nian

(Shanghai Institute of Quality and Standardization)

Abstract: [Objective] Currently, in the practice of consumer product safety risk assessment, the risk matrix method is mainly used at home and abroad to determine the risk category, and serves as reference for decision-making; however, this method has limitations in risk level determination. [Methods] Tries to introduce the idea of Bayesian Networks (BNs), and puts forward a kind of improved consumer product safety risk assessment method, which can solve the limitations of the risk matrix method in risk determination. [Results] By comparing the risk matrix method and BNs, the advantages of the application of the BNs in the risk assessment of consumer product safety are elaborated in detail, and the optimization and improvement of the typical EU consumer product risk assessment method (RAPEX) is shown with the help of a simple case study of the BNs. [Conclusion] The use of the BNs idea can optimize the RAPEX risk matrix method, providing quantitative and auditable risk level determination results, which not only enhances the science and reliability of risk management decisions, but also improves the efficiency of the use of regulatory resources.

Keywords: Bayesian networks, consumer product safety, risk assessment, RAPEX, product risk

作者简介: 石念, 硕士, 工程师, 研究方向为质量与标准化。

1 消费品安全风险评估方法应用现状及问题

消费品安全风险评估为国家市场监管部门实施消费品风险管理提供科学决策依据。风险评估结果直接指导产品召回等风险处理及应对和监管措施的实施,以最大程度降低产品可能导致的伤害风险,并保护消费者的合法权益。消费品是指市场上为满足消费者需求而提供的非食品类产品。鉴于消费品的多样性和消费者消费行为的复杂性和不确定性,消费品风险评估实践中常见的方法并不多,目前主要包括:欧盟委员会的RAPEX风险矩阵方法、新西兰消费者事务部提出的诺莫图(Nomograph)/列线图方法,以及其他风险矩阵(Matrix)方法。RAPEX风险矩阵法,即欧盟非食品类消费品快速预警系统(Rapid Alert System for Non-Food Consumer Products, RAPEX)的通用风险评估方法,自2016年起成为欧盟和英国监管部门官方正式采用的消费品风险评估方法。美国、日本在消费品安全风险评估中也采用了类似的风险矩阵法进行风险等级的最终判定,但其在伤害概率和伤害严重程度划分标准、风险分类等级数量方面与欧盟有所不同。

在我国,尽管官方尚未形成统一的消费品风险评估方法,但已经出台了多项相关的国家标准,以指导和规范消费品安全风险评估的实际操作,这些标准主要为推荐性的。例如,GB/T 22760—2020《消费品安全 风险评估导则》GB/T 39063—2020《消费品召回 电子电器风险评估》以及GB/T 40981—2021《消费品安全 物理危害风险评估 通则》等,这些为消费品安全风险评估提供了明确的规范和指导。这些标准在风险评估方法上大多借鉴了欧盟RAPEX风险矩阵法,特别是在风险等级划分的矩阵表判定中,采用了伤害发生概率的7个层次和受伤严重程度的四级水平划分。虽然RAPEX风险矩阵法操作简便且实用而被广泛采用,但它在风险等级判定时存在一定的局限性,如难以明确区别不同风险等级的界限。

贝叶斯网络(Bayesian networks或BNs),作为一种模拟风险因素与观测数据之间因果关系的强有力工具,为不确定性因果关系的建模提供了严格和规范的方法。特别是在处理新证据或新观测数据等不确定性因素时,贝叶斯网络能够弥补传统产品风险矩阵评估方法的不足。尽管贝叶斯网络技术已经广泛运用在医学、金融等领域风险评估,但是在消费品风险评估领域,其应用还处在探索阶段,具有巨大的潜力和发展空间。

2 消费品安全风险评估方法研究现状与技术比较

2.1 贝叶斯网络运用在消费品安全风险评估的研究综述

在全球范围内,学者们已经开始探索将贝叶斯网络技术运用到消费品安全风险评估研究之中。例如,国内研究学者刘霞等^[1]基于风险耦合、仿真技术、机器学习等理论方法,构建了消费品安全风险评估模型,并在消费品安全伤害情景构成因素关联关系中应用了贝叶斯网络技术。然而,该研究并未全面考虑除产品伤害情景以外的其他关键风险因素。韩国Suh^[2]开发了一个产品风险评估系统,使用贝叶斯网络,根据韩国消费者机构提供的伤害信息,对33种儿童产品进行风险评估,但未提供贝叶斯网络因果图。英国Hunte等^[3]研发了一个通用的贝叶斯网络模型,改进了产品风险评估方法,展示了在相关测试和产品实例数据可用和不可用的情况下,如何对产品进行风险评估。虽然评估结果可验证且优于RAPEX风险矩阵法评估,但是整个评估过程需要重新构建贝叶斯网络关系模型,过程极其复杂,涉及各项风险因素的参数设置,需要提供很多条件概率分布。这些条件概率通常由专家判断提供,对专业知识的要求会比RAPEX风险矩阵法评估时更高。后续的分析将详细阐述风险矩阵法与贝叶斯网络风险评估技术的差异。

他们的研究结果均表明,贝叶斯网络技术在评估消费品安全风险方面表现出色,优点在于能

够提供更易于解释且准确的预测。若贝叶斯网络分析覆盖所有产品风险评估过程,实际操作中工作量巨大,会消耗大量资源。因此,本文建议将贝叶斯网络作为对传统风险矩阵法的补充或拓展技术,以改进消费品安全风险评估方法。

2.2 贝叶斯网络与传统风险矩阵法比较

IEC 31010:2019《风险管理 风险评估技术》^[4]提供了众多起源于不同技术领域和发展历史的风险评估技术,这些风险评估技术不仅可以独立应用,还可以通过调整、组合或者进行扩展,以适应当前和未来的需求,进而深化我们对风险的理解。本标准提供的后果/可能性矩阵(即风险矩阵法)与贝叶斯网络风险/影响图是两种重要的风险评估技术。对两者的主要指标性特征进行对比分析,详见表1。

在比较2种风险评估技术所需应用资源和数据需求时,贝叶斯网络分析在资源需求上属于中

到高级别。该分析不仅需要大量的历史数据来构建和校准模型,还需要深厚的专业知识来理解和应用。相比之下,风险矩阵法分析在资源需求上相对较低,操作简便,通常只需要相对少量的历史数据和专业知识来构建风险矩阵。因此,若贝叶斯网络分析覆盖所有产品风险评估过程,则会耗费大量时间和成本,可能导致监管资源的浪费。

为了在节约监管资源的同时解决风险矩阵分析中风险等级判定的模糊性问题,本文提出了将贝叶斯网络作为风险评估方法的补充,来增强风险评估的可信度。以欧盟典型的RAPEX风险矩阵法为例,在此基础上分析采用贝叶斯网络风险评估技术。借助一个简单的案例来展现贝叶斯网络在消费品风险评估应用中的优势,有助于克服RAPEX风险矩阵法在使用新证据数据时纳入因果解释的局限性。

表1 风险矩阵法与贝叶斯网络的主要指标性特征比较

特征说明	技术	
	后果/可能性矩阵(风险矩阵法)	贝叶斯网络(BNs)/影响图
描述	选择一对后果(影响程度)和可能性(发生概率)比较单个风险的方法,并将其显示在矩阵上,其中一个轴是影响程度,另一个轴是发生概率	使用概率表示的变量及其因果关系的图形模型,一个基本的贝叶斯网络包含代表不确定性的变量。扩展版本称为影响图,包括代表不确定性(条件概率表和概率推理)、后果(影响程度)和行动的变量
应用	适用于较为简单的风险评价,快速报告与分享	适用于复杂的、多变量的风险评估,识别风险、评价风险及在评估干预选项
起始信息/数据需求	通常只需要少量的历史数据和专业知识来构建风险矩阵	通常需要大量的历史数据和专业知识来构建和校准贝叶斯网络模型
专业知识	正确使用所需专业知识水平要求低,风险因素之间的关系相对简单	正确使用所需专业知识水平要求高,处理复杂的、多变量的风险评估问题,能够描述风险因素之间的复杂关系和相互影响
定性/定量/半定量	主要依赖于定性分析,通过风险矩阵工具提供定性化的风险评估结果	主要依赖于定量分析,通过概率推理提供量化的风险评估结果
应用所需资源	应用技术所需的时间和成本低	应用技术所需的时间和成本中高

共同点

范围: 适用于组织层面、部门或项目层面、单个流程或设备层面风险
时间范围: 适用于任何时间范围(短期、中期或长期风险)
决策层级: 适用于战略、战术或运营层级风险

3 理论基础与典型案例分析

根据ISO 31000:2018《风险管理指南》中对于风险管理流程的描述可知,风险评估(risk assessment)环节之后紧接着的是风险应对(risk treatment)。风险评估的结果为风险应对决策提供重要依据,通过将风险评估结果与既定的风险标准相比较,可以确定风险及其等级是否能够接受或容忍,从而决定是否需要采取额外的风险控制措施。以下论述当前欧盟广泛采用的RAPEX风险矩阵法在消费品风险评估中的局限性,并借助实际案例,阐释贝叶斯网络技术对风险评估过程的优化和改进。

3.1 RAPEX风险矩阵法与局限性

RAPEX风险矩阵法是欧盟成员国政府在消费品安全评估中广泛采用的官方方法。根据2023年欧盟委员会修订发布的《欧盟快速信息系统RAPEX管理指南》(EU) 2019/417文件,该方法在消费品风险评估中确定风险等级需要遵循3个步骤:(1)识别危险严重性;(2)估计消费者因为这些危险而受伤的概率;(3)将危害(伤害的严重程度)和概率(伤害发生的可能性)结合起来,判定风险等级/风险级别。风险等级可分为“严重”“高”“中”和“低”风险四类,其中,最高风险等级为“严重”,见表2。根据《欧盟市场监管法规》(EC) No 765/2008第20条,成员国必须对存在

“严重”风险的产品采取快速干预措施,包括召回、撤回或禁止在市场上销售这些产品,并根据第22条立即通知欧盟委员会。这表明,欧盟当局将“严重”风险视为采取快速干预措施的关键阈值,而对于“高”“中”和“低”风险产品,则并非如此。

产品评估风险等级是否达到“严重”,是决定监管部门是否立即采取风险应对措施的关键。然而,在评估结果处于“严重”和“高”风险之间界限模糊时(见表2粗实线所示),且敏感性分析也无法确保风险水平随概率变化的稳定性,这会使得评估结果的可信度受到质疑,RAPEX风险矩阵法的评估面临重大挑战。如果风险等级本应判定为“高”,却被错误评估为“严重”,可能会导致监管资源的不必要浪费。在这种情况下,贝叶斯网络技术提供了一种整合新不确定因素(新获证据或新观测数据)来优化和改进风险评估过程的方法。这种方法不仅适用于“严重”与“高”风险之间的划分问题,同样也适用于“高”与“中”,“中”与“低”的风险等级之间的划分问题。以下对贝叶斯网络分析进行介绍和说明。

3.2 一个简单的贝叶斯网络因果分析与推导

贝叶斯网络是一种有向无环图(DAG)的可视化风险的图形模型方法,用于描述变量之间的因果关系。如图1所示,一个简单的贝叶斯网络关系可简单描述为:A导致B,A和B导致C。贝叶斯网络由定性和定量两部分组成。定性部分由“节点”

表2 RAPEX风险矩阵伤害严重程度和伤害发生概率相结合的风险等级/水平表

在产品可预见生命周期的伤害概率		受伤的严重程度 (低→高)			
		1级	2级	3级	4级
	高	>50 %	高	严重	严重
		> 1/10	中	严重	严重
		> 1/100	中	严重	严重
		> 1/1000	低	高	严重
		> 1/10000	低	中	严重
		> 1/100000	低	低	中
		> 1/1000000	低	低	低
	低	< 1/1000000	低	低	低

和“有向弧”组成。节点代表随机变量（离散或连续），如事件或行动。节点通过有向弧连接，有向弧表示变量之间的直接依赖关系，通常是因果关系。图1节点A（parent）指向节点B，称节点A影响到节点B，节点A也被称为B的“父节点”，可表示为 $pa(B)$ 。贝叶斯网络的定量部分由与每个节点相关联的条件概率分布（概率表）组成，这些概率对每个节点相关联进行量化，由点估计表示，用于描述节点与其父节点之间的关系强度。其中子节点的状态取决于父节点值的组合， $P(B|A)$ 表示父节点A事件对子节点B事件的影响程度。

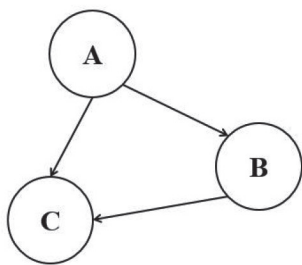


图1 简单的贝叶斯网络图

贝叶斯定理会根据新的证据修正一个假设的“先验概率” $P(A)$ ，从而得到该假设在新证据条件下的“后验概率” $P(A|X)$ 。在图1中，事件A、B、C的联合概率可通过它们各自的局部条件概率分布相乘得到，这一关系可以用公式（1）表示。贝叶斯定理一般表示形式见公式（2）。

$$P(A, B, C) = P(C|A, B)P(B|A)P(A) \quad (1)$$

$$P(A_i|B) = \frac{P(A_i, B)}{P(B)} = \frac{P((B|A_i))P(A_i)}{\sum_n P(B|A_n)P(A_n)} \quad (2)$$

式中： $P(A)$ 表示A概率的先验评估； $P(B)$ 表示B概率的先验评估； $P(A|B)$ 表示给定B发生时A的概率（后验评估）； $P(B|A)$ 表示给定A发生时B的概率； A_i 表示A事件中第*i*个假设， $n=1, 2, \dots, N$ 。

贝叶斯网络模型中的所有计算（推理）可由一些专业软件实现。在本文中，使用贝叶斯定理将图1所示的贝叶斯网络图的因果关系，推导出事件 C_i 条件下事件A的后验概率见公式（3）。

$$P(A_i|C_j) = \frac{P(A_i, C_j)}{P(C_j)} = \frac{P(C_j|A_i)P(A_i)}{\sum_n \sum_m P(C_j|A_n, B_m)P(B_m|A_n)P(A_n)} \quad (3)$$

式中： C_j 表示C事件中第*j*个假设， $m=1, 2, \dots, M$ ， $n=1, 2, \dots, N$ 。

下面案例中的贝叶斯网络分析会使用到公式

（3）计算后验概率。

3.3 典型案例分析

为了便于理解，这里参考和借用《欧盟快速信息系统RAPEX管理指南》中的香薰大豆蜡蜡烛案例和英国产品安全和标准办公室（OPSS）分析报告数据。由于文化传统和消费习惯的差异，考虑到我国消费者在使用香薰大豆蜡蜡烛的习惯与欧洲国家存在细微差异，在此案例基础上，做了部分数值修改，并增加了估计风险因素，以便进一步诠释。值得说明的是，在产品的预期寿命期内，由于消费者使用产品过程中的行为难以预测，存在不确定性，假定风险评估员将充分利用现有信息，对潜在的伤害场景进行假设，并估计这些场景发生的可能性。

表3列出了伤害场景和最严重的场景伤害类型“致命中毒”概率水平预估，通过5个步骤进行说明。第一步，假设香薰大豆蜡蜡烛有50%的概率发生着火；第二步，考虑到人们通常不会在无人时点燃蜡烛以照明或者营造氛围，假设人离开房间的概率仅为5%；第三步，放置蜡烛的台面，基于现代家庭装修中木制品的广泛使用，如木质地板、木桌等，保守估计家具或窗帘着火概率为50%；第四步，若房间内无人，吸入有毒烟雾的风险概率较低（2.5%）；第五步，新增加一个风险因素“蜡烛质量有缺陷”，考虑到蜡烛生产工艺的简单性且原材料易获得性，以及生产商质量控制水平参差不齐，假设这一缺陷发生的概率为30%。

3.3.1 RAPEX风险矩阵法结果

RAPEX风险矩阵评估通过分步骤评估每个伤害场景，为每一步赋予相应概率，通过将这些概率相乘，得到了该场景的总体概率。为了确保评估结果的稳健性，有时需要进行敏感性分析，重复测试这两个因素（一般考虑概率的

表3 RAPEX风险矩阵法及加入贝叶斯网络分析对香薰大豆蜡蜡烛的风险评估

风险评估方法	伤害场景	伤害类型	受伤严重程度	受伤的可能性	结果概率	风险等级
RAPEX风险矩阵法	香薰大豆蜡蜡烛着火会产生很高的火焰; 引起家具或窗帘着火; 人若不在房间里, 但吸入有毒气体	致命中毒	4级	1) 大豆蜡蜡烛着火: 50%; 2) 人一段时间不在房间里: 5%; 3) 家具或窗帘着火: 50%; 4) 吸入有毒烟雾的人: 2.5%; 5) 蜡烛质量有缺陷概率: 30%	0.000094	无法确定“严重”还是“高”
加入贝叶斯网络分析, 修正“受伤的可能性5)”	同上	同上	同上	1) 同上; 2) 同上; 3) 同上; 4) 同上; 5) 蜡烛质量有缺陷概率: 13.4%	0.000041	高

变化, 因为伤害的严重程度通常更有把握预测) 变化时风险水平的波动程度。在本案例中, 将所有概率值相乘, 得到总体概率为0.000094 (即 $50\% \times 5\% \times 50\% \times 2.5\% \times 30\%$), 这一概率低于表2中伤害概率阈值1/10000, 但高于1/100000, 初步被判定为“高”风险。如果将0.000094四舍五入至0.0001, 则结论升级为“严重”风险。需要说明的是, 0.000094接近1/10000, 但是未达到或超过阈值1/10000, 因此敏感性分析在此情况下不太适用, 无法有效测试评估结果的稳健性, 导致风险等级的判定陷入窘境。

3.3.2 贝叶斯网络对RAPEX风险矩阵法的改进

借助贝叶斯网络能够整合新证据或新观测数据等其他不确定因素的优势, 优化以上风险评估过程, 帮助得到更可靠的风险等级。假设根据新获得的信息, 确信销售出去的香薰大豆蜡蜡烛均未发现质量缺陷, 3个节点及相关先验概率和条件概率数据在表4中有所体现, “Yes”表示肯定, “No”表示否定。

将这一关键证据信息纳入到风险评估过程中, 并利用产品检测信息的贝叶斯网络图(图2)进行分析, 分析软件可根据输入数据实现统计推断。图2(a)中, 原产品有缺陷的概率 $P(A_{yes})$ 为30%, 根据新获得的信息, 确认产品发现缺陷的概率 $P(C_{no})$ 为100%, 并进行相应调整, 这时贝叶斯

表4 香薰大豆蜡蜡烛质量有缺陷概率的先验概率和条件概率表

A: 产品有缺陷		B: 产品进行检测		C: 发现缺陷	
No	0.7	No	0.4	No	1
				Yes	0
	0.3	Yes	0.6	No	1
				Yes	0
Yes	0.7	No	0.2	No	1
				Yes	0
	0.3	Yes	0.8	No	0.2
				Yes	0.8

网络图的其他节点的概率也随之调整, 结果见图2(b), “A: 有缺陷”中“ Yes” 概率变为13.4%, 这一结果也可以通过前面推导出的公式(3)进行计算。这一贝叶斯网络分析结果表明, 如果产品在检测中没有发现缺陷, 产品有缺陷的后验概率 $P(A_{yes}|C_{no})$ 会从 $P(A_{yes})$ 的30%显著下降至13.4%。这一信息对于修正风险评估等级结果具有重大的意义。

在整合了新信息后, 重新计算了总体概率为0.000041。该值远低于1/10000, 这样对该风险水平的评估有了更高的信心, 将香薰大豆蜡蜡烛风险等级定为“高”而非“严重”风险。基于这一判

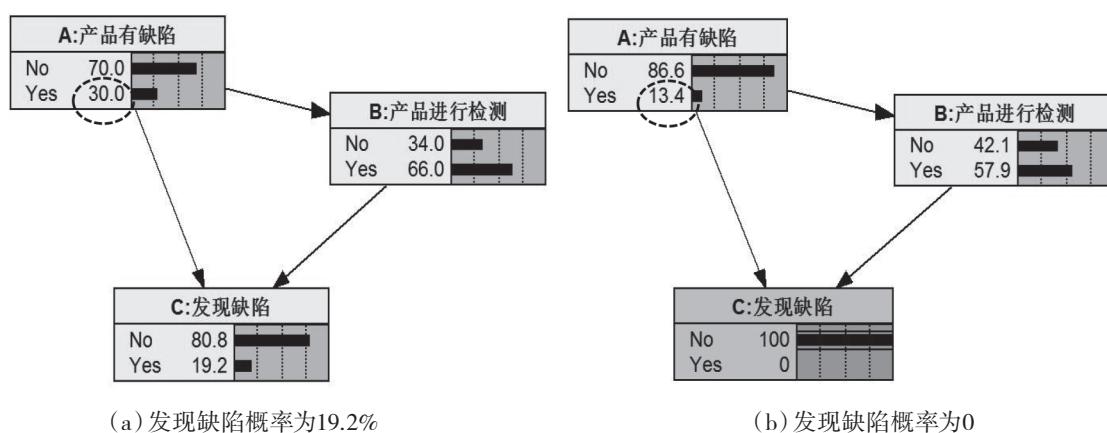


图2 考虑产品检测信息的贝叶斯网络图

定结果,监管部门无需立即采取行动,但仍将持续关注这一风险,从而在一定程度上节约监管资源。当然,如果贝叶斯网络分析新变量信息后,导致产品风险最终判定为“严重”,监管部门可依据情况立即采取适当措施以降低风险或消除风险。总体而言,贝叶斯网络能够整合新的风险变量信息,对风险评估总体概率进行修正,得出更可信可靠的产品风险等级,从而更高效地为风险管理决策提供参考。

4 结语

本研究将贝叶斯网络应用于消费品安全风险评估中,为该领域提供了一个全新的视角,开辟了新的思考路径。通过一个具体案例,展示了贝叶斯网络如何优化典型的风险矩阵法(欧盟RAPEX风

险矩阵法),解决了敏感性分析失效时,RAPEX方法在风险等级判定上存在局限性的问题。贝叶斯网络独到之处在于其建模能力,它能够处理消费品安全风险相关的复杂数据,有效地整合各类不确定性因素,并精准地构建起因果关系模型。通过对消费品潜在的多元风险源以及风险传播路径进行深入分析,为风险评估工作提供更为科学、全面和可靠的量化支持,从而显著提高了消费品安全风险评估的准确性。这不仅有助于帮助产品风险监管部门做出更加明智和有效的决策,也促进了推动消费品行业的健康、稳健发展。然而,在将贝叶斯网络应用于消费品安全风险评估实践中,如何合理分配资源,高效、准确地建立贝叶斯网络,以及如何处理专家意见的不确定性,仍是当前面临的重要研究和挑战。

参考文献

- [1] 刘霞,刘碧松,吴倩.消费品安全风险评估方法研究:基于仿真技术[M].北京:中国质检出版社,2017.
- [2] SUH J. Development of a product risk assessment system using injury information in Korea consumer agency[J]. Journal of Digital Convergence, 2017, 15(4): 181-190.
- [3] HUNTE J L, NEIL M, FENTON N E. A causal Bayesian network approach for consumer product safety and risk assessment [J]. Journal of Safety Research, 2022, 80: 198-214.
- [4] Risk management—Risk assessment techniques: IEC 31010:2019[S].