

曹婷,刘铮,王晓慧,等.基于多方法优化的行业优控污染物清单筛选技术研究及应用[J].环境工程技术学报,2023,13(2):827-838.
CAO T,LIU Z,WANG X H,et al.Research and application of screening technology of industrial priority control pollutants list based on multi-method optimization[J].Journal of Environmental Engineering Technology,2023,13(2):827-838.

基于多方法优化的行业优控污染物清单筛选 技术研究及应用

曹婷^{1,2,3},刘铮^{1,3*},王晓慧^{2*},王璠^{1,3},方刚^{1,3},党春阁^{1,3},符志友⁴

1.中国环境科学研究院清洁生产与循环经济研究中心

2.北京化工大学化学工程学院

3.国家环境保护生态工业重点实验室,中国环境科学研究院

4.环境基准与风险评估国家重点实验室,中国环境科学研究院

摘要 针对优控污染物筛选技术缺乏行业层面的研究以及筛选技术不完善的问题,基于清洁生产全过程管控理念,在以往对于行业优控污染物清单筛选技术研究基础上,将综合评价法、Hasse图解法和层次分析法综合起来进行分析评价,形成一种矢量分析与标量分析相结合的综合筛选技术。并将该筛选技术在常州市印刷电路板(PCB)行业开展应用。结果表明:经过全流程调查和气相色谱-质谱联用仪90%匹配度下的水样检测分析结果,得到常州市PCB行业特征污染物清单中共含172种物质;PCB行业优控污染物清单中共含有30种物质,包括卤代烃3种、苯系物9种、酯类3种、醛类1种、醇类5种、酮类2种、金属离子5种、盐类1种、其他1种。提出的综合筛选技术可作为行业优控污染物筛选方法,能够更加科学有效地得出常州市PCB行业优控污染物清单。

关键词 重点行业;优控污染物;综合评价法;Hasse图解法;层次分析法

中图分类号:X592 文章编号:1674-991X(2023)02-0827-12 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20220213

Research and application of screening technology of industrial priority control pollutants list based on multi-method optimization

CAO Ting^{1,2,3}, LIU Zheng^{1,3*}, WANG Xiaohui^{2*}, WANG Fan^{1,3}, FANG Gang^{1,3}, DANG Chungu^{1,3}, FU Zhiyou⁴

1.Research Center of Cleaner Production and Circular Economy, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2.College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology

3.State Key Laboratory of Eco-industry for Environmental Protection, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

4.State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

Abstract In order to solve the problems of the lacking of industry-level research and imperfect screening technology for priority control pollutants, the comprehensive evaluation method, Hasse diagram method and analytic hierarchy process were integrated to form a comprehensive screening technology combining vector analysis and scalar analysis, according to the concepts of cleaner production and whole-process control, and based on the previous researches on the screening technology of the industrial priority control pollutants list. Then, the screening technology was applied in the printed circuit board (PCB) industry in Changzhou City. The results showed that after the whole process investigation and analysis of water samples by gas chromatography-mass spectrometry with 90% matching degree, the list of characteristic pollutants in PCB industry contained 172 substances. There were 30 kinds of substances in the list of priority control pollutants in PCB industry, including 3 kinds of halogenated hydrocarbons, 9 kinds of benzene series, 3 kinds of esters, 1 kind of aldehydes, 5 kinds of alcohols, 2 kinds of ketones, 5 kinds of metal ions, 1 kinds of salts and 1 kind of others. The proposed comprehensive screening

收稿日期:2022-03-08

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07301-005-03-02)

作者简介:曹婷(1997—),女,硕士研究生,主要从事水环境研究,3298374808@qq.com

* 责任作者:1.刘铮(1983—),男,高级工程师,博士,主要从事清洁生产技术和水环境科学研究,liuzheng@craes.org.cn

2.王晓慧(1980—),男,教授,博士,主要从事水污染控制理论与技术、环境微生物研究,xhwang@mail.buct.edu.cn

technology could be used for the industry so as to obtain the list of pollutants under priority control in PCB industry in the city more scientifically and effectively.

Key words key industry; priority control pollutants; comprehensive evaluation method; Hasse diagram method; analytic hierarchy process

随着社会工业化程度逐渐加深,工业企业种类数量增多,导致在人类生产生活的各个领域,化学品使用频率越来越大,种类也越来越多。据统计,仅欧洲地区的商业化学物质的种类就在 10 万以上^[1]。由于大量工业化学品进入环境,导致空气、水体、土壤污染问题频频发生。目前我国化工行业废水的 COD、BOD、氨氮等综合指标均按相应的排放标准排放,但来自各类工业企业的有毒有害有机物种类繁多、理化性质复杂,若径直排放会使环境污染越来越严重,同时也威胁着水生生物和人类健康安全^[2]。从环境管理的角度,很难通过制定标准来控制所有污染物排放,因此通过特征污染物的识别和优控污染物的筛选,对毒性大、危害性大的物质进行选择性的优先控制,可以为流域/区域内人类健康和生态环境保护提供保障,也是开展环境污染管控以及环境质量保护和提升的最有效科学技术手段^[3]。

关于优控污染物的筛选技术很多,大致可分为标量法和矢量法。标量法的特点是对单个化学物质进行数据分析,依次计算每种化学物质的得分,然后得到化学物质的最终排序结果^[4],如 CHEMS-1 法、CHEMS-2 法、SCRAM 法、RQ 法、综合评分法^[5]、潜在危害指数法^[6]、综合风险指数法^[7]、专家评判法^[8]等;矢量法则将所有需比较的化学物质的指标通过向量矩阵的形式呈现,然后对矩阵进行一系列数学变换后得出化学物质的排序结果^[4],如 Hasse 图解法^[9]、Copeland 计分排序法、因子分析法、层次分析法^[10]、定量评分法^[11]、半定量评分法^[11]、密切值法^[12]、模糊评价法^[13]。

目前,特征污染物和优控污染物筛选主要以水体为研究对象,从行业出发(行业全过程视角)开展的研究较少,且特征污染物和优控污染物的筛选技术也存在诸多不足^[14-16]。因此,笔者从行业角度入手,按清洁生产全过程预防控制思路,在课题组前期行业全过程特征污染物与优控污染物调查和筛选技术^[17]研究基础上,通过矢量法与标量法结合分析,进一步融入了 Hasse 图解法和层次分析法,对筛选技术进行了优化,并应用于常州市印刷电路板(PCB)行业特征污染物和优控污染物筛选,以期为区域水体有机污染物风险的源头防控提供有效的技术思路 and 参考。

1 行业特征污染物和优控污染物清单筛选技术

1.1 行业特征污染物清单筛选技术

重点行业特征污染物清单的确定主要包括技术路线制定、现场考察、取样检测分析(水样预处理、检测、检测结果分析)、重点行业特征污染物清单的汇总确定等步骤,具体可参考刘铮等^[17]的研究。

1.2 行业优控污染物清单筛选技术

1.2.1 技术路线

采用综合评价法、Hasse 图解法、层次分析法开展行业优控污染物的筛选,整个筛选技术分为初步筛选、进一步筛选物质的确定、进一步筛选 3 个阶段,如图 1 所示。

1.2.2 优控污染物清单 I

收集最新水环境质量标准、优控污染物名录(表 1),形成对比目录库。通过特征污染物清单与对比目录库的比对,将符合条件的有机物直接纳入优控污染物清单 I。

1.2.3 优控污染物清单 II

进一步筛选主要内容为将重点行业特征污染物清单去掉优控污染物清单 I 所含物质后余下物质中出现频率高、含量高的物质进行筛选,基于矢量分析法和标量分析法结合的理念,采用综合评价法、Hasse 图解法和层次分析法分别进行筛选,对产生的结果合并重复后得到优控污染物清单 II。

1.2.3.1 综合评价法

筛选因子的建立原则为结合该研究的实际情况并参考化学品污染物的筛选原则。化学品污染物的筛选原则:毒性效应(急性毒性、慢性毒性、三致性)大的;在环境中降解缓慢、有积蓄作用的;环境中检出率高的;已造成污染或环境浓度高的;环境污染事故频发、造成损失严重的;已列入有关组织及一些发达国家公布的各类环境优控污染物名单中的;已有条件可以监测的;人群敏感的^[23-25]。

综合评价法的主要步骤可分为筛选因子的建立,包括 COD_{Cr} 贡献值、水中溶解度、挥发度、生物积累性、生物降解性、一般毒性、致癌性(表 2);筛选因子信息查询;筛选因子赋分标准。具体方法可参考刘铮等^[17]的研究。

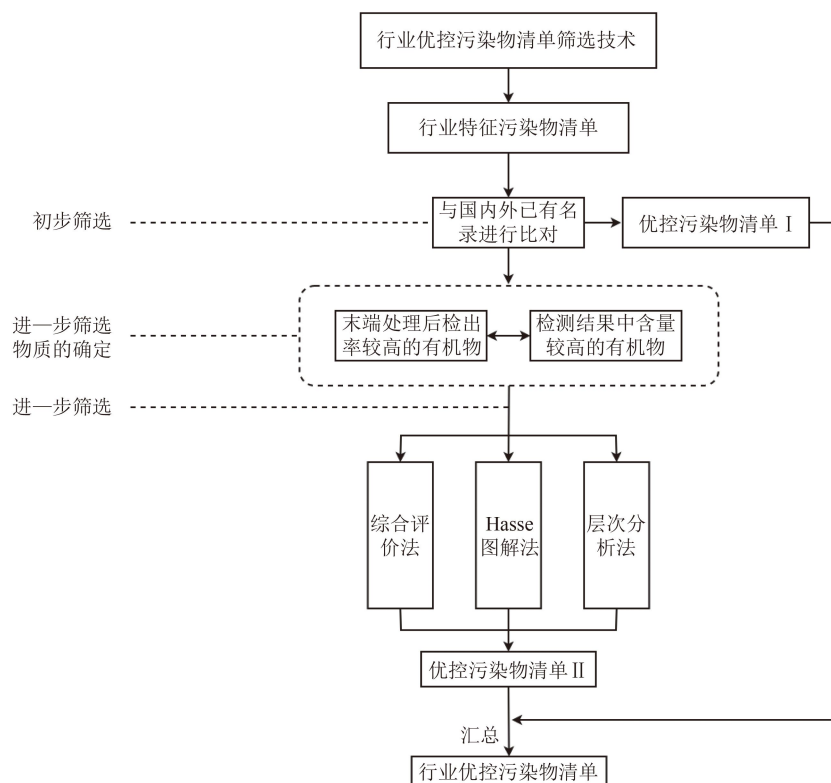


图 1 行业优控污染物清单筛选技术路线

Fig.1 Screening technology roadmap of priority control pollutants list in industries

表 1 优控污染物清单筛选对比目录库

Table 1 Priority control pollutants screening and comparison directory library

类型	名称
水环境质量标准	《饮用水水质标准》(美国国家环境保护局) GB 3838—2020《地表水环境质量标准》 GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》
优控污染物名单	《优控污染物名单129种》(美国国家环境保护局) ^[18] 《中国水中优先控制污染物黑名单》 ^[19] 《浙江省第一批环境优先污染物黑名单》 ^[20] 《福建省水环境优先污染物名单》 ^[21] 《江苏水体优先控制有毒有机污染物》 ^[22] 《四川省优先污染物名单》 ^[23]

表 2 各类物质的筛选因子

Table 2 Screening factors for various substances

筛选依据	序号	排放物筛选因子
暴露性	1	COD _{Cr} 贡献值
	2	水中溶解度
	3	挥发度
持久性	4	生物积累性
	5	生物降解性
毒性	6	一般毒性
	7	致癌性

1.2.3.2 Hasse 图解法

Hasse 图解法的基本原理是将化学物质的危害性通过向量来表示, 向量中每个数学元素都是各种

理化指标的具体数值^[26]。Hasse 图解法筛选主要包括危害性指标的选择、化学物质之间的比较规则、Hasse 图形绘制。

危害性指标的选择。在排序时略去个别使大多数化学物质无法进行比较或分值相同的指标^[27]。也可以对分析矩阵进行分析之后, 通过判断指标的重要性对指标进行取舍^[28]。

化学物质之间的比较规则。化学物质的危害性是通过与其他化学物质一一比较得到的, 最终可以得到 3 种结果: 化学物质的位置重合; 箭头由数值均大的化学物质指向数值均小的化学物质; 化学物质的数值有大有小则不具备可比性, 之间没有连线^[27-28]。

Hasse 图形绘制。化学物质用带圆圈的数字表示, 按照规则绘制图形, 危害性最大的化学物质位于顶层, 危害性最小的位于底层。依据向量的可传递性及最少水平层数放置不可比化学物质的原则^[9], 进行简化调整。

1.2.3.3 层次分析法

层次分析法^[12,29]是一种定性定量相结合、系统化、层次化的分析方法, 它将与决策有关的元素分解成决策层、中间层、方案层等, 在此基础上进行分析。主要分为 5 个步骤: 确定评价指标; 构建层次结构模型; 构造判断矩阵; 层次单排序及一致性检验; 层次总排序及一致性检验。

确定评价指标。选择 COD_{Cr} 贡献值等 7 个评价指标。

构建层次结构模型。包括决策层、中间层和方案层 3 个层次。决策层中的元素为分析问题的预定目标;中间层包含为实现目标所涉及的中间环节,主要包括决策过程中需考虑到的准则;方案层主要包括为实现预定目标提供的方案。

构造判断矩阵。将元素通过一对一比较它们对于上一层某个目标的影响程度,从而确定在该层中相对于某个目标占的权重。

层次单排序及一致性检验。对应于判断矩阵最大特征根的特征向量中的各元素即为同层次因素对上一层某因素相对重要性的排序权重。而能否确定该层次单排序,还需进行一致性检验,当一致性比例 $(\text{CR}) < 0.1$ 时,即通过了一致性检验,主要步骤如下。

一致性指标(CI)的确定:

$$\text{CI} = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (1)$$

式中: λ_{\max} 为矩阵最大特征根; n 为矩阵阶数。

CR 的确定:

$$\text{CR} = \text{CI} / \text{RI} \quad (2)$$

式中 RI 为平均随机一致性指标。

层次总排序及一致性检验。为了得到方案层对决策层的排序权重,总排序权重需自上而下对中间层的权重进行合并及一致性检验。

化学物质得分计算。根据以下公式计算得到每个化学物质的最终得分。

$$T = \sum_{i=1}^7 W_i \times C_i \quad (3)$$

式中: T 为指标得分; W_i 为指标权重; C_i 为指标赋分。

1.2.3.4 筛选结果

分别选取综合评价法、Hasse 图解法、层次分析法筛选结果前 50% 筛选物质合并重复得到优控污染物清单 II。

1.2.4 重点行业优控污染物清单的确定

汇总优控污染物清单 I 与优控污染物清单 II 得到重点行业优控污染物清单。

2 常州市 PCB 行业特征污染物和优控污染物清单确定

2.1 特征污染物清单确定

2.1.1 特征污染物清单 I

有机物污染和重金属污染是电镀废水最主要的污染物质^[30]。重金属污染主要包括铬、铜、镍、镉、锌等,有机污染物主要成分为矿物油、表面活性剂、

光亮剂、蜡等高分子化合物以及苯并三氮唑、间硝基苯磺酸钠等^[31]。总结起来即以重金属离子和苯系物、酯类、醇类、醚类等为主^[32]。

2.1.2 特征污染物清单 II

印刷电路板(PCB)行业废水有机污染物主要来自于电镀废水前处理工艺和镀后处理工艺^[33],具体体现在显影、黑/棕氧化、除胶渣、镀通孔(PTH)、镀铜、退膜、剥废板绿漆、酸性除油等工段产生的有机废水中^[34],详见表 3。

2.1.3 特征污染物清单 III

常州市 PCB 企业一共有 10 家,选取具有代表性的 4 家企业(A、B、C、D)作为研究对象,分别对其末端处理前后的废水取样处理。利用 GC-MS 进行检测,并筛选出匹配度在 90% 以上的化学物质,详见表 4。

常州市 PCB 行业废水污染物以醇类、苯系物、酯类、酮类为主,分别占比 20.2%、19.3%、14.9%、10.5%。

2.1.4 常州市 PCB 行业特征污染物清单的确定

汇总特征污染物清单 I、特征污染物清单 II 和特征污染物清单 III,得到常州市 PCB 行业特征污染物清单(表 5),共计 172 种物质,主要包括酸类 11 种、长链烷烃类 10 种、烯烃类 3 种、卤代烃类 4 种、苯系物 30 种、酯类 36 种、醇类 23 种、酮类 13 种、醛类 1 种、酰胺类 7 种、醚类 4 种、金属离子 9 种、盐类 10 种、其他 11 种。

2.2 优控污染物清单确定

2.2.1 优控污染物清单 I

在特征污染物清单的基础上,得到优控污染物清单 I(表 6),共计 22 种化学物质,包括卤代烃 3 种、苯系物 8 种、酯类 3 种、醛类 1 种、金属离子 5 种、盐类 1 种、其他 1 种。

2.2.2 进一步筛选物质的确定

进一步筛选的研究对象是初步筛选时特征污染物清单中未被选中的部分,选取其中含量高、检出频率高的化学物质进行下一步筛选。

2.2.2.1 末端处理前后检出率高的物质

选取 4 家企业中不止一次检出的物质,分别为水杨醇(检出率为 50%)、正十六酸(检出率为 50%)、4,4'-亚甲基-苯酚(双酚 F,检出率为 50%)、4,4'-(1-甲基亚乙基)二苯酚(双酚 A,检出率为 50%)、2,2'-亚甲基 [6-(1,1-二甲基乙基)-4-甲基-苯酚](检出率为 75%)、(1-羟基环己基)苯基-甲酮(检出率为 50%)、(Z)-13-二十二烷酰胺(检出率为 50%),共计 7 种有机物。

表 3 基于生产工艺的特征污染物

Table 3 Characteristic contaminants based on production process

污染源	产污工序	主要污染物
刷酸废水	下板磨料刷洗、去毛刺刷洗	硫酸、盐酸、磷酸三丁酯、磷酸三(2-乙基己基)酯、磷酸三(2-氯乙基)酯、磷酸三(2,3-二氯丙基)酯
碱性废水	丝网模板、黑化棕化、化学镀铜、热风整平、沉锡、浸涂有机保护膜前处理的清洗	磷酸甲苯-二苯酯、磷酸三甲苯酯、磷酸三苯酯、磷酸(2-乙基己基)-二苯酯、氢氧化钠
酸性铜废水(非络合铜)	酸洗和微蚀、化学镀铜、全板镀铜和图案镀铜、酸性氯化铜蚀刻、镀镍金酸的酸洗和微蚀、浸涂有机保护膜的清洗	铜离子、金离子、钼离子、锌离子、氯丹酸酐、磷酸三(2,3-二溴丙基)酯
络合铜废水	化学镀铜清洗(含EDTA络合物)	络合物[EDTA-Cu、Cu(NH ₃) ₄ ²⁺]、异丁醇、丙酮、丁酮、醋酸乙酯、醋酸丁酯
铜氨废水	氨性蚀刻剂清洗	二溴甲烷、八溴二苯基氧化物、五溴乙基苯、四溴双酚A
锡铅废水	硫酸盐/氨基磺酸盐镀/甲基磺酸盐/氟硼酸盐镀锡铅清洗、退锡或锡铅清洗、化学镀铜敏化清洗、沉锡清洗	铅离子、锡离子、甲基丙烯酸、甲基丙烯酸甲酯、甲基丙烯酸叔丁酯、抗蚀剂基团甲基丙烯酸异冰片酯
含镍废水	硫酸盐或氨基磺酸盐、镀镍清洗镍盐、次亚磷酸钠化学沉镍清洗	镍离子、酒石酸盐、柠檬酸盐、亚氨酸钠、磷酸钠、碳酸钠
含银废水	照相制版清洗、化学沉银清洗	二甲基亚砷、甲基乙酰胺、N,N-二甲基乙酰胺、N-甲基吡咯烷酮
含锰废水	内层板凹蚀清洗	甲苯、二甲苯、丙二醇甲醚、乙醇胺、高锰酸钾、环氧树脂、氯化氨、乙二胺四乙酸钠(EDTA二钠)、氨三乙酸(NTA)、
含氰废水	氰化镀银清洗、氰化镀金清洗	脂肪酸、甘油三酯混合物、烷基苯并咪唑、环氧大豆油(C ₅₇ H ₁₀₆ O ₁₀)
有机废水	内层板显影、脱膜、膨胀、凹蚀、去钻污清洗、外层线路板图层显影、阻焊膜显影清洗、外层板浸涂有机保护膜清洗、丝网模板脱膜清洗	铬离子、铁离子、甲醇、异丙醇、醋酸正丁酯、丙二醇甲醚醋酸酯、苯酚、甲醛、三氯溴甲烷、二氯溴甲烷

表 4 基于水样检测的特征污染物质

Table 4 Characteristic contaminants based on water sample detection

类别	有机污染物质
醇类(23种)	2-丁氧基乙醇、2-(2-丁氧基乙氧基)乙醇、2-[4-(1,1-二甲氧基乙基)苯氧基]-乙醇、2-丁基-1-辛醇、水杨醇、4-羟基苯乙醇、水杨醇、2-甲基-6-亚甲基-2-辛醇、2,2'-氧双-乙醇、三甘醇、2-[2-(2-氯乙氧基)乙氧基]-乙醇、1-甲基-4-(1-甲基乙烯基)-1,2-环己二醇、1,3-二氧戊环-2-甲醇、三缩四乙二醇、3,6,9,12-四氧杂-1-醇、2,5,8,11,14-五氧十六烷-16醇、戊乙二醇、六甘醇、三环[5.2.1.0(2,6)]癸-3-烯-10-醇、1-十六醇、2-丁氧基-乙醇、1-(2-甲氧基-1-甲基乙氧基)异丙醇、DL-红-1-苯基-1,2-丙二醇
酮类(12种)	2-吡咯烷酮、2-羟基-1,2-二苯基乙酮、2-甲基-1-[4-(甲基硫代)苯基]-2-(4-吗啉基)-1-丙酮、2-吡咯烷酮、1,1'-(1,4-苯基)双-乙酮、(1-羟基环己基)苯基-甲酮、1,6-二噁英环癸烷-7,12-二酮、甲基正十六烷基酮、1,4,7,10,13,16,19-七醇-2-环己酮、环己酮、2-羟基异丁苯酮、(1-羟基环己基)苯基-甲酮
酸类(8种)	1,2-苯二羧酸、顺式-4-环己烯-1,2-二羧酸、正十六酸、十八酸、水杨酸、顺天冬氨酸、2-甲基庚基丙酸、正十六酸
酯类(17种)	2-(3,4-二甲氧基苯基)-羟基乙酸甲酯、邻苯二甲酸二丁酯、1,2-苯二羧酸双(2-甲基丙基)酯、α-甲氧基苯乙酸(+/-)甲酯、2-甲基-3-羟基-2,2,4-三甲基丙酸戊酯、1,2-苯二羧酸双(2-甲基丙基)酯、草酸烯丙基十二烷基酯、邻苯二甲酸二(6-甲基庚基-2-基)酯、N-甲氧羰基-d-脯氨酸壬基酯、1,4-苯二羧酸双(2-乙基己基)酯、2-[2-[2-(2-羟基乙氧基)乙氧基]乙氧基]乙酸乙酯、乙酰柠檬酸三丁酯、乙酸正十八烷基酯、三醋酸甘油酯、丁基环己基亚硫酸甲酯、1,2-苯二甲酸丁基环己基酯、N-甲氧羰基-L-脯氨酸癸酯
醚类(3种)	三乙二醇单十二烷基醚、二异丙醚、三缩四乙二醇单甲醚
酰胺类(6种)	4-甲基苯磺酰胺、(Z)-9-十八酰胺、(Z)-13-二十二烷酰胺、(Z)-13-二十二烷酰胺、N-苯基乙酰胺、正环己基-甲酰胺
苯系物(22种)	4-(甲硫基)苯甲酸、顺-1,2,3,6-四氧苯酐、1H-苯并三唑、4,4'-(1-甲基亚乙基)双-苯酚、三苯基氧化膦、4,4'-(1-甲基亚乙基)双[2,6-二溴-苯酚]、苯酚、邻苯二酚、4-羟基苯甲醛、2-羟基-6-甲基苯甲醛、2,4,6-三溴苯酚、2-[(4-羟基苯基)甲基]-苯酚、4,4'-亚甲基-苯酚(双酚F)、4-(乙氧基甲基)苯酚、4,4'-亚甲基(2,6-二甲基)-苯酚、邻苯二甲酸酐、4,4'-(1-甲基亚乙基)二苯酚(双酚A)、2,2'-亚甲基[6-(1,1-二甲基乙基)-4-甲基-苯酚]、2,2'-亚甲基双-(4-甲基-6-叔丁基苯酚)、2,4-二叔丁基苯酚、2-(1,1,3,3-四甲基丁基)-苯酚、2,2'-亚甲基-苯酚
烷烃类(11种)	1,2-二硝基乙烷、1-苯基-1-(2,4,5-三甲氧基苯基)乙烷、1-甲基-2-丙基-环己烷、3,3-二甲基己烷、4,7-二甲基-十一烷、十六烷、2-甲基双环[3.2.1]辛烷、十八甲基环壬基氧烷、2,4,6-三甲基-辛烷、十六烷、1,4,7,10,13,16-十六烷环十八烷
烯烃类(3种)	2,6,10-三甲基-(Z)-1,5,9-十一烯、2,3,3-三甲基-1-己烯、2,4,4-三甲基-1-己烯
其他(9种)	2,6-无氧-1,3,4-三甲氧基-β-d-呋喃果糖、N,3-二乙基-3-庚胺、9,9-二甲基-9-硅芬、1-辛基磺酰氯、4-乙基-4-氢-1,2,4-三唑-3-胺、15-冠-5、二苯胺、2-丙醇-1-氯-磷酸盐(3:1)、四氢-2,2,5,5-四甲基-咪唑

2.2.2.2 末端处理前后含量高的物质

由表 7 分析得到 4 家企业废水中一共有 18 种物质含量较高。

2.2.2.3 进一步筛选物质名单

选择 7 种检出率较高和 18 种含量较高的有机物, 合并剔除重复项, 最后得到 20 种有机物, 见表 8。

表 5 常州市 PCB 行业特征污染物清单

Table 5 List of characteristic pollutants in PCB industry in Changzhou City

类别	特征污染物
酸类(11种)	硫酸、盐酸、甲基丙烯酸、氨三乙酸(NTA)、顺式-4-环己烯-1,2-二羧酸、正十六酸、十八酸、水杨酸、顺-天冬氨酸、2-甲基庚基丙酸、亚氯丹酸酐
长链烷烃(10种)	1-甲基-2-丙基-环己烷、3,3-二甲基己烷、十一烷、4,7-二甲基-十六烷、2-甲基双环[3.2.1]辛烷、十八甲基环壬基氧烷、2,4,6-三甲基-辛烷、1,2-二硝基乙烷、1,4,7,10,13,16-十六烷环十八烷、十六烷
烯烃(3种)	2,3,3-三甲基-1-己烯、2,4,4-三甲基-1-己烯、2,6,10-三甲基-(Z)-1,5,9-十一三烯
卤代烃(4种)	二溴甲烷、三氯溴甲烷、二氯溴甲烷、四溴双酚A
苯系物(30种)	甲苯、二甲苯、顺-1,2,3,6-四氢苯酐、1H-苯并三唑、1-苯基-1-(2,4,5-三甲氧基苯基)乙烷、三苯基氯化膦、9,9-二甲基-9-硅芬、八溴二苯基氧化物、五溴乙基苯、苯酚、邻苯二酚、2,4,6-三溴苯酚、2-[(4-羟基苯基)甲基]-苯酚、4,4'-亚甲基-苯酚(双酚F)、4-(乙氧基甲基)苯酚、4,4'-(1-甲基亚乙基)二苯酚(双酚A)、4,4'-亚甲基[2,6-二甲基]-苯酚、2,2'-亚甲基[6-(1,1-二甲基乙基)-4-甲基-苯酚、4,4'-双(1-甲基亚乙基)-苯酚、4,4'-(1-甲基亚乙基)双[2,6-二溴]-苯酚、2,2'-亚甲基-苯酚、2,4-二叔丁基苯酚、2-(1,1,3,3-四甲基丁基)-苯酚、4-羟基苯乙醇、4-羟基苯甲醛、2-羟基-6-甲基苯甲醛、邻苯二甲酸酐、1,2-苯二羧酸、4-(甲硫基)苯甲酸、烷基苯并咪唑
酯类(36种)	醋酸乙酯、醋酸丁酯、醋酸正丁酯、丙二醇甲醚醋酸酯、磷酸三丁酯、磷酸三(2-乙基己基)酯、磷酸三(2-氯乙基)酯、磷酸三(2,3-二氯丙基)酯、磷酸三(2,3-二溴丙基)酯、磷酸三甲苯-二苯酯、磷酸三苯酯、磷酸(2-乙基己基)-二苯酯、甲基丙烯酸甲酯、甲基丙烯酸叔丁酯、抗蚀剂基团甲基丙烯酸异冰片酯、环氧大豆油(C ₅₇ H ₁₀₆ O ₁₀)、桐油(脂肪酸、甘油三酯混合物)、3-甲基-4-[(三甲基硅基)氧]苯甲酸三甲基硅酯、1,2-苯二羧酸双(2-甲基丙基)酯、邻苯二甲酸二丁酯、二-(3,4-二甲氧基苯基)-羟基乙酸甲酯、 α -甲氧基苯乙酸(+/-)甲酯、2-甲基-3-羟基-2,2,4-三甲基丙酸戊酯、(1-羟基环己基)苯基-甲酮1,2-苯二羧酸双(2-甲基丙基)酯、草酸烯丙基十二烷基酯、邻苯二甲酸二(6-甲基庚基-2-基)酯、N-甲氧羰基-d-脯氨酸壬基酯、1,4-苯二羧酸双(2-乙基己基)酯、三醋酸甘油酯、丁基环己基亚硫酸甲酯、1,2-苯二甲酸丁基环己基酯、N-甲氧羰基-L-脯氨酸癸酯、2-[2-(2-羟基乙氧基)乙氧基]乙氧基]乙酸乙酯、乙酰柠檬酸三丁酯、乙酸正十八烷基酯
醇类(23种)	甲醇、异丙醇、异丁醇、水杨醇、2-丁氧基乙醇、2-(2-丁氧基乙氧基)乙醇、2-[4-(1,1-二甲基乙基)苯氧基]-乙醇、2-丁基-1-辛醇、2-甲基-6-亚甲基-2-辛醇、1-(2-甲氧基-1-甲基乙氧基)异丙醇、DL-红-1-苯基-1,2-丙二醇、2,2'-氧双-乙醇、三甘醇、2-[2-(2-氯乙氧基)乙氧基]-乙醇、1-甲基-4-(1-甲基乙基)-1,2-环己二醇、1,3-二氧戊环-2-甲醇、三缩四乙二醇、3,6,9,12-四氧杂-1-醇、2,5,8,11,14-五氧十六烷-16醇、戊乙二醇、六甘醇、三环[5.2.1.0(2,6)]癸-3-烯-10-醇、1-十六醇
酮类(13种)	丙酮、丁酮、N-甲基吡咯烷酮、2-吡咯烷酮、2-羟基-1,2-二苯基乙酮、1,1'-(1,4-苯基)双-乙酮、2-甲基-1-[4-(甲基硫代)苯基]-2-(4-吗啉基)-1-丙酮、环己酮、2-羟基异丁苯酮、(1-羟基环己基)苯基-甲酮、甲基正十六烷基酮、1,4,7,10,13,16,19-七醇-2-环己酮、1,6-二噁英环癸烷-7,12-二酮
醛类(1种)	甲醛
酰胺(7种)	甲基乙基酰胺、N,N-二甲基乙酰胺、4-甲基苯磺酰胺、正环己基-甲酰胺、N-苯基乙酰胺、(Z)-13-二十二烷酰胺、(Z)-9-十八酰胺
醚类(4种)	丙二醇甲醚、三乙二醇单十二烷基醚、二异丙醚、三缩四乙二醇单甲醚
金属离子(9种)	铜离子、金离子、铅离子、锡离子、钡离子、镍离子、锌离子、铬离子、铁离子
盐类(10种)	氯酸钠、磷酸钠、碳酸钠、氢氧化钠、氰化氨、乙醇胺、乙二胺四乙酸钠(EDTA二钠)、高锰酸钾、酒石酸盐、柠檬酸盐
其他(11种)	环氧树脂、二甲基亚砷、络合物[EDTA-Cu、Cu(NH ₃) ₄ ²⁺]、2,6-无氢-1,3,4-三氧甲基- β -d-呋喃果糖、N,3-二乙基-3-庚胺、4-乙基-4氮-1,2,4-三唑-3-胺、1-辛基磺酰氯、四氢-2,2,5,5-四甲基-呋喃、2-丙醇-1-氯-磷酸盐(3:1)、15-冠-5、二苯胺

表 6 PCB 行业优控污染物清单 I

Table 6 List I of priority control pollutants in PCB industry

类别	优控污染物
卤代烃(3种)	二溴甲烷、三氯溴甲烷、二氯溴甲烷
苯系物(8种)	甲苯、二甲苯、9,9-二甲基-9-硅芬、八溴二苯基氧化物、五溴乙基苯、苯酚、2,4,6-三溴苯酚、4,4'-双(1-甲基亚乙基)[2,6-二溴]-苯酚
酯类(3种)	邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二(6-甲基庚基-2-基)酯、1,4-苯二羧酸双(2-乙基己基)酯
醛类(1种)	甲醛
金属离子(5种)	铜离子、铅离子、镍离子、锌离子、铬离子
盐类(1种)	氰化氨
其他(1种)	络合物[EDTA-Cu、Cu(NH ₃) ₄ ²⁺]

2.2.3 优控污染物清单 II

2.2.3.1 综合评价法筛选

根据 1.2.3.1 节介绍的筛选因子信息查询数据库,分别对表 8 中进一步筛选物质的暴露性、持久性和毒性等 7 项指标进行赋分,结果见表 9~表 11。

分析图 2 得到排名前 50% 的化学物质为 2-丁氧基乙醇、三缩四乙二醇、2-(2-丁氧基乙氧基)乙醇、戊乙二醇、2-吡咯烷酮、3,6,9,12-四氧杂-1-醇、1-(2-甲氧基-1-甲基乙氧基)异丙醇、4,4'-(1-甲基亚乙基)二苯酚(双酚 A)、4,4'-亚甲基-苯酚(双酚 F)、2-羟基异丁苯酮、(1-羟基环己基)苯基-甲酮。

2.2.3.2 Hasse 图形筛选结果

根据综合评价法所得 COD_{Cr} 贡献值、生物累积性、生物降解性得分,构成每种物质指标得分的向量

表 7 废水中含量较高的物质

Table 7 Substances of higher content in waste water

来源	废水来源	排序	物质名称	含量/%
企业A	处理前	1	2-吡咯烷酮	25.71
		2	2-(2-丁氧基乙氧基)乙醇	14.23
		3	2-丁氧基乙醇	11.47
企业B	处理后	1	水杨醇	44.75
		2	4,4'-(1-甲基亚乙基)二苯酚(双酚A)	25.00
		3	4-羟基苯乙醇	3.59
企业C	处理后	1	二异丙醚	5.17
		2	2,3,3-三甲基-1-己烯	1.96
		3	2,4,4-三甲基-1-己烯	1.69
企业D	处理后	1	2-羟基异丁苯酮	5.91
		2	1-(2-甲氧基-1-甲基乙氧基)异丙醇	5.30
		3	(Z)-13-二十二烷酰胺	3.14
企业D	处理前	1	3,6,9,12-四氧杂-1-醇	7.21
		2	戊乙二醇	5.86
		3	三缩四乙二醇	4.58
企业D	处理后	1	(Z)-13-二十二烷酰胺	17.30
		2	油酸酰胺	8.10
		3	2,2'-亚甲基双-(4-甲基-6-叔丁基苯酚)	2.79

表 8 进一步筛选物质名单

Table 8 List of substances to be further screened

编号	名称	编号	名称
1	2-丁氧基乙醇	11	(1-羟基环己基)苯基-甲酮
2	三缩四乙二醇	12	水杨醇
3	2-(2-丁氧基乙氧基)乙醇	13	2,2'-亚甲基双-(4-甲基-6-叔丁基苯酚)
4	戊乙二醇	14	正十六酸
5	2-吡咯烷酮	15	4-羟基苯乙醇
6	3,6,9,12-四氧杂-1-醇	16	二异丙醚
7	1-(2-甲氧基-1-甲基乙氧基)异丙醇	17	2,3,3-三甲基-1-己烯
8	4,4'-(1-甲基亚乙基)二苯酚(双酚A)	18	(Z)-13-二十二烷酰胺
9	4,4'-亚甲基-苯酚(双酚F)	19	2,4,4-三甲基-1-己烯
10	2-羟基异丁苯酮	20	油酸酰胺

表达式, 再对所有物质通过正交比较向量表达式中代表上述 3 种指标的分值大小。例如: 物质 2=[5,1,3] 与物质 3=[5,1,3] 分值相同在数学意义上位置重合, 在绘图中为体现筛选物质的完整性置于同一水平层; 物质 8=[5,3,2] 与物质 12=[4,1,1], 因 5>4 且 3>1 且 2>1, 因此从上到下由毒害性大的物质 8 指向毒害性小的物质 12; 物质 2=[5,1,3] 与物质 8=[5,3,2], 因 1<3 但 3>2, 因此 2 种物质间不具备可比性, 既不

表 9 化学物质暴露性指标赋分

Table 9 Chemical exposure index score table

物质名称	COD _{Cr} 贡献值		溶解度		挥发性	
	数值/(g/g)	赋分	数值/(g/L)	赋分	数值/℃	赋分
2-丁氧基乙醇	258.4	4	64.500	3	181.14	3
三缩四乙二醇	304.0	5	1 000.000	4	315.80	2
2-(2-丁氧基乙氧基)乙醇	224.4	5	71.920	3	240.02	3
戊乙二醇	380.0	5	1 000.000	4	353.51	2
2-吡咯烷酮	147.2	3	679.700	4	236.40	2
3,6,9,12-四氧杂-1-醇	395.2	5	1 000.000	4	305.91	2
1-(2-甲氧基-1-甲基乙氧基)异丙醇	288.8	4	493.600	4	191.60	3
4,4'-(1-甲基亚乙基)二苯酚(双酚A)	576.0	5	0.173	1	363.54	2
4,4'-亚甲基-苯酚(双酚F)	480.0	5	0.543	2	351.92	2
2-羟基异丁苯酮	307.2	5	25.340	3	260.00	2
(1-羟基环己基)苯基-甲酮	409.6	5	1.110	2	322.15	2
水杨醇	364.8	4	283.600	4	260.58	2
2,2'-亚甲基双-(4-甲基-6-叔丁基苯酚)	960.0	5	0.001×10 ⁻¹	1	444.75	1
正十六酸	699.2	5	0.004×10 ⁻²	1	358.84	2
4-羟基苯乙醇	243.2	4	728.900	4	260.58	2
二异丙醚	100.8	2	5.800	2	67.34	3
2,3,3-三甲基-1-己烯	43.2	1	52.244×10 ⁻²	2	132.00	3
(Z)-13-二十二烷酰胺	209.6	4	0.005×10 ⁻⁴	1	461.05	1
2,4,4-三甲基-1-己烯	43.2	1	0.345×10 ⁻²	1	111.00	3
油酸酰胺	171.2	3	0.005×10 ⁻²	1	414.63	1

位于同一水平层, 之间也没有连线, 通过以上绘图原则和方法, 最终形成图 3 所示 Hasse 图解法的比较结果。

由图 3 可知, 排名前 50% 的化学物质为三缩四乙二醇、2-(2-丁氧基乙氧基)乙醇、戊乙二醇、3,6,9,12-四氧杂-1-醇、1-(2-甲氧基-1-甲基乙氧基)异丙醇、4,4'-(1-甲基亚乙基)二苯酚(双酚 A)、4,4'-亚甲基-苯酚(双酚 F)、2-羟基异丁苯酮、(1-羟基环己基)苯基-甲酮、2,2'-亚甲基双-(4-甲基-6-叔丁基苯酚)、正十六酸。

2.2.3.3 层次分析法筛选

本研究决策层为优先污染物的筛选指标; 中间层为暴露性、持久性和毒性; 方案层为 COD_{Cr} 贡献值、水中溶解度、挥发性、生物积累性、生物降解性、一般毒性、致癌性。按照决策层、中间层、方案层由上到下构建层次结构模型。

在层次单排序及一致性检验中, 通过中间层对

表 10 化学物质持久性指标赋分

Table 10 Chemical substance persistence index score table

物质名称	生物降解性		生物积累性(lg K _{ow})	
	数值	赋分	数值	赋分
2-丁氧基乙醇	0.611 1	2	0.570	1
三缩四乙二醇	-0.069 5	3	-2.023	1
2-(2-丁氧基乙氧基)乙醇	0.242 8	3	0.290	1
戊乙二醇	-0.437 9	3	-2.300	1
2-吡咯烷酮	0.917 2	1	-0.320	1
3,6,9,12-四氧杂-1-醇	-0.589 0	3	-1.239	1
1-(2-甲氧基-1-甲基乙氧基)异丙醇	0.141 0	3	-0.350	1
4,4'-(1-甲基亚乙基)二苯酚(双酚A)	0.686 6	2	3.640	3
4,4'-亚甲基-苯酚(双酚F)	0.938 5	1	3.060	3
2-羟基异丁苯酮	0.620 4	2	1.080	2
(1-羟基环己基)苯基-甲酮	0.601 3	2	2.440	3
水杨醇	0.963 0	1	0.595	1
2,2'-亚甲基双-(4-甲基-6-叔丁基苯酚)	0.613 2	2	7.970	3
正十六酸	0.806 6	1	6.960	3
4-羟基苯乙醇	0.963 0	1	0.600	1
二异丙醚	0.351 5	2	1.880	2
2,3,3-三甲基-1-己烯	0.503 5	2	4.570	3
(Z)-13-二十二烷酰胺	0.905 4	1	8.440	3
2,4,4-三甲基-1-己烯	0.503 5	2	4.570	3
油酸酰胺	0.932 1	1	6.480	3

决策层以及方案层对中间层构造判断矩阵并计算得到相应的权重(表 12~表 15)。

中间层对决策层的判断矩阵计算得 $\lambda_{\max}=3.029 1$, $CI=0.02$, $CR=0.027 9<0.1$, 表明该判断矩阵符合一致性要求。

暴露性指标的判断矩阵计算得 $\lambda_{\max}=3.053 6$, $CI=0.03$, $CR=0.051 6<0.1$, 表明该判断矩阵符合一致性要求。

持久性指标的判断矩阵计算得 $\lambda_{\max}=2.000 0$, $CI=0.00$, $CR=0.000 0<0.1$, 表明该判断矩阵符合一致性要求。

毒性指标的判断矩阵计算得 $\lambda_{\max}=2.000 0$, $CI=0.00$, $CR=0.000 0<0.1$, 表明该判断矩阵符合一致性要求。

在层次总排序及一致性检验中, 得到方案层每个指标对于决策层的总权重(表 16)。

将所得各物质总权重及综合评价法得分代入式(3)计算得到最终结果, 见图 4。由图 4 可知, 排名前 50% 的化学物质为 2-(2-丁氧基乙氧基)乙醇、三

表 11 化学物质毒性指标赋分

Table 11 Chemical substance toxicity index score table

物质名称	一般毒性		致癌性	
	LD50(大鼠经口)/(mg/kg)	赋分	结果	赋分
2-丁氧基乙醇	2 500	2	三级致癌物	2
三缩四乙二醇	34 650	1	N	0
2-(2-丁氧基乙氧基)乙醇	6 560	1	N	0
戊乙二醇	22 500	1	N	0
2-吡咯烷酮	328	3	TD50(大鼠)2 050 mg/(kg·d)	2
3,6,9,12-四氧杂-1-醇	N	0	N	0
1-(2-甲氧基-1-甲基乙氧基)异丙醇	N	0	N	0
4,4'-(1-甲基亚乙基)二苯酚(双酚A)	3 250	1	N	0
4,4'-亚甲基-苯酚(双酚F)	4 950	1	N	0
2-羟基异丁苯酮	N	0	N	0
(1-羟基环己基)苯基-甲酮	N	0	N	0
水杨醇	6 560	1	N	0
2,2'-亚甲基双-(4-甲基-6-叔丁基苯酚)	11×10^3	1	N	0
正十六酸	$>10 \times 10^3$	1	N	0
4-羟基苯乙醇	N	0	N	0
二异丙醚	$8 470 \times 10^3$	1	N	0
2,3,3-三甲基-1-己烯	N	0	N	0
(Z)-13-二十二烷酰胺	N	0	N	0
2,4,4-三甲基-1-己烯	N	0	N	0
油酸酰胺	N	0	N	0

注: N为查询不到相关数据。

缩四乙二醇、戊乙二醇、3,6,9,12-四氧杂-1-醇、1-(2-甲氧基-1-甲基乙氧基)异丙醇、4,4'-(1-甲基亚乙基)二苯酚(双酚 A)、2-丁氧基乙醇、(1-羟基环己基)苯基-甲酮、2,2'-亚甲基双-(4-甲基-6-叔丁基苯酚)、2-羟基异丁苯酮。

2.2.4 优控污染物清单的确定

将优控污染物清单 II 和优控污染物清单 I 进行合并汇总, 得到最终常州市 PCB 行业优控污染物清单, 共计 30 种物质(表 17), 与单纯采用综合评价法筛选结果对比后主要相差 4,4'-双(1-甲基亚乙基)[2,6-二溴]-苯酚、2-丁氧基乙醇、2-吡咯烷酮这 3 种物质。

关于 PCB 行业特征污染物和优控污染物清单相关研究较少。邵先涛^[35]在进行以电路板中的非金属物质为原料制备活性炭的研究中, 通过 ICP-AES 和 GC-MS 对电路板浸出液进行检测, 结果显示铜、甲苯、苯酚、三氯联苯超过对应的浓度限值。马英歌^[36]

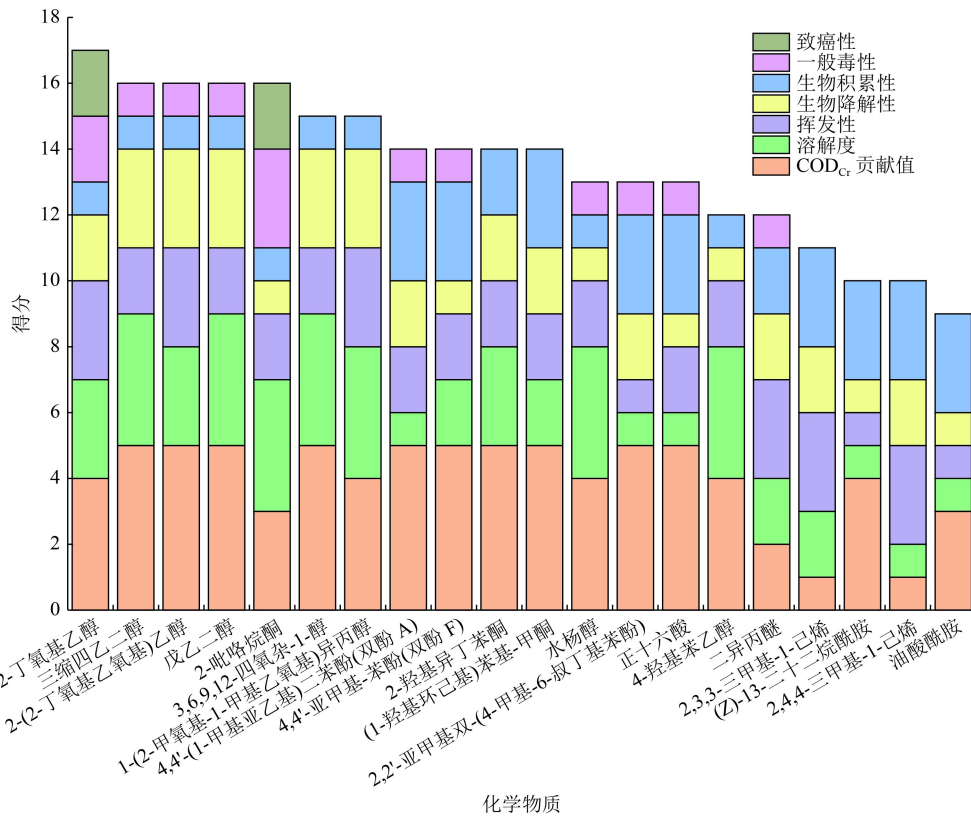


图 2 化学物质的综合评价得分

Fig.2 The scores of chemical substances under the comprehensive evaluation method

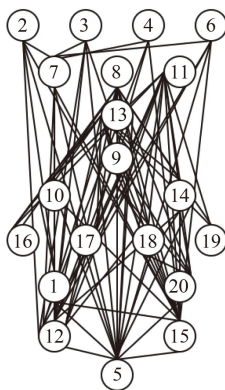


图 3 Hasse 图形

Fig.3 Hasse graph

表 12 中间层对决策层的判断矩阵

Table 12 Judgment matrix of middle layer to target layer

中间层	暴露性	持久性	毒性	权重(W_i)
暴露性	1	3	5	0.658 6
持久性	1/3	1	1	0.185 2
毒性	0.200	1	1	0.156 2

以上海某工业区 3 个印刷电路板厂为研究对象,对车间和排放口的 VOCs 含量水平、组成特征以及成分进行检测分析,GC-MS 结果显示,主要包含烷烃、烯烃、苯系物、酮类、氯代烷烃、氯代苯类、酯类等 7 大类有机物,苯、甲苯、乙苯、二甲苯、3-氯丙烯、

表 13 暴露性指标的判断矩阵

Table 13 Judgment matrix of exposure index

暴露性	COD _{Cr} 贡献值	水中溶解度	挥发度	权重(W_i)
COD _{Cr} 贡献值	1	3	3	0.593 6
水中溶解度	1/3	1	0.500	0.157 1
挥发度	1/3	2	1	0.249 3

表 14 持久性指标的判断矩阵

Table 14 Judgment matrix for persistence metrics

持久性	生物累积性	生物降解性	权重(W_i)
生物累积性	1	1/3	0.250
生物降解性	3	1	0.750

表 15 毒性指标的判断矩阵

Table 15 Judgment matrix of toxicity index

毒性	一般毒性	致癌性	权重(W_i)
一般毒性	1	0.500	0.333 3
致癌性	2	1	0.666 7

丙烯、1-丁烯、乙烷、丙烷、异丁烷正己烷、甲基环戊烷的检出率达到了 100%,氯甲烷、四氯化碳、戊烷、2-甲基戊烷、3-甲基戊烷、2,3-二甲基戊烷、3-甲基己烷检出率为 83.3%,邻-乙基甲苯、对-乙基甲苯、间-乙基甲苯、1,3-丁二烯、反-2 丁烯、顺-2-丁烯、1-己

表 16 各指标对于决策层的总权重

Table 16 The total weight of each index to the bill layer

层次元素	暴露性	持久性	毒性	各指标相对于目标层的总权重(W)
COD _{Cr} 贡献值	0.593 6			0.092 7
水中溶解度	0.157 1			0.024 5
挥发度	0.249 3			0.038 9
生物积累性		0.250 0		0.164 7
生物降解性		0.750 0		0.494 1
一般毒性			0.333 3	0.061 7
致癌性			0.666 7	0.123 4

烯、正庚烷、正辛烷、2-甲基己烷检出率为 66.7%，其中丙烷、乙酸乙酯、2-丁酮、2-甲基己烷、乙烷、丙酮、正己烷、丙烷、正庚烷、正丁烷是检出浓度最高的有机物质。陈洁英^[37]研究了线路板生产过程中的挥发性有机物的产生和毒性，发现有机物种类主要有甲醛、醇类(乙醇、异丙醇、丁醇、丙醇)、酮类(丁酮)、酯类(乙酸乙酯、乙酸丁酯)、甲苯、二甲苯等。本研究所得的 PCB 行业特征和优控污染物清单包含了以往研究得到的污染物种类，且污染物种类更为全面和精准，为行业的风险精细化管控提供了技术支持。

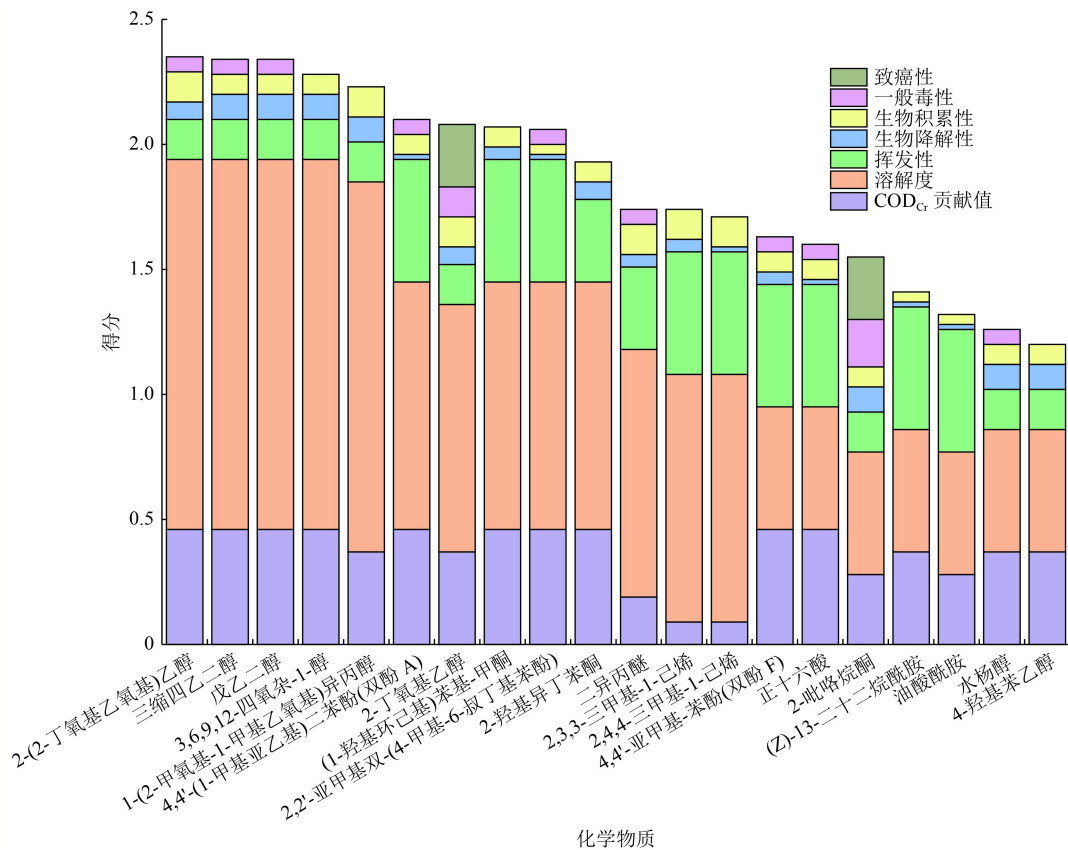


图 4 层次分析法最终得分

Fig.4 Analytic hierarchy process final score

表 17 常州市 PCB 行业优控污染物清单

Table 17 List of pollutants under optimal control in Changzhou PCB industry

类别	优控污染物
卤代烃(3种)	二溴甲烷、三氯溴甲烷、二氯溴甲烷
苯系物(9种)	甲苯、二甲苯、八溴二苯基氧化物、五溴乙基苯、苯酚、2,4,6-三溴苯酚、4,4'-双(1-甲基亚乙基)[2,6-二溴]-苯酚、9,9-二甲基-9-硅芬、4,4'-(1-甲基亚乙基)二苯酚(双酚A)
酯类(3种)	邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二(6-甲基庚基-2-基)酯、1,4-苯二羧酸双(2-乙基己基)酯
醛类(1种)	甲醛
醇类(5种)	三缩四乙二醇、2-(2-丁氧基乙氧基)乙醇、戊乙二醇、3,6,9,12-四氧杂-1-醇、1-(2-甲氧基-1-甲基乙氧基)异丙醇
酮类(2种)	2-羟基异丁苯酮、(1-羟基环己基)苯基-甲酮
金属离子(5种)	铜离子、铅离子、镍离子、锌离子、铬离子
盐类(1种)	氰化氢
其他(1种)	络合物[EDTA-Cu、Cu(NH ₃) ₄ ²⁺]

3 结论

(1) 基于清洁生产全过程的管控理念, 综合考虑原料、工艺过程、中间产物、产品、水处理设施废水检测及非正常工况等因素, 研究行业特征污染物清单调查和筛选技术。在特征污染物清单基础上, 基于矢量分析法与标量分析法综合分析的理念, 在综合评价法的基础上, 进一步优化筛选方法学, 最终采用综合评价法、Hasse图解法和层次分析法综合分析的技术路线, 形成一种更科学、更合理、更缜密的筛选方法, 最终得到行业优控污染物筛选技术。

(2) 选取常州市 PCB 行业为研究对象, 得到含有 172 种特征污染物的行业特征污染物清单, 主要包括苯系物、酯类、醇类、酮类等有机物种类; 通过进一步的筛选, 最终得到含有 30 种化学物质的 PCB 行业优控污染物清单, 包括卤代烃 3 种、苯系物 9 种、酯类 3 种、醛类 1 种、醇类 5 种、酮类 2 种、金属离子 5 种、盐类 1 种、其他 1 种。

参考文献

- [1] 裴淑玮, 周俊丽, 刘征涛. 环境优控污染物筛选研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2013, 3(4): 363-368.
PEI S W, ZHOU J L, LIU Z T. Research progress on screening of environment priority pollutants[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2013, 3(4): 363-368.
- [2] 王立阳, 李斌, 李佳熹, 等. 沈阳市典型城市河流优先控制污染物筛选及生态环境风险评估[J]. 环境科学研究, 2019, 32(1): 25-34.
WANG L Y, LI B, LI J X, et al. Priority pollutants and their ecological risk in typically urbanized river of Shenyang[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(1): 25-34.
- [3] 余璇, 吴劲, 宋柳霆, 等. 基于健康风险评价的土壤优先控制污染物筛选研究[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(4): 473-478.
YU X, WU J, SONG L T, et al. Priority control pollutants screening based on health risk assessment in soil[J]. Environmental Pollution & Control, 2018, 40(4): 473-478.
- [4] 任幸. 优先控制潜在高环境风险农药及助剂筛选[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- [5] 高辰龙, 陆纪腾, 刘燕婕. 荆江航道疏浚土优先控制污染物筛选研究[J]. 水运工程, 2016(7): 26-31.
GAO C L, LU J T, LIU Y J. Screening the precedence-controlled pollutants in dredged soil of the Jingjiang River waterway[J]. Port & Waterway Engineering, 2016(7): 26-31.
- [6] 刘臣辉, 徐青, 申雨桐, 等. 备用水源地农田面源优先控制污染物筛选研究[J]. 安全与环境工程, 2015, 22(6): 79-83.
LIU C H, XU Q, SHEN Y T, et al. Research on screening of precedence-controlled pollutants of backup water source with farmland non-point source pollution[J]. Safety and Environmental Engineering, 2015, 22(6): 79-83.
- [7] 穆景利, 王菊英, 张志锋. 我国近岸海域优先控制有机污染物的筛选[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(1): 114-117.
MU J L, WANG J Y, ZHANG Z F. Screening of priority-control organic pollutants in coastal water in China[J]. Marine Environmental Science, 2011, 30(1): 114-117.
- [8] 傅德黔, 孙宗光, 周文敏. 中国水中优先控制污染物黑名单筛选程序[J]. 中国环境监测, 1990, 6(5): 48-50.
- [9] HALFON E, REGGIANI M G. On ranking chemicals for environmental hazard[J]. Environmental Science & Technology, 1986, 20(11): 1173-1179.
- [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.
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.
- [11] KLEIN W, DENZER S, HERRCHEN M, et al. Revised proposal for a list of priority substances in the context of the water framework directive (COMMPS procedure) final report[R]. Schmallenberg: Fraunhofer-Ititut Umweltchemie und Okotoxicology (IUCT), 1999.
- [12] 王先良. 流域水环境特征污染物筛选理论与实践[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
- [13] 全燮, 孙英, 杨凤林, 等. 海域有机污染物优先排序和风险分类模糊评判系统[J]. 海洋环境科学, 1996, 15(1): 1-7.
QUAN X, SUN Y, YANG F L, et al. Fuzzy system for assessment of the prior order and the risk classification of the marine organic pollutants[J]. Marine Environmental Science, 1996, 15(1): 1-7.
- [14] 徐晓琳, 李红莉, 高虹, 等. 我国水生生态系统优先控制有机污染物的研究现状[J]. 环境科学研究, 2003, 16(2): 27-30.
XU X L, LI H L, GAO H, et al. Research status of priority-control organic pollutants in aquatic ecosystem in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2003, 16(2): 27-30.
- [15] 刘志彬. 松花江饮用水水源中优先检测有机污染物的GC/MS分析[J]. 科技信息, 2009(7): 37.
- [16] 王向明, 万方, 杨银锁, 等. 黄浦江上游优先控制有机物的筛选[J]. 环境监测管理与技术, 1996, 8(5): 13-15.
WANG X M, WAN F, YANG Y S, et al. The sifting of the prior control organic substance of the water resouces in the upper reaches of huangpu river[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 1996, 8(5): 13-15.
- [17] 刘铮, 曹婷, 王璠, 等. 行业全过程水特征污染物和优控污染物清单筛选技术研究及其在常州市纺织染整业的应用[J]. 环境科学研究, 2020, 33(11): 2540-2553.
LIU Z, CAO T, WANG F, et al. Screening technology of water characteristic pollutants and priority pollutants list from whole-process of industry and its application in textile dyeing and finishing industry of Changzhou City[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(11): 2540-2553.
- [18] US EPA. Toxic and priority pollutants[A]. Washington DC: Office of Health and Environmental Assessment, US EPA, 2014.
- [19] 周文敏, 傅德黔, 孙宗光. 中国水中优先控制污染物黑名单的确

- 定[J]. *环境科学研究*, 1991, 4(6): 9-12.
- ZHOU W M, FU D Q, SUN Z G. Determination of black list of China's priority pollutants in water[J]. *Research of Environmental Sciences*, 1991, 4(6): 9-12.
- [20] 方路乡, 胡望钧. 浙江省第一批环境优先污染物黑名单研究[J]. *环境污染与防治*, 1991, 13(3): 8-11.
- [21] 印楠. 福建省水环境优先污染物初探[J]. *福建环境*, 1997(4): 6-15.
- [22] 王媛. 江苏水体优先控制有毒有机污染物的筛选[C]//中国毒理学会环境与生态毒理学专业委员会第二届学术研讨会暨中国环境科学学会环境标准与基准专业委员会2011年学术研讨会会议论文集. 北京: 中国环境科学研究院, 2011: 78-81.
- [23] 刘仲秋, 史箴, 郭华, 等. 四川省优先污染物的研究(上)[J]. *环境保护*, 1992, 20(1): 39-40.
- [24] 郑庆子, 祝琳琳. 松花江吉林江段优先控制污染物筛选[J]. *环境科技*, 2012, 25(4): 68-70.
- ZHENG Q Z, ZHU L L. The selection of the priority control contaminants in Jilin section of the Songhua River[J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, 25(4): 68-70.
- [25] 任双梅, 杨良年, 甄继琪, 等. 甘肃省优先控制有毒化学品名单筛选研究[J]. *甘肃环境研究与监测*, 1996(1): 8-11.
- [26] KEITH L, TELLIARD W. ES&T special report: priority pollutants: I. a perspective view[J]. *Environmental Science & Technology*, 1979, 13(4): 416-423.
- [27] 刘存, 韩寒, 周雯, 等. 应用Hasse图解法筛选优先污染物[J]. *环境化学*, 2003, 22(5): 499-502.
- LIU C, HAN H, ZHOU W, et al. Applying hasse diagrams to select priority pollutants[J]. *Environmental Chemistry*, 2003, 22(5): 499-502.
- [28] HALFON E, GALASSI S, BRÜGGEMANN R, et al. Selection of priority properties to assess environmental hazard of pesticides[J]. *Chemosphere*, 1996, 33(8): 1543-1562.
- [29] 孙伟. 层次分析法应用研究[J]. *市场研究*, 2008(12): 35-39.
- [30] FU F L, WANG Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(3): 407-418.
- [31] AKBAL F, CAMCI S. Copper, chromium and nickel removal from metal plating wastewater by electrocoagulation[J]. *Desalination*, 2011, 269(1/2/3): 214-222.
- [32] 赵鹏, 刘杰民, 伊芹, 等. 异味污染评价与治理研究进展[J]. *环境化学*, 2011, 30(1): 310-325.
- ZHAO P, LIU J M, YI Q, et al. Advance on the study of odor assessment and treatment[J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(1): 310-325.
- [33] 孙威, 张莉, 吴小丽, 等. 电镀废水有机污染物去除技术初探[J]. *科技创新导报*, 2017, 14(35): 104-105.
- [34] 杨再勇, 谢海松. 在线路板生产过程中高浓度有机废水处理办法[J]. *环境*, 2006(9): 98-99.
- [35] 邵先涛. 电路板中非金属材料制备活性炭的可行性研究[D]. 上海: 东华大学, 2014.
- [36] 马英歌. 印刷电路板(PCB)厂挥发性有机物(VOCs)排放指示物筛选[J]. *环境科学*, 2012, 33(9): 2967-2972.
- MA Y G. Composition and characteristics of volatile organic chemicals emission from printed circuit board factories[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(9): 2967-2972.
- [37] 陈洁英. 线路板生产中挥发性有机物的污染与防治[J]. *环境与发展*, 2018, 30(8): 49.
- CHEN J Y. Pollution and prevention of volatile organic compounds in circuit board production[J]. *Environment and Development*, 2018, 30(8): 49. □