



移动扫码阅读

成卓韦,牛传真,陈东之,等.融合层次分析的多目标优化决策在工业园区大气污染物总量减排中的应用[J].能源环境保护,2022,36(5):77-87.

CHENG Zhuowei, NIU Chuazhen, CHEN Dongzhi, et al. Application of multi-objective optimization decision based on analytic hierarchy process in total emission reduction of air pollutants for an industrial park[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(5):77-87.

融合层次分析的多目标优化决策在工业园区大气污染物总量减排中的应用

成卓韦¹,牛传真¹,陈东之²,陈建孟^{1,2,*}

(1.浙江工业大学环境学院,浙江杭州310014;2.浙江海洋大学石油化工与环境学院,浙江舟山316022)

摘要:通过文献检索和现场调研,计算了工业园区主要大气污染物减排潜力,制定了大气污染控制初选减排情景,运用层次分析与熵权相结合的方法对减排情景进行评价,构建了大气污染全过程控制多目标决策优化实施路线,获得了最优减排情景。预测结果表明:VOCs、NO_x、SO₂、NH₃和颗粒物的减排量分别为2 610.2、255.1、96.6、8.1、337.6 t,相应的固定成本和节约的运行成本分别为4 220万元、419.93万元/a。本文为该工业园区大气污染物综合管控提供了可行的措施,融合层次分析的多目标优化决策法可为中小尺度区域工业园区大气污染管控提供技术支持。

关键词:减排潜力;层次分析;减排情景;大气污染物;多目标优化

中图分类号:X321;F205

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2022)05-0077-11

Application of multi-objective optimization decision based on analytic hierarchy process in total emission reduction of air pollutants for an industrial park

CHENG Zhuowei¹, NIU Chuazhen¹, CHEN Dongzhi², CHEN Jianmeng^{1,2,*}

(1. College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. School of Petrochemical Engineering & Environment, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: Through literature review and field investigation of an industrial park, the emission reduction potential of main air pollutants was calculated and the primary emission reduction scenario of air pollution control was formulated. The emission reduction scenarios were evaluated via the combined method of analytic hierarchy process and entropy weight. The optimal implementation route of multi-objective decision-making in the whole process of air pollution control was constructed, and the optimal emission reduction scenario was obtained. The prediction results showed that the emission reduction of VOCs, NO_x, SO₂, NH₃ and particulate matter were 2 610.2, 255.1, 96.6, 8.1 and 337.6 t, respectively. The corresponding fixed cost and saved operating cost were 42.2 million yuan per year and 4.199 3 million yuan per year respectively. The feasible measures for the comprehensive control of air pollutants in the industrial park were provided. The multi-objective optimization decision-making method integrating analytic hierarchy process proposed in this study could provide technical support for air pollution management for small or medium-sized industrial parks.

Key Words: Emission reduction potential; Analytic hierarchy process; Emission reduction scenarios; Air pollutants; Multi-objective optimization

收稿日期:2022-05-17;责任编辑:金丽丽

基金项目:国家重点研发计划项目(No.:2018YFC0214100)

第一作者简介:成卓韦(1982—),男,博士,浙江杭州人,教授,博士生导师,研究方向为大气污染控制。E-mail: zhweng@zjut.edu.cn

通讯作者简介:陈建孟(1966—),男,博士,浙江慈溪人,教授,博士生导师,研究方向为大气污染控制。E-mail: jchen@zjut.edu.cn

0 引言

工业园区是全球经济发展的一个普遍现象,已成为支撑工业发展的关键载体和重要动力,也是实施工业集约集聚发展的重要战略,在中国工业化进程、发展开放型经济、带动城镇化发展中发挥了重要作用^[1-2]。2018年全国生态环境保护大会指出“要推动工业企业向园区聚集”。目前我国经济发展的重点仍在工业,而园区绿色发展在工业高质量发展的进程中起着举足轻重的作用。

工业园区是在相对较小的地理空间内聚集了大量工业企业,资源能源消耗量大,污染物排放集中且排放量大,园区资源环境压力突出。数量庞大的园区在发展过程中面临着资源和能源消耗高、生态环境风险高等复合型挑战。最近二十年,中国政府大力推动工业园区的绿色发展,陆续开展了生态工业园区、循环化改造园区、低碳工业园区和绿色园区等实践探索^[3-5]。推进绿色、低碳、循环发展,实现产业生态化,提高经济发展的质量和效益,是工业园区发展历久弥新的问题。工业园区的绿色低碳循环发展,是国民经济和社会绿色发展、实现生态文明的重大战略需求。

大气污染是当前工业园区绿色发展的重要挑战之一^[6]。大气污染排放具有浓度高、种类多等特点,精准治理难度大。针对工业园区大气污染问题,学者已开展了一系列研究,多从政策建议、智慧环保系统、环境预警等方面提出措施和建议^[7-10],但从整体角度出发制定大气污染全过程控制减排情景的研究相对较少。

如何科学地制定工业园区大气污染防治情景,满足最小(或较小)的经济损失和最大(或较大)的环境效益双重目标,是当前工业园区大气污染管理决策面临的一个重要问题,对于落实“精准治污、科学治污、依法治污”具有重要意义。多目标控制决策优化是解决这一问题的有效手段,它可以快速、准确地得到不同排放情景下的污染物浓度变化情况^[11],但该方法较为复杂,往往为了量化因素之间的关系而简化实际条件,影响了情景的合理性。为此,本研究提出了一种融合层次分析的多目标优化方法,并以某化工园区大气污染物总量控制为例,基于大气污染物减排潜力分析,提出了大气污染全过程多目标控制决策优化技术路线并获得最优减排情景,为该化工园区及类似的工业园区大气污染物综合管控提供理论

和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 技术减排潜力分析

工业园区大气污染物排放量较大的污染物主要包括 VOCs、NO_x、颗粒物、SO₂和 NH₃。

VOCs 最佳可行性减排技术主要包括清洁生产、资源回收和末端治理技术,其中清洁生产是通过源头控制 VOCs 的产生量来实现 VOCs 的减排,资源回收和末端治理则是生产过程或者尾气处理实现 VOCs 的减排。减排潜力是指最佳可行技术实施后的减排潜力,即技术改造和末端治理均达到最佳可行性技术水平的减排潜力。某企业减排潜力计算公式如式(1)所示:

$$J = V - [(1 - \beta) \times (V_1 - \gamma a \times X - \mu b \times X)] \quad (1)$$

$$V_1 = V / (1 - \alpha) \quad (2)$$

式(1)和(2)中: J 为某企业 VOCs 的减排潜力总量,t; V 为企业 VOCs 排放量,t; V_1 为企业 VOCs 产生量,t; β 为最佳控制技术 VOCs 的去除率,设为 99%; α 为企业 VOCs 现去除率; $\gamma = 1$ 或 0,涉及采用清洁生产原料(如溶剂替代)的企业为 1,不涉及的企业为 0; $\mu = 1$ 或 0,涉及采用清洁生产工艺(如液体染料工艺改进)的企业为 1,不涉及的企业为 0; a 为采用清洁生产原料后单位产品产生 VOCs 的减少量,设定为 0.01 t/t; b 为采用清洁生产工艺后单位产品产生 VOCs 的减少量,设定为 0.012 5 t/t。

除 VOCs 外,其他大气污染物(NO_x、颗粒物、SO₂和 NH₃)减排技术不涉及清洁生产,只考虑资源回收和末端处理技术改进所带来的减排潜力。其减排潜力计算如公式(3)所示。

$$J_n = V_n - (1 - \beta_n) \times V_n / (1 - \alpha_n) \quad (3)$$

式(3)中: J_n 表示企业第 n 种污染物的减排潜力,t,其中 $n = 1, 2, 3, 4$,分别表示 NO_x、颗粒物、SO₂和 NH₃; V_n 表示企业第 n 种污染物的现排放量,t; β_n 表示第 n 种污染物的最佳可行技术的去除率,%; α_n 表示企业第 n 种污染物的现去除率。

1.2 减排情景制定

工业园区常以 VOCs 作为特征污染物,已成为影响园区大气环境质量的主要污染物。因此,本研究在制定大气污染物减排情景时以 VOCs 减排为主,总量控制只考虑 VOCs 的减排总量目标。《浙江省挥发性有机污染物整治情景》(2013—2020年),提出“有机化工、医药化工、橡胶和塑料

制品、溶剂型涂料表面涂装、包装印刷业的 VOCs 总净化率不低于 90%，其他行业总净化率原则上不低于 75%”，该工业园区中企业多为医药、农药、化工等行业，故设定的 VOCs 总净化率目标为不低于 90%；《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》中提出 VOCs 排放总量下降 10% 以上。因此，设定的总量减排目标为在 VOCs 总净化率 90% 的基础上，排放总量比现状再下降 10%。

减排情景的制定主要从大气污染物减排量大和减排成本低等两方面考虑。

(1) 减排量大原则

结合园区现有处理技术调研情况，VOCs 的最佳减排措施是催化燃烧法，去除率为 99%；NO_x 和 SO₂ 的最佳减排措施是协同净化法，去除率分别为 70% 和 95%；细颗粒物的最佳减排措施是袋式除尘，去除率为 99%；NH₃ 的最佳减排措施是生物强化净化技术，去除率为 95%。因此，在设定减排情景时优先考虑大气污染物排放量较大的企业或原有净化设施去除率较低的企业选择上述减排工艺。

(2) 减排成本低原则

结合园区现有企业生产工艺调研情况，采用清洁生产工艺和原料后在减少 VOCs 产生的同时，也相应减少了运行成本。故在设定减排情景

时优先考虑类似企业采用清洁生产工艺和清洁生产原料。

(3) 减排潜力大的企业优先考虑原则

从大气污染物减排情景的效益来看，投入最佳减排技术的企业数相同时，减排潜力总量越大的情景减排量越大。因此，在设定减排情景时遵从减排潜力的企业优先考虑。

(4) 减排率低的企业优先考虑原则

通过对园区大气污染治理现状的分析可知，企业之间的大气污染物减排率差距较大。如 VOCs 的减排率最高为 98%，最低仅为 50%。因此，在设定减排情景时优先考虑大气污染物减排率低的企业。

1.3 层次分析法

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是由美国匹兹堡大学教授 T. L. Saaty 在 20 世纪 70 年代中期提出的^[12]，基本原理是将一个复杂的主题问题分解成若干个构成要素，并按支配关系将这些要素形成递阶层次结构，进而分解为多指标的若干层次，通过定性指标模糊量化方法算出层次单排序和总排序，以作为目标、多方案优化决策的系统方法^[13]。依据 AHP 法，选取具有代表性且易量化的评价指标，构建了工业园区减排情景(以 VOCs 总量控制为目标)的综合评价指标体系，具体如表 1 所示。

表 1 某工业园区大气污染物减排情景评价指标体系

Table 1 Evaluation indicators of the air pollutants emission reduction scenario for the industrial park

目标	准则层	指标	
大气污染物减排情景 (以 VOCs 总量 控制为目标)	总量控制	VOCs 减排量	
		NO _x 减排量	
		SO ₂ 减排量	
		NH ₃ 减排量	
		颗粒物减排量	
	社会效益	固定成本	
		运行费用	
		VOCs 处理能力	
			催化燃烧法企业数
			尾气循环利用企业数
		VOCs 回收利用企业数	

(1) 评价指标的计算

VOCs 削减量:企业 VOCs 削减量计算与减排潜力综合评价公式(1)相同,情景 VOCs 削减量为企业之和。

其它大气污染物削减量:企业其它大气污染物削减量计算与减排潜力综合评价公式(3)相同,

情景其它大气污染物削减量为企业之和。

固定成本:包括技术更新的设备成本与人工成本。

运行费用:工艺更新后的运行费用减去原运行费用,再减去因资源回收带来的回收效益。

(2) 评价标准

评价指标一般可分为以下四种类型:极大型、极小型、定指标型和区间型。对于极大型指标,计算所得数值越大优势越明显,与目标成正相关;对于极小型指标,计算所得数值越小优势越明显,与目标成负相关;对于定指标型,计算所得数值则越接近某个固定值越好;区间型指标则是计算所得数值以落在某个固定区间为最佳。

结合工业园区大气污染减排情景评价指标的特点,按四种指标类型归类如下:

极大型指标:VOCs 减排量、NO_x 减排量、SO₂ 减排量、NH₃ 减排量、颗粒物减排量、催化燃烧法企业数、染料喷塔尾气循环企业数、VOCs 回收应用企业数、清洁生产原料采用企业数及清洁生产

工艺采用企业数。

极小型指标:固定成本、运行成本。

(3) 构建判断矩阵

判断矩阵的构造方法是将同一目标、同一准则下的因素进行两两比较,并按照 Thomas Lsatty 标度法的 1—9 比例标度对其重要程度赋值^[14],如表 2。将两两比较的结果,记作 a_{ij} ,表示第 i 行因素 A_i 比第 j 列 A_j 的相对重要程度。

判断矩阵构建的合理性,是层次分析法的关键一步,为了综合不同类型专家的意见,在确定权重方面进行了广泛的专家咨询。在此基础上,构建判断矩阵。

表 2 Thom as L.satty 标度法评分规则

Table 2 Thomas L.Satty scale scoring rules

序号	重要性等级	a_{ij} 赋值
1	A_i 和 A_j 同等重要	1
2	A_i 比 A_j 稍重要	3
3	A_i 比 A_j 明显重要	5
4	A_i 比 A_j 强烈重要	7
5	A_i 比 A_j 极端重要	9
6	A_i 比 A_j 稍不重要	1/3
7	A_i 比 A_j 明显不重要	1/5
8	A_i 比 A_j 强烈不重要	1/7
9	A_i 比 A_j 极端不重要	1/9
10	表示上述相邻判断的中间值	2,4,6,8,1/2,1/4,1/6,1/8

其中 a_{ij} 就是元素 a_i 和 a_j 相对于准则层的重要性的比例标度。判断矩阵 A 具有下列性质: $a_{ij} > 0$, $a_{ji} = 1/a_{ij}$, $a_{ii} = 1$ 。

(4) 确定权重

由判断矩阵计算被比较元素对于该准则的相对权重。判断矩阵 A 对应于最大特征值 λ_{\max} 的特征向量 W ,经归一化后即为一层次相应因素对于上一层次某因素相对重要性的排序权值,这一过程称为层次单排序^[15],公式 4。

$$AW = \lambda_{\max} W \quad (4)$$

式(4)中, λ_{\max} 是 A 的最大特征根, W 是相应的特征向量,所得到的 W 经归一化后就可作为权重向量。

(5) 判断矩阵的一致性检验

对判断矩阵进行一致性检验,其一般步骤如下^[16]:

① 求出判断矩阵的最大特征值 λ_{\max} ;

② 计算一致性指标 $CI(5)$;

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (5)$$

③ 计算平均随机一致性指标 RI ,其是多次(500 次以上)重复进行随机判断矩阵特征值的计算后取算术平均值得到的。

④ 计算一致性比例 $CR(6)$

$$CR = CI / RI \quad (6)$$

当 $CR < 0.1$ 时,一般认为判断矩阵是一致性的,是可以接受的。否则就应当重新调整判断矩阵,直至具有满意的一致性为止。

2 结果与讨论

2.1 技术减排潜力分析

计算了园区企业大气污染物减排潜力如表 3 和表 4 所示(表内公司序号一致),其中 VOCs 减排潜力共 2 802.9 t,减排潜力前十的企业 VOCs 减排共 2 402.4 t,占园区 VOCs 总减排潜力的 85.10%。减排潜力在 500 t 以上的企业有两家,在 100~500 t 之间的企业有 6 家,减排潜力共 1 158.5 t,

减排潜力在 1~100 t 之间的企业有 35 家,减排潜力共 567.1 t;减排潜力在 1 t 以下的企业有 42 家,减排潜力共 11.0 t。从行业来看,园区大气污染物

VOCs 减排潜力从高到低排序,依次为:医药制造业、染料制造业、农药制造业、化学品制造业、纺织品制造业、材料制造业和能源制造业。

表 3 某园区企业 VOCs 减排潜力(前 20 家)

Table 3 VOCs emission reduction potential of the enterprises (Top 20)

企业序号	行业	原 VOCs 产生量/t	原排放量/t	VOCs 减排潜力/t
公司 1	染料制造	2 994.0	598.8	568.9
公司 2	染料制造	5 749.0	574.9	517.4
公司 3	医药制造	4 449.7	445.0	400.5
公司 4	医药制造	1 124.6	224.9	213.7
公司 5	染料制造	961.7	192.3	182.7
公司 6	染料制造	797.7	159.5	151.6
公司 7	染料制造	1 208.8	120.9	108.8
公司 8	医药制造	1 125.3	112.5	101.3
公司 9	医药制造	1 029.3	102.9	92.8
公司 10	化学品制造	341.4	68.3	64.9
公司 11	染料制造	336.3	33.6	30.3
公司 12	染料制造	324.6	32.5	29.2
公司 13	医药制造	147.0	29.4	27.9
公司 14	医药制造	2 760.2	55.2	27.6
公司 15	纺织品制造	300.0	30.0	27.0
公司 16	染料制造	292.4	29.2	26.3
公司 17	医药制造	109.8	22.0	20.9
公司 18	材料制造	107.9	21.6	20.5
公司 19	医药制造	209.9	21.0	18.9
公司 20	染料制造	94.1	18.8	17.9

表 4 某园区企业其它大气污染物减排潜力

Table 4 Other air pollutants emission reduction potential of the enterprises

企业名称	行业	NO _x		SO ₂		NH ₃		颗粒物	
		排放量/t	减排潜力/t	排放量/t	减排潜力/t	排放量/t	减排潜力/t	排放量/t	减排潜力/t
公司 36	医药制造	10.166	8.895	5.860	3.906	—	—	0.598	—
公司 5	染料制造	0.338	0.265	0	—	—	—	0.002	0.002
公司 6	染料制造	10.722	10.186	0	—	—	—	0.006	0.003
公司 7	染料制造	10.447	9.577	2.550	3.700	—	—	0.261	0.087
公司 9	医药制造	0.159	0.151	0	—	—	—	0.005	0.005
公司 12	染料制造	0	—	0	—	8.572	8.144	7.935	7.776
公司 15	纺织品制造	5.225	4.964	0	—	—	—	0.150	0.149
公司 17	医药制造	0.136	0.129	0	—	—	—	0.004	0.004
公司 25	纺织品制造	2.362	2.244	0	—	—	—	0.007	0.006
公司 39	材料制造	8.162	7.754	0	—	—	—	343.195	274.556
公司 40	材料制造	1.999	1.899	0	—	—	—	0.057	0.057
公司 41	化学品制造	149.096	124.247	67.590	50.693	—	—	26.837	21.470
公司 42	化学品制造	2.743	2.605	0	—	—	—	0.004	0.003
公司 44	材料制造	0.041	0.039	0	—	—	—	0	0
公司 51	化学品制造	102.252	89.471	34.766	26.074	—	—	13.804	11.043

NO_x减排潜力总量为 292.0 t,其中公司 41 的 NO_x减排潜力最高,为 124.2 t,占园区 NO_x减排潜力总量的 43.56%;SO₂减排潜力总量为 96.6 t,其中公司 41 减排潜力最高,为 50.7 t,占园区 SO₂减排潜力总量的 52.49%;NH₃减排潜力总量为 9.4 t,公司 12 和公司 82 的减排潜力分别为 8.1 t 和 1.2 t;颗粒物减排潜力总量为 338.2 t,其中公司 39 颗粒物减排潜力最高,为 274.6 t,占园区颗粒物减排潜力总量的 81.19%。

2.2 减排情景确定

根据设定的总量减排目标为在 VOCs 总净化

率 90%的基础上,排放总量比现状再下降 10%,由此确定了所需的减排量。

工业园区排放 VOCs 的 86 家企业中减排潜力 1 t 的企业总减排潜力为 11.003 t,仅占园区 VOCs 总减排潜力的 0.29%。因此,VOCs 的减排主要从 VOCs 减排潜力 ≥ 1 t 的 43 家企业,即序号为 1~43 的企业。制定了的 12 套减排情景,遵循大气污染物减排量尽可能大、减排成本尽可能低的原则,采用减排措施的企业从减排潜力大的企业入手(见表 5)。

表 5 初选减排情景

Table 5 Primary emission reduction scenarios

情景	清洁生产资源回收					末端治理			
	溶剂替代	液体染料	染料喷塔尾气循环利用	染料喷塔颗粒物回收	SO ₂ 和 NO _x 尾气和资源化	VOCs 催化燃烧	NO _x 和 SO ₂ 协同净化	生物强化处理	
情景 1	9、28	2、3、4、5、6、7、11、12、16、21、22、23、24、26、31、32、35	2	39、41、51、68	40	-	1、3、4、5、6、7、8、9、10、17、18、20	7、36、41、51、68	12
情景 2	9、28	2、3、4、5、6、7、11、12、16、21、22、23、24、26、31、32、35	2	39	40	7、36、41、51、68	1、3、4、5、6、7、8、9、10、17、18、20	-	12
情景 3	9、28	2、3、4、5、6、7、11、12、16、21、22、23、24、26、31、32、35	2	12、39、41、51、68、82	40	7、36	1、3、4、5、6、7、8、9、10、17、18、20	41、51、68	12、82
情景 4	9、28	2、3、4、5、6、7、11、12、16、21、22、23、24、26、31、32、35	2	39、41、51、68	-	-	1、3、4、5、6、7、8、9、10、12、13、14、15、16、19、20、21、23、26、27、28、29、30、33、34、35、36、37、38、39、40、41、42、43	7、36、41、51、68	12
情景 5	9、28	2、3、4、5、6、7、11、12、16、21、22、23、24、26、31、32、35	2	39	-	7、36、41、51、68	1、3、4、5、6、7、8、9、10、12、13、14、15、16、19、20、21、23、26、27、28、29、30、33、34、35、36、37、38、39、40、41、42、43	-	12
情景 6	9、28	2、3、4、5、6、7、11、12、16、21、22、23、24、26、31、32、35	2	12、39、41、51、68、82	-	7、36	1、3、4、5、6、7、8、9、10、12、13、14、15、16、19、20、21、23、26、27、28、29、30、33、34、35、36、37、38、39、40、41、42、43	41、51、68	12、82
情景 7	9、28	2、3、4、5、6、7、11、12、16、21、22、23、24、26、31、32、35	2	39、41、51、68	40	-	1、3、4、5、6、7、8、9、10、15、19、20、2、24、26、27、28、29	7、36、41、51、68	12

续表

情景	清洁生产资源回收					末端治理				
	溶剂替代	液体染料	染料喷塔尾气循环利用	染料喷塔颗粒物回收	VOCs回收	SO ₂ 和NO _x 尾气资源化	VOCs催化燃烧	NO _x 和SO ₂ 协同净化	生物强化处理	
情景 8	9,28	2、3、4、5、6、7、11、12、16、21、22、23、24、26、31、32、35	2	39	40	7、36、41、51、68	1、3、4、5、6、7、8、9、10、15、19、20、22、24、26、27、28、29	-	12	
情景 9	9,28	2、3、4、5、6、7、11、12、16、21、22、23、24、26、31、32、35	2	12、39、41、51、68、82	40	7、36	1、3、4、5、6、7、8、9、10、15、19、20、22、24、26、27、28、29	41、51、68	12、82	
情景 10	9,28	2、3、4、5、6、7、11、12、16、21、22、23、24、26、31、32、35	2	39、41、51、68	40	-	3、4、5、6	7、36、41、51、68	12	
情景 11	9,28	2、3、4、5、6、7、11、12、16、21、22、23、24、26、31、32、35	2	39	40	7、36、41、51、68	3、4、5、6	-	12	
情景 12	9,28	2、3、4、5、6、7、11、12、16、21、22、23、24、26、31、32、35	2	12、39、41、51、68、82	40	7、36	3、4、5、6	41、51、68	12、82	

(1) VOCs 减排情景

VOCs 的减排情景主要有 4 种,分别对应表 5 中的情景 1~3、4~6、7~9、10~12,其中情景 4~6 为 VOCs 减排量最大,情景 10~12 为减排成本最低,情景 1~3 与 7~9 为减排量与成本之前的权衡。

情景 1~3: 结合减排情景制定原则,园区 VOCs 减排潜力排序为 1、3~10 的企业减排潜力均在 50 t 以上,均采用催化燃烧法作为末端处理技术对 VOCs 进行减排;减排潜力前 20 的企业中去除率小于 90%的企业采用催化燃烧作为末端处理技术;VOCs 减排潜力排序 2 的企业已采用尾气循环利用技术,取得较好的减排效果;公司 40 的 VOCs 去除率为 50%,但其减排潜力较低,故采用固定和运行成本相对较低的 VOCs 回收应用技术。

情景 4~6: 该情景主要是从 VOCs 减排量最大进行考虑。VOCs 减排潜力排序为 1、3~43 家企业中,除去 5 家 VOCs 去除率为 98%的企业,其他企业均采用催化燃烧法末端处理技术进行 VOCs 减排;VOCs 减排潜力排序 2 的企业已采用尾气循环利用技术,取得较好的减排效果;

情景 7~9: 结合减排情景制定原则,园区 VOCs 减排潜力排序为 1、3~10 的企业减排潜力均在 50 t 以上,均采用催化燃烧法作为末端处理技术对 VOCs 进行减排;43 家企业中 VOCs 去除率小于 90%的企业采用催化燃烧作为末端处理技术;VOCs 减排潜力排序 2 的企业已采用尾气循环利用技术,取得较好的减排效果;公司 40 的 VOCs 去除率为 50%,但其减排潜力较低,故采用固定和运行成本相对较低的 VOCs 回收应用技术。

情景 10~12: 该情景主要从 VOCs 减排成本低考虑,仅对 VOCs 减排潜力大于 150 t 以上的企业,即排序为 1、3~10 的企业采用催化燃烧末端处理技术,仅有 5 家企业;VOCs 减排潜力排序 2 的企业已采用尾气循环利用技术,取得较好的减排效果。公司 40 的 VOCs 去除率为 50%,但其减排潜力较低,故采用固定和运行成本相对较低的 VOCs 回收应用技术。

(2) NO_x 和 SO₂ 减排情景

园区排放 NO_x 的企业有 22 家,排放 SO₂ 的企业有 5 家,且排放 NO_x 和 SO₂ 的共同企业共有 5 家,且该 5 家企业 NO_x 的减排潜力总量为 255.14 t,占园区 NO_x 减排潜力总量的 87%。NO_x 和 SO₂ 治

理技术主要包括 NO_x 和 SO_2 协同净化技术(去除率分别为 70% 和 95%) 和尾气资源化技术(可产生一定的经济效益)。因此,对这 5 家企业采用协同净化技术替代原治理技术,并在原治理技术的基础上新增回收工艺,主要包括 3 种减排措施,分别对应表 3 中的情景 1、4、7、10,情景 2、5、8、11 和情景 3、6、9、12。

情景 1、4、7、10:该情景的 NO_x 和 SO_2 减排量最大,5 家企业均采用 NO_x 和 SO_2 协同净化技术。

情景 2、5、8、11:该情景的 NO_x 和 SO_2 的经济效益最佳,5 家企业均新增尾气资源化技术。

情景 3、6、9、12:该情景为 NO_x 和 SO_2 的减排量和减排费用的权衡,即 NO_x 减排潜力大于 20 t 的两家企业采用 NO_x 和 SO_2 协同净化技术,剩余三家企业采用尾气资源化技术。

(3) NH_3 减排情景

园区共有两家企业排放 NH_3 , 强化生物处理技术对 NH_3 的减排率为 95%。因此, NH_3 的减排情景主要为两种,即对减排潜力最大的企业采用强化的生物处理技术,即情景 1、2、4、5、7、8、10、11; 两家企业均采用强化生物处理技术,即情景 3、6、9、12。

(4) 颗粒物减排情景

园区排放颗粒物的企业 25 家,减排潜力最大为 274.56 t,最小为 0.01 t。其中,颗粒物减排潜力为 1 t 以上的企业共有 6 家,减排潜力为 337.63 t,占颗粒物减排潜力总量的 99.84%。因此,颗粒物减排情景主要为三种,分别为表中 3~6 种的情景 1、4、7、10,情景 2、5、8、11 和情景 3、6、9、12,颗粒物减排采用回收技术。

情景 2、5、8、11:该情景为颗粒物减排费用最低,仅对减排潜力最大的企业采用颗粒物回收技术。

情景 3、6、9、12:该情景为颗粒物减排量最大,6 家企业均采用颗粒物回收技术。

情景 1、4、7、10:该情景为颗粒物减排量最大和减排费用的权衡,对减排潜力大于 10 t 以上的企业采用颗粒物回收技术。

2.4 减排情景评价

依据层次分析法的原理^[17-19],结合大气环境质量、总量控制、社会经济效益和园区 VOCs 处理能力因素构建了某园区大气污染物减排控制情景评价体系(图 1)。

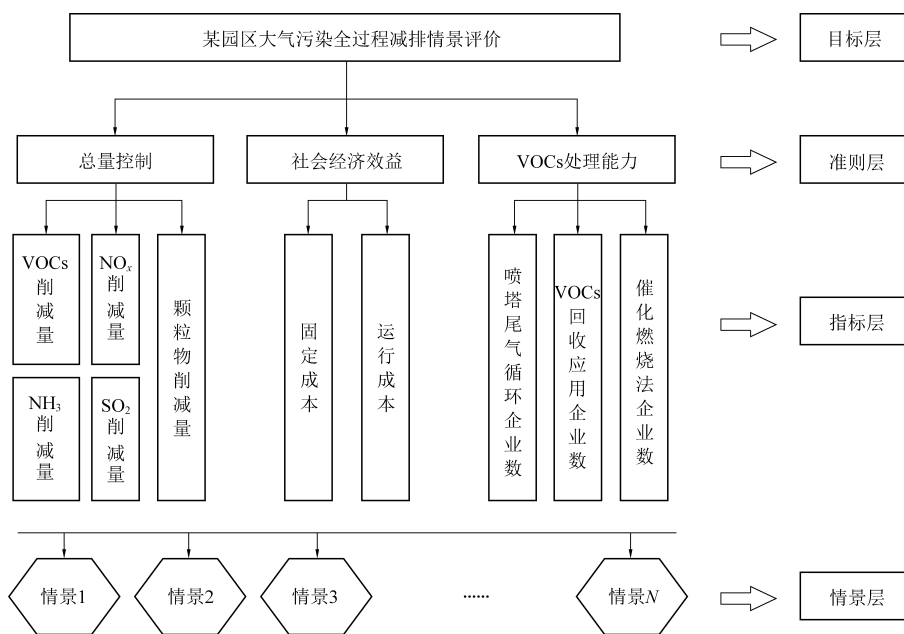


图 1 VOCs 减排情景评价多层次分析法体系

Fig.1 Multi-level analysis method system of VOCs emission reduction scenario evaluation

通过查阅文献,结合有关专家对准则层和指标层的要素进行评分,汇总专家评分,建立判断矩阵。按照 AHP 法建模步骤确定各下层要素对上层各个要素的影响程度,确定权重 W 。由于 AHP

是一种主观赋权法^[20],专家打分时会受专家主观意识的影响,为尽可能减少这种主观影响,在专家打分时会给出大气污染物减排潜力最大和减排成本最低措施。同时附带相应的减排率、减排成本、

减排效益等因素,确保专家对指标打分时更加客观与合理。

构建指标层对准则层、准则层对目标层的判断矩阵,运用 AHP 法进行计算,获得相应的权重。

在此基础上,计算综合权重,是指通过准则层与指标层的权重计算,得出指标层对目标层的权重。综合权重计算结果如表 6 所示。

表 6 准则层、指标层与目标层之间的权重表

Table 6 Weighting of the criterion layer, the index layer, and the target layer

目标层	准则层		指标层		综合权重
	要素	权重	要素	权重	
某园区大气污染物减排情景	总量控制	$W_1 = 0.539\ 6$	VOCs 减排量	0.437\ 3	0.236\ 0
			NO _x 减排量	0.254\ 1	0.137\ 1
			SO ₂ 减排量	0.100\ 1	0.054\ 0
			NH ₃ 减排量	0.053\ 9	0.029\ 1
			颗粒物减排量	0.154\ 6	0.083\ 4
			运行费用	0.333\ 3	0.099\ 0
	社会经济 效益	$W_2 = 0.297\ 0$	固定成本	0.666\ 7	0.198\ 0
			催化燃烧法企业数	0.571\ 4	0.093\ 4
			染料喷塔尾气循环企业数	0.142\ 9	0.023\ 3
	VOCs 处理 能力	$W_3 = 0.163\ 4$	VOCs 回收应用企业数	0.285\ 7	0.046\ 7

在获得了指标层的 9 项指标原始数据后,采用 AHP 法对 9 项指标进行比较,建立情景层对指标层的判断矩阵,计算情景层对指标层的权重。

通过指标综合权重与情景对指标层的权重可计算出情景层的综合权重,如表 7。综合权重最大的情景为最优情景,因此情景 4 为最优情景。

表 7 情景层综合权重

Table 7 Comprehensive weight of the scenario layer

准则层	指标层	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4	情景 5	情景 6	情景 7	情景 8	情景 9	情景 10	情景 11	情景 12
总量 控制	VOCs 减排量	0.011\ 9	0.011\ 9	0.011\ 9	0.038\ 5	0.038\ 5	0.022\ 2	0.022\ 2	0.022\ 2	0.022\ 2	0.006\ 0	0.006\ 0	0.006\ 0
	NO _x 减排量	0.019\ 6	0.004\ 9	0.009\ 8	0.019\ 6	0.004\ 9	0.009\ 8	0.019\ 6	0.004\ 9	0.009\ 8	0.019\ 6	0.004\ 9	0.009\ 8
	SO ₂ 减排量	0.007\ 7	0.001\ 9	0.003\ 9	0.007\ 7	0.001\ 9	0.003\ 9	0.007\ 7	0.001\ 9	0.003\ 9	0.007\ 7	0.001\ 9	0.003\ 9
	NH ₃ 减排量	0.001\ 8	0.001\ 8	0.003\ 6	0.001\ 8	0.001\ 8	0.003\ 6	0.001\ 8	0.001\ 8	0.003\ 6	0.001\ 8	0.001\ 8	0.003\ 6
	颗粒物减排量	0.011\ 2	0.006\ 1	0.003\ 4	0.011\ 2	0.006\ 1	0.003\ 4	0.011\ 2	0.006\ 1	0.003\ 4	0.011\ 6	0.006\ 4	0.003\ 5
社会经 济效益	固定成本	0.012\ 4	0.013\ 6	0.012\ 8	0.003\ 3	0.004\ 9	0.004\ 1	0.004\ 1	0.005\ 3	0.005\ 0	0.008\ 1	0.013\ 6	0.011\ 8
	运行成本	0.006\ 2	0.008\ 7	0.008\ 2	0.027\ 8	0.043\ 2	0.034\ 7	0.013\ 8	0.041\ 1	0.005\ 7	0.002\ 2	0.003\ 6	0.002\ 7
VOCs 处理 能力	催化燃烧法企业数	0.003\ 5	0.003\ 5	0.003\ 5	0.018\ 9	0.018\ 9	0.018\ 9	0.007\ 0	0.007\ 0	0.007\ 0	0.001\ 7	0.001\ 7	0.001\ 7
	染料喷塔尾气循环 企业数	0.001\ 3	0.001\ 3	0.001\ 3	0.001\ 3	0.001\ 3	0.001\ 9	0.002\ 5	0.002\ 5	0.002\ 5	0.002\ 5	0.002\ 5	0.002\ 5
	VOCs 回收应用企业数	0.0044	0.004\ 4	0.004\ 4	0.002\ 2	0.002\ 2	0.002\ 2	0.004\ 4	0.004\ 4	0.004\ 4	0.004\ 4	0.004\ 4	0.004\ 4
合成权重		0.0801	0.058\ 3	0.062\ 8	0.132\ 3	0.123\ 8	0.121\ 0	0.094\ 3	0.097\ 4	0.067\ 6	0.065\ 5	0.046\ 8	0.049\ 9
综合排序		6	10	9	1	2	3	5	4	7	8	12	11

情景 4 的固定成本为 4 220 万元,运行成本节约 420.0 万元/a,VOCs 减排量为 2 610.2 t,NO_x 减排量为 255.1 t,SO₂ 减排量为 96.6 t,NH₃ 减排量为 8.1 t,颗粒物减排量为 337.6 t。园区现有企业年产值在 2~36 亿之间,情景 4 中的年环保投入不超过 110 万元/a,则企业的环保投入占企业年产值的 0.03%~0.53%;结合技术的费效分析,情景 4

所采用的技术费效最佳。因此,情景 4 无论在技术还是经济方面均可行。

情景 4 的实施企业具体为:采用清洁生产原料的企业为 9 和 28,采用清洁生产工艺的企业为 2~7、11、12、16、22~24、26、31、32、35;采用细颗粒回收的企业为 39、41、51、68;采用催化燃烧的企业为 1、3~10、12~16、19~21、23、26~31、33~36、38~

43;采用NO_x和SO₂协同净化技术的企业为7、36、41、51、68;采用强化生物处理工艺的企业为21。

3 结 论

(1)结合园区企业调研和文献调研,利用最佳可行技术对园区主要大气污染物减排潜力进行了计算分析,VOCs减排潜力总量为2 802.9 t,NO_x减排潜力总量为2 920 t,SO₂减排潜力总量为96.6 t,NH₃减排潜力总量为9.4 t,颗粒物减排潜力总量为338.2 t。

(2)从关键污染物减排量和减排成本两方面考虑制定了减排情景,包括VOCs减排量最大3种、减排成本最低3种、减排量和减排成本权衡6种,共计12种减排情景。

(3)对上述构建的12种减排情景采用AHP法进行了评价,设立了目标层、准则层与指标层,建立了情景层对指标层的判断举证,并进行了权重计算,确定情景4为最佳减排情景,其固定成本为4 220万元,运行成本节约419.93万元/a。在该减排情景下,VOCs减排量为2 610.163 t,NO_x减排量为255.145 t,SO₂减排量为96.578 t,NH₃减排量为8.144 t,颗粒物减排量为337.630 t。

参考文献

- [1] 石磊,王震.中国生态工业园区的发展(2000—2010年)[J].中国地质大学学报(社会科学版),2010,10(4):60-66.
SHI Lei, WANG Zhen. Eco-industrial parks in China (2000-2010) [J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2010, 10 (4): 60-66.
- [2] 焦文婷.我国生态工业园区政策可持续性的动力机制[J].中国环境管理,2019,11(6):103-106.
JIAO Wenting. Dynamic for the policy sustainability of eco-industrial parks in China [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2019, 11 (6): 103-106.
- [3] 费伟良,李奕杰,杨铭,等.碳达峰和碳中和目标下工业园区减污降碳路径探析[J].环境保护,2021,49(8):61-63.
FEI Weiliang, LI Yijie, YANG Ming, et al. Analysis of the synergistic path to reduce pollution and carbon in industrial parks under Carbon Peak and Carbon Neutrality targets [J]. Environmental Protection, 2021, 49 (8): 61-63.
- [4] 贾小平,石磊,杨友麒.工业园区生态化发展的挑战与过程系统工程的机遇[J].化工学报,2021,72(5):2373-2391.
JIA Xiaoping, SHI Lei, YANG Youqi. Challenges of eco-industrial parks development and opportunities for process systems engineering [J]. CIESC Journal, 2021, 72 (5): 2373-2391.
- [5] 吕一铮,田金平,陈吕军.推进中国工业园区绿色发展实现产业生态化的实践与启示[J].中国环境管理,2020,12(3):85-89.
LV Yizheng, TIAN Jinping, CHEN Lvjun. Practice and inspiration of promoting green development of China's industrial parks and realizing industrial ecology [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, 12 (3): 85-89.
- [6] 刘奇,王曙光.化工企业排放废气监管难[N].中国环境报,2014-8-22(3).
- [7] 刘瀚斌,包存宽.工业园区环境治理政策分析与优化路径[J].环境与可持续发展,2020,45(4):120-128.
LIU Hanbin, BAO Cunkuan. Analysis and optimization of environmental governance policies on industrial park [J]. Environment and Sustainable Development, 2020, 45 (4): 120-128.
- [8] 李霖,刘征涛,李捍东,等.化工园区重点液态环境风险源监控布点研究[J].环境工程技术学报,2011,1(5):409-413.
LI Ji, LIU Zhengtao, LI Handong, et al. Monitoring sites setting for major liquid environmental risk sources in chemical industry parks [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2011, 1 (5): 409-413.
- [9] 赵若楠,马中,乔琦,等.中国工业园区绿色发展政策对比分析及对策研究[J].环境科学研究,2020,33(2):511-518.
ZHAO Ruonan, MA Zhong, QIAO Qi, et al. Comparative analysis of green development policies of China's industrial parks and countermeasure Research [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33 (2): 511-518.
- [10] 张艳军,余游,罗庆俊.化工园区大气环境风险评估与预警平台设计研究[J].四川环境,2014,33(5):77-81.
ZHANG Yanjun, YU You, LUO Qingjun. Research on atmospheric environmental risk assessment and early warning platform design of chemical industry park [J]. Sichuan Environment, 2014, 33 (5): 77-81.
- [11] Jia Xing, Dian Ding, Shuxiao Wang, et al. Quantification of the enhanced effectiveness of NO_x control from simultaneous reductions of VOC and NH₃ for reducing air pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18 (11): 7799-7814.
- [12] 邓雪,李家铭,曾浩健,等.层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J].数学的实践与认识,2012,42(7):93-100.
DENG Xue, Li Jiaming, ZENG Haojian, et al. Research on computation methods of AHP weight vector and its applications [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42 (7): 93-100.
- [13] 张贵红.基础研究类项目经济价值评价的方法探索——以估值法应用的分析为视角[J].中国高校科技,2020(8):30-33.
ZHANG Guihong. Method exploration of economic value evaluation

- ation of basic research projects; From the perspective of analysis of the application of valuation method [J]. China University Science & Technology, 2020 (8): 30-33.
- [14] 董海侠. 辽宁省矿产资源综合评价 [D]. 沈阳: 东北大学, 2009: 21-23.
- [15] 王仁明, 胡海强. 层次分析法在三峡船闸调度方案中的应用 [J]. 三峡大学学报 (自然科学版), 2008 (1): 31-34.
- WANG Renming, Hu Haiqiang. Application of analytic hierarchy process to three gorges shiplock running [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2008 (1): 31-34.
- [16] 刘纪华. 宝鸡市区域火灾风险评估方法研究及应用 [D]. 西安: 西安科技大学, 2018: 44-47.
- [17] 杜大仲. 河流型饮用水水源地安全保障体系构建及实证研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 37-41.
- [18] 李慧珍. 基于 TOPSIS 的建设工程变更综合评价模型研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2014: 39-43.
- [19] 张亚青, 王相, 孟凡荣, 等. 基于熵权和层次分析法的 VOCs 处理技术综合评价 [J]. 中国环境科学, 2021, 41 (6): 2946-2955.
- ZHANG Yaqing, WANG Xiang, MENG Fanrong, et al. Comprehensive evaluation of VOC sprocessing technology based on entropy weight method and analytic hierarchy process [JS]. China Environmental Science, 2021, 41 (6): 2946-2955.