doi:10.3772/j.issn.2095-915x.2019.03.005

供应链风险识别中的弱信号介入、感知机制与观测方法研究

开放科学（资源服务）标识码（OSID）

董尹[1] 刘千里[2]

1. 合肥学院 合肥 230601；
2. 南京大学信息管理学院 南京 210023

摘要：风险识别是供应链主动式风险管理的首要环节，需要弱信号的介入，通过对其内涵和感知机制的研究，让供应链风险识别在理念和时间先行性上获得提升。首先，对供应链风险识别过程中存在的问题进行了梳理。其次，在形成弱信号概念的基础上，对弱信号介入供应链风险识别的可行性开展分析。之后，以态势感知作为理论基础，借助卡尔曼滤波框架进行补充，形成供应链风险识别中的弱信号感知机制。最后，提出运用模糊 TOPSIS 方法对供应链风险弱信号观测进行描述，并借助仿真算例检验了模糊 TOPSIS 方法对于供应链风险弱信号观测的适用性。

关键词：弱信号；供应链风险识别；态势感知；卡尔曼滤波；模糊 TOPSIS
中图分类号：G35

Intervention, Awareness Mechanism and Observation Method of Weak Signals in Supply Chain Risk Identification

DONG Yin[1] LIU Qianli[2]

1. Department of Management, Hefei University, Hefei 230601, China;
2. School of Information Management, Nanjing University, Nanjing 210023, China

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目“弱信号生命周期视角下的供应链风险信号识别研究”（71603069）；国家社科基金青年项目“意义构建视野下安全情报的弱信号研究”（15CTQ032）；江苏省社会科学基金青年项目“面向国家安全的弱信号意义构建机制研究”（14TQC004）。

作者简介：董尹 (1981-)，博士，副教授，研究方向：竞争情报、物流与供应链管理，Email: dy_asaka@qq.com；刘千里 (1983-)，博士，讲师，研究方向：竞争情报、信息资源管理。

doi:10.3772/j.issn.2095-915x.2019.03.005

Abstract: Risk identification is the first important stage in supply chain proactive risk management, and needs weak signals to get involved in order to enhance that perspective and leading time of supply chain risk identification. First of all, finding problems in the supply chain risk identification process.Secondly, forming the concept of weak signals, and analyzing the feasibility of getting involved in supply chain risk identification. Thirdly, based on Situation Awareness theory, we describe that mechanism of supply chain risk weak signals awareness by Karlman filter framework as supplement. Finally,putting forward the way how to observe supply chain risk weak signals by Fuzzy TOPSIS.Moreover, it is tested by a simulation example that fuzzy TOPSIS is workable for observation of supply chain risk weak signals.

Keywords: Weak signals; supply chain risk identification; situation awareness; karlman filter; fuzzy TOPSIS

引言

“风险识别”是有效开展供应链风险管理的首要阶段。广泛、持续不断地汇集相关数据和信息对于风险识别来说是重要的基础工作，但是，通常一般意义上搜集到的数据和信息并非是为风险识别而准备的，还需要“处理和加工”来对其进行初步鉴别、整理和序化，这就带来了时滞问题。另一方面，传统的风险识别是在风险事故发生前，对已确定或者几乎成为定局的事件进行总结和处理，从而识别所出面临的风险及分析发生风险事故潜在原因的过程，留给行为主体控制与决策的时间较短，识别效果也不尽明显。然而，基于弱信号的供应链风险识别实质在于对未来变化的推测，突出前瞻性，对各种征兆保持敏感，可使风险预警时间得以提前。特别是某段时间内，竞争环境中某些指标发生细微变化时，可通过对供应链内外环境中风险弱信号的侦测进行风险识别，进而辅助行为主体的战略和战术决策，增强整条供应链在面对竞争动态和环境变化时所需的掌控力。

1 弱信号在供应链风险识别中的介入

1.1 供应链风险识别过程中存在的问题

（1）对风险触发事件与供应链绩效之间关系的理解不足

无论是供应链风险还是一般性风险，风险与事件相关已被广泛接受，但人们通常对供应链风险评价和评估往往是建立在一起触发事件对供应链整体绩效影响的基础之上，如图 3（a）所示。然而，实际情况并不是只有这一种，供应链的绩效由多方面组成，并且风险事件的触发也会由多个触发事件造成。所以，在供应链风险识别过程中，对风险事件与供应链绩效之间关系的理解是识别的基础，除了图 1（a）指出的情况之外，还有另外两种情况：①单一风险触发事件对一个或多个供应链绩效指标产生影响，如图 1（b）所示；②多个触发事件对一个或多个供应链绩效指标产生影响，图 1（c）所示。

（2）概率陷阱与认知偏见

尽管概率学说是现代风险理论的基础之

一，但在使用概率方法进行供应链风险识别过程中，人们经常会忽略风险和概率都具有着随时间变化这一动态属性。另外，概率是对不确定性的衡量，它需要有关“不确定性”的信息，当所需信息不足或缺失的时候，使用概率进行风险识别将变的困难，这也是为什么“低概率 / 高影响”事件不易被发现的原因。所以，在供应链风险识别过程中要注意风险会随着时间推移而演化，风险清单上的排序也要做出相应调整。

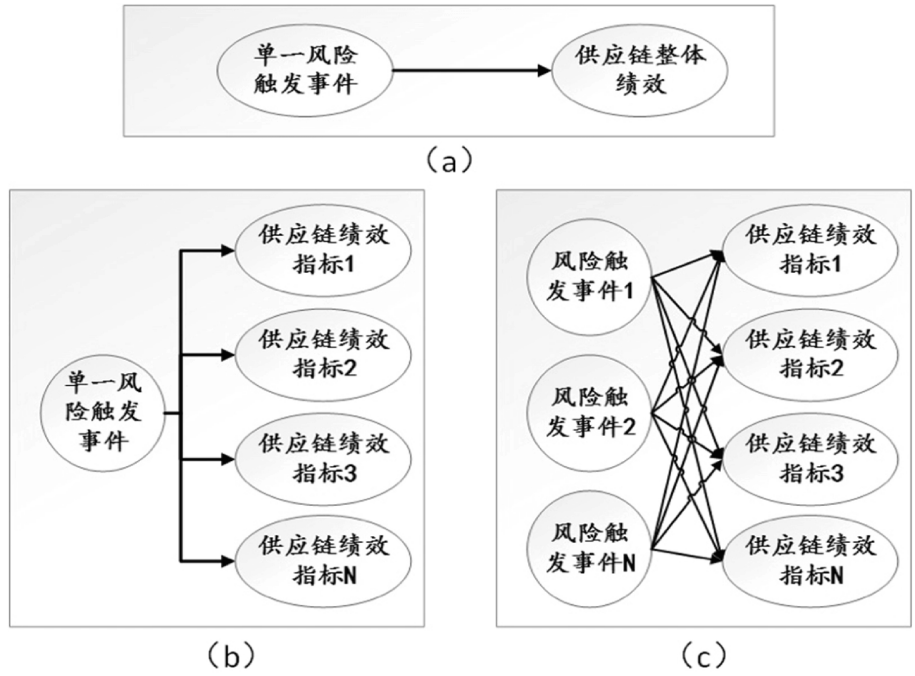

图 1 风险触发事件与供应链绩效之间关系

除此之外，对风险识别产生影响的还有认知偏见（Cognitive Biases）。认知偏见并非来自做出某种判断时理智上或感情上的倾向性，而是来自头脑思考的方式，这种偏见对人们如何估计各种可能性、评估各种迹象和归结因果关系有影响 [1]。在认知偏见的影响下，供应链风险识别人员往往会在海量信息里寻找与自己已有看法相一致的信息来证实自己的观点和假设，一旦遇到“必要的”异常信息，不是反思自己的观点或假设是否有误，而是试图进行各种解释，以证明自己已有的观点和假设是正确的。因此，在供应链风险识别过程中，还要借助认知心理学的研究成果去克服这些偏见。

（3）风险识别过程中过于悲观和过于乐观

在风险世界中，“黑天鹅”一词常被用来形容那些概率非常低又会带来重大影响的风险事件 [2]，它们既不能用一种概率分布来表达，但也不意味着完全不可能发生。所以，想要识别这类事件通常是非常困难的，既无迹可寻也无前车之鉴，会让管理者和决策者产生沮丧的心态，从而放弃识别或预测的念头，甚至幻想

doi:10.3772/j.issn.2095-915x.2019.03.005

这种事件根本不会发生。

另一种情况则是对于识别的结果过于乐观，其实只是看到了一些明显的和琐碎的风险，而没有看到最重要的或完全忽视重要的风险；亦或者，面对风险清单用着单一的应对策略就可以把风险消除，殊不知风险的传递性和风险事件间的关联性也是带来供应链整体损失的原因之一。

1.2 弱信号介入的可行性

1.2.1 弱信号的概念

本文的“弱信号”主要是指在社会科学中且更多面向经济管理领域的不完全信息。董尹等（2018）对这一范畴下的弱信号相关研究进行了梳理，并给出初步的理解和设定：情报学语境下的弱信号，指的是对变化的感知，同时也是与该变化相关的知识在形成过程中的基本假设[3]。

随后，通过进一步研究发现，弱信号也还是一种语用信息。Dervin 的意义构建理论认为信息使用是一种建构，而不是一种传递；应该从使用者的角度而不是观察者的角度看待信息的使用[4]。弱信号就是一种强调与主体相关程度的信息，没有主体决策的问题域就没有弱信号的发现，没有主体认知环节的介入就没有解读，没有主体逻辑推理的支持就没有弱信号的证实和证伪。换句话说，一个弱信号号价值的高低依赖于它与主体信息状态相关性的高低。

由此，笔者尝试借鉴 Karl Weick 的意义构建理论（或称之为“释意理论”），在前人的基础上重新界定弱信号的概念。意义构建的研究源于认知心理学。对于组织来说，其目的是为了解释组织内外发生的事件和问题，这些事件和问题常常是出乎意料之外的、复杂的、令人困惑的[5]；对于个人来说，“人”是积极的行动者，他们把自己的观点、看法、经验等因素投射到信息上[6]；同时，环境被看作是一个输出信息而不是一个输入信息，人、组织与环境相互作用[7]。可见，意义构建涉及的三个方面恰恰也是形成弱信号的三个维度，于是我们借用 Weick 意义构建过程对弱信号进行定义，即弱信号是：

一个持续的意义构建过程。首先从当前经验流的异常中注意到模糊且不确切的提示，随后抽取出线索并进一步润色和细化，指引可能会产生的变化和趋势，最终通过事后的反思确定效果。

1.2.2 弱信号介入的可行性分析

（1）目的的相似性。弱信号本质上仍是信息诸多类型中的一种，从大量的原始数据中产生，并夹杂着“噪声”，通过合理的解释或推断，它能够成为预警的“触发器（Trigger）”，带来预测信息，用于决策支持。相类似，供应链风险识别也是为了后续的风险分析、风险评估、风险应对等环节奠定基础，也是起到预警的作用，而且风险识别过程中常会遇到信息不完全的情况，这恰恰也是弱信号的特性之一。所以，弱信号可以成为供应链风险识别的重要补充，提升风险识别的质量。

（2）早期预警信号（EarlyWarning Signals）在其他风险管理分支中有不同程度涉及。通过对文献的调研发现，早期预警信号是一个与弱信号非常接近的概念，只是早期预警信号

更倾向于指的是经过解读的、具有预警价值的弱信号[8-9]。而且，在危机管理[10-12]、安全管理[13]、柔性工程[14-15]等风险管理分支领域，都强调了早期预警信号在风险识别和主动式风险管理的作用。所以，弱信号的运用对于供应链风险识别来说也是有意义的尝试。

（3）弱信号有助于指引性风险指标的形成，缩短供应链风险识别周期。弱信号有着隐匿性、不确定性等特征让其的作用并不那么突出，但是有时往往是关键所在。正如 Ansoff（1984）所说，弱信号是“用来预测不可知变化”[16]。Coffman（1997）指出如果可以尽早的解读弱信号，并在此基础上进行战略实施，企业则能识别更多的风险和获得更多的机会[17]。供应链风险识别活动也具有预警性质，与其他预警活动一样，需要对信息进行搜集，也就是说需要风险指标作为基础。但在现有的供应链风险识别过程中多使用的是事后型的迟滞性指标（例如：已发生的事故或未遂事故的数量），而非指引性指标，所以无法起到早期预警的作用，也错失了实施预防和缓解措施的时机。然而，当弱信号介入，则弥补了这一不足之处，通过弱信号的意义构建，尽早的发现触发事件，加快了供应链风险识别的过程（如图 2 所示），为后续的风险分析、评估和应对争取更多时间。

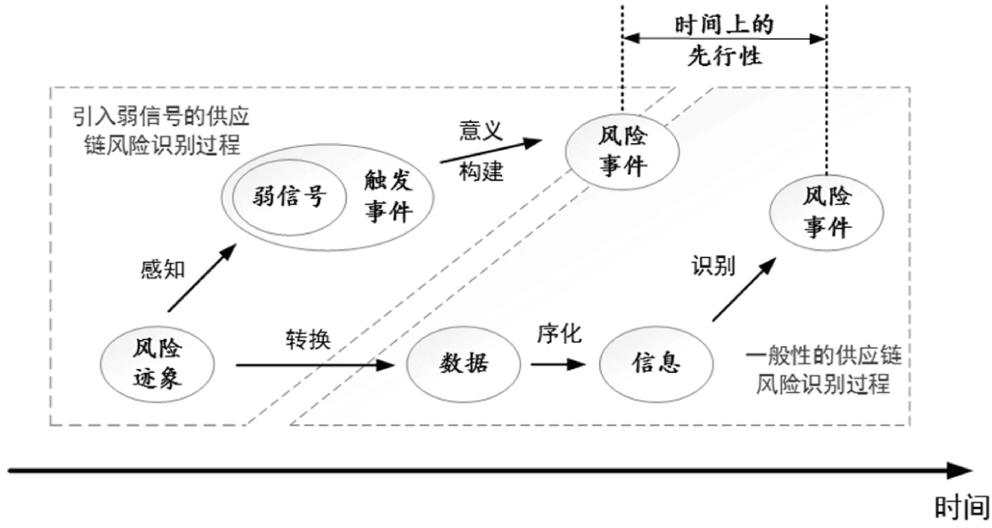

图 2 弱信号在供应链风险识别中的介入

综上所述，将弱信号引入到供应链风险识别中是可行的且有必要的，进而形成“供应链风险弱信号识别”这一课题。鉴于弱信号既是一种不完全信息，也是一种语用信息，同时还是一个意义构建过程。就目前常用的风险识别方法来看，还没有合适的途径来阐明供应链风险弱信号识别这一过程，为此，我们需要从弱信号感知和观测、语义关联、语用评估三个方面进行探讨，本文将重点诠释其中的感知机制与观测方法。

doi:10.3772/j.issn.2095-915x.2019.03.005

2 供应链风险弱信号感知机制

弱信号因其隐匿性、不确定性等特征，使其不易被侦测，而且弱信号的的作用和价值与主体的信息状态息息相关，需要人的解读才能体现。所以，对于供应链风险弱信号的识别首先考虑从认知角度，引入“态势感知（Situation-Awareness）”作为理论基础，进一步用卡尔曼滤波（Kalman Filter）与模糊 TOPSIS（Fuzzy-TOPSIS）相结合的方法进行补充完善。

2.1 态势感知与弱信号感知

态势感知的概念最初来自战场指挥系统，是通过对战场复杂形势的分析评估与预测作出适当的反应[18]。Endsley（1988，1995，2000）提出的态势感知模型在动态决策领域被广泛接受，该模型将态势感知分为三个级别：

级别 1 为知觉层（perception），主要通过不同感觉器官对当前情形中的各要素的状态、属性、变化等进行洞察，获取有价值的线索；

级别 2 为理解层（comprehension），建立在知觉层基础上，结合（个人）目标或目的对线索的重要性进行洞悉；

级别 3 为最高层——推测层（projection），是指在前两层的基础上，从当前事件和变化中预见未来事件和影响的能力[19-21]。

同时 Endsley（1995）也指出态势感知作为一种认知技能，与决策和行动实施一样都会受到个人因素和任务（系统）因素的影响。

态势感知对于弱信号感知有着很好的理论指引作用。首先，态势与弱信号有着类似的意指，都需要从周边环境中发现线索，然后去理解、权衡，进而推测潜在的影响；其次，弱信号的感知同样要借助个人的认知活动，可以用态势感知模型进行解释。但是，该模型也并非完美，从其本身来看，赵柯然和王延飞（2018）指出三个问题：

①不同结构的数据使用能让感知结果更理想；

②如何让结果与真实情况更接近是关键问题；

③不具有完备描述新生知识的能力[22]。

另一方面，就供应链风险弱信号感知来说，态势感知模型还有一定的不足：

①态势感知模型面向所有类型的信息，并不是针对弱信号这种不完全信息；

②影响态势感知的那些因素是否对弱信号感知也起作用，不得而知；

③态势感知模型更多的是从组织内个人任务视角，或是通过技术系统辅助个人完成任务为前提，像供应链这种更宽泛的组织环境并未被考虑。

2.2 卡尔曼滤波框架下的供应链风险弱信号感知机制描述

卡尔曼滤波是一种在时域范围内对动态系统进行状态预测的递推算法。同时，作为理论，它在控制论和信息论的衔接上起到了非常重要的作用；现实中，它的应用也较为广泛，从航海导航、全球定位、雷达目标跟踪、图像处理，到经济周期测算、金融风险预测，等等。卡尔曼滤波的本质是参数化的贝叶斯推断模型，其核心思想是预测与反馈，完整的滤波过程可以用 9 个方程来表示：

基本状态

$$x_k = F_k x_{k-1} + B_k u_k + w_k$$ ⇦ 状态转移方程 （公式 1）

$$z_k = H_k x_k + v_k$$ ⇦ 状态观测方程 （公式 2）

预测过程

第一步：$$\hat{x}_{k|k-1} = F_k \hat{x}_{k-1|k-1} + B_k u_k$$ （公式 3）

第二步：$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k$$ （公式 4）

更新准备阶段

$$\tilde{y}_k = z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}$$ （公式 5）

$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k$$ （公式 6）

更新过程

第三步：$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \tilde{y}_k$$ （公式 7）

第四步：$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1}$$ （公式 8）

第五步：$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1}$$ （公式 9）

以下，将结合卡尔曼滤波的 9 个方程对供应链风险弱信号感知过程进行描述：

（1）正如在弱信号概念中提及的，弱信号感知源于对“异常”的警觉和注意，而这份“异常”来自认知层面就现在与过去的比较，即 k 时刻供应链系统风险状态观测 z_k 和 k-1 时刻系统风险状态真实值 x_{k-1} 的差异。另一方面，由于风险会随时间演化，这里我们给出前提条件：k 时刻供应链系统风险状态真实值 x_k 是从 k-1 时刻的风险状态真实值 x_{k-1} 演化而来。所以，在状态转移方程（公式 1）和状态观测方程（公式 2）的基础上，可以对 k 时刻的状态真实值 x_k，乃至 k+1 时刻的状态真实值 x_{k-1} 进行预测，也就是说，根据过去和当前的测量数据对弱信号预示的变化或趋势做出估计。公式 1 和公式 2 中符号含义如表 1 所示。

表 **1** 状态转移方程和状态观测方程中符号含义

公式符号	含义
x_k, x_{k-1}	k和k-1时刻系统状态真实值，对于供应链系统可以设置为由风险事件组成的向量
N_k	让系统状态从k-1时刻向k时刻进行转变的转换矩阵，对于供应链系统可以设置为含有时间步长的矩阵
u_k	u_k可选择的控制器向量
B_k	B_k作用于控制器u的控制矩阵 但供应链系统不像电子或机械设备可以实时控制，处于简化的目的，可暂时忽略
w_k	过程噪声，是均值为0、方差为常数的白噪声，并以此形成过程噪声协方差矩阵Q_k
zk	k时刻系统观测值，对于供应链系统可设置为由弱信号组成的向量
H_k	k时刻观测矩阵，作用是将隐含的真实状态空间映射到观测空间，体现出z_k和x_k各元素之间的关系
v_k	观测噪声，是均值为0、方差为常数的白噪声，并以此形成观测噪声协方差矩阵R_k

doi:10.3772/j.issn.2095-915x.2019.03.005

（2）在卡尔曼滤波框架下，供应链风险弱信号感知过程也分为两个阶段：预测和更新。这里的预测意味着个人或组织对供应链风险触发事件 x_k 做出的初步判断，是先验的估计值，并形成需要观测的弱信号向量 z_k。所以，第一步在公式 1 的基础上，通过 k-1 时刻的估计值 $\hat{x}_{k-1|k-1}$ 得到 k 时刻的估计值 $\hat{x}_{k|k-1}$，只是这一步是一种理想状态下对估计值的预测，不能引入不可控的过程噪声 w_k。第二步，则是要对预测精度进行度量，通过公式 1 和公式 3 计算预测误差协方差矩阵 $P_{k|k-1}$ 获得，在这步中可以引入过程噪声，形成过程噪声协方差矩阵 Q_k。然而，无论预测的精度如何，还需要把这个估计值转换成观测值的预测值，并与 k 时刻的实际观测值 z_k 进行比较获得差值 $\tilde{y}_k$，来确认是否要进行状态的更新，并且用这个差值进行补偿。同样，也需要对观测值的精度进行度量，通过协方差矩 S_k 实现，包含观测噪声的协方差矩阵 R_k。

（3）经过公式 5 和公式 6 的准备阶段，接下来可以进行状态更新过程，对于供应链风险弱信号感知来说，则是对之前判断进行的修正。在预测阶段，是通过 k-1 时刻对 k 时刻状态进估计获得 k 时刻风险触发事件的预测值，那么在此基础上想获得更加准确的 k 时刻估计值 $\hat{x}_{k|k}$，需要进一步把基于 k-1 时刻对 k 时刻状态的估计值 $\hat{x}_{k|k-1}$ 与差值 $\tilde{y}_k$ 进行线性组合，而连接两者的桥梁就是 K_k（也就是著名的卡尔曼增益，Kalman Gain），对于供应链风险弱信号感知可以理解为当前风险环境下弱信号观测的重要程度，或者可以更简单地理解为是否要进行弱信号观测。

既然 K_k 代表的是弱信号观测重要性，那么对于它的计算则要从 k-1 时刻对 k 时刻的预测误差 $P_{k|k-1}$ 情况入手。譬如，考虑两种极端情况：当 $P_{k|k-1}$=1，意味着之前的预测是完全不准确的，需要 K_k 进行补偿。根据公式 2、5、6、7 可以进一步知道，k 时刻状态的估计值 $\hat{x}_{k|k}$ 与 z_k 有着密切的关系，而且每个观测值都与特定的噪声相关，随着 P_k 的增大，K_k 会越来越小，这又说明了当 k 时刻弱信号观测的噪声如果过大，其预测值是不可取的。所以，在更新阶段的最后，仍要对更新后 k 时刻的预测误差进行计算，即后验预测误差协方差矩阵 $P_{k|k}$。从公式 9 可以看出，对 $P_{k|k}$ 的取值主要是根据 $P_{k|k-1}$ 和 K_k，这个值体现了我们对弱信号的观测之于风险事件的更新究竟起到何种程度的作用，以及是否可以直接用观测值进行更新。

综上所述，卡尔曼滤波框架下的供应链风险弱信号感知是一个具有迭代性质的学习过程，只要赋予适当的初始值并配合观测，就可以完成迭代，如图 3 所示。而且，无论是供应链风险弱信号感知，还是卡尔曼滤波本身，都体现了诠释循环思想：前理解对于理解本身具有重要影响，理解必须要借助前理解才得以实现，并且成为下一阶段理解的“前结构”[23]。

3 基于模糊 TOPSIS 方法的供应链风险弱信号观测

在供应链风险弱信号感知过程中，弱信号观测是更新阶段重要的组织部分，但在供应链这个管理范畴下，无法像使用电子、机械设备那样，通过传感器或测量仪等观测部件对外部

环境进行实时的扫描。所以，面对供应链风险环境，弱信号的观测还是需要通过“人”去完成，而 TOPSIS 方法（Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution，逼近理想解排序方法）作为一种被广泛使用的综合评价方法[24]，因其前提条件约束少、无需两两比较、计算简单等特点，我们考虑把其当作“传感器”用于弱信号观测。

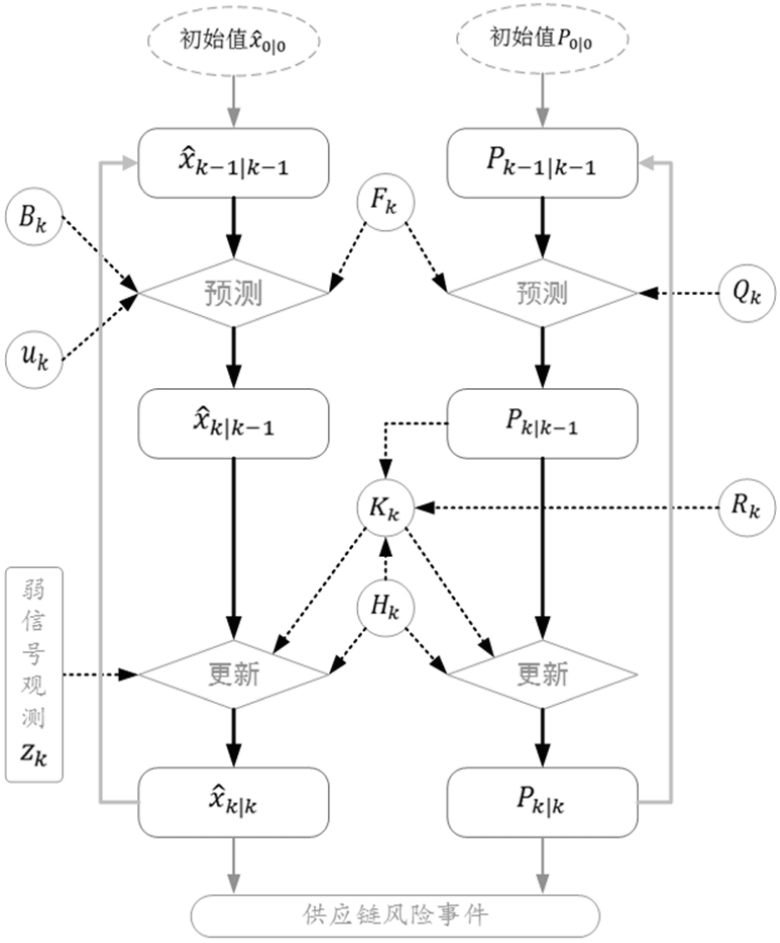

图 3 卡尔曼滤波框架下供应链风险弱信号感知过程

另一方面，鉴于风险的不确定性，弱信号的观测如果只用“非此即彼”的判断也不尽合理，所以我们同时引入模糊逻辑概念，形成模糊 TOPSIS（FuzzyTOPSIS）。模糊逻辑是一种多值逻辑，用近似的而非精确的方式进行推断。相比较传统的二元设置，模糊逻辑允许对真值设置一定的取值范围。也就是说，可以对介乎完全真与完全假之间的局部真值描述，通过将语言变量转换成数值变量再进行计算。以下给出供应链风险弱信号的观测步骤。

步骤 1：选择评价成员和确定评价标准。

（1）供应链风险涉及诸多方面，所以尽可能从企业内外、不同部门选取成员，整合供应

doi:10.3772/j.issn.2095-915x.2019.03.005

链网络内外部多样性的异构信息源。成员数记作 k。

（2）评价标准则可以参照不同的供应链风险类别划分，形成相应的层次模型，如图 4 所示。

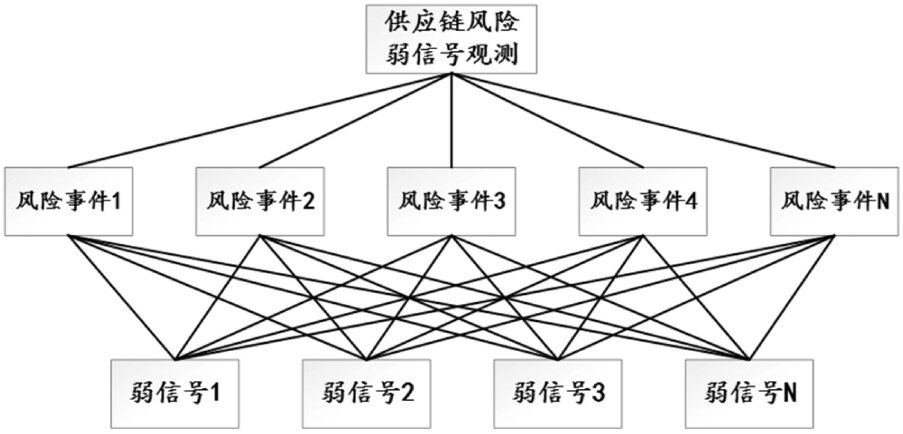

图 4 供应链风险弱信号观测层次模型

步骤 2：确定用于衡量风险事件层和弱信号层的语言变量（Linguistic Variables），以及对应的模糊量化标度——三角模糊数[25]，如表 2 和表 3 所示。

表 2 弱信号层评价标准

语言变量（弱信号揭示程度）	模糊量化标度（a，b，c）
非常差（VB）	（0，0，1）
差（B）	（0，1，3）
较差（MB）	（1，3，5）
一般（N）	（3，5，7）
较好（MG）	（5，7，9）
好（G）	（7，9，10）
非常好（VG）	（9，10，10）

表 3 风险事件层评价标准

语言变量（风险事件发生可能性）	模糊量化标度（f，g，h）
非常低（VL）	（0，0，0.1）
低（L）	（0，0.1，0.3）
较低（ML）	（0.1，0.3，0.5）
中等（M）	（0.3，0.5，0.7）
较高（MH）	（0.5，0.7，0.9）
高（H）	（0.7，0.9，1.0）
非常高（VH）	（0.9，1.0，1.0）

步骤 3：构建风险事件可能性判断矩阵$\widetilde{E}$和弱信号揭示性判断矩阵$\widetilde{D}$，并计算每个风险事件的权重$\tilde{w}_j$。矩阵$\widetilde{E}$表示评价者对风险事件 j 发生可能性的判断，矩阵$\widetilde{D}$表示评价者认为弱信号 i 对于风险事件 j 揭示性程度的判断。

$$\widetilde{E}=\begin{pmatrix}\widetilde{E}_1^1 & \cdots & \widetilde{E}_1^p\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ \widetilde{E}_n^1 & \cdots & \widetilde{E}_n^p\end{pmatrix} \quad （公式 10）$$

$$\widetilde{D}=\begin{pmatrix}\tilde{x}_{11} & \cdots & \tilde{x}_{1n}\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ \tilde{x}_{m1} & \cdots & \tilde{x}_{mn}\end{pmatrix} \quad （公式 11）$$

$$\tilde{w}_j=\frac{1}{k}(\widetilde{E}_j^1+\widetilde{E}_j^2+\cdots+\widetilde{E}_j^k) \quad （公式 12）$$

$$\tilde{x}_{ij}=\frac{1}{k}(\tilde{x}_{ij}^1+\tilde{x}_{ij}^2+\cdots+\tilde{x}_{ij}^k) \quad （公式 13）$$

$$\widetilde{E}_j^k=(f_j^k,g_j^k,h_j^k) \quad （公式 14）$$

$$\tilde{x}_{ij}^k=(a_{ij}^k,b_{ij}^k,c_{ij}^k) \quad （公式 15）$$

$i=1,2,\cdots,m;\ j=1,2,\cdots,n;\ k=1,2,\cdots,p$

步骤 4：鉴于风险事件层和弱信号层评价标度的取值范围不尽相同，所以还需对矩阵$\widetilde{D}$进行标准化，形成包含元素$\tilde{r}_{ij}$的 $m\times n$ 矩阵$\widetilde{R}$。

$$\widetilde{R}=[\tilde{r}_{ij}]_{m\times n}$$ （公式 16）

当 j 属于效益型（或称之为正向型）目标集 B 时，

$$\tilde{r}_{ij}=\left(\frac{a_{ij}}{c_j^+},\frac{b_{ij}}{c_j^+},\frac{c_{ij}}{c_j^+}\right),\quad c_j^+=\max(c_{ij}^i),\ j\in B$$ （公式 17）

当 j 属于成本型（或称之为负向型）目标集 C 时，

$$\tilde{r}_{ij}=\left(\frac{a_j^-}{a_{ij}},\frac{a_j^-}{b_{ij}},\frac{a_j^-}{c_{ij}}\right),\quad a_j^-=\min\left(a_{ij}^i\right),\ j\in C$$ （公式 18）

$$a_{ij}=\frac{1}{k}\sum_{k=1}^{k}a_{ij}^k\ ,\ b_{ij}=\frac{1}{k}\sum_{k=1}^{k}b_{ij}^k\ ,\ c_{ij}=\frac{1}{k}\sum_{k=1}^{k}c_{ij}^k$$ （公式 19）

上述标准化方式，可以确保所有元素的三角模糊数取值范围为 [0，1]。

步骤 5：构建加权标准化矩阵$\tilde{v}$，由矩阵$\widetilde{R}$和风险事件权重向量$\tilde{w}_j$点积获得。

$$\tilde{v}=\left[\tilde{v}_{ij}\right]_{m\times n}\ ,\ \tilde{v}=\tilde{r}_{ij}\bullet\tilde{w}_j$$ （公式 20）

步骤 6：确定正、负理想解，A_j^+和A_j^-。

$$A_j^+=\begin{cases}\max(\tilde{v}_{ij}^i),\quad j\in B,\ i=1,2,\ldots m\ ;j=1,2,\ldots n\\ \min(\tilde{v}_{ij}^i),\quad j\in C,\ i=1,2,\ldots m\ ;j=1,2,\ldots n\end{cases}=(\tilde{v}_1^+,\tilde{v}_2^+,\cdots,\tilde{v}_n^+)$$ （公式 21）

$$A_j^-=\begin{cases}\max(\tilde{v}_{ij}^i),\quad j\in B,\ i=1,2,\ldots m\ ;j=1,2,\ldots n\\ \min(\tilde{v}_{ij}^i),\quad j\in C,\ i=1,2,\ldots m\ ;j=1,2,\ldots n\end{cases}=(\tilde{v}_1^-,\tilde{v}_2^-,\cdots,\tilde{v}_n^-)$$ （公式 22）

本文的研究是希望通过弱信号观测尽早且准确地发现风险事件，以及弱信号能够正确的揭示风险事件，所以，本文中的每个风险事件j可以理解为效益型目标。由此，正、负理想解为:

$$A_j^+=\left[(1,1,1)_1,(1,1,1)_2,(1,1,1)_3,\cdots,(1,1,1)_n\right]$$
$$A_j^-=\left[(0,0,0)_1,(0,0,0)_2,(0,0,0)_3,\cdots,(0,0,0)_n\right]$$ （公式 23）

步骤 7：计算每个弱信号 i 在加权标准化矩阵$\tilde{v}$中的值与正、负理想解的欧氏距离。

$$d_i^+=\sum_{j=1}^{n}d(\tilde{v}_{ij},\tilde{v}_j^+),\quad i=1,2,\cdots,m$$ （公式 24）

$$d_i^-=\sum_{j=1}^{n}d(\tilde{v}_{ij},\tilde{v}_j^-),\quad i=1,2,\cdots,m$$ （公式 25）

两个三角模糊数的欧氏距离计算可以根据公式：

$$d(\tilde{m},\tilde{n})=\sqrt{\frac{1}{3}\left[(\tilde{m}_1-\tilde{n}_1)^2+(\tilde{m}_2-\tilde{n}_2)^2+(\tilde{m}_3-\tilde{n}_3)^2\right]}$$
$$\tilde{m}=(\tilde{m}_1,\tilde{m}_2,\tilde{m}_3),\quad \tilde{n}=(\tilde{n}_1,\tilde{n}_2,\tilde{n}_3)$$ （公式 26）

由步骤 4 中的正、负解的的值可得：

$$d_i^+=\sqrt{\frac{1}{3}\left[(\tilde{m}_1^1-1)^2+(\tilde{m}_2^1-1)^2+(\tilde{m}_3^1-1)^2\right]}+\sqrt{\frac{1}{3}\left[(\tilde{m}_1^2-1)^2+(\tilde{m}_2^2-1)^2+(\tilde{m}_3^2-1)^2\right]}$$
$$+\cdots+\sqrt{\frac{1}{3}\left[(\tilde{m}_1^j-1)^2+(\tilde{m}_2^j-1)^2+(\tilde{m}_3^j-1)^2\right]}$$ （公式 27）

$$d_i^-=\sqrt{\frac{1}{3}\left[(\tilde{m}_1^1-0)^2+(\tilde{m}_2^1-0)^2+(\tilde{m}_3^1-0)^2\right]}+\sqrt{\frac{1}{3}\left[(\tilde{m}_1^2-0)^2+(\tilde{m}_2^2-0)^2+(\tilde{m}_3^2-0)^2\right]}$$
$$+\cdots+\sqrt{\frac{1}{3}\left[(\tilde{m}_1^j-0)^2+(\tilde{m}_2^j-0)^2+(\tilde{m}_3^j-0)^2\right]}$$ （公式 28）

doi:10.3772/j.issn.2095-915x.2019.03.005

步骤 8：计算每个弱信号 i 的贴近系数（Closeness CoeNNicient）CC_i，并以此形成供应链风险弱信号观测向量 z。

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, \quad i = 1,2,\ldots,m$$
$$z = (CC_1, CC_2, \cdots, CC_m) \qquad \text{（公式 29）}$$

4 供应链风险弱信号观测仿真算例

为了验证上述供应链风险弱信号观测过程的可行性，我们尝试以“三鹿奶粉”事件为例，进行供应链风险弱信观测复盘。

首先，卡尔曼滤波框架下的弱信号感知需要初始值 $\hat{x}_{0|0}$，而这个初始值则产生于“三鹿奶粉”事件爆发之前，长久以来乳品行业的畸形发展，即在整个乳品供应链中，成本和利润呈“倒金字塔”分配格局。同时，这一现象的普遍性也让预测误差初始值 $P_{0|0}$ 非常小，所以可以初步判断：三鹿公司的供应链存在着潜在的风险，但仍需要通过弱信号观测对预测进行更新。

第二步，将借助模糊 TOPSIS 方法对三鹿公司供应链风险弱信号进行观测，以图 1 中的供应链风险类别划分为基础，假设有 5 种可能存在的风险事件，构建三鹿公司供应链风险识别层次模型，如图 5 所示，其中 4 个弱信号分别从历史事件中析出。

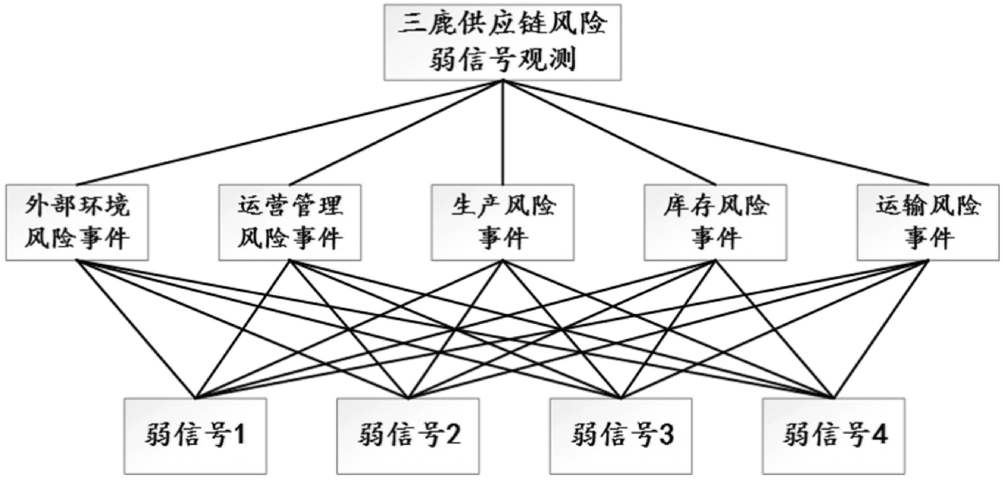

图 5 三鹿公司供应链风险弱信号观测层次模型

弱信号 1：2004 年安徽阜阳奶粉事件，三鹿位列不合格名单之中，但随后被证实为检测人员失误所致。阜阳奶粉事件之后，我国奶粉行业将蛋白质含量列为检测标准之一，采用凯氏定氮法。

弱信号 2：2005 年，雀巢奶粉碘超标。

弱信号 3：2007 年，我国出口美国的宠物食品中含有三氯氰胺，造成宠物中毒死亡。

弱信号 4：凯氏定氮法存在不足之处，蛋白质和三氯氰胺都含氮。

第三步，请硕士、博士研究生和供应链管理领域专业人士模拟观测评价，根据表 2 和表 3 的评价准则，形成评价矩阵，如表 4 和表 5 所示。

表 4 弱信号对于供应链风险事件揭示程度的评价

供应链风险事件	弱信号	专家																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
外部环境风险事件	1	MG	G	G	MG	G	MG	G	VG	MG	MG	VG	VG	MG	G	MG	VG	VG	G	MG	MG
	2	N	MG	G	N	G	MG	MG	N	MG	N	MG	VG	MG	G	N	N	MG	G	MG	VG
	3	MB	B	N	N	MG	B	MB	N	G	MB	MG	B	G	B	B	MB	B	G	MG	MB
	4	MG	N	MG	VG	VG	G	MG	G	G	MG	G	MG	G	N	MO	VG	G	N	MB	B
运营管理风险事件	1	N	MB	G	N	G	MG	N	MG	N	MG	MB	MG	G	MB	N	MB	MG	B	G	MG
	2	VB	N	MB	B	MB	MG	VB	N	G	G	B	VB	N	MG	MB	B	G	N	MB	B
	3	VG	MB	MG	G	N	B	VG	G	MG	N	G	N	MG	MG	VG	G	MG	MB	VG	N
	4	MB	MG	B	G	B	N	MB	B	G	MB	G	MG	MG	VG	MB	MG	G	MB	N	MG
生产风险事件	1	VG	N	G	MG	MG	G	MG	N	G	N	MG	G	MB	MG	B	G	B	VG	N	MG
	2	MB	B	MG	VB	N	B	G	G	MB	N	G	MG	MB	MG	VG	G	MG	MB	B	MB
	3	VG	N	MG	VG	VG	G	MG	G	G	MG	G	VG	G	N	MB	VG	G	N	VG	G
	4	VB	MB	N	B	MG	MB	VB	B	MB	VB	B	VB	MB	N	B	G	MG	MB	VB	N
库存风险事件	1	G	MG	MG	VG	G	N	VG	N	MG	MG	VG	G	G	MG	MG	VG	G	VG	N	MG
	2	B	N	MB	MG	G	N	MB	N	MG	MG	N	G	MB	MG	MG	N	G	B	N	MG
	3	VG	G	N	MB	VG	G	N	VG	G	VG	G	N	VG	G	MG	MG	G	MG	N	VG
	4	MB	B	MG	VB	N	B	N	G	MB	N	G	MG	MB	MG	VB	G	MG	MB	B	MB
运输风险事件	1	VG	G	MG	N	G	MG	MG	G	MG	N	VG	VG	G	MG	MG	N	G	MG	VG	G
	2	VB	B	MB	VB	B	VB	MB	MG	VB	G	MG	MB	B	MB	MB	MG	G	N	VB	MB
	3	N	MG	VG	VG	G	MG	MG	N	G	MG	MG	G	MG	N	VG	MG	VG	G	G	MG
	4	VG	N	N	G	MG	MG	G	MG	N	VG	VG	MG	N	MG	N	VG	VG	G	MG	MG

表 5 对于供应链风险事件发生可能性的评价

供应链风险事件	专家																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
外部环境风险事件	ML	VL	M	L	M	MH	L	ML	L	VL	VL	M	M	M	MH	L	VL	M	M	ML
运营管理风险事件	H	VH	MH	H	M	MH	L	ML	H	VH	VL	ML	H	M	MH	H	VH	M	MH	VH
生产风险事件	VH	VH	M	MH	H	MH	H	VH	M	H	VH	M	H	VH	VH	VH	H	MH	H	VH
库存风险事件	M	ML	H	M	VH	MH	VH	ML	H	H	MH	VH	M	M	VH	MH	VH	MH	M	H
运输风险事件	L	ML	H	M	M	MH	ML	ML	H	L	ML	MH	M	ML	MH	MH	ML	MH	M	ML

doi:10.3772/j.issn.2095-915x.2019.03.005

第四步，根据表 4、表 5，形成模糊判断矩阵$\tilde{D}$和风险事件模糊权重$\tilde{w}$，如表 6 所示。

表 6 弱信号对于风险事件揭示性程度的模糊判断矩阵及风险事件模糊权重

弱信号	外部环境风险事件	运营管理风险事件	生产风险事件	库存风险事件	运输风险事件
1	(6.6, 8.4, 9.6)	(3.9, 5.8, 7.6)	(4.8, 6.6, 8.2)	(6.2, 8, 9.2)	(6.1, 7.9, 9.2)
2	(5.2, 7.1, 8.7)	(2.4, 3.9, 5.6)	(1.3, 2.3, 3.6)	(3.6, 5.5, 7.4)	(1.9, 3.3, 4.9)
3	(2.5, 4.2, 6)	(5.2, 7, 8.3)	(6.4, 8.1, 9.2)	(6.2, 7.9, 9)	(6, 7.8, 9.2)
4	(5.5, 7.4, 8.8)	(3.7, 5.5, 7.2)	(1.6, 2.9, 4.6)	(2.8, 4.4, 6.2)	(5.8, 7.6, 8.9)
模糊权重	(0.17, 0.3, 0.5)	(0.5, 0.68, 0.8)	(0.7, 0.85, 0.94)	(0.55, 0.73, 0.85)	(0.3, 0.48, 0.67)

第五步，根据表 6 形成标准化模糊判断矩阵$\tilde{R}$，如表 7 所示，在矩阵$\tilde{R}$的基础上，结合模糊权重$\tilde{w}$形成加权标准化模糊判断矩阵$\tilde{v}$，如表 8 所示。

表 7 标准化模糊判断矩阵

弱信号	外部环境风险事件	运营管理风险事件	生产风险事件	库存风险事件	运输风险事件
1	(0.69, 0.88, 1)	(0.47, 0.7, 0.92)	(0.52, 0.72, 0.89)	(0.67, 0.87, 1)	(0.66, 0.86, 1)
2	(0.54, 0.74, 0.9)	(0.29,0.47,0.67)	(0.14, 0.25, 0.4)	(0.4, 0.6, 0.8)	(0.21, 0.36, 0.53)
3	(0.26, 0.44, 0.63)	(0.63, 0.84, 1)	(0.7, 0.88, 1)	(0.67, 0.86, 0.98)	(0.65, 0.85, 1)
4	(0.57, 0.77, 0.92)	(0.45, 0.66, 0.87)	(0.17, 0.32, 0.5)	(0.3, 0.48, 0.67)	(0.63, 0.83, 0.97)

表 8 加权标准化模糊判断矩阵

弱信号	外部环境风险事件	运营管理风险事件	生产风险事件	库存风险事件	运输风险事件
1	(0.12, 0.26, 0.5)	(0.23, 0.48, 0.73)	(0.37, 0.61, 0.84)	(0.37, 0.63, 0.85)	(0.2, 0.41,0.67)
2	(0.09, 0.22, 0.45)	(0.14, 0.32, 0.54)	(0.1, 0.21, 0.37)	(0.22, 0.44, 0.68)	(0.06, 0.17, 0.36)
3	(0.04, 0.13, 0.31)	(0.31, 0.57, 0.8)	(0.49, 0.75, 0.94)	(0.37, 0.63, 0.83)	(0.2, 0.41, 0.67)
4	(0.1, 0.23, 0.46)	(0.22, 0.45, 0.69)	(0.12, 0.27, 0.47)	(0.17, 0.35, 0.57)	(0.19, 0.4, 0.65)

第六步，计算每个弱信号在加权标准化模糊判断矩阵$\tilde{v}$中的值与正、负理想解的欧氏距离，如表 9 所示。

表 9 弱信号与正、负理想解的欧氏距离

弱信号	与正理想解的欧氏距离d^+	与负理想解的欧氏距离d^-
1	2.76	2.61
2	2.81	1.4
3	2.09	2.18
4	2.72	1.52

第七步，计算每个弱信号的贴近系数CC_i，并以此形成供应链风险弱信号观测向量z。

CC_1=0.49，CC_2=0.33，CC_3=0.51，CC_4=0.36

z= (0.49,0.33,0.51,0.36)

由此，获得关于 4 个弱信号的揭示度排序：

弱信号 3> 弱信号 1> 弱信号 4> 弱信号 2

而且，弱信号 3 和弱信号 1 在揭示度上相差不多，说明可以先从这两个弱信号入手，将析出这些弱信号的历史事件视为风险触发事件，依据弱信号揭示度排序进一步开展跳跃式的语

义关联，对可能发生的风险事件进行预测。

5 结语

供应链作为复杂的交互式系统，其风险必定伴随左右，无论哪一类的风险都会给供应链带来效率或效益方面的损失，从而风险识别成为主动式风险管理关键的第一步。随着弱信号研究的兴起和介入，让供应链风险识别在理念和时间先行性上获得提升。通过卡尔曼滤波原理，我们可以对供应链风险弱信号感知过程进行描述，卡尔曼滤波的迭代性反映了弱信号感知的连续度。但弱信号的产生始终离不开“人”，借助人的认知能力，筛选异构信息作出判断形成弱信号观测变量 z_k，这一变量与观测噪声 v_k、过程噪声 w_k 决定了弱信号感知的广度和深度。本文给出的供应链风险和弱信号概念还需进一步思辨，卡尔曼滤波框架和模糊 TOPSIS 方法的引入也只是一种尝试，还要在未来的研究中持续改进和验证。

参考文献

[1] 张丹 . 认知偏见对情报分析客观性的影响及其对策 [J]. 法制与社会 , 2010(2):273-273.

[2] Taleb N. N. The Black Swan – the Impact of the Highly Improbable[M]. London: Random House, 2007.

[3] 董尹 , 刘千里 , 宋继伟 , 等 . 弱信号研究综述: 概念、方法和工具 [J]. 情报理论与实践 , 2018, 41(10): 147-154.

[4] Brenda D. Strategies for dealing with human information needs: Information or communication?[J]. Journal of Broadcasting & Electronic Media, 1976, 20(3):323-333.

[5] Cornelissen J P. Sensemaking Under Pressure: The Influence of Professional Roles and Social Accountability on the Creation of Sense[J]. Organization Science, 2012, 23(1):118-137.

[6] 曾忠禄 . 情报分析 : 定义、意义构建与流程 [J]. 情报学报 , 2016, 35(2):189-196.

[7] 维克 . 组织社会心理学 [M]. 贾柠瑞 , 高隽 , 译 . 北京 : 中国人民大学出版社 , 2009: 223.

[8] Bright J R. Evaluating signals of technological change[J]. Harvard Business Review, 1970, 48(1): 62-70.

[9] Blanco S, Lesca H. Business intelligence: integrating knowledge into the selection of early warning signals[EB/OL].(1998-01)[2017-12-20]. http://www.veille-strategique.org/docs/1998-Blanco-Lesca-Articlewksp.pdf.

[10] Mitroff I. Managing Crises Before They Happen: What Every Executive and Manager Needs to Know about Crisis Management[J]. Future Survey, 2001, 19(1):103-105.

[11] Hensgen T, Desouza K C, Kraft G D. Games, Signal Detection, and Processing in the Context of Crisis Management[J]. Journal of Contingencies & Crisis Management, 2003, 11(2):67-77.

[12] Elsubbaugh S, Fildes R, Rose M B. Preparation for Crisis Management: A Proposed Model and Empirical Evidence[J]. Journal of Contingencies & Crisis Management, 2004 12(3):112-127.

[13] Cameron I T, Raman R. Process Systems Risk Management[J]. Academic Press, 2005, 6.

[14] Sheffi Y. The resilient enterprise: overcoming vulnerability for competitive advantage[M]. Cambridge: The MIT Press, 2005.

[15] Wears R L. Resilience Engineering: Concepts and Precepts[J]. Quality & Safety in Health Care, 2007, 15(6):447

[16] Ansoff H I, McDonnell E J. Implanting strategic

doi:10.3772/j.issn.2095-915x.2019.03.005

management[M]. New York: Prentice-Hall International Inc., 1984.

[17] Coffman B. Weak signal research, part I: Introduction[A]. Holopainen M, Toivonen M. Weak signals: Ansoff today[J]. Futures, 2012, 44(3): 98-205.

[18] 胡冠宇 , 张邦成 , 周志杰 , 等 . 基于置信规则库的网络安全态势感知 [M]. 北京 : 科学出版社 , 2017: 1-2.

[19] Endsley M R. Design and evaluation for situation awareness enhancement[C]. Proceedings of the Human Factors Society annual meeting. Los Angeles: SAGE Publications, 1988, 32(2): 97-101.

[20] Endsley M R. Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems[J]. Human Factors, 1995, 37(1):32-64.

[21] Endsley M R. Theoretical underpinnings of situation awareness: A critical review[M]. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, 2000: 3-32.

[22] 赵柯然 , 王延飞 . 情报感知的方法探析 [J]. 情报理论与实践 , 2018, 41(8): 11-16.

[23] 刘千里 . 情报信号意义构建研究 [D]. 南京 : 南京大学 , 2011.

[24] Hwang C L, Yoon K P. Multiple attribute decision making. Methods and applications. A state-of- the-art survey[J]. European Journal of Operational Research, 1981, 4(4):287-288.

[25] 李锋 , 魏莹 . 一种改进的基于效用理论的 TOPSIS 决策方法 [J]. 系统管理学报 , 2008, 17(1):82-86.