李韵唯,吴燕星,张靖雯,等.基于 SOM 方法的珠三角秋季臭氧污染天气型特征分析 [J]. 中国环境科学, 2026,46(3):1194-1201.
Li Y W, Wu Y X, Zhang J W, et al. Characteristics analysis of autumn ozone pollution weather patterns in the Pearl River Delta based on the SOM method [J]. China Environmental Science, 2026,46(3):1194-1201.

# 基于 SOM 方法的珠三角秋季臭氧污染天气型特征分析

李韵唯[1],吴燕星[1],张靖雯[1],刘 润[1,2*] (1.暨南大学环境与气候学院,广东 广州 511443；2.粤港环境质量协同创新联合实验室,广东 广州 511443)

**摘要:** 基于珠三角地区臭氧($O_3$)污染事件呈秋季高发的特征,结合近年来客观天气分型方法在城市群污染分析中的应用,利用自组织映射神经网络(SOM)方法对珠三角海平面气压场进行客观天气分型,并探讨不同天气型对 $O_3$ 严重污染的影响.结果表明,基于海平面气压场划分的 15 种天气型可按照 $O_3$ 污染程度归为 4 类(重污染型、中污染型、轻污染型和清洁型),其中重污染与中污染天气型具有显著的季节分布特征.弱冷高压叠加台风副高型(T12)($O_3$ 平均浓度为 118.2μg/m$^3$,$O_3$ 超标率为 22.4%)对应最严重的 $O_3$ 污染.秋季 $O_3$ 超标日对应的重污染天气型通常伴随高太阳辐射(较均值高 554.1kJ/m$^2$)、高温(较均值高 3.1℃)和低湿(较均值低 9.2%)等气象条件,极有利于 $O_3$ 生成.以秋季出现 $O_3$ 超标天下的重污染天气型环流场为基准进行识别发现,2015~2024 年有利于发生 $O_3$ 超标的识别日数与秋季 $O_3$ 浓度呈显著正相关,且 1995~2060 年类似基准场下有利于发生 $O_3$ 超标的识别日数呈显著上升趋势(年均增加 0.14d).

**关键词:** 珠三角；臭氧；SOM 天气分型；气象
**中图分类号:** X515 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2026)03-1194-08

**Characteristics analysis of autumn ozone pollution weather patterns in the Pearl River Delta based on the SOM method.**

LI Yun-wei[1], WU Yan-xing[1], ZHANG Jing-wen[1], LIU Run[1,2*] (1.College of Environmental and Climate Research, Jinan University, Guangzhou 511443, China；2.Guangdong-Hong Kong-Macau Joint Laboratory of Collaborative Innovation for Environmental Quality, Guangzhou 511443, China). *China Environmental Science*, 2026,46(3)：1194~1201

**Abstract:** Given the ozone ($O_3$) pollution events in the Pearl River Delta (PRD) region frequently occur in autumn and the increasing application of objective weather classification methods in urban agglomeration pollution studies, this study employed the Self-Organizing Map (SOM) method to classify the sea level pressure fields in the PRD and to investigate the impacts of different weather patterns on severe autumn $O_3$ pollution. The results indicated that 15weather patterns identified from sea level pressure fields could be categorized into four groups based on $O_3$ pollution levels: heavy pollution, moderate pollution, light pollution, and clean. Among them, heavy and moderate pollution weather patterns exhibited distinct seasonal distributions, with the weak cold high-pressure combined with typhoon and subtropical high pattern (T12) (The average $O_3$ concentration was 118.2 μg/m$^3$, with an exceedance rate of 22.4%) was associated with the most severe $O_3$ pollution. Autumn $O_3$ exceedance days under heavy pollution patterns were generally accompanied by high solar radiation (554.1kJ/m$^2$ above the mean), high temperature (3.1℃ above the mean), and low relative humidity (9.2% below the mean), which were highly favorable for $O_3$ formation. Using the circulation field of heavy pollution weather patterns with autumn $O_3$ exceedance day as a reference, the study found that the number of days favorable for $O_3$ exceedance during 2015~2024 was significantly correlated with autumn $O_3$ concentration. Furthermore, the number of favorable days under similar circulation conditions showed a significant increasing trend during 1995~2060 (with an average growth rate of 0.14d/a).

**Key words:** Pearl River Delta；ozone；SOM weather classification method；meteorology

近年来,随着多项大气污染防治政策的有效实施,我国 $PM_{2.5}$ 浓度呈现持续下降趋势[1],但近地面 $O_3$ 污染水平却呈显著上升态势[2-3].珠三角地区首要污染物构成发生显著转变:2013 年该区域首要污染物中 $PM_{2.5}$ 占比高达 46%,而 $O_3$ 占比仅为 27%;至 2024 年,$PM_{2.5}$ 占比大幅下降至 8.5%,同时 $O_3$ 占比则快速攀升 78.7%[4-5].这一转变凸显了 $O_3$ 污染在珠三角大气复合污染治理中日益突出的重要性.

长期暴露于高浓度近地面 $O_3$ 可引发呼吸道炎症、肺功能下降等呼吸系统疾病[6-8].近地面 $O_3$ 主要由挥发性有机化合物(VOCs)和氮氧化物($NO_x$)在太阳辐射驱动下发生光化学反应生成[9-10].虽然 $O_3$ 前体物浓度是决定 $O_3$ 生成潜势的关键因素[11-13],气象

**收稿日期:** 2025-08-16
**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2023YFC3706204,2023YFC3706104)
* 责任作者, 副研究员, liurun@jnu.edu.cn

条件则通过调控光化学反应速率(如温度、辐射)、影响边界层结构(如混合层高度、垂直交换)以及驱动区域传输过程等机制,对 $O_3$ 的生成、积累和时空分布格局产生至关重要的影响[14].高浓度 $O_3$ 污染事件通常易发于高温、低湿、强太阳辐射以及风速较小的稳定气象条件下[15-18].

近地面气象条件受大尺度天气形势的支配[19].天气分型是一种基于海平面气压场、风场等要素的统计分类技术,旨在通过识别气象要素时空分布特征对天气形势进行分类.其主要方法包括主观分型、客观分型以及主客观结合分型三类[20-21].主观分型依赖预报员经验判别环流特征,存在样本量有限及分类结果主观性强等局限[22].近年来,客观天气分型逐步应用于各大城市群污染现状分析.基于京津冀地区的 PCT 分型研究表明,东部高压后部型、鞍型场型和均压场型是易导致保定市 $PM_{2.5}$ 污染的天气型,$O_3$ 污染则多出现在均压场型和西北部低压后部型[23].有学者通过 K−means 分析长江三角洲的极端臭氧污染事件,发现在台风外围型的控制下,合肥市的臭氧浓度最高[24].自组织映射神经网络(Self−Organizing Maps, SOM)[25]是近年发展的客观分型方法,通过将高维气象场非线性降维至低维离散空间,实现对环流模态的聚类,其相比于其他客观分型法的优势在于,可同时提取优势环流型(即获胜神经元)及其连续演变特征,已逐步应用于区域气候特征分析[26].随着方法论的完善,SOM 在污染气象学研究中的应用广度和深度显著增加.有学者比较了 SOM 与 K−means 两种方法在广州市天气分型中的应用,结果表明 SOM 在聚类频率分布方面相较于 K−means 具有更高的稳定性[27].在基于珠三角海平面气压场和 10m 风场分型的研究中识别出三类易导致 $O_3$ 高污染的典型环流型,其共同特征表现为台风外围、副热带高压与高压脊多天气系统的协同作用[28];基于广东地区的 SOM 分型研究则表明弱冷高压脊型对区域 $O_3$ 污染具有显著控制作用[29];针对广州 $O_3$−$PM_{2.5}$ 复合污染事件 SOM 分析结果显示秋季副热带高压叠加台风外围型与副热带高压叠加弱冷高压脊型是 $O_3$ 与 $PM_{2.5}$ 浓度“双高”污染的主要环流型[30].

珠三角 $O_3$ 污染事件呈现出在秋季高发的特征[31].为揭示秋季污染事件发生的天气环流背景特征,并探求其与历史同期(2015~2024 年)典型天气型频率或持续性演变的可能关联,本研究采用 SOM 方法,基于 2015~2024 年逐日平均海平面气压场数据,构建研究覆盖研究区域(10ºN~40ºN,100ºE~130ºE)的客观天气型分类体系.在此基础上,重点聚焦秋季污染事件期间的重污染天气型,通过多时空尺度诊断分析,旨在为区域 $O_3$ 污染的精准防控和前瞻性预警提供科学依据.

## 1　数据资料与方法

### 1.1　数据来源

近地面 $O_3$ 浓度数据来源于中国环境监测总站全国空气质量观测数据平台(http://www.cnemc.cn/),严格遵循《环境空气质量标准》(GB 3095−2012)实施质量控制流程.本研究选取珠三角地区广州、珠海、佛山、深圳、江门、肇庆、惠州、中山和东莞共 9 个城市 2015~2024 年 $O_3$ 浓度逐小时数据,基于日最大 8h 滑动平均浓度[$MDA8O_3$,$\rho(O_3-8h)$]构建区域平均 $MDA8O_3$ 作为区域污染指标.通过设定站点数据完整度阈值(≥90%),剔除不符合要求的监测站点,最终保留 48 个有效站点数据.当区域平均 $MDA8O_3$ 超过国家环境空气质量二级标准限值(160 μg/m$^3$),则判定为区域 $O_3$ 超标日.

气象场数据源自欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium−Range Weather Forecasts, ECMWF)ERA5 再分析数据集[32]和基于动力降尺度的 CMIP6 模式偏差校正数据集[33].ERA5 再分析数据集包含海平面气压、10m 风场、500hPa 位势高度、2m 气温、地表向下短波辐射(SSRD)、950hPa 相对湿度,空间分辨率为 0.25°×0.25°,时间分辨率为 1h.其中,2m 气温与 SSRD 取每日 08:00 至 18:00(北京时间)时段内的最大值,其余气象变量则计算 24h 平均值.基于动力降尺度的 CMIP6 模式偏差校正数据集包含共享社会经济路径 SSP585 情景下 2025~2060 年的海平面气压数据,空间分辨率为 1.25°×1.25°,时间分辨率为 6h,该数据计算日平均值后使用.

### 1.2　SOM 天气分型法

本文采用 SOM 方法进行客观天气分型.SOM 是一种基于无监督学习的人工神经网络方法,通过对高维输入数据进行非线性降维和拓扑保持映射,

将具有相似特征的气象场在二维输出层网格上进行聚类[34].鉴于海平面气压场主导近地面大尺度环流并耦合影响局地气象要素,选取该变量作为天气分型的特征场[27,35-36].基于2015~2024年的逐日海平面气压场构建训练样本集,输入至二维 SOM 网络进行模式识别,最终实现天气系统的客观分类.SOM 分型质量通过量化误差(QE)和拓扑误差(TE)双指标进行评价,其中 QE 反映数据重构精度,TE 表征拓扑结构保持度,二者数值与分型质量呈负相关[37].本研究系统评估不同分型数量的分型性能,QE 和 TE 的综合评估(图 1),3×5(15 类)网格在综合排序中表现最优,且其 TE 值较低,表明拓扑结构保持良好.据此,本研究确定采用 15 类天气型(3×5)作为最优分型方案.

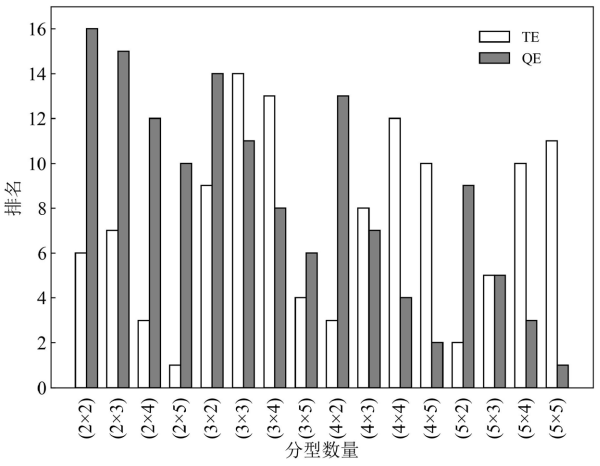



图 1 SOM 误差数值排序

Fig.1 Sorting of SOM error value

### 1.3 基于空间相似性识别有利于 $O_3$ 生成日法

为解析导致珠三角 $O_3$ 污染事件的特定环流型其潜在发生概率的长期演变,本研究采用基于环流相似性的方法识别历史及未来与之环流特征相似的日子.该方法借鉴了 Liu 等[27]利用空间相关系数识别特定天气型日的思路,本研究选取 2015~2024 年 $O_3$ 超标日对应关键型的海平面气压场作为基准场,计算 1995~2024 年(基于 ERA5 再分析海平面气压场数据)和 2025~2060 年(基于 CMIP6SSP585 情景下动力降尺度偏差校正的海平面气压场数据)逐日海平面气压场与该基准场的空间相关系数($r$).

在构建 2025~2060 年的相关系数序列时,将基准场的空间分辨率由 0.25°×0.25°插值为 1.25°×1.25°(与 CMIP6 数据分辨率匹配).设定 $r$>0.9 为阈值,识别历史及未来时期中环流特征与 $O_3$ 污染事件关键型高度相似的日子(识别日).通过分析 1995~2060 年期间识别日的出现频率,评估此类易导致区域 $O_3$ 高污染的特定环流型在未来气候变化背景下的潜在演变趋势.

## 2 结果与讨论

### 2.1 2015~2024 年珠三角 $MDA8O_3$ 变化特征

由图 2 可知,2015~2024 年珠三角地区 $MDA8O_3$ 呈现显著上升趋势,线性增长速率为 2.33μg/(m$^3$·a).其中,2019 年珠三角的 $\rho(O_3-8h)$为 109μg/m$^3$,超标天数为 63d,2022 年 $MDA8O_3$ 达到次峰值为 108μg/m$^3$,超标天数到达最大的 70d.珠三角月 $MDA8O_3$ 和月超标天数在 9 月达到峰值,分别为 129μg/m$^3$ 和 82d;10 月次之,分别为 126μg/m$^3$ 和 68d.2015~2024 年 $MDA8O_3$ 呈现出秋季大于春季略大于夏季,冬季最小的分布特征.

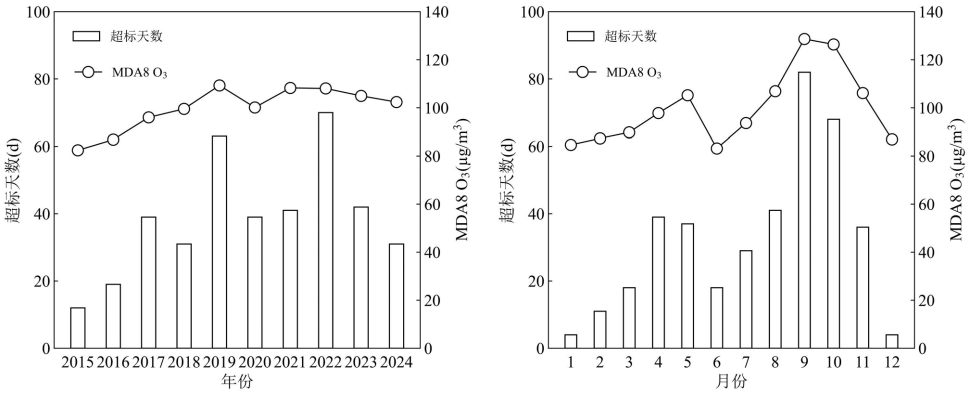



图 2 2015~2024 年 $MDA8O_3$ 年平均浓度及年超标天数和 $MDA8O_3$ 月平均浓度及月超标天数

Fig.2 Annual average concentration of $MDA8O_3$ and annual number of $O_3$ exceedance days from 2015 to 2024 and monthly average concentration of $MDA8O_3$ and monthly number of $O_3$ exceedance days

### 2.2　珠三角天气分型与 $MDA8O_3$ 的关联

利用 SOM 方法将 2015~2024 年珠三角的天气类型划分为 15 类(图 3),分别为:副高边缘型(T1)、东风回流型(T2)、变性高压脊型(T3)、弱冷高压东移型(T4)、冷高压脊型(T5)、副高西侧型(T6)、脊后槽前型(T7)、弱冷高压型(T8)、冷高压底部型(T9)、强冷高压脊型(T10)、均匀低压型(T11)、弱冷高压叠加台风副高型(T12)、冷高压叠加台风型(T13)、强冷高压型(T14)、弱冷高压底部型(T15).总体上,临近天气型的气压场分布相似,而相距较远的天气型差异明显,主要体现在天气型中气压场的高低压系统的强弱与位置差异上,即临近天气型之间的高低压系统的强弱与位置分布相似,从天气型高低压系统的强弱与位置差异的变化中可反映出天气系统的演变过程.

为比较不同天气型下 $MDA8O_3$ 和超标率的差异,采用极差标准化方法处理 15 类天气型对应的 $MDA8O_3$ 平均浓度和超标率[38],并基于 $MDA8O_3$ 和超标率的双重阈值建立污染天气型分级体系:重污染天气型(双因子>0.7)、中污染天气型(单因子>0.7)、轻污染天气型(双因子介于 0.2 ~ 0.7)及清洁天气型(单因子<0.2).

具体分类结果及季节分布如表 1 所示,15 类天气型的出现频次相对均衡.在重污染天气型中,均匀低压型(T11)、弱冷高压叠加台风副高型(T12)和冷高压叠加台风型(T13)的 $MDA8O_3$ 平均浓度和超标率分别为 116.5μg/m$^3$、20.2%,118.2μg/m$^3$、22.4%和 117.6μg/m$^3$、18.7%.重污染天气型控制下的天数占总天数的 18.5%,其中弱冷高压叠加台风副高型(T12)的浓度和超标率为 15 类中最高,是造成珠三角 $O_3$ 污染最严重的天气型.在中污染天气型中,弱冷高压型(T8)对应的 $MDA8O_3$ 平均浓度最高,为 112.7μg/m$^3$,而变性高压脊型(T3)的超标率最高,达到 14.1%,中污染天气型控制下的天数占总天数的 17.1%.轻污染天气型控制下的天数占比为 31.9%,而清洁天气型中强冷高压底部型(T15)对应的 $MDA8O_3$ 平均浓度和超标率最低,分别为 81.3μg/m$^3$、1.2%.清洁天气型的天数占比在四类中最高,达到 32.4%.

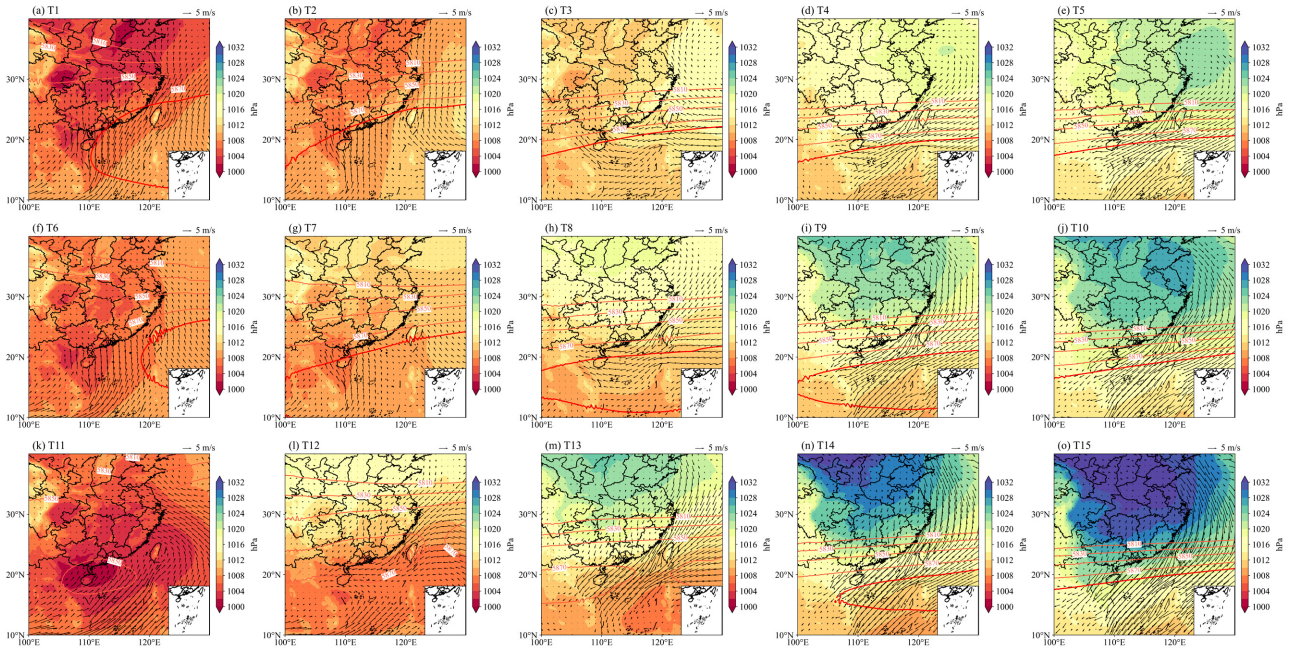



图 3　2015~2024 年海平面气压场天气分型

Fig.3　Weather classification map based on sea level pressure field from 2015 to 2024

实心颜色表示海平面气压,等值线表示 500hPa 位势高度,红色加粗等值线为 5880 线,箭头表示 10m 风

珠三角易引发 $O_3$ 污染的重污染和中污染天气型在季节分布上差异显著.其中,主要出现在秋季的天气型为 T12(弱冷高压叠加台风副高型)、T13(冷高压叠加台风型)和 T8(弱冷高压型)(图 3):T12(弱冷高压叠加台风副高型)与 T13(冷高压叠加台风型)分别集中在 9 月和 10 月,反映了中高纬度冷空气活动

与热带系统(台风)及副热带高压等多种尺度天气系统的共同作用; T8(弱冷高压型)则集中在 9~10 月,表现为蒙古弱冷空气南侵.与洪莹莹等[28]对 2013~2017 年珠三角秋季天气分型的分析相比,本研究识别出的影响该区域秋季臭氧污染的天气系统具有一致性,且导致秋季臭氧污染最为严重的天气型也较为一致,但出现了 T8(弱冷高压型)作为易引发 $O_3$ 污染的典型天气型在其研究中未有明确体现,表明了近年来珠三角易引发 $O_3$ 污染的天气型已发生演变.

**表 1 15 类天气型控制时期的年均与秋季 $MDA8O_3$ 平均浓度、出现天数及超标率**

Table 1 Annual and autumn average $MDA8O_3$ concentrations, occurrence days, and exceedance rates during the 15weather patterns

| 天气类型 | 天气型 | $MDA8O_3$(μg/m$^3$) | | 天数(d)/超标率(%) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 平均浓度 | 秋季 | 总计 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 |
| 重污染 | T11 | 116.5 | 124.4 | 277.0/20.2 | 12.0/25.0 | 241.0/20.3 | 24.0/16.7 | 0.0/0.0 |
| | T12 | 118.2 | 129.0 | 196.0/22.4 | 42.0/9.5 | 26.0/19.2 | 128.0/27.3 | 0.0/0.0 |
| | T13 | 117.6 | 127.5 | 203.0/18.7 | 21.0/4.8 | 0.0/0.0 | 149.0/23.5 | 33.0/6.1 |
| 中污染 | T3 | 109.1 | 116.1 | 234.0/14.1 | 179.0/14.5 | 7.0/0.0 | 36.0/19.4 | 12.0/0.0 |
| | T5 | 109.1 | 124.2 | 187.0/11.2 | 77.0/18.2 | 0.0/0.0 | 34.0/17.7 | 76.0/1.3 |
| | T8 | 112.7 | 132.5 | 204.0/13.2 | 87.0/3.5 | 1.0/0.0 | 107.0/22.4 | 9.0/0.0 |
| 轻污染 | T4 | 100.7 | 125.1 | 207.0/11.6 | 99.0/7.1 | 0.0/0.0 | 59.0/23.7 | 49.0/6.1 |
| | T6 | 94.0 | 144.6 | 218.0/10.1 | 48.0/8.3 | 153.0/7.2 | 17.0/41.2 | 0.0/0.0 |
| | T7 | 99.8 | 102.3 | 220.0/12.7 | 122.0/10.7 | 37.0/13.5 | 61.0/16.4 | 0.0/0.0 |
| | T9 | 102.7 | 124.3 | 266.0/11.7 | 54.0/5.6 | 0.0/0.0 | 114.0/22.8 | 98.0/2.0 |
| | T10 | 93.8 | 98.9 | 253.0/6.3 | 33.0/12.1 | 0.0/0.0 | 34.0/8.8 | 186.0/4.8 |
| 清洁 | T1 | 85.6 | 132.8 | 351.0/4.6 | 25.0/4.0 | 320.0/4.1 | 6.0/33.3 | 0.0/0.0 |
| | T2 | 88.4 | 102.8 | 243.0/6.2 | 97.0/8.3 | 134.0/3.7 | 12.0/1.7 | 0.0/0.0 |
| | T14 | 89.7 | 102.2 | 240.0/5.0 | 10.0/0 | 0.0/0.0 | 100.0/11.0 | 130.0/0.8 |
| | T15 | 81.3 | 91.5 | 347.0/1.2 | 14.0/21.4 | 0.0/0.0 | 29.0/0.0 | 304.0/0.3 |

## 2.3 重污染天气型环流场特征及未来演变

基于珠三角 $O_3$ 超标天数在秋季高发的特征[39],本研究进一步聚焦主导型重污染天气型,系统分析其环流场的演变规律.秋季 $O_3$ 超标天下重污染天气型对应的气象要素合成分析表明(图 4):在秋季 $O_3$ 超标天下,重污染天气型对应的相对湿度较均值低 11.8%,降水减少,不利于 $O_3$ 的湿沉降,较低的相对湿度延长了臭氧前体物($NO_x$ 和 VOCs)在大气中的滞留时间,从而使光化学反应持续进行[40-42],且较低的相对湿度会抑制 $O(^1D)$与水汽反应生成羟基自由基 OH,从而抑制 $O_3$ 与 OH 的反应,使 $O_3$ 的分解减少[43]. 2m 温度与太阳辐射分别偏高 1.1℃和 426.2kJ/m$^2$,较高的温度和太阳辐射可以增强 $NO_2$ 的光解速率和 NO 与 $O_3$ 的反应速率,从而增强 $O_3$ 的光化学生成,且较高的温度也会促进植物挥发性有机物(VOCs)的排放速率,更多的 VOCs 又会促进 $O_3$ 的生成,从而提高 $O_3$ 浓度[44-46],上述气象要素特征共同构成 $O_3$ 暴发的气象条件.

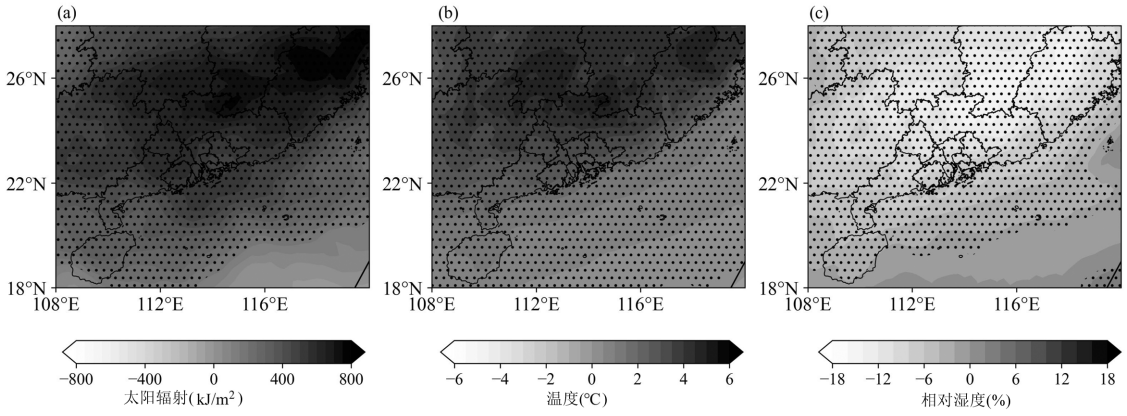



图 4 秋季 $O_3$ 超标天下重污染天气型对应的气象要素较秋季均值的差异

Fig.4 Anomalies of meteorological parameters of $O_3$ exceedance days under the heavy pollution weather patterns in autumn relative to autumn mean

在改进 Liu 等[27]方法的基础上,构建了环流相似度识别模型.针对 2015~2024 年秋季出现的三类重污染天气型对应的 $O_3$ 超标日,分别计算其海平面气压均值场,并按各类重污染天气型 $O_3$ 超标日数占三类总 $O_3$ 超标日数的比例加权,叠加得到基准场.随后计算基准场与 2015~2024 年各日海平面气压场的空间相似性,并以 $r$>0.9 为阈值识别有利于 $O_3$ 超标的日数.结果表明,2015~2024 年识别日数与同期秋季 $O_3$ 浓度及实际超标日数均呈显著正相关(图 5a),表明环流型对 $O_3$ 浓度变化具有重要调制作用.其中,识别日数与实际超标日数存在差异,主要归因于前体物排放的影响[47].

进一步对 1995~2060 年秋季与重污染天气型环流相似日的发生频率进行量化(图 5b),结果显示识别日数整体呈显著上升趋势(0.14d/a, $P$<0.05).其中,1995~2024 年识别日数增长更为显著(0.29d/a, $P$<0.05),2019 年达到峰值(29d);2025~2060 年仍呈上升趋势(0.15d/a),2053 年达到峰值(35d).基于上述相关性与趋势分析,可以推测出 1995~2060 年秋季 $O_3$ 浓度具有显著上升趋势,为珠三角地区 $O_3$ 污染防控提供了科学依据.

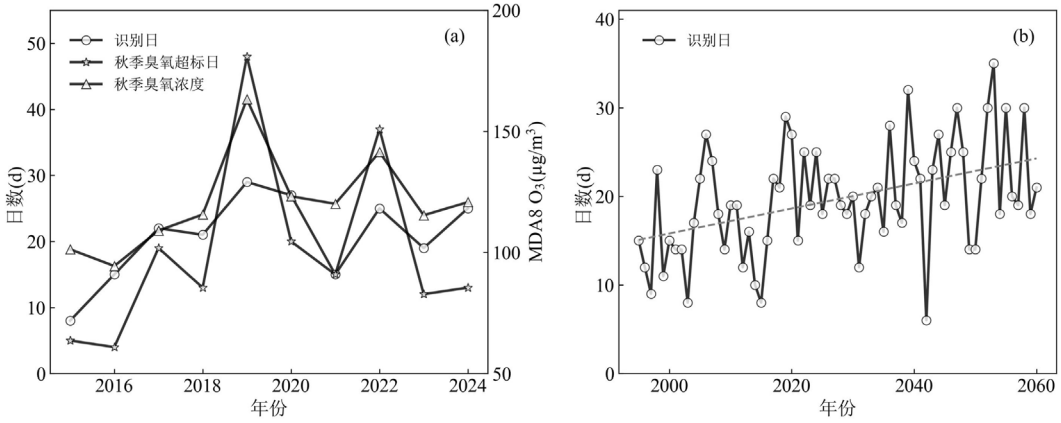



图 5　2015~2024 年有利于发生 $O_3$ 超标的识别日数、秋季 $O_3$ 实际超标日数及秋季平均 $O_3$ 浓度,以及 1995~2060 年有利于发生 $O_3$ 超标识别日数的演变特征

Fig.5　The number of $O_3$ favorable exceedance days, autumn $O_3$ exceedance days and autumn $O_3$ average concentration during 2015~2024, together with the long-term evolution of the number of $O_3$ favorable exceedance days from 1995 to 2060

## 3　结论

3.1　基于 SOM 客观分型结果,2015~2024 年珠三角共识别 15 种天气型,弱冷高压叠加台风副高型(T12)为造成珠三角 $O_3$ 污染最严重的天气型.

3.2　秋季 $O_3$ 超标天下重污染天气型控制的低湿度(较均值低 9.2%)、强太阳辐射(较均值高 554.1kJ/m$^2$)及高温(较均值高 3.1℃)协同作用显著促进 $O_3$ 生成,是珠三角秋季极端 $O_3$ 污染的关键气象成因.

3.3　基于秋季 $O_3$ 超标天下的重污染天气型环流基准场的相似日识别显示:2015~2024 年有利于发生 $O_3$ 超标的识别日数与秋季 $O_3$ 浓度呈现显著正相关($p$<0.05),且 1995~2060 年促发 $O_3$ 超标的气象条件年均增加 0.14d,揭示了气象条件下驱动 $O_3$ 污染风险持续增强的演变趋势.

**参考文献:**

[1] Xue T, Liu J, Zhang Q, et al. Rapid improvement of $PM_{2.5}$ pollution and associated health benefits in China during 2013~2017 [J]. Science China Earth Sciences, 2019,62:1847-1856.

[2] 赵　伟,高　博,卢　清,等.2006~2019 年珠三角地区臭氧污染趋势 [J]. 环境科学, 2021,42(1):97-105.
Zhao W, Gao B, Lu Q, et al. Ozone pollution trend in the Pearl River Delta region during 2006~2019 [J]. Environmental Science, 2021,42(1):97-105.

[3] Lu X, Zhang L, Wang X L, et al. Rapid increases in warm-season surface ozone and resulting health impact in China since 2013 [J]. Environmental Science & Technology Letters, 2020,7(4):240-247.

[4] 广东省生态环境厅.广东省环境状况公报 [R]. 广州:广东省生态环境厅, 2013.
Department of Ecology and Environment of Guangdong Province. Report on the state of Guangdong Provincial ecology and environment [R]. Guangzhou: Department of Ecology and Environment of Guangdong Province, 2013.

[5] 广东省生态环境厅.广东省生态环境状况公报 [R]. 广州:广东省生态环境厅, 2024.

Department of Ecology and Environment of Guangdong Province. Report on the state of Guangdong Provincial ecology and environment [R]. Guangzhou: Department of Ecology and Environment of Guangdong Province, 2024.

[6] Hu F, Xie P H, Xu J, et al. Long-term trends of ozone in the Yangtze River Delta, China: spatiotemporal impacts of meteorological factors, local, and non-local emissions [J]. Journal of Environmental Sciences, 2025,156:408-420.

[7] 王晓红,马明浩,辛守英,等.2019~2022 年京津冀臭氧污染特征及影响因素分析 [J]. 环境污染与防治, 2024,46(6):777-783,788.
Wang X H, Ma M H, Xin S Y, et al. Analysis of ozone pollution characteristics and influencing factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2019 to 2022 [J]. Environmental Pollution and Control, 2024,46(6):777-783, 788.

[8] Phosri A, Ueda K, Seposo X, et al. Effect modification by temperature on the association between $O_3$and emergency ambulance dispatches in Japan: A multi-city study [J]. Science of the Total Environment, 2023,861:160725.

[9] 钟宗莲,刘忠鹏,方选进,等.2019~2023 年自贡市臭氧污染特征及气象条件影响分析 [J]. 环境影响评价, 2025,47(2):68-74,82.
Zhong Z L, Liu Z P, Fang X J, et al. Analysis of the impact of ozone pollution characteristics and meteorological conditions in Zigong City from 2019~2023 [J]. Environmental Impact Assessment, 2025,47(2): 68-74,82.

[10] Leung K H Y, Arnillas C A, Cheng V Y S, et al. Seasonality patterns and distinctive signature of latitude and population on ozone concentrations in Southern Ontario, Canada [J]. Atmospheric Environment, 2021,246:118077.

[11] Zeren Y Z, Zhou B, Zheng Y H, et al. Does ozone pollution share the same formation mechanisms in the bay areas of China? [J]. Environmental Science & Technology, 2022,56(20):14326-14337.

[12] Wang Z Y, Shi Z B, Wang F, et al. Implications for ozone control by understanding the survivor bias in observed ozone-volatile organic compounds system [J]. Npj Climate and Atmospheric Science, 2022, 5:39.

[13] 韩婷婷,李颖若,邱雨露,等.上甸子区域背景站 VOCs 污染特征及其对臭氧生成贡献 [J]. 环境科学, 2020,41(6):2586-2595.
Han T T, Li Y R, Qiu Y L, et al. Characteristics of VOCs and their roles in ozone formation at a regional background site in Beijing, China [J]. Environmental Science, 2020,41(6):2586-2595.

[14] Zhu T F, Deng H Y, Huang J H, et al. Analysis of ozone vertical profiles over Wuyishan region during spring 2022 and their correlations with meteorological factors [J]. Atmosphere, 2022,13(9): 1505.

[15] Zhan C C, Xie M, Liu J, et al. Surface ozone in the Yangtze River Delta, China: a synthesis of basic features, meteorological driving factors, and health impacts [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2021,126(6):e2020JD033600.

[16] Ejimofor C S, Okoro E C, Sivla W T. Effects of elevated humidity on stratospheric ozone content in the tropics [J]. International Journal of Physical Sciences, 2020,15(4):182-193.

[17] 齐 冰,牛彧文,杜荣光,等.杭州市近地面大气臭氧浓度变化特征分析 [J]. 中国环境科学, 2017,37(2):443-451.
Qi B, Niu Y W, Du R G, et al. Characteristics of surface ozone concentration in urban site of Hangzhou [J]. China Environmental Science, 2017,37(2):443-451.

[18] Wang L, Chen B H, Ouyang J Y, et al. Causal-inference machine learning reveals the drivers of China's 2022 ozone rebound [J]. Environmental Science and Ecotechnology, 2025,24:100524.

[19] 张宇烽,杨俊俊,陈婷婷,等.西北太平洋台风路径对汕头市秋季臭氧污染的影响 [J]. 中国环境科学, 2024,44(12):6538-6548.
Zhang Y F, Yang J J, Chen T T, et al. Influence of typhoon track in northwest Pacific on ozone pollution in autumn in Shantou City [J]. China Environmental Science, 2024,44(12):6538-6548.

[20] Huth R, Beck C, Philipp A, et al. Classifications of atmospheric circulation patterns: Recent advances and applications [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2008,1146(1):105-152.

[21] Philipp A, Bartholy J, Beck C, et al. Cost733cat-A database of weather and circulation type classifications [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2010,35(9/12):360-373.

[22] 蔡日东,沈 劲,林子锋,等.广东省不同天气类型下的臭氧生成敏感性分析 [J]. 广东化工, 2023,50(23):95-99.
Cai R D, Shen J, Lin Z F, et al. Sensitivity analysis of ozone generation under different weather types in Guangdong Province [J]. Guangdong Chemical Industry, 2023,50(23):95-99.

[23] 付兴宇,程水源,王传达.保定市不同天气型下 $PM_{2.5}$ 和 $O_3$ 复合污染防治策略 [J]. 中国环境科学, 2025,45(7):3582-3592.
Fu X Y, Cheng S Y, Wang C D. Study on prevention and control strategies of $PM_{2.5}$ and $O_3$ combined pollution under different weather patterns in Baoding City [J]. China Environmental Science, 2025,45(7): 3582-3592.

[24] Hu F, Xie P H, Xu J, et al. Impacts of synoptic weather patterns on Hefei's ozone in warm season and analysis of transport pathways during extreme pollution events [J]. Journal of Environmental Sciences, 2025,156:371-384.

[25] Hewitson B C, Crane R G. Self-organizing maps: applications to synoptic climatology [J]. Climate Research, 2002,22(1):13-26.

[26] Reusch D B, Alley R B, Hewitson B C. Relative performance of self-organizing maps and principal component analysis in pattern extraction from synthetic climatological data [J]. Polar Geography, 2005,29(3):188-212.

[27] Liu N X, He G W, Wang H L, et al. Rising frequency of ozone-favorable synoptic weather patterns contributes to 2015~2022 ozone increase in Guangzhou [J]. Journal of Environmental Sciences, 2025, 148:502-514.

[28] 洪莹莹,翁佳烽,谭浩波,等.珠江三角洲秋季典型 $O_3$ 污染的气象条件及贡献量化 [J]. 中国环境科学, 2021,41(1):1-10.
Hong Y Y, Weng J F, Tan H B, et al. Meteorological conditions and contribution quantification of typical ozone pollution during autumn in Pearl River Delta [J]. China Environmental Science, 2021,41(1):1-10.

[29] 李婷苑,陈靖扬,翁佳烽,等.广东省臭氧污染天气型及其变化特征 [J]. 中国环境科学, 2022,42(5):2015-2024.
Li T Y, Chen J Y, Weng J F, et al. Ozone pollution synoptic patterns and their variation characteristics in Guangdong Province [J]. China Environmental Science, 2022,42(5):2015-2024.

[30] 刘南希,何 成,刘晨曦,等.2015~2021 年广州市臭氧和 $PM_{2.5}$ 复合污

染特征及天气分型研究 [J]. 环境科学学报, 2023,43(1):42−53.
Liu N X, He C, Liu C X, et al. Study on characteristics and weather classification of ozone and $PM_{2.5}$ complex pollution in Guangzhou from 2015 to 2021 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023,43(1):42−53.

[31] 中国环境科学学会臭氧污染控制专业委员会.中国大气臭氧污染防治蓝皮书(2023 年) [M]. 北京:科学出版社, 2023.
Ozone Pollution Control Committee of the Chinese Society for Environmental Sciences. Blue book on the prevention and control of atmospheric ozone pollution in China (2023) [M]. Beijing: Science Press, 2023.

[32] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5global reanalysis [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020,146(730): 1999−2049.

[33] Xu Z F, Han Y, Tam C Y, et al. Bias−corrected CMIP6global dataset for dynamical downscaling of the historical and future climate (1979–2100) [J]. Scientific Data, 2021,8(1):293.

[34] Kohonen T. Self−organized formation of topologically correct feature maps [J]. Biological Cybernetics, 1982,43(1):59−69.

[35] Liu J D, Wang L L, Li M G, et al. Quantifying the impact of synoptic circulation patterns on ozone variability in northern China from April to October 2013~2017 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019,19(23):14477−14492.

[36] 孙启斌,冼星河,黄朝盈,等.东莞市臭氧污染及扩散输送特征的客观天气分型研究 [J]. 环境科学学报, 2025,45(1):436−446.
Sun Q B, Xian X H, Huang Z Y, et al. Study on prevention and control strategies of $PM_{2.5}$ and $O_3$ combined pollution under different weather patterns in Baoding City [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2025,45(1):436−446.

[37] 吴胜男,江志红.基于自组织映射的长江中下游夏季天气分型及其降水特征 [J]. 气象科学, 2019,39(5):588−598.
Wu S N, Jiang Z H. Synoptic classification and precipitation characteristics in summer over the Yangtze River Basin based on self−organizing map [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2019,39(5):588−598.

[38] 曹　梅,范绍佳,靳　春,等.2015~2020 年广东臭氧污染特征、污染天气分型及局地气象要素影响 [J]. 环境科学学报, 2023,43(1):19−31.
Cao M, Fan S H, Jin C, et al. $O_3$ pollution characteristics, weather classifications and local meteorological conditions in Guangdong from 2015 to 2020 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023,43(1):19−31.

[39] 周婕萍,袁　斌,彭钰雯,等.珠三角冬季臭氧污染成因分析——以 2020 年 1 月一次污染过程为例 [J]. 中国环境科学, 2023,43(5): 2198−2209.
Zhou J P, Yuan B, Peng Y W, et al. Causes of ozone pollution in the Pearl River Delta in winter−A case study of pollution process in January 2020 [J]. China Environmental Science, 2023,43(5):2198−2209.

[40] Dufour G, Hauglustaine D, Zhang Y, et al. Recent ozone trends in the Chinese free troposphere: role of the local emission reductions and meteorology [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2021,21(20): 16001−16025.

[41] 岳岩裕,吴翠红,许　可,等.武汉城市圈臭氧污染特征及气象因子影响分析 [J]. 气象与环境科学, 2021,44(3):16−23.
Yue Y Y, Wu C H, Xu K, et al. Analysis of Ozone Pollution Characteristics and Meteorological Impact Factors in Wuhan Metropolitan Area [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2021,44(3):16−23.

[42] Li M Y, Yu S C, Chen X, et al. Large scale control of surface ozone by relative humidity observed during warm seasons in China [J]. Environmental Chemistry Letters, 2021,19:3981−3989.

[43] Yu S C. Fog geoengineering to abate local ozone pollution at ground level by enhancing air moisture [J]. Environmental Chemistry Letters, 2019,17(1):565−580.

[44] Wang R N, Bei N F, Hu B, et al. The relationship between the intensified heat waves and deteriorated summertime ozone pollution in the Beijing–Tianjin–Hebei region, China, during 2013~2017 [J]. Environmental Pollution, 2022,314:120256.

[45] 黄　俊,廖碧婷,吴　兑,等.广州近地面臭氧浓度特征及气象影响分析 [J]. 环境科学学报, 2018,38(1):23−31.
Huang J, Liao B T, Wu D, et al. Guangzhou ground level ozone concentration characteristics and associated meteorological factors [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018,38(1):23−31.

[46] Fu T M, Zheng Y Q, Paulot F, et al. Positive but variable sensitivity of August surface ozone to large−scale warming in the southeast United States [J]. Nature Climate Change, 2015,5(5):454−458.

[47] 徐紫碟,顾　晨,夏思佳,等.气象条件和排放变化对江苏省 2015~2019 年臭氧浓度年际变化的影响研究 [J]. 环境科学学报, 2022, 42(8):1−12.
Xu Z D, Gu C, Xia S J, et al. Study on the effects of changing meteorology conditions and emissions on the interannual variation of ozone concentration in Jiangsu Province from 2015 to 2019 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022,42(8):1−12.

**作者简介：**李韵唯(2001–),女,山东济宁人,暨南大学硕士研究生,主要研究方向为天气型对臭氧污染的影响.发表论文 1 篇.1043454971@qq.com.