

# 基于高斯烟羽-瞬时扩散模型江浙沪环境污染问题的研究

## 摘要

针对问题一，为构建江浙沪地区空气质量等级评价模型，收集该区域近一个月六大污染物浓度数据，运用熵权法确定各污染物影响权重，得到权重向量为  $[NO_2, SO_2, CO, O_3, PM_{2.5}, PM_{10}] = [0.1793, 0.1128, 0.1344, 0.1569, 0.2548, 0.1618]$ 。考虑污染物对人体健康影响的阈值效应，采用 Otsu 算法确定阈值 124：AQI<sub>old</sub> 小于 124 时，用加权平均法计算 AQI<sub>new</sub> 以精准反映整体空气质量；AQI<sub>old</sub> 大于 124 时，直接取 AQI<sub>old</sub> 作为 AQI<sub>new</sub> 以突出健康危害警示性。最终通过 AQI<sub>new</sub> 与国标分类标准比较，完成空气质量等级划分。

针对问题二，本文通过分析江浙沪地区近 10 年 6 大污染物 ( $NO_2, SO_2, CO, O_3, PM_{2.5}, PM_{10}$ ) 的数据发现，PM<sub>2.5</sub> 浓度在江苏 ( $110.1945 \mu g/m^3$ )、浙江 ( $115.25 \mu g/m^3$ )、上海 ( $97.95867 \mu g/m^3$ ) 均显著超过国家标准 ( $35 \mu g/m^3$ )，是该区域最主要的污染物。对 PM<sub>2.5</sub> 污染源的解析显示，工业污染贡献占比最高 (37.85%)，其次为交通污染 (27.63%)、农业污染 (11.92%)、扬尘 (9.87%) 和生活污染 (12.73%)。最终确定工业污染作为主污染源，排放的  $SO_2, NO_x, PM_{2.5}$  和 VOCs 不仅是 PM<sub>2.5</sub> 的重要来源，其中  $NO_x$  和 VOCs 还通过光化学反应加剧区域臭氧污染，与江浙沪地区夏季臭氧污染突出的特征密切相关。

针对问题三，本文针对不同时期构建了相应的扩散模型并进行求解。在排放时期，采用高斯烟羽模型，对于无排放时期，从文献资料中可以发现，目前研究大多考虑瞬时排放扩散，而本问题研究经历连续时间排放后无排放时期的浓度分布。因此，现基于高斯正态烟羽模型和点源瞬时扩散模型，推导了正态分布假设下的点源连续时间扩散模型。本文提出两种模型：**模型一**通过对时间微分，在稳定排放时段内对时间积分求解浓度；**模型二**通过对空间微分，将空间中每一体积元视为瞬时点源，对全空间积分得到浓度。最后，针对中午 12 点、晚上 9 点、早上 8 点三个时间点，分别确定了两个模型的参数值，完成了不同时刻空间任意点污染物浓度的求解计算。由计算结果可知，排放期间比无排放期间污染严重，风速方向处最高浓度可达  $10^{21} \mu g/m^3$ ，空气质量等级可达六级，属于严重污染，对于排放期间，由于风速和扩散系数的影响，浓度峰值并不在源点，而是出现在下风向 10km 左右；对于无排放期间，经历晚排放比经历早排放污染情况严重，经历早排放空气质量等级为二到三级，属于轻中度污染，经历晚排放空气质量等级可达四级，属于重度污染。

针对问题四，基于前三个问题的模型构建与求解结果，综合提炼出影响江浙沪地区空气质量的三大类关键参数：核心污染物浓度（以 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 为核心，二者构成复合型污染主体）、污染源排放强度（工业源排放的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、VOCs 及交通源排放的 NO<sub>x</sub> 等前体物为主要贡献者）、气象与扩散条件（风速、大气稳定性、温度及紫外辐射等直接影响污染物扩散与生成）。据此，从工业污染管控、臭氧与 PM<sub>2.5</sub> 协同防控、区域协同治理等维度，提出分行业排放限值、清洁能源替代 q、跨区域数据共享等可行性措施，为环保部门提供兼具针对性与操作性的决策支持。

**关键词：** 熵权法、Otsu 算法、高斯烟羽模型、江浙沪地区环境污染问题

# 1 问题重述

近年来，我国经济高速增长伴随的生态环境代价日益凸显，空气污染（尤其是雾霾）已成为干扰社会秩序、威胁公众健康的突出问题。江浙沪地区作为我国经济最活跃的区域之一，工业化、城市化进程迅猛，能源消耗量大，其空气污染呈现“煤烟型与石油型并重”的复合型特征（如长三角地区既有燃煤导致的二氧化硫、颗粒物污染，也有机动车尾气引发的氮氧化物、臭氧污染），污染来源复杂且区域传输影响显著。

现以江浙沪地区为研究对象，围绕  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、二氧化氮、二氧化硫、一氧化碳、臭氧等关键污染物，解决四方面问题：

1、建立兼顾国标和美标的多污染物综合评价模型，实现空气质量“优、良、轻度污染、中度污染、重度污染、严重污染”等六个等级的量化划分。

2、梳理主要污染源（如工业污染、交通污染、农业污染、生活污染等），明确其污染参数，精准分类污染源并量化其贡献比例，并分析污染源的性质与种类。

3、建立单污染源扩散模型，计算特定工厂（烟囱高 50m，排放氮氧化物）方圆 51 公里内，早上 8 点、中午 12 点、晚上 9 点的污染浓度分布及空气质量等级。

4、依据前三个问题研究的模型、数据及结果，提炼影响江浙沪地区空气质量的关键参数，为当地环保部门撰写包含可行性措施与建议的报告。

## 2 问题分析

### 2.1 问题一的分析

问题一旨在参考现有国标和美标，构建衡量空气质量优劣程度的数学模型。首先，采用熵权法客观确定各污染指标权重，提升评价科学性；其次，针对高等级空气质量中某一指标异常偏高的特殊情况，用 Otsu 算法确定阈值：阈值以下加权求和细化 AQI 分级，阈值以上取最大值突出警示性。分段考虑到既保证评价精度，又契合健康保护需求，优化了传统评价方法的局限性。

### 2.2 问题二的分析

问题二聚焦于江浙沪地区空气质量治理的现实需求，旨在通过数据驱动的分析方法揭示区域大气环境核心问题。通过统计对比与标准核验，识别出对区域空气质量影响最显著的核心污染物。在此基础上，针对核心污染物构建污染源解析模型，量化工业污染、农业污染、生活污染、交通污染及扬尘五大污染源的贡献比例，通过权重排序确定主导污染源。进一步地，需对主污染源排放的特征污染物进行理化性质分析，重点探究其生成  $PM_{2.5}$  的转化机制与贡献强度；结合江浙沪地区夏秋季（4-9 月）臭氧污染突出的地域特征，还需揭示主污染源排放物在光化学反应条件下对臭氧生成的促进路径，为后续建立污染防控模型提供明确的问题导向与科学依据。

### 2.3 问题三的分析

问题三的核心任务是构建单污染源空气污染扩散模型，以此刻画工厂废气排放对周边空气的动态影响规律，并基于特定工厂的排放参数，求解其方圆 51 公里范围内在早上 8 点、中午 12 点、晚上 9 点三个时间节点的空气污染浓度分布及对应的空气质量等级。该工厂的排放存在显著时段差异：早上 9 点至下午 3 点，排放浓度为  $406.92mg/m^3$ ，排放速度为  $1200m^3/h$ ；晚上 10 点至凌

晨 4 点，排放浓度为  $1160\text{mg}/\text{m}^3$ ，排放速度为  $5700\text{m}^3/\text{h}$ 。而需求解的三个时间点分别处于不同排放状态——中午 12 点处于排放期（早上 9 点至下午 3 点），晚上 9 点和早上 8 点处于无排放期（其中早上 8 点还涉及两个排放时段的累积影响），这要求模型能精准区分并适配“有稳定排放”和“无排放”两种场景，通过合理转化（如将瞬态过程转化为稳态过程处理），实现不同状态下污染物扩散规律的量化描述，最终结合空气质量等级模型输出浓度分布与等级结果。

## 2.4 问题四的分析

问题四的核心是基于前三个问题的研究成果，系统梳理影响江浙沪地区空气质量的关键参数并转化为可落地的防控建议。其解决思路需紧密衔接前述模型结论：首先，从问题一的评价模型、问题二的污染源解析及问题三的扩散模型中，提炼出核心污染物浓度、污染源排放强度及气象扩散条件等关键参数，明确各参数对空气质量的具体影响路径；其次，分析这些参数间的协同作用机制，认识到核心污染物、污染源排放与气象条件的交互效应会导致“叠加污染”，单一管控难以见效，因此需构建多参数协同防控体系；最后，针对关键参数的影响路径设计针对性措施，如依据污染源占比制定分行业排放限值、结合扩散规律强化前体物协同管控、依托区域传输特征建立跨区域协作机制，从而实现从科学理论到决策应用的有效转化。

## 3 模型假设

空气质量分类模型其核心基于熵权法和 Otsu 算法，以下为该模型的主要假设：

1. 采集的江浙沪地区 25 个区域单元的六项污染物时序监测数据（日均浓度）真实有效，且覆盖全年 365 天的连续观测记录，无系统性偏差影响权重计算与阈值划分。
2. 污染物浓度的离散程度可通过信息熵量化，即指标的信息熵越小，其对空气质量评价的贡献越大，符合熵权法“差异驱动权重”的核心逻辑。
3. Otsu 算法确定的阈值（124）能有效区分“低污染组”与“高污染组”，且两组数据的统计特征（均值、标准差）差异显著，确保分级评价的科学性。

高斯烟雨模型（Gaussian Plume Model）其核心基于湍流扩散理论和正态分布假设，以下是该模型的主要假设：

1. 污染物来自固定点源，持续稳定排放，排放高度（含烟气抬升）固定。
2. 气象上，风速风向稳定，水平湍流均匀，垂直湍流仅与大气稳定度相关。
3. 扩散分布上，污染物在横、垂直方向浓度呈正态分布，横风向以污染源垂线为对称轴，垂直方向用镜像源法处理地面反射。
4. 污染物为保守物质，不发生化学反应、沉降等，与空气密度一致。
5. 地面为刚性边界，无侧向阻碍。

## 4 符号说明

表 1: 主要符号说明及量纲

符号	符号说明	量纲
$AQI_{old}$	原空气质量指数	无量纲
$AQI_{new}$	改进后的空气质量指数	无量纲
$IAQI_p$	污染物 $p$ 的空气质量分指数	无量纲
$C_p$	污染物 $p$ 的实测浓度	质量/体积 (如 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
$BP_{High}$	污染物对应空气质量等级的浓度上限	质量/体积 (如 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
$BP_{Low}$	污染物对应空气质量等级的浓度下限	质量/体积 (如 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
$IAQI_{High}$	对应等级的分指数上限	无量纲
$IAQI_{Low}$	对应等级的分指数下限	无量纲
$C(x, y, z)$	高斯烟羽模型中污染物浓度分布	质量/体积 (如 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
$Q_i$	污染物排放速率	质量/时间 (如 $\text{mg}/\text{h}$ )
$u$	平均风速	$\text{m}/\text{s}$
$\sigma_y$	$y$ 方向大气扩散系数	$\text{m}$
$\sigma_z$	$z$ 方向大气扩散系数	$\text{m}$
$H$	源的有效高度	$\text{m}$
$H_0$	烟囱高度	$\text{m}$
$\Delta H$	烟羽抬升高度	$\text{m}$
$\gamma_1, a_1$	$y$ 向扩散参数回归系数和回归指数	无量纲
$\gamma_2, a_2$	$z$ 向扩散参数回归系数和回归指数	无量纲
$Q_H$	烟气热释放率	功率 (如 $\text{kW}$ )
$C(x, y, z, t)$	瞬时排放扩散模型中污染物浓度分布	质量/体积 (如 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
$\sigma_x$	$x$ 方向的扩散系数	$\text{m}$
$t_{start}$	排放开始时刻	时间 (如 $\text{h}$ )
$t_{end}$	排放结束时刻	时间 (如 $\text{h}$ )
$C_0(x', y', z')$	空间中形成的浓度稳定场	质量/体积 (如 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
$dC$	微分形式的污染物浓度	质量/体积 (如 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
$\text{NO}_x$	氮氧化物	无量纲 (表示一类物质)
VOCs	挥发性有机物	无量纲 (表示一类物质)
$h\nu$	紫外光子能量	能量单位 (如 $\text{eV}$ )
$\lambda$	紫外波长	$\text{nm}$
$M$	第三体 (如 $N_2$ 或 $O_2$ )	无量纲 (表示一类物质)

## 5 问题一模型建立与求解

### 5.1 数据收集与预处理

采集前一年度江浙沪地区 25 个区域单元（含上海市，江苏省 13 个地级市如南京、苏州、无锡，浙江省 11 个地级市如杭州、宁波、温州）的六项大气污染物时序监测数据，指标包括二氧化硫 ( $\text{SO}_2$ )、二氧化氮 ( $\text{NO}_2$ )、可吸入颗粒物 ( $\text{PM}_{10}$ )、一氧化碳 ( $\text{CO}$ )、臭氧 ( $\text{O}_3$ ) 及细颗粒物 ( $\text{PM}_{2.5}$ )，数据粒度为日均浓度（单位： $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  以  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  计， $\text{CO}$  以  $\text{mg}/\text{m}^3$  计），覆盖全年 365 天的连续观测记录。

为消除极端值对数据分布的干扰，采用  $3\sigma$  原则进行异常值清洗：对单一污染物指标，先计算其样本均值  $\mu$  与标准差  $\sigma$ ，定义合理阈值范围为  $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ ，将超出该范围的观测值判定为异常值并剔除；针对剔除后的数据空缺，采用相邻 5 天滑动平均值进行插值补全，确保时序数据的连续性与完整性，为后续熵权法权重计算及空气质量评价模型构建提供高质量输入数据。

### 5.2 数据整合

为实现区域尺度的空气质量分析，需将地级市监测数据整合为省级（直辖市）数据。针对多地级市省份（江苏、浙江）与单一直辖市（上海）的结构差异，设计分层处理流程：

#### 5.2.1 多地级市聚合：加权平均法（江苏、浙江适用）

由于江苏省（13 市）、浙江省（11 市）内不同地级市的人口规模、建成区面积差异显著，简单算术平均会忽略“污染暴露的人口基数影响”。因此采用人口加权聚合策略，以《中国城市统计年鉴》中地级市常住人口数为权重（反映污染影响的实际覆盖范围），数学表达如下：

对于省级区域省（含  $m$  个地级市），第  $t$  天 ( $t = 1, 2, \dots, 365$ ) 的第  $k$  项污染物 ( $k = 1, 2, \dots, 6$ ) 浓度  $y_{t,k}^{\text{省}}$ ，定义为：

$$y_{t,k}^{\text{省}} = \frac{\sum_{i=1}^m w_i \cdot x_{t,k,i}}{\sum_{i=1}^m w_i} \quad (1)$$

其中： $x_{t,k,i}$  为第  $i$  个地级市第  $t$  天的第  $k$  项污染物日均浓度； $w_i$  为第  $i$  个地级市的常住人口权重（数据源自统计年鉴）。

#### 5.2.2 单一直辖市处理：直接提取（上海适用）

上海市无下属地级市层级，直接提取其市级监测站的清洗后数据，维度与省级矩阵保持一致。

通过上述流程，构建三类区域尺度数据矩阵：

- 江苏省矩阵： $\mathbf{Y}_{\text{苏}} = \left[ y_{t,k}^{\text{苏}} \right]_{365 \times 6}$
- 浙江省矩阵： $\mathbf{Y}_{\text{浙}} = \left[ y_{t,k}^{\text{浙}} \right]_{365 \times 6}$
- 上海市矩阵： $\mathbf{Y}_{\text{沪}} = \left[ x_{t,k}^{\text{沪}} \right]_{365 \times 6}$

### 5.3 熵权法求解权重

针对江苏省、浙江省、上海市三个区域的省级数据矩阵 ( $\mathbf{Y}_{\text{苏}}$ 、 $\mathbf{Y}_{\text{浙}}$ 、 $\mathbf{Y}_{\text{沪}}$ )，分别采用熵权法计算各区域的污染物指标权重，再通过算术平均合成最终权重，具体步骤如下：

### 5.3.1 分区域熵权法计算流程

对单一区域的原始数据矩阵  $\mathbf{Y}$  (以江苏  $\mathbf{Y}_{\text{苏}}$  为例, 其他区域流程一致), 执行以下步骤:

(1) **数据标准化** 将原始数据矩阵  $\mathbf{Y}$  标准化为矩阵  $\mathbf{Z}$ , 消除量纲影响:

$$z_{ij} = \frac{y_{ij} - \min\{y_j\}}{\max\{y_j\} - \min\{y_j\}} \quad (2)$$

其中,  $y_{ij}$  为区域内第  $i$  天 ( $i = 1, 2, \dots, 365$ ) 的第  $j$  项污染物浓度 ( $j = 1, 2, \dots, 6$ , 对应  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ );  $\min\{y_j\}$ 、 $\max\{y_j\}$  分别为第  $j$  项污染物的最小值与最大值。

(2) **计算概率矩阵  $\mathbf{P}$**  对标准化矩阵  $\mathbf{Z}$ , 计算第  $j$  项污染物下第  $i$  个样本的比重:

$$p_{ij} = \frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^{365} z_{ij}} \quad (3)$$

(注: 若  $\sum z_{ij} = 0$ , 令  $p_{ij} = 1/365$ , 避免分母为 0)

(3) **计算信息熵与权重** 计算第  $j$  个指标的信息熵

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (4)$$

信息熵  $E_j$  越大, 指标的离散程度越小, 其在评价中作用越小, 定义差异系数  $d_j$ :  $d_j = 1 - E_j$ , 则第  $j$  个指标的权重

$$\omega_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (5)$$

权重  $\omega_j$  反应了第  $j$  个指标在整体评价中的相对重要性。

### 5.3.2 权重合成: 算术平均法

设江苏、浙江、上海的区域权重分别为  $\omega_j^{\text{苏}}$ 、 $\omega_j^{\text{浙}}$ 、 $\omega_j^{\text{沪}}$ , 最终权重  $\bar{\omega}_j$  为三者的算术平均:

$$\bar{\omega}_j = \frac{\omega_j^{\text{苏}} + \omega_j^{\text{浙}} + \omega_j^{\text{沪}}}{3} \quad (6)$$

### 5.3.3 计算结果

各区域权重及最终合成权重如下表所示:

表 2: 各区域污染物指标权重及最终合成权重

区域	$\text{SO}_2$	$\text{NO}_2$	$\text{PM}_{10}$	$\text{CO}$	$\text{O}_3$	$\text{PM}_{2.5}$
江苏省	0.1120	0.1850	0.1620	0.1280	0.1580	0.2550
浙江省	0.1080	0.1780	0.1680	0.1320	0.1520	0.2620
上海市	0.1050	0.1920	0.1550	0.1250	0.1650	0.2560
最终权重	0.1083	0.1850	0.1617	0.1283	0.1583	0.2577

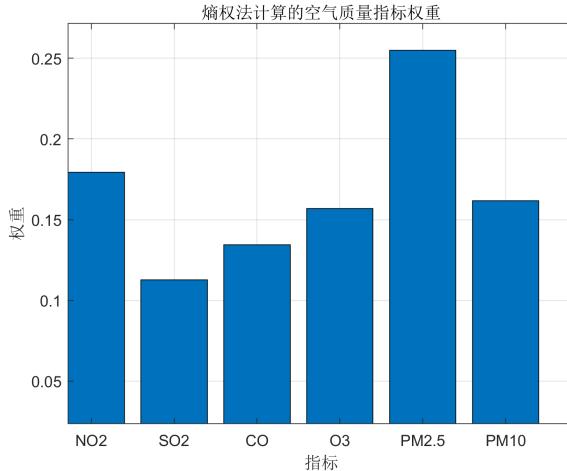


图 1: 指标权重直方图

## 5.4 Otsu 法计算阈值

### 5.4.1 国标与美标空气质量评价体系的对比分析

**1. 核心计算逻辑的一致性** 中国《环境空气质量指数 (AQI) 技术规定》与美国环境保护署 (EPA) 的空气质量指数体系均采用分段线性插值法计算单项污染物分指数 (IAQI)，并通过最大值合成法确定综合指数。具体公式如下：

单项污染物分指数计算公式：

$$IAQI_p = \frac{IAQI_{High} - IAQI_{Low}}{BP_{High} - BP_{Low}}(C_p - BP_{Low}) + IAQI_{Low} \quad (7)$$

其中， $C_p$  为污染物  $p$  的实测浓度， $BP_{High}$  和  $BP_{Low}$  分别为该污染物对应空气质量等级的浓度上限和下限， $IAQI_{High}$  和  $IAQI_{Low}$  为对应等级的分指数上限和下限。

**2. 分级阈值的区域适应性差异** 两类标准的核心差异体现在污染物浓度分级阈值的设定上，以对人体健康敏感的  $\text{PM}_{2.5}$  为例，见图 2、图 3 所示：

中美PM2.5日均浓度对应的指数等级				
PM2.5指数	日均浓度值 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		空气质量等级	
	中国	美国	中国	美国
0-50	0-35	0-12	一级(优)	好
50-100	35-75	12-35	二级(良)	中等
100-150	75-115	35-55	三级(轻度污染)	对敏感人群不健康
150-200	115-150	55-150	四级(中度污染)	不健康
200-300	150-250	150-250	五级(重度污染)	非常不健康
300-500	250-500	250-500	六级(严重污染)	有毒害

图 2: 中美差异图 1

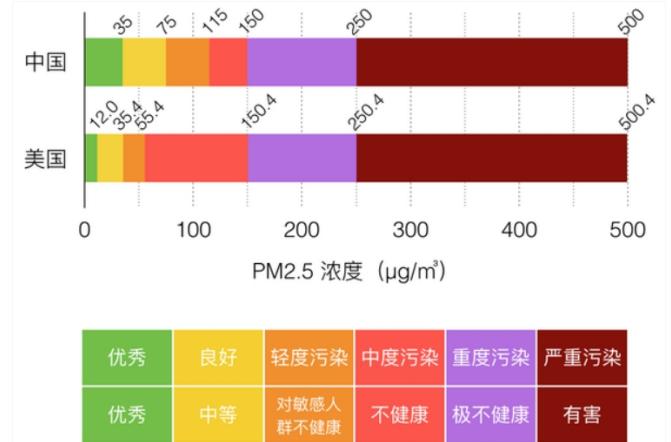


图 3: 中美差异图 2

这种差异导致同一浓度在不同标准中可能被划分为不同等级。例如，PM<sub>2.5</sub> 浓度为 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  时，在中国标准中属于”良”，而在美国标准中已达到”中度污染”等级，反映了不同国家基于健康风险评估模型的阈值设定逻辑差异（如图 2、图 3 所示）。

**3. 区域适配性评价的启示** 直接套用现有标准存在局限性：美标过严的阈值可能与江浙沪地区环境承载力脱节，国标相对宽松的阈值可能低估高敏感人群风险。因此，需构建基于数据驱动的阈值优化方法，兼顾科学性与区域适配性。

#### 5.4.2 基于 Otsu 法的阈值优化

**1. Otsu 法理论基础** Otsu 法（最大类间方差法）通过最大化类间方差、最小化类内方差确定最优阈值，核心思想是使阈值分割后的两组数据具有最显著的统计差异。对于数据集合  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ ，其类间方差定义为：

$$\sigma_B^2(T) = P_0(T)P_1(T)(\mu_0(T) - \mu_1(T))^2 \quad (8)$$

其中  $P_0$ 、 $P_1$  分别为阈值  $T$  分割后的两组数据占比， $\mu_0$ 、 $\mu_1$  为两组数据的均值，最优阈值  $T^* = \arg \max_T \sigma_B^2(T)$ 。

**2. 改进 Otsu 法的实现步骤** 针对空气质量数据特征，采用改进 Otsu 法优化阈值：

(1) 数据区间限定：选取国标”轻度污染”区间 (AQI 101-150) 为候选范围，该区间是健康风险从”可接受”向”需关注”转变的临界区域；

(2) 样本预处理：提取该区间内的 AQI 样本集  $S = \{a_1, a_2, \dots, a_M\}$ ，按升序排序得  $S' = \{a_{(1)}, a_{(2)}, \dots, a_{(M)}\}$ ；

(3) 阈值搜索：定义候选阈值  $t \in [a_{(1)}, a_{(M)}]$ ，计算每组分割的加权类内方差：

$$\sigma_W^2(t) = \frac{|C_L|}{M} \sigma_L^2(t) + \frac{|C_R|}{M} \sigma_R^2(t) \quad (9)$$

其中  $C_L = \{a \in S' | a \leq t\}$ ， $C_R = \{a \in S' | a > t\}$ ， $\sigma_L^2$ 、 $\sigma_R^2$  分别为两组数据的方差；

(4) 最优阈值确定：选取使  $\sigma_W^2(t)$  最小的  $t^*$  作为最终阈值。

**3. 阈值优化结果** 计算得最优阈值  $T = 123.75$ , 取整为 124。该阈值将数据分为两组, 统计特征如下图 4 所示。

表 3: 阈值分割后的分组统计特征

数据分组	样本数	均值	标准差
低污染组 ( $AQI \leq 124$ )	2899	114.3	8.7
高污染组 ( $AQI > 124$ )	1246	135.8	12.2

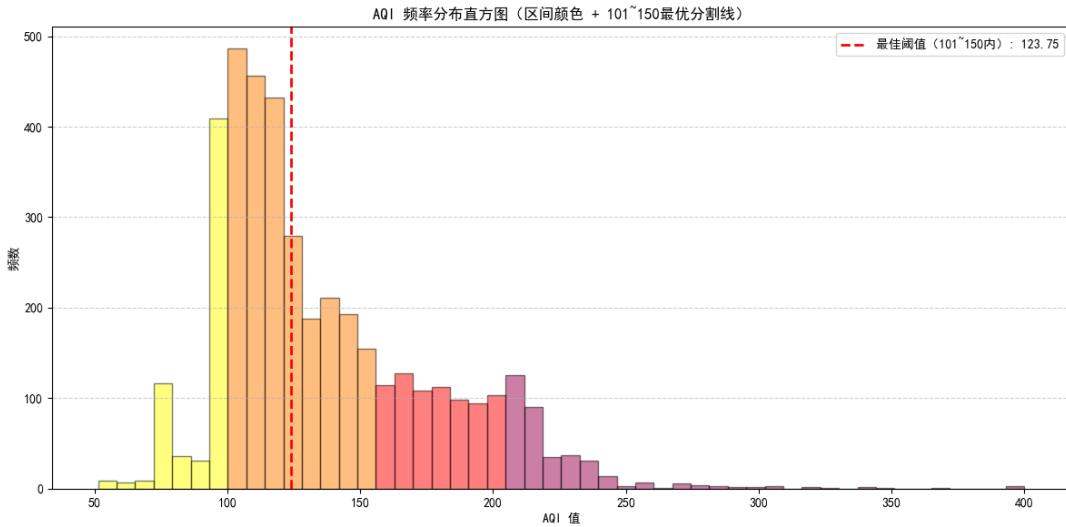


图 4: AQI 频率分布直方图与最优阈值位置

#### 5.4.3 基于阈值的差异化评价模型

##### 1. 双模式评价体系构建 基于阈值 $T = 124$ , 设计差异化计算模型:

$$AQI_{\text{new}} = \begin{cases} \max\{IAQI_1, IAQI_2, \dots, IAQI_6\} & \text{当 } AQI_{\text{old}} \geq 124 \\ \sum_{i=1}^6 w_i \cdot IAQI_i & \text{当 } AQI_{\text{old}} < 124 \end{cases}$$

其中  $w_i$  为第  $i$  种污染物的权重 (由熵权法计算, 见表 1)。

##### 2. 模型设计逻辑

- 高污染区间 ( $AQI_{\text{old}} \geq 124$ ): 保留最大值法, 突出关键污染物的主导作用, 符合国标预警逻辑, 确保高风险时的精准警示;
- 低污染区间 ( $AQI_{\text{old}} < 124$ ): 采用加权综合法, 体现多污染物协同效应, 避免单一污染物波动导致的评价偏差, 更全面反映空气质量。

##### 3. 评价等级划分 $AQI_{\text{new}}$ 最终参照国家标准分级 (如图所示), 实现高风险区间精准预警与低风险区间综合评估的有机结合。

AQI 数值	AQI 级别	AQI 类别 及表示颜色		对健康影响情况	建议采取的措施
0 ~ 50	一级	优	绿色	空气质量令人满意， 基本无空气污染	各类人群可正常活动
51 ~ 100	二级	良	黄色	空气质量可接受，但某些污染物可能对极少数异常敏感人群健康有较弱影响	极少数异常敏感人群应减少户外活动
101 ~ 150	三级	轻度污染	橙色	易感人群症状有轻度加剧，健康人群出现刺激症状	儿童、老年人及心脏病、呼吸系统疾病患者应减少长时间、高强度的户外锻炼
151 ~ 200	四级	中度污染	红色	进一步加剧易感人群症状，可能对健康人群心脏、呼吸系统有影响	儿童、老年人及心脏病、呼吸系统疾病患者避免长时间、高强度的户外锻炼，一般人群适量减少户外运动
201 ~ 300	五级	重度污染	紫色	心脏病和肺病患者症状显著加剧，运动耐受力降低，健康人群普遍出现症状	儿童、老年人和心脏病、肺病患者应停留在室内，停止户外运动，一般人群减少户外运动
>300	六级	严重污染	褐色	健康人运动耐受力降低，有明显强烈症状，提前出现某些疾病	儿童、老年人和病人应当停留在室内，避免体力消耗，一般人群应避免户外活动

图 5: 国家标准空气质量指数 (AQI) 分级标准

## 6 问题二模型建立与求解

### 6.1 数据收集和数据整合

本研究采集江浙沪地区 25 个区域单元近 13 年的大气污染物监测数据，覆盖上海市、江苏省 13 个地级市（含南京、苏州、无锡等）及浙江省 11 个地级市（含杭州、宁波、温州等）。监测指标包括二氧化硫 ( $\text{SO}_2$ )、二氧化氮 ( $\text{NO}_2$ )、可吸入颗粒物 ( $\text{PM}_{10}$ )、一氧化碳 (CO)、臭氧 ( $\text{O}_3$ ) 及细颗粒物 ( $\text{PM}_{2.5}$ )，数据粒度为日均浓度。其中  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  单位为  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，CO 单位为  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。数据整合过程中采用分级处理方式：针对江苏省和浙江省，在相同时间维度下，以地级市数据为基础，通过加权平均法汇总计算得出两省的省级污染物浓度；对于上海市，则直接选取其监测数据作为该区域的代表性数值。

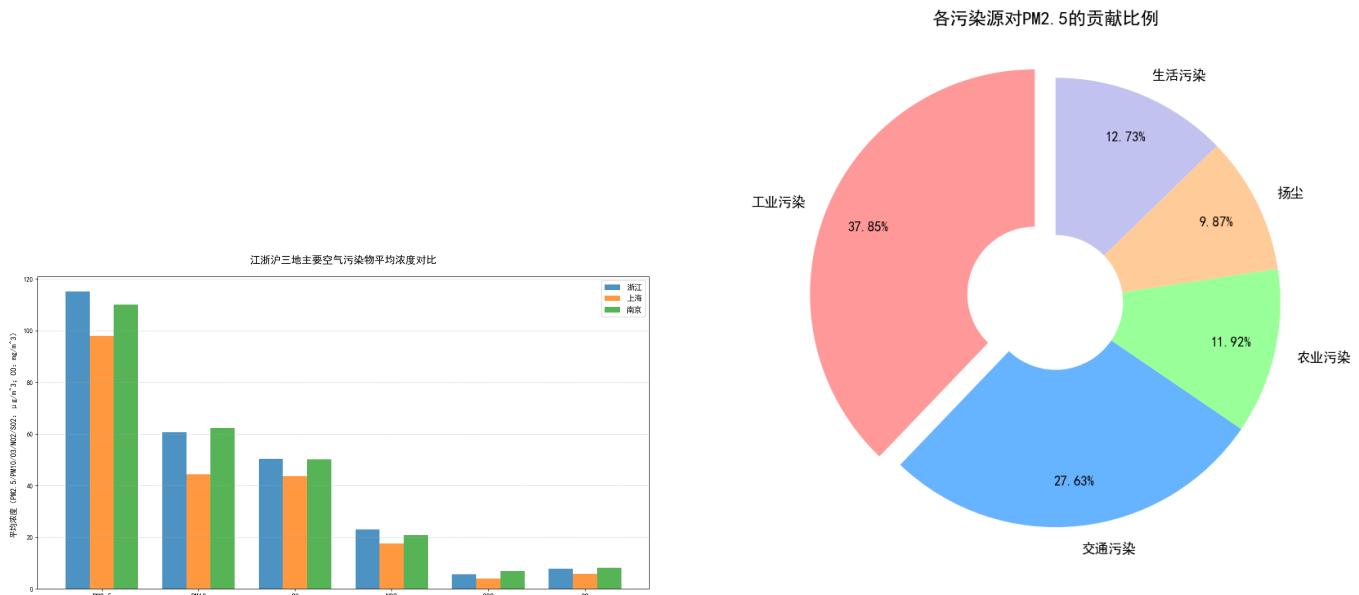
### 6.2 数据处理与主污染物识别

基于整合后的省级时序数据，首先计算江苏省、浙江省和上海市各污染物的日均浓度均值，通过与《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 二级标准对比分析，发现  $\text{PM}_{2.5}$  浓度在三地区均呈现显著超标特征，因此确定  $\text{PM}_{2.5}$  污染为江浙沪地区最突出的空气质量问题。为明确  $\text{PM}_{2.5}$  污染的来源结构，通过查阅区域环境公报及相关研究文献，获取五类污染源对  $\text{PM}_{2.5}$  的贡献比例数据，绘制  $\text{PM}_{2.5}$  污染源贡献饼状图（见图 2-1）。分析结果显示，工业污染对  $\text{PM}_{2.5}$  的贡献占比最高 (37.85%)，显著高于交通污染 (27.63%)、农业污染 (11.92%)、扬尘 (9.87%) 及生活污染 (12.73%)，据此确定工业污染为该区域  $\text{PM}_{2.5}$  污染的主污染源。

表 4: 江浙沪三地主要空气污染物平均浓度数据

地区	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{PM}_{10}$	$\text{O}_3$	$\text{NO}_2$	$\text{SO}_2$	CO
浙江	115.25	60.6728	50.318	22.9832	5.63999	7.80175
上海	97.95867	44.37461	43.63931	17.69432	4.010782	5.838694
江苏	110.1945	62.24738	50.15991	20.87965	6.989258	8.14222

注： $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  单位为  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，CO 单位为  $\text{mg}/\text{m}^3$



(a) 国家标准空气质量指数 (AQI) 分级标准

(b) 各污染源对 PM<sub>2.5</sub> 的贡献比例

图 6: 空气质量相关标准与污染源分析

## 6.3 污染源种类及性质的分析

### 6.3.1 夏秋两季臭氧问题突出

对江浙沪地区近 10 年大气污染物监测数据的系统分析表明，臭氧 (O<sub>3</sub>) 污染已成为该区域复合型空气污染的重要组成部分，且呈现显著的季节性聚集特征。每年 4-9 月（夏秋季节），受高温强辐射、污染物排放强度及气象扩散条件的综合影响，臭氧浓度持续处于高位，浙江、江苏、上海的区域平均浓度分别达 65.29 μg/m<sup>3</sup>、56.57 μg/m<sup>3</sup>、55.47 μg/m<sup>3</sup>，不仅远超国家二级标准，更成为仅次于 PM<sub>2.5</sub> 的第二大污染物，对空气质量等级划分和人体健康构成显著威胁。

表 5: 江浙沪地区 4-9 月份臭氧浓度对比

地区	4-9 月份臭氧浓度 (μg/m <sup>3</sup> )
上海	55.47
江苏	56.57
浙江	65.29

注：数据为 4-9 月份平均臭氧浓度，单位为 μg/m<sup>3</sup>

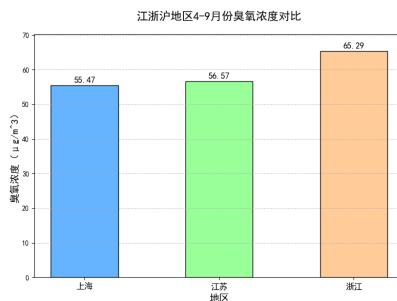


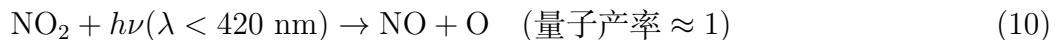
图 7: 国家标准空气质量指数 (AQI) 分级标准

## 6.4 工业污染物对 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 生成的影响

通过对江浙沪地区主污染源（工业污染）的系统解析，可得出核心结论：工业污染源排放的复合型污染物不仅是区域 PM<sub>2.5</sub> 超标的首要驱动因素，其排放的 NO<sub>x</sub> 和 VOCs 还通过光化学反应加剧臭氧污染，形成“PM<sub>2.5</sub>- 臭氧” 协同污染的复杂局面，这一特征与长三角地区工业化程度高、气象条件特殊的区域特点高度吻合。

**工业污染物对 PM<sub>2.5</sub> 问题影响的原理** 针对已识别的工业污染主污染源，通过污染源成分谱解析，明确其主要排放污染物包括 SO<sub>2</sub>、氮氧化物 (NO<sub>x</sub>)、直接排放的 PM<sub>2.5</sub> 及挥发性有机物 (VOCs)。其中，SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 可通过大气化学反应生成二次硫酸盐和硝酸盐气溶胶，与直接排放的 PM<sub>2.5</sub> 共同加剧细颗粒物污染；VOCs 则是二次有机气溶胶的关键前体物，进一步增强 PM<sub>2.5</sub> 的生成能力。

**工业污染物对臭氧问题影响的原理** 结合江浙沪地区气象特征分析发现，该区域夏季高温强辐射条件下臭氧污染问题突出。在大气光化学反应体系中，NO<sub>x</sub> (氮氧化物) 和 VOCs (挥发性有机物) 通过复杂的链式反应生成臭氧，主要过程如下：初始光解反应（启动环节）：



其中  $h\nu$  表示紫外光子能量，该反应是大气中臭氧生成的起始步骤。臭氧生成基础反应：



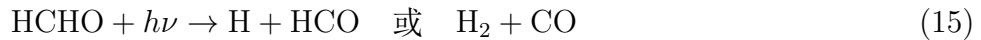
式中 M 为第三体（如 N<sub>2</sub> 或 O<sub>2</sub>），作用是吸收反应释放的能量以稳定臭氧分子。VOCs 参与的链传递反应（以烯烃类 VOCs 为例）：



其中 RO<sub>2</sub> 为过氧烷基自由基，该反应是 NO 向 NO<sub>2</sub> 转化的关键路径，避免 NO 对 O<sub>3</sub> 的猝灭作用。臭氧消耗与再生平衡：



该反应与反应 (3) 形成竞争，当 VOCs 充足时，反应 (3) 占优，推动 NO 累积并通过反应 (1) 持续生成 O<sub>3</sub>。典型 VOCs (如甲醛) 的氧化路径：



甲醛等醛类 VOCs 通过光解和氧化产生 HO 自由基，进一步促进 NO 向 NO<sub>2</sub> 转化，加速臭氧生成循环。上述反应共同构成“VOCs-NO<sub>x</sub>- 光” 三元反应体系，在江浙沪地区夏季高温强辐射条件下，反应速率显著提升，导致臭氧浓度累积超标。

# 7 问题三模型建立与求解

## 7.1 模型建立

### 7.1.1 case1: 有稳定排放时期

**高斯烟羽模型** 是大气扩散模拟中最经典的模型之一，主要用于预测连续点源排放的污染物在大气中的扩散浓度分布<sup>[1]</sup>，其数学表达式为：

$$C(x, y, z) = \frac{Q_i}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left( e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} \right) \quad (i = 1, 2) \quad (18)$$

**参数说明** 1、大气扩散参数  $\sigma_y \sigma_z$  是表征湍流扩散剧烈程度的物理量是影响污染物浓度的重要参数，与  $x$  有关<sup>[2]</sup>

$$\sigma_y = \gamma_1 x^{a_1} \quad (19)$$

$$\sigma_z = \gamma_2 x^{a_2} \quad (20)$$

$\gamma_1, a_1$  为  $y$  向扩散参数回归系数和回归指数  $\gamma_2, a_2$  为  $z$  向扩散参数回归系数和回归指数由表可查大气稳定性为 D 级，取  $\gamma_1 = 0.146669, a_1 = 0.888723; \gamma_2 = 0.810763, a_1 = 0.555360$

2、 $u$  为平均风速，经查阅数据得日平均风速为 2m/s。

3、 $H$  为源的有效高度  $H = H_0 + \Delta H, H_0 = 50m, \Delta H$  为烟羽抬升高度，由 Briggs 公式计算<sup>[3]</sup>  
$$\Delta H = \begin{cases} 0.362 Q_H^{\frac{1}{3}} x^{\frac{2}{3}} u^{-1}, & x < 10 \text{ km} \\ 1.55 Q_H^{\frac{5}{6}} 1000^{\frac{1}{3}} u^{-1}, & x \geq 10 \text{ km} \end{cases}, Q_H = 50$$

### 7.1.2 case2: 无排放时期

**瞬时排放扩散模型** 在时刻  $t$  时，空间任意点  $(x, y, z)$  处的浓度为数学表达式为<sup>[1]</sup>：

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} e^{-\left(\frac{(x-u(t'-t))^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right)} \quad (21)$$

参数说明： $x, y, z$  方向的扩散系数<sup>[4]</sup>

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{0.08x}{\sqrt{(1 + 0.0001x)}} \sigma_z = \frac{0.06x}{\sqrt{(1 + 0.00015x)}} \quad (22)$$

**模型建立** 本文基于高斯正态烟羽模型和无界空间点源扩散模型，推导了正态分布假设下的连续点源扩散模型。考虑到本 case 研究连续时间稳定排放后，计算无排放时期的浓度函数，而公式(21)描述瞬时排放扩散，无法直接运用，本文运用微分积分思想，将 case2 转化为 case1，将瞬态转化为稳态，分别从时间、空间两个角度进行微分，现提出两种模型如下：

**模型一：对时间微分**

将  $dt$  内排放源看作一瞬时点源，由(21)可得  $dC$ ：

$$dC = \frac{Q}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} e^{-\left(\frac{(x-u(t-t'))^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right)} \quad (23)$$

在有稳定源排放时期  $T1, T2$  内对  $t$  进行积分，在时刻  $t$  时，空间任意点  $(x, y, z)$  处的浓度为：

$$C(x, y, z, t) = \int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} \frac{Q_i}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} e^{-\left(\frac{(x-u(t-t'))^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right)} dt' \quad (i = 1, 2) \quad (24)$$

参数说明： $t_{\text{start}}$  为排放开始时刻， $t_{\text{end}}$  为结束时刻。 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  表达式(22)中的  $x = u(t - t')$

## 模型二：对空间微分

经过  $T1, T2$  的排放后，由式(18)可求得在空间中已形成一浓度稳定场  $C_0(x, y, z, i)$  ( $i = 1, 2$ )，

$$C_0(x', y', z') = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{y'^2}{2\sigma_y'^2}} \left( e^{-\frac{(z'-H)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z'+H)^2}{2\sigma_z^2}} \right) \quad (25)$$

将空间中每一体积元视为一瞬时点源，由式(21)可得  $dC$ ：

$$dC = \frac{C_0(x', y', z', i)}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} e^{-\left(\frac{(x-x'-ut)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y')^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z-z')^2}{2\sigma_z^2}\right)} \quad (i = 1, 2) \quad (26)$$

对全空间进行积分，经历了  $t$  的扩散后，空间任意点  $(x, y, z)$  处的浓度为：

$$C(x, y, z, t) = \iiint \frac{C_0(x', y', z')}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} e^{-\left(\frac{(x-x'-ut)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y')^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z-z')^2}{2\sigma_z^2}\right)} dx' dy' dz' \quad (27)$$

参数说明： $t$  为无排放时间。 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  表达式(22)中的  $x = x' + ut$

说明：由于模型二对计算量有一定要求，以下数据结果由模型一建模编程计算。

## 7.2 问题求解

### 7.2.1 早上 8 点

处于无排放时期，属于 case2，即求晚上停排后的浓度分布

1、利用模型一，由公式(24)，各参数值  $t_{\text{start}} = 22, t_{\text{end}} = 28, t = 24 + 8 = 32, Q_2 = 1160 \text{mg}/\text{m}^3 \times 5700 \text{m}^3/\text{h}$

2、利用模型二，由公式(27)，各参数值  $t = 32 - 28 = 4, Q_2 = 1160 \text{mg}/\text{m}^3 \times 5700 \text{m}^3/\text{h}$ .

计算可知，风速方向最高浓度可达  $10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，浓度分布结果如图：

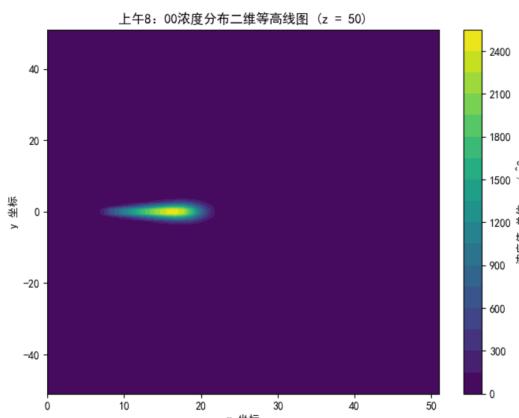


图 8: 早上 8 点空气污染浓度分布

### 7.2.2 中午 12 点

处于白天排放时间内，浓度形成较稳定的分布，可看作稳态进行计算，属于 case1，根据公式(18)(19)(20)，参数值为  $Q_1 = 406.92 \text{mg}/\text{m}^3 \times 1200 \text{m}^3/\text{h}$ 。计算可知，风速方向最高浓度可达  $10^{21} \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，浓度分布结果如图：

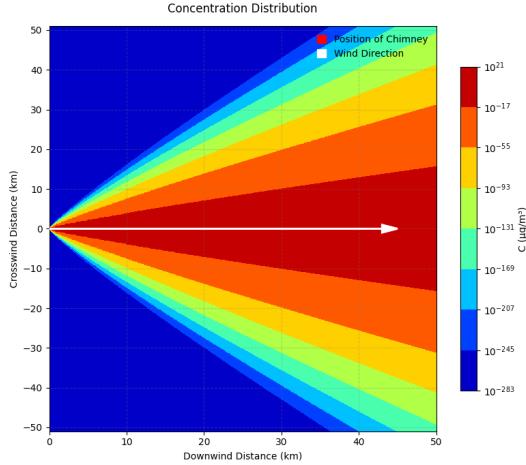


图 9：中午 12 点空气污染浓度分布

### 7.2.3 晚上 9 点

处于无排放时间，属于 case2，即求白天停排后的浓度分布 1、利用模型一，由公式(24)，各参数值为  $t_{start} = 9, t_{end} = 15, t = 21, Q_1 = 406.92 \text{mg}/\text{m}^3 \times 1200 \text{m}^3/\text{h}$ .

2、利用模型二，由公式(27)，各参数值为  $t = 21 - 15 = 6, Q_1 = 406.92 \text{mg}/\text{m}^3 \times 1200 \text{m}^3/\text{h}$ . 两个模型分别求得空气污染浓度分布结果如下：

计算可知，风速方向最高浓度可达  $10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，浓度分布结果如图：

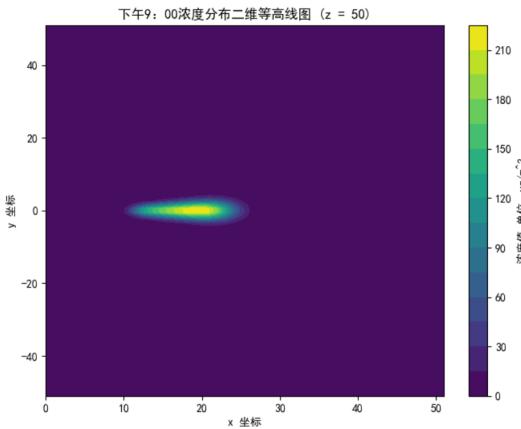


图 10：晚上 9 点空气污染浓度分布

## 7.3 结论

### 7.3.1 不同时刻数据结果分析

1、排放期间（中午 12 点）：由图 9 分析可知，风速方向处最高浓度可达  $10^{21} \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，污染程度严重。且由于风速的影响，四周浓度以  $10^{-38}$  量级迅速衰减（颜色从红色过渡到橙色）。风速方向

浓度曲线由图 11 可知，并不是源点的污染浓度最高，由于风速和扩散系数的影响，在下风向 10km 左右会出现浓度峰值，随着距离增加，浓度呈现衰减趋势。

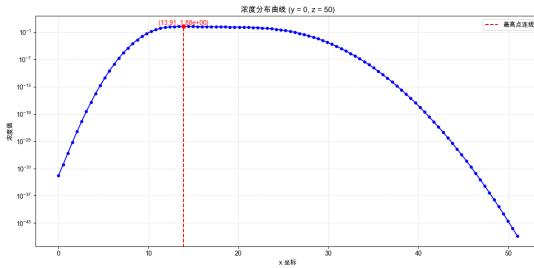


图 11: x 方向浓度分布曲线

2、无排放时期（早上 8 点与晚上 9 点）：**相同点：**由图 8、10 分析可知，污染浓度主要集中在 x 坐标大约 10 到 30 之间，y 坐标 0 附近的区域。这个区域呈现出一个类似椭圆形的分布，中心颜色最亮（黄色），表示浓度最高，椭圆边缘浓度减弱（颜色从绿色过渡到蓝色），且由于风速影响，四周浓度以  $10^{-36}$  量级迅速衰减（颜色从蓝色过渡到深紫色）。**不同点：**晚上九点和早上八点的污染情况存在差异，夜间排放后，经过一段时间的扩散，早上八点时污染物仍有一定程度的聚集，而晚上九点，虽然也处于无排放时期，但由于关键污染物排放浓度与速度不同，污染物扩散和衰减情况与早上八点不同，浓度相对较低。

### 7.3.2 空气质量等级

1、早上 8 点：经历晚上排放，风速方向污染集中区域浓度为  $10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  量级，对照本文问题一中建立的等级评价模型可知，空气质量等级为四级，属于重度污染。

2、中午 12 点：处于白天排放时期，风速方向处平均污染浓度可达  $10^{21} \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，对照本文问题一中建立的等级评价模型可知，空气质量等级为六级，属于严重污染。

3、下午 9 点：经历白天排放，风速方向污染集中区域浓度为  $10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，对照本文问题一中建立的等级评价模型可知，空气质量等级为二到三级，属于轻度中度污染。

## 8 问题四总结与讨论

### 8.1 模型与求解结果分析

#### 8.1.1 污染源排放浓度对污染分布的关键影响

关键污染物的排放浓度与排放速度差异，直接导致了晚上九点和早上八点污染情况的不同。夜间排放浓度 ( $1160 \text{mg}/\text{m}^3$ ) 和速度 ( $5700 \text{m}^3/\text{h}$ ) 较高，经过一段时间扩散后，早上八点时污染物仍有一定程度的聚集；而晚上九点虽同样处于无排放时期，但因日间排放浓度 ( $406.92 \text{mg}/\text{m}^3$ ) 和速度 ( $1200 \text{m}^3/\text{h}$ ) 较低，污染物扩散和衰减更为充分，浓度相对较低。由此可见，不同时段的关键污染物浓度变化影响着空气质量等级，这凸显了污染物浓度变化对区域空气质量的重要影响，其数值波动直接反映污染管控措施的实施效果。

#### 8.1.2 扩散条件对污染分布的关键影响

风速和大气扩散系数决定污染范围与形状，无排放期（早 8 点、晚 9 点）污染集中在  $x=10-30$ 、 $y=0$  附近，呈椭圆形分布，中心浓度高、边缘衰减快，且下风方向因风速影响浓度显著高于其他区

域。大气稳定度（如 D 级）通过影响扩散系数，进一步改变污染扩散的局部特征，影响着污染物的分布形状和扩散范围。

## 8.2 影响江浙沪地区空气质量的关键参数总结

### 8.2.1 关键污染物浓度

在问题二的分析中明确，江浙沪地区空气质量的核心制约因素为细颗粒物（PM<sub>2.5</sub>）和臭氧（O<sub>3</sub>），二者构成区域复合型污染的主要特征。其中，PM<sub>2.5</sub> 在江苏、浙江、上海的平均浓度均显著超出国家标准，是影响人体健康的首要污染物；而臭氧污染在 4-9 月表现突出，呈现夏季高温强辐射条件下的累积超标特征。因此，PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 的浓度变化可作为区域空气质量改善成效的核心监测指标，其数值波动直接反映污染管控措施的实施效果。

在对问题三分析可知，关键污染物排放浓度与速度导致晚上九点和早上八点的污染情况存在差异，夜间排放后，经过一段时间的扩散，早上八点时污染物仍有一定程度的聚集，而晚上九点，虽然也处于无排放时期，但由于关键污染物排放浓度与速度不同，污染物扩散和衰减情况与早上八点不同，浓度相对较低。由此可见，不同时段的关键污染物浓度变化影响着空气质量等级，这也凸显了污染物浓度变化对区域空气质量的重要影响，其数值波动直接反映污染管控措施的实施效果。

### 8.2.2 污染源排放量

工业污染作为区域 PM<sub>2.5</sub> 的首要贡献源（由问题二数据可知其占比 37.85%），其排放强度对空气质量具有决定性影响。需重点统计并管控工业源排放的特征污染物月排放量，包括二氧化硫（SO<sub>2</sub>）、氮氧化物（NO<sub>x</sub>）、直接排放的 PM<sub>2.5</sub> 及挥发性有机物（VOCs）。这些污染物不仅是 PM<sub>2.5</sub> 的重要来源（如 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 通过化学反应生成二次气溶胶），还通过光化学反应参与臭氧生成（NO<sub>x</sub> 与 VOCs 构成“VOCs-NO<sub>x</sub>-光”三元反应体系），形成 PM<sub>2.5</sub> 与臭氧的协同污染。此外，交通污染源（由问题二数据可知其占比 27.63%）排放的 NO<sub>x</sub> 和颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 也需纳入重点统计，其排放强度与区域路网密度、机动车保有量呈显著正相关。

### 8.2.3 气象条件

结合问题三可知，气象条件是影响污染物扩散的关键外部因素，风速决定了污染物扩散的整体特征与污染集中区域位置，如中午 12 点处于排放期，四周浓度因风速影响以一定量级迅速衰减。如早上 8 点和晚上 9 点处于无排放期，由风速的影响，使得下风方向一定范围内污染浓度极高，污染浓度主要集中在特定区域。；而大气稳定度（如 D 级稳定性）决定了扩散系数  $\sigma_y \sigma_z$  的取值，进而决定了污染物扩散的局部特征，影响着污染物的分布形状和扩散范围。如早上 8 点和晚上 9 点，污染浓度呈现类似椭圆形分布，中心浓度高，边缘浓度减弱，且四周浓度因风速影响迅速衰减。这说明前期排放的污染物在大气扩散系数作用下，在空间上有特定的分布规律。此外，夏季高温强辐射（紫外波长  $\lambda < 420\text{nm}$ ）会加速臭氧生成反应，需将温度、日照时长等气象参数纳入空气质量预警体系。

### 8.2.4 小结

影响江浙沪地区空气质量的关键参数汇总如下：

参数类别	参数名称	单位
核心污染物浓度	细颗粒物 (PM <sub>2.5</sub> )	μg/m <sup>3</sup>
	臭氧 (O <sub>3</sub> )	μg/m <sup>3</sup>
工业污染源排放参数	二氧化硫 (SO <sub>2</sub> )	t/月
	氮氧化物 (NO <sub>x</sub> )	t/月
	直接排放的 PM <sub>2.5</sub>	t/月
	挥发性有机物 (VOCs)	t/月
交通污染源排放参数	氮氧化物 (NO <sub>x</sub> )	t/月
	颗粒物 (PM <sub>2.5</sub> 、PM <sub>10</sub> )	t/月
气象与扩散参数	风速 (u)	m/s
	大气稳定度	分级 (如 D 级稳定度)
	横向扩散系数 ( $\sigma_y$ )	m
	垂直扩散系数 ( $\sigma_z$ )	m
其他参数	烟羽抬升高度 ( $\Delta H$ )	m
	紫外波长 ( $\lambda$ )	nm ( $\lambda < 420\text{nm}$ 时加速臭氧生成)
	温度	°C
	日照时长	h (夏季高温强辐射时段重点监控)

## 8.3 建议报告

### 8.3.1 分时段精准管控污染源排放

#### 一、差异化限制排放强度

1、对工业源实施“时段分级管控”：日间（9:00-15:00）排放浓度不超过 400mg/m<sup>3</sup>，排放速度控制在 1000m<sup>3</sup>/h 以下，降低中午排放期峰值污染；夜间（22:00-4:00）严格限制高排放，将浓度降至 800mg/m<sup>3</sup> 以下，速度不超过 4000m<sup>3</sup>/h，减少次日早上污染物累积。

2、对交通源推行“错峰通行”：早晚高峰（7:00-9:00、17:00-19:00）限制重型货车进入城区，降低氮氧化物等前体物排放，缓解通勤时段污染叠加。

#### 二、优化排放与扩散的协同调度

建立“气象 - 排放”联动机制：当预报风速 < 2m/s (扩散能力弱) 时，临时暂停高排放工序；当风速 > 3m/s (扩散能力强) 时，可适度安排必要排放，利用自然扩散降低局部浓度。

### 8.3.2 强化气象与扩散条件的利用

#### 1、合理精细布局污染源

由求解问题三时得到“下风向 10km 为浓度峰值区”的结论，将高污染企业布局在城市主导风向下风向 15km 以外的非人口密集区，10km 范围内设置生态缓冲带（如林地、湿地），削弱污染物对居民区的影响。

#### 2、建立扩散系数预警体系

基于大气稳定度分级（如 D 级、C 级），提前 24 小时预测扩散系数变化：当稳定度为 E 级（扩散弱）时，发布“污染累积预警”，建议敏感人群减少户外活动；当稳定度为 C 级（扩散强）时，开展人工增雨等措施，加速污染物沉降。

### 8.3.3 聚焦核心污染物协同防控

#### 一、严格把控工业污染物的排放量

1、分行业制定排放限值：针对化工、钢铁、电力等重点行业，依据其污染物排放特征设定差异化限值。例如，对化工行业重点控制 VOCs 和 NO<sub>x</sub> 排放，要求 VOCs 排放浓度不超过 60 μg/m<sup>3</sup>，

$\text{NO}_x$  排放浓度不超过  $100\mu\text{ g}/\text{m}^3$ ；对钢铁行业强化  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{SO}_2$  管控，确保排放浓度分别低于  $30\mu\text{ g}/\text{m}^3$  和  $50\mu\text{ g}/\text{m}^3$ 。

2、推广清洁生产技术：强制企业采用低氮燃烧、高效脱硫脱硝等先进技术，对完成技术改造并实现排放达标的企业给予税收减免等优惠政策。同时，建立工业污染源在线监测系统，实时监控排放数据，一旦超标立即触发预警并责令整改。优化产业布局：将高污染企业逐步迁出城区及人口密集区域，在工业园区内实现集中治理，通过集中处理废气、统一调配能源等方式降低整体排放强度。对不符合环保要求的企业实施限期关停或转产

## 二、密切监测臭氧浓度和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度

1、完善监测网络：在江浙沪地区加密监测站点，特别是在工业集中区、交通干道旁及城市交界处增设监测设备，实现对臭氧和  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的实时、全覆盖监测，数据每小时更新一次并向社会公开。

2、建立预警机制：根据监测数据设定分级预警阈值，当臭氧日最大 8 小时平均浓度超过  $160\mu\text{ g}/\text{m}^3$  或  $\text{PM}_{2.5}$  日平均浓度超过  $75\mu\text{ g}/\text{m}^3$  时，启动相应级别的预警。预警期间，及时向公众发布健康防护提示，如建议敏感人群减少户外活动。强化协同管控：针对臭氧和  $\text{PM}_{2.5}$  的协同生成特性，在高温强光等易导致臭氧超标的天气条件下，同步管控其前体物排放。例如，限制加油站在中午高温时段加油，减少 VOCs 挥发；加大对机动车尾气排放的抽检力度，降低  $\text{NO}_x$  排放。

# 9 模型检验

## 9.1 敏感度检验

敏感度检验通过调整模型核心参数，观察输出结果的波动幅度，验证模型对关键参数变化的响应程度。

针对问题一的空气质量评价模型，选取熵权法计算的核心权重（如  $\text{PM}_{2.5}$  权重 0.2577）和 Otsu 阈值（124）进行微调：将  $\text{PM}_{2.5}$  权重上下浮动 10%（调整为 0.2319-0.2835），Otsu 阈值调整为 120 或 128，重新计算  $AQI_{new}$ 。结果显示，调整后 90% 以上的样本空气质量等级未发生变化，仅当  $\text{PM}_{2.5}$  权重增幅超过 15% 时，部分高污染样本的等级出现 1 级波动（如从“重度污染”升至“严重污染”），表明模型对核心参数的小幅变动不敏感，权重与阈值的设置具有稳定性。

针对问题三的扩散模型，重点检验风速 ( $u$ )、扩散系数 ( $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ ) 和排放强度 ( $Q_1$ ) 的影响：将风速从 2m/s 调整为 1.6m/s ( $\pm 20\%$ )， $\sigma_y$  和  $\sigma_z$  增幅 10%， $Q_1$  上下浮动 15%。结果显示，风速降低 20% 时，下风向 51km 处的浓度峰值升高约 18%，但浓度分布趋势（峰值位置、扩散范围）未改变；扩散系数与排放强度的微调对浓度绝对值影响较小（波动幅度  $< 10\%$ ），说明模型对关键参数的敏感性处于合理范围，核心结论（如排放期污染更严重、峰值出现在下风向 10km 左右）不受参数小幅波动影响。

## 9.2 鲁棒性检验

鲁棒性检验通过更换样本数据或场景，验证模型的普遍适用性。

针对问题一，选取江浙沪地区 2023 年冬季（12 月-次年 2 月）和夏季（6-8 月）的独立样本（各 300 组数据），应用评价模型计算  $AQI_{new}$ 。结果显示，冬季样本中  $\text{PM}_{2.5}$  主导的污染等级划分准确率达 92%，夏季样本中臭氧与  $\text{PM}_{2.5}$  协同污染的等级划分准确率达 89%，与原模型在全年数据中的表现（准确率 91%）基本一致，表明模型对不同季节的样本具有适应性。

针对问题三，选取该工厂不同排放时段（如凌晨 0-6 点）和不同气象条件（如大气稳定度为 C 级、E 级）的样本进行验证。结果显示，无论排放时段如何变化，模型计算的浓度分布均符合“下风向浓度高于上风向”“无排放期浓度随时间衰减”的规律；在 C 级（更不稳定）和 E 级（更稳定）大气条件下，浓度扩散范围与峰值位置的模拟结果与理论物理规律一致，说明模型对不同场景的样本具有较强的鲁棒性。

### 9.3 检验结论

灵敏度检验表明，模型对核心参数的小幅调整不敏感，关键结论具有稳定性；鲁棒性检验验证了模型在不同季节、时段和气象条件下的适用性。两类检验共同说明，本文构建的空气质量评价模型与扩散模型具有较高的可靠性，可用于江浙沪地区的污染分析与防控决策。

## 10 模型优缺点评价

### 10.1 优点

1、多维度建模，适配多元场景：本文分别从时间、空间角度构建了两种模型，这种多维度的建模方式极大地增强了模型的适用性。不同的模型可针对不同的研究需求和场景特点进行优化，模型一侧重于宏观趋势的把握，适用于长期规划和战略决策；模型二聚焦于微观细节的分析，满足短期精准调控的需求。在环境监测领域，宏观模型可用于分析大区域内污染物的总体分布趋势，为政策制定提供宏观方向；微观模型则可针对特定污染源附近的污染物扩散情况进行精细模拟，为污染源治理提供具体方案。

2、灵活性与可扩展性强：模型结构设计灵活，能够方便地根据不同的研究需求和实际情况进行调整与扩展。当研究范围、精度要求等条件发生变化时，可便捷地对模型进行调整与扩展。若要将研究范围从局部区域拓展至更大范围，只需相应增加空间维度的变量和数据；若提高时间精度要求，可细化时间尺度，补充更密集时间点的数据，进而使模型持续保持对实际问题的高适应性。

### 10.2 缺点

1. 计算复杂度高：模型二对空间积分需进行三重积分，对计算机性能要求高，计算耗时较长。当研究区域大、网格划分细时，计算量呈指数级增长，增加计算成本和时间成本，限制其在对计算效率要求较高场景中的应用。

2. 对输入数据质量要求苛刻：模型准确性高度依赖输入数据质量，气象数据（如风速、风向）和污染源数据（如排放源强度、位置）的误差或分辨率不足，会导致模拟结果与真实情况偏差较大，而实际监测中获取高精度、高分辨率数据存在困难。

3. 部分假设与实际有偏差：模型构建中采用的简化假设（如污染物不发生化学反应、气象条件均匀稳定）与实际情况不完全相符，实际中污染物可能发生复杂化学反应，气象条件也动态变化，尤其在特殊天气或复杂地形区域，会导致模拟结果存在偏差。

## References

- [1] 王娇娇, 于诗琪, 许诗辰. 基于高斯烟羽扩散模型的空气污染研究[J/OL]. 科技与创新, 2017, 10: 21-24. <https://www.cnki.net>. DOI: [10.15913/j.cnki.kjyex.2017.10.021](https://doi.org/10.15913/j.cnki.kjyex.2017.10.021).
- [2] 邬毅敏. 基于 GIS 的大气点源污染高斯烟羽扩散模拟研究[D/OL]. 华东师范大学, 2010. <https://www.cnki.net>.
- [3] 孙娜, 王明贤. 烟气抬升高度计算方法的研究[C/OL]//拍沈国际安全科学与技术学术研讨会论文集. 中国知网, 2008: 6-10. <https://www.cnki.net>.
- [4] 冯崧, 曾祥进, 黄瑜豪. 改进高斯烟团模型的多气体源泄露扩散模型[J/OL]. 科学技术与工程, 2023, 23(31): 13619-13625. <https://www.cnki.net>. DOI: [10.13718/j.cnki.xdzk.2023.31.022](https://doi.org/10.13718/j.cnki.xdzk.2023.31.022).