

DOI: 10.20103/j.stxb.202206171722

刘静,刘仁志,张瀚文,邹长新,张志娇.东江下游流域突发性重金属复合污染生态风险评价.生态学报,2023,43(18):7553-7565.

Liu J, Liu R Z, Zhang H W, Zou C X, Zhang Z J. Ecological risk assessment for heavy metals mixing pollution accidents at the Dongjiang downstream watershed. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(18): 7553-7565.

东江下游流域突发性重金属复合污染生态风险评价

刘 静¹, 刘仁志^{2,*}, 张瀚文³, 邹长新¹, 张志娇⁴

1 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042

2 北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875

3 生态环境部环境规划院战略规划所, 北京 100012

4 广东省环境科学研究院, 环境风险与损害鉴定评估研究所, 广州 510045

摘要:流域突发性重金属污染事件发生不确定性较高,难以预测和防控,严重威胁流域生态安全、人群健康乃至社会稳定。本研究以东江下游流域为研究区开展生态风险评价,基于“多风险源(危险性)-多胁迫因子(联合暴露)-多风险受体(脆弱性)-生态风险”的风险传递框架,运用贝叶斯网络,计算东江下游流域突发性 Cr⁶⁺-Hg²⁺复合污染生态风险,概率化表征风险不确定性,进而提出流域风险防控与管理措施。结果表明:(1)东江下游深莞惠地区 67 家涉重金属风险源均会对其子流域造成生态风险,惠州市的生态风险明显高于深圳市和东莞市;(2)东江下游西枝江子流域的生态风险最为显著,其次是东江下游干流子流域和东江下游河网区子流域;(3)基于敏感性分析,“河流水体脆弱性”是造成东江下游流域生态风险的主导因子。研究结果可为东江下游流域生态风险防控与管理提供理论支持。

关键词:东江下游;突发性重金属复合污染;贝叶斯网络;生态风险

Ecological risk assessment for heavy metals mixing pollution accidents at the Dongjiang downstream watershed

LIU Jing¹, LIU Renzhi^{2,*}, ZHANG Hanwen³, ZOU Changxin¹, ZHANG Zhijiao⁴

1 Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China

2 State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3 Institute of Strategic Planning, Chinese Academy of Environmental Planning, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China

4 Institute of Environmental Risk & Damages Assessment, Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China

Abstract: Heavy metal pollution accidents have the characteristics of high uncertainty, which are difficult to predict and control, thus posing great threats to the ecological security, human health and even social stability. In this study, based on the Bayesian Network, ecological risk was probabilistically evaluated with uncertainty for the accidental Cr⁶⁺-Hg²⁺ mixing pollution at the Dongjiang River downstream watershed, following the risk route “multiple risk sources hazardousness-risk stressors joint exposure-multiple risk receptors vulnerability-ecological risk”, and the relevant risk control and management measures were proposed. The results showed that (1) all electroplating risk sources (67 in total) would cause ecological risk to Dongjiang downstream watershed. The ecological risk level in Huizhou City was the highest compared to that in Shenzhen City and Dongguan City. (2) The ecological risk level was the highest in the tributary (Xizhijiang River), which was superior than that in the mainstream and the river network of the Dongjiang River. (3) Based on the sensitivity analysis, risk node “water body vulnerability” was the critical factor for the ecological risk. The quantitative risk assessment

基金项目:国家自然科学基金项目(52170186);江苏省自然科学基金项目(BK20220205)

收稿日期:2022-06-17; 网络出版日期:2023-05-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liurenzhi@bnu.edu.cn

can provide a scientific basis for the ecological risk transfer methodologies, as well as technical support for ecological risk prevention and management at the watershed scale.

Key Words: Dongjiang downstream watershed; accidental heavy metal mixing pollution; Bayesian Network; ecological risk

流域生态风险评价是流域风险防控与管理决策的科学依据和主要技术支撑。生态风险评价大多基于已有经验或证据,预测风险源对生态系统造成有害影响的可能性,通常存在较高的不确定性^[1-2]。因此明确风险传递过程中不确定性的来源及大小是流域生态风险评价的关键。目前,流域突发性水污染的风险评价多在河流、湖泊或水库等微观尺度水体进行,明确了“多风险源-多风险受体”的风险传递链,通过定性的风险评估方法,如风险矩阵法^[3]、模糊评价法^[4-5]、多属性决策分析法^[6-7]、相对风险评估法^[8-9]等对不同区域间的风险水平进行比较和评估。但流域水文环境复杂,风险源与风险受体众多,多因素叠加与耦合使得流域系统风险不确定性显著增高。已有研究较少能反映风险源对风险受体的生态风险传递机制,在一定程度上削弱了生态风险评价的科学性与准确性。近年来,贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)^[10]作为概率论和图论相结合的概率风险评价方法,在图形化表征风险要素传递关系的同时,亦可实现风险的概率化推理与不确定性的定量化表达。目前,贝叶斯网络在流域累积性生态风险^[11-12]和人体健康风险^[13-14]的评价与表征中已有所应用,为流域突发性重金属复合污染的生态风险评价研究提供了新思路。

东江流域是我国华南地区最重要的饮用水水源地之一,为惠州、东莞、深圳、香港等地区提供生产、生活和生态用水^[15]。东江下游(观音阁到石龙)及其河网地区(石龙到泗胜围)作为珠江三角洲区域的典型电镀区,涉重金属企业繁多。重金属元素具有易积累、难降解、迁移性强、生物毒性显著且难以修复。突发性重金属污染一旦发生,大量重金属污染物迅速涌入东江下游,造成河流水质恶化,将极大威胁人口密集且经济发达的惠州、东莞、深圳乃至香港地区,造成难以估量的损失。因此,东江下游流域作为广东省突发环境污染事件发生几率最高和风险重点防控区域^[16],亟需进行科学、定量的流域突发性重金属污染的生态风险评价,提出合理且准确的风险防控措施,保障经济社会的可持续发展。

本文基于贝叶斯网络,对东江下游流域突发性 Cr^{6+} - Hg^{2+} 复合污染生态风险传递过程进行概率分析与因果推理,构建了流域“多风险源(危险性)-多胁迫因子(联合暴露)-多风险受体(脆弱性)-生态风险”的风险传递网络,实现生态风险不确定性的定量化表征,从而推动流域突发性重金属污染风险评价的概率化进程。

1 研究方法

1.1 研究区概况

东江下游(观音阁至石龙)及其河网地区(石龙至入海),行政区隶属于广东省的惠州市、东莞市和深圳市,其主要支流包括增江、西枝江、淡水河、石马河等,如图 1 所示。东江下游及河网区的电子电镀等产业发展迅速,基于《广东省工业企业污染排放及处理利用情况(2016 年)》和《东江流域优先控制污染物清单》,本文共筛选出电镀风险源企业 67 家,包括:深圳市 9 家(S1—S9)、东莞市 24 家(D1—D24)和惠州市 34 家(H1—H34)。东江下游流域作为《广东省重金属污染防治“十三五”规划》的国家重防控区,工业类型以电子、电镀为主,流域内重金属浓度水平较高,重金属离子(Cr^{6+} 、 Cu^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 等)在下游及河网区广泛检出,支流西枝江污染尤为严重,枯水期较丰水期浓度稍高。其中,工业废水的排放,即电子电镀的行业排放废水,为东江下游水体中重金属复合污染的主要来源^[17]。

1.2 数据来源与处理

(1) 电镀风险源数据:《广东省工业企业污染排放及处理利用情况(2016 年)》、《广东省环境统计数据(2016 年)》、《广东省生产化学品环境调查技术报告(2016 年)》、《广东省统计年鉴(2017 年、2018 年)》、《东江流域优先控制污染物清单》部分涉重金属企业风险评估报告与应急预案(如东莞市麻涌镇豪丰电镀、印染

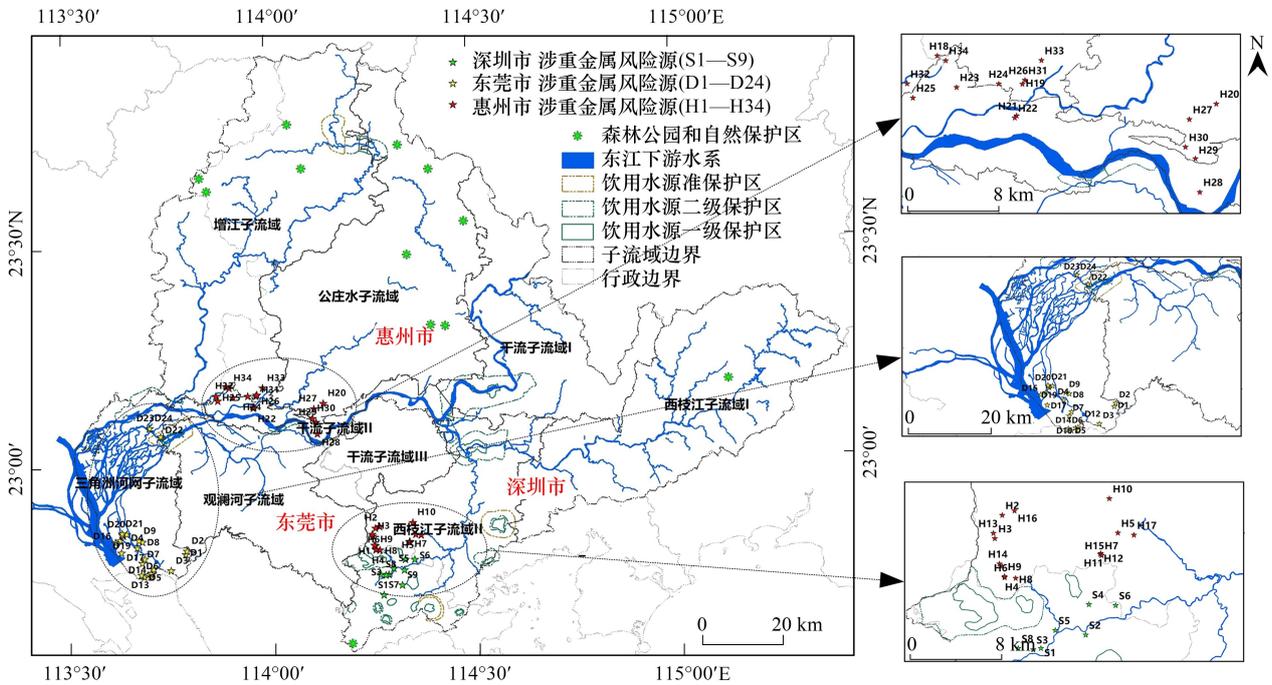


图 1 研究区范围

Fig.1 The location of study area

基地风险评估报告与应急预案)等。

(2) 风险传递数据:东江下游河道地形图(惠州水位站-东江口,2009 年)、东江下游水文站(博罗、淡水和惠阳)的逐日水位、流量数据(2016 年)、潮位站(石龙(二)、石龙(樊屋)和新家埔)逐日潮位数据(2016 年)、东江下游干流、支流(西枝江)及河网区重金属在地表水及沉积物中的本底浓度分布情况。

(3) 风险受体数据:在实地调研与资料收集的基础上,基于广东省 1:10000 土地利用现状数据图(2014 年)、30 m×30 m 珠三角地区 DEM 数据,提取东江下游水系空间分布图,采用 ArcGIS 的 ArcHydro 水文分析模型将东江下游划分为 9 个子流域,如图 1 所示。而后,基于东江下游水库分布情况、广东省断面监测数据、广东省饮用水源保护区及地表水环境功能区划情况、广东省禁止开发名录等数据,获得各子流域饮用水水源地、自然保护区和森林公园等风险受体的分布情况,如图 1 所示。

1.3 基于贝叶斯网络的生态风险评价方法

1.3.1 贝叶斯网络结构

本文基于“多风险源(危险性)-多胁迫因子(联合暴露)-多风险受体(脆弱性)-生态风险”的风险传递机制,构造的贝叶斯网络如图 2 所示。首先,从风险要素入手,在每个子流域(风险评价单元)中,将风险源危险性、胁迫因子联合暴露、风险受体脆弱性等随机变量定义为贝叶斯网络中的节点。其次,将风险传递过程概化为地理空间实体属性之间的关系,构建贝叶斯网络的拓扑结构。而后,将风险源危险性评价结果、突发性重金属急性暴露的迁移归趋模拟结果、基于 Copula 函数的重金属急性联合暴露概率分布结果及风险受体脆弱性评价结果,以条件概率表的形式在贝叶斯网络中整合与汇总,基于贝叶斯网络的因果推理,自动计算东江下游突发性重金属复合污染的生态风险概率分布。

1.3.2 节点参数化

在贝叶斯网络中,节点参数化是将随机变量的状态定义为离散化的数值,从而规范风险评价中的评价条件与标准,实现“多风险源-多风险受体”风险传递的定量化计算与比较,为后续风险管理提供数据支撑。图 2 所示的风险节点参数化过程阐述如下:

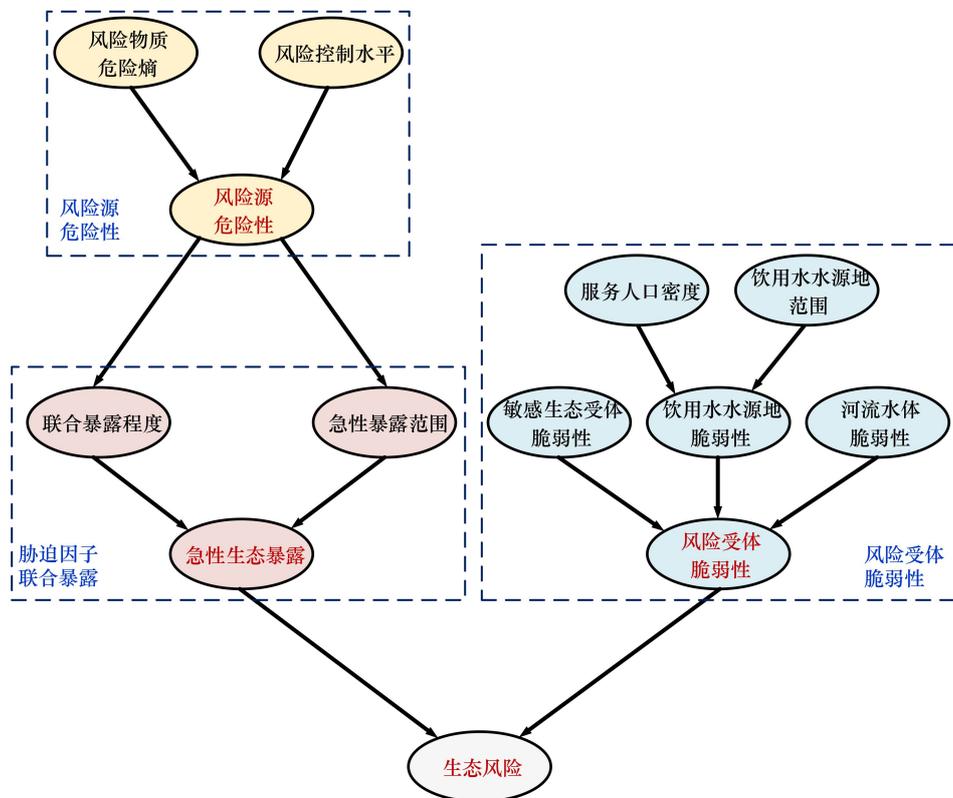


图2 流域突发性重金属复合污染生态风险的贝叶斯网络结构

Fig.2 The BN structure for binary heavy metal contamination emergencies at the watershed scale

(1) 风险源危险性

“风险源危险性(存在/不存在)”是指风险源(涉重金属企业)发生突发性重金属污染的可能性大小,取决于父节点“风险物质危险熵(危险/不危险)”和“风险控制水平(存在/不存在)”的风险源危险性评价结果。其中,基于《企业突发环境事件风险分级方法(HJ 941—2018)》^[18],“风险物危险熵(Hazard quotient, HQ)”的计算方法为:

$$HQ = \frac{w_1}{W_1} + \frac{w_2}{W_2} + \dots + \frac{w_n}{W_n} \quad (1)$$

式中, w_i 为每一种胁迫因子(重金属离子)的储量, t_i ; W_i 为风险物质的临界量, t_i ; “风险控制水平”则是指企业是否存在突发水环境事件发生情况及相应的水环境风险应急防控措施,细分为事故废水收集、生产废水排放与处理、风险物质储存与管理、近3年内突发性水污染事件发生情况等评价要素,如表1所示。

(2) 胁迫因子联合暴露

风险源发生突发性重金属污染时,风险源对风险受体的急性暴露不仅会因多胁迫因子的共同暴露程度的不同而不同,还会随河流水体迁移而造成其暴露范围的不同。因此,本文构造了“联合暴露程度(零暴露/低暴露/中暴露/高暴露)”、“急性暴露范围(零暴露/低暴露/中暴露/高暴露)”和“急性生态暴露(零暴露/低暴露/中暴露/高暴露)”三个节点,量化表征胁迫因子的联合暴露。其中,“联合暴露程度”是指两种重金属急性联合暴露发生的可能性大小,由重金属联合暴露概率分布模型(详见1.3.3节)计算而来。“急性暴露范围”则是指突发性重金属复合污染对整个子流域的影响范围,即在突发性重金属复合污染发生的过程中,重金属在水体中超过某一急性浓度标准^[19]时的最大暴露范围,计算方法为:

$$P(X_i) = \frac{L_{\text{exposure}}}{L} \quad (2)$$

式中, $X_i (i=1,2,3,4)$ 为“急性暴露范围”的状态(零暴露/低暴露/中暴露/高暴露); L_{exposure} 为突发性重金属污染在某一状态下的最大暴露距离, m ; L 为暴露子流域内的河流长度, m 。

表 1 企业环境风险控制水平(M)的评价要素与评价依据

Table 1 The evaluation criteria of the management reliability (M)

评价要素 Evaluation criteria	评价依据 Criteria expression
事故废水收集 Accidental drainage collection measures	① 是否设有应急事故水池、事故存液池、清净废水排放缓冲池等; ② 是否存在足够的缓冲容量,在事故情景下确保泄漏物和消防水顺利收集; ③ 是否能将事故废水运输至污水处理设备中处理。
污水截流 Wastewater closure plans	① 是否设置防腐蚀、防渗漏、防流失、防淋溶措施; ② 是否存在排水切换阀,并确保雨水系统的阀门处于关闭状态,而事故废水应急设备与污水处理设备的阀门处于开放状态; ③ 是否设置自动阀门切换系统,或专人负责。
雨水排水系统风险防控 Rainwater risk control measures	① 是否存在雨水收集设备; ② 是否存在雨水在线监控系统; ③ 若设有排洪沟,是否存在阻断污染物进入排洪沟的应急方案。
生产废水排放与处理 Production wastewater treatment measures	① 是否存在生产废水产生或外排; ② 生产废水若存在,则是否进入工业企业废水集中处理厂、城镇污水处理厂等; ③ 生产废水若外排,则是否设有:生产废水排放监控系统、事故废水缓冲系统、雨水、消防水、受污染的循环冷却水等处理系统; ④ 若未依法取得污水排入管网许可,是否直接外排进入地表水体中,或进入蒸发地、灌溉农田中。
风险物质储存与管理 Storage and management for risk substances	是否存在风险物质分区储存、运输与处置的防控与应急措施。
近 3 年突发性水污染发生情况 Numbers of water pollution accidents in recent three years	是否发生一般、较大、重大及特别重大等级的突发性水污染事件。

(3) 风险受体脆弱性

基于生态实体功能的不同,本文将风险受体设定为河流水体、饮用水水源地和敏感生态受体(森林公园和自然保护区),其脆弱性以生态实体暴露范围的大小来衡量。其中,“饮用水水源地脆弱性(零脆弱性/低脆弱性/中脆弱性/高脆弱性)”重点关注“饮用水水源地范围”及其“服务人口密度”。“河流水体脆弱性”、“敏感生态受体脆弱性”和“饮用水水源地范围”的概率分布计算方法为:

$$P(Y_i) = \frac{S_{\text{vulnerability}}}{S} \quad (3)$$

式中, $Y_i (i=1,2,3,4)$ 为“河流水体脆弱性”、“敏感生态受体脆弱性”和“饮用水水源地范围”的状态; $S_{\text{vulnerability}}$ 为暴露于突发性重金属污染的面积, m^2 ; S 为整个子流域的面积, m^2 ; “服务人口密度(零密度 0/低密度 < 500 人/ km^2 /中密度 [500, 1000] 人/ km^2 /高密度 > 1000 人/ km^2)”的概率分布基于隶属度函数计算得出。服务人口密度越大,则脆弱性越高,对生态风险起增强作用,为负向型要素,本文采用降半梯形分布隶属函数^[20]进行隶属度计算,基于 MATLAB 软件(Matrix laboratory; <https://www.mathworks.com/>)编程实现,计算方法为:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a} & a < x < b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (4)$$

式中, a 、 b 为评价指标端点值。

(4) 生态风险

风险节点“生态风险”作为贝叶斯网络的评价终点,其概率分布由风险源危险性、胁迫因子联合暴露、风险受体脆弱性共同推理得出,离散为:零风险、低风险、中风险和高风险四种状态。

1.3.3 条件概率表

在贝叶斯网络中,条件概率表是指在两个或多个输入节点不同状态的组合情景下,输出节点不同状态的条件概率分布^[21]。基于条件概率表,流域突发性重金属复合污染的生态风险传递网络可以实现概率化的推理与定量化的表征。基于数据的可得性,本文主要采取模型模拟和专家判断计算风险节点之间的条件概率,具体阐述如下:

(1) 重金属联合暴露概率分布模型

重金属污染物在水体中通常以溶解态或吸附态存在^[22]。本文基于东江下游重点风险源企业名单、流域优先控制污染物清单、风险源企业基本排放信息等风险源数据,选取电镀废水中浓度最高且最常见的 Cr^{6+} - Hg^{2+} 组合为优先模拟重金属离子,确定其最大泄漏量及其在东江下游干流、支流及河网区的地表水和沉积物中溶解态及吸附态 $\text{Cr}^{6+}/\text{Hg}^{2+}$ 的本底浓度值^[17, 23]。基于河流边界、河道地形、地表径流等水文数据,借助 MIKE Hydro HD^[24] 和 Heavy Metal^[25] 模块,构建流域突发性重金属污染迁移归趋模型。基于最大可信事故理论,假设每家电镀风险源中的电镀废水以泄漏发生时的瞬时流量(每一家风险源的数值有所不同)直排入东江下游流域,持续排放 2 h,模拟研究区内 67 家风险源发生突发性水污染的迁移归趋过程,预测单一重金属急性暴露的时空浓度分布规律。在此基础上,计算单一重金属离子超出急性暴露浓度标准^[19] 的累积概率分布函数^[26]。

而后利用 Copula 函数,建立风险胁迫因子联合暴露的二元 Copula 分布,量化表征风险源与风险受体间的急性暴露水平。Copula 函数又称连接函数^[27],在构建任意边缘分布的随机变量的联合分布函数的同时,又能准确反映随机变量的相关性结构,包含随机变量的所有信息,具有较高的灵活性与适应性。Copula 函数的通用表达式为:

$$C(F_1, F_2, \sigma) = \varphi_{\sigma}(\varphi^{-1}(f_1), (\varphi^{-1}(f_2))) \quad (5)$$

式中, F_1 、 F_2 为边缘分布函数, σ 为参数。若边缘分布 $F_1 = \varphi^{-1}(f_1)$ 和 $F_2 = \varphi^{-1}(f_2)$ 是连续的,则 $C(F_1, F_2, \sigma)$ 是唯一的。本文选取阿基米德 Copula 函数中的 Gumbel-Hougaard、Clayton 和 Frank Copula 函数分别构建突发性 Cr^{6+} - Hg^{2+} 复合污染的联合概率分布函数,而后基于平方欧式距离 D^2 开展 Copula 函数的拟合度检验,选取最优二元 Copula 函数分布模型,开展联合暴露概率计算^[28]。

(2) 专家判断

专家判断作为生态风险评价中应用较为广泛的方法之一^[29],是贝叶斯网络中先验概率分布的重要来源。将其引入流域生态风险评价的最大优势在于,在数据缺乏的复杂环境系统中,定性化的经验知识可以与定量化的模拟预测结果在贝叶斯网络中汇总、概率推理与计算。本文采用专家判断与线性插值相组合的方法,构建部分节点(如“风险源危险性”“风险受体脆弱性”“生态风险”)的条件概率表。首先,将完全不可能发生状态的条件概率设置为 0,完全可能发生状态的条件概率设置为 100%。其次,选择需要进行专家判断的随机变量之间的不同状态的组合情景,邀请风险专家、利益相关者(企业负责人)、风险管理者等完成其他情景下的条件概率表。而后,计算插值系数,完成其余情境下的条件概率表的内插与构建。

1.3.4 风险计算与表征

本文选取贝叶斯网络计算软件 Hugin8.8 (<https://www.hugin.com/>),实现流域突发性重金属复合污染生态风险传递网络的构建与概率推理(如图 2 所示)。在单一风险源生态风险分布结果的基础上,基于等间隔分类法^[30],将目标节点“生态风险”的四种状态在区间 $[0, 1]$ 之间等间隔离散: $[0, 0.25]$ “零风险”、 $[0.25, 0.5]$ “低风险”、 $[0.5, 0.75]$ “中风险”和 $[0.75, 1]$ “高风险”,计算每个子流域在不同风险源暴露时的叠加风险,得到子流域的风险分布结果的排序。最后,利用 ArcGIS 空间分析软件 (<https://developers.arcgis.com/>),将生态风险计算结果在流域尺度上进行空间汇总与综合表征,实现流域突发性重金属复合污染生态风险分布的空间化表达。

1.3.5 敏感性分析

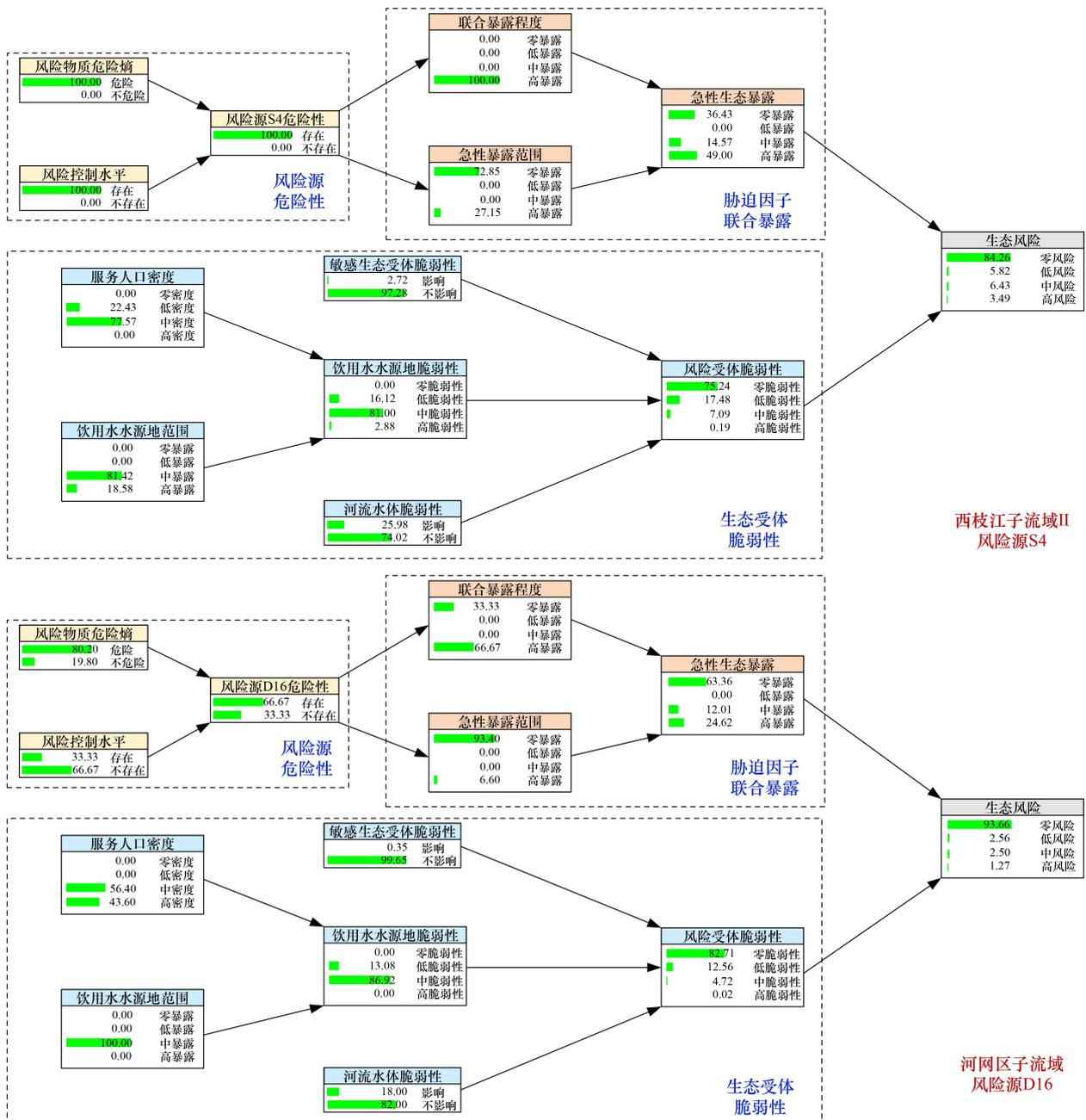
敏感性分析是量化贝叶斯网络中随机变量敏感程度的方法,可以诊断出哪些输入节点对目标节点的影响

最大,从而实现风险管理目标的筛选与优化^[31]。本文采用离散型随机变量的敏感性分析方法——交叉熵法,对目标节点“生态风险”开展敏感性分析,比较分析不同风险要素(“风险源危险性”“急性暴露”“风险受体脆弱性”)的交叉熵大小。交叉熵越大,风险节点对目标节点的影响程度和贡献水平越高。本文利用 Hugin8.8 软件进行生态风险的敏感性分析。

2 结果分析

2.1 单一风险源生态风险评价结果

基于东江下游不同子流域之间的空间差异性,本文以东江下游支流西枝江子流域 II、河网区子流域及干流子流域 II 中三家典型电镀风险源 S4(重大风险源)、D16(较大风险源)和 H25(一般风险源)为例(如图 3 所示),具体结果分析如下:



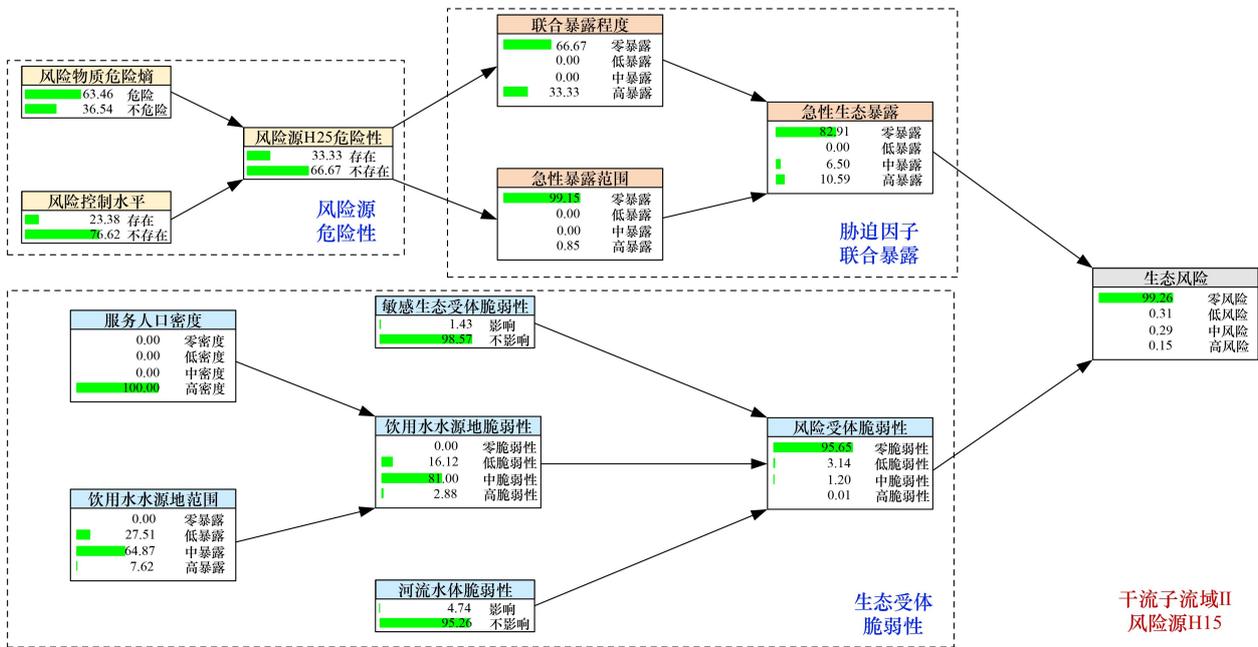


图3 单一风险源在其暴露子流域的贝叶斯网络

Fig.3 The BNs of S4、D16 and H25 in their exposing sub-watersheds

基于“风险物质危险熵”和“风险控制水平”的电镀风险源危险性评价结果,风险源 S4、D16 和 H25 的危险性“存在”的可能性分别为:100%、66.67%和 33.33%,分别为重大风险源、较大风险源和一般风险源。上述三家风险源发生突发性重金属复合污染时,基于突发性重金属污染迁移归趋模拟结果和 Copula 函数的急性联合暴露概率分布模拟结果,风险源 S4、D16 和 H25 风险节点“急性生态暴露”的“高暴露”的概率依次为:49.00%、24.62%和 10.59%,与“风险源危险性”的排序一致,即电镀风险源危险性水平越高,则发生急性生态暴露的可能性越大。

基于重金属离子 Cr^{6+} 、 Hg^{2+} 在河流水体中的迁移转化特性及其在各子流域内的暴露范围,西枝江子流域 II、河网区子流域及干流子流域 II 的“河流水体脆弱性”、“敏感生态受体脆弱性”及“饮用水水源地脆弱性”的“影响”/“高脆弱性”的概率分别为:25.98%、2.72%、2.88%;18.00%、0.35%、0.00%;4.74%、1.43%、2.88%。基于概率推理,在上述三个节点的共同影响下,三个子流域节点“风险受体脆弱性”的“高脆弱性”的概率分布依次为:0.19%、0.02%和 0.01%。

将上述所有风险节点的概率分布在图 3 所示的贝叶斯网络中汇总,基于贝叶斯定理和自上而下的因果推理,风险源 S4 在西枝江子流域 II、风险源 D16 在河网区子流域、H25 在干流子流域 II 均会造成生态风险,发生“高风险”的概率依次为:3.49%、1.27%和 0.15%。由此可见,风险源危险性越高、胁迫因子联合暴露越高、风险受体脆弱性越高,则生态风险越高。

2.2 多风险源生态风险评价结果

如图 4 所示,东江下游 67 家电镀风险源均会对其暴露子流域造成生态风险。按行政区统计,深圳市生态风险最高的 3 家电镀风险源为:S4(0.880)、S7(0.530)和 S1(0.529),均位于西枝江子流域 II;惠州市生态风险最高的 3 家电镀风险源为:H26(0.874)、H24(0.867)和 H33(0.835),均位于增江子流域,但均对东江干流子流域 II 和河网区干流子流域造成威胁;东莞市生态风险最高的 3 家电镀风险源为:D22(0.298)、D20(0.280)和 D15(0.278),均位于河网区干流子流域。综合来看,惠州市电镀风险源风险值超过 0.5 的有 24 家(H1—H4、H6、H8—H9、H13—H14、H16,位于西枝江子流域 II;H18—H20、H23—H27、H29—H34,位于干流子流域 II,同时对河网区子流域产生生态风险)、深圳市 9 家(S1—S9,位于西枝江子流域 II)、东莞市 0 家。惠州市的

生态风险明显高于深圳市和东莞市。

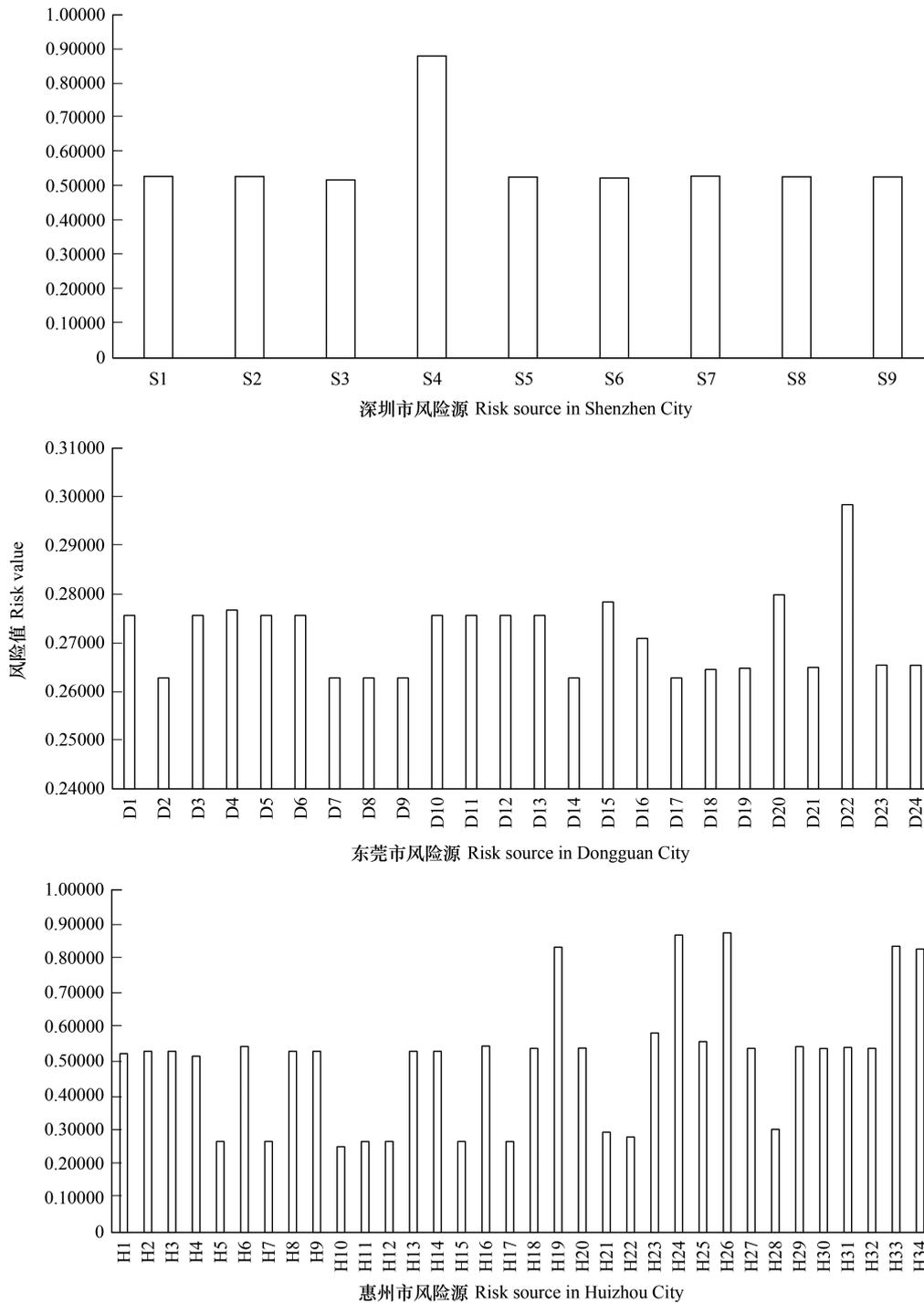


图 4 东江下游电镀风险源生态风险分布

Fig.4 Ecological risk distributions for all electroplating risk sources in Dongjiang River Downstream watershed

2.3 流域生态风险空间特征

东江下游突发性 Cr⁶⁺-Hg²⁺复合污染的生态风险评估结果如图 5 所示。生态风险分布由高至低分别为：西枝江子流域 II(11.8331)、三角洲河网子流域(11.2056)、干流子流域 II(4.4623)、增江子流域(2.0005)和公庄水子流域(1.0002),这主要是由于电镀风险源企业主要集中于上述子流域,且突发性污染一旦发生,重金属

污染物随河流水体而迁移积累。其中,西枝江子流域 II 突发性重金属复合污染生态风险最高,受到深圳市 9 家电镀风险源(S1—S9)和惠州市 17 家电镀风险源(H1—H17)的共同威胁。河网区子流域生态风险次之,主要受东莞市 24 家电镀风险源(D1—D24)及其上流东江干流的惠州市 10 家电镀风险源(H18—H19、H23—H26 和 H31—H34)的影响。干流子流域 II 则由于惠州市 17 家电镀风险源(H18—H34)的威胁,为东江下游干流中生态风险最高的子流域。

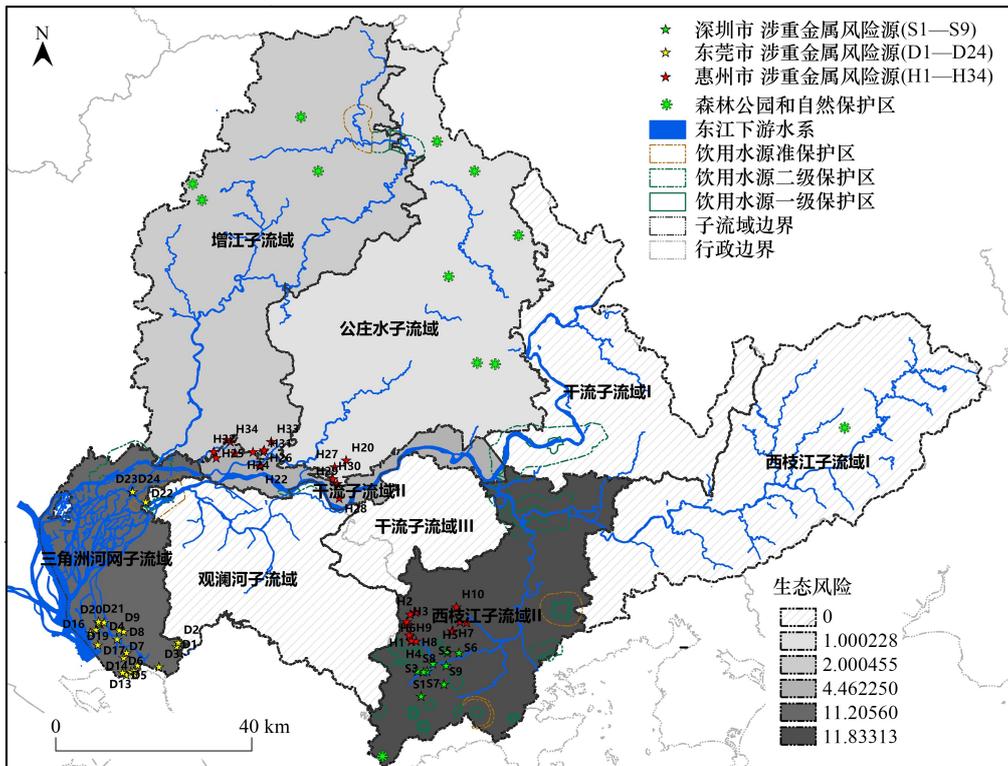


图 5 东江下游突发性重金属复合污染生态风险分区图

Fig.5 Zoning map of ecological risk caused by accidental heavy metal mixing pollution in Dongjiang River downstream watershed

2.4 敏感性分析

东江下游典型风险源 S4、D16 和 H25 的评价终点“生态风险”的敏感性分析结果如图 6 所示。计算结果表明,3 家风险源交叉熵最大的均为“风险受体脆弱性”和“河流水体脆弱性”,即风险受体的脆弱程度,尤其是河流水体的脆弱性程度对评价终点“生态风险”的概率分布贡献最大。“急性生态暴露”是仅次于风险受体脆弱性的敏感因子,对评价终点“生态风险”的概率分布贡献次之。对于东江下游河网区子流域风险源 D16 和干流子流域 H25,“风险源危险性”也同样值得关注。因而,在东江下游流域突发性重金属复合污染的风险防控中,应优先考虑保护风险受体和切断急性暴露途径;对于东江下游干流流域和河网区流域,除上述风险管理措施外,同时应兼顾风险源的防控与管理。

3 讨论

流域突发性重金属污染生态风险评价不仅要明确风险要素之间的风险传递关系,还应预测风险传递的可能性及后果。可变性和不确定性是风险最突出的特性^[32-33],而鉴于定量化概率分析的复杂与困难,大多数生态风险评价仍以潜在生态风险指数^[34-35]、生态风险比值^[36-37]等定性或半定量的非概率方法开展研究,由此造成了风险预防不足或预防过度的局面。本文回归风险的本质——概率,借助贝叶斯网络的定量化、概率化和网络化的优势,构建了“多风险源(危险性)-多胁迫因子(联合暴露)-多风险受体(脆弱性)-生态风险”的流

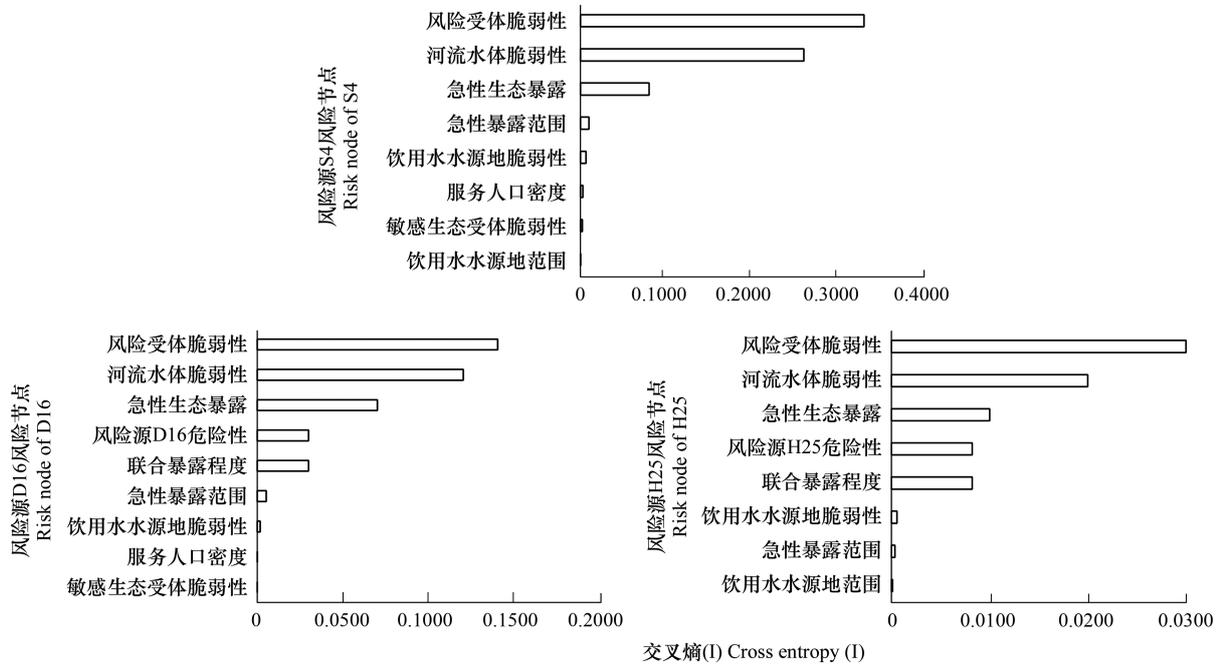


图 6 典型风险源 S4、D16 和 H25 生态风险的敏感性分析图
 Fig.6 Sensitivity analysis results for the ecological risks of S4, D16 and H25

域突发污染生态风险评价方法。以典型风险源 S4 为例,基于贝叶斯网络的拓扑结构,其发生突发性重金属污染的风险传递关系可以图形化表征为风险源危险性与胁迫因子联合暴露间的因果关联以及胁迫因子联合暴露与风险受体脆弱性之间的耦合关系,如图 3 所示。基于条件概率表,风险源 S4 危险性(100%“存在”)、急性生态暴露(49.00%“高暴露”)、风险受体脆弱性(0.19%“高脆弱性”)的不确定性均可以在贝叶斯网络中进行整合汇总与概率计算,推理出其生态风险的概率分布暨风险源 S4 一旦发生重金属泄漏,有 5.82% 概率造成流域生态环境“低风险”、6.43% 概率为“中风险”以及 3.49% 造成“高风险”,实现流域突发性重金属污染生态风险的定量化评估与比较(如图 4 所示),从而有望推动流域生态风险表征的概率化进程。

生态风险分布结果表明,突发性 Cr⁶⁺-Hg²⁺ 复合污染将会对东江下游流域造成较为严重的生态风险。东江下游西枝江子流域 II、三角洲河网区子流域和干流子流域 II 的生态风险最为显著,其余子流域则生态风险较小或不存在。流域生态风险水平受风险源的数量和危险性水平、风险受体的数量和脆弱性水平,以及胁迫因子(重金属离子 Cr⁶⁺、Hg²⁺)的暴露程度与暴露范围等所有风险要素的共同影响。其中,西枝江子流域 II 重大/较大电镀风险源数目最多(9 家,相较于总数 15 家)、胁迫因子联合暴露可能性最高、风险受体(饮用水水源地和敏感风险受体)分布最为密集,因而生态风险最为显著。此外,东江下游生态风险最敏感的因子为“风险受体脆弱性”的父节点“河流水体脆弱性”,敏感性分析的结果表明,在东江下游突发性重金属复合污染生态风险防控中,要优先考虑保护风险受体,切断暴露途径和风险源防控次之。可以为流域风险管理与决策的制定提供理论依据。

本文研究方法也存在一些局限性,包括:(1)基于贝叶斯网络的流域生态风险评价中,部分风险节点如涉重金属风险源危险性、风险受体脆弱性等离散化过程以专家判断为主,存在一定的主观性,可能会造成计算过程中信息的缺失;(2)鉴于流域突发性重金属污染事件大多尚未发生,本研究构建的流域突发性重金属污染迁移归趋模型的水质模拟部分无法进一步校验与率定。未来将继续开展实地调研与统计研究,开展验证性实验,细化风险源危险性和风险受体脆弱性的评估准则,进一步完善流域生态风险评价的方法和手段,为风险管理及决策分析提供更全面的理论支持。

4 结论

本文基于贝叶斯网络,构建了流域“多风险源(危险性)-多胁迫因子(联合暴露)-多风险受体(脆弱性)-生态风险”风险传递网络,开展了东江下游流域突发性 Cr^{6+} - Hg^{2+} 复合污染生态风险评价,获得了如下主要结论:

(1) 东江下游 67 家风险源均会对其影响的子流域造成生态风险。

(2) 东江下游 9 个子流域中,5 个子流域存在生态风险。突发性重金属复合污染生态风险分布最高的三个子流域依次为:西枝江子流域 I、河网三角洲子流域和干流子流域 II。

(3) 敏感性分析结果表明,风险要素“风险受体脆弱性”的父节点“河流水体脆弱性”是造成东江下游生态风险的主导因子。

(4) 基于贝叶斯网络的流域突发性重金属复合污染生态风险评价方法,可以将风险传递要素(风险源危险性、胁迫因子联合暴露、风险受体脆弱性)及其计算结果在贝叶斯网络中表征和汇总,实现流域生态风险传递的因果推理与概率计算,量化表征生态风险的不确定性。

参考文献(References):

- [1] 周婷, 蒙吉军. 区域生态风险评价方法研究进展. 生态学杂志, 2009, 28(4): 762-767.
- [2] 王慧芳, 饶恩明, 肖焱, 严岩, 卢慧婷, 朱捷缘. 基于多风险源胁迫的西南地区生态风险评价. 生态学报, 2018, 38(24): 8992-9000.
- [3] 李树清, 颜智, 段瑜. 风险矩阵法在危险有害因素分级中的应用. 中国安全科学学报, 2010, 20(4): 83-87.
- [4] 宋礼波, 窦明, 姚保垒. 突发重金属水污染事故环境风险评价模型研究. 人民黄河, 2012, 34(5): 69-72.
- [5] Arunraj N S, Mandal S, Maiti J. Modeling uncertainty in risk assessment: an integrated approach with fuzzy set theory and Monte Carlo simulation. *Accident Analysis & Prevention*, 2013, 55: 242-255.
- [6] 薛鹏丽, 曾维华. 上海市突发环境污染事故风险区划. 中国环境科学, 2011, 31(10): 1743-1750.
- [7] 贾倩, 曹国志, 於方, 周夏飞, 朱文英. 基于环境风险系统理论的长江流域突发水污染事件风险评估研究. 安全与环境工程, 2017, 24(4): 84-88, 93-93.
- [8] 张珂, 刘仁志, 张志娇, 胡兰群, 贾中富, 卓玉侠. 流域突发性水污染事故风险评价方法及其应用. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(4): 675-684.
- [9] Zhang W, Liu G Y, Yang Z F. Urban agglomeration ecological risk transfer model based on Bayesian and ecological network. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 161: 105006.
- [10] Pearl J. Fusion, propagation, and structuring in belief networks. *Artificial Intelligence*, 1986, 29(3): 241-288.
- [11] Lehtikoinen A, Hänninen M, Storgård J, Luoma E, Mäntyniemi S, Kuikka S. A Bayesian network for assessing the collision induced risk of an oil accident in the Gulf of Finland. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(9): 5301-5309.
- [12] Harris M J, Stinson J, Landis W G. A Bayesian approach to integrated ecological and human health risk assessment for the South River, Virginia mercury-contaminated site. *Risk Analysis*, 2017, 37(7): 1341-1357.
- [13] Azar A, Mostafaei Dolatabad K. A method for modelling operational risk with fuzzy cognitive maps and Bayesian belief networks. *Expert Systems with Applications*, 2019, 115: 607-617.
- [14] Orak N H. A hybrid Bayesian network framework for risk assessment of arsenic exposure and adverse reproductive outcomes. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 192: 110270.
- [15] 周夏飞, 於方, 刘琦, 曹国志, 马国霞, 杨威杉. 东江流域突发水污染风险分区研究. 生态学报, 2020, 40(14): 4813-4822.
- [16] 段锦, 康慕谊, 戴诚, 江源. 基于格网的东江流域生态安全空间综合评价. 生态学杂志, 2012, 31(8): 2075-2081.
- [17] 应国光, 彭平安, 赵建亮, 任明忠, 陈慧明, 魏东斌, 李本纲, 宋建中. 流域化学品生态风险评价——以东江流域为例. 北京: 科学出版社, 2012.
- [18] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. HJ 941—2018 企业突发环境事件风险分级方法. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
- [19] Yan Z G, Zheng X, Zhang J, Liu Z T. Development of emergency water quality standard for typical heavy metals with Chinese resident ecotoxicity data//Yan Z G, Liu Z T, eds. *Toxic Pollutants in China: Study of Water Quality Criteria*. Dordrecht: Springer, 2015.
- [20] 于相毅, 尚金城, 张研. 模糊关联分析法及其应用. 中国环境监测, 2005, 21(1): 68-72.
- [21] Chen S H, Pollino C A. Good practice in Bayesian network modelling. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 37: 134-145.

- [22] Nyjfelner U P, Santschi P H, Li Y H. The relevance of scavenging kinetics to modeling of sediment-water interactions in natural waters. *Limnology and Oceanography*, 1986, 31(2): 277-292.
- [23] 王丽, 陈凡, 马千里, 范中亚, 姚玲爱, 许振成, 谭万春, 赵学敏. 东江淡水河流域地表水和沉积物重金属污染特征及风险评价. *环境化学*, 2015, 34(9): 1671-1684.
- [24] DHI. DHI Simulation Engine for 1D River and Urban Modelling; Reference Manual. Denmark: DHI, 2022.
- [25] DHI. Heavy Metal; MIKE ECO Lab Template. Scientific Description. Denmark: DHI, 2017.
- [26] 张彦, 窦明, 李桂秋. 基于 Copula 函数的水体富营养化联合风险概率研究. *环境科学学报*, 2018, 38(10): 4204-4213.
- [27] Sklar A. Fonctions de Répartition À N Dimensions et Leurs Marges. Paris: Publications de l' Institut de Statistique de l' Université de Paris, 1959: 29-31.
- [28] Liu J, Liu R Z, Zhang Z J, Zhang H W, Cai Y P, Yang Z F, Kuikka S. Copula-based exposure risk dynamic simulation of dual heavy metal mixed pollution accidents at the watershed scale. *Journal of Environmental Management*, 2021, 277: 111481.
- [29] Caley M J, O'Leary R A, Fisher R, Low-Choy S, Johnson S, Mengersen K. What is an expert? A systems perspective on expertise. *Ecology and Evolution*, 2014, 4(3): 231-242.
- [30] O'Brien G C, Dickens C, Hines E, Wepener V, Stassen R, Landis W G. A regional scale ecological risk framework for environmental flow evaluations. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, doi: 10.5194/hess-2017-37.
- [31] Marcot B G. Metrics for evaluating performance and uncertainty of Bayesian network models. *Ecological Modelling*, 2012, 230: 50-62.
- [32] 邬伦, 于海龙, 高振纪, 承继成. GIS 不确定性框架体系与数据不确定性研究方法. *地理学与国土研究*, 2002, 18(4): 1-5.
- [33] 吴健生, 罗宇航, 王小玉, 赵宇豪. 城市滑坡灾害生态风险不确定性分析及风险管理——以深圳市为例. *生态学报*, 2020, 40(11): 3612-3621.
- [34] 马建华, 韩昌序, 姜玉玲. 潜在生态风险指数法应用中的一些问题. *地理研究*, 2020, 39(6): 1233-1241.
- [35] 刘长峰, 侯鹰, 陈卫平, 崔昊天. 基于生态系统服务的城市化区域生态风险表征方法研究. *生态学报*, 2021, 41(9): 3343-3353.
- [36] Huang Y N, Dang F, Li M, Zhou D M, Song Y, Wang J B. Environmental and human health risks from metal exposures nearby a Pb-Zn-Ag mine, China. *Science of the Total Environment*, 2020, 698: 134326.
- [37] 何绪文, 王宇翔, 房增强, 崔晓宇, 张斯宇. 铅锌矿区土壤重金属污染特征及污染风险评价. *环境工程技术学报*, 2016, 6(5): 476-483.