

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20211109001

王伟霞, 姚洪烨, 赵静, 等. 基于逼近理想解排序的江苏省优先控制毒害有机化学物质筛查研究[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(4): 197-212

Wang W X, Yao H Y, Zhao J, et al. Screening system for priority control of toxic organic chemicals in Jiangsu Province based on technique for order preference by similarity to an ideal solution [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2022, 17(4): 197-212 (in Chinese)

基于逼近理想解排序的江苏省优先控制毒害有机化学物质筛查研究

王伟霞^{1,2}, 姚洪烨², 赵静², 顾凰琳², 张丹¹, 刘伟^{1,*}

1. 江苏省环境科学研究院, 江苏省环境工程重点实验室, 南京 210036

2. 江苏省环境工程技术有限公司, 南京 210000

收稿日期: 2021-11-09 录用日期: 2022-01-20

摘要: 基于“优先控制”策略, 筛选高产量、高环境健康风险的毒害有机化学物质, 优先开展环境管理, 是有效防控毒害化学物质环境健康风险的重要手段之一。本研究结合逼近理想解排序技术(TOPSIS)、层次分析法(AHP)和熵值法(Entropy), 构建了优先控制毒害有机化学物质的筛查体系, 并用于确定江苏省优先控制毒害有机化学物质清单。筛查体系流程包括: (1) 江苏省毒害有机化学物质清单的建立; (2) 从物质的释放、暴露和危害潜力 3 个角度, 选取 17 个评价指标, 建立综合风险评估层次结构模型; (3) 基于 AHP-Entropy, 计算各指标权重值; (4) 利用 TOPSIS 开展毒害有机化学物质优先级排序, 确定江苏省优先控制毒害有机化学物质清单。筛查结果显示, 江苏省毒害有机化学物质 257 种, 其中综合风险评分前 5% 的物质(13 种)纳入江苏省优先控制毒害化学物质清单。优控清单中, 11 种物质已列入国内外管控名录, 纳入率为 84.6%。其中, 萘、邻甲苯胺、六溴环十二烷、苯、乙醛、甲醛和四氯乙烯已纳入我国优先控制化学品清单。该结果表明, 本研究构建的优控毒害有机化学物质筛查体系较为合理。本研究构建的筛查体系, 有助于管理部门快速识别区域优控毒害有机化学物质, 为新污染物治理奠定重要基础。

关键词: 优先控制毒害有机化学物质; 熵值法; 层次分析法; 逼近理想解排序技术

文章编号: 1673-5897(2022)4-197-16 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Screening System for Priority Control of Toxic Organic Chemicals in Jiangsu Province Based on Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution

Wang Weixia^{1,2}, Yao Hongye², Zhao Jing², Gu Huanglin², Zhang Dan¹, Liu Wei^{1,*}

1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Environmental Engineering, Jiangsu Provincial Academy of Environment Science, Nanjing 210036, China

2. Jiangsu Provincial Environmental Engineering Technology Co. Ltd., Nanjing 210000, China

Received 9 November 2021 accepted 20 January 2022

Abstract: It is of great importance to control environmental health risks resulting from toxic organic chemicals. The management and control of toxic organic chemicals were laborious, time consuming and resource intensive due to their high varieties. “Priority Control Strategy” provides a promising way to screen out toxic chemicals with

基金项目: 江苏省科技计划社会发展项目(BE2021731); 江苏省生态环境科研课题(2020002)

第一作者: 王伟霞(1982—), 女, 高级工程师, 研究方向为化学品及固体废物污染防治, E-mail: wangweixia@jsepc.com

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: jshblw@126.com

high yield and high environmental health risks. However, the priority chemicals/pollutants screening system built by the previous research has the disadvantages of incomplete indicators and strong subjectivity. In this study, a new screening system for the priority control of toxic organic chemicals was developed by combining approximate ideal solution sequencing technique (TOPSIS), analytic hierarchy process (AHP), and entropy method (Entropy). This system was used to determine toxic organic chemicals list under priority control in Jiangsu Province. The process of screening system included: (1) establishment of toxic organic chemicals list in Jiangsu Province; (2) establishment of a comprehensive risk assessment hierarchy model by selecting 17 evaluation indexes from three aspects of material release, material exposure, and hazard potential; (3) calculation of the weight value of each indicator based on AHP-Entropy; (4) prioritization of toxic organic chemicals using TOPSIS and determination of toxic organic chemical priority list of Jiangsu Province. Screening results showed that there were 257 toxic organic chemicals in Jiangsu Province, among which the 13 substances in the top 5% of comprehensive risk score were included in the list of priority toxic chemical substances in Jiangsu Province, and 11 substances have been included in the list of domestic and foreign control (with an inclusion rate of 84.6%). Anthracene, o-toluidine, hexabromocyclododecane, phenylacetaldehyde, formaldehyde, and tetrachloroethylene have been included in the priority control chemicals list in China. The results showed that the new screening system for the optimal control of toxic organic chemicals was reasonable, which could help the management department to quickly identify toxic organic chemicals that require regional priority control. The new system set an important foundation for the control of new pollutants.

Keywords: priority control of toxic organic chemicals; entropy; analytic hierarchy process; technique for order preference by similarity to an ideal solution

“十四五”规划和2035年远景目标纲要指出“重视新污染物治理”。新污染物指新近产生或被新近认识的、任何人工合成或自然存在的化学物质或微生物,其环境赋存浓度可引起显著的已知或可疑的毒害作用^[1]。毒害有机化学物质源头管控是预防新污染物产生的关键措施之一。由于毒害有机化学物质种类多、数量、环境健康危害具有差异性,管理部门全面开展管控不现实^[2]。基于“优先控制”策略,筛选高产量、高环境健康风险的毒害有机化学物质,优先开展环境管理,已成为有效防控毒害有机化学物质环境健康风险的重要手段之一。

目前,“优先控制”策略已应用于污染物的筛选(表1)。美国、欧盟和加拿大等发达国家和地区选取毒性效应、暴露参数等作为评价指标,结合专家论证、综合得分等方法,确定优先污染物清单^[3-6]。近年来,我国国内也开展了若干优先污染物的筛选研究。四川、福建和浙江等省通过专家论证的方式,建立了优先污染物清单。天津市选取健康毒性、检出率和降解性等指标,结合分级赋值和加和综合计算的方式,确定了水体中优先污染物清单^[3]。胡凤琦等^[7]基于赋分筛选技术,结合危害性、持久性和暴露参数,确定了重庆市涪陵工业园区优先评估化学品名录。丁琪琪等^[6]构建多指标综合评分法,确定了涨

渡湖水体中优先污染物清单。然而,国内“优先控制”技术研究仍存在一些不足:筛查指标不全面,未考虑化学品/污染物的释放潜力、人体健康风险等因素;依赖专家经验,主观性强^[3,6]。因此,有必要采用主客观相结合的权重决策技术,全面考虑暴露、释放和危害场景,构建优先控制毒害有机化学物质筛查体系。

层次分析法(AHP)是具有扩展性的多准则决策算法,适用于多层次指标体系框架下的最优解评估^[8]。目前,该方法已应用于优先污染物筛查研究^[9-10]。然而,AHP对指标样本进行量化的过程,依赖专家经验设置不同的阈值和等级权重值,具有较强的主观因素,容易导致一定的量化偏差^[11-12]。熵值法(Entropy)是一种客观评价技术,仅取决于所选样本及其评价指标,不存在人为影响^[13-14]。此外,逼近理想解排序技术(TOPSIS)通过测量测试样本与最佳样本之间的差距来量化指标的适用性,可以避免阈值量化产生的偏差。TOPSIS-AHP-Entropy相结合不仅可以解决指标权重确定的主观性和离散化问题,而且可以实现不同指标样本的合理排序,适用于优先控制毒害有机化学物质的筛查。

江苏是我国化学物质的生产使用大省,全省拥有14家化工园区和15家化工集中区,部分化工企业沿江、濒海、环湖或位于敏感区域。然而,江苏省

尚未确定优控毒害有机化学物质清单。2016 年江苏省化学物质调查(统计年份为 2015 年)涵盖了全省化学原料和化学制品制造、石油化工和医药制造等化学物质生产使用较多的行业,调查结果能够反映全省化学物质的生产使用情况。因此,本研究以

2015 年江苏省生产使用的化学物质为对象,基于 TOPSIS-AHP-Entropy 技术,建立优先控制毒害有机化学物质筛查体系。该筛查体系有助于管理部门快速识别优控毒害有机化学物质,为新污染物治理奠定重要基础。

表 1 国内外优先污染物筛查方法
Table 1 Screening methods of priority pollutants at home and abroad

清单 List	评价指标 Evaluation indicators	筛选方法 Screening method
美国水环境优先污染物 Priority pollutants of water environment in the United States	生产量、检出频次、监测方法、环境健康危害 Production volume, detection frequency, monitoring method, environmental health hazard	专家论证 Expert verification
欧盟水环境优先污染物 Priority pollutants of EU water environment	持久性、生物蓄积性、内分泌干扰性、毒性、暴露水平 Persistence, bioaccumulation, endocrine disrupting, toxicity, exposure level	监测和模型的优先设置方案、专家判断 Priority setting scheme and expert judgment of monitoring and model
加拿大环境优先污染物 Environmental priority pollutants in Canada	风险表征 Risk characterization	专家论证 Expert verification
日本优先污染物清单 List of priority pollutants in Japan	环境残留量、暴露潜力、毒性效应 Environmental residues, exposure potential and toxic effects	专家论证 Expert verification
英国优先污染物清单 UK priority pollutant list	持久性、生物富集性、毒性 Persistence, bioaccumulation, toxicity	专家论证 Expert verification
中国环境优先污染物黑名单 Blacklist of environmental priority pollutants in China	生产量、难降解、监测条件、毒性效应 Production volume, refractory degradation, monitoring conditions, toxic effects	专家论证 Expert verification
中国有毒有害水污染名录 List of toxic and hazardous water pollution in China	水环境赋存潜力、管控可行性 Water environment occurrence potential, control feasibility	专家论证 Expert verification
中国有毒有害大气污染名录 List of toxic and harmful air pollution in China	国家排放标准、监测方法、环境管理基础 National emission standards, monitoring methods, environmental management basis	专家论证 Expert verification
中国四川省优先污染物名单 List of priority pollutants in Sichuan Province, China	环境健康危害、环境检出 Environmental health hazards and environmental detection	专家评判 Expert verification
中国福建省水环境优先污染物名单 List of priority pollutants of water environment in Fujian Province, China	水系、废水排放量、重点行业 Water system, wastewater discharge, key industries	专家论证 Expert verification
中国天津市水体中优先污染物名单 List of priority pollutants in surface water of Tianjin, China	健康毒性、检出率、降解性、生物蓄积性 Health toxicity, detection rate, degradability, bioaccumulation	分级赋值、加权、加和综合计算 Hierarchical assignment, weighting, summation and comprehensive calculation
中国浙江省第一批环境优先污染物黑名单 List of the first batch of environmental priority pollutants in Zhejiang Province, China	生产量、使用量、进口量、排放量、毒性、环境事故 Production, usage, imports, emissions, toxicity, environmental incidents	专家论证 Expert verification
中国湖北省洪泽湖地表水环境优先污染物 Priority pollutants of surface water environment in Zhangdu Lake, Hubei, China	暴露水平、持久性、生物累积性、生态风险和人体健康风险 Exposure levels, persistence, bioaccumulation, ecological risks and human health risks	综合评分 Overall rating

1 研究方法 (Research methods)

1.1 筛查思路

优先控制毒害有机化学物质筛查体系如图 1 所示。(1)根据 2015 年江苏省化学物质生产使用数据,以“生产和使用量之和 $>1\,000\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ ”为原则,确定高产量有机化学物质清单;(2)将具有持久性(P)、生物蓄积性(B)、致癌、致突变或生殖毒性的高产量有机化学物质,确定为毒害有机化学物质;(3)选取 17 个表征有机化学物质释放、暴露和危害潜力的参数,建立综合风险评估层次结构模型;(4)基于 AHP-Entropy 技术,计算各评估指标权重;(6)使用 TOPSIS 技术,对毒害有机化学物质开展优先级排序,确定优先

控制毒害有机化学物质清单。

1.2 指标及数据收集

本研究选取表征有机化学物质释放、暴露和危害潜力的参数开展江苏省优先控制毒害有机化学物质筛查。物质向环境释放的总量与生产使用及环保治理设施去除率有关。理论上,生产使用越大,环保治理设施去除率越低,向环境释放的潜力也越大。因此,释放参数选取生产量、使用量和污水处理厂去除率。有机化学物质生产、使用量来自 2015 年江苏省化学物质调查的结果。基于 US EPA EPI Suite 软件,计算有机化学物质污水处理厂去除率^[15]。

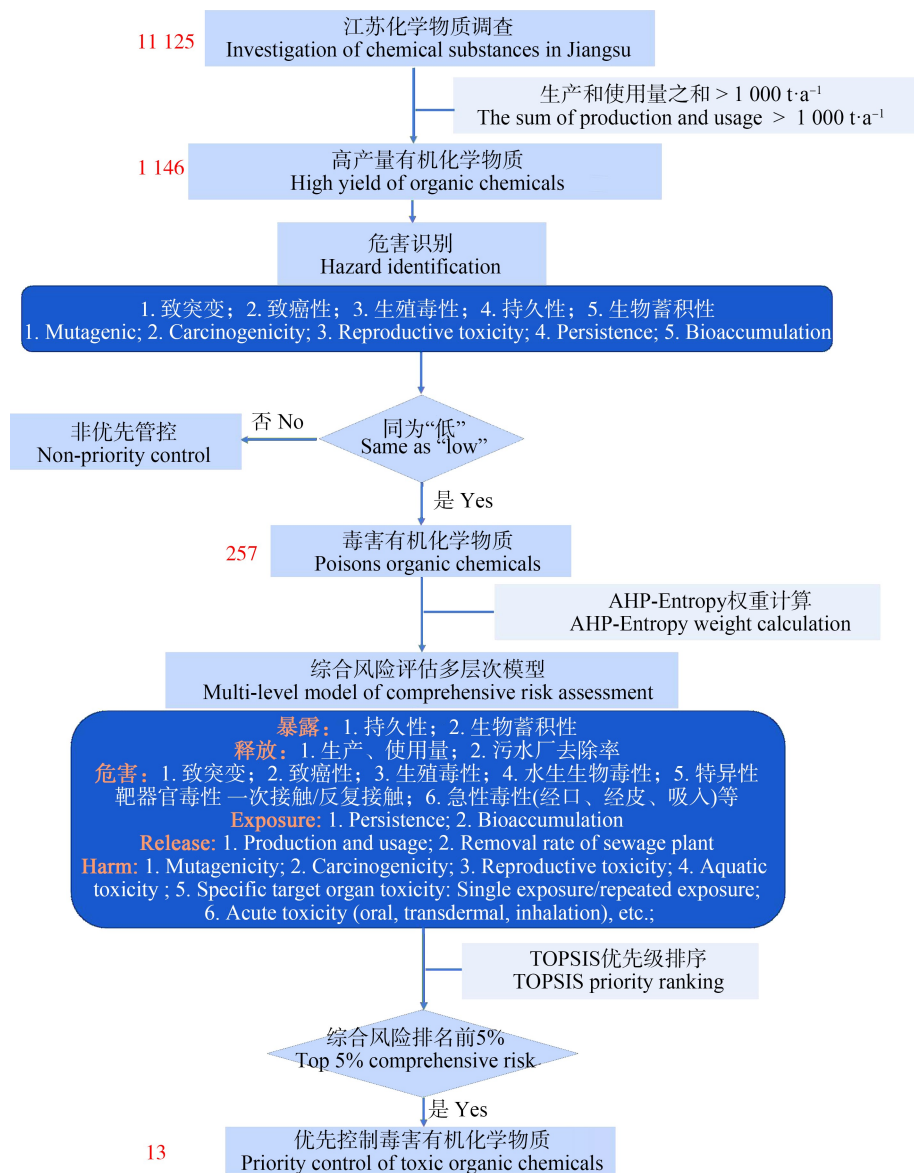


图 1 优先控制毒害有机化学物质筛查思路

Fig. 1 Screening strategy for priority control of toxic organic chemicals

暴露参数包括持久性(P)和生物蓄积性(B)。P、B 属性是反映有机化学物质在时间维度和空间维度(食物链传递)迁移和传递的重要指标^[16]。P 的判断参照 REACH 注册的化学物质信息^[17],分为高持久性(vP)、P 和非持久性(N)。当 REACH 注册的有机化学物质信息数据缺失时,使用加拿大的分类结果进行补充^[18]。B 判断方法与 P 判断方法一致,分为高生物富集性(vB)、B 和非富集性(N)。

危害参数包括生态效应和健康效应。生态效应考虑水生急慢性毒性。健康效应包括致癌、致突变、生殖毒性(CMR)、特定靶器官毒性和哺乳动物急性毒性。化学物质的致癌性判断结果以国际癌症研究中心(IARC)致癌物分类为主^[19],以德国工作场所化学有害因素职业接触限值(MAK)进行补充^[20]。水生急慢性毒性、致突变、生殖毒性、特定靶器官毒性和哺乳动物急性毒性来源于日本的全球化学品统一分类和标签制度(GHS)^[21]。

1.3 赋分标准

毒害有机化学物质 17 个评价指标中,包含定量

和定性判断,且部分数据存在数量级的差异,因此采用分级赋值的方式,实现数据的定量化和标准化。各评价指标总分 100,具有最大暴露、释放或危害潜力的等级分值最高,其余等级的赋值计算公式为总分除以该等级在指标中的危害排序,无效应或现有数据无法对其效应进行分类的,赋值 1,具体赋分标准如表 2 所示。

1.4 综合风险评估层次结构模型构建

根据选取的毒害有机化学物质筛查指标,构建综合风险评估的递阶层次结构模型(图 2)。第一层级为本研究的目的:毒害有机化学物质综合风险评估;第二层级论述了筛查考虑的主要因素,包括释放、暴露和危害 3 个方面。第 3 级为各因素包含的评价指标,共 17 个。

1.5 AHP-Entropy 权重计算

根据综合风险评估层次结构模型,分别计算 17 个评价指标的 AHP、Entropy 和 AHP-Entropy 的权重值。

(1)AHP 权重。根据不同参数的优先级,建立比

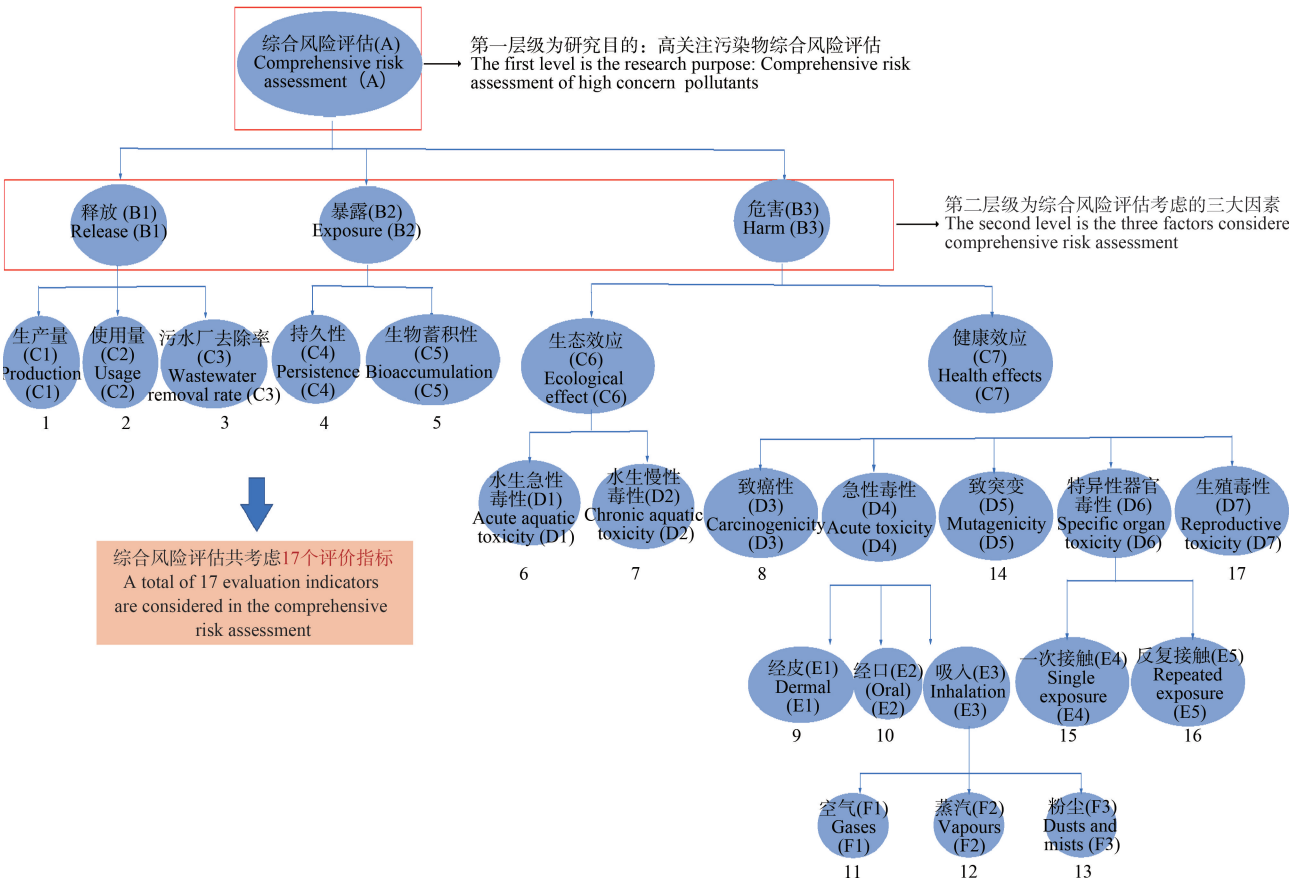


图 2 毒害有机化学物质综合风险评估层次结构模型

Fig. 2 Hierarchical structure model for comprehensive risk assessment of toxic organic chemicals

表 2 化学物质评价指标分级赋分表
Table 2 Graded score table of chemical substance evaluation index

评价指标 Evaluation indicators	分级 Classification	分值 Score
持久性 Persistence	高持久性(vP) High persistence (vP)	100
	持久性(P) Persistence (P)	50
	无持久性或不确定 No persistence or uncertainty	1
生物蓄积性 Bioaccumulation	高生物蓄积性(vB) High bioaccumulation (vB)	100
	生物蓄积性(B) Bioaccumulation (B)	50
	无生物蓄积性或不确定 No bioaccumulation or uncertainty	1
致癌性 Carcinogenicity	1	100
	2A(2)	50
	2B(3)	33
	3(4)	25
	未分类	1
	Unclassified	
生殖毒性、致突变性 Reproductive toxicity, mutagenicity	1A	100
	1B	50
	2	33
	未分类	1
	Unclassified	
哺乳动物急性毒性(经口、经皮、吸入)、 特性靶器官毒性(一次接触、反复接触)、 水生急性、水生慢性毒性 Mammalian acute toxicity (oral, dermal, inhalation), characteristic target organ toxicity (single exposure, repeated exposure), aquatic acute, aquatic chronic toxicity	1	100
	2	50
	3	33
	4	25
	5	22
	未分类	1
	Unclassified	
生产量、使用量 Production, usage	生产(使用)量排名前 20% Top 20% in production (use)	100
	生产(使用)量排名在 20% ~40% The production (use) ranks 20% ~40%	50
	生产(使用)量排名在 40% ~60% The production (use) ranks 40% ~60%	33
	生产(使用)量排名 60% ~80% The production (use) ranks 60% ~80%	25
	生产(使用)量排名后 20% The bottom 20% of production (use)	20
污水处理厂去除率 Removal rate of sewage treatment plant	80% <去除率≤100% 80% <Removal rate ≤100%	20
	60% <去除率≤80% 60% <Removal rate ≤80%	25
	40% <去除率≤60% 40% <Removal rate ≤60%	33
	20% <去除率≤40% 20% <Removal rate ≤40%	50
	去除率≤20% Removal rate ≤20%	100

较矩阵,按照 1~9 标度法进行 AHP 权重量化,并通过一致性检验。具体计算步骤如下:

设 $p_1, p_2, \dots, p_m$ 为指标参数, $w_1, w_2, \dots, w_j$ 为参数的归一化权向量,需满足:

$$\sum_{j=1}^m w_j=1; w_j \geq 0; j=1,2,\dots,m; m=17 \tag{1}$$

根据 1~9 标度法量化各指标重要性,形成 $m \times m$ 维的成对比较矩阵:

$$A = (a_{ij})_{m \times m} = \begin{matrix} p_1 & & & \\ & p_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & p_m \end{matrix} \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mm} \end{bmatrix}; i,j=1,2,\dots,m \tag{2}$$

式中: a_{ij} 表示参数 p_i 和 p_j 的权重比, $a_{ij}=1, a_{ji}=1/a_{ij}$ 。

若成对比较矩阵 A 中的任何 $i,j,k=1,2,\dots,m$ 满

足 $a_{ij} = a_{ik} a_{kj}$, 则称 A 为完全一致矩阵; 否则它不是一个完全一致的矩阵。可以通过求解以下特征方程来获得权重向量(W)

$$AW = \lambda_{\max} A \quad (3)$$

式中: $\lambda_{\max}$ 为成对比较矩阵 A 的最大特征值。成对比较矩阵 A 的一致性需要在可接受的一致性范围内。使用一致性比(CR)进行检验:

$$CR = \frac{(\lambda_{\max} - m)/(m-1)}{RI} \quad (4)$$

式中: RI 为同阶矩阵的平均随机一致性, 可从表中获得。如果 CR 满足要求, 说明构建的成对比较矩阵的一致性是可以接受。

(2) Entropy 权重。根据评价指标, 构建初始矩阵(式 5), 并使用式(6)对初始数据进行标准化。

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - (x_{ij})_{\min}^j}{(x_{ij})_{\max}^j - (x_{ij})_{\min}^j} \quad (6)$$

式中: $(x_{ij})_{\max}^j$ 和 $(x_{ij})_{\min}^j$ 是初始矩阵第 j 列元素的最大值和最小值; y_{ij} 为标准化后的值。

获取标准化评价矩阵后(式 7), 使用式(8) ~ 式(10)计算各指标熵值。

$$Y = \begin{pmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & \cdots & y_{mn} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$P_{ij} = \frac{y_{ij} + 10^{-4}}{\sum_{i=1}^m (y_{ij} + 10^{-4})} \quad (8)$$

$$e_{ij} = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad (9)$$

$$b_{ij} = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (10)$$

式中: P_{ij} 是评价指标得分; e_{ij} 是索引的信息熵; 10^{-4} 是修正指数, b_{ij} 是 Entropy 权重值。

(3) AHP-Entropy。基于 AHP 和 Entropy 计算的权重值, 确定各指标的 AHP-Entropy 值:

$$K_j = (W_j \times b_j) / (\sum W_j \times b_j) \quad (11)$$

式中: W_j 是 AHP 权重值, b_j 是 Entropy 权重值, K_j 为 AHP-Entropy 权重值。

1.6 得分与排序

采用 TOPSIS 算法, 开展毒害有机化学物质优先级排序, 并选取总得分在前 20% 的毒害化学物

质, 纳入江苏省优先控制化学物质清单。TOPSIS 计算的具体步骤为:

(1) 17 个评价指标标准化转换

$$x^N = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (12)$$

式中: x_i 为指标样本值, $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 分别为该评价指标的最大值和最小值。

(2) 参数样本归一化, 公式如下:

$$x^{N,STD} = (x_i^N - x_{\text{mean}}) / x_{\text{std}} \quad (13)$$

式中: $x^{N,STD}$ 为归一化的值, x_i^N 是正样本值, 并且 x_{mean} 和 x_{std} 是样本平均值和标准差。

(3) 计算正负理想解 S_i^+ 和 S_i^- :

$$S_i^+ = \max(x_i^{N,STD}) \times K_i \quad (14)$$

$$S_i^- = \min(x_i^{N,STD}) \times K_i \quad (15)$$

(4) 计算到正负理想解的距离:

$$Sd_i^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i^+ - x_i^{N,STD})^2} \quad (16)$$

$$Sd_i^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i^- - x_i^{N,STD})^2} \quad (17)$$

(5) TOPSIS 得分:

$$\varepsilon_i = \frac{Sd_i^-}{Sd_i^+ + Sd_i^-} \quad (18)$$

1.7 筛查模型验证

将筛查的优控毒害有机化学物质清单与国内外优控清单比对, 确定模型的合理性。

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 江苏省毒害化学物质识别

根据 2015 年江苏省化学物质生产使用结果, 江苏省化学物质种类 11 125 种, 其中生产和使用量之和 > 1 000 t·a⁻¹ 的有机化学物质有 1 146 种, 列为高产量有机化学物质。基于“具有潜在 P、B、致癌性、致突变和生殖毒性中的任一项即为毒害有机化学物质”的筛选原则, 确定 257 种毒害有机化学物质。根据用途分类看, 中间体和化工原料最多, 分别占据 25.68% 和 24.51% (图 3)。

2.2 AHP-Entropy 权重确定

根据 1 ~ 9 标度法, 对相同层次的因素进行两两比较, 构建各层次的判断矩阵, 计算各评价指标的 AHP 权重值, 并使用随机一致性比率(CR)检验矩阵的一致性。如表 3 所示, 判断矩阵中, 二阶矩阵的 CR 值均为 0, 三阶矩阵 CR 值均 < 0.58, 五阶矩阵 CR 值 < 1.12。该结果表明, 本研究构建的判断矩阵的一致性可接受。

根据各阶矩阵权重值的计算结果, 确定 17 个评

价指标的 AHP 权重,如表 3 所示。结果显示,污水处理厂去除率、P、B、致癌、致突变和生殖毒性权重相对较高。这与我国优先控制化学品的确定原则相一致:具有 P 和 B 属性;或者属于已知的人类致癌物、引起人类生殖细胞发生可遗传突变或人类生殖毒物的化学品,纳入优先控制化学品清单。

使用公式(5)~(10),计算各指标的 Entropy 权重值(表 4)。结果显示,Entropy 确定权重值上下浮动幅度不明显,说明毒害有机化学物质评价指标的数

据差异性较低。

AHP、Entropy 和 AHP-Entropy 这 3 种方法确定的评价指标权重值比对如图 4 所示。由于 Entropy 确定的各指标权重值趋于一条直线,对最终权重值的确定影响小,因此 AHP-Entropy 确定的指标权重走势与层次分析法基本相同。17 个权重指标中,C3(P)、C4(B)、D2(水生慢性毒性)、D3(致癌性)、D5(致突变)和 D7(生殖毒性)权重值较大,对筛查结果的影响相对较大。

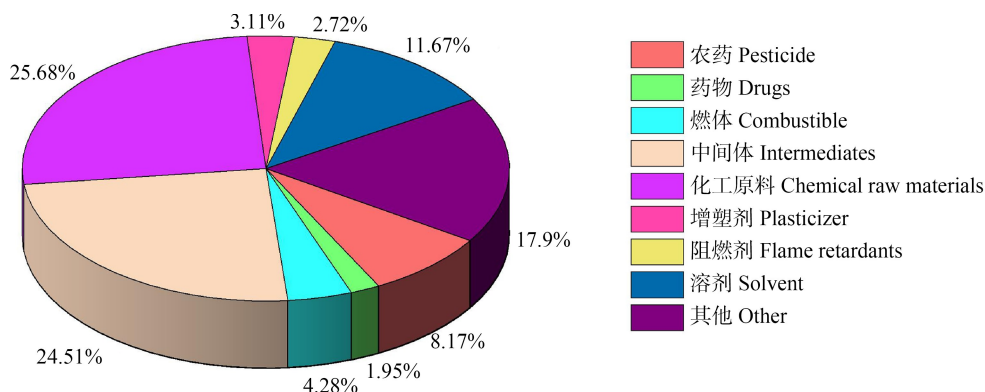


图 3 江苏省有机毒害化学物质分类情况

Fig. 3 Classification of toxic organic chemical substances in Jiangsu Province

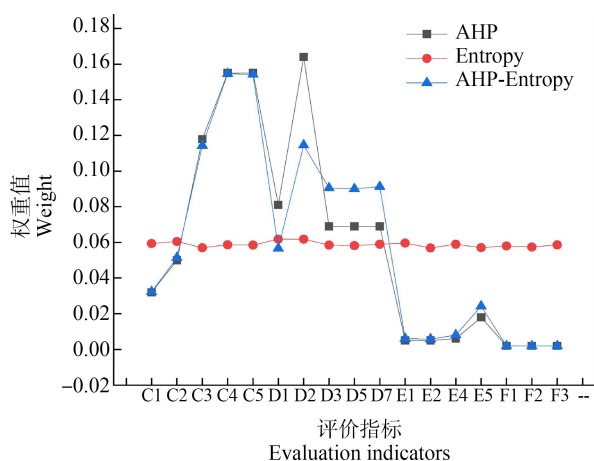


图 4 评价指标权重值比对

Fig. 4 Comparison of evaluation index weight values

2.3 江苏省优控毒害有机化学物质清单

基于 TOPSIS 技术,结合上文确定的 17 个评价指标权重值,开展 257 种毒害有机化学物质的综合风险排序,排名前 5% (13 种) 的物质列入江苏省优先控制毒害有机化学物质清单。如表 5 所示,综合风险前 3 位的物质分别为环氧乙烷、蒽和毒死蜱。环氧乙烷属于持久性有机污染物,具有潜在的致癌性、生

殖细胞致突变性及生殖毒性。蒽属于多环芳烃类物质,具有高持久性、生物富集性和水生生物毒性,在江苏省地表水、沉积物和大气中均有检出^[22-24]。毒死蜱是我国使用最广泛的有机磷农药之一,属于持久性有机污染物,具有生物富集性和生物毒性。有研究表明,江苏省农业区域毒死蜱对 2 岁婴儿造成潜在健康风险^[25]。四氯苯酚属于医药、农药和染料中间体,具有潜在的持久性、生物富集性和水生毒性效应。三氯乙醛属于农药、医药和有机合成产品的生产原料,也是自来水中氯化消毒副产物之一,具有一定的致癌、致突变性及生殖毒性,其急性经口、经皮肤毒性症状明显。有研究发现,苏州地区部分饮用水中三氯乙醛最大值为 $15 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,高于国家标准限值^[26]。

2.4 清单比对

本研究基于 TOPSIS-AHP-Entropy 技术,综合考虑毒害化学物质释放、暴露和危害潜力,筛选了江苏省优先控制毒害有机化学物质清单。由于江苏省目前尚未出台优先管控清单,本研究将建立的江苏省优控毒害有机化学物质清单与国内外相关管控清单比对,确定筛查策略的合理性。如表 5 所示,11 种

表 3 各层级判断矩阵及权重
Table 3 Judgment matrix and weight at each level

综合风险评估(A) Comprehensive risk assessment (A)	释放(B1) Release (B1)	暴露(B2) Exposure (B2)	危害(B3) Harm (B3)	W_A	
释放(B1) Release (B1)	1	2	1/2	0.20	$\lambda_{\max}=3.05$; CI=0.026, RI=0.58, CR=0.046<0.58
暴露(B2) Exposure (B2)	1/2	1	1/2	0.31	
危害(B3) Harm (B3)	2	2	1	0.49	
释放(B1) Release (B1)	生产量(C1) Production (C1)	使用量(C2) Usage (C2)	污水厂去除率(C3) Wastewater removal rate (C3)	W_{B1}	
生产量(C1) Production (C1)	1	1/2	1/3	0.16	$\lambda_{\max}=2$; CI=0.023, RI=0.58, CR=0.040<0.58
使用量(C2) Usage (C2)	2	1	1/3	0.25	
污水厂去除率(C3) Wastewater removal rate (C3)	3	3	1	0.59	
暴露(B2) Exposure (B2)	持久性(C4) Persistence (C4)	生物蓄积性(C5) Bioaccumulation (C5)		W_{B2}	
持久性(C4) Persistence (C4)	1	1		0.5	$\lambda_{\max}=2$; CI=0, RI=0, CR=0
生物蓄积性(C5) Bioaccumulation (C5)	1	1		0.5	
危害(B3) Harm (B3)	生态效应(C6) Ecological effect (C6)	健康效应(C7) Health effects (C7)		W_{B3}	
生态效应(C6) Ecological effect (C6)	1	1/2		0.33	$\lambda_{\max}=2$; CI=0, RI=0, CR=0
健康效应(C7) Health effects (C7)	2	1		0.67	
生态效应(C6) Ecological effect (C6)	水生急性毒性(D1) Acute aquatic toxicity (D1)	水生慢性毒性(D2) Chronic aquatic toxicity (D2)		W_{C6}	
水生急性毒性(D1) Acute aquatic toxicity (D1)	1	1/2		0.33	$\lambda_{\max}=2$; CI=0, RI=0, CR=0
水生慢性毒性(D2) Chronic aquatic toxicity (D2)	2	1		0.67	

续表 3

健康效应(C7) Health effects (C7)	致癌性(D3) Carcinogenicity (D3)	急性毒性(D4) Acute toxicity (D4)	致突变(D5) Mutagenicity (D5)	特异性 器官毒性 (D6) Specific organ toxicity (D6)	生殖 毒性 (D7) Reproductive toxicity (D7)	W_{C7}	
致癌性(D3) Carcinogenicity (D3)	1	5	1	3	1	0.28	$\lambda_{\max}=6.36;$ $CI=0.47,$ $RI=1.24,$ $CR=0.377<1.12$
急性毒性(D4) Acute toxicity(D4)	1/5	1	1/5	1/3	1/5	0.06	
致突变(D5) Mutagenicity (D5)	1	5	1	3	1	0.28	
特异性器官毒性(D6) Specific organ toxicity (D6)	1/3	3	1/3	1	1/3	0.10	
生殖毒性(D7) Reproductive toxicity (D7)	1	5	1	3	1	0.28	
急性毒性(D4) Acute toxicity (D4)	急性毒性: 经皮(E1) Acute toxicity: Dermal (E1)	急性毒性: 经口(E2) Acute toxicity: Oral (E2)	急性毒性: 吸入(E3) Acute toxicity: Inhalation (E3)			W_{D4}	
急性毒性: 经皮(E1) Acute toxicity: Dermal (E1)	1	1	1			0.33	$\lambda_{\max}=3;$ $CI=0,$ $RI=0,$ $CR=0$
急性毒性: 经口(E2) Acute toxicity: Oral (E2)	1	1	1			0.33	
急性毒性: 吸入(E3) Acute toxicity: Inhalation (E3)	1	1	1			0.33	
特异性器官毒性(D6) Specific organ toxicity (D6)	特异性器官毒性: 一次接触(E4) Specific organ toxicity: Single exposure (E4)	特异性器官毒性: 反复接触(E5) Specific organ toxicity: Repeated exposure (E5)				W_{D6}	
特异性器官毒性: 一次 接触(E4) Specific organ toxicity: Single exposure (E4)	1	1/3				0.25	$\lambda_{\max}=2;$ $CI=0,$ $RI=0,$ $CR=0$
特异性器官毒性: 反复接触(E5) Specific organ toxicity: Repeated exposure (E5)	3	1				0.75	

续表 3					
急性毒性: 吸入(E3) Acute toxicity: Inhalation (E3)	急性毒性: 吸入(空气) (F1) Acute toxicity: Inhalation (gases) (F1)	急性毒性: 吸入(蒸气) (F2) Acute toxicity: Inhalation (vapours) (F2)	急性毒性: 吸入(粉尘) (F3) Acute toxicity: Inhalation (dusts and mists) (F3)	W_{E3}	
急性毒性: 吸入(空气)(F1) Acute toxicity: Inhalation (gases) (F1)	1	1	1	0.33	$\lambda_{\max}=3;$ CI=0, RI=0, CR=0
急性毒性: 吸入(蒸气)(F2) Acute toxicity: Inhala- tion (vapours) (F2)	1	1	1	0.33	
急性毒性: 吸入(粉尘)(F3) Acute toxicity: Inhala- tion (dusts and mists) (F3)	1	1	1	0.33	

注: $\lambda_{\max}$ 表示最大特征值;CI 表示一致性;RI 表示同阶矩阵的平均随机一致性;CR 表示一致性比。
Note: $\lambda_{\max}$ means largest eigenvalue; CI means consistency; RI means average random consistency of the same order matrix; CR means consistency ratio.

表 4 评价指标权重值
Table 4 Evaluation index weight value

评价指标 Evaluation index	生产量(C1) Production (C1)	使用量(C2) Usage (C2)	污水厂去除率 (C3) Wastewater removal rate (C3)	持久性(C4) Persistence (C4)	生物蓄积性(C5) Bioaccumulation (C5)	水生急性毒性 (D1) Acute aquatic toxicity (D1)	水生慢性毒性(D2) Chronic aquatic toxicity (D2)
W_i	0.032	0.05	0.118	0.155	0.155	0.054	0.109
b_i	0.0594	0.0605	0.0570	0.0587	0.0585	0.0618	0.0618
K_i	0.0320	0.0514	0.1143	0.1547	0.1541	0.0567	0.1145

评价指标 Evaluation index	致癌性(D3) Carcinogenicity (D3)	致突变(D5) Mutagenicity (D5)	生殖毒性(D7) Reproductive toxicity (D7)	急性毒性: 经皮(E1) Acute toxicity: Dermal (E1)	急性毒性:经口(E2) Acute toxicity: Oral (E2)	特异性器官毒性: 一次接触(E4) Specific organ toxicity: Single exposure (E4)	特异性器官毒性: 反复接触(E5) Specific organ toxicity: Repeated exposure (E5)
W_i	0.091	0.091	0.091	0.006	0.006	0.008	0.025
b_i	0.0585	0.0582	0.0590	0.0596	0.0569	0.0590	0.0571
K_i	0.0905	0.0900	0.0913	0.0061	0.0058	0.0080	0.0243

评价指标 Evaluation index	急性毒性: 吸入(空气) (F1) Acute toxicity: Inhalation (gases) (F1)	急性毒性: 吸入(蒸气)(F2) Acute toxicity: Inhalation (vapours) (F2)	急性毒性: 吸入(粉尘)(F3) Acute toxicity: Inhalation (dusts and mists) (F3)
W_i	0.002	0.002	0.002
b_i	0.0580	0.0574	0.0586
K_i	0.0020	0.0020	0.0020

表 5 江苏省优先控制毒害有机化学物质清单
Table 5 List of priority controlled toxic organic chemicals in Jiangsu Province

排名 Rank	CAS 号 CAS No.	化学品名称 Chemical	得分 Score	国内外清单比对情况 List comparison between home and abroad	毒害效应 Toxic effects
1	75-21-8	环氧乙烷 Ethylene oxide	76.8	加拿大优先物质清单 List of Canadian Priority Substances	P;致癌性;2A;致突变性;类别 1B;生殖毒性:类别 1B;特定靶器官毒性(一次接触):类别 1;特定靶器官毒性(反复接触):类别 1;水生急性毒性:类别 3 P; Carcinogenicity: 2A; Mutagenicity: Category 1B; Reproductive toxicity: Category 1B; Specific target organ toxicity (single exposure): Category 1; Specific target organ toxicity (repeated exposure): Category 1; Aquatic acute toxicity: Category 3
2	120-12-7	蒽 Anthracene	75.0	优先控制化学品名录(第二批)(中国)、清洁水法案-优先控制物质清单(美国)、欧盟高关注度物质清单等 Priority Control of Chemicals (Second Batch) in China, Clean Water Act -List of Substances of Priority Control in USA, EU List of Substances of High Concern, etc.	vP;B;致癌性;3;水生急性毒性:类别 1;水生慢性毒性:类别 1;特定靶器官毒性(一次接触):类别 3 vP; B; Carcinogenicity: 3; Aquatic acute toxicity: Category 1; Aquatic chronic toxicity: Category 1; Specific target organ toxicity (one exposure): Category 3
3	2921-88-2	毒死蜱 Chlorpyrifos	69.8	欧盟水框架优先控制污染清单 The EU Water Framework Prioritizes Pollution Control Inventories	P;B;生殖毒性:类别 2;特定靶器官毒性(一次接触):类别 1;特定靶器官毒性(反复接触):类别 1 P; B; Reproductive toxicity: Category 2; Specific target organ toxicity (single exposure): Category 1; Specific target organ toxicity (repeated exposure): Category 1
4	556-67-2	八甲基环四硅氧烷 Octamethylcyclotetrasiloxane	69.0	欧盟高关注度物质清单 EU List of Substances of High Concern	P;B;水生慢性毒性:类别 1;水生急性毒性:类别 1 P; B; Aquatic chronic toxicity: Category 1; Aquatic acute toxicity: Category 1
5	75-87-6	三氯乙醛 Trichloroacetaldehyde	66.5	/	致癌性;2A;致突变性;类别 1B;生殖毒性:类别 2;特定靶器官毒性(一次接触):类别 1;急性吸入毒性:类别 1 Carcinogenicity: 2A; Mutagenicity: Category 1B; Reproductive toxicity: Category 2; Specific target organ toxicity (single exposure): Category 1; Acute inhalation toxicity: Category 1
6	95-53-4	邻甲苯胺 o-toluidine	64.3	优先控制化学品名录(第二批)(中国)、欧盟高关注度物质清单 Priority Control of Chemicals (Second Batch) in China, EU List of Substances of High Concern	致癌性;1;水生急性毒性:类别 1;水生慢性毒性:类别 1;定靶器官毒性(一次接触):类别 1;特定靶器官毒性(反复接触):类别 1 Carcinogenicity: 1; Aquatic acute toxicity: Category 1; Aquatic chronic toxicity: Category 1; Targeted organ toxicity (primary exposure): Category 1; Specific target organ toxicity (repeated exposure): Category 1

续表5

排名 Rank	CAS 号 CAS No.	化学品名称 Chemical	得分 Score	国内外清单比对情况 List comparison between home and abroad	毒害效应 Toxic effects
7	67-66-3	三氯甲烷 Trichloromethane	63.8	优先控制化学品名录(第一批) (中国)、欧盟水框架优先控制污 染清单、美国水环境优先污染 物清单等 Priority Control of Chemicals (First Batch) in China, EU Water Framework Priority Control Pol- lution Inventory, U.S. Water En- vironment Priority Pollutants List, etc.	P;致癌性;2B;致突变性;2A;生殖毒性;2;特定 器官毒性(一次接触);类别 1;特定靶器官毒性 (反复接触);类别 1;水生急性毒性;类别 3;水生 慢性毒性;类别 1 P; Carcinogenicity: 2B; Mutagenicity: 2A; Repro- ductive toxicity: 2; Organ-specific toxicity (single contact): Category 1; Specific target organ toxicity (repeated exposure): Category 1; Aquatic acute tox- icity: Category 3; Aquatic chronic toxicity: Catego- ry 1
8	3194-55-6	六溴环十二烷 Hexabromocyclododecane	63.1	优先控制化学品名录(第二批) (中国)、欧盟高关注度物质清 单、斯德哥尔摩公约管控物质 Priority Control of Chemicals (Second Batch) in China, EU List of Substances of High Concern, substances controlled by the Stockholm Convention	P;B;生殖毒性;2 P; B; Reproductive toxicity: 2
9	71-43-2	苯 Benzene	62.5	优先控制化学品名录(第二批) (中国)、欧盟水框架优先控制污 染清单、美国水环境优先污染 物清单等 Priority Control of Chemicals (Second Batch) in China, EU Water Framework Priority Con- trol Pollution Inventory, U. S. Water Environment Priority Pol- lutants List, etc.	P;致癌性;1;致突变性;2A;水生急性毒性;类别 2;水生慢性毒性;类别 2 P; Carcinogenicity: 1; Mutagenicity: 2A; Aquatic a- cute toxicity: Category 2; Aquatic chronic toxicity: Category 2
10	75-07-0	乙醛 Acetaldehyde	61.4	优先控制化学品名录(第一批) (中国) Priority Control of Chemicals (First Batch) in China	致癌性;1;特定靶器官毒性(一次接触);类别 1; 特定靶器官毒性(反复接触);类别 1 Carcinogenicity: 1; Specific target organ toxicity (single exposure): Category 1; Specific target organ toxicity (repeated exposure): Category 1
11	50-00-0	甲醛 Formaldehyde	60.6	优先控制化学品名录(第一批) (中国) Priority Control of Chemicals (First Batch) in China	致癌性;1;致突变性;类别 2;定靶器官毒性(一 次接触);类别 1;特定靶器官毒性(反复接触);类 别 1;水生急性毒性;类别 2 Carcinogenicity: 1; Mutagenicity: Category 2; Tar- geted organ toxicity (primary exposure): Category 1; Specific target organ toxicity (repeated expo- sure): Category 1; Aquatic acute toxicity: Category 2

续表5

排名 Rank	CAS 号 CAS No.	化学品名称 Chemical	得分 Score	国内外清单比对情况 List comparison between home and abroad	毒害效应 Toxic effects
12	117-08-8	四氯苯酐 Tetrachlorophthalic anhydride	60.6	/	P;B;特定靶器官毒性(一次接触):类别 1;水生 急性毒性:类别 1;水生慢性毒性:类别 1 P; B; Specific target organ toxicity (single expo- sure): Category 1; Aquatic acute toxicity: Category 1; Aquatic chronic toxicity: Category 1
13	127-18-4	四氯乙烯 Tetrachloroethylene	60.3	优先控制化学品名录(第一批) (中国)、欧盟水框架优先控制污 染清单、美国水环境优先污染 物清单等 Priority Control of Chemicals (First Batch) in China, EU Water Framework Priority Control Pol- lution Inventory, U.S. Water En- vironment Priority Pollutant In- ventory, etc.	vP;水生急性毒性:类别 1;水生慢性毒性:类别 1;致癌性:2A;定靶器官毒性(一次接触):类别 1;特定靶器官毒性(反复接触):类别 1;生殖毒 性:类别 2 vP; Aquatic acute toxicity: Category 1; Aquatic chronic toxicity: Category 1; Carcinogenicity: 2A; Targeted organ toxicity (primary exposure): Cate- gory 1; Specific target organ toxicity (repeated ex- posure): Category 1; Reproductive toxicity: Catego- ry 2

物质已被列入国内外管控清单中,纳入率为 84.6%。其中,蒽、邻甲苯胺、六溴环十二烷、苯、乙醛、甲醛和四氯乙烯已列入我国优先控制化学品清单;环氧乙烷已列入加拿大优先物质清单;甲基环四硅氧烷已列入欧盟高关注度物质清单;毒死蜱已列入欧盟水框架优先控制污染清单。该结果表明,本研究构建的 TOPSIS-AHP-Entropy 技术能较准确筛选出高危害的毒害有机化学物质,具有一定的合理性。

本研究根据有机化学物质的生产使用量、P、B、致癌、致突变和生殖毒性,确定毒害有机化学物质。随后综合选取 17 个释放、暴露和危害潜力参数,构建综合风险评估层次结构模型。基于 TOPSIS-AHP-Entropy 技术,开展参数权重计算及毒害有机化学物质优先级排序,建立了优先控制毒害有机化学物质筛查体系,并应用于江苏省优控毒害有机化学物质清单的建立。结果显示,通过该筛查体系确定的 13 种优控毒害有机化学物质中,11 种物质已纳入我国优先控制化学品、加拿大优先物质清单等国内外优控清单^[27-28],表明筛查体系具有良好的合理性。该项体系的建立,有助于管理部门快速识别区域优控毒害有机化学物质,为新污染物治理奠定重要基础。但是,本筛查技术也存在一些不足之处:毒害有机化学物质生态危害表征仅考虑水生毒性,

未包含其 在其他环境介质的潜在危害。因此,后续研究应重点增加毒害有机化学物质生态效应指标,更全面反映其生态危害。

通讯作者简介:刘伟(1979—),男,博士,正高级工程师,主要研究方向为化学品污染防控。

参考文献 (References):

[1] 王佳钰,王中钰,陈景文,等. 环境新污染物治理与化学品环境风险防控的系统工程[J]. 科学通报, 2022, 67 (3): 267-277
Wang J Y, Wang Z Y, Chen J W, et al. Environmental systems engineering consideration on treatment of emerging pollutants and risk prevention and control of chemicals [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67 (3): 267-277 (in Chinese)

[2] Bu Q W, Wang D H, Wang Z J. Review of screening systems for prioritizing chemical substances [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2013, 43 (10): 1011-1041

[3] 王一喆,张亚辉,赵莹,等. 国内外环境优先污染物筛选排序方法比较[J]. 环境工程技术学报, 2018, 8(4): 456-464
Wang Y Z, Zhang Y H, Zhao Y, et al. Comparison on screening and sorting methods of environmental priority pollutants at home and abroad [J]. Journal of Environ-

- mental Engineering Technology, 2018, 8(4): 456-464 (in Chinese)
- [4] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Toxic and priority pollutants under the Clean Water Act [R]. Washington DC: US EPA, 1977
- [5] Council E. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of water [R]. European Community, 2000
- [6] 丁琪琪, 龚雄虎, 王兆德, 等. 基于多指标综合评分法筛选地表水环境优先污染物——以湖北涨渡湖为例 [J]. 湖泊科学, 2022, 34(1): 90-108
- Ding Q Q, Gong X H, Wang Z D, et al. A proposed multi-criteria scoring method for identifying priority pollutants in surface water: A case study of Lake Zhangdu, Hubei Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(1): 90-108 (in Chinese)
- [7] 胡凤琦, 胡洁, 卓丽, 等. 重庆市涪陵工业园区优先评估化学品名录筛查[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(S2): 262-270
- Hu F Q, Hu J, Zhuo L, et al. Screening on the list of priority assessment chemicals in Fuling industrial park, Chongqing [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(S2): 262-270 (in Chinese)
- [8] Li Y, Wu L Y, Han Q, et al. Estimation of remote sensing based ecological index along the Grand Canal based on PCA-AHP-TOPSIS methodology [J]. Ecological Indicators, 2021, 122: 107214
- [9] 朱菲菲, 秦普丰, 张娟, 等. 我国地下水环境优先控制有机污染物的筛选[J]. 环境工程技术学报, 2013, 3(5): 443-450
- Zhu F F, Qin P F, Zhang J, et al. Screening of priority organic pollutants in groundwater of China [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2013, 3(5): 443-450 (in Chinese)
- [10] 段思聪. 河北省流域水环境优先控制污染物筛选方法研究[J]. 煤炭与化工, 2017, 40(11): 146-150, 160
- Duan S C. Study on screening method of pollutants in water environment priority control in Hebei Province [J]. Coal and Chemical Industry, 2017, 40(11): 146-150, 160 (in Chinese)
- [11] 刘子琦, 郭炳晖, 程臻, 等. 基于熵值模糊层次分析法的科技战略评价[J]. 计算机科学, 2020, 47(S1): 1-5
- Liu Z Q, Guo B H, Cheng Z, et al. Science and technology strategy evaluation based on entropy fuzzy AHP [J]. Computer Science, 2020, 47(S1): 1-5 (in Chinese)
- [12] Joshi R, Banwet D K, Shankar R. A Delphi-AHP-TOPSIS based benchmarking framework for performance improvement of a cold chain [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(8): 10170-10182
- [13] Amiri V, Kamrani S, Ahmad A, et al. Groundwater quality evaluation using Shannon information theory and human health risk assessment in Yazd Province, central plateau of Iran [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(1): 1108-1130
- [14] Li P Y, Qian H, Wu J H. Application of set pair analysis method based on entropy weight in groundwater quality assessment-A case study in Dongsheng City, northwest China [J]. E-Journal of Chemistry, 2011, 8: 879683
- [15] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Estimation Program Interface (EPI) Suite. EPA. 2013. [CP]. [2021-11-09]. <http://www2.epa.gov/tscascreeing-tools/epi-suite/estimation-program-interface>. Last accessed 25/9/2015
- [16] 卜庆伟, 王东红, 王子健. 基于风险分析的流域优先有机污染物筛查: 方法构建[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(1): 61-69
- Bu Q W, Wang D H, Wang Z J. A risk-based screening approach for priority organic contaminants at the watershed scale: Method development [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2016, 11(1): 61-69 (in Chinese)
- [17] European Chemicals Agency. Technical problems with ECHA's public chemicals database [EB/OL]. [2021-11-09]. <https://echa.europa.eu/information-on-chemicals>
- [18] Organization for Economic Co-operation and Development. Categorization results from the Canadian domestic substance list [EB/OL]. [2021-11-09]. <https://canadachemicals.oecd.org/>
- [19] International Agency for Research on Cancer (IARC). Agents classified by the IARC monographs, volumes 1-132 [R]. Lyon: IARC, 2022
- [20] Volz N, Greim H, Hartwig A. Permanent Senate Commission for the Investigation of Health Hazards of Chemical Compounds in the Work Area-An example about the procedure in threshold [R]. Permanent Senate Commission, 2015
- [21] National Institute of Technology and Evaluation (Japan). GHS Information [EB/OL]. [2021-11-08]. <https://www.nite.go.jp/chem/>
- [22] 蔡杨, 李伟, 左雪燕, 等. 盐城滨海湿地土壤多环芳烃分布特征及影响因素[J]. 生态环境学报, 2021, 30(6): 1249-1259
- Cai Y, Li W, Zuo X Y, et al. Distribution characteristics and influencing factors of PAHs in Yancheng coastal wet-

- land soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(6): 1249-1259 (in Chinese)
- [23] 汪庆庆, 马小莹, 徐斌, 等. 江苏四城市 $PM_{2.5}$ 中多环芳烃室外呼吸暴露健康风险评估[J]. *江苏预防医学*, 2018, 29(2): 140-144, 207
- Wang Q Q, Ma X Y, Xu B, et al. Outdoor inhalation exposure risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons among $PM_{2.5}$ in 4 Cities of Jiangsu Province [J]. *Jiangsu Journal of Preventive Medicine*, 2018, 29(2): 140-144, 207 (in Chinese)
- [24] He H, Hu G J, Sun C, et al. Trace analysis of persistent toxic substances in the main stream of Jiangsu section of the Yangtze River, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2011, 18(4): 638-648
- [25] Liu P, Wu C H, Chang X L, et al. Assessment of chlorpyrifos exposure and absorbed daily doses among infants living in an agricultural area of the Province of Jiangsu, China [J]. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 2014, 87(7): 753-762
- [26] 倪攀, 华一江, 杨海兵, 等. 苏州地区城乡生活饮用水水质调查与分析[J]. *环境卫生学杂志*, 2011, 1(4): 10-13
- Ni P, Hua Y J, Yang H B, et al. Analysis and investigation on the quality of drinking water in Suzhou urban and rural areas [J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 2011, 1(4): 10-13 (in Chinese)
- [27] 中华人民共和国环境保护部. 优先控制化学品名录(第一批)[S]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2017
- [28] 中华人民共和国生态环境部. 优先控制化学品名录(第二批)[S]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2020 ◆