

王玲玲, 欧奕含, 刘霏薇, 等. 基于智能算法的PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>气象扩散等级研究:以自贡为例[J]. 环境科学与技术, 2025, 48(11): 142-154. Wang Lingling, Ou Yihan, Liu Aiwei, et al. Research on PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> meteorological diffusion levels based on intelligent algorithms: a case study of Zigong City[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48(11): 142-154.

# 基于智能算法的PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>气象扩散等级研究: 以自贡为例

王玲玲<sup>1,2</sup>, 欧奕含<sup>1,2\*</sup>, 刘霏薇<sup>1,2</sup>, 邓欢<sup>1,2</sup>, 罗伟<sup>1,2</sup>,  
喻琴昆<sup>1,2</sup>, 卢晓宁<sup>3</sup>, 邹长武<sup>2,3</sup>

(1. 自贡市气象局, 四川 自贡 643000;

2. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610000;

3. 成都信息工程大学资源环境学院, 四川 成都 610000)

**摘要:**为解决大气污染物气象扩散等级精细预报较欠缺现状,文章以四川盆地自贡市为例,基于气象和遥感气溶胶光学厚度(AOD),采用加速遗传算法的投影寻踪模型(RAGA-PPC)探索建立PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>浓度扩散等级的气象指标和预报方法。结果表明:(1)AOD空间分布呈西低东高态势,与PM<sub>2.5</sub>浓度季节趋势较为一致,呈冬季高、夏季低特征;O<sub>3</sub>浓度空间分布季节差异明显,呈秋冬季低、春夏季高特征。(2)智能算法筛选出影响PM<sub>2.5</sub>浓度的气象要素冬季表现更明显;影响O<sub>3</sub>浓度的气象要素夏季更突出。(3)气象扩散等级拟合结果与实况较为吻合,夏季O<sub>3</sub>、冬季PM<sub>2.5</sub>浓度的拟合等级正确率高达90.00%以上。(4)RAGA-PPC模型对未来1~7 d的空气污染物扩散等级具有可预报性,数值预报的稳定性和准确率与拟合等级的优劣程度关系密切。

**关键词:**PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>浓度; 气溶胶光学厚度; 气象指标; 气象扩散等级

中图分类号:X513 文献标志码:A doi:10.19672/j.cnki.1003-6504.0394.25.338 文章编号:1003-6504(2025)11-0142-13

## Research on PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> Meteorological Diffusion Levels Based on Intelligent Algorithms: a Case Study of Zigong City

WANG Lingling<sup>1,2</sup>, OU Yihan<sup>1,2\*</sup>, LIU Aiwei<sup>1,2</sup>, DENG Huan<sup>1,2</sup>, LUO Wei<sup>1,2</sup>,  
YU Qinkun<sup>1,2</sup>, LU Xiaoning<sup>3</sup>, ZOU Changwu<sup>2,3</sup>

(1. Zigong Meteorological Bureau, Zigong 643000, China;

2. Sichuan Provincial Key Lab for Rain-storm/Drought/Flood Disasters in Plateau and Basin, Chengdu 610000, China;

3. College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** To address the present inadequacy of precise-level forecasting of atmospheric pollutant diffusion, a projection pursuit model based on accelerated genetic algorithm (RAGA-PPC) was developed by use of the meteorological and remote sensing aerosol optical thickness (AOD) to explore setting-up of meteorological indicators and forecasting methods concerning the concentration diffusion levels of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> suitable for Zigong, a city situated in the Sichuan Basin. The results suggest the spatial distribution of AOD shows a trend of low in the west and high in the east of the city, which is consistent with the seasonal trend of PM<sub>2.5</sub>, with a characteristic of high in winter and low in summer; while the spatial distribution of O<sub>3</sub> concentration has significant seasonal differences: low concentrations in autumn and winter and high in spring and summer. Intelligent algorithms filter out meteorological elements that affect PM<sub>2.5</sub> concentration, and their winter performance is more pronounced. The meteorological factors that affect O<sub>3</sub> concentration are more prominent in summer. As to hierarchical accuracy verification, the fitting results of meteorological diffusion levels match the actual situation well, with a fitting accuracy of over 90.00% in terms of O<sub>3</sub> concentration in summer and PM<sub>2.5</sub> concentration in winter; and the model of RAGA-PPC is characterized with the predictability of air-pollutants diffusion level in the future period 1~7 days, and the stability and accuracy.

《环境科学与技术》编辑部: (网址)http://fjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期:2025-03-04;修回 2025-04-21

基金项目:风云卫星应用现行计划项目(FY-APP-2024.0404);国家自然科学基金面上项目(41471305);高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金项目(SCQXKJQN202209);自贡市气象局科学技术重点课题(ZGKY-2025-02)

作者简介:王玲玲(1986-),女,高级工程师,硕士,研究方向为大气污染影响评价等,(电子信箱)serena0612@foxmail.com;\*通讯作者,(电子信箱)617951557@qq.com。

cy of numerical forecasting are closely related to the goodness of the fitting levels.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> concentrations; aerosol optical depth; meteorological elements; meteorological diffusion level

工业发展、能源消耗、机动车和人口数量日益增加,加之气候和地理等自然条件限制,给大气环境质量带来了重大压力<sup>[1,2]</sup>,呈现以PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>为主要污染物的快速蔓延性和影响区域性的复合型大气污染特征。四川盆地为空气污染严重地区之一,自贡是一座老工业城市,地处四川盆地南部,近年以PM<sub>2.5</sub>为首要空气污染物浓度增幅多位于四川省甚至全国前列<sup>[3]</sup>,且以O<sub>3</sub>为首要污染物的污染事件频发,已成为继PM<sub>2.5</sub>之后影响城市环境空气质量的重要污染物,其浓度、暴露时间与人体健康有着较强的相关性,也能够影响自然植被、作物的正常生长<sup>[4]</sup>。

大气污染物浓度变化与污染源分布、外源输送、本地气象条件均密切相关<sup>[5]</sup>,学者在研究PM<sub>2.5</sub>浓度涉及的影响因素不外有AQI、气象因素和供暖时间等<sup>[6,7]</sup>,较少建立模型时考虑季节这个解释变量,且少有结合多年数据对空气污染物的波动趋势等进行分析<sup>[8]</sup>。针对高浓度O<sub>3</sub>污染事件,国内外学者考虑了前体物浓度占比和气象因素等<sup>[9]</sup>。重污染事件的形成、发展、消亡由排放和湿沉降、传输扩散等物理化学过程决定;其中人为排放是内因,气象特征是外因;当污染排放源相对稳定,突发污染事件和季节性污染特征往往归结于气象因素<sup>[5]</sup>。目前大气质量研究多集中于我国北方及西北地区,对西南地区的大气质量监测特征、扩散等级等研究仍较少<sup>[5]</sup>。从四川盆地因云、雾和霾覆盖等严重性上看,说明适用于该地区高效、高精度的空气污染扩散条件等级研究十分必要。

与常规的地面监测手段相比,卫星遥感覆盖区域更广,可快速收集地表时间动态和空间变化信息,实现不同区域尺度、全方位连续动态监测。有研究指出气溶胶粒子是影响空气质量的重要因素,在降低空气能见度方面能力较其他大小的颗粒物更强,是形成霾天气的重要原因<sup>[10,11]</sup>。气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)虽然反演计算复杂、易受到时空因素影响,但可弥补地面监测范围的不足。有研究发现四川盆地是我国重要的气溶胶光学厚度大值区之一<sup>[5]</sup>,AOD与颗粒物质量浓度之间存在一定相关性,可用于反映颗粒物的浓度分布状况,且气象要素对AOD的扩散范围影响较大<sup>[12]</sup>。李成才等<sup>[13]</sup>研究得到春季四川盆地具有最大的AOD且全年平均值在0.7左右;且加入气象要素可提高PM<sub>2.5</sub>浓度与AOD相关性<sup>[6,13]</sup>。因此,结合恰当的遥感数据提高大气扩散等级研究精度是非常必要的。

目前发展了多视角的大气质量监测预报和评价等方法,其中数学统计方法或机器学习算法建立大气污染物浓度拟合模型是当前国内外研究热点<sup>[14]</sup>,有学者基于ARIMA<sup>[15]</sup>、GARCH模型<sup>[16]</sup>对空气污染物浓度进行预测,效果较好。由于空气污染物受气象因素、污染排放源及排放量、复杂的下垫面和物理化学过程的耦合等因素影响,具有较强的非线性特征<sup>[13]</sup>,而智能算法在非线性和拟合领域已有广泛应用,包括多元线性回归、灰色模型、支持向量机、贝叶斯、模糊数学方法等<sup>[17]</sup>,其中投影寻踪算法(PPC)可克服高维数据的“维数祸根”困难<sup>[18]</sup>,同时排除与数据结构和特征无关或关系很小变量的干扰从而解决某种非线性问题<sup>[19]</sup>。

面对快速发展的大气复合型污染和四川盆地特殊的地理气候环境等诸多问题,当前污染物气象扩散等级预报主要依据预报员经验,科学精细的客观预报仍较欠缺,故探索气象和AOD共同影响的气象扩散等级预报研究势在必行。本文以自贡地区为例,利用2016–2022年空气质量和气象监测数据,通过XGBoost算法筛选关键气象因素,结合遥感AOD进行PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>浓度时空特征分析;利用置信区间、加速遗传算法优化的投影寻踪模型(RAGA-PPC),探索构建PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>浓度扩散等级的气象指标和预报方法,可提高空气污染物气象扩散等级预报的客观性和精确度,为重污染天气下大气污染防治提供科学精细的预报技术和数据支撑。

## 1 研究区概况及数据

### 1.1 研究区概况

自贡地处四川盆地南部,东邻隆昌、泸县,南界江安、南溪、宜宾,西与犍为、井研毗邻,北靠威远、内江。境内中、浅丘陵起伏,地势由西北向东南倾斜,平均海拔高度在250~500 m(图1)。属中亚热带湿润季风气候区,全年气候温和、四季分明、季风气候显著;春季温度回升快,冷空气活动较频繁;夏季受西太平洋副热带高压影响,雨量丰沛,雨热同步,多夏伏旱,局部有洪涝;秋季温度下降快,多秋绵雨和夜雨,局部有秋涝;冬季受西伯利亚和蒙古冷空气影响,无严寒,多雾寡照,雨水稀少<sup>[5,8]</sup>。

### 1.2 数据资料

#### 1.2.1 空气质量监测数据

根据国家空气质量联网监测管理平台(<http://221.10.170.172:8000/>)提供的监测点信息,选取自贡地区2016–2022年8个国控、省控站点的PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>-8 h

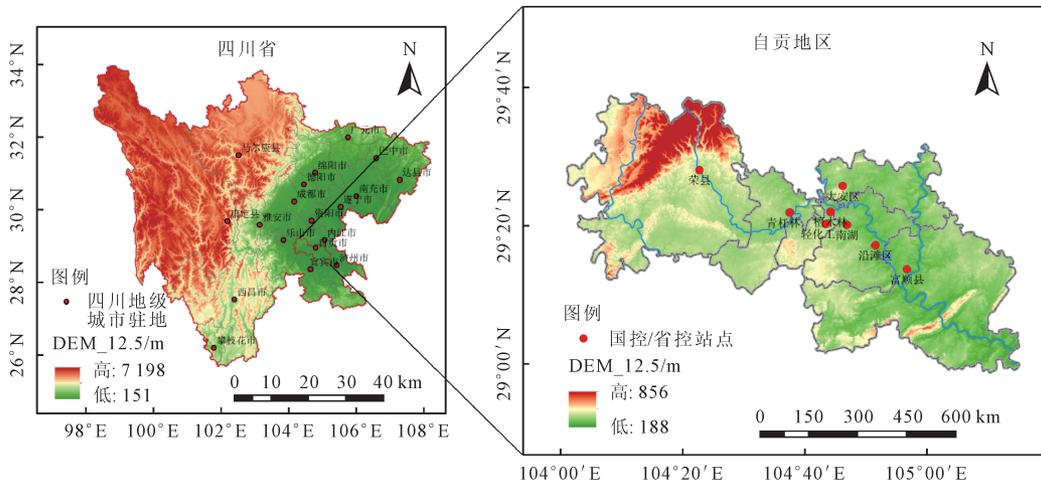


图1 自贡地区位置和DEM分布  
Fig.1 Location and DEM distribution of Zigong

(8 h滑动平均)浓度数据;站点位置分别代表近郊区的大安区环保局、行政商业交通居民混合的富顺县行政中心、青杠林路、荣县行政中心、沿滩区发改委、南湖救助站和轻化工大学、文化区的檀木林体育

馆站(表1),其中大安区、青杠林、南湖、沿滩区、轻化工和檀木林位于自贡市区。通过整理分别得到8个站点2 557 d的 $PM_{2.5}$ 和 $O_3$ -8 h逐日、月和季平均浓度数据集。

表1 研究区地面监测站点基本信息  
Table 1 Basic information of ground monitoring stations in the study area

站点	经度(E)	纬度(N)	地面气象站点	国/省控监测站点	简称
1	104.796°	29.377°	S3648	大安区环保局	大安区
2	104.972°	29.185°	56399	富顺县行政中心	富顺县
3	104.721°	29.359°	S3644	青杠林路	青杠林
4	104.415°	29.448°	56394	荣县行政中心	荣县
5	104.800°	29.323°	S3788	南湖救助站	南湖
6	104.876°	29.276°	S3645	沿滩区发改委	沿滩区
7	104.764°	29.334°	S3647	轻化工大学	轻化工
8	104.775°	29.356°	56396	檀木林体育馆	檀木林

### 1.2.2 气象要素监测数据

气象要素对空气污染物的聚集、传输和扩散有显著影响<sup>[20]</sup>。采用地面气象监测站和水平分辨率 $0.25^\circ$ (陆表 $0.1^\circ$ )、时间分辨率1 h的ERA5(ECMWF Reanalysis 5th Generation)再分析资料整理得到2016–2022年逐日、月、季的气象要素数据集。分别选用代表性强的8个气象监测站(表1)的温度、湿度、气压、相对湿度、降雨量、水气压、日照时数、风向和风速数据序列;并利用同期ERA5再分析资料空间插值得到对应8个站点的边界层高度、辐射数据序列。

### 1.2.3 遥感反演AOD数据

气溶胶光学厚度(AOD)为大气层顶到地面整个垂直柱内气溶胶对太阳光反射和吸收的积分无量纲,可监测全球陆地和海洋上空的大气气溶胶光学厚度<sup>[21]</sup>。本文获取2016–2022年MCD19A2逐日产品数据(2 555期),HDF格式、空间分辨率1 km,通过提取陆地AOD $_{0.55 \mu m}$ 的有效波段,使用Python程序调用MRT(modis reprojection tools)将数据投影转换、格

式转为TIFF,并将异常像元赋值为0、有效像元值比例缩小1 000倍,通过波段合成得到研究区AOD的逐日、月、季均值。

## 2 研究方法和流程

### 2.1 数据时空匹配

将2016–2022年的AOD值(8个站点位置 $3 \times 3$ 栅格平均值)与气象要素(温度、湿度、气压、相对湿度、降雨量、水气压、边界层高度、日照时数、辐射、风向和风速)数据对应匹配;得到同期8个站点的 $PM_{2.5}$ 和 $O_3$ -8 h浓度、气象要素和遥感AOD的日、月、季均值。

### 2.2 加速遗传算法的投影寻踪模型

加速遗传算法的投影寻踪模型(projection pursuit classification model based on RAGA, RAGA-PPC),结合了实码加速遗传算法(RAGA)的全局优化能力和投影寻踪(PPC)的高维数据降维与特征提取能力,适用于复杂非线性预测问题<sup>[22, 23]</sup>;通过RAGA优化结果可求得最佳投影方向、投影值,得到最优分类与排序

结果<sup>[18]</sup>。

### 2.2.1 确定影响因子

设指标的样本集为  $\{m^*(i, j) | i = 1 \sim u, j = 1 \sim v\}$ ,  $m^*(i, j)$  为第  $i$  个样本第  $j$  各指标值,  $u, v$  为样本和指标数; 这里采用极值归一化统一不同指标的量纲和数量级:

$$\text{越小越优: } m(i, j) = \frac{m^*(i, j) - m_{\min}(j)}{m_{\max}(j) - m_{\min}(j)} \quad (1)$$

$$\text{越大越优: } m(i, j) = \frac{m_{\max}(j) - m^*(i, j)}{m_{\max}(j) - m_{\min}(j)} \quad (2)$$

式中,  $m_{\max}(j)$  和  $m_{\min}(j)$  为第  $j$  个指标值的最大和最小值,  $m(i, j)$  为指标特征的归一化序列集。

### 2.2.2 数据划分

随机选择 70% 的指标特征为训练集, 用于模型构建; 剩下 30% 的指标特征为测试集, 用于检验。

### 2.2.3 构建投影指标函数 $P(a)$

当  $P(a)$  取最大时,  $a$  方向是最能反映多维数据结构特征的方向。PPC 模型目标是把  $v$  维数据  $\{m^*(i, j) | j = 1 \sim v\}$  合成最优投影方向为  $a = \{a(1), a(2), a(3), \dots, a(v)\}$  的一维投影值  $R(i)$ :

$$R(i) = \sum_{j=1}^v a(j)m(i, j) \quad (i = 1 \sim u) \quad (3)$$

式中,  $a$  为单位长度向量;  $R(i)$  的特征应局部投影点尽可能密集成点团, 整体投影点团尽可能散开。  $B_R$  为投影值  $R(i)$  的标准差,  $N_R$  为投影值  $R(i)$  的局部密度,  $P(a)$  可表达为:

$$P(a) = B_R N_R \quad (4)$$

$$B_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^u (R(i) - E(R))^2}{u - 1}} \quad (5)$$

$$N_R = \sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^u (R - d(i, j)) \cdot w(R - d(i, j)) \quad (6)$$

式中,  $E(R)$  为序列  $\{R(i) | i = 1 \sim u\}$  的平均值;  $R$  为局部密度的窗口半径 (取值多为  $0.1B_R$ );  $d(i, j) = |R(i) - R(j)|$  为样本间距;  $w(t)$  为一单位阶跃函数, 当  $t \geq 0$  时, 其值为 1, 当  $t < 0$  时, 其值为 0。

### 2.2.4 实码加速遗传算法(RAGA)优化投影方向

投影指标函数  $P(a)$  只随投影方向  $a$  的变化而变化, 最大可暴露高维数据特征结构的投影方向最佳。通过投影指标函数最大化来估计最佳投影方向:

$$\begin{cases} \max P(a(1), a(2), a(3), \dots, a(p)), \\ n(j) \leq a(j) \leq m(j), j = 1, 2, \dots, p \\ \sum_{j=1}^p a^2 = 1, a \in [0, 1] \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $a(j)$  为第  $j$  个优化变量,  $[n(j), m(j)]$  为  $a(j)$  的变化区间,  $p$  为优化变量的数目,  $P$  为目标函数 (为便于

定义后面的适应度函数, 假设其值为非负)。

(1) 实数编码。将优化变量的取值范围都统一为  $[0, 1]$ , 把初始变化区间为  $[n(j), m(j)]$  区间的第  $j$  个优化变量  $a(j)$  对应到  $[0, 1]$  区间上的基因  $b(j)$ , 构成问题解 (点) 的编码形式  $(b(1), b(2), \dots, b(p))$ , 线性变换如下:

$$a(j) = n(j) + b(j)(m(j) - n(j)), j = 1, 2, \dots, p \quad (8)$$

(2) 父代群体初始化。初始群体的父代个体  $\{m^*(i, j) | i = 1 \sim u, j = 1 \sim v\}$  中, 把  $b(j, i)$  代入式 (7) 得优化变量值  $a(j, i)$ , 再经式 (6) 得到目标函数值  $P(a)$ 。把  $\{P(a)\}$  ( $a = 1 \sim m$ ) 按从小到大排序, 对应的个体  $b(j, i)$  也跟着排序, 排前面的为优秀个体。

(3) 适应度评价。  $P(a)$  越小表示该个体适应度值越高, 反之亦然。第  $i$  个父代个体的适应度函数  $Q(i)$  为:

$$Q(i) = \frac{1}{P(a)^2 + 0.001} \quad (9)$$

(4) 筛选。选择产生第 1 个子代群体  $\{b1(j, i) | j = 1 \sim p, i = 1 \sim m\}$ 。从父代群体  $b(j, i)$  中以概率  $G(i)$  选择第  $i$  个个体, 即  $b1(j, k) = b(j, i)$ , 选择概率  $G(i)$  为:

$$G(i) = \frac{Q(i)}{\sum_{i=1}^m Q(i)} \quad (10)$$

(5) 交叉。选择适应度较高的个体进入子代群体  $\{b2(j, i) | j = 1 \sim p, i = 1 \sim m\}$ 。根据式 (9) 的随机选择一对父代个体  $b(j, i1)$  和  $b(j, i2)$ , 通过如下随机线性组合,  $h1, h2, h3$  是随机数, 产生  $n$  个子代个体  $b2(j, i)$ :

$$\begin{cases} b2(j, i) = h1b(j, i1) + (1 - h1)b(j, i2), h3 < 0.5 \\ b2(j, i) = h2b(j, i1) + (1 - h2)b(j, i2), h3 \geq 0.5 \end{cases} \quad (11)$$

(6) 变异。采用  $p$  个随机数以  $pm(i) = 1 - G(i)$  的概率来代替个体  $b(j, i)$ , 从而得到  $h(j) | j = 1 \sim p, hm$  均为随机数的子代个体  $\{b3(j, i) | j = 1 \sim p, i = 1 \sim m\}$ :

$$\begin{cases} b3(j, i) = h(j), hm < pm(i) \\ b3(j, i) = b3(j, i), hm \geq pm(i) \end{cases} \quad (12)$$

(7) 演化迭代。由步骤 (1)~(6) 得到的  $3n$  个子代个体, 适应度函数值按从大到小进行排序, 取排名前  $n$  个子代个体作为新的父代群体; 转入步骤 (3) 进行下一轮评价、筛选、较差和变异, 如此反复。

(8) 加速循环。用迭代所产生的优秀子群体的变化区间, 作为新的初始变量区间, 转入步骤 (1) 加速循环, 优秀个体与最优点的距离逐步收缩, 直至达到设定值或循环次数后结束。

### 2.2.5 建立污染扩散等级 RAGA-PPC 模型

将 PPC 模型中投影指标函数  $P(a)$  求最大作为目标函数, 各指标的投影  $a(v)$  作为优化变量, 运行 RAGA 的 8 个步骤, 即可得到平均最佳投影方向  $a^*(v)$  和

投影特征值  $P(a)$ , 根据空气质量浓度等级将投影特征值进行排序和等级划分, 可得到污染扩散等级结果, 流程见图 2。

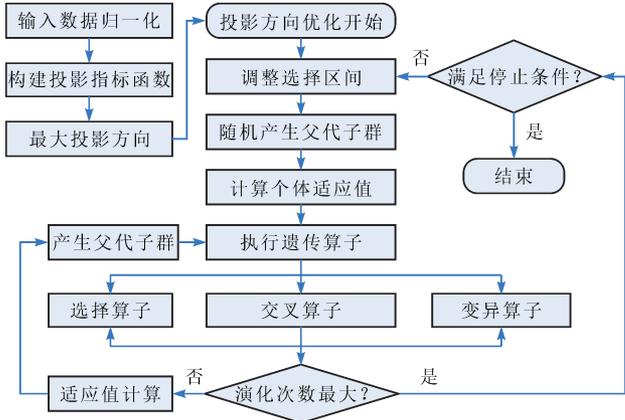


图2 RAGA-PP模型流程图  
Fig.2 Flow chart of RAGA-PP

### 2.3 XGBoost 筛选关键因素

XGBoost是一种基于梯度提升决策树的改进算法, 适用于解决回归或分类预测任务的机器学习算法<sup>[24]</sup>。其特征的重要性是通过计算每个特征在构建决策树时对分裂点的贡献来确定, 特征在决策树中使用的次数越多或对分裂点改进越大重要性越高<sup>[25]</sup>。

(1) 确定目标函数。目标函数  $G(\theta)$  由损失函数和正则化项 2 部分组成<sup>[26]</sup>。

$$G(\theta) = \sum_{i=1}^m s(x_i, \hat{x}_i) + \sum_{j=1}^n \Omega(f_j) \quad (13)$$

式中,  $m$  为训练数据的数量,  $x_i$  为第  $i$  个监测值的真是标签,  $\hat{x}_i$  为模型对第  $i$  个监测值的预测, 损失函数  $s(x_i, \hat{x}_i)$  是衡量拟合值  $\hat{x}_i$  和真实值  $x_i$  之间的差异,  $n$  为模型中树的数量,  $f_j$  为第  $j$  棵树的预测函数,  $\Omega(f_j)$  第  $j$  棵树的复杂度, 其中正则化项  $\Omega(f_j)$  对模型的复杂度进行惩罚, 以避免过拟合, 正则化项由 2 部分组成:

$$\Omega(f) = \gamma R + \frac{1}{2} \lambda \sum_{j=1}^R \omega_j^2 \quad (14)$$

式中,  $R$  为树  $f_j$  的叶节点数,  $\omega_j$  为树第  $j$  个叶节点的权重,  $\gamma, \lambda$  参数分别控制树的复杂程度和叶权重的平滑度。

(2) 构建树。新树的目标是通过连续迭代最小化目标函数, 基于损失函数  $s(x_i, \hat{x}_i)$  的一阶导数 ( $p_i$ ) 和二阶导数 ( $q_i$ ) 计算分裂点的增益, 逐步选择最优分裂点来构建多个决策树,  $f_i(x_i)$  为新树第  $i$  个样本拟合值, 并通过集成优化目标函数:

$$\text{一阶导数: } p_i = \frac{\partial s(x_i, \hat{x}_i)}{\partial \hat{x}_i} \quad (15)$$

$$\text{二阶导数: } q_i = \frac{\partial^2 s(x_i, \hat{x}_i)}{\partial \hat{x}_i^2} \quad (16)$$

$$G(\theta)^{(0)} = \sum_{i=1}^m \left[ p_i f_i(x_i) + \frac{1}{2} q_i f_i^2(x_i) \right] + \Omega(f_i) \quad (17)$$

(3) 分裂增益。增益 (Gain) 是在分裂前后损失函数的减少量, 可衡量每个特征对于模型输出的贡献度:

$$\text{Gain} = \frac{1}{2} \left[ \frac{P_l^2}{H_l + \lambda} + \frac{P_r^2}{H_r + \lambda} + \frac{P^2}{H + \lambda} \right] - \gamma \quad (18)$$

式中,  $P_l, P_r$  为左右子树的增益,  $H_l, H_r$  为左右子树的二阶导数之和。

遍历以上步骤, XGBoost 在每一轮迭代中构建新树并逐步减小目标函数值, 每个特征的增益代表该特征的重要程度, 当增益小于  $\gamma$  时, 模型会停止进一步分裂节点; 按增益从大到小对特征进行排序, 根据需求选择前  $N$  个气象要素特征作为最优特征用于后续污染物扩散等级模型训练。

### 2.4 气象扩散等级划分方法

按照春季 (3-5 月)、夏季 (6-8 月)、秋季 (9-11 月)、冬季 (12 月-次年 2 月), 引入 XGBoost 算法分别筛选冬季  $PM_{2.5}$  和夏季  $O_3$  浓度关键气象影响因素, 通过 95% 置信区间分级方法统计得到 2016-2022 年自贡地区春、秋、冬季  $PM_{2.5}$  浓度和春、夏、秋季  $O_3$  浓度的高影响气象要素和对应的遥感气溶胶光学厚度 (AOD) 阈值范围, 并带入加速遗传算法的投影寻踪模型 (RAGA-PPC) 进行扩散等级拟合, 利用同期地面监测的  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  浓度等级检验, 并结合欧洲数值预报 (EC) 和对应 AOD 开展  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  浓度扩散等级预报验证, 流程见图 3。

## 3 自贡地区 $PM_{2.5}$ 和 $O_3$ -8 h 时空特征

### 3.1 $PM_{2.5}$ 和 $O_3$ -8 h 季节变化特征

#### 3.1.1 季均值时间变化特征

$O_3$ -8h 浓度均值具有明显季节性差异 (表 2)。市区和荣县表现为夏 (市区  $163.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 荣县  $158.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 春 > 秋 > 冬, 而富顺县呈现出春 = 夏 ( $147 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 秋 > 冬季的特征; 故  $O_3$  已成为影响自贡地区春夏季空气质量的主要污染物。  $PM_{2.5}$  季节变化呈市区和荣县冬季 (市区  $79.69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 荣县  $74.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 春 > 秋 > 夏, 富顺县冬季 ( $76.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 秋 > 春 > 夏 (表 2);  $PM_{2.5}$  浓度冬季明显高于其他季节, 是影响自贡地区冬季空气质量的主要污染物。

#### 3.1.2 季均值空间分布特征

反演虽经去云处理, 但仍有少量云像元使 AOD 值较实际偏高; 四季荣县西北部的林地山区污染较轻, 冬春季大部分地区及夏秋季在交通运输和人口活动频繁的青杠林、轻化工和南湖污染较重 (图 4(a))。  $PM_{2.5}$  浓度季节变化趋势与 AOD 较为一致, 呈冬季

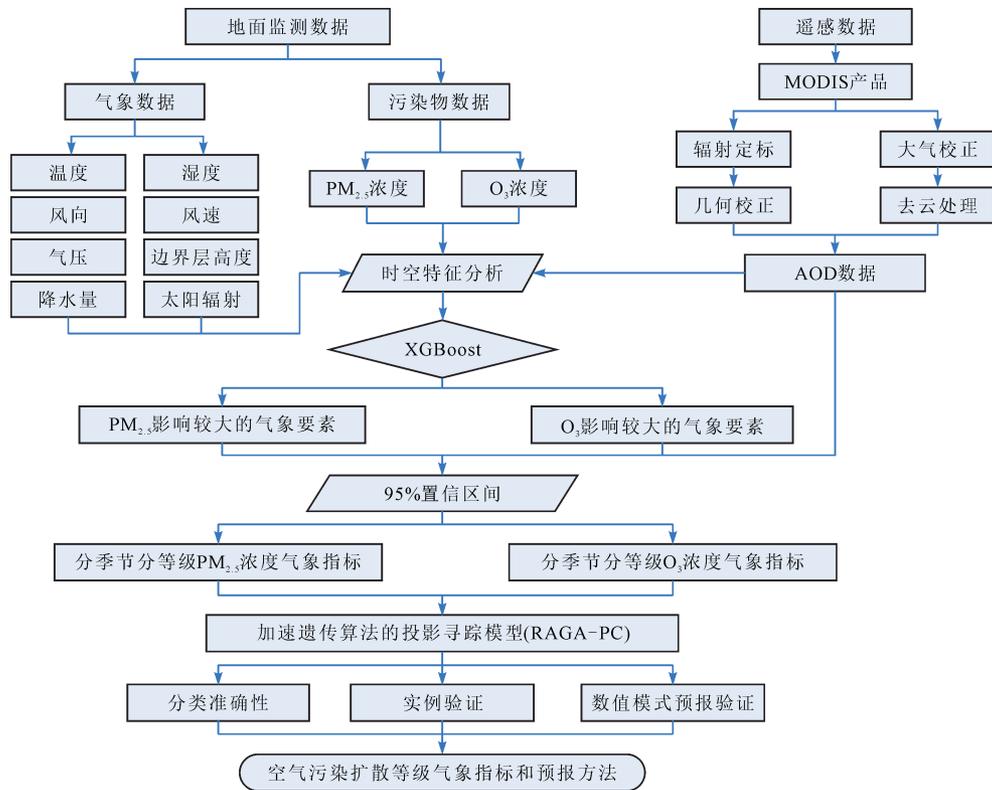


图3 气象扩散等级划分方法流程图  
Fig.3 Flow chart of method for dividing meteorological diffusion levels

表 2 自贡市 2016–2022 年 O<sub>3</sub>和 PM<sub>2.5</sub>季节浓度均值特征  
Table 2 Characteristics of seasonal average concentrations of O<sub>3</sub> and PM<sub>2.5</sub> from 2016 to 2022 in Zigong

污染物	位置	春季	夏季	秋季	冬季
PM <sub>2.5</sub>	市区	45.27	26.79	45.20	79.69
	荣县	44.26	27.36	40.27	74.61
	富顺县	37.24	19.41	38.18	76.15
O <sub>3</sub>	市区	156.03	163.23	114.47	89.48
	荣县	141.46	158.30	113.00	92.90
	富顺县	147.00	147.00	109.20	85.00

高、夏季低的分布特征(图 4(b));冬季 PM<sub>2.5</sub>浓度最高且空间梯度差异较其他季节更明显。O<sub>3</sub>-8 h 浓度呈秋冬季低、春夏季高的特征(图 4(c));春季南湖和沿滩站浓度较高,青杠林至南湖站夏季浓度最高;整体呈荣县、大安区和富顺县较低,市区中部较高的分布特征。

### 3.2 PM<sub>2.5</sub>和 O<sub>3</sub>-8 h 月均值特征

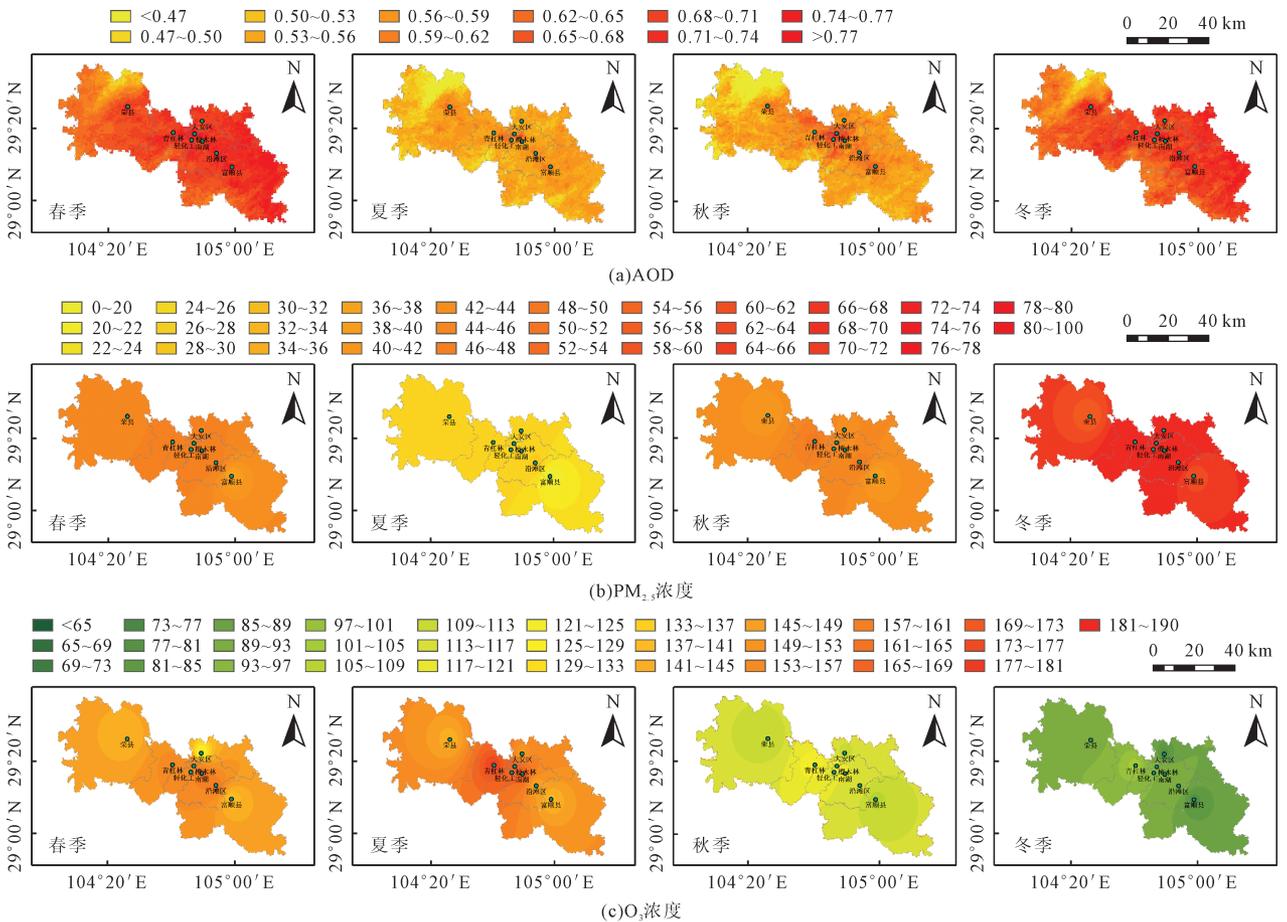
2016–2022 年 O<sub>3</sub>-8 h 月均浓度均呈“倒 U”型(图 5(a)),浓度从 1 月开始逐渐上升,4–8 月维持在较高水平,市区、荣县、富顺县 O<sub>3</sub>-8 h 浓度累计平均超标天数分别为 110 d(85.7%)、102 d(84.8%)、101 d(87.8%),其中 4、7、8 月超标天数相对较多;最高浓度均出现在 8 月(120、106、110 μg/m<sup>3</sup>)。PM<sub>2.5</sub>浓度均值呈“U”型月变化特征(图 5(b)),市区、荣县、富顺县高浓度均出现在 1 月分别为 88、82、85 μg/m<sup>3</sup>,7 月浓度最低;浓度和超标天数高值期多在 1–2 月和 11–12 月,累计超标天数分别为 304 d(79.4%)、279 d(86.9%)、289 d(81.4%),其中 1 月和 12 月超标天数相对较多。

## 4 空气污染物气象指标和扩散等级

### 4.1 XGBoost 算法筛选气象关键因素

在污染源一定的情况下,气象因素与污染物的扩散、积累和转移密切相关且存在季节性差异<sup>[5]</sup>。由于影响 O<sub>3</sub>和 PM<sub>2.5</sub>浓度的气象参数具有强耦合性,很难确定单个气象因素对污染物浓度的影响,因此引入 XGBoost 算法<sup>[24]</sup>,按增益从大到小对气压(PRS)、温度(TEM)、相对湿度(RHU)、降雨量(PRE)、水气压(VAP)、边界层高度(BLH)、日照时数(SSH)、辐射(RAD)、风速(WIN\_S)和风向(WIN\_D)等进行排序,越靠前重要性越大<sup>[25]</sup>,评估筛选 2016–2022 年冬季 PM<sub>2.5</sub>和夏季 O<sub>3</sub>浓度关键气象因素。

夏季,气压、温度、最高气温、相对湿度、风速、边界层高度、日照时数和辐射是影响 O<sub>3</sub>浓度的主要气象要素(图 6(a))。这与夏季强盛的太阳辐射、长日照时数、高温、副热带高压、青藏高原、低相对湿度易增加



注:  $PM_{2.5}$ 、 $O_3$ 浓度单位均为 $\mu g/m^3$ 。

图4 自贡市2016–2022年AOD、 $PM_{2.5}$ 和 $O_3$ 浓度季均值变化

Fig.4 Seasonal average changes of AOD,  $PM_{2.5}$  and  $O_3$  concentrations from 2016 to 2022 in Zigong

生物源的排放及部分人为源挥发性有机物<sup>[27,28]</sup>,且日照时数直接反映太阳辐射的强弱,辐射可加快光化学反应速率,促使大气光解更多的氮氧化物加速转化生成 $O_3$ <sup>[29]</sup>;一定风速可促进大气混合、分散和传输使得边界层发展,利于 $O_3$ 传输浓度增高<sup>[28,29]</sup>。虽然能见度(VIS\_Min)呈一定重要性,但其与 $O_3$ 浓度的关系受多因素间接调控,且易与相对湿度、温度等直接气象因子产生较强共线性,可能干扰后期的拟合效果。而海平面气压(PRS\_Sea)主要反映大尺度天气系统的变化,其对 $O_3$ 浓度的影响需通过调节风速、温度、边界层高度等局部气象条件间接实现,而非 $O_3$ 生成的直接驱动因子。因此,二者未被选为模型的直接输入变量。

冬季,气压、温度、相对湿度、风速、风向、降雨量、边界层高度和辐射是影响 $PM_{2.5}$ 的主要气象要素(图6(b)),其中边界层高度是影响 $PM_{2.5}$ 浓度的关键因素,增益值为708,其次是温度(608)。冬季温度低大气层结稳定易出现逆温现象,边界层高度较低时垂直方向上无明显扩散,易造成污染物在近地面层积聚<sup>[30]</sup>,相对湿度较高时气溶胶易吸湿增长,促使更多的硫酸盐或硝酸盐形成;一定降雨量可稀释污染物产生沉降,若少量降水易诱发污染物吸湿增长加剧;配合低温取暖耗能

升高及机动车尾气不完全燃烧,促使 $PM_{2.5}$ 及前体物易在近地面不断累积<sup>[31]</sup>。能见度虽在统计上呈现较强重要性,但其易受沙尘、雾等非 $PM_{2.5}$ 成分干扰,且与湿度、温度等直接气象因子存在共线性;海平面气压表征大尺度环流特征,需通过风场等间接影响 $PM_{2.5}$ ;最高气温(TEM\_Max)虽通过调控扩散速率、逆温层及化学反应活性与 $PM_{2.5}$ 相关,但其作用机制具有间接性与多因素协同性,可能影响模型预测稳定性。因此,能见度、海平面气压和最高气温变量未被选为模型的直接输入因子。

污染浓度分布与风场及周围城市污染源的贡献密切相关,风速影响污染物输送或清除效率,风向决定污染物的来源方向<sup>[32]</sup>。自贡位于盆地南部,常年风速小于 $2\text{ m/s}$ <sup>[33]</sup>, $O_3$ 和 $PM_{2.5}$ 污染主导风向为偏东南风<sup>[5]</sup>,上风方向宜宾和泸州等工业城市的污染物随气流流向西北输送,内江、重庆、眉山、成都等的污染物向南输送<sup>[3,5,34]</sup>,污染物受山脉等阻挡易集聚<sup>[5,8]</sup>。

#### 4.2 分等级建立气象指标

通过大量统计、实验和比对,按国家标准将 $PM_{2.5}$ 、 $O_3$ 浓度均值划分为有利于扩散( $\leq 35\ \mu g/m^3$ 、 $\leq 100\ \mu g/m^3$ )、较不利于扩散( $35\sim 75\ \mu g/m^3$ 、 $100\sim 160\ \mu g/m^3$ )和不利

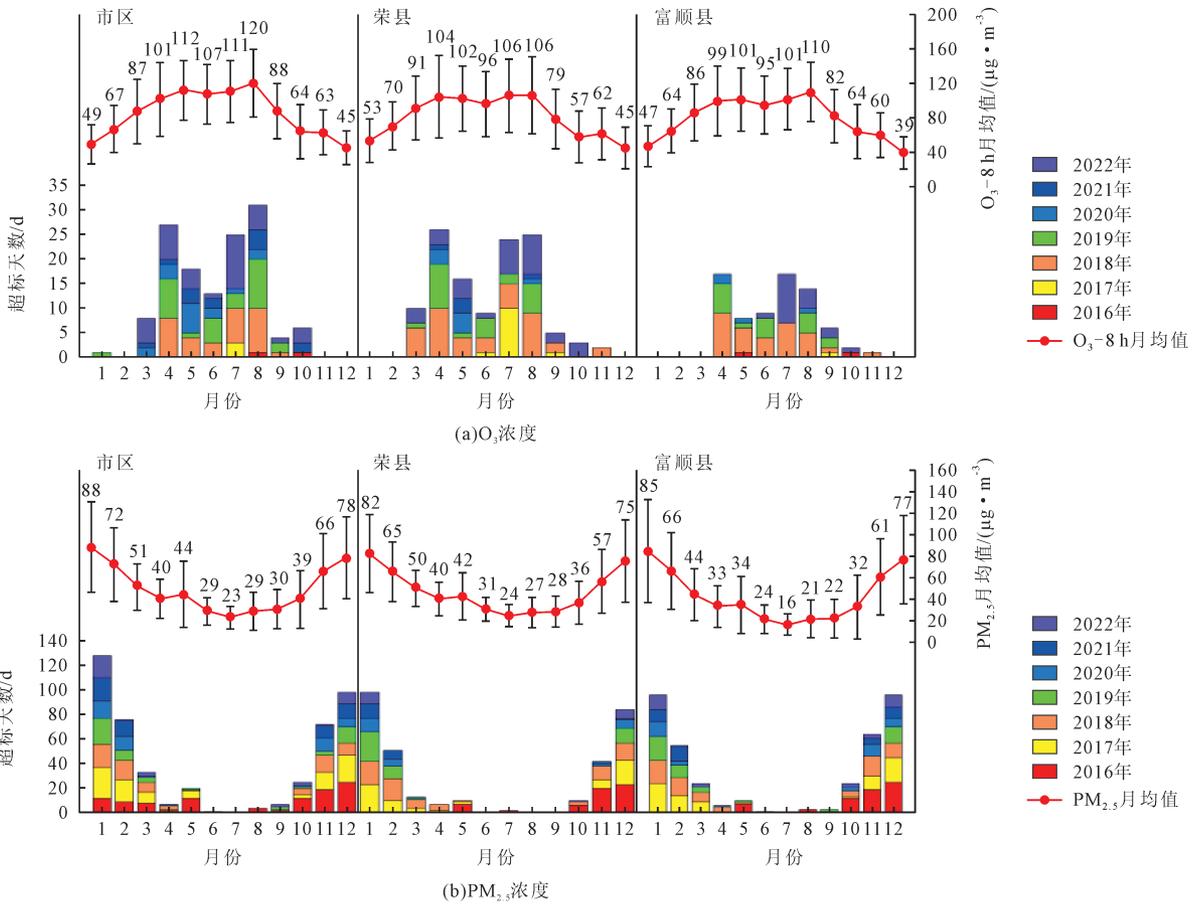


图5 自贡市2016–2022年O<sub>3</sub>和PM<sub>2.5</sub>平均值和超标状况月变化

Fig.5 Monthly variations of the average values and exceedance conditions of O<sub>3</sub> and PM<sub>2.5</sub> from 2016 to 2022 in Zigong

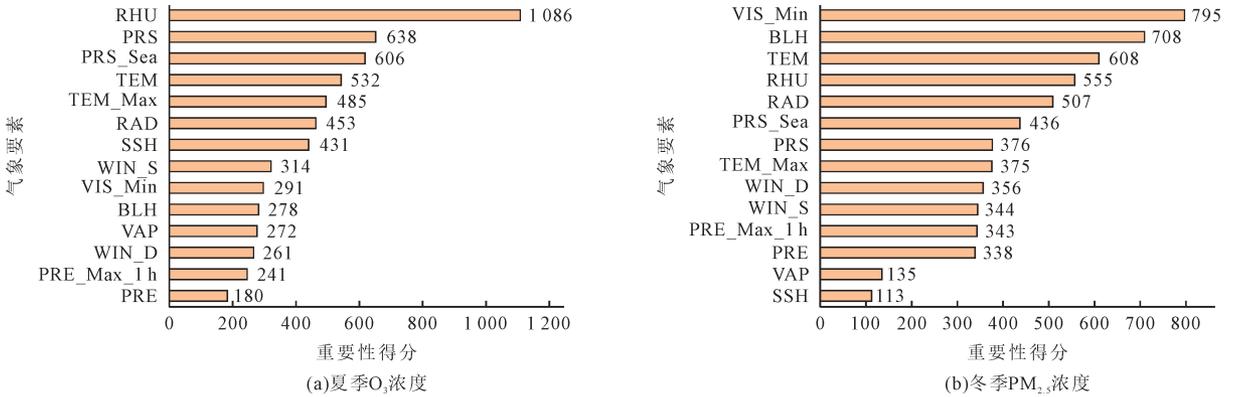


图6 XGBoost算法筛选关键气象因子

Fig.6 Selection of important meteorological factors using XGBoost

于扩散( $\geq 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $\geq 160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )3个空气质量气象扩散等级。根据重要性排序确定降水量、风速、风向、边界层高度、温度、水汽压、相对湿度、气压和AOD为PM<sub>2.5</sub>浓度评价指标(9维);降雨量、风速、风向、边界层高度、温度、最高气温、相对湿度、气压、日照时数和辐射为O<sub>3</sub>浓度评价指标(10维)。采用95%置信区间分级统计得到2016–2022年自贡地区春、秋、冬季PM<sub>2.5</sub>浓度和春、夏、秋季O<sub>3</sub>浓度的主要气象指标和AOD阈值范围(表3)。

### 4.3 RAGA–PP模型污染物气象扩散等级划分

选择2016–2020年日数据为训练集,依次进行数

据归一化、构造投影指标函数、约束条件和实数编码加速遗传算法(RAGA)优化PPC模型的投影方向,求得得分季节各气象要素的最佳投影方向 $a^*$ ;可得到PM<sub>2.5</sub>春、秋、冬季和O<sub>3</sub>春、夏、秋季有利于扩散、较不利于扩散和不利于扩散3个污染气象扩散等级的临界投影值 $P(a)$ (表4),PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>浓度投影值的散布特征均呈现局部投影点较密集,整体投影点团之间能散开特征。把 $P(a)$ 值从小到大排序,可将污染等级从优到劣进行排序,当样本投影值落在对应临界投影区间(表4),即可判定该样本的污染等级。

表 3 自贡地区 PM<sub>2.5</sub>浓度和 O<sub>3</sub>浓度阈值与气象要素季节指标  
Table 3 Threshold values of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> concentrations and seasonal indicators of meteorological elements in Zigong

PM <sub>2.5</sub>	气象要素	春季			秋季			O <sub>3</sub>	气象要素	春季			夏季			秋季		
		春季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季			春季	夏季	秋季	春季	夏季	秋季			
≥75 μg/m <sup>3</sup>	温度/°C	>23.5	<17.0	>10.2	≥160 μg/m <sup>3</sup>	温度/°C	>22.0	>29.0	>23.0	温度/°C	>22.0	>29.0	>23.0	温度/°C	>22.0	>29.0	>23.0	
	气压/hPa	<966	>978	>980		气压/hPa	<969.0	<963.0	<973.0	气压/hPa	<969.0	<963.0	<973.0	气压/hPa	<969.0	<963.0	<973.0	
	相对湿度/%	>72	>83	>80.0		相对湿度/%	<66.0	<73.0	<76.0	相对湿度/%	<66.0	<73.0	<76.0	相对湿度/%	<66.0	<73.0	<76.0	
	水气压/hPa	>19.5	>18.0	>9.9		降雨量/mm	<2.0	<3.0	<2.0	降雨量/mm	<2.0	<3.0	<2.0	降雨量/mm	<2.0	<3.0	<2.0	
	边界层高度/m	<420	<330	>320		风速/(m·s <sup>-1</sup> )	<2.0	>1.8	>1.5	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	<2.0	>1.8	>1.5	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	<2.0	>1.8	>1.5	
	AOD	>0.9	>1.0	>1.1		风向/°	100~200	180~240	240~120	风向/°	100~200	180~240	240~120	风向/°	100~200	180~240	240~120	
	降雨量/mm	<0.5	<0.3	<0.2		边界层高度/m	>460.0	>450.0	>300.0	边界层高度/m	>460.0	>450.0	>300.0	边界层高度/m	>460.0	>450.0	>300.0	
	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	<1.9	<1.3	<1.3		最高气温/°C	>27.0	>33.0	>28.0	最高气温/°C	>27.0	>33.0	>28.0	最高气温/°C	>27.0	>33.0	>28.0	
	风向/°	100~290	60~330	180~315		日照/h	>6.0	>6.0	>6.0	日照/h	>6.0	>6.0	>6.0	日照/h	>6.0	>6.0	>6.0	
						辐射/(kW·h·m <sup>-2</sup> )	>16.0	>16.5	>13.0	辐射/(kW·h·m <sup>-2</sup> )	>16.0	>16.5	>13.0	辐射/(kW·h·m <sup>-2</sup> )	>16.0	>16.5	>13.0	
35~75 μg/m <sup>3</sup>	温度/°C	20.0~23.5	17.0~18.0	9.8~10.2	100~160 μg/m <sup>3</sup>	温度/°C	18.0~22.0	26.0~29.0	18.0~23.0	温度/°C	18.0~22.0	26.0~29.0	18.0~23.0	温度/°C	18.0~22.0	26.0~29.0	18.0~23.0	
	气压/hPa	966~970	977.0~979.0	979~981		气压/hPa	969.0~974.0	963.0~964.0	973.0~977.0	气压/hPa	969.0~974.0	963.0~964.0	973.0~977.0	气压/hPa	969.0~974.0	963.0~964.0	973.0~977.0	
	相对湿度/%	65.0~72.0	80.0~83.0	77.0~80.0		相对湿度/%	66.0~77.0	73.0~84.0	76.0~85.0	相对湿度/%	66.0~77.0	73.0~84.0	76.0~85.0	相对湿度/%	66.0~77.0	73.0~84.0	76.0~85.0	
	水气压/hPa	16.0~19.5	17.0~18.0	9.4~9.9		降雨量/mm	2.0~3.0	3.0~12.0	2.0~3.0	降雨量/mm	2.0~3.0	3.0~12.0	2.0~3.0	降雨量/mm	2.0~3.0	3.0~12.0	2.0~3.0	
	边界层高度/m	420~440	330~350	320~358		风速/(m·s <sup>-1</sup> )	1.8~2.0	1.7~1.8	1.4~1.5	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	1.8~2.0	1.7~1.8	1.4~1.5	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	1.8~2.0	1.7~1.8	1.4~1.5	
	AOD	0.8~0.9	0.8~1.0	0.8~1.1		风向/°	45~175	50~180	120~240	风向/°	45~175	50~180	120~240	风向/°	45~175	50~180	120~240	
	降雨量/mm	0.5~1.0	0.1~3.0	0.2~0.5		边界层高度/m	430.0~460.0	350.0~450.0	320.0~400.0	边界层高度/m	430.0~460.0	350.0~450.0	320.0~400.0	边界层高度/m	430.0~460.0	350.0~450.0	320.0~400.0	
	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	1.9~2.2	1.3~1.5	1.3~1.5		最高气温/°C	22.0~27.0	30.0~33.0	21.0~29.0	最高气温/°C	22.0~27.0	30.0~33.0	21.0~29.0	最高气温/°C	22.0~27.0	30.0~33.0	21.0~29.0	
	风向/°	50~100	60~270	45~180		日照/h	2.0~6.0	3.0~6.0	2.0~6.0	日照/h	2.0~6.0	3.0~6.0	2.0~6.0	日照/h	2.0~6.0	3.0~6.0	2.0~6.0	
						辐射/(kW·h·m <sup>-2</sup> )	10.0~18.0	11.0~18.5	6.5~13.0	辐射/(kW·h·m <sup>-2</sup> )	10.0~18.0	11.0~18.5	6.5~13.0	辐射/(kW·h·m <sup>-2</sup> )	10.0~18.0	11.0~18.5	6.5~13.0	
≤35 μg/m <sup>3</sup>	温度/°C	<20.0	>18.0	>9.8	≤100 μg/m <sup>3</sup>	温度/°C	<18.0	<26.0	<18.0	温度/°C	<18.0	<26.0	<18.0	温度/°C	<18.0	<26.0	<18.0	
	气压/hPa	>970	<977.0	<979		气压/hPa	>974.0	>963.0	>977.0	气压/hPa	>974.0	>963.0	>977.0	气压/hPa	>974.0	>963.0	>977.0	
	相对湿度/%	<65.0	<80.0	<77.0		相对湿度/%	>77.0	>84.0	>85.0	相对湿度/%	>77.0	>84.0	>85.0	相对湿度/%	>77.0	>84.0	>85.0	
	水气压/hPa	<16.0	<17.0	<9.4		降雨量/mm	>3.0	>12.0	>3.0	降雨量/mm	>3.0	>12.0	>3.0	降雨量/mm	>3.0	>12.0	>3.0	
	边界层高度/m	>440	>350	>358		风速/(m·s <sup>-1</sup> )	<1.8	<1.7	<1.4	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	<1.8	<1.7	<1.4	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	<1.8	<1.7	<1.4	
	AOD	<0.8	<0.8	<0.8		风向/°	45~200	45~240	45~120	风向/°	45~200	45~240	45~120	风向/°	45~200	45~240	45~120	
	降雨量/mm	>1.0	>3.0	>0.5		边界层高度/m	<430.0	<350.0	<320.0	边界层高度/m	<430.0	<350.0	<320.0	边界层高度/m	<430.0	<350.0	<320.0	
	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	>2.0	>1.5	>1.4		最高气温/°C	<22.0	<30.0	<21.0	最高气温/°C	<22.0	<30.0	<21.0	最高气温/°C	<22.0	<30.0	<21.0	
	风向/°	50~290	60~270	45~315		日照/h	<2.0	<3.0	<1.2	日照/h	<2.0	<3.0	<1.2	日照/h	<2.0	<3.0	<1.2	
						辐射/(kW·h·m <sup>-2</sup> )	<10.0	<11.0	<6.5	辐射/(kW·h·m <sup>-2</sup> )	<10.0	<11.0	<6.5	辐射/(kW·h·m <sup>-2</sup> )	<10.0	<11.0	<6.5	

注:PM<sub>2.5</sub>浓度均值划分为有利于扩散、较不利于扩散和不利于扩散等级,分别为≤35 μg·m<sup>-3</sup>、35~75 μg·m<sup>-3</sup>以及≥75 μg·m<sup>-3</sup>。O<sub>3</sub>浓度均值划分为有利于扩散、较不利于扩散和不利于扩散等级,分别为≤100 μg·m<sup>-3</sup>、100~160 μg·m<sup>-3</sup>以及≥160 μg·m<sup>-3</sup>。下同。

表 4 PM<sub>2.5</sub>和 O<sub>3</sub>浓度季节等级临界投影值  
Table 4 Critical projection values of seasonal levels of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> concentrations

等级临界投影值	PM <sub>2.5</sub>			等级临界投影值	O <sub>3</sub>		
	春季	秋季	冬季		春季	夏季	秋季
有利于扩散	0.885	1.085	0.937	有利于扩散	0.919	1.084	1.107
较不利于扩散	0.997	1.381	1.181	较不利于扩散	1.383	1.213	1.317
不利于扩散	≥0.997	≥1.381	≥1.181	不利于扩散	≥1.383	≥1.213	≥1.317

最佳投影方向各分量的大小可反映各气象指标对大气污染的影响程度<sup>[35]</sup>,即 $a^*$ 中各分量绝对值越大,对应的气象指标对空气质量的影响程度就越大,且优劣顺序还可逆向查出造成空气质量恶化的主要指标。自贡地区 PM<sub>2.5</sub>污染冬季表现突出,其最佳投影方向 $a^*=(0.330,0.228,0.249,0.430,0.357,0.153,0.314,0.334,0.381)$ ,依次为气压、温度、水汽压、相对湿度、降雨量、风速、风向、AOD 和边界层高度 9 个气象指标。表明冬季影响 PM<sub>2.5</sub>浓度的气象指标依次为相对湿度>边界层高度>降雨量>AOD>气压>风向>水汽压>温度>风速。

同理,夏季 O<sub>3</sub>浓度最佳投影方向 $a^*=(0.338,0.269,0.497,0.071,0.080,0.182,0.420,0.343,0.438,0.383)$ ,

依次代表气压、温度、最高气温、相对湿度、降雨量、风速、风向、边界层高度、日照时数和辐射 10 个气象指标。可知影响 O<sub>3</sub>浓度的气象指标依次为最高气温>日照时数>风向>辐射>边界层高度>气压>温度>风速>降雨量>相对湿度。

#### 4.4 气象扩散等级验证

##### 4.4.1 分等级准确性验证

选择自贡地区 2021~2022 年的数据分季节进行 PM<sub>2.5</sub>和 O<sub>3</sub>浓度扩散等级回顾拟合,每个季节测试样本数量为 188 站次左右,按季节筛选 PM<sub>2.5</sub>(春、秋、冬季)和 O<sub>3</sub>(春、夏、秋季)有利于扩散、较不利于扩散和不利于扩散 3 个气象扩散等级的站次数及其对应的气象指标,分别代入 RAGA-PPC 模型得到各季节各站次最

大投影方向和投影特征值;投影特征值越大,说明该季节空气污染程度越严重,空气质量越差。当某季节某个站的投影值介于对应的污染扩散等级临界投影值区间范围时(表4),则认为该季节该站次拟合的污染扩散等级正确,然后统计得到PM<sub>2.5</sub>(春、秋、冬季)和O<sub>3</sub>(春、夏、秋季)不同扩散等级的拟合正确率(表5),从而评估RAGA-PPC气象扩散等级预报模型的拟合能力。

各样本组合的拟合等级与实际空气污染情况较为吻合(表5)。冬季PM<sub>2.5</sub>浓度等级划分效果最优,综

合正确率为79.35%,其中较不利于扩散等级正确率达90.00%;其次春季的综合正确率为62.50%;而秋季较差,综合正确率为56.52%。夏季O<sub>3</sub>浓度等级划分效果最优,综合正确率为78.80%,其中有利于和不利于扩散等级的正确率分别达到了95.24%和86.96%;春季综合正确率较好,为70.27%,其中不利于扩散等级评价正确率为85.71%;而秋季综合正确率较差,为57.80%。整体呈夏季O<sub>3</sub>浓度、冬季PM<sub>2.5</sub>浓度的等级拟合效果最优,其次是春季和秋季,而秋季3个等级划分存在样本数据相近,使得等级划分效果一般。

表 5 PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>浓度等级季节站数和正确率  
Table 5 Number and accuracy of stations with seasonal levels of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> concentrations

类别	季节	PM <sub>2.5</sub> ≤35 μg·m <sup>-3</sup> 或O <sub>3</sub> ≤100 μg·m <sup>-3</sup> (有利于扩散)		PM <sub>2.5</sub> :35~75 μg·m <sup>-3</sup> 或O <sub>3</sub> :100~160 μg·m <sup>-3</sup> (较不利于扩散)		PM <sub>2.5</sub> ≥75 μg·m <sup>-3</sup> 或O <sub>3</sub> ≥160 μg·m <sup>-3</sup> (不利于扩散)	
		总站次数	正确率/%	总站次数	正确率/%	总站次数	正确率/%
PM <sub>2.5</sub>	春季	40	57.50	106	64.15	38	63.16
	秋季	54	61.11	78	53.85	52	55.77
	冬季	11	63.64	60	90.00	113	75.22
O <sub>3</sub>	春季	87	58.62	77	79.22	21	85.71
	夏季	63	95.24	98	56.12	23	86.96
	秋季	137	81.82	30	83.33	6	66.67

4.4.2 实例验证

分别选取冬季PM<sub>2.5</sub>、夏季O<sub>3</sub>的污染天气进行验证分析(表6)。根据《环境空气质量标准》(GB 3095-2012),当PM<sub>2.5</sub>或O<sub>3</sub>日平均浓度超过75 μg/m<sup>3</sup>或160 μg/m<sup>3</sup>时,认为是PM<sub>2.5</sub>或O<sub>3</sub>污染日。2020年1月14日(冬季)PM<sub>2.5</sub>日平均浓度94.5 μg/m<sup>3</sup>(超标),除温度、气压外,相对湿度、风向、风速、边界层高度、AOD均满足超标阈值。2021年1月2-5日(冬季)持续4 d PM<sub>2.5</sub>浓度日均值93.7~122.8 μg/m<sup>3</sup>(超标),除温度、边界层高度略有差异,气压、相对湿度、风向、风速、AOD均值都能满足超标阈值。2022年11月23-24日(秋季)连续2 d PM<sub>2.5</sub>浓度日均值为78.0~101.0 μg/m<sup>3</sup>(超标),温度、相对湿度、风速、降雨量、边界层高度、AOD均值满足超

标阈值。

2018年8月28-29日(夏季)连续2 d O<sub>3</sub>浓度日均值167.2~198.7 μg/m<sup>3</sup>(超标),各项指标除了气压、风向略有差异,温度、降雨量、相对湿度、风速、日照时数、辐射、边界层高度、最高气温均满足超标阈值。2020年5月31日(春季)O<sub>3</sub>浓度94.5 μg/m<sup>3</sup>(良),各项指标除了气压、边界层高度略有差异,温度、最高气温(30.5℃)、相对湿度、风速、风向、日照时数、辐射均满足超标阈值。2021年10月7日(秋季)O<sub>3</sub>浓度43.0 μg/m<sup>3</sup>(优),除温度、气压略有差异,相对湿度、降雨量、最高气温、边界层高度、日照时数、辐射都满足优等级阈值。表明分季节分等级的气象指标适用于PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>浓度扩散等级判定。

表 6 自贡地区PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>浓度不同扩散等级的气象要素实例  
Table 6 Examples of meteorological elements with different diffusion levels of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> concentrations in Zigong

气象要素	PM <sub>2.5</sub> (μg·m <sup>-3</sup> )			气象要素	O <sub>3</sub> (μg·m <sup>-3</sup> )		
	94.5	93.7~122.8	78.0~101.0		167.2~198.7	94.5	43.0
时间	20200114	20210102-20210105	20221123-20221124	时间	20180829-20180829	20200531	20211007
温度/℃	8.9	7.1	16.5	温度/℃	31.1	26.0	19.6
气压/hPa	976.9	983.8	976.4	气压/hPa	963.2	968.0	972.8
相对湿度/%	84.0	81.8	84.8	相对湿度/%	64.7	67.8	86.8
水汽压/hPa	9.5	8.2	14.3	降雨量/mm	0.0	0.0	1.2
边界层高度/m	335	340	322	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	1.5	1.4	1.1
AOD	1.2	1.1	1.1	风向/°	189	170.9	320
降雨量/mm	2.6	0.0	0.0	边界层高度/m	465	407.1	315
风速/(m·s <sup>-1</sup> )	1.2	0.9	0.9	最高气温/℃	36.4	30.5	21.6
风向/°	107	208	28	日照时数/h	8.8	2.9	0.0
				辐射/(kW·h·m <sup>-2</sup> )	20.2	18.0	5.2

#### 4.5 RAGA-PP模型气象扩散等级预测

选择预报性能稳定且准确率较高的欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)气象数值预报产品,空间分辨率 $0.125^\circ$ ,时间分辨率前72 h为3 h,72 h后为6 h,起报时间为每日20:00(北京时)。通过空间插值得到自贡站( $29.35^\circ\text{N}$ ,  $104.77^\circ\text{E}$ )未来168 h气象预报指标,利用均值合成构建逐日气象和AOD预报数据集;选择ECMWF次日气象预报指标及当日AOD、 $\text{PM}_{2.5}$ 或 $\text{O}_3$ 浓度实测值作为RAGA-PP模型输入变量,对次日 $\text{O}_3$ 或 $\text{PM}_{2.5}$ 污染扩散等级进行预测;通过迭代再将次日预报结果作为前一日污染物浓度的输入变量,则可预报未来1~7 d的污染扩散等级。

当污染持续天数达3 d及以上且中断间隔小于2 d,则认为是一次持续性污染过程<sup>[36]</sup>;这里以7 d时间尺度选择2次持续性污染过程,按照 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{O}_3$ 浓度有利于扩散( $\leq 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $\leq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )、较不利于扩散( $35\sim 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $100\sim 160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )和不利于扩散( $\geq 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $\geq 160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )等级标准,对未来7 d的扩散等级进行预报验证。通过拟合得到的临界投影值 $P(a)$ ,将 $\text{PM}_{2.5}$ 、

$\text{O}_3$ 浓度划分为有利于扩散( $\leq 1.06$ 、 $\leq 0.83$ )、较不利于扩散( $1.06\sim 1.28$ 、 $0.83\sim 1.37$ )和不利于扩散( $\geq 1.28$ 、 $\geq 1.37$ )3个扩散等级判定标准。针对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染过程(2024年12月1~7日),以11月30日为起报日,将ECMWF气象预报指标(未来7 d)和当日AOD值、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度代入RAGA-PPC模型进行污染扩散等级预报,前2天投影值介于 $1.06\sim 1.28$ (较不利于扩散),第3~5天投影值均 $\geq 1.28$ (不利于扩散),第6~7天投影值低于1.06(有利于扩散),仅第2天预报结果与实况(不利于扩散)略有差异,其余预报时段的扩散等级均与实况较好地吻合(表7)。同理, $\text{O}_3$ 污染过程(2024年9月26日~10月2日)的预报扩散等级,除第1天(1.32)和第4天(1.07)预报为较不利于扩散,与实况(不利于扩散)存在一定差异,其余预报等级均较实况吻合(表7)。将预报从提前1 d增至3 d时,RAGA-PPC预报扩散等级结果与实测值的均方根误差(RMSE)有所增加(由 $3.67$ 增至 $7.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ );当提前预报时间延长至7 d时,拟合结果与实测值的误差存在一定不稳定性,这与数值模式预报气象指标的稳定性和准确率关系密切。再次证实RAGA-PPC模型对未来1~7 d的空气污染物扩散等级具有可预报性。

表7 RAGA-PP模型预报预报自贡地区 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{O}_3$ 浓度扩散等级实例  
Table 7 Example of RAGA-PP forecasting  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{O}_3$  concentration diffusion levels in Zigong

时间	实测 $\text{PM}_{2.5}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	预报投影值	RMSE/ $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	时间	实测 $\text{O}_3/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	预报投影值	RMSE/ $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$
12月1日	75.58	1.12	4.16	9月26日	162.25	1.32	4.38
12月2日	115.70	1.13	6.44	9月27日	211.25	1.84	7.65
12月3日	100.17	1.51	5.28	9月28日	206.88	1.69	3.67
12月4日	91.38	1.40	4.78	9月29日	151.88	1.07	6.38
12月5日	37.96	1.38	3.88	9月30日	72.25	0.38	5.46
12月6日	24.14	0.98	4.99	10月1日	69.25	0.41	4.45
12月7日	26.96	0.98	4.56	10月2日	65.75	0.48	4.67

## 5 结论

以自贡地区2016~2022年8个监测站点的空气质量和气象要素数据为样本,利用XGBoost筛选 $\text{O}_3$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的关键气象因素,结合遥感反演的AOD分别进行 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{O}_3$ 浓度时空特征分析,并采用置信区间和RAGA-PPC模型初步建立 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{O}_3$ 污染扩散等级气象指标和预报方法。

(1)AOD空间分布呈西低东高势态,低值区位于荣县西北部属林地山区,高值区位于荣县城区以东一带,这与人口活动频繁、工业聚集等有关;整体变化趋势与 $\text{PM}_{2.5}$ 一致,呈冬季高、夏季低的分布特征。 $\text{O}_3$ 浓度季节空间分布差异明显,呈秋冬季低、春夏季高的分布特征,8月污染最重。

(2)XGBoost筛选得到气压、温度、水汽压、相对湿度、风速、风向、降雨量、边界层高度和AOD是影响

$\text{PM}_{2.5}$ 的主要气象要素,且在冬季表现更明显;影响 $\text{O}_3$ 的主要气象要素在夏季表现更明显,包括气压、温度、最高气温、相对湿度、降雨量、风速、风向、边界层高度、日照时数和辐射。

(3)RAGA-PPC模型得出 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{O}_3$ 浓度气象扩散等级与实况较为吻合;夏季 $\text{O}_3$ 浓度、冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的等级评价效果最好,正确率最高达90.00%以上,其次是春季和秋季。

(4)RAGA-PPC模型对未来1~7 d的空气污染物扩散等级具有可预报性;拟合结果与实测等级的误差随预报时间延长存在一定不稳定性,这与数值模式预报的稳定性和准确率关系密切。

## 6 展望

RAGA-PPC模型对空气污染物扩散等级预报精度,多受数值预报模式稳定性和准确性影响,目前基

于多种深度学习架构的人工智能气象大模型在预测准确性、时效性和计算速度等方面已呈现出巨大潜力。后期可选用高精度数值模式和气象大模型的要素预报,并在PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>扩散等级研究中将综合考虑AOD、气象、土地利用、人口、社会经济和社交网络等更多因素。

### 【参考文献】

- [1] 丁成亮,郑洪波. 大连市PM<sub>2.5</sub>-O<sub>3</sub>复合污染特征及潜在源区分析[J]. 环境科学与技术, 2024,47(S1):95-101.  
Ding Chengliang, Zheng Hongbo. Composite pollution characteristics and potential source area analysis of PM<sub>2.5</sub>-O<sub>3</sub> in Dalian City[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47(S1):95-101.
- [2] 黄毅,郑凯莉,盛积良,等. 成渝地区双城经济圈PM<sub>2.5</sub>污染网络的连通性研究[J]. 环境科学与技术, 2025,48(2):168-177.  
Huang Yi, Zheng Kaili, Sheng Jiliang, et al. Study on the connectivity of PM<sub>2.5</sub> pollution network in Chengdu-Chongqing economic circle[J]. Environmental Science & Technology, 2025,48(2):168-177.
- [3] 雷雨,张小玲,康平,等. 川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析[J]. 环境科学, 2020,41(7):3021-3030.  
Lei Yu, Zhang Xiaoling, Kang Ping, et al. Analysis of transport pathways and potential sources of atmospheric particulate matter in Zigong, in south of Sichuan Province[J]. Environmental Science, 2020,41(7):3021-3030.
- [4] 余益军,孟晓艳,王振,等. 京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨[J]. 环境科学, 2020,41(1):106-114.  
Yu Yijun, Meng Xiaoyan, Wang Zhen, et al. Driving factors of the significant increase in surface ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, during 2013-2018[J]. Environmental Science, 2020,41(1):106-114.
- [5] 王玲玲,陈婷,邹长武,等. 自贡市城区MAIAC AOD和PM<sub>2.5</sub>时空特征及气象因素分析[J]. 湖北农业科学, 2022,61(21):39-44.  
Wang Lingling, Chen Ting, Zou Changwu, et al. Spatio-temporal characteristics and meteorological influencing factors of MAIAC AOD and PM<sub>2.5</sub> in Zigong City[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022,61(21):39-44.
- [6] 李雪梅,许东明. 京津冀城市群PM<sub>2.5</sub>的空间分布及相关性分析[J]. 生态与农村环境学报, 2019,35(2):174-179.  
Li Xuemei, Xu Dongming. Research on the spatial distribution and correlation of PM<sub>2.5</sub> in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019,35(2):174-179.
- [7] Lin W, Xu X, Ge B, et al. Gaseous pollutants in Beijing urban area during the heating period 2007-2008: variability, sources, meteorological, and chemical impacts[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011,11(15):8157-8170.
- [8] 王玲玲,何巍,朱玉璘,等. 自贡市PM<sub>2.5</sub>浓度时空特征分析[J]. 湖北农业科学, 2020,59(6):68-72.  
Wang Lingling, He Wei, Zhu Yulin, et al. Analysis on the spatial-temporal feature of PM<sub>2.5</sub> concentration in Zigong City[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020,59(6):68-72.
- [9] 欧奕含,刘霭薇,王玲玲,等. 自贡逐时臭氧污染气象条件指数研究及应用[J]. 农业灾害研究, 2024,14(7):145-148.  
Ou Yihan, Liu Aiwei, Wang Lingling, et al. Study and application of hourly ozone pollution meteorological condition index in Zigong[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2024,14(7):145-148.
- [10] Yang Q Q, Yuan Q Q, Yue L W, et al. The relationships between PM<sub>2.5</sub> and aerosol optical depth (AOD) in mainland China: about and behind the spatio-temporal variations[J]. Environmental Pollution, 2019,248:526-535.
- [11] Sun K, Chen X L, Zhu Z M, et al. High resolution aerosol optical depth retrieval using Gaofen-1 WFV camera data[J]. Remote Sensing, 2017,9(1):89.
- [12] 王晨莹,何沐全,陈军辉,等. 2006-2017年四川盆地MODIS气溶胶光学厚度时空变化特征[J]. 环境科学研究, 2020,33(1):54-62.  
Wang Chenying, He Muquan, Chen Junhui, et al. Temporal and spatial variation characteristics of MODIS aerosol optical depth in Sichuan Basin from 2006 to 2017[J]. Research of Environmental Sciences, 2020,33(1):54-62.
- [13] 李成才,毛节泰,刘启汉. 用MODIS遥感资料分析四川盆地气溶胶光学厚度时空分布特征[J]. 应用气象学报, 2003,14(1):1-7.  
Li Chengcai, Mao Jietai, Liu Qihan. Characteristics of aerosol optical depth distributions over Sichuan Basin derived from modis data[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2003,14(1):1-7.
- [14] 王学梅,王凤文,陈滔,等. 基于组合模型的PM<sub>2.5</sub>浓度预测及其不确定性分析[J]. 环境工程, 2020,38(8):229-235.  
Wang Xuemei, Wang Fengwen, Chen Tao, et al. PM<sub>2.5</sub> concentration prediction and uncertainty analysis based on a composite model[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(8):229-235.
- [15] 汪伟舵,吴涛涛,张子振. 基于ARIMA模型的杭州市PM<sub>2.5</sub>预测[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2018,34(3):49-55.  
Wang Weiduo, Wu Taotao, Zhang Zizhen. Forecast of PM<sub>2.5</sub> in Hangzhou based on ARIMA model[J]. Natural Science Journal of Harbin Normal University, 2018,34(3):49-55.
- [16] Lung Kuo S, Lin Ho C. The assessment of time series for an entire air quality control district in southern Taiwan using GARCH model[J]. International Journal of Engineering & Technology, 2018,7(3.19):119.
- [17] 解康. 基于参数和非参数方法的PM<sub>2.5</sub>浓度区域预测模型研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2021.
- [18] 王一婷. 基于RAGA-PPC模型的资源型城市绿色转型评价:以攀枝花市为例[D]. 成都:成都理工大学, 2019.

- Wang Yiting. Evaluation on Green Transformation of Resource-based Cities Based on RAGA-PPC Model-Take Panzhihua City as an Example[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [19] 邴其春, 龚勃文, 林赐云, 等. 基于粒子群优化投影寻踪回归模型的短时交通流预测[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2016, 47(12): 4277-4282.
- Bing Qichun, Gong Bowen, Lin Ciyun, et al. Short-term traffic flow prediction method based on particle swarm optimization projection pursuit regression model[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2016, 47(12): 4277-4282.
- [20] 廉丽姝, 高军靖, 束炯. 城市大气污染特征及其与气象因子的关系: 以济南、青岛市为例[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(5): 22-26.
- Lian Lishu, Gao Junjing, Shu Jiong. Urban air pollution feature and its relationship with meteorologic factors: a case study of Jinan and Qingdao[J]. Environmental Pollution & Control, 2011, 33(5): 22-26.
- [21] Wang Z T, Li Q, Wang Q, et al. HJ-1 terrestrial aerosol data retrieval using deep blue algorithm[J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(3): 615-629.
- [22] Bachmann C M, Musman S A, Luong D, et al. Unsupervised BCM projection pursuit algorithms for classification of simulated radar presentations[J]. Neural Networks, 1994, 7(4): 709-728.
- [23] 付强, 金菊良, 梁川. 基于实码加速遗传算法的投影寻踪分类模型在水稻灌溉制度优化中的应用[J]. 水利学报, 2002, 33(10): 39-45.
- [24] Chen T Q, Guestrin C. XGBoost: a Scalable Tree Boosting System[C]//San Francisco California USA. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2016: 785-794.
- [25] 陶世银, 贺敬安. 基于XGBoost与特征重要性筛选的闪电预报模型构建研究[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(1): 99-105.
- Tao Shiyin, He Jing'an. Research on construction of lightning forecast model based on XGBoost and feature importance screening[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(1): 99-105.
- [26] 张芝威, 张玉燕, 温银堂, 等. 基于XGBoost模型的多缺陷点阵结构性能参数预测方法[J]. 计量学报, 2024, 45(4): 559-564.
- Zhang Zhiwei, Zhang Yuyan, Wen Yintang, et al. Multi-defective lattice structure performance parameter prediction method based on XGBoost model[J]. Acta Metrologica Sinica, 2024, 45(4): 559-564.
- [27] 蔡敏, 谷欣, 赵正昱, 等. 2016-2021年运城市区臭氧浓度特征及其与气象因素的关系[J]. 环境科学学报, 2023, 43(9): 229-243.
- Cai Min, Gu Xin, Zhao Zhengyu, et al. Characteristics of ozone concentration and relationships with meteorological factors in Yuncheng City from 2016 to 2021[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(9): 229-243.
- [28] Li K, Jacob D J, Liao H, et al. A two-pollutant strategy for improving ozone and particulate air quality in China[J]. Nature Geoscience, 2019, 12(11): 906-910.
- [29] 王玫, 郑有飞, 柳艳菊, 等. 京津冀臭氧变化特征及与气象要素的关系[J]. 中国环境科学, 2019, 39(7): 2689-2698.
- Wang Mei, Zheng Youfei, Liu Yanju, et al. Characteristics of ozone and its relationship with meteorological factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. China Environmental Science, 2019, 39(7): 2689-2698.
- [30] 张颖龙, 李莉, 宋刘明, 等. 嘉善冬季PM<sub>2.5</sub>化学组分特征及来源分析[J]. 环境化学, 2021, 40(3): 754-764.
- Zhang Yinglong, Li Li, Song Liuming, et al. Chemical components characteristic and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> during winter in Jiaying[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(3): 754-764.
- [31] Wang J F, Li J Y, Ye J H, et al. Fast sulfate formation from oxidation of SO<sub>2</sub> by NO<sub>2</sub> and HONO observed in Beijing haze[J]. Nature Communications, 2020, 11: 2844.
- [32] Coskuner G, Jassim M S, Munir S. Characterizing temporal variability of PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> ratio and its relationship with meteorological parameters in Bahrain[J]. Environmental Forensics, 2018, 19(4): 315-326.
- [33] 杨童, 杨显玉, 阮温馨, 等. 2021年冬季四川盆地PM<sub>2.5</sub>重污染事件成因及来源解析[J]. 中国环境科学, 2023, 43(11): 5633-5644.
- Yang Tong, Yang Xianyu, Ruan Wenxin, et al. Attribution and source apportionment of a severe PM<sub>2.5</sub> episode in winter 2021 over the Sichuan Basin[J]. China Environmental Science, 2023, 43(11): 5633-5644.
- [34] 何沐全, 刘志红, 张颖, 等. 川南城市群大气灰霾时空分布特征及成因分析[J]. 中国环境科学, 2017, 37(2): 432-442.
- He Muquan, Liu Zhihong, Zhang Ying, et al. Analyses on the spatial-temporal distribution features and causing factors of atmospheric haze in the southern city-group of Sichuan[J]. China Environmental Science, 2017, 37(2): 432-442.
- [35] 付强, 赵小勇. 投影寻踪模型原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [36] 康平, 侯静雯, 冯浩鹏, 等. 成都市PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>复合污染特征及相互作用研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(10): 80-90.
- Kang Ping, Hou Jingwen, Feng Haopeng, et al. Study on the characteristics and interaction of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> combined pollution in Chengdu[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(10): 80-90.