

# 合肥市夏季夜间臭氧浓度升高特征及成因研究

耿天召,赵旭辉,程 龙,董 昊,王含月

安徽省生态环境监测中心,安徽 合肥 230071

**摘要:**合肥市作为长三角地区重要省会城市之一,正面临着十分突出的臭氧( $O_3$ )污染问题。目前,大多数研究都集中在日间  $O_3$  峰值浓度水平上,对夜间  $O_3$  浓度上升的研究相对不足。本研究基于 2021—2024 年合肥市 10 个国控站点常规监测数据,研究夜间近地面  $O_3$  增强(NSOE)事件的特征,并探讨其形成机制。研究期间,合肥市夏季平均 NSOE 事件发生频率为  $45\% \pm 7\%$ 。NSOE 事件和非夜间近地面  $O_3$  增强(NNSOE)事件前的日间  $O_3$  峰值浓度分别  $123 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $116 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。低空急流(LLJ)和垂直混合是影响合肥市 NSOE 事件的主要因素。3 个代表性站点在 NSOE 事件过程中的低空急流类型主要为 LLJ-1,其在 3 个站点的出现频率均不低于 87%。此外,NSOE 事件前残留层中高浓度  $O_3$  的存在和 NSOE 事件期间大气稳定性的降低有利于上层  $O_3$  向下混合。NSOE 事件对应的水平传输过程的气团来源主要为周边省市,其贡献占比约为 76%。综上,本研究提供了对合肥市 NSOE 事件从特征到机制的重要概述,强调了未来开展夜间  $O_3$  垂直观测和详细研究的必要性。

**关键词:**夜间臭氧;低空急流;垂直混合;水平传输

中图分类号:X508

文献标志码:A

文章编号:1002-6002(2026)01-0201-08

DOI:10.19316/j.issn.1002-6002.2026.01.18

## Study on the Characteristics and Causes of Nocturnal Surface Ozone Enhancement in Hefei City During Summer

GENG Tianzhao, ZHAO Xuhui, CHENG Long, DONG Hao, WANG Hanyue

Anhui Eco-Environmental Monitoring Center, Hefei 230071, China

**Abstract:** Hefei is one of the important provincial capitals in the Yangtze River Delta region, which faces a prominent issue of  $O_3$  pollution. At present, most studies focus on daytime peak  $O_3$  concentrations, while research on the increase in nighttime  $O_3$  concentrations remains relatively insufficient. Based on routine monitoring data from 10 national control stations in Hefei City from 2021 to 2024, this study investigated the characteristics of nocturnal surface  $O_3$  enhancement (NSOE) events and explored their formation mechanisms. During the study period, the average frequency of NSOE events in Hefei during summer was  $45\% \pm 7\%$ . The daytime peak  $O_3$  concentrations preceding NSOE events and non-NSOE (NNSOE) events were  $123 \mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $116 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectively. Low-level jets (LLJ) and vertical mixing were identified as the primary factors affecting NSOE events in Hefei. Among three representative sites, the predominant LLJ type during NSOE events was LLJ-1, with its occurrence frequency no lower than 87% across all three sites. In addition, the presence of high  $O_3$  concentration in the residual layer before the NSOE events and the reduction of atmospheric stability during the NSOE events facilitated the downward mixing of upper-level  $O_3$ . Horizontal transport affecting NSOE events mainly originated from neighboring provinces and cities, accounting for 76%. In conclusion, this study provides a significant overview of the characteristics and mechanisms of NSOE events in Hefei, emphasizing the need for future nighttime vertical  $O_3$  observations and detailed studies.

**Keywords:** nocturnal surface ozone; low-level jet; vertical mixing; horizontal transport

臭氧( $O_3$ )作为大气中的一种微量气体,扮演着至关重要的角色。大气  $O_3$  约 90% 存在于平流层,剩余 10% 则位于对流层。平流层中的  $O_3$  能够有效吸收紫外线辐射,并在大气环流、化学交互作用以及辐射平衡等多个关键大气过程中发挥着

不可或缺的作用。然而,近地面  $O_3$  则被视为一种典型的二次污染物,同时也是一种重要的温室气体<sup>[1]</sup>。近地面  $O_3$  浓度的增加不仅会对生态环境和人类健康产生负面影响,还可能改变近地面大气的氧化潜力,进而影响近地面大气中的化学反

收稿日期:2024-12-04;修订日期:2025-02-21

基金项目:安徽省重点研发计划(202304a05020010);安徽省科技重大专项(202203a07020004)

第一作者简介:耿天召(1978—),男,硕士,正高级工程师,283382236@qq.com。

应,导致大气污染物的组成和浓度发生变化<sup>[2]</sup>。

近地面  $O_3$  主要来源于氮氧化物( $NO_x$ , 主要包括  $NO$  与  $NO_2$ )、一氧化碳( $CO$ )以及挥发性有机化合物( $VOCs$ )在光照条件下发生的光化学反应。此外, $O_3$  在对流层上部乃至平流层中的传输与扩散过程同样会对其浓度产生显著影响。光化学反应是对流层  $O_3$  的主要生成途径,但值得注意的是,由于夜间缺乏足够的光照, $O_3$  无法以光化学反应方式生成,其浓度主要通过  $NO_x$  的滴定作用及干沉降等过程逐渐降低。通常情况下,近地面  $O_3$  浓度在日间呈现较高水平,在夜间降至较低水平。以往的研究主要聚焦于日间  $O_3$  浓度及极端  $O_3$  污染事件<sup>[3-4]</sup>。近年来,夜间近地面  $O_3$  增强(Nocturnal Surface Ozone Enhancement, NSOE)事件愈发显著,引起了学术界的广泛关注。研究人员在美国、葡萄牙、法国、瑞典、马来西亚、印度及中国等多个国家,均观察到夜间  $O_3$  浓度上升现象。鉴于  $O_3$  的光化学生成在夜间基本停止,NSOE 事件只能归因于特定的气象过程,表现为气象过程引起的  $O_3$  向下垂直混合及高浓度  $O_3$  的区域水平传输。因此,NSOE 事件并非独立事件,而是一种由特定气象条件引发、在全球多个地区普遍发生的现象<sup>[5-6]</sup>。

目前,关于 NSOE 事件形成机制的研究相对有限,不同地区的形成原因间存在显著的差异性。已有研究表明,低空急流(Low-Level Jets, LLJ)<sup>[7]</sup>、局部环流<sup>[8]</sup>、对流天气过程<sup>[9]</sup>以及水平传输是导致夜间  $O_3$  浓度升高的重要原因。此外,NSOE 事件也可能与多种边界层过程间的复杂相互作用有关。多数研究指出,低空急流的动力学作用通过增强垂直风切变,加强湍流的垂直混合,不仅在近地面与残留层之间建立了物质交换,而且促进了  $O_3$  从残留层向近地面的垂直传输。对局部环流机制的研究结果表明,夜间高浓度  $O_3$  与携带  $O_3$  的陆风的水平输送以及与山谷风相关的山坡下沉气流的出现紧密相关。对流风暴引发的近地面  $O_3$  增强现象受多种因素的共同影响,包括但不限于大气对流的强度、风暴的移动速度、下沉气团的来源以及事件的发生时间等<sup>[10]</sup>。

合肥市作为长三角地区城市化和工业化高度发达的城市之一,经济持续增长,能源消耗量也急剧上升。在经济发展的同时,合肥市  $O_3$  污染问题日益凸显,不仅表现出明显的区域特性,污染发生频率也在稳步上升。程龙等<sup>[11]</sup>的研究表明, $O_3$

已经成为影响合肥市环境空气质量的主要污染因子, $O_3$  高值主要集中出现在5—6月和9月。此外,凌晨存在高空  $O_3$  沉降影响<sup>[12]</sup>。在合肥市观测到的典型  $O_3$  污染事件期间, $O_3$  小时平均浓度达  $96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,峰值达  $224 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,呈现出快速生成、快速消耗的污染特征,并且在夜间呈现出非典型的二次峰值过程<sup>[13]</sup>。至今,针对合肥市  $O_3$  污染特征的研究主要聚焦于日间,对夜间近地面  $O_3$  浓度上升的原因尚未开展充分探究。深入理解这一现象不仅对于揭示夜间  $O_3$  浓度的变化规律至关重要,也有助于更准确地预测次日晨间乃至午后的  $O_3$  浓度水平。

因此,本研究为填补合肥市 NSOE 事件研究空白,深入分析2021—2024年间合肥市 NSOE 事件的特点与成因,以期增进对此类事件的理解。本研究涵盖 NSOE 事件的频率分布、峰值特征、发生时段及趋势等方面。此外,本研究通过考察夜间大气化学成分与气象因素的变化情况,探讨驱动 NSOE 事件的潜在因素,系统性地概述合肥市 NSOE 事件的特征,为理解合肥市  $O_3$  污染的演变历程提供新的视角,为制定有效的  $O_3$  污染控制策略提供科学依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据来源

本研究采用2021—2024年合肥市10个国控站点近地面  $O_3$ 、 $NO_2$  和  $CO$  逐小时观测数据。各个国控站点均位于合肥市主城区,其中瑶海区设有三里街、高教基地和瑶海区站点,庐阳区设有庐阳区站点,蜀山区设有长江中路、琥珀山庄、明珠广场和高新区站点,包河区设有滨湖新区和包河区站点。相关数据均源自全国城市空气质量实时发布平台(<https://air.cnemc.cn:18007/>)。观测过程实施了严格的质量控制流程,并已剔除潜在异常数据,从而提升了数据的准确性和可靠性。本研究使用混合单粒子拉格朗日综合轨迹(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory, HYSPLIT)模型,计算2021—2024年每年5—8月发生的 NSOE 事件对应的到达合肥市的8 h 向后轨迹。该模型由美国国家海洋和大气管理局空气资源实验室开发,轨迹模拟由全球数据同化系统(Global Data Assimilation System, GDAS)数据驱动(空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ )。

本研究整合了源自欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) ERA5 数据集的气象资料 (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>), 该数据集是对全球气候与天气条件的再分析成果。本研究所采纳的气象参数涵盖了风的  $U/V$  分量、垂直风速、位势高度、平均海平面气压、边界层高度 (Boundary Layer Height, BLH) 及摩擦速度 (Friction Velocity,  $U^*$ ) 等关键要素。气象数据的时间分辨率为 1 h, 空间水平分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , 垂直分辨率为 25 hPa。

### 1.2 分析方法

本研究中 NSOE 事件的定义参考 HAO 等<sup>[14]</sup> 的研究, 即在当地时间 20:00 至次日 06:00 时段内, 任意一小时近地面  $O_3$  浓度相较于前一小时增长超过  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的现象。NSOE 事件中的  $O_3$  峰值被定义为在该夜间时段内观测到的最高  $O_3$  浓度值。相对地, 本研究将夜间时段内近地面  $O_3$  浓度未发生增强的情况, 定义为非夜间近地面  $O_3$  增强事件 (Nonnocturnal Surface Ozone Enhancement, NNSOE)。

同一时段内  $O_3$  浓度变化  $[\Delta\rho(O_3)]$  与 CO 浓度变化  $[\Delta\rho(\text{CO})]$  的比值一般被用于判断污染气团传输方向。CO 主要由人类活动在近地面大气层中排放, 其浓度在污染气团中通常较高, 而在清洁气团中相对较低。随着海拔的升高, CO 浓度迅速下降,  $O_3$  浓度则呈现上升趋势。因此, 在受污染空气影响的下风向区域,  $O_3$  与 CO 之间呈现出正相关关系; 在垂直混合作用增强的情景下, 两者则可能表现为负相关。本研究采用  $\Delta\rho(O_3)/\Delta\rho(\text{CO})$  作为判定指标, 以区分  $O_3$  浓度增加是由水平传输还是垂直混合所致, 判定标准具体如公式 (1) 所示。

$$\begin{cases} \Delta\rho(O_3)/\Delta\rho(\text{CO}) > 0 & \text{水平传输} \\ \Delta\rho(O_3)/\Delta\rho(\text{CO}) < 0 & \text{垂直混合} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\Delta\rho(O_3)$  表示  $O_3$  小时浓度变化,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $\Delta\rho(\text{CO})$  表示 CO 小时浓度变化,  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。

本研究中的低空急流分类标准参考 WEI 等<sup>[15]</sup> 在长三角地区进行的研究, 具体定义如下:

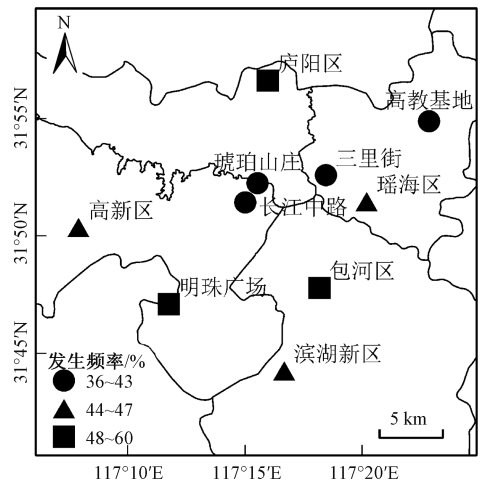
$$\begin{cases} \text{LLJ-1: } 6 \text{ m/s} \leq V_{\text{max}} < 10 \text{ m/s}, \Delta V \geq 3 \text{ m/s} \\ \text{LLJ-2: } 10 \text{ m/s} \leq V_{\text{max}} < 14 \text{ m/s}, \Delta V \geq 5 \text{ m/s} \\ \text{LLJ-3: } 14 \text{ m/s} \leq V_{\text{max}} < 20 \text{ m/s}, \Delta V \geq 7 \text{ m/s} \\ \text{LLJ-4: } V_{\text{max}} \geq 20 \text{ m/s}, \Delta V \geq 10 \text{ m/s} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $V_{\text{max}}$  为最大垂直风速,  $\text{m/s}$ ;  $\Delta V$  为低空急流中最大垂直风速与最小垂直风速的差值,  $\text{m/s}$ 。若  $V_{\text{max}}$  与  $\Delta V$  均不符合以上分类标准, 则判定当前气象条件为“无低空急流”。此外, 代表性站点的气象要素数据选用 ERA5 数据集中距离该站点最近的网格点数据。

## 2 结果与讨论

### 2.1 NSOE 事件发生频率

2021—2024 年, 合肥市 10 个国控站点 NSOE 事件的年平均发生频率为  $45\% \pm 7\%$  (图 1), 其中包河区站点高达 60%, 其次为明珠广场站点和庐阳区站点 (均为 48%)。南部城区略高于北部, 可能是由于南部地区工业活动和交通运输相对更加发达, 提升了区域内  $O_3$  的生成能力<sup>[16]</sup>。此外, 来自站点上风向的气流可将  $O_3$  从上风向污染区传输至研究站点, 导致局部  $O_3$  水平显著升高<sup>[17]</sup>。部分站点 NSOE 事件发生频率相对较低, 可能是由于站点附近具有较强的  $\text{NO}_x$  滴定作用 ( $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ ), 使  $O_3$  浓度在一定程度上降低<sup>[18]</sup>。NSOE 事件多发生于 5 月和 8 月, 并伴随  $O_3$  浓度高峰, 对应的频率均值分别为 54% 和 47%,  $O_3$  浓度均值分别为  $89 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。



注: 底图源自安徽省地理信息公共服务平台 (<https://anhui.tianditu.gov.cn/index.html#/>)  
1 : 1 800 000 政区版安徽省地图, 审图号为皖 S(2024)52 号, 下载日期为 2025-02-20。下同。

图 1 合肥市各国控站点 NSOE 事件发生频率

Fig. 1 The NSOE event frequency at sites in Hefei City

在高光照强度下,湍流的垂直混合作用可促进  $O_3$  在混合层内的均质分布<sup>[19]</sup>。夜间残留层常被视作日间混合层内污染物的“汇”,因而若忽略外部传输对该层的影响,则下午近地面  $O_3$  浓度可作为一个合理的近似值,用以表征夜间残留层  $O_3$  浓度,进而用于  $O_3$  长期污染特性统计分析。此外,若假设夜间滴定作用的影响远超沉积作用和区域传

输,则夜间近地面氧化剂( $O_x$ , [ $O_3$ ]+[ $NO_2$ ])浓度亦可作为夜间残留层  $O_3$  浓度的一个有效指示指标。本研究针对 NSOE 事件与 NNSOE 事件,对比分析事件发生期间的夜间(20:00—次日 06:00)平均  $O_3$  浓度[图 2(a)、图 2(b)]和  $O_x$  浓度[图 2(c)、图 2(d)]、事件发生前的下午(12:00—17:00)平均  $O_3$  浓度[图 2(e)、图 2(f)]。

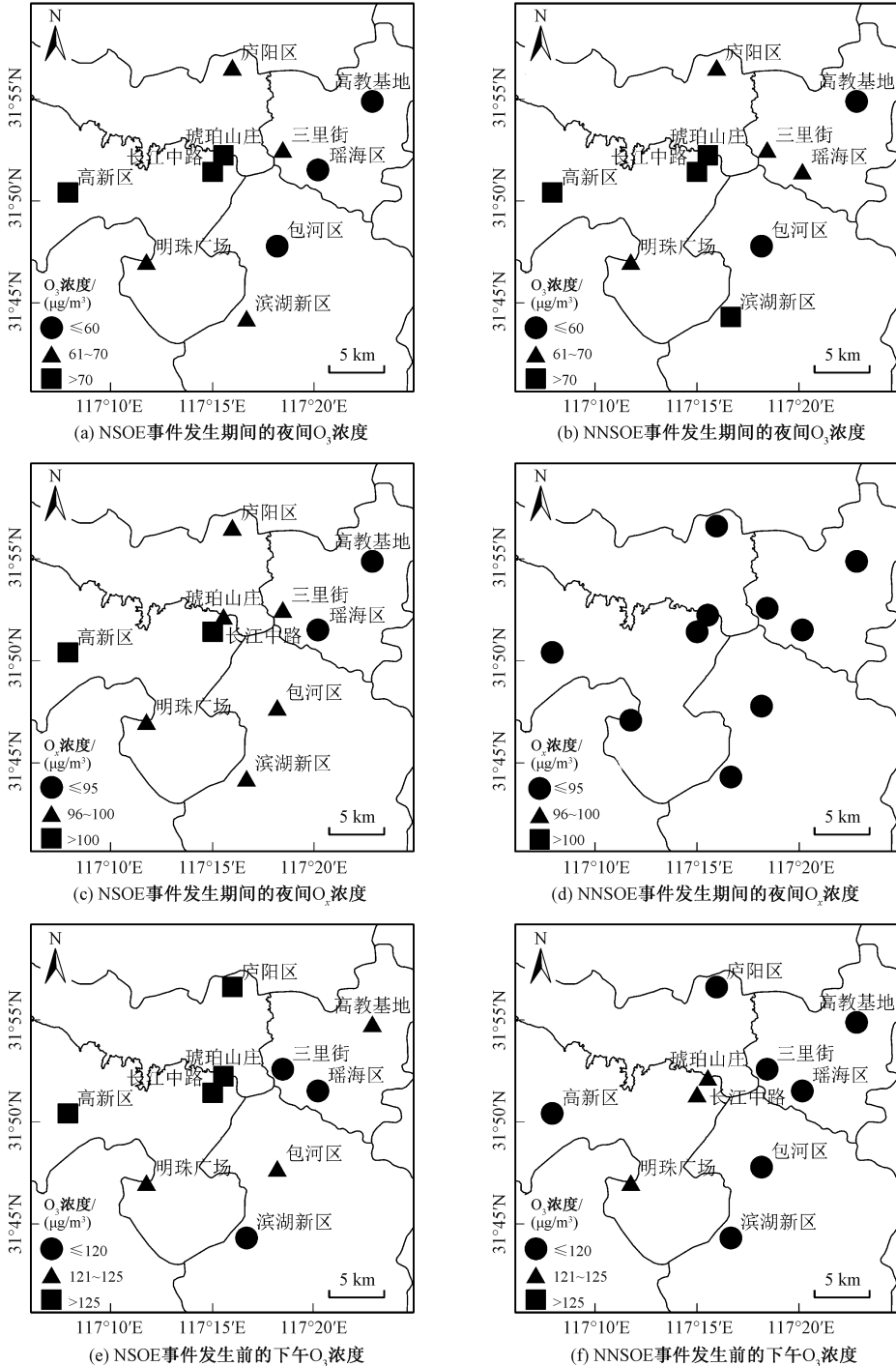


图 2 NSOE 和 NNSOE 事件期间的夜间平均  $O_3$  浓度、 $O_x$  浓度及事件发生前的下午平均  $O_3$  浓度

Fig. 2 Nighttime average concentrations of  $O_3$  and  $O_x$  during NSOE and NNSOE events, and the afternoon average  $O_3$  concentration before the events

研究结果显示,相较于 NNSOE 事件,NSOE 事件的夜间平均  $O_3$  浓度及  $O_x$  浓度、下午平均  $O_3$  浓度均较高,尤其是下午平均  $O_3$  浓度。具体而言,NSOE 事件发生时,合肥市 10 个监测站点的下午平均  $O_3$  浓度达  $123 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,高于 NNSOE 事件发生时 ( $116 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )。进一步分析表明,夜间  $O_3$  浓度和  $O_x$  浓度、下午  $O_3$  浓度的空间分布特征具有高度的一致性,这可能主要归因于下午时段产生的大部分  $O_3$  在夜间能

够在残留层中得到有效保留,其间未经历显著的消耗过程和明显的沉降作用<sup>[14]</sup>。

为了探究 NSOE 事件对夜间  $O_3$  和相关污染物的影响,本研究分析了 3 个代表性站点(包河区站点、庐阳区站点和明珠广场站点)的 NSOE 事件发生频率分布特征,并进一步比较了 NSOE 事件与 NNSOE 事件期间的 3 个代表性站点夜间  $O_3$ 、 $\text{NO}_2$  及  $\text{CO}$  平均浓度随时间变化的差异性,结果见图 3。

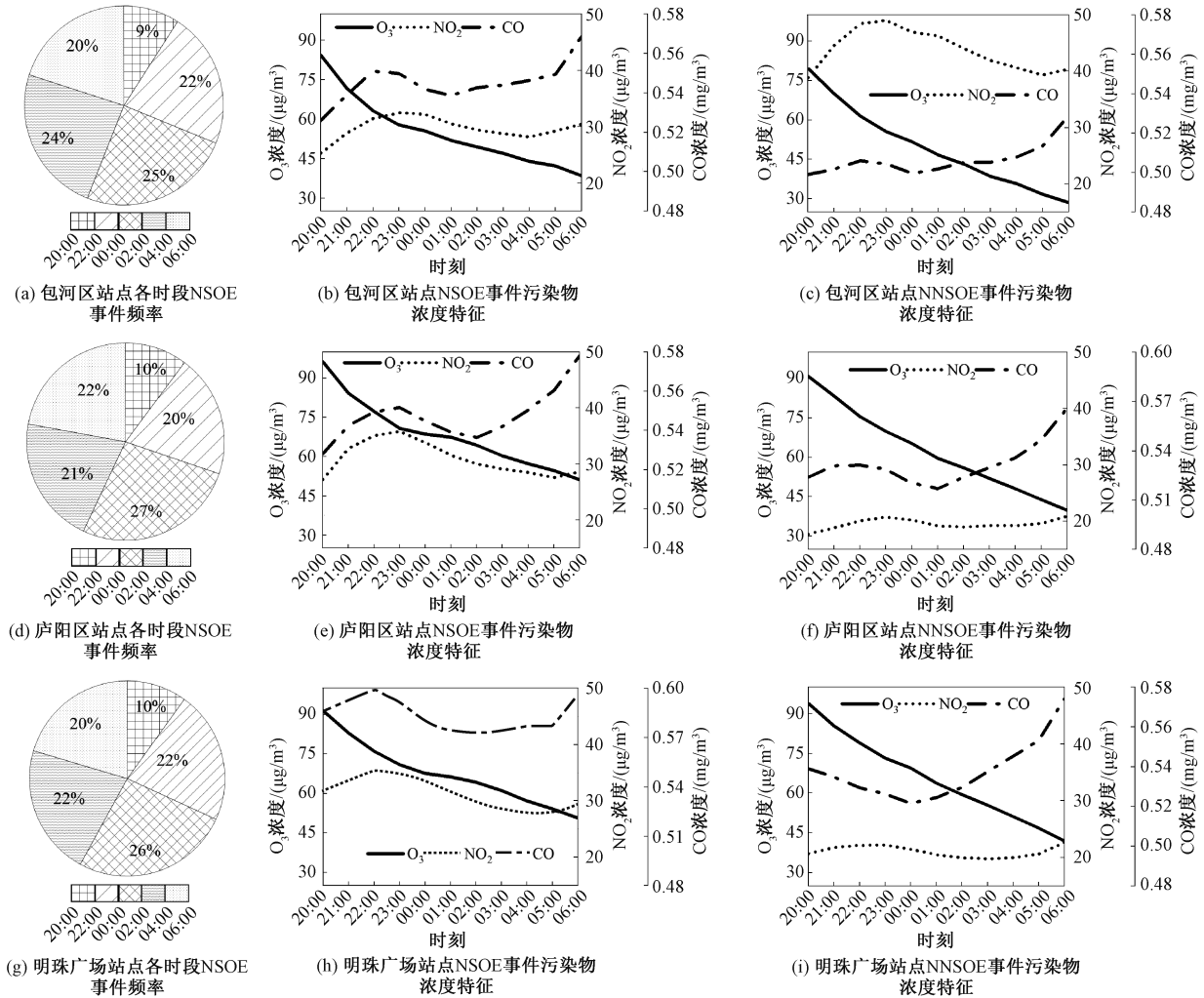


图 3 代表性站点 NSOE 事件发生频率以及 NSOE 和 NNSOE 事件期间污染物平均浓度变化特征  
 Fig. 3 Frequency of NSOE events at representative sites and the variation characteristics of the average concentration of pollutants during NSOE and NNSOE events

研究发现,NSOE 事件影响下的 3 个站点的  $O_3$  初始浓度(18:00),均高于 NNSOE 事件影响下的对应浓度。通过对比分析 NSOE 事件和 NNSOE 事件影响下的 3 种污染物的夜间浓度变化发现,在 NSOE 事件发生的 20:00—23:00 时段内, $O_3$  浓度的下降速率以及  $\text{NO}_2$  和  $\text{CO}$  浓度的上

升速率均显著高于 NNSOE 事件同时段水平。从 NSOE 事件发生时段频率分布来看,00:00—02:00 为 3 个站点 NSOE 事件发生最为频繁的时段。这一发现与 PAN 等<sup>[20]</sup>对淄博市的研究结果相似,其研究结果显示,NSOE 事件主要发生在 00:00—05:00 之间,夜间  $O_3$  浓度在 01:00 达到

峰值。在 23:00 之后,  $\text{NO}_2$  浓度的下降主要归因于 NSOE 事件引发的化学损耗过程(特别是  $\text{NO}_2 + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_3 + \text{O}_2$  和  $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 + \text{M} \rightarrow \text{N}_2\text{O}_5 + \text{M}$ ) 的加强。相比之下,  $\text{CO}$  因化学性质相对稳定, 其浓度的降低可能更多地与大气中的垂直混合作用相关。综上, 在 2021—2024 年期间, 合肥市 NSOE 事件对应的夜间  $\text{O}_3$  浓度总体呈现下降趋势,  $\text{NO}_2$  浓度呈现波动式下降趋势,  $\text{CO}$  浓度受气象条件影响呈现波动上升趋势。

## 2.2 NSOE 事件气象成因

对比 NSOE 事件发生时的  $\Delta\rho(\text{O}_3)/\Delta\rho(\text{CO})$  特征发现, 垂直混合对此类事件具有显著影响[图 4(a)]。在包河区、庐阳区、明珠广场站点, 由垂直混合引起的 NSOE 事件所占比例分别为 67%、70%、74%, 而水平传输的贡献比例则分别为 33%、30%、26%。NSOE 事件期间, 上述 3 个点位观测到的低空急流类型主要为 LLJ-1, 其在 3 个点位的出现频率依次为 90%、87%、87% [图 4(b)], 说明合肥市 NSOE 事件中的湍流垂直混合活动主要发生在相对较弱的动力学条件下。其主要原因是低空急流引发的风切变不仅会增强湍流混合过程, 而且在促进稳定边界层内湍流通量的

传输方面起到重要作用, 可有效地将来自较高高度的气团与近地面气团混合<sup>[21-22]</sup>, 进而使平流层  $\text{O}_3$  通过该方式进入近地面。值得注意的是, 与传统边界层结构相异, 低空急流发生时, 湍流活动起源于上层大气并向下传输, 形成倒置的稳定边界层结构, 这一机制显著削弱了残余层与稳定边界层之间的解耦<sup>[22]</sup>。

夜间传输和垂直混合活动的增强与大气不稳定性加剧密切相关, 该不稳定性可通过边界层高度与摩擦速度的变化来量化评估。本研究进一步分析了 3 个监测站点的夜间不同时刻边界层高度与摩擦速度相对于 20:00 的变化[图 4(c)、图 4(d)]。结果显示, NSOE 事件期间, 3 个站点的夜间边界层高度、摩擦速度与其 20:00 值的比值均高于 NNSOE 事件期间, 这一差异在 23:00 后逐渐加剧。边界层高度与摩擦速度增大通常意味着湍流动能及强度的增加, 从而为 NSOE 事件的发生提供有利条件。这一发现与 HE 等<sup>[17]</sup> 在中国 5 个典型城市(北京、上海、广州、成都和乌鲁木齐)的研究结果一致。综上, 低空急流的存在和大气层结稳定性减弱为垂直湍流混合提供了更为有利的气象条件, 导致了 NSOE 事件的发生。

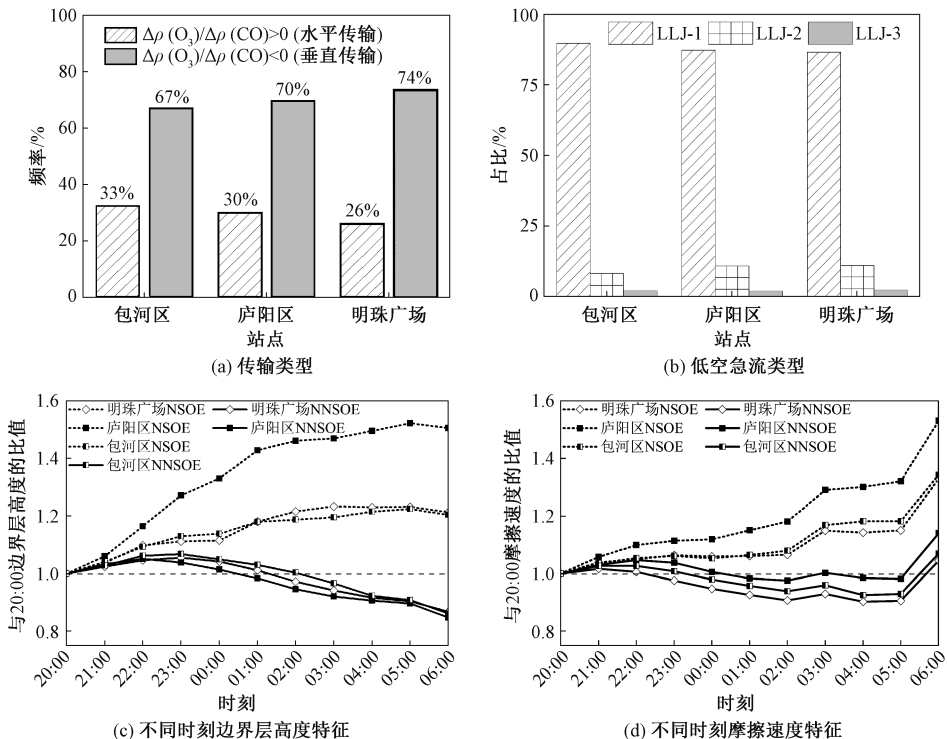


图 4 2021—2024 年 NSOE 和 NNSOE 事件的传输类型及相关气象特征

Fig. 4 Types of transport and characteristic of relevant meteorology of NSOE and NNSOE events from 2021 to 2024

## 2.3 NSOE 事件水平传输的来源贡献

为了研究合肥市 NSOE 事件的水平传输特征,本研究采用后向轨迹聚类方法进行聚类分析,结果如图 5 所示。结果表明,合肥市 NSOE 事件对应的污染气团主要来自周边省市。其中,由湖北和江西交界区域传输至合肥的轨迹的贡献占比为 41.25%,由江苏南部地区传输至合肥的轨迹的贡献占比为 35.21%。该结果与赵旭辉等<sup>[13]</sup>对合肥一次 O<sub>3</sub> 污染过程的研究结果接近,说明在夏季应对 NSOE 事件采取联防联控措施。

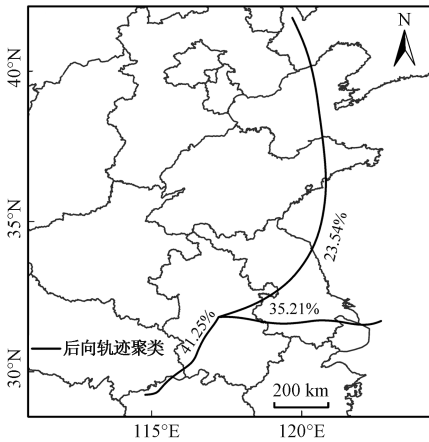


图 5 合肥市 NSOE 事件  
气流轨迹来源示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the cluster  
of the airflow trajectory of the  
NSOE events in Hefei City

## 2.4 NSOE 事件对次日日间 O<sub>3</sub> 浓度的影响

3 个代表性站点在 NSOE 事件次日清晨 (06:00) 的 O<sub>3</sub> 浓度普遍高于 NNSOE 事件次日清晨,两类事件对应的平均 O<sub>3</sub> 浓度分别为 46.8 μg/m<sup>3</sup> 和 36.8 μg/m<sup>3</sup>。通过对比分析 NSOE 与 NNSOE 事件次日的日间 O<sub>3</sub> 峰值浓度可发现,合肥市所有监测站点在 NSOE 事件次日的日间 O<sub>3</sub> 峰值浓度均高于 NNSOE 事件次日,平均差异达到 18 μg/m<sup>3</sup> ± 11 μg/m<sup>3</sup>。NSOE 事件对次日日间 O<sub>3</sub> 峰值浓度出现时间的影响并不显著。具体而言,NSOE 事件次日日间出现当日 O<sub>3</sub> 峰值浓度的频率低于 NNSOE 事件次日日间 (占比分别为 49.3% 和 57.4%)。这表明日间 O<sub>3</sub> 峰值浓度值及其出现的时间并非单一地由 NSOE 事件决定,而是受到多种因素的共同作用。

NSOE 事件对次日 O<sub>3</sub> 浓度的影响机制较为复杂,需将其与前体物排放、光化学反应以及气象条件等因素综合分析。本研究初步推测,NSOE

事件对次日日间 O<sub>3</sub> 浓度具有正向影响。如需更深入地理解 NSOE 事件对次日 O<sub>3</sub> 浓度水平的影响,仍需开展更为详尽的研究。

## 3 结论

1) 2021—2024 年,合肥市 NSOE 事件发生频率较高,平均为 45% ± 7%。NSOE 事件在 5 月和 8 月的发生频率较高,分别为 54% 和 47%,对应的 O<sub>3</sub> 浓度均值分别为 89 μg/m<sup>3</sup> 和 75 μg/m<sup>3</sup>。

2) 2021—2024 年,NSOE 事件对应的夜间平均 O<sub>3</sub> 浓度、下午平均 O<sub>3</sub> 浓度和夜间平均 O<sub>x</sub> 浓度均高于 NNSOE 事件。NSOE 事件发生前,残留层中 O<sub>3</sub> 的浓度水平较高,下午平均 O<sub>3</sub> 浓度达 123 μg/m<sup>3</sup>,高于 NNSOE 事件发生前 (116 μg/m<sup>3</sup>)。NSOE 事件次日的日间 O<sub>3</sub> 峰值浓度高于 NNSOE 事件次日,两者的差异为 18 μg/m<sup>3</sup>。

3) NSOE 事件期间,大气稳定性降低促进了湍流垂直混合。在合肥市 3 个代表性站点,由垂直混合引起的 NSOE 事件的比例在 67% ~ 74% 之间,而由水平输送引起的 NSOE 事件的比例在 26% ~ 33% 之间。NSOE 事件发生时,低空急流起重要作用。包河区、庐阳区、明珠广场站点的低空急流类型主要为 LLJ-1,对应的出现频率分别为 90%、87%、87%。代表性站点在 NSOE 事件中的夜间边界层高度、摩擦速度与其 20:00 值的比值,均大于 NNSOE 事件。

4) NSOE 事件对应的水平传输过程的气团来源主要为邻近省市,其合计贡献占比为 76.46%。相较于 NNSOE 事件,NSOE 事件次日清晨 (06:00) 的 O<sub>3</sub> 浓度水平更高,次日日间的 O<sub>3</sub> 峰值浓度显著更高。建议在夏季 O<sub>3</sub> 浓度高值期间采取联防联控措施,以降低夜间和次日 O<sub>3</sub> 浓度。

## 参考文献 (References):

- [1] KRISHNAN R, SANJAY J, GNANASEELAN C, et al. Assessment of Climate Change over the Indian Region: A Report of the Ministry of Earth Sciences (MoES), Government of India [M]. Singapore: Springer Nature, 2021: 29.
- [2] BRASSEUR G, HITCHMAN M H. Stratospheric Response to Trace Gas Perturbations: Changes in Ozone and Temperature Distributions [J]. Science, 1988, 240(4 852): 634-637.

- [ 3 ] AHMAD A N, ABDULLAH S, ABU MANSOR A, et al. Assessment of Daytime and Nighttime Ground Level Ozone Pollution in Malaysian Urban Areas[J]. Malaysian Journal of Medicine and Health Sciences, 2023, 19(6): 242-248.
- [ 4 ] PANCHOLI P, KUMAR A, BIKUNDIA D S, et al. An Observation of Seasonal and Diurnal Behavior of  $O_3$ - $NO_x$  Relationships and Local/Regional Oxidant ( $O_x = O_3 + NO_2$ ) Levels at a Semi-arid Urban Site of Western India [ J ]. Sustainable Environment Research, 2018, 28(2): 79-89.
- [ 5 ] AGATHOKLEOUS E, FENG Z Z, SICARD P. Surge in Nocturnal Ozone Pollution[J]. Science, 2023, 382(6675): 1131.
- [ 6 ] AN C, LI H, JI Y Y, et al. A Review on Nocturnal Surface Ozone Enhancement: Characterization, Formation Causes, and Atmospheric Chemical Effects [ J ]. Science of the Total Environment, 2024, 921: 170731.
- [ 7 ] ZHU X W, MA Z Q, LI Z M, et al. Impacts of Meteorological Conditions on Nocturnal Surface Ozone Enhancement During the Summertime in Beijing[J]. Atmospheric Environment, 2020, 225: 117368.
- [ 8 ] MORGADO F F R, MEIRELES J F F, NEVES C M, et al. Scale Development; Ten Main Limitations and Recommendations to Improve Future Research Practices [ J ]. Psicologia: Reflexão e Crítica, 2017, 30: 3.
- [ 9 ] GERKEN T, WEI D D, CHASE R J, et al. Downward Transport of Ozone Rich Air and Implications for Atmospheric Chemistry in the Amazon Rainforest [ J ]. Atmospheric Environment, 2016, 124: 64-76.
- [ 10 ] HU X M, FUENTES J D, ZHANG F Q. Downward Transport and Modification of Tropospheric Ozone Through Moist Convection[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2010, 65(1): 13-35.
- [ 11 ] 程龙,董昊,刘阳,等.合肥市臭氧及其前体物污染特征及源解析[J].中国环境监测,2023,39(3): 58-66.  
CHENG Long, DONG Hao, LIU Yang, et al. Pollution Characteristics and Sources Apportionment of Ozone and Its Precursors in Hefei [ J ]. Environmental Monitoring in China, 2023, 39(3): 58-66.
- [ 12 ] 程龙.合肥市臭氧污染特征分析[J].绿色科技, 2023, 25(6): 87-91.  
CHENG Long. Characteristics of Ozone Pollution in Hefei[J]. Journal of Green Science and Technology, 2023, 25(6): 87-91.
- [ 13 ] 赵旭辉,张付海,王含月,等.合肥市典型臭氧污染特征及成因分析[J].中国环境监测,2022,38(4): 90-103.  
ZHAO Xuhui, ZHANG Fuhai, WANG Hanyue, et al. Typical Characteristics and Causes of the Ozone Pollution Process in Hefei [ J ]. Environmental Monitoring in China, 2022, 38(4): 90-103.
- [ 14 ] HAO T Y, LIU B, CAI Z Y, et al. Cause of Nocturnal Surface Ozone Enhancement in the North China Plain [ J ]. Science of the Total Environment, 2024, 954: 176583.
- [ 15 ] WEI W, WU B G, YE X X, et al. Characteristics and Mechanisms of Low-Level Jets in the Yangtze River Delta of China [ J ]. Boundary-Layer Meteorology, 2013, 149(3): 403-424.
- [ 16 ] REN B, XIE P H, XU J, et al. Vertical Characteristics of  $NO_2$  and HCHO, and the Ozone Formation Regimes in Hefei, China [ J ]. Science of the Total Environment, 2022, 823: 153425.
- [ 17 ] HE C, LU X, WANG H L, et al. The Unexpected High Frequency of Nocturnal Surface Ozone Enhancement Events over China: Characteristics and Mechanisms [ J ]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2022, 22(23): 15 243-15 261.
- [ 18 ] FANG C S, ZHOU X W, CAI Y X, et al. Characterization and Atmospheric Drivers of Nocturnal Ozone Enhancement in Putian City, China [ J ]. Atmosphere, 2025, 16(1): 45.
- [ 19 ] 张亮,朱彬,高晋徽,等.长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟[J].环境科学,2015,36(11): 3 981-3 988.  
ZHANG Liang, ZHU Bin, GAO Jinhui, et al. Modeling Study of a Typical Summer Ozone Pollution Event over Yangtze River Delta[J]. Environmental Science, 2015, 36(11): 3 981-3 988.
- [ 20 ] PAN R X, ZHANG K, CHEN D H, et al. Investigation into the Nocturnal Ozone in a Typical Industrial City in North China Plain, China [ J ]. Environmental Pollution, 2024, 360: 124627.
- [ 21 ] YANG B, FINN D, RICH J, et al. Effects of Low-Level Jets on Near-Surface Turbulence and Wind Direction Changes in the Nocturnal Boundary Layer[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2023, 128(11): e2022JD037657.
- [ 22 ] WEI W, ZHANG H S, ZHANG X Y, et al. Low-Level Jets and Their Implications on Air Pollution: A Review [ J ]. Frontiers in Environmental Science, 2023, 10: 1082623.