

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.257

引用格式:张飞,高佳圆,肖雅文,等.烟团积分-多维多箱模型在大气污染物核算中的应用[J].重庆大学学报, 2026,49(6): 50-58.



# 烟团积分-多维多箱模型在大气污染物核算中的应用

张 飞<sup>1</sup>,高佳圆<sup>2</sup>,肖雅文<sup>1</sup>,王 超<sup>3</sup>,叶志洪<sup>3</sup>

(1. 重庆渝隆环保有限公司,重庆 400039; 2. 重庆铝产业开发投资集团有限公司,重庆 400039;  
3. 重庆大学 环境与生态学院,重庆 400045)

**摘要:**对工业园区进行精准大气环境容量核算有利于优化产业结构,揭示园区发展潜力,但单一模型难以实现精准核算。针对这一问题,以重庆市某工业园区为例,通过在园区内采集的环境参数为基础,构建了烟团积分-多维多箱模型,并评估了工业园区的大气环境容量。结果显示模型计算的大气环境容量普遍高于当前污染物排放量,证实了园区在污染物排放控制的基础上仍具备进一步发展的空间。模型计算结果与修正 A 值法的计算结果之间具有较小的误差,体现了烟团积分-多维多箱模型的可靠性和准确性,表明其能有效地应用于大气环境容量计算。最后,结合核算结果与园区当前污染排放特征,对该工业园区规划发展提供了优化建议。

**关键词:**大气污染;工业园区;多箱模型;烟团积分模型;环境容量

中图分类号:X511

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2026)06-050-09

## Application of a smoke-integral multi-dimensional multi-box model for atmospheric environmental capacity assessment

ZHANG Fei<sup>1</sup>, GAO Jiayuan<sup>2</sup>, XIAO Yawen<sup>1</sup>, WANG Chao<sup>3</sup>, YE Zhihong<sup>3</sup>

(1. Chongqing Yulong Environmental Protection Co. Ltd., Chongqing 400039, P. R. China; 2. Chongqing Aluminum Industry Development and Investment Group Co. Ltd., Chongqing 400039, P. R. China; 3. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** Accurate estimation of atmospheric environmental capacity is essential for optimizing industrial structure and assessing the development potential of industrial parks; however, single models often lack predictive accuracy. To address this issue, this study develops a smoke-integral multi-dimensional multi-box model based on site-specific environmental parameters and applies it to an industrial park in Chongqing. Results indicate that the calculated atmospheric environmental capacity exceeds current pollutant emissions, confirming potential for further development under existing emission controls. Comparison with the modified A-value method demonstrates minimal discrepancies, revealing the reliability and accuracy of the proposed model. Furthermore,

收稿日期:2024-08-18 网络出版日期:2025-04-14

基金项目:西彭园区环保管家技术服务项目(YLHB-2024-3)。

Supported by Environmental Protection Housekeeper Technical Service Project of Xipeng Park (YLHB-2024-3).

作者简介:张飞(1972—),男,硕士研究生,主要从事环境规划与管理、水环境综合治理、土壤污染评估与修复等方向的研究,(E-mail)7135256@qq.com。

通信作者:王超,男,博士研究生,(E-mail)Wchaoy8@163.com;

叶志洪,男,教授,(E-mail)yezhihong@cqu.edu.cn。

by combining model results with current emission characteristics, targeted optimization strategies for industrial park planning and development are proposed.

**Keywords:** air pollution; industrial park; multi-box model; smoke-integral model; environmental capacity

当前,中国经济发展态势良好,城镇化进度加快,但随之而来的高能源消耗致使城市空气质量严重下降。《2023中国生态环境状况公报》显示,截至2023年末,中国约有20%~35%的城市存在不同类型的污染物超标。工业园区的合理构建,可以优化城市区域结构,有利于大气污染治理和管控。通过合理规划和建立工业园区,改变城市产业结构,可以有效控制大气污染源。因此,工业园区的优势越来越为各级政府部门所认可,成为区域经济发展的理想样板和新的竞争单元,增强了区域的核心竞争力<sup>[1]</sup>。工业园区的大气污染物排放对周边人居环境的影响显著,其原因在于城市规划、产业结构和产业布局的不合理。例如,工业区与住宅小区混建现象严重,导致在工业园区的运行和排污过程中污染周围人居环境。

自2013年发布《大气污染防治行动计划》以来,中国的大气污染治理更为严格。随后逐渐颁布了一系列对大气污染治理的战略指导和长效管理更为细致和精准的规划政策。在这些政策的影响下,多数典型污染物如NO<sub>2</sub>和CO等的排放都得到显著的管控<sup>[2-3]</sup>。近年来,国家对大气环境大力整治,对不同类型的排污采取了因地制宜的应对措施,也形成了多样化的排污控制方法<sup>[4]</sup>。现阶段大气容量计算多采用建立模型的方法,根据工业园区的实际观测数据测算出污染物承受容量,得出相应的治理方案,提升企业的大气污染防治意识<sup>[5]</sup>。但将模型应用于实际污染测算时,需要充分收集资料并对数据进行分析 and 筛选,要求较高,且单一的模型难以实现精准预测。因此,基于现有研究区域具备的典型的气象特征,将大气污染物核算中使用的多维多箱模型结合烟团积分模型,并根据图1,对重庆市某工业园区的大气污染物进行了核算,以确定大气污染物总量控制方案,缓解其大气污染对周围人居环境的影响,实现经济与环境的可持续发展。

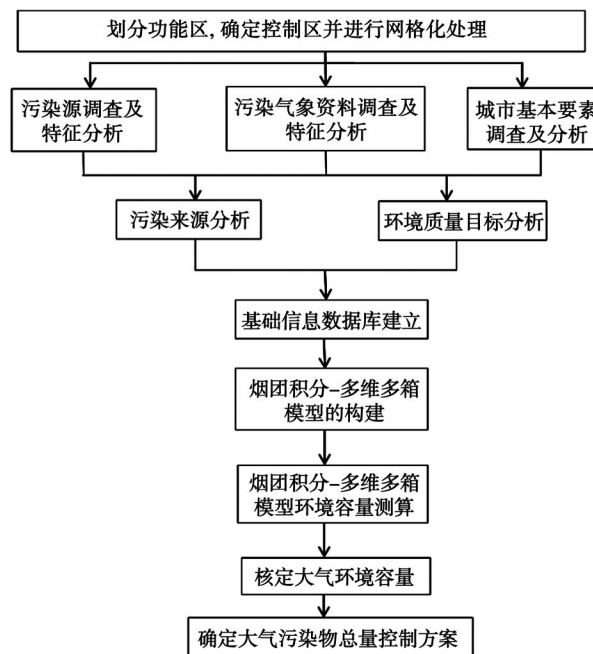


图1 大气影响预测流程图

Fig. 1 Flowchart of atmospheric impact prediction

## 1 研究方法

### 1.1 园区污染主要组成

研究园区是经市政府批准的特色工业园区,规划面积65 km<sup>2</sup>,包含建成区4 km<sup>2</sup>,启动区5 km<sup>2</sup>,拓展区

56 km<sup>2</sup>,可建设用地面积18 km<sup>2</sup>,现状管辖范围包括A组团、B组团和C组团。该工业园区因其复杂的地形和气候条件,在冬季易造成污染物积聚,而夏季则因逆温层和湿度的作用加剧了颗粒物和挥发性有机物的扩散和沉降,呈现出独特的气象特征和污染物类型。目前,园区内工业废气主要包含燃料尾气、工艺粉尘、焊接烟尘、喷漆废气、喷粉废气、固化废气等;主要污染物为烟(粉)尘、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、甲苯、二甲苯、挥发性有机物、氯化氢、硫酸雾、氟化物等。园区行业类别主要涉及的行业类别如表1所示,污染物最主要的来源行业为压延加工业、金属制品业、有色金属冶炼和化学原料和化学制品制造业<sup>[6-7]</sup>。

表1数据展示了重庆市某工业园区中一些特定行业在废气排放中的显著地位。为了制定排污管控方案,实现更加环保的生产,同时减少污染,对园区内污染容量进行核算是至关重要的。

表1 工业园区废气排放行业分布情况

序号	行业名称	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	烟(粉)尘	VOCs
1	有色金属冶炼和压延加工业	1 165.49	598.02	279.74	127.15
2	金属制品业	21.04	45.34	9.88	5.20
3	汽车零部件及配件制造	3.74	116.87	32.50	74.83
4	化学原料和化学制品制造业	47.40	116.33	18.94	—
5	专用设备制造业	1.15	17.85	1.09	0.37
6	摩托车零部件制造	7.13	1.57	6.86	3.88
7	非金属矿物制品业	0.53	3.22	—	2.21
8	机动车燃油零售	—	—	—	3.80
9	农副食品加工业	0.07	0.17	0.19	—
10	食品制造业	1.91	6.70	0.81	—
	合计	1 248.46	906.07	350.01	217.44

## 1.2 烟团积分模型-多维多箱模型原理

大气中的污染物并非静止,而是随风和湍流运动迁移扩散。大气污染物迁移过程涉及干沉降、湿沉降、扩散和稀释等,诸多因素如风速、大气稳定度及地貌情况等都对其有影响<sup>[8]</sup>。由于实际大气环境的影响因素多变,污染物在大气中的迁移转化难以直接观测实现。因此,利用计算机的高效处理能力结合空气质量模型进行精准的模拟以观测迁移转化过程显得尤为关键,这将有助于了解在不同时间和空间位置的污染物质量浓度分布。在模拟结果的基础上,可以根据污染物在大气环境中的扩散和稀释的基本规律,进一步预测其在大气中的质量浓度,从而更准确地管理和控制大气环境<sup>[9]</sup>。

### 1.2.1 多维多箱模型

多维多箱模型,作为单箱模型的优化之作,全面考量了三维空间中的扩散、污染物衰减、污染源分布及气象条件<sup>[10]</sup>。通过精细划分多个子箱体,依据不同污染源分布、环境功能和控制区需求,确保各子箱体质量浓度混合的均匀性,从而突破了单箱模型的局限,实现了对污染物扩散过程的精准模拟。基础多维多箱模型中,在每个子箱内污染物质量浓度的计算为

$$\bar{C} = \frac{\bar{u}C_b + \Delta x \cdot q_a / H_f}{u + (u_d + u_w + H_f / T_c) \Delta x / H_f}, \quad (1)$$

式中: $\bar{C}$ 表示箱体中的污染物平均质量浓度,mg/m<sup>3</sup>;  $\bar{u}$ 代表污染物在该箱体中的平均流速,m/s;  $u_d$ 、 $u_w$ 为沉积速率,m/s;  $T_c$ 表示污染物转化时间常数,  $T_c = T_{1/2} / 0.693$ ;  $C_b$ 表示由上风向进入该箱内的大气污染物本底质量浓度,mg/m<sup>3</sup>;  $\Delta x$ 为等效直径,m;  $H_f$ 为有效混合层高度,指的是大气中污染物混合的有效高度,m;  $q_a$ 是污染物排放源强度,指单位时间内进入箱体的污染物质量,mg/s。

### 1.2.2 烟团积分模型

烟团积分模型是一种用于计算特定时刻污染物质量浓度的假设性模型,其特定条件为在选定的时间间隔内,其处于静止状态。某一接受点的污染物质量浓度可以根据其在设定的时间范围内,该点包含的烟团所累积的平均质量浓度即为该接受点的污染物质量浓度。烟团积分模型中的积分模型与随机游走模型不同之处在于,积分模型通过将持续排放的污染源分解为以时间顺序排列的离散烟团,并模拟其传输过程,叠加它们对某一接收点的质量浓度贡献,从而精确计算出该点的污染物质量浓度<sup>[11]</sup>。积分模型在风速较小或静风条件下,对下风向的大气扩散计算尤为有效。

### 1.2.3 烟团积分-多维多箱模型

多维多箱模型核算得到的大气环境容量结果相对于其他模型偏差更大,因为其所需要的箱体尺寸较大(通常为10 km级)。为了提升核算的精确性,将烟团模型引入构建烟团积分-多维多箱模型,因其专注于模拟局部的污染物扩散情况,能更细致地将风场和排放的变化结合至模型中。烟团积分模型的运用使得箱体划分更为精细,从而有效地提高了预测的准确性。然而,单独的烟团模型计算量庞大且处理速度受限。因此,将烟团积分模型与多维多箱模型相结合可能更适合大气污染物核算。计算时,首先通过多维多箱模型对研究目标进行子箱体划分,需假设子箱体内的污染物质量浓度是均匀分布的,再通过监测数据和相关气象资料,利用烟团积分模型分别计算每个子箱体的污染物质量浓度<sup>[12]</sup>。

## 1.3 核算思路

计算方法主要包括以下2点:

1)根据研究区域气象特征,构建烟团积分-多维多箱模型。通过代入研究区域内逐月风速、风频、大气稳定度、混合层高度、降雨量、温度及其他所需参数,通过模型计算出园区内各区域的大气环境容量。

2)依据核算出的大气环境容量,并结合当前研究园区工业产业污染排放特点,对比传统计算的大气污染容量与传统方法得出的数据,来验证模型的有效性。通过对不同数据的比较,可以更全面地评估大气环境承载能力以及污染物排放对环境的影响。

## 2 烟团积分模型-多维多箱模型的建立

### 2.1 参数收集

1)风速是指烟囱上的风速,或利用梯度风进行计算。通过风速仪即可测定烟囱上的风速,而不同高度的风速不一样,可利用梯度风公式进行计算,得出不同高度对应风速。

2)风向频率是根据某一研究区域在过去特定时间段内各风向出现的概率大小,来推测未来某一时期内某风向出现的可能性,通常使用风向频率玫瑰图来表示,在本研究中风向计16个方位,采用了矢量法进行计算,可求得各风向下的平均风速和风向频率<sup>[13]</sup>。

3)大气稳定度取决于温度随高度变化的梯度(即温度垂直递减率)与大气中的温度分层<sup>[14]</sup>。大气稳定度是研究并预测污染物在大气环境中稀释、扩散的重要的参数,也是影响混合层高度的重要因素<sup>[15]</sup>。混合层高度内,空气通过湍流和对流过程进行充分混合,从而使污染物得以垂直扩散。

4)混合层高度指示了污染物在垂直方向上受热力湍流扩散的范围。在多维多箱模型中,混合层高度直接决定了相应子箱体的高度<sup>[16]</sup>。

5)烟气抬升高度(plume rise height)是指污染源排放的烟气在进入大气后,由于其初始动量和热浮力作用而上升的高度。因此,计算排放源高度时,需要参考烟气抬升的影响,利用有效源高进行计算<sup>[17]</sup>。

6)扩散参数是大气污染扩散模型中用于描述污染物扩散过程的关键要素,包含水平扩散参数和垂直扩散参数<sup>[18]</sup>。该参数的主要影响因素是大气稳定度,稳定度和扩散参数呈负相关。此外,该数值还与下垫面的粗糙程度有关,地表越平坦,扩散系数越低<sup>[19]</sup>。

### 2.2 烟团积分-多维多箱模型的构建

#### 2.2.1 模型基本假设

构建的烟团积分-多维多箱模型需满足以下基本假设条件<sup>[9]</sup>:

1) 箱体内的污染物仅受  $x, y, z$  方向的湍流作用以及  $x, y$  方向的分子扩散影响, 不考虑不同污染物之间的化学反应;

2) 污染物在大气环境中扩散时, 整个子箱体内部的风速保持恒定, 风场分布均匀且稳定。风速随高度变化, 但在同一高度上风速相同;

3) 在划分的子箱体中, 污染物质量浓度在垂直和水平方向上均匀混合;

4) 各个污染源的排放强度保持连续且均匀。

### 2.2.2 各风向组下的烟团积分-多维多箱模型

通常情况下, 扩散模型计算的污染质量浓度指的是污染物扩散约 0.5 h 后的平均质量浓度, 但为了全面评估, 还需要了解日、月、年等不同时间跨度内的平均质量浓度<sup>[20]</sup>。

假设在 A 类稳定度条件下, 风向为  $n$ , 建立  $xOy$  坐标系与 NOE 方向重合, 则可以计算出接受点  $i$  在 A 稳定度和  $n$  风向下的地面质量浓度。随后, 通过类似步骤计算  $i$  点在不同稳定度和风向条件下的地面质量浓度, 并根据风向频率和稳定度频率进行加权求和, 即可得出  $i$  点的地面质量浓度。计算公式为<sup>[21]</sup>

$$C_i = \sum_{m=1}^6 \sum_{n=1}^{16} f_{mn} g_1 + \sum_{m=1}^6 f_m g_2, \quad (2)$$

式中:  $g_1$  为各稳定度、各小风频率下地面浓度计算公式;  $g_2$  为各稳定度、各静风频率下地面质量浓度计算公式;  $f_{mn}$  为  $m$  稳定度且风向为  $n$  的发生频率;  $f_m$  为稳定度为  $m$  时静风频率

将各  $m$  稳定度下的扩散参数  $\sigma_{xm} \sigma_{ym} \sigma_{zm}$  和  $H$  高度处风速  $u$  分别代入计算求解, 最终可得  $i$  点的地面质量浓度  $C_i$ 。

$$g_1 = \int_0^T \frac{2Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_{xm} \sigma_{ym} \sigma_{zm}} \exp\left[-\frac{(x-ut)^2 + y^2}{2\sigma_{ym}^2}\right] \exp\left(-\frac{H_i^2}{2\sigma_{zm}^2}\right) dt, \quad (3)$$

$$g_2 = \int_0^T \frac{2Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_{xm} \sigma_{ym} \sigma_{zm}} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_{ym}^2}\right] \exp\left(-\frac{H_i^2}{2\sigma_{zm}^2}\right) dt. \quad (4)$$

考虑污染物的沉降与化学反应, 其计算公式也可为

$$C_i = \frac{Q_s}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} C_x \cdot C_y \cdot C_z \cdot C_b \cdot C_d, \quad (5)$$

$$C_x = \exp\left[-\frac{(x-x_{ij})^2}{2\sigma_x^2}\right], \quad (6)$$

$$C_y = \exp\left[-\frac{(y-y_{ij})^2}{2\sigma_y^2}\right], \quad (7)$$

$$C_b = \exp(-b \cdot j \cdot \Delta t), \quad (8)$$

$$C_d = \exp\left[-\frac{(V_d \cdot j \cdot \Delta t)^2}{2\sigma_z^2}\right], \quad (9)$$

式中:  $C_x, C_y, C_z$  为  $x, y, z$  方向的扩散质量浓度项;  $C_b, C_d$  为污染物的转化和沉降的质量浓度项;  $Q_s$  为污染源强, mg/s。

当  $H_i=0$ , 即混合层高度为 0 时, 可得到  $z$  方向上的扩散质量浓度项为

$$C_z = \exp\left[-\frac{(z-z_{ij})^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+z_{ij})^2}{2\sigma_z^2}\right]. \quad (10)$$

令  $z=0$ , 可得地面质量浓度的长期平均质量浓度为

$$C_z = \exp\left[-\frac{z_{ij}^2}{2\sigma_z^2}\right]. \quad (11)$$

按照最多风向(如SE)进行第一步计算,即可得到研究区域每一污染源对每一接受点的质量浓度贡献(矩阵 $A_{ij}$ ),继而代入方程即可得到各个污染源对接受点的质量浓度贡献叠加值 $Q_{ij}(1)$ 。接着依次求得剩余风向下的 $Q_{ij}(n)$ ,根据风频进行加权叠加得到最终各接受点的污染物质量浓度值 $Q_{ij}(t)$ 。

### 3 基于模型的大气容量核算

#### 3.1 大气环境容量核算

根据A、B、C组团的地理环境参数和扩散参数,将其带入文章中所求得的模型中进行核算,得出了3个组团各自的环境容量结果如表2所示。烟团积分-多维多箱模型计算得出容量均大于污染物当前排放量,这表明当前园区可以进一步优化产业生产排放,实现园区的优质发展。

表2 烟团积分-多维多箱模型的核算结果

组团	SO <sub>2</sub>	PM10	VOCs	甲苯	HCl
A	2 045.27	903.35	2 492.67	1 469.08	284.05
B	1 656.44	756.49	1 944.59	1 183.88	234.89
C	936.68	414.48	1 184.41	586.63	132.57
合计	4 638.39	2 074.32	5 621.67	3 239.59	651.51

#### 3.2 与传统核算方法对比

A值法是最早产生的环境容量核算方法,已被我国环保部门推荐为采用的方法。本次研究中用A值法在相同数据库的条件下对污染园区容量核算进行计算,起到参考作用。计算方式来源于《制定地方大气污染物排放标准的技术方法》(GB/T 13201—91): $A=A_{低值}+(A_{高值}-A_{低值})\times 0.1=2.8+(4.2-2.8)\times 0.1=2.94$ ,具体计算结果如表3所示。

表3 A值法计算结果

分类	污染物				
	SO <sub>2</sub>	PM10	VOCs	甲苯	HCl
全年	3 728.62	1 720.46	4 692.18	2 557.24	547.42
低架源	977.53	430.11	97.75	1 173.04	639.31

A值法计算结果远低于烟团积分-多维多箱模型计算结果,这是因为A值法仅适用于大气环境满足环境容量线性假设的情况<sup>[22]</sup>。因此,当大气污染问题呈现非线性特征时,A值法将不再适用。此外,一般在处理环境容量核算问题时,取值高则不利于污染的控制,A值取值低则不利于充分利用当地大气的自净能力,一定程度上会影响当地的经济发展,所以会对A值法进行修正处理。

#### 3.3 修正后的A值法

大气污染物的干沉降、湿沉降等物理转化过程和一些相关化学反应变化难以被考虑进传统的A值法,导致在相同气象资料的情况下,A值法核算得出的大气污染物允许排放限值相对于实际大气环境容量更小,因此在实际使用过程中需要对A值法核算得出的结果进行修正<sup>[23]</sup>。

结合重庆市九龙坡区的气象条件,近年内各个季节的混合层平均风速和混合层高度,利用帕斯奎尔(Pasqui)方法计算其稳定度等级,确定不同稳定度等级下混合层内风速廓线,计算近年内该工业园区各个季节的A值,得出各个季节下的平均A值。经过修正后的A值法计算结果如表4所示,进一步,根据环境容量合

理规划排放时间能更加有效地改善不同季节的环境质量。该园区对现状排放量接近总量管控限额的污染物进行了详细摸底调查,并对相关排污企业采取了限制性措施。通过表5比较发现,烟团积分-多维多箱模型和修正后的 $A$ 值法之间的相对误差保持在16%以内,说明了烟团积分-多维多箱模型的可靠性和准确性。2种方法计算得出的环境容量均高于污染物的当前排放量。这表明,虽然此前基于传统方法制定的总量管控限额在一定程度上受限于数据的精度、方法的适用性等因素,存在一定保守性,但从模型计算结果来看,园区在污染物排放控制的基础上仍具备进一步发展的空间。

表4 修正后的 $A$ 值法计算结果Table 4 Calculated results of the modified  $A$ -value method

污染物	春季	夏季	秋季	冬季	全年	低架源
SO <sub>2</sub>	1 257.48	1 528.43	1 251.70	1 197.01	5 234.62	1 372.37
PM10	665.43	672.50	550.74	526.68	2 415.37	603.84
VOCs	1 814.81	1 834.11	1 502.04	1 436.40	6 587.37	137.23
甲苯	989.07	999.59	818.61	782.83	3 590.11	1 646.84
HCl	211.72	213.98	175.23	167.58	768.52	897.53

表5 现状排放量与环境容量

Table 5 Current emissions and environmental capacity

污染物	现状排放量	园区总量管控限值	能否维持环境 质量底线	模型计算 结果	修正后 $A$ 值法 计算结果	相对 误差/%
SO <sub>2</sub>	1 249.31	1 357.89	能	4 638.39	5 234.62	11.39
PM10	1 002.33	1 320.84	能	2 074.32	2 415.37	14.12
HCl	259.24	487.85	能	651.51	768.52	15.23
VOCs	—	—	—	5 621.67	6 587.37	14.66
甲苯	—	—	—	3 239.59	3 590.11	9.76

## 4 结论与展望

通过对工业园区所得的各项气象资料数据进行处理分析,建立了简单的大气资料数据库,利用烟团积分-多维多箱模型对大气环境容量进行核算,深入分析园区内各行业的废气排放数据,结果显示:烟团积分-多维多箱模型计算得出的容量均大于污染物当前排放量,证实了当前园区可以进一步优化产业结构,规划发展。与传统核算方法相比,烟团积分-多维多箱模型核算结果误差较小,具有充分的可靠性和准确性,在大气环境容量核算中有较好的推广应用前景。

当污染物排放量小于大气环境容量时,园区可以根据内部产业排放数据合理规划生产或优化产业结构,实现效益最大化。反之,当污染物排放量大于大气环境容量时,园区应及时调整生产规划。此外,大气污染物排放量较多的行业包括汽车零部件及配件制造业、压延加工业以及有色金属冶炼,为了减少污染物排放,汽车零部件及配件制造业应当抓住新能源汽车和智能网联汽车发展机遇,加大研发投入,开发符合未来趋势的新产品。加强与整车厂商的合作,提高产品配套质量和技术水平,满足市场需求。同时投入资金对现有的NO<sub>x</sub>排放控制技术进行升级,或与研究机构合作开发新的减排技术。在设备更新方面对可能产生高NO<sub>x</sub>排放的旧设备进行更换或升级,引入先进的低排放设备。有色金属冶炼和压延加工业是该工业园区的主要产业,也是SO<sub>2</sub>等污染物的主要排放源。为降低该行业的污染排放,建议企业加大低排放、高效生产技术的研发投入,逐步替换传统高污染工艺,采用高效脱硫设备、静电除尘器等先进废气处理系统。政府应提供补贴或税

收减免,鼓励更新老旧设备,引导企业采用低污染、高效的生产设备。同时,可引入排放权交易机制,激励企业参与环保改造,并通过多维度监测系统和烟团积分模型,优化污染物扩散控制与园区布局,推动工业园区向绿色低碳方向转型,促进可持续发展。

### 参考文献

- [ 1 ] 大气污染防治行动计划[J]. 中国环保产业, 2013(10): 4-9.  
Action plan for air pollution prevention and control[J]. China Environmental Protection Industry, 2013(10): 4-9. (in Chinese)
- [ 2 ] 李兰兰, 梁雪, 李晶晶, 等. 中国大气污染防治政策与空气污染治理: 基于城市级面板数据的实证研究[J]. 生态经济, 2024, 40(3): 179-186.  
Li L L, Liang X, Li J J, et al. China's policy for the control of air pollution and air pollution control: an empirical research based on city-level panel data[J]. Ecological Economy, 2024, 40(3): 179-186. (in Chinese)
- [ 3 ] Wang Y, Zhu S Q, Ma J L, et al. Enhanced atmospheric oxidation capacity and associated ozone increases during COVID-19 lockdown in the Yangtze River Delta[J]. Science of the Total Environment, 2021, 768: 144796.
- [ 4 ] 蒋薇. 工业大气污染防治研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(9): 100-104.  
Jiang W. Prevention and control of industrial air pollution[J]. Environmental Science and Management, 2017, 42(9): 100-104. (in Chinese)
- [ 5 ] 蔺尾燕, 何静, 祝婕, 等. 米东工业园区大气污染物排放对乌鲁木齐市空气质量影响[J]. 新疆环境保护, 2022, 44(2): 9-15.  
Lin W Y, He J, Zhu J, et al. Impact of air pollutant emissions in the Midong industrial park on air quality in Urumqi City[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2022, 44(2): 9-15. (in Chinese)
- [ 6 ] 王经顺, 赵瀚森, 张夏夏, 等. 基于大气环境监测数据的工业园区污染物排放总量实时反演核算方法[J]. 环境工程学报, 2023, 17(11): 3698-3705.  
Wang J S, Zhao H S, Zhang X X, et al. Real-time estimation of atmospheric pollutant emission in industrial park with environment monitoring data[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(11): 3698-3705. (in Chinese)
- [ 7 ] Luo Y J, Li X Y, Cai G T, et al. A study on atmospheric environmental resource accounting: a case of SO<sub>2</sub> capacity resources in Chinese Provinces[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 249: 109432.
- [ 8 ] Zhao S, Wang J H, Feng S J, et al. Effects of ecohydrological interfaces on migrations and transformations of pollutants: a critical review[J]. Science of the Total Environment, 2022, 804: 150140.
- [ 9 ] 仇慧. 大气环境容量核算与污染物总量控制研究: 以重庆市合川区为例[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.  
Qiu H. Research on calculation of atmospheric capacity and control of total air pollutant emission: a case study of Hechuan, Chongqing[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)
- [ 10 ] 吴丽芳, 程水源, 陈东升, 等. 应用多维多箱与高斯复合模型研究大气环境容量[J]. 安全与环境学报, 2007, 7(1): 71-75.  
Wu L F, Cheng S Y, Chen D S, et al. Composite model of multi-dimension multi-box model and Gauss model for atmospheric capacity study[J]. Journal of Safety and Environment, 2007, 7(1): 71-75. (in Chinese)
- [ 11 ] Ma X F, Zhong W Q, Feng W, et al. Modelling of pollutant dispersion with atmospheric instabilities in an industrial park[J]. Powder Technology, 2017, 314: 577-588.
- [ 12 ] Jiang Y Y, Xin J Y, Wang Z F, et al. The dynamic multi-box algorithm of atmospheric environmental capacity[J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: 150951.
- [ 13 ] Fox D L. The transformation of pollutants[M]//Stern A C. Air pollution: 3rd ed. San Diego: Academic Press, 1986: 61-94.
- [ 14 ] Loughner C P, Allen D J, Pickering K E, et al. Impact of fair-weather cumulus clouds and the Chesapeake Bay breeze on pollutant transport and transformation[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(24): 4060-4072.
- [ 15 ] 乐可定, 郁冶, 王异成, 等. 基于中尺度模式的大气稳定性对风电场运行特性[J]. 排灌机械工程学报, 2025, 43(1): 87-93.  
Le K D, Yu Y, Wang Y C, et al. Atmospheric stability based on mesoscale simulations and its impact on operational characteristics of wind farms[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2025, 43(1): 87-93. (in Chinese)
- [ 16 ] 陆秋琴, 杨帅, 黄光球. 小风条件下工业园区无组织 VOCs 溯源方法[J]. 环境工程学报, 2023, 17(3): 869-883.  
Lu Q Q, Yang S, Huang G Q. Research on traceability method of unorganized VOCs emission in industrial park under low wind condition[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(3): 869-883. (in Chinese)

- [17] Guevara M, Soret A, Arévalo G, et al. Implementation of plume rise and its impacts on emissions and air quality modelling[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 99: 618-629.
- [18] Netterville D D J. Plume rise, entrainment and dispersion in turbulent winds[J]. *Atmospheric Environment Part A General Topics*, 1990, 24(5): 1061-1081.
- [19] Wöhrschimmel H, MacLeod M, Hungerbühler K. Emissions, fate and transport of persistent organic pollutants to the Arctic in a changing global climate[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(5): 2323-2330.
- [20] 路冰. 盘锦市大气污染物环境容量核算研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2018.  
Lu B. Research on calculation of atmospheric capacity of air pollutant emission in Panjin City[D]. Shenyang: Liaoning University, 2018. (in Chinese)
- [21] Reiminger N, Jurado X, Vazquez J, et al. Effects of wind speed and atmospheric stability on the air pollution reduction rate induced by noise barriers[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 200: 104160.
- [22] 欧阳晓光. 大气环境容量  $A-P$  值法中  $A$  值的修正算法[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(1): 37-40.  
Ouyang X G. Research on the  $A$  value amending algorithm for  $A-P$  value method in EPC calculation[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(1): 37-40. (in Chinese)
- [23] Guo Q, Wang J Y, Yin H L, et al. A comprehensive evaluation model of regional atmospheric environment carrying capacity: model development and a case study in China[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 91: 259-267.

(编辑 郑洁)