DOI: 10.3969/j.issn.2097-583X.2026.04.022　　文章编号：2097-583X(2026)04-0674-07

安阳市臭氧污染特征和成因机制研究

郑　瑶[1*]，和暐杰[2]，李聚军[3]，韩　健[1]，苏方成[4]，叶　圣[5]

(1. 河南省生态环境监测和安全中心，河南 郑州 450006；
2. 河南省安阳生态环境监测中心，河南 安阳 455000；
3. 安阳市生态环境监测和安全中心，河南 安阳 455000；
4. 郑州大学 生态与环境学院，河南 郑州 450001；
5. 生态环境部 华南环境科学研究所，广东 广州 510535)

摘　要：基于安阳市O_3及其关键前体物(NO_x、VOCs组分)与气象要素的同步观测数据，结合光化学箱模型与相对增量反应活性敏感性分析，系统揭示了安阳市O_3超标日的浓度演变特征与形成机制。结果表明：(1)O_3超标具有显著的季节性与日变化规律，超标日集中于4—9月，6月超标率最高；日变化呈典型单峰分布，峰值时段为13:00—15:00。(2)气象条件是驱动O_3超标的核心因素，超标期间常伴随高温、低湿与弱偏南风等气象特征，显著提升大气氧化性；TVOCs与NO_2浓度较非超标日并无显著升高，气象条件的光化学增效作用主导了超标过程。(3)高值季节O_3生成处于VOCs控制区。本地主导型、传输主导型与混合主导型超标事件的浓度累积与峰值演变特征差异显著，区域传输的持续输入与本地光化学生成的协同决定了O_3日变化形态与峰值强度。研究结果可为安阳市制定前体物减排策略及污染防控提供科学支撑。

关键词：臭氧；超标特征；气象因素；成因机制

中图分类号：X511　　**文献标志码：**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID)：**

Research on the characteristics and mechanisms of ozone pollution in Anyang City

Zheng Yao[1*], He Weijie[2], Li Jujun[3], Han Jian[1], Su Fangcheng[4], Ye Sheng[5]

(1. Henan Ecological Environment Monitoring and Safety Center, Zhengzhou 450006, China;
2. Anyang Ecological Environment Monitoring Center of Henan Province, Anyang 455000, China;
3. Anyang Ecological Environment Monitoring and Safety Center, Anyang 455000, China;
4. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
5. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510535, China)

Abstract: Based on synchronous observations of O_3, its key precursors (NO_x and speciated VOCs), and meteorological parameters in Anyang City, by coupling a photochemical box model with relative incremental reactivity sensitivity analysis, the concentration evolution characteristics and formation mechanisms of O_3 pollution episodes in Anyang City were systematically investigated. Results indicated that: (1) O_3 exceedances displayed pronounced seasonal and diurnal patterns, which predominantly occurred from April to September with the highest frequency in June. The diurnal cycle followed a typical single-peak distribution with peak concentrations occurring during 13:00—15:00. (2) Meteorological conditions were the primary drivers of O_3 exceedances. Exceedance periods were characterized by a highly favorable photochemical regime of high temperature, low relative humidity and weak southerly winds, which significantly enhanced atmospheric oxidative capacity. Notably, the concentrations of TVOCs and NO_2 were not significantly increased compared to non-exceedance days, highlighting that the

收稿日期：2026-05-21；**修回日期：**2026-07-10；*.**通信联系人，**E-mail：6169205@qq.com

基金项目：国家自然科学基金项目(42207133)；河南省科技发展计划项目(232102320110)

作者简介：郑 瑶(1983—)，女，河南温县人，高级工程师，硕士，主要从事大气污染物监测、污染成因和影响因素定量分析等方向的研究。

引用格式：郑瑶，和暐杰，李聚军，等. 安阳市臭氧污染特征和成因机制研究[J]. 信阳师范大学学报(自然科学版)，2026，39(4)：674-680.
Zheng Yao，He Weijie，Li Jujun，et al.Research on the characteristics and mechanisms of ozone pollution in Anyang City[J].Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition)，2026，39(4):674-680.

photochemical efficiency amplified by meteorological conditions, rather than precursor loading, governed the exceedance process. (3) O_3 formation during high-concentration seasons operated in a VOCs-limited regime. The concentration accumulation trajectories and peak evolution patterns differed significantly among local production-dominated, regional transport-dominated, and mixed type exceedance events. The sequential action and synergistic interaction of sustained regional transport inputs and local photochemical production constituted the core mechanism determining the diurnal O_3 profile and peak intensity. The results might provide scientific support for developing precursor emission reduction strategies and air pollution prevention and control in Anyang City.

Key words: ozone; exceedance characteristics; meteorological factors; formation mechanisms

0　引言

近年来，得益于一系列环境大气防治措施，我国环境质量大幅改善[1]，细颗粒物（$PM_{2.5}$）浓度持续降低。然而，在气候变暖及人为排放结构演变的双重驱动下，城市区域夏秋季臭氧（O_3）污染问题日益突出，O_3已成为我国许多地区暖季的首要污染物[2]。O_3是典型的二次污染物，由氮氧化物（NO_x）和挥发性有机物（VOCs）在太阳辐射等气象条件下经复杂光化学反应生成，其生成速率与前体物浓度呈现高度非线性关系[3]。同时，O_3光化学寿命较长，其浓度同时受到本地生成和区域传输的共同影响[4]。此外，受前体物排放结构、气象条件、区域传输路径的差异影响，不同区域O_3成因和演变特征存在显著差异[5-6]。因此，通过深入探究区域O_3关键影响因素及规律，精细解析O_3污染过程共性规律和差异化演变机制，是实现区域O_3污染高效治理和科学防控的关键。

目前，国内已针对多个大城市开展了较为系统的O_3的污染特征和成因研究，但对安阳这类位于华北平原、以钢铁、煤化工、建材行业为主的重工业城市的针对性研究相对较少。安阳市位于河南省北部、太行山东麓，是“2+26”京津冀大气污染传输通道城市之一，且近年来O_3污染形势严峻。监测数据显示，近年安阳O_3污染的年均值超过180 μg/m^3[7]，截至目前只有少数研究对该地区O_3污染的浓度特征和气象条件影响进行了初步探讨[8-9]，而对O_3超标成因和演变机制的分析不足。

基于2022年2月至2023年12月安阳市的VOCs组分、常规污染物及气象要素连续观测数据，结合观测约束的箱式化学模型模拟，分析了O_3污染浓度特征以及超标期间气象与前体物浓度的基本特征，探究了城市O_3污染超标的主导因素、驱动类型以及不同污染类型的演变特征，以期为该区域差异化的O_3前体物减排和区域联防联控提供科学依据。

1　数据与方法

1.1　研究区域与数据

研究采用安阳市VOCs组分监测站（114.41°E，36.09°N）及邻近空气质量监测站的逐小时同步观测数据（2022年2月至2023年12月）。观测要素包括O_3（Thermo Fisher 49i）、NO_2（Thermo Fisher 42i）、VOCs（武汉天虹 TH-300B 气相色谱仪）及温度、风速、风向、相对湿度等气象要素（阳光气象PC-8D）。

VOCs组分数据作为观测模型的前体物输入，输入物种涵盖短链碳氢化合物、含氧有机物（OVOCs）及卤代烃，并将其缩写对应至大气排放清单与空气质量模型映射物种集，用于模拟本地O_3净生成速率、区域传输速率及相对增量反应活性。在对比超标与非超标的前体物浓度水平时，以TVOCs（VOCs各组分浓度之和）作为VOCs总量指标。

1.2　基于观测数据的箱式模型

采用耦合主化学机制的观测约束箱式模型（Observation-Based Model coupled with Master Chemical Mechanism，OBM-MCM v3.3）来模拟，输入数据包括实测气象参数和化学组分。模型输出3个关键诊断量：(1)本地O_3净生成速率，单位μg/(m^3·h)，表征局地光化学反应的净产O_3能力；(2)区域O_3传输速率，单位μg/(m^3·h)，由O_3小时变化率减去本地净生成速率得到，反映区域传输和其他非光化学过程对O_3浓度变化的贡献；(3)相对增量反应活性（%/%）。通过分别削减20%的NO_x或VOCs浓度来判别O_3生成对不同前体物的敏感性：RIR>0表示削减该前体物可降低O_3浓度，RIR_NO_x<0则表示该时段O_3生成处于VOCs控制区，此时增加NO_x反而会抑制O_3生成，降低O_3浓度[10]。

1.3　超标事件成因分类

以日最大 8 h 平均浓度(MDA8)＞160 μg/m³作为 O_3 超标判定阈值;根据超标日光化学活跃时段(7:00—16:00)本地 O_3 净生成速率与区域传输速率的小时均值,将超标事件划分为 3 类:(1)本地主导型:区域传输速率均值≤0,即区域传输对 O_3 积累无贡献,超标由本地光化学生成主导;(2)传输主导型:区域传输速率均值＞本地净生成速率均值(两者均大于 0),即区域传输贡献超过本地光化学生成,超标主要由区域传输所致;(3)混合主导型:0＜区域传输速率均值≤本地净生成速率均值,本地生成与区域传输共同驱动 O_3 超标。

2　结果与讨论

2.1　O_3 超标时间特征

图 1 为研究期内 O_3 超标(浓度＞200 μg/m³)的小时和月份分布特征。从小时尺度(图 1(a))看,O_3 小时浓度超过 200 μg/m³的频率集中在 12:00—18:00,其中 13:00 和 15:00 最高。O_3 小时均值的峰值出现在 16:00,夜间至清晨时段(0:00—9:00)的小时超标频率降至接近零。这一日变化特征表明,安阳市 O_3 超标集中于太阳辐射较强、光化学反应活跃的午后至下午时段,光化学生成是 O_3 超标的关键来源。

从月尺度(图 1(b))看,O_3 超标率自 4 月起逐步升高,6 月达到峰值,5 月和 9 月次之,冬半年(11 月至次年 2 月)超标率为零。MDA8 月均值的季节变化趋势与超标率一致,6 月达到峰值,4—9 月普遍接近或超过 160 μg/m³的超标阈值。尽管 7 月平均气温通常高于 6 月,但 7 月降水增多和云量增大导致太阳辐射相对减弱,因此月超标率低于 6 月。这说明 O_3 超标受温度、辐射、云量等多个气象因子的共同调控,而非由单一温度因子决定。

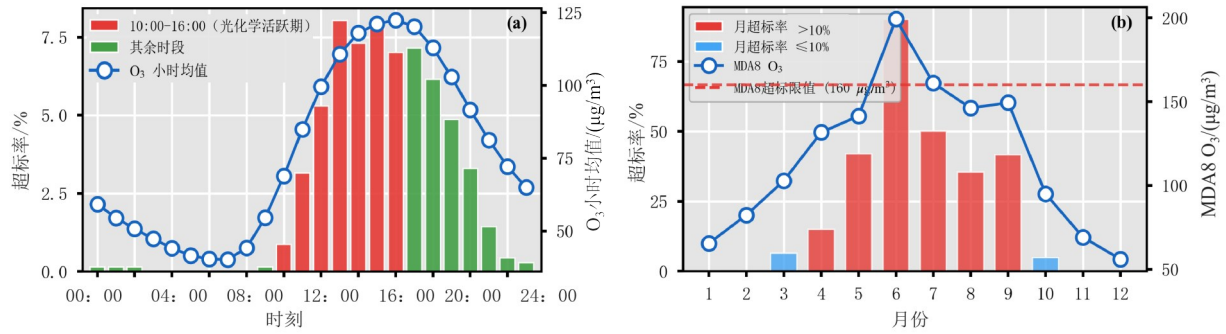


图 1　O_3 小时超标率与 O_3 小时均值(a)及月超标率与 MDA8 月均值(b)

Fig. 1　Exceedance rate of hourly O_3 (a) and monthly exceedance rate versus monthly mean MDA8 O_3 (b)

2.2　O_3 超标、非超标期间气象与前体物特征

图 2 为 O_3 超标日与非超标日的气象条件(白天 10:00—16:00 和夜间其余时段)差异分析(a—c 为白天;d—f 为夜间)。白天超标日温度均值为 30.6 ℃,远高于非超标日的 15.5 ℃,夜间对应均值分别为 24.6 ℃和 11.2 ℃。明显的温差说明 O_3 超标集中于暖季、非超标多集中于冷季的季节差异,也表明高温可通过加快光化学反应速率,促进 O_3 生成。超标日白天风速均值(3.3 m/s)高于非超标日(2.9 m/s),与夜间趋势一致,说明安阳市 O_3 超标并非发生在静稳条件下,而是多伴随一定强度的气流输送。超标日相对湿度白天均值(43.6%)低于非超标日(48.6%),夜间两者差异较小(62.1%和 65.0%),较低的湿度通常对应晴好天气和强太阳辐射,为光化学反应提供了有利条件。

暖季(本研究定义为 4—9 月)日最高温度、日均风速、日最低相对湿度与 MDA8 O_3 的关系如图 3 所示。当日最高温度＜25 ℃时,MDA8 O_3 普遍低于 160 μg/m³;当温度升至 30 ℃以上时,MDA8 O_3 明显抬升并大量超过 160 μg/m³;当温度＞35 ℃时,MDA8 O_3 均值进一步升高,接近或超过 200 μg/m³。此外,湿度与 MDA8 O_3 呈显著负相关(r=−0.4,p＜0.001),当湿度低于 30% 时,MDA8 O_3 多大于 160 μg/m³;当湿度高于 60% 时,几乎无超标。这说明干燥、晴好的气象条件有利于 O_3 的光化学生成和近地面积累。风速与 MDA8 O_3 几乎无线性相关,但较高风速下 O_3 略高,中等偏强的风速可能通过影响前体物扩散与区域传输,进而对 O_3 浓度产生间接影响。综合来看,温度和相对湿度是影响安阳市 O_3 污染超标的关键气象因子。

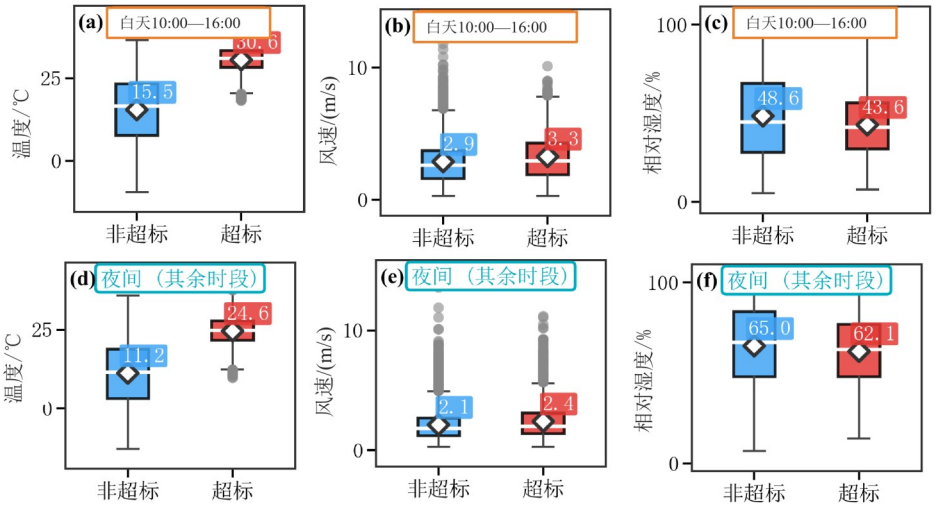


图2　O_3超标与非超标时期温度、风速和相对湿度的箱线对比

Fig. 2　Comparisons of temperature, wind speed and relative humidity between O_3 exceedance and non-exceedance periods

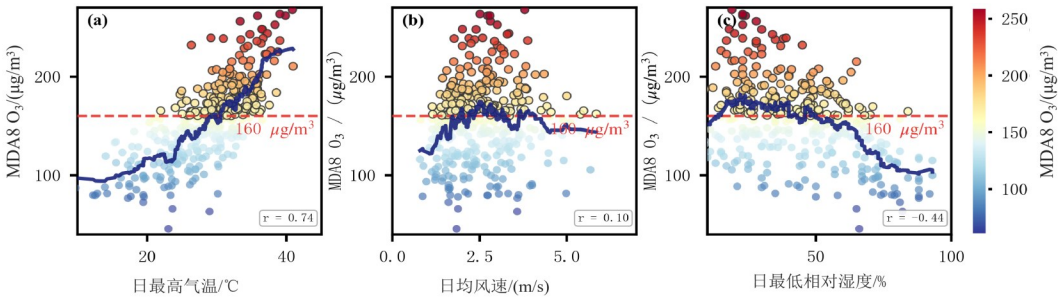


图3　暖季日最高温度、日均风速与日最低相对湿度与MDA8 O_3的散点关系

Fig. 3　Scatter relationships of MDA8 O_3 with daily maximum temperature, daily mean wind speed and daily minimum relative humidity in the warm season

O_3超标和非超标日前体物浓度分析如图4所示(图中(a)、(b)为白天，(c)、(d)为夜间)。白天超标日NO_2均值(15.0 μg/m³)明显低于非超标日(25.1 μg/m³)，TVOCs也呈现出类似趋势(超标17.3 nL/L，非超标22.4 nL/L)，夜间时段两者同样表现为超标日低于非超标日的特征。非超标日O_3关键前体物NO_x和TVOCs高于超标日，这与两类日期的季节分布差异有关。由于非超标日多集中于秋冬季，采暖等人为排放增强、边界层高度偏低，前体物积聚效果显著；但由于冬季气温低、太阳辐射弱，光化学反应效率有限，因而O_3浓度维持在较低水平。而超标日集中于暖季，虽然前体物排放强度相对较低，但高温、强辐射条件下光化学反应效率显著提升，较低的前体物浓度即可驱动O_3快速生成并触发超标。超标日高温强辐射驱动的高强度光化学反应会快速消耗NO_x和VOCs，因此暖季前体物浓度反而偏低。在当前安阳市前体物浓度水平下，气象条件对O_3是否超标具有决定性作用。

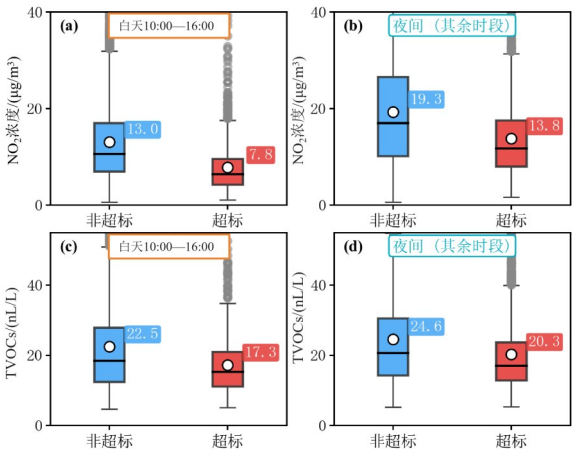


图4　超标与非超标时期NO_2和TVOCs的箱线对比

Fig. 4　Boxplot comparison of NO_2 and TVOCs during ozone exceedance and non-exceedance periods

为进一步分析O_3及其前体物的输送特征，O_3、NO_2和TVOCs的风向玫瑰图如图5所示。O_3高值(图5(a))主要对应东南和西南风(>4 m/s)，而低值多对应西风且风速约3 m/s条件下。NO_2(图5

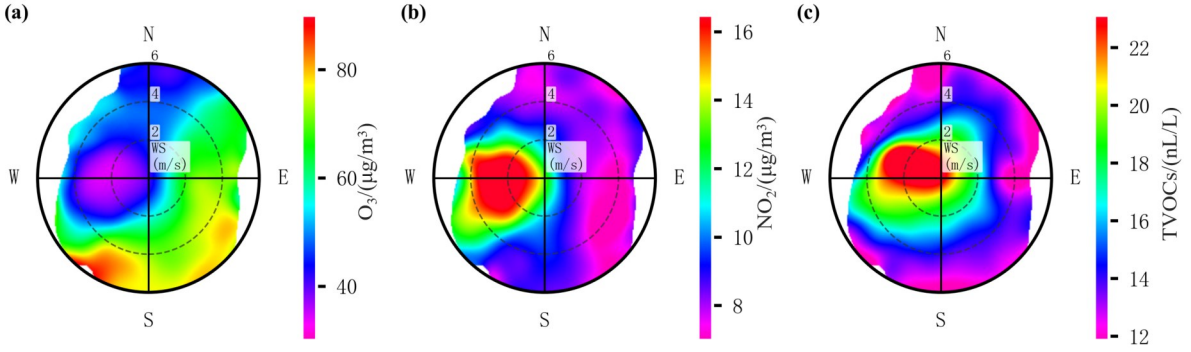


图5　暖季 O_3(a)、NO_2(b)和TVOCs(c)的风向玫瑰图

Fig. 5　Wind rose diagrams for O_3 (a), NO_2 (b) and TVOCs (c) during the warm season

(b))和TVOCs(图5(c))的空间分布与O_3差异显著,前体物高值集中于西、西北和西南方向。偏西方向前体物浓度较高,这与研究站点位于安阳市文峰区西北部、其西侧分布有钢铁及化工等重工业排放源的区位特征高度吻合。在前体物浓度不高的西南和东南风向下,出现O_3浓度高值,说明在西南和东南方位很可能存在着明显的区域传输现象,是安阳O_3浓度高值的重要影响因素。

2.3　O_3超标成因机制分析

2.3.1　3类O_3污染超标类型的气象与前体物特征

基于研究期间MDA8 O_3浓度,将超标类型分为3类,其中本地主导型、传输主导型、混合主导型天数分别为63、67、44 d。O_3浓度在混合主导型期间最高,其次是本地主导型和传输主导型。超标情况下温度、风速、相对湿度、NO_2、TVOCs浓度整体状况,如图6所示。

本地主导型的气象特征表现为温度最高(均值30.1 ℃),风速最低(均值2.5 m/s),相对湿度最高(均值59.7%);前体物方面,NO_2均值较低(15.2 μg/m³)而TVOCs均值最高(21.7 nL/L)。该类型集中发生于盛夏,高温且太阳辐射充足,本地前体物的光化学反应速率快,O_3浓度受本地前体物的影响较大。传输主导型温度最低(均值26.5 ℃)、NO_2均值最高(30.0 μg/m³),意味着本地光化学生成相对较弱,但该类型风速最大(均值3.1 m/s),有利于将上风向较高浓度的O_3输入,叠加本地光化学生成,易引发O_3超标事件。混合主导型各气象要素和前体物浓度均介于二者之间(温度29.8 ℃、风速2.8 m/s、相对湿度46.5%、NO_2 18.2 μg/m³、TVOCs 18.2 nL/L),但其MDA8 O_3均值达到最高111.7 μg/m³。这表明当本地光化学生成与区域传输同时发生时,O_3浓度更容易累积至极端高值。

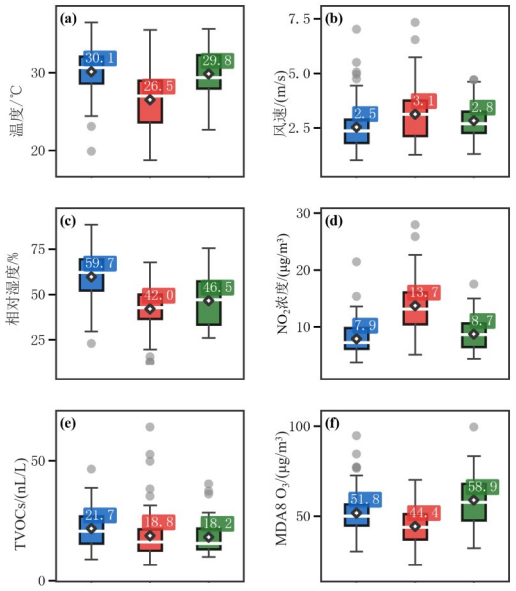


图6　3类O_3超标类型温度、风速、相对湿度、NO_2、TVOCs及MDA8 O_3的箱线对比

Fig. 6　Comparisons of temperature, wind speed, relative humidity, NO_2, TVOCs, and MDA8 O_3 among three types of exceedance events

注　蓝色为本地主导型,红色为传输主导型,绿色为混合主导型。

2.3.2　O_3生成光化学敏感性

为进一步诊断O_3超标的化学驱动因子,基于RIR对安阳O_3的生成机制进行识别,如图7所示。在O_3超标高发暖季(4—9月),RIR_VOCs整体为正值,其中4—5月最高,表明削减VOCs可有效降低O_3浓度。而同期RIR_NO_x持续为负值,5月最低,其值约为−0.9。该结果表明在O_3浓度超标期间O_3生成处于VOCs控制区,此时削减NO_x对降低O_3浓度无效,甚至可能引发O_3浓度的反弹。在O_3浓度较低的1月、2月、11月、12月,O_3生成对NO_x敏感性变为正值,表明O_3生成机制由VOCs控制区向过渡区转变。总

体而言，在O_3超标的月份(4—9月)，VOCs和NO_x对O_3生成分别起着促进和抑制作用。

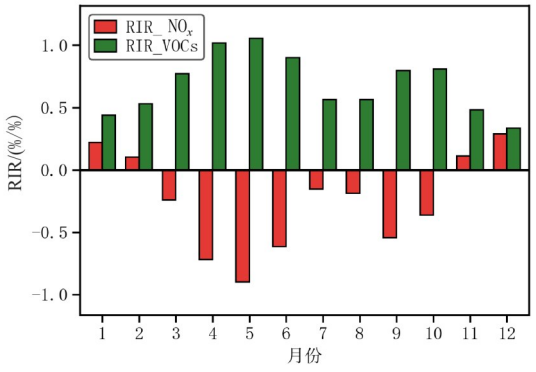


图7　暖季RIR_NO_x与RIR_VOCs的月均变化(10:00—16:00)

Fig. 7　Monthly mean variations of RIR_NO_x and RIR_VOCs during 10:00—16:00 in the warm season

2.3.3　3类O_3污染超标类型日内24 h驱动特征解析

结合气象、本地O_3净生成速率、区域传输速率等指标对不同O_3超标类型特征进行解析，结果如图8所示。3类超标类型中，O_3浓度均自7:00开始累积。此时温度开始上升、湿度下降，气象条件变得有利于O_3生成和累积，且此时夜间O_3前体物叠加早高峰排放，为O_3的光化学生成提供了丰富的物料。然而不同类型超标事件中，O_3浓度的演变和峰值时间特征存在明显差异。本地生成主导的O_3超标事件中(图8(a))，8:00—10:00的区域传输使O_3背景浓度抬升；随后，温度逐渐升高、太阳辐射增强且光化学反应速率加快，O_3浓度在14:00达到峰值(180 μg/m³)，之后开始回落。此后，随着温度的下降和O_3前体物的减少，叠加区域传输为负贡献，O_3浓度开始显著下降。

传输主导型如图8(b)所示，O_3浓度峰值出现在16:00(约200 μg/m³)，较本地生成主导型滞后约2 h。该类型的O_3累积主要依靠上风向高浓度气团的持续输入与本地光化学生成的协同作用，因而达到峰值所需时间更长。该类型中区域传输速率在7:00—15:00为正值，并于12:00达到峰值(约24 μg/(m³·h))，为本地提供了连续的O_3外部输入。在此基础上，午后本地光化学生成虽较弱(峰值仅约8 μg/(m³·h))，但仍持续提供正贡献，两者叠加最终将O_3浓度推至峰值。16:00后随着太阳辐射减弱，本地生成和区域传输贡献由正转负，O_3浓度开始缓慢回落。

混合主导型结果如图8(c)所示。O_3浓度在

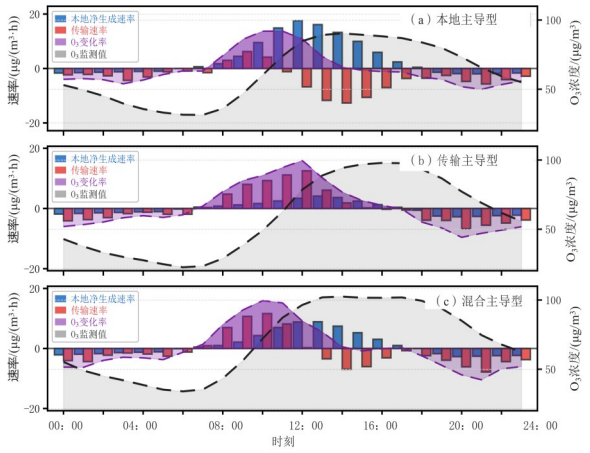


图8　3类O_3超标类型O_3浓度、本地O_3净生成速率与区域传输速率小时值变化平均状况

Fig. 8　Diurnal variations of O_3, local net O_3 production rate, and regional transport rate among three types of exceedance events

14:00达到该3类事件中的最高值(约206 μg/m³)，且至17:00维持在200 μg/m³左右的较高水平。区域传输自7:00开始抬升，并于10:00达到约24 μg/(m³·h)的峰值，为O_3浓度提供了显著的背景输入，使10:00—11:00的O_3浓度已达到160 μg/m³以上。同时，随着太阳辐射增强，本地光化学生成接续驱动，本地O_3净生成速率在13:00达到约18 μg/(m³·h)的峰值，进一步将O_3浓度推升至3类事件中的最高水平，且该高浓度持续至17:00。该类型浓度最高的核心机制在于上午的传输抬升为午后的本地生成提供了更高的反应基线，2种驱动路径在时间上先后衔接、作用上相互叠加，共同推高了O_3浓度峰值。此后，随着O_3的向外输送以及本地前体物的消耗，O_3浓度于18:00开始回落。

3　结论与建议

基于安阳市VOCs组分、O_3、NO_2及气象条件观测数据，结合光化学箱模型与敏感性分析，对安阳市O_3超标特征与成因机制进行了系统研究。安阳市O_3超标具有显著的季节性与日变化规律，集中在4—9月，6月超标率最高，5、7、8月次之，日变化呈单峰型，13:00—15:00为超标高频时段。气象条件是驱动安阳市O_3超标的核心因素，超标期间主导气象条件为高温、低湿、弱偏南风，此类条件显著提升了大气氧化性与光化学反应效率，前体物TVOCs和NO_2浓度无明显的抬升，表明在当前前体物排放水平下，气象条件的光化学增强主

导了O_3超标过程。

光化学箱模型与敏感性分析表明,暖季安阳市O_3生成处于VOCs控制区,超标日可分为本地主导型(36%)、传输主导型(39%)和两者混合主导型(25%),3类事件日内驱动过程差异显著:本地主导型由午后强光化学生成主导,峰值出现最早;传输主导型依赖上风向区域持续输入,峰值出现最晚;混合主导型中,区域传输与本地生成在时间上先后衔接、作用上协同叠加,峰值浓度最高。

综上所述,安阳市O_3污染防控需实施分型施策:本地主导型应优先控制VOCs排放;传输主导型需强化区域联防联控,削减上风向地区的前体物排放;混合主导型需采取“本地减排-区域协同”组合策略,在削减本地前体物的同时加强区域协调,才能有效遏制O_3超标。

参考文献:

[1] Geng Guannan, Liu Yuxi, Liu Yang, et al. Efficacy of China′s clean air actions to tackle $PM_{2.5}$ pollution between 2013 and 2020[J]. Nature Geoscience, 2024, 17(10): 987-994.

[2] Qin Momei, She Yongliang, Wang Ming, et al. Increased urban ozone in heatwaves due to temperature-induced emissions of anthropogenic volatile organic compounds[J]. Nature Geoscience, 2025, 18(1): 50-56.

[3] Xie Qianqian, Tham Y J, Yu Xiaoyu, et al. Seasonal variations of O_3 formation mechanism and atmospheric photochemical reactivity during severe high O_3 pollution episodes in the Pearl River Delta region[J]. Atmospheric Environment, 2023, 309: 119918.

[4] Du Huiyun, Li Jie, Yang Wenyi, et al. The multi-scale insights into summer ozone sources and their impacts on maize yield over the north China Plain[J]. Atmospheric Research, 2026, 336: 108833.

[5] 伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 等. 不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 160-169.

[6] Su Fangcheng, Xu Qixiang, Yin Shasha, et al. Contributions of local emissions and regional background to summertime ozone in central China[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 338: 117778.

[7] 刘军民, 赵海丽, 王兵, 等. 基于KZ滤波的安阳市$PM_{2.5}$和O_3浓度变化及驱动因素分析[J]. 中国环境监测, 2025, 41(6):57-67.

[8] 杨健, 尹沙沙, 于世杰, 等. 安阳市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 115-124.

[9] 刘晓咏, 颜俊, 牛继强, 等. 2015—2021年河南省$PM_{2.5}$-O_3复合污染时空特征分析[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2024, 37(3): 281-285.

[10] Ma Wei, Feng Zemin, Zhan Junlei, et al. Influence of photochemical loss of volatile organic compounds on understanding ozone formation mechanism[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2022, 22: 4841-4851.

责任编辑:王　萍　任长江