

挥发性有机污染物污染防治 技术评价方法

*Evaluation method of pollution control technology
of volatile organic pollutants*

大气污染防治技术评价系列

南开大学 主编

2021年6月

目 录

1 总则	1
1.1 适用范围	1
1.2 评价目的	1
1.3 评价原则	1
1.4 工作程序	1
2 术语和定义	2
2.1 生命周期评价 Life Cycle Assessment (LCA)	2
2.2 层次分析法 Analytic Hierarchy Process (AHP)	2
2.3 灰色层次分析法 Gray Analytic Hierarchy Process (GAHP)	3
3 VOCs 污染防治系统生命周期评价	3
3.1 系统边界	3
3.2 清单分析	4
3.3 影响评价	5
4 VOCs 污染防治系统环境绩效评价	7
4.1 环境正效益	7
4.2 环境负效应	8
4.3 环境绩效系数	8
5 VOCs 污染防治技术综合评价	8
5.1 评价指标与权重	8
5.2 评价指标矩阵的确定	9
5.3 综合关联度分析	10
6 评价结论	11

1 总则

1.1 适用范围

挥发性有机污染物(VOCs)污染防治技术评价方法适用于具有烟气 VOCs 污染防治需求的工业企业，通过评价，工业企业能够对 VOCs 污染防治设备系统中能耗高或耗材多或污染大的部分进行优化改进；此外，通过对比不同 VOCs 污染防治技术的评价结果，可为工业企业选用 VOCs 污染防治设备提供参考。

1.2 评价目的

为分析我国当前挥发性有机污染物(VOCs)污染防治技术存在的问题和短板，淘汰和改进落后的技术和产品，为新技术创新和开发应用提供方法手段，制定挥发性有机污染物(VOCs)污染防治技术评价方法。

1.3 评价原则

本方法实施过程中应符合以下原则：（1）科学性原则；（2）实用性原则；（3）先进性原则。

1.4 工作程序

（1）通过调查接受评估的 VOCs 污染防治系统，统计技术参数和各阶段耗材耗能情况，确定研究范围，在生命周期评价计算软件中建立模型，得出各阶段能源消耗清单、主要资源消耗清单、主要污染物排放清单，通过清单分析可找出耗能较大、消耗能源较大、污染物排放量较大的环节；此外，在模型计算结果中也可得到各环境影响指标，用于评价污染物排放对各类环境问题的影响。

（2）参考 VOCs 污染防治设备工艺参数，可得出 VOCs 污染防治系统对环境的正效益；参考生命周期评价主要污染物排放清单，可得出 VOCs 污染防治系统对环境的负效应；通过正负效应比值关系，得出环境绩效指数，用于比较两种 VOCs 污染防治系统对环境的影响。

(3) 对 VOCs 污染防治技术建立了关于经济、技术、环境、资源等各方面综合性评价方法，采用层次分析法建立了三个层次的指标体系，调查所得各类指标取值情况，按照评分体系计算得出综合评分，从而对 VOCs 污染防治系统实现综合评价。

(4) 从生命周期评价、环境绩效评价、综合评价三个维度对 VOCs 污染防治系统评估，实现对 VOCs 污染防治技术各阶段、环境绩效、综合绩效的考量，形成挥发性有机污染物(VOCs)污染防治技术评价结论。

挥发性有机污染物(VOCs)污染防治技术评价技术流程见下图：

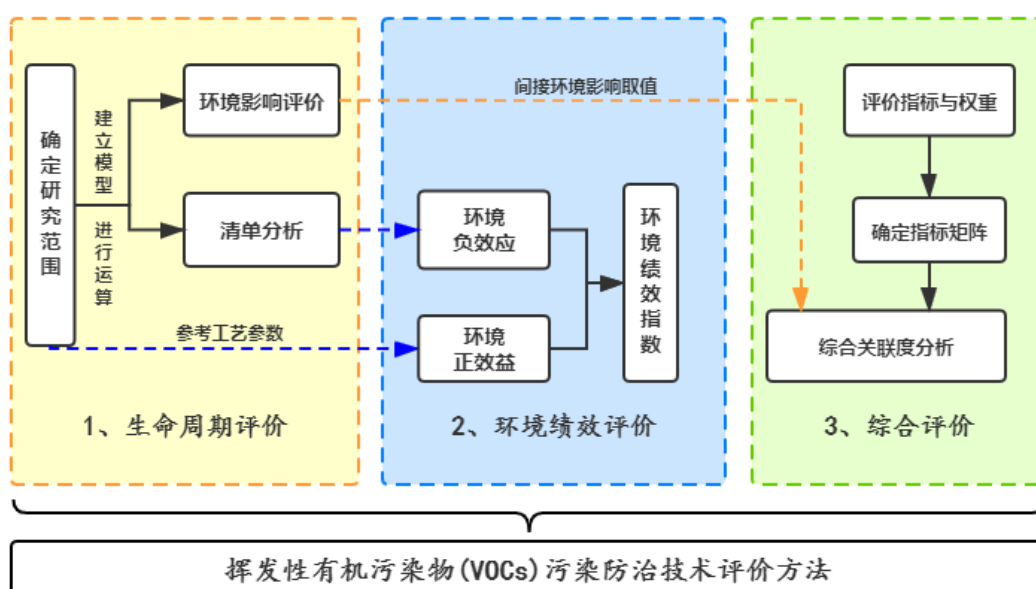


图 1.1 挥发性有机污染物(VOCs)污染防治技术评价技术流程图

2 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

2.1 生命周期评价 Life Cycle Assessment (LCA)

量化分析和评估各种产品及技术在生命周期全过程（即生产消费全过程）的资源环境效率及潜在影响，从而为全过程协同改进和持续改进（即生命周期管理 LCM）提供分析方法、数据和决策支持。

2.2 层次分析法 Analytic Hierarchy Process (AHP)

根据问题的性质和要达到的总目标，将问题分解为不同的组成因素，并按照因素间的相互关联影响以及隶属关系将因素按不同层次聚集组合，形成一个多层次的分析结构模型，从而最终使问题归结为最低层(供决策的方案、措施等)相对于最高层(总目标)的相对重要权值的确定或相对优劣次序的排定。

2.3 灰色层次分析法 Gray Analytic Hierarchy Process (GAHP)

灰色层次分析方法是一种结合了灰色关联分析理论和层次分析理论的综合评价方法。基本思路是将灰色系统理论中的关联分析法用于多层次的综合评价中，即通过层次分析法确定各层次各指标的权系数，考虑到各因素的重要性不同，把按乘法法则并合得的各指标权系数加入关联度的计算，即由各元素下的关联系数取平均值而改为取加权平均值，从而较好的克服关联分析法对个评价元素主次不分的不足，同时也克服了层次分析法过分的依赖于评价因素权重的不足，加强了对评价因素的定量分析。

3 VOCs 污染防治系统生命周期评价

3.1 系统边界

在生命周期评价中，研究范围的确定即界定产品系统边界。规定 VOCs 污染防治过程系统边界如下：

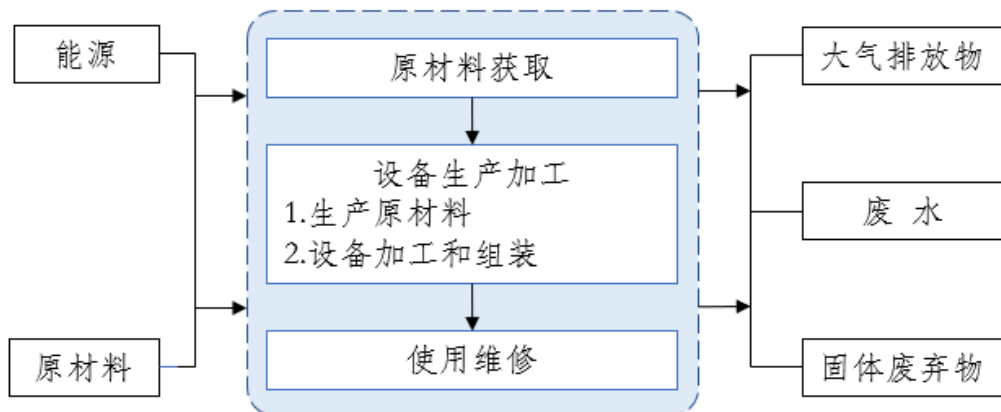


图 3.1 VOCs 污染防治技术系统边界

此外，需统计 VOCs 污染防治系统相关工艺参数，并列入下表：

表 3-1 VOCs 污染防治系统工艺参数统计表

工艺参数	单位	数值
额定烟气处理量	Nm ³ /h	
入口 VOCs 浓度	mg/Nm ³	
出口 VOCs 浓度	mg/Nm ³	
VOCs 去除效率	%	
年运行时间	h	
设备寿命	年	

选择功能单位为 VOCs 污染防治系统运行一年或寿命年数。

3.2 清单分析

统计 VOCs 污染防治系统原材料获取、设备生产加工、使用维修阶段消耗的能源和原材料以及排放的污染物，对上述三个阶段分别列表：

表 3-2 VOCs 污染防治系统清单分析表

序号	原材料	消耗量/kg	年消耗量/kg
1			
2			
...			
序号	能源	消耗量/kwh	年消耗量
1			
2			
...			
序号	污染物	排放量	年排放量
1			
2			
...			

根据以上调查结果，在 LCA 应用软件（如 GaBi、WebLCA）中对三个阶段分别建立计算模型，输出各阶段耗能清单、主要资源消耗清单和主要污染物排放清单：

表 3-3 VOCs 污染防治系统耗能清单

	原材料获取能耗	设备生产加工能耗	使用维修能耗
能耗/MJ			
总计/MJ			

表 3-4 VOCs 污染防治系统主要资源消耗清单

序号	物质名称	原材料获取阶段消耗量/kg	设备生产加工阶段消耗量/kg	使用维修阶段消耗量/kg
1				
2				
...				

表 3-5 VOCs 污染防治系统主要污染物排放清单

类别	序号	物质名称	原材料获取阶段排放量/kg	设备生产加工阶段排放量/kg	使用维修阶段排放量/kg
向大气中排放的物质	1				
	2				
	...				
向水中排放的物质	1				
	...				
向土壤中排放的物质	1				
	...				

3.3 影响评价

清单分析的过程侧重于定量呈现评价对象在评价范围内的输入和输出，而影响评价是对清单结果的整理和分析，通过量化和分类环境影响负荷，系统地呈现影响情况。主要步骤有影响分类，特征化，归一化和加权评估。

影响分类的依据是按照 CML-2001 评价法中的环境影响指标，将系统各阶段的环境排放归为以下几类，包括：

不可再生资源消耗（Abiotic Depletion，简称 ADP）

全球变暖（Global Warming Potential，简称 GWP）

酸化效应（Acidification Potential，简称 AP）

水体富营养化（Eutrophication Potential，简称 EP）

新鲜水水生生态毒性（Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential，简称 FAETP）

人体健康损害（Human Toxicity Potential，简称 HTP）

海洋生态毒性（Marine Aquatic Ecotoxicity Potential，简称 MAETP）

臭氧层破坏（Ozone Layer Depletion Potential，简称 ODP）

光化学烟雾形成（Photochemical Ozone Creation Potential，简称 POCP）

陆地生态毒性（Terrestrial Ecotoxicity Potential，简称 TETP）

环境影响中的各种因素采用一种影响特征因素进行衡量和表达的步骤称为特征化。在 LCA 应用软件中打开平衡表，可获得 VOCs 污染防治系统各阶段环境潜值表。各类环境影响潜值除以选定基准值计算得出归一化结果，可采用的基准值有特定范围内人均排放总量或资源消耗总量、特定范围内排放总量和资源消耗量等。本文表格中按照 Gabi 软件提供的 2000 年全球人均排放总量为基准值计算。加权评估是通过对环境影响类型赋予不同的权重从而让不同环境影响类型可以相互比较大小。本文表格中所示权重是由 Gabi 软件根据前面所选择的基准值提供的。

表 3-6 VOCs 污染防治系统环境影响潜值表

环境影响指标	单位	生产阶段	运行阶段	环境影响潜值
ADP（elements）	kg Sb-Equiv.			
ADP（fossil）	MJ			
AP	kg SO ₂ -Equiv.			
EP	kg Phosphate-Equiv.			
FAETP	kg DCB-Equiv.			
GWP	kg CO ₂ -Equiv.			
HTP	kg DCB-Equiv.			
MAETP	kg DCB-Equiv.			
ODP	kg R11-Equiv.			
POCP	kg Ethene-Equiv.			
TETP	kg DCB-Equiv.			

表 3-7 环境影响潜值归一化及加权过程

环境影响指标	单位	环境影响潜值	标准化基准	标准化结果	权重因子	加权结果
ADP (elements)	kg Sb-Equiv.		3.61×10^8			
ADP (fossil)	MJ		3.8×10^{14}			
AP	kg SO ₂ -Equiv.		2.39×10^{11}			
EP	kg Phosphate-Equiv.		1.58×10^{11}			
FAETP	kg DCB-Equiv.		2.36×10^{12}			
GWP	kg CO ₂ -Equiv.		4.22×10^{13}			
HTP	kg DCB-Equiv.		2.58×10^{12}			
MAETP	kg DCB-Equiv.		1.95×10^{14}			
ODP	kg R11-Equiv.		2.27×10^8			
POCP	kg Ethene-Equiv.		3.68×10^{10}			
TETP	kg DCB-Equiv.		1.09×10^{12}			

对加权后的环境影响指标进行排序，得出对环境影响最大的指标。

4 VOCs 污染防治系统环境绩效评价

4.1 环境正效益

对于 VOCs 污染防治系统而言，尽管其有减少 NO_x、SO₂、PM_{2.5} 等多种污染物排放的环保功能，但其主要功能为减少挥发性有机污染物排放，因此以 VOCs 为标准环境因子进行评估。VOCs 污染防治系统对环境产生的正向影响，称作环境正效益，应按式（1）计算。

$$EI^+ = (c_1 - c_2) \times Q \times t \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中：

EI⁺ —VOCs 污染防治系统每年产生环境正效益（kg）；

c₁ —VOCs 污染防治系统入口氮氧化物浓度（mg/Nm³）；

c₂ —VOCs 污染防治系统出口氮氧化物浓度（mg/Nm³）；

Q —烟气处理量（Nm³/h）；

t —VOCs 污染防治系统年运行时间（h）。

4.2 环境负效应

VOCs 污染防治系统在生产和运行过程中投入大量的资源、能源，排放大量污染物，对于环境产生不可忽视的负面影响。根据 3.2 生命周期评价清单分析，可得到 VOCs 污染防治系统各阶段 VOCs 总量即为环境负效应 EI⁻。

4.3 环境绩效系数

VOCs 污染防治系统对环境产生的正效益超过负效应的倍数大小，可用于度量 VOCs 污染防治系统的环境影响，从而评价系统减排效果。建立评价环境绩效的主要参数——环境绩效系数 R，即 VOCs 污染防治系统的环境正影响与环境负影响的比值，按式（2）计算。

$$R = \frac{EI^+}{EI^-} \quad (2)$$

式中：

EI⁺——VOCs 污染防治系统在运行周期内因减排 VOCs 造成的环境正效益 (kg VOCs)；

EI⁻——VOCs 污染防治系统在运行周期内因投入资源、能源造成的环境负效应 (kg VOCs)。

环境绩效系数 R 属于正向指标，其值越大说明 VOCs 污染防治系统的环境绩效越高，量纲为 1，研究认为较好的 VOCs 污染防治系统应具有更大的 VOCs 减排量，而因其资源、能源投入造成的环境负影响应尽可能小。

5 VOCs 污染防治技术综合评价

5.1 评价指标与权重

指标体系按层次分析法分为三级，间接环境影响权重由 5.3 节得出，其他指标权重采用层次分析法中九层标度原则结合 Delphi 专家调查法计算得出，见表 5-1。

表 5-1 VOCs 污染防治技术综合评价指标与权重

一级指标	二级指标	三级指标	权重
经济指标	投资成本	生产投资成本↓	0.0303
		人力及管理成本↓	0.0151
	运行维护成本	生产运行维修成本↓	0.0303
		人力投资成本↓	0.0151
技术指标	技术性能	运行稳定性↑	0.0909
		升级连续性↑	0.0455
		去除率↓	0.0455
		催化剂成分↓	0.0455
		排气压力损失↓	0.1200
	适用范围	适用工况范围↓	0.1984
环境指标	直接环境影响	氮氧化物排放量↓	0.0227
		一氧化碳排放量↓	0.0454
		颗粒物排放量↓	0.0682
	间接环境影响	酸化效应↓	0.0113
		水体富营养化↓	0.0104
		新鲜水生态毒性↓	0.0255
		全球变暖↓	0.0174
		人体健康损害↓	0.0197
		海洋生态毒性↓	0.0201
		臭氧层破坏↓	0.0111
		光化学氧化剂生成↓	0.0106
		陆地生态毒性↓	0.0101
资源指标	物质资源	水资源消耗量↓	0.0227
		矿产资源消耗潜值↓	0.0227
	能源资源	化石燃料消耗潜值↓	0.0455

注：表中“↑”代表正向指标，即指标值越高越好；“↓”代表负向指标，指标值越低越好。

5.2 评价指标矩阵的确定

一级指标中，经济指标、技术指标和直接环境影响指标视为定性指标，采用图 5.1 所示标准进行赋值。

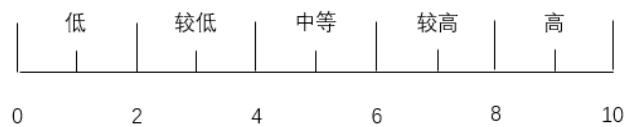


图 5.1 定性指标赋值表

间接环境影响指标和资源指标为定量指标，其数值由生命周期评价软件计

算得到。

由此列出所选各种 VOCs 污染防治系统的各类指标值外，应当列出理想方案的各项指标值，即选择最优指标组成参考数列，作为各评价对象的参考基准以便进行灰色关联分析。列表如下：

表 5-2 VOCs 污染防治系统与理想方案评价指标值

评价指标	A 设备	B 设备	...	理想方案
生产投资成本				
人力及管理成本				
生产运行维修成本				
人力投资成本				
运行稳定性				
升级连续性				
去除率				
催化剂成分				
排气压力损失				
适用工况范围				
氮氧化物排放量				
一氧化碳排放量				
颗粒物排放量				
酸化效应				
水体富营养化				
新鲜水生态毒性				
全球变暖				
人体健康损害				
海洋生态毒性				
臭氧层破坏				
光化学氧化剂生成				
陆地生态毒性				
化石燃料消耗潜值				
水资源消耗量				
矿产资源消耗潜值				

5.3 综合关联度分析

灰色关联分析方法在层次分析方法构建评价指标体系和确定权重的基础上，需要完成以下评价步骤：

第一步，确定比较数列和参考数列。理想方案作为各评价对象（VOCs 污染防治系统）的参考基准，记为：

$$\{x_0(k)\}, k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中： k 代表评价指标。

比较数列由各评价对象的指标值分别列出：

$$\{x_i(k)\}, i = 1, 2, \dots, m, k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中： i 代表某种评价对象。

第二步，数据规范化处理。既要定性数据定量化，也要将比较数列和参考数列的量纲去除，获得公式 5 中的数列：

$$\{x'_i(k)\}, i = 1, 2, \dots, m, k = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

第三步，计算关联系数。将某种评价对象去量纲化的评价指标序列，与去量纲化的参考数列进行比较，计算指标 k 的灰色关联系数，计算方程式如下：

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x'_0(k) - x'_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x'_0(k) - x'_i(k)|}{|x'_0(k) - x'_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x'_0(k) - x'_i(k)|} \quad (6)$$

式中： ρ 为分辨系数，一般取 0.5； $i=1, 2, \dots, m$ ； $k=1, 2, \dots, n$

由各关联系数组成评价矩阵 E ：

$$E = \begin{bmatrix} \varepsilon_1(1) & \varepsilon_2(1) & \dots & \varepsilon_m(1) \\ \varepsilon_1(2) & \varepsilon_2(2) & \dots & \varepsilon_m(2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varepsilon_1(n) & \varepsilon_2(n) & \dots & \varepsilon_m(n) \end{bmatrix} \quad (7)$$

第四步，计算方案综合关联度。根据 5.1 节中层次分析权重系数向量 W 和关联系数矩阵 E ，即可计算得到灰色综合评价结果向量 R ：

$$R = W \cdot E = (r_1 r_2 \dots r_m) \quad (8)$$

式中：

$$r_i = \sum_{k=1}^n w_k \cdot \varepsilon_i(k), i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

计算得到 r_i 越大，说明第 i 种评价对象（VOCs 污染防治系统更接近于最优值，是相对较好的方案。

6 评价结论

评价结论是对评价工作成果的归纳和总结，应明确、简洁、清晰。

在挥发性有机污染物(VOCs)污染防治评价结论中应重点明确以下内容：

(1) VOCs 污染防治系统在原材料获取、设备生产加工、使用维修阶段的能耗清单、主要资源消耗清单、主要污染物排放清单、各类环境影响潜值，分析能源消耗、资源消耗、污染物排放的主要过程和环境影响潜值较大的指标，以明确 VOCs 污染防治技术改进方向。

(2) 两种以上 VOCs 污染防治技术的环境绩效系数进行比较，明确各种 VOCs 污染防治技术环境影响相对大小。

(3) 两种以上 VOCs 污染防治技术的综合进行比较，明确各种 VOCs 污染防治技术经济、技术、环境、资源四个方面的综合性能相对强弱。

(4) 结合以上三个维度的分析，对 VOCs 污染防治技术提出改进方案，为新技术研发与利用提供新思路。