

# 中国西部荒漠城市高背景臭氧浓度受局地弱人为影响特征研究

张少亭<sup>1,4</sup>, 吴八一<sup>2</sup>, 王芳<sup>2</sup>, 武红<sup>2</sup>, 任鑫冰<sup>1,4</sup>, 马永敬<sup>1</sup>, 吴方堃<sup>1</sup>, 孙扬<sup>1,4</sup>, 周兴军<sup>3</sup>, 田永莉<sup>3</sup>, 辛金元<sup>1,4,\*</sup>

- 1.中国科学院大气物理研究所大气环境与极端气象重点实验室, 北京 100029
- 2.内蒙古自治区环境监测总站阿拉善分站, 阿拉善左旗 750300
- 3.内蒙古自治区环境监测总站, 呼和浩特 010090
- 4.中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

**摘要:** 国内外针对沙漠地区臭氧浓度演变特征研究存在较大空白。阿拉善左旗属于我国西部典型的荒漠城市, 在人为活动强度较低的基础下, 具有较高的臭氧(O<sub>3</sub>)背景浓度。其中2015年-2022年日最大臭氧8小时滑动平均值(MDA8 O<sub>3</sub>)年增长约为2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 春夏秋冬季节平均MDA8 O<sub>3</sub>分别为111.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、132.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、101.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和82.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。由于高温强辐射的有利条件促进O<sub>3</sub>的大气光化学反应, 增强O<sub>3</sub>的二次生成, 因此O<sub>3</sub>污染主要出现于夏季。夏季夜间在NO<sub>x</sub>滴定效应影响下, 阿拉善左旗各监测站O<sub>3</sub>浓度仍然可以达到93-106 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 且观测站点距地面越高O<sub>3</sub>浓度越高, 表明西部沙漠地区受到高O<sub>3</sub>背景浓度控制。观测发现近地面人为排放对三个距离地面不同高度站点的O<sub>3</sub>浓度产生不同的影响。以距地面22m的环保局新楼站O<sub>3</sub>浓度为参考, 距地面15m的蒙二幼站夜间O<sub>3</sub>浓度低5-25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 日间O<sub>3</sub>浓度高5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 距地面12m西花园站夜间O<sub>3</sub>浓度低10-25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 日间O<sub>3</sub>浓度高5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。对于城区夜晚越靠近地面NO<sub>x</sub>滴定效应越强, 白天随着对流扩散和近地面快速的O<sub>3</sub>光化学反应影响, 越靠近地面O<sub>3</sub>浓度越高。说明弱人为活动对O<sub>3</sub>浓度的影响, 反映沙漠城市O<sub>3</sub>垂直分布特征。

**关键词:** 臭氧污染, 滴定效应, 光化学过程, 西部荒漠, 阿拉善左旗

文章编号:

中图分类号: P402

文献标识码: A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2412.24005

收稿日期: 2025-01-02; 网络预出版日期:

作者简介: 张少亭, 男, 1997年10月出生, 硕士研究生, 主要从事大气环境研究, E-mail:

zhangshaoting@mail.iap.ac.cn

通讯作者: 辛金元, E-mail: xjy@mail.iap.ac.cn

资助项目: 国家重点研发计划课题2022YFF0802501

Funded by National Key Research and Development Program (Grant No. 2022YFF0802501)

# Characteristics of weak anthropogenic influences on high background ozone concentrations in the desert cities of western China

Shaoting ZHANG<sup>1,4</sup>, Bayi WU<sup>2</sup>, Fang WANG<sup>2</sup>, Hong Wu<sup>2</sup>, Xinbing REN<sup>1,4</sup>,  
Yongjing MA<sup>1</sup>, Fangkun WU<sup>1</sup>, Yang SUN<sup>1,4</sup>, Xingjun ZHOU<sup>3</sup>, Yongli TIAN<sup>3</sup>,  
Jinyuan XIN<sup>1,4,\*</sup>

1. Key Laboratory of Atmospheric Environment and Extreme Meteorology, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029, China
2. Inner Mongolia Environmental Monitoring Center Station, Alashan Substation, Alax Left Banner , 750300, China
3. Inner Mongolia Environmental Monitoring Center Station, Hohhot, 010090, China
4. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

**Abstract:** There are large gaps in domestic and international research on the characteristics of ozone(O<sub>3</sub>) concentration evolution in desert areas. Alxa Left Banner belongs to a typical desert city in the western China, which has high background concentrations of O<sub>3</sub> on the basis of low intensity of anthropogenic activities. From 2015 to 2022, the annual growth of the 8-hour moving average of daily maximum ozone (MDA8 O<sub>3</sub>) was about 2 μg·m<sup>-3</sup>. And the average MDA8 O<sub>3</sub> in spring, summer, autumn and winter was 111.3 μg·m<sup>-3</sup>, 132.3 μg·m<sup>-3</sup>, 101.8 μg·m<sup>-3</sup> and 82.9 μg·m<sup>-3</sup>. Due to the favourable conditions of high temperature and strong radiation, the atmospheric photochemical reaction of O<sub>3</sub> will be promoted and the secondary production of O<sub>3</sub> will be enhanced, thus the O<sub>3</sub> pollution incidents mainly appear in the summer. The O<sub>3</sub> concentrations in Alashan Left Banner were 93-106 μg·m<sup>-3</sup> in the

summer night under the influence of NO titration effect, indicating that the Alashan region was controlled by high background O<sub>3</sub> level. The higher the distance from the observation site to the ground, the higher the O<sub>3</sub> concentration. The observations show that the near-surface anthropogenic emissions has direct and significant influence on the vertical O<sub>3</sub> concentrations at three stations with different heights over the ground surface. Setting the O<sub>3</sub> concentration at the Huanbaojuxinlou Station (22 m above the ground) as a criteria. The O<sub>3</sub> concentration at the Mengeryou Station, which is 15 m above the ground, is lower by 5-25 μg·m<sup>-3</sup> during the night, and it is higher by 5 μg·m<sup>-3</sup> during the noon; the O<sub>3</sub> concentration at the Xihuayuan Station, which is 12 m above ground, is lower by 10-25 μg·m<sup>-3</sup> during the night, and it is higher by 5 μg·m<sup>-3</sup> during the noon. The stronger NO titration effect was found in the near ground atmosphere in the urban area at night. However, the higher O<sub>3</sub> was found in the near ground atmosphere due to the convective diffusion and rapid photochemical reaction. The effect of weak human activities on O<sub>3</sub> concentration was illustrated, and the vertical distribution characteristics of O<sub>3</sub> in desert cities were reflected.

**Keywords:** Ozone pollution, Titration effect, Photochemical processes, Western desert, Alxa Left Banner

## 1 引言

沙漠地区大气环境观测困难，目前国内外针对沙漠地区臭氧（ $O_3$ ）浓度演变特征研究存在较大空白。我国西部沙漠总面积约 120 万  $km^2$ ，是全球最主要的沙漠分布带之一。阿拉善盟境内有巴丹吉林、腾格里、乌兰布和三大沙漠，沙漠总面积达 106,000 $km^2$ ，辖区内沙漠面积仅次于新疆维吾尔自治区，其中巴丹吉林沙漠是中国第三大沙漠（Li et al., 2017; Zhu and Yang, 2023）。向西约 500km 接续分布有位于青海省北部的柴达木沙漠以及新疆维吾尔自治区的库木塔格沙漠、塔克拉玛干沙漠和古尔班通古特沙漠，构成了一条在中国西部跨越 2500km 的沙漠带，也是世界上唯一的温带沙漠带（Wei et al., 2022）。由于地表高度沙化和岩化的荒漠生态环境和干燥少雨的恶劣气候条件，区域内人口和居住地分布较少，人为活动对大气环境的影响主要表现在局地小范围内。 $O_3$  是大气环境中的主要大气污染物和温室气体，特别是大气边界层内的高浓度  $O_3$  对公众健康和农业有直接危害。 $O_3$  具有强氧化性，长时间暴露在高浓度  $O_3$  条件下，会对人体的呼吸道和肺部等黏膜组织造成强刺激作用（Lim et al., 2012; Wie et al., 2020）。此外  $O_3$  会影响植物叶片气孔的开闭，干扰正常的呼吸作用，降低农作物的产量，中国华北研究区主要农作物在高  $O_3$  影响下减产比例为 9% -33%（Feng et al., 2022）。在大气环境中  $O_3$  生成主要为氮氧化物（ $NO_x$ ）和挥发性有机污染物（VOCs）等前体物质在光照条件下的反应（Song et al., 2023）。边界层内  $O_3$  的光化学生成与气象要素紧密相关，例如太阳辐射增强会加速  $O_3$  的光化学生成速率（Wang et al., 2017）。

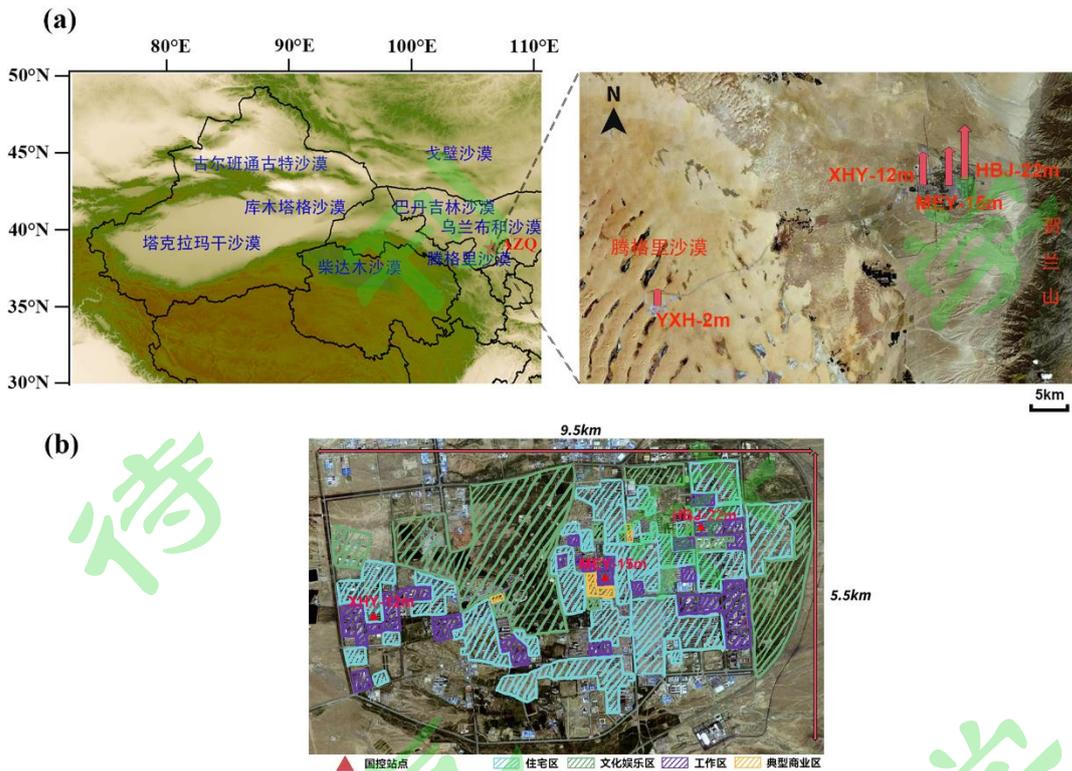
全球对沙漠地区的  $O_3$  地表浓度的研究主要集中在非洲撒哈拉沙漠和美国西南部的沙漠带。Güsten et al. (1996) 在撒哈拉沙漠地区测得  $O_3$  地表浓度在南北主导风向分别为 80  $\mu g \cdot m^{-3}$  和 120  $\mu g \cdot m^{-3}$ ，同时表明区域风场的变化会显著影响沙漠地表  $O_3$  浓度。在北美莫哈韦沙漠地表  $O_3$  的研究指出，大气垂直混合的增强影响了低空地表  $O_3$  最大值浓度（VanCuren, 2015）。Hoffer et al. (1982) 基于美国西南部沙漠农村地区十年的  $O_3$  浓度数据表明在北风天，农村地区的  $O_3$  本底水平可以达到大陆本底水平（38  $\mu g \cdot m^{-3}$ ）。Meixner et al. (2013) 对比测量了蒙古国乌兰巴托西南方向区域到沙尔金戈壁（半干旱草原到干旱/超干旱蒙古

戈壁)的地表  $O_3$  浓度,  $O_3$  混合比周期振幅依次为  $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 结果表明  $O_3$  的日变化幅度随地表荒漠程度的加强而显著减弱。目前, 中国国内对  $O_3$  污染的相关研究主要集中在京津冀及周边地区 (Zhou et al., 2018; Hong et al., 2022) 和珠三角、长三角等东部经济发达城市群 (Zhao et al., 2021; Mao et al., 2022) 以及成渝重点区域 (Xiao and Jiang, 2013), 对西部荒漠地区研究较少。Liu et al. (2022) 通过塔克拉玛干沙漠 8 年的长期  $O_3$  观测, 发现  $O_3$  的昼夜和季节变化主要受气温等自然过程的影响, 日变化和季节变化规律与显著受到人为影响的区域有所不同, 同时该地区  $O_3$  浓度在近 8 年呈下降趋势。基于目前沙漠地区的研究主要结果为自然气象要素对  $O_3$  浓度的影响, 人为活动对沙漠大气  $O_3$  影响的认知较浅, 沙漠地区  $O_3$  生成和消耗的影响因素还需要进一步观测研究 (Feng et al., 2015 ; Liu et al., 2017)。

西部荒漠地区阿拉善左旗城市规模较小, 工业、交通等人为活动较弱,  $O_3$  前体物质浓度较低。同时由于位于西风带, 西向为腾格里沙漠, 东向与周边其他城市相距 60km, 且有贺兰山脉阻隔, 污染物的区域传输对局地污染物的贡献不明显, 污染物变化特征主要受到当地人为干扰的影响。目前对西部荒漠城市阿拉善区域的  $O_3$  空间分布特征以及沙漠区域  $O_3$  的昼夜周期变化的研究较少。全国  $O_3$  污染问题逐渐突出, 观测发现阿拉善盟的  $O_3$  浓度也表现出上升趋势, 且呈现较高的  $O_3$  背景值。本文基于国控站点 2015-2022 年和沙漠站点 2022 年 6.23-6.29 和 7.24-7.30 观测数据, 对荒漠城市阿拉善区域  $O_3$  的长时间年季变化趋势和  $O_3$  分布特征进行了研究, 为当地的  $O_3$  概况提供清楚认知, 进一步为污染防治提供科学依据。

## 2 数据和方法

本研究涉及的观测站点主要有阿拉善盟阿拉善左旗(AZQ)巴彦浩特镇的 3 个国控站点,分别为环保局新楼站(HBJ,距地面高度 22m)、西花园站(XHY,距地面高度 12m)和蒙二幼站(MEY,距地面高度 15m),以及地处腾格里沙漠的英雄会站(YXH,距地面高度 2m),具体站点分布如图 1(a)所示。阿左旗城区面积较小(约为  $9\text{km}\times 5\text{km}$ ),人口总量约为 9.4 万人,属于 II 型小城市。图 1(b)根据当地城市用地规划和城市建设情况,划分不同功能区。城区内由西至东,西花园站与蒙二幼站相距 4.4km,蒙二幼站与环保局新楼站相距 2.2km。此外,腾格里沙漠英雄会站点与其余三个站点相距约 55km。本研究使用阿拉善国控环境监测站点臭氧( $\text{O}_3$ )、二氧化氮( $\text{NO}_2$ )、一氧化氮( $\text{NO}$ )、二氧化硫( $\text{SO}_2$ )和一氧化碳( $\text{CO}$ )的小时浓度数据以及气象要素温度、相对湿度的小时数据,研究时间段为 2015-2022 年。国控站监测设备为 EC9810  $\text{O}_3$  自动监测仪,EC9850  $\text{SO}_2$  自动监测仪和 EC9830  $\text{CO}$  自动监测仪,氮氧化物( $\text{NO}_2$ 和 $\text{NO}$ )使用 EC9841  $\text{NO}_2$  自动监测仪,以上设备检出限均为  $0.1\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。各个站点依据 HJ 654-2013 连续自动监测系统技术要求及检测方法,监测过程中使用统一标定方法和标定时间。英雄会(YXH)站点观测时间为 2022 年 6 月 23 日至 6 月 29 日和 7 月 24 日至 7 月 30 日,观测设备为中国青岛众瑞公司生产的 ZR-3351 型环境空气臭氧分析仪和 ZR-3370 型环境空气氮氧化物分析仪。数据包括  $\text{O}_3$ 、 $\text{NO}_2$  和  $\text{NO}$  小时浓度。



**图 1** (a) 观测站点在中国西部阿拉善左旗的分布及站点周边地理环境特征 (国控站: HBJ 环保局新楼站, 距地面 22m; XHY 西花园站, 距地面 12m; MEY 蒙二幼站, 距地面 15m; 观测站: YXH 腾格里沙漠英雄会站, 距地面 2m); (b) 观测区域的功能区划分 (住宅区为居民小区用地; 文化娱乐区包括旅游景区和博物馆区域等; 工作区包括学校和相关工作单位, 有规律的往返性人口流动特征; 典型商业区为主要的购物中心和大型超市)

**Figure 1.** (a) Distribution of observation stations in Alashan Left Banner, western China, and characteristics of the geographic environment (State-controlled stations: HBJ Huanbaojuxinlou, 22 m above ground level; XHY Xihuayuan, 12 m above ground level; MEY Mengeryou, 15 m above ground level; and observation station: YXH Yingxionghui in Tengger Desert, 2 m above ground level). (b) Functional division of the observation area (residential area is residential area land; the cultural and entertainment area includes tourist attractions and museum areas; the work area includes schools and work units, and there are regular commuting population flow characteristics; typical business districts are major shopping malls and hypermarkets)

### 3 研究与分析

#### 3.1 观测数据年际变化特征

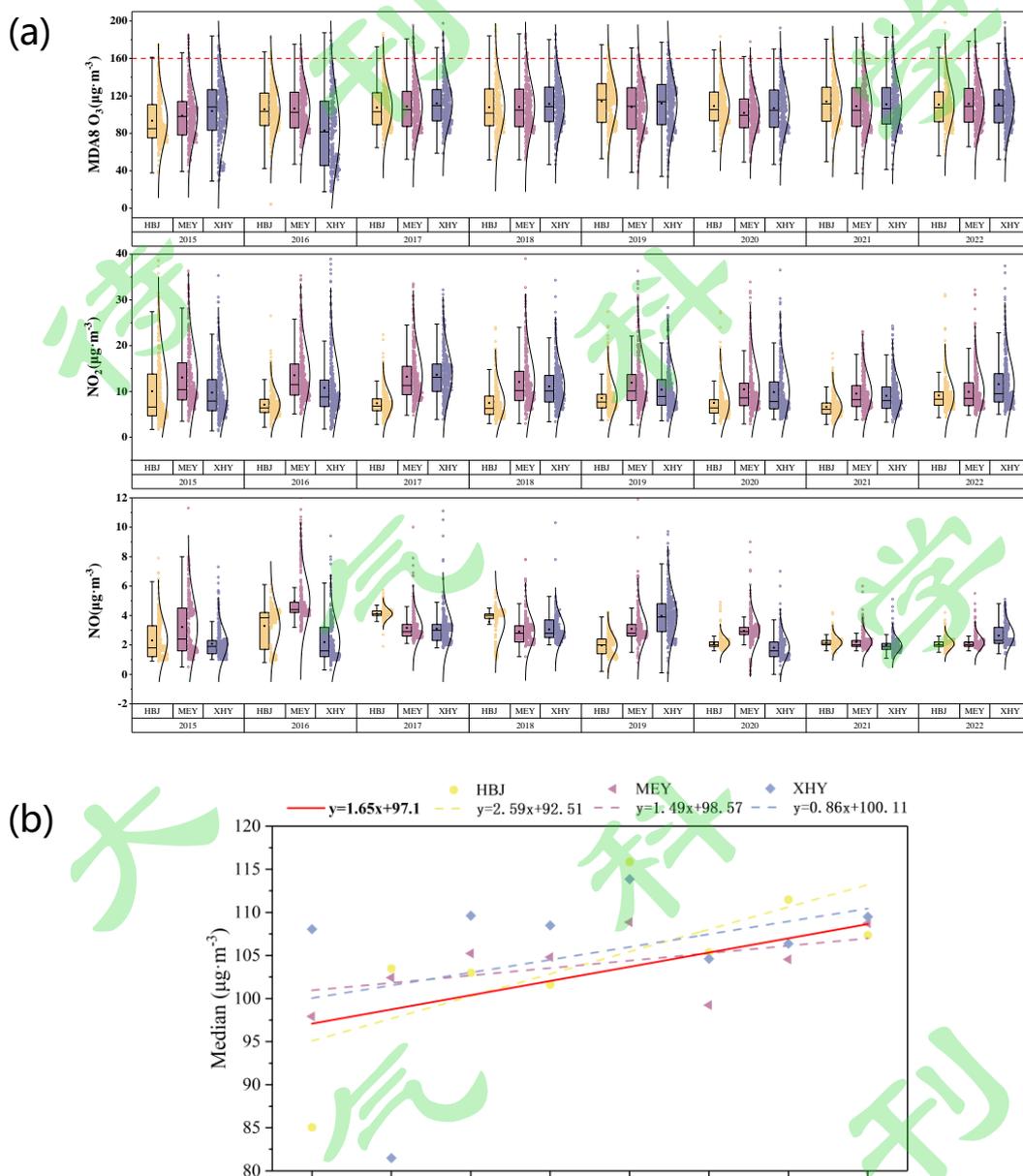


图 2 (a)环保局新楼站 (HBJ)、蒙二幼站 (MEY) 和西花园站 (XHY) 三个站点 2015 至 2022 年 MDA8 O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub> 和 NO 逐年日均值变化图 (图中红色虚线为 MDA8 O<sub>3</sub> 二级标准限值 160 μg·m<sup>-3</sup>) (b)三个站点 2015-2022 年 MDA8 O<sub>3</sub> 中位数拟合线( $y=1.65x+97.1$ )  
 Figure 2. (a)Interannual variations of MDA8 O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> and NO concentrations at HBJ, MEY and XHY for 2015-2022 [The red dotted line shows the secondary standard limit (160 μg·m<sup>-3</sup>) of MDA8 O<sub>3</sub>]. (b) Median fitting line of MDA8 O<sub>3</sub> for three sites from 2015 to 2022( $y=1.65x+97.1$ )

近年来全国污染现状呈现 O<sub>3</sub> 浓度上升的趋势，而氮氧化物等 O<sub>3</sub> 前体物经

过重点污染源和污染过程排放控制，其浓度逐渐下降。阿拉善左旗在弱人为影响的条件下 O<sub>3</sub> 浓度也逐年呈现上升趋势，O<sub>3</sub> 污染现象逐渐凸显。图 2 展示了环保局新楼站、蒙二幼站和西花园站从 2015 年至 2022 年的日最大臭氧 8 小时滑动平均浓度 (MDA8 O<sub>3</sub>) 变化情况，以及 NO<sub>2</sub> 和 NO 的逐年日均值变化情况。MDA8 O<sub>3</sub> 受太阳辐射强度和温度的影响，其高值主要在夏季日间出现，四个季节 MDA8 O<sub>3</sub> 均值分别为 111.3 μg·m<sup>-3</sup> (春季)、132.3 μg·m<sup>-3</sup> (夏季)、101.8 μg·m<sup>-3</sup> (秋季) 和 82.9 μg·m<sup>-3</sup> (冬季)。根据图中拟合线可得，MDA8 O<sub>3</sub> 呈上升趋势，2015 年至 2022 年期间，年均增长约 2 μg·m<sup>-3</sup>。相比之下，Fu et al. (2019) 研究表明，全国主要城市 MDA8 O<sub>3</sub> 的第 90 百分位数平均值在 2013 年至 2017 年期间，年均增长约 7 μg·m<sup>-3</sup>。阿拉善左旗 MDA8 O<sub>3</sub> 年增长速率相对较缓，这表明区域内人为活动强度较弱。NO 主要来源为机动车排放，自 2017 年中国实施第五阶段机动车排放标准以来，到 2022 年，NO 浓度日均值保持在 2 μg·m<sup>-3</sup> 左右，相比标准实施前下降了约 30%。

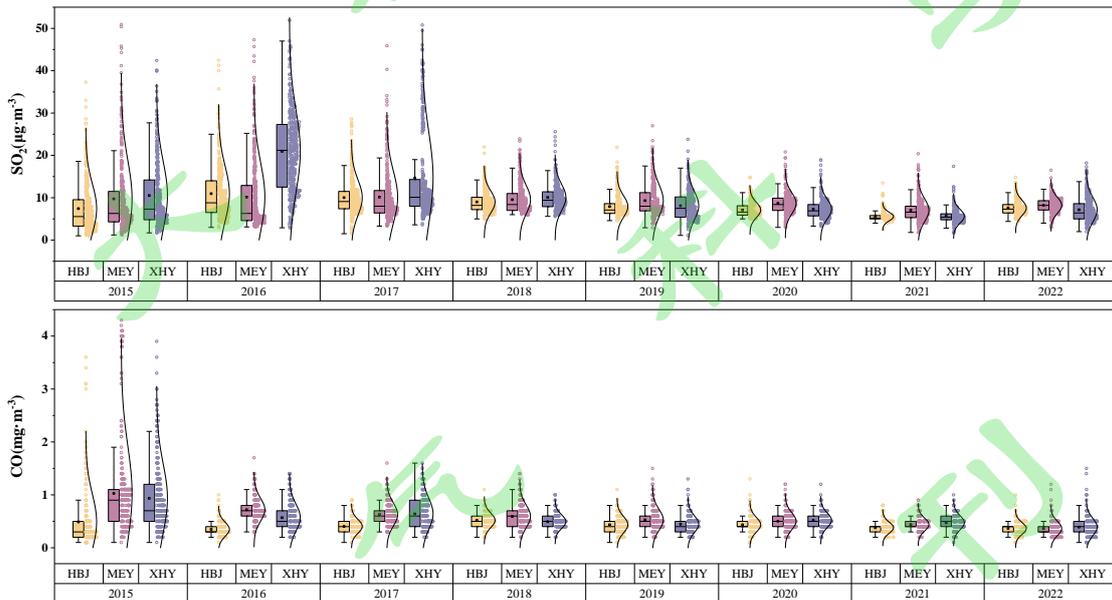


图 3 环保局新楼站 (HBJ)、蒙二幼站 (MEY) 和西花园站 (XHY) 三个站点 2015 至 2022 年的 SO<sub>2</sub> 和 CO 浓度逐年日均值

Figure 3. Interannual variations of SO<sub>2</sub> and CO concentrations at HBJ, MEY and XHY for 2015-2022

同样的，SO<sub>2</sub> 和 CO 也与氮氧化物类似，出现浓度下降的变化特征。图 3 展示了环保局新楼站、蒙二幼站和西花园站从 2015 年至 2022 年的 SO<sub>2</sub> 和 CO 日均值长期变化情况。SO<sub>2</sub> 和 CO 的浓度与工业排放密切相关，而阿左旗城区及

周边并无大型工业排放源，主要工业集中在距城区东北约 100km 的乌斯太镇。城区西部和南部分别有巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠，东部临近贺兰山脉（海拔 2000-3000m），因此 SO<sub>2</sub> 和 CO 主要来源是当地供暖和机动车排放。随着“煤改气”政策和第五阶段机动车排放标准的实施，两种污染物的浓度显著下降，SO<sub>2</sub> 浓度从 13μg·m<sup>-3</sup> 降至 6μg·m<sup>-3</sup>，CO 从 0.8mg·m<sup>-3</sup> 降至 0.4mg·m<sup>-3</sup>，表明阿左旗是一个弱人为影响区域。

### 3.2 观测站点四季日平均变化特征

#### 3.2.1 春季日变化特征

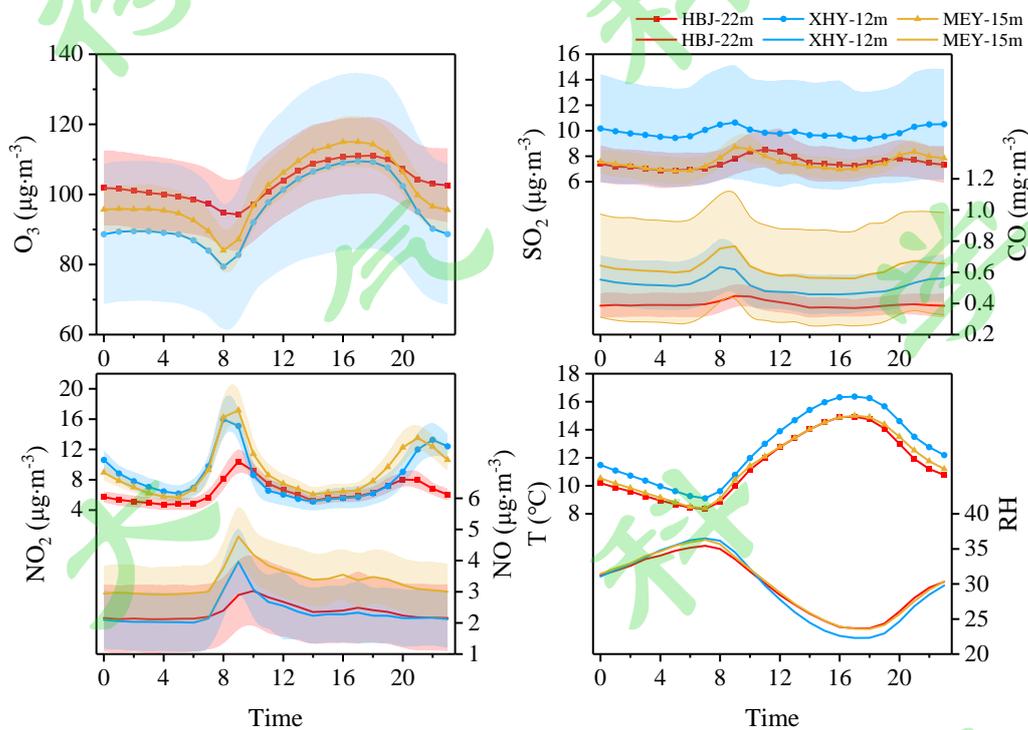


图 4 环保局新楼站（HBJ）、蒙二幼站（MEY）和西花园站（XHY）三个站点 2015 年至 2022 年春季大气 O<sub>3</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub> 和 CO 以及温度（T）、相对湿度（RH）的日平均小时值变化图

Figure 4. Average diurnal variations in O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> and CO, as well as temperature(T) and relative humidity(RH) for the spring from 2015 to 2022 at HBJ, MEY and XHY

阿左旗位于中国北方，春季气温偏低，同时受到西风较强影响，不利于 O<sub>3</sub> 的生成和积累，所以春季阿左旗 O<sub>3</sub> 浓度日变化较为平缓。图 4 展示了 2015 年至 2022 年春季，环保局新楼站、蒙二幼站和西花园站各要素的日平均小时变化情况。从图中可知，在夜间（20:00 至次日 6:00）环保局新楼站（距地面 22m）

$O_3$  浓度比蒙二幼站（距地面 15m）高约  $5\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，比西花园站（距地面 12m）高约  $10\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。根据当地规律的往返性人口流动特征，8:00 和 18:00 为居民活动高峰，此时人为排放影响显著。大气化学过程中 NO 会反应消耗  $O_3$  ( $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ )，这一反应在太阳辐射减弱的过程中尤为显著，此时  $O_3$  光化学生成逐渐减弱，夜间 NO 滴定效应主导  $O_3$  浓度变化 (Nguyen et al., 2022)。NO 主要来源于机动车排放，逐层向上滴定  $O_3$ ，导致  $\text{NO}_2$  浓度在 18:00 开始上升约  $6\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，标志着滴定反应的发生。夜间大气边界层内稳定，人为排放源逐渐消失。滴定反应消耗 NO， $O_3$  浓度逐渐稳定，随着距地面高度增加，三个站点  $O_3$  浓度分别为  $89\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $96\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $101\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。早晨 6:00 后，由于人为活动，新的 NO 排放源出现，滴定反应控制  $O_3$  浓度继续下降。西花园和蒙二幼站  $O_3$  浓度降至  $82\pm 3\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，环保局新楼站降至  $95\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。对比我国主要城市群长三角区域在非冬季夜间的臭氧浓度均在  $50\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以下 (赵月, 2024)；阿左旗尽管受到较弱的人为影响，夜间  $O_3$  浓度仍保持在约  $90\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。此外，在日间 (08:00-18:00)，随着太阳辐射的增强，近地面温度逐渐升高， $O_3$  光化学生成开始加快，当  $O_3$  生成量大于与 NO 反应消耗量， $O_3$  浓度开始上升，于 16 时前后到达峰值  $110\pm 3\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，此时也是气温峰值处，反映  $O_3$  浓度在日间与气温有极高相关性。

### 3.2.2 夏季日变化特征

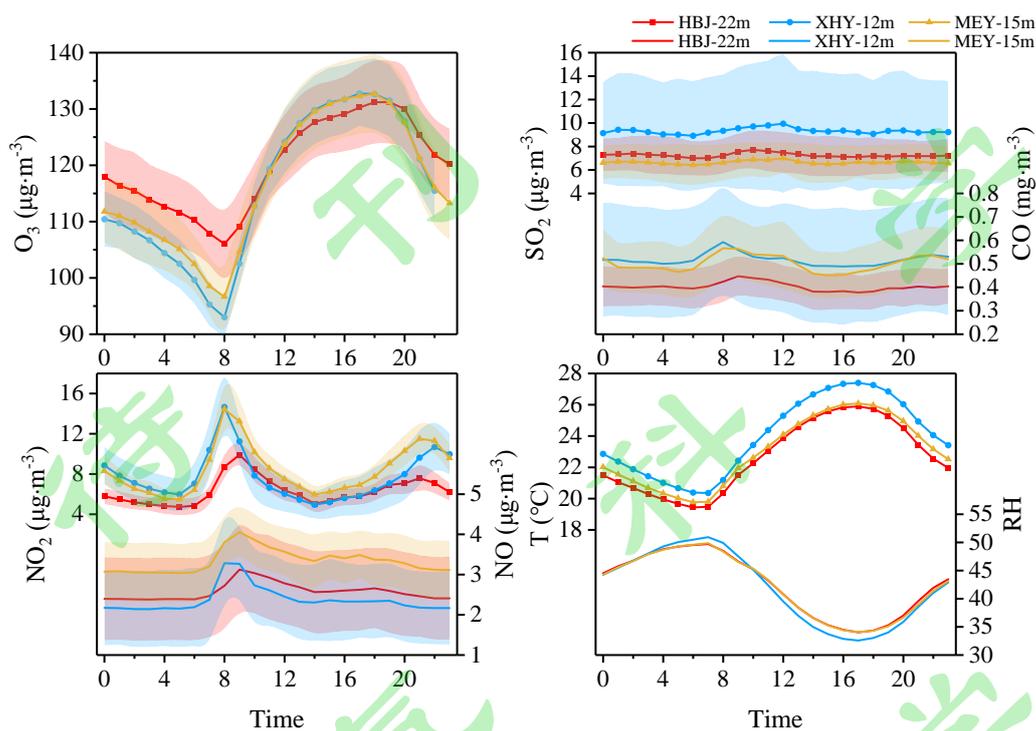


图5 环保局新楼站（HBJ）、蒙二幼站（MEY）和西花园站（XHY）三个站点2015年至2022年夏季大气 $O_3$ 、 $NO_x$ 、 $SO_2$ 和CO以及温度（T）、相对湿度（RH）的日平均小时值变化图

**Figure 5.** Average diurnal variations in  $O_3$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$  and CO, as well as temperature(T) and relative humidity(RH) for the summer from 2015 to 2022 at HBJ, MEY and XHY

夏季是  $O_3$  污染出现的最重要时期， $O_3$  生成主要依赖的大气光化学反应在气象要素（太阳辐射、气温等）影响下快速进行。阿左旗地处沙漠区域拥有优良的气象条件，在夏季日间表现较高的  $O_3$  浓度水平。图 5 展示了环保局新楼站、蒙二幼站和西花园站2015年至2022年夏季各要素的日平均小时变化情况。西部地区夏季光照时间长、太阳辐射强、气温高以及大气对流旺盛，这些气象要素极大促进了  $O_3$  的光化学反应。如图所示，城区三个站点的夏季  $O_3$  日均浓度峰值均超过  $130\mu g \cdot m^{-3}$ 。距地面较低的西花园站（距地面 12m）和蒙二幼站（距地面 15m）的  $O_3$  峰值比环保局新楼站（距地面 22m）高约  $5\mu g \cdot m^{-3}$ ，表明近地面的人为活动排放的  $O_3$  前体物参与了光化学反应，但是人为贡献有限。夜间，NO 滴定效应在西花园站（距地面 12m）和蒙二幼站（距地面 15m）较为明显，三个站点随着距地面高度增加， $O_3$  浓度谷值分别为  $93\mu g \cdot m^{-3}$ 、 $97\mu g \cdot m^{-3}$  和  $106\mu g \cdot m^{-3}$ 。与阿左旗夜间高  $O_3$  相比，成都 2015 年至 2019 年夏季夜间的  $O_3$  日

平均浓度仅为  $40\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (徐栋夫等, 2023)。Ren et al. (2025) 研究发现阿拉善地区的高  $\text{O}_3$  背景浓度约为  $110\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。阿左旗夏季高  $\text{O}_3$  浓度受沙漠区域高背景值的影响。

### 3.2.3 秋季日变化特征

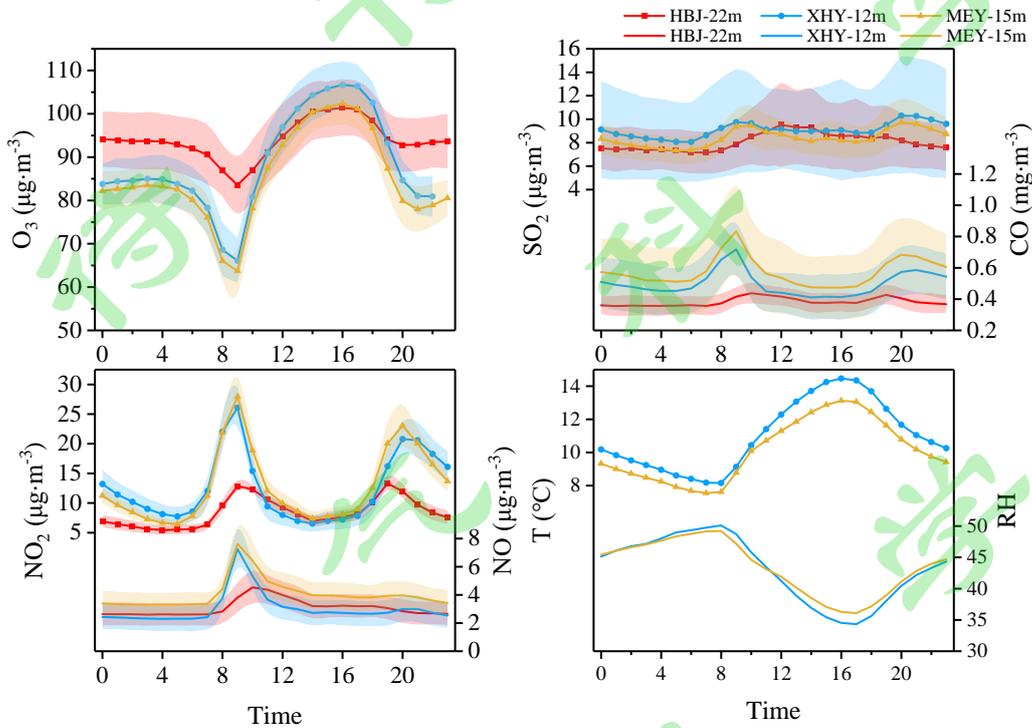


图 6 环保局新楼站 (HBJ)、蒙二幼站 (MEY) 和西花园站 (XHY) 三个站点 2015 年至 2022 年秋季大气  $\text{O}_3$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{CO}$  以及温度 ( $T$ )、相对湿度 ( $\text{RH}$ ) 的日平均小时值变化图

**Figure 6.** Average diurnal variations in  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  and  $\text{CO}$ , as well as temperature( $T$ ) and relative humidity( $\text{RH}$ ) for the autumn from 2015 to 2022 at HBJ, MEY and XHY

图 6 展示了环保局新楼站、蒙二幼站和西花园站 2015 年至 2022 年秋季各要素的日平均小时变化情况。由于阿拉善地区的供暖活动，秋季人为排放污染物有所增加。环保局新楼站 (距地面 22m) 的  $\text{NO}$  峰值浓度为  $4\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，另外两个站点为  $7\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。 $\text{NO}_2$  与  $\text{NO}$  浓度同步上升，西花园站 (距地面 12m) 和蒙二幼站 (距地面 15m) 的  $\text{NO}_2$  浓度峰值升高至约  $27\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，而环保局新楼站为  $13\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。秋季夜间 (20:00 至次日 6:00)，西花园站和蒙二幼站  $\text{O}_3$  浓度平均值为  $82\pm 1\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，环保局新楼站为  $93\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。西宁位于青藏高原东北部，生态环境较脆弱，主要发展新能源产业，属于人为活动影响较弱的区域。谈昌蓉等

(2019) 分析了 2015 年至 2017 年西宁近地面 O<sub>3</sub> 的季节平均日变化特征, 发现秋季夜间 O<sub>3</sub> 浓度为 38 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。尽管阿左旗与西宁类似, 周围无强人为活动排放源, 但是阿左旗 O<sub>3</sub> 夜间浓度显著高于西宁, 反映沙漠城市 O<sub>3</sub> 分布特征和较高的区域背景值。

### 3.2.4 冬季日变化特征

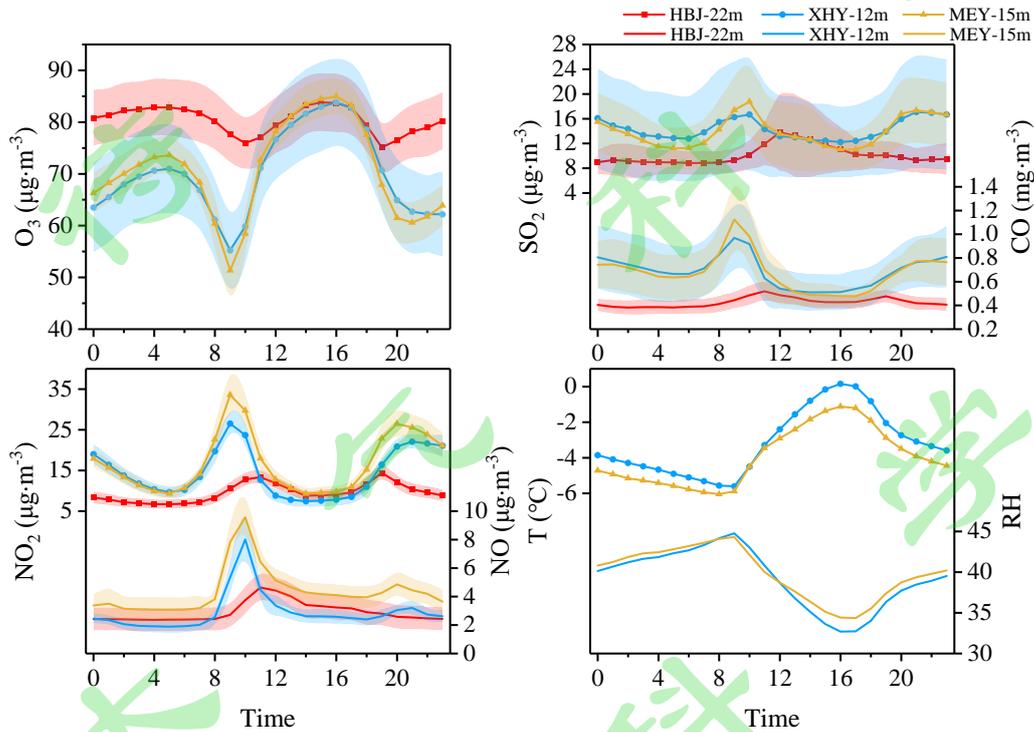


图 7 环保局新楼站 (HBJ)、蒙二幼站 (MEY) 和西花园站 (XHY) 三个站点 2015 年至 2022 年冬季大气 O<sub>3</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub> 和 CO 以及温度 (T)、相对湿度 (RH) 的日平均小时值变化图

**Figure 7.** Average diurnal variations in O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> and CO, as well as temperature(T) and relative humidity(RH) for the winter from 2015 to 2022 at HBJ, MEY and XHY

冬季太阳辐射明显减弱、气温降低, 导致大气 O<sub>3</sub> 光化学反应速率降低, 影响 O<sub>3</sub> 的生成。此外, 冬季大气自由运动减弱, 由于 NO 滴定反应主要发生在近地面, O<sub>3</sub> 浓度的垂直高度差异更为明显。阿左旗在西花园站 (距地面 12m) 和蒙二幼站 (距地面 15m) 相较于环保局新楼站 (距地面 22m) O<sub>3</sub> 浓度谷值低约 25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。图 7 展示了环保局新楼站、蒙二幼站和西花园站 2015 年至 2022 年冬季各要素的日平均小时值变化。冬季气温较低, 大气边界层稳定, 导致人为排放的 NO<sub>x</sub> 在近地面层积累, 西花园和蒙二幼站 NO 和 NO<sub>2</sub> 浓度分别升高至 9

$\pm 1\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $30\pm 3\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。西花园站（距地面 12m）和蒙二幼站（距地面 15m）夜间（20:00 至次日 6:00）平均  $\text{O}_3$  浓度为  $65\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，而环保局新楼站（距地面 22m）为  $82\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。由于沙漠下垫面的比热较小，夜间极易出现逆温情况，温度变化对  $\text{O}_3$  浓度有较大影响。何清等（2010）指出，塔克拉玛干沙漠腹地冬季观测期全天都出现很强的逆温，逆温层存在导致  $\text{O}_3$  浓度随高度增加而增加。沙漠腹地近地面  $\text{O}_3$  浓度为  $20\text{-}60\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，逆温层大约出现于距地面 300m 处，较地面温度高  $4\text{-}8^\circ\text{C}$ ， $\text{O}_3$  浓度高  $10\text{-}40\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。阿左旗环保局新楼站（距地面 22m）、蒙二幼站（距地面 15m）和西花园站（距地面 12m），三个站点间最大高度差仅为 10m。环保局新楼站相较其余两个距地面高度低的站点，夜间  $\text{O}_3$  浓度高约  $25\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。与塔克拉玛干沙漠背景区域  $\text{O}_3$  浓度相比，阿左旗人为活动对  $\text{O}_3$  浓度的影响远大于气象因素。由于西花园站（距地面 12m）和蒙二幼站（距地面 15m） $\text{O}_3$  明显受到夜间  $\text{NO}$  滴定效应影响，在日间（08:00-18:00）随着温度和太阳辐射强度的升高， $\text{O}_3$  浓度出现快速上升，而环保局新楼站（距地面 22m）在日间浓度变化幅度较小，三个站点  $\text{O}_3$  浓度在 16 时前后到达峰值，反映冬季阿左旗区域  $\text{O}_3$  浓度峰值为约  $84\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

### 3.3 对比沙漠站点英雄会 $\text{O}_3$ 变化特征

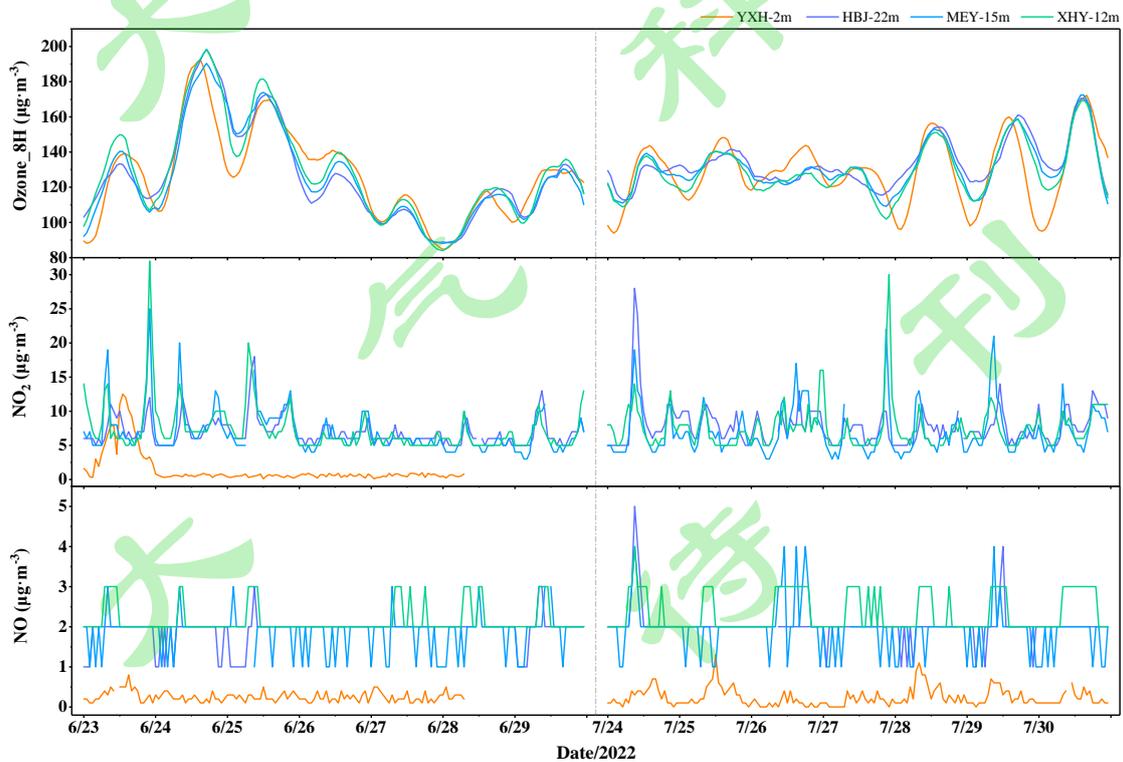


图 8 环保局新楼站 (HBJ)、蒙二幼站 (MEY) 和西花园站 (XHY) 三个城区国控站点以及沙漠站点英雄会 (YXH) 2022 年夏季观测期 6.23 至 6.29 和 7.24 至 7.30 臭氧 8 小时滑动平均值、NO<sub>2</sub> 和 NO 小时浓度变化图

**Figure 8.** Variation of ozone 8-hour sliding average, NO<sub>2</sub> and NO hourly concentrations at HBJ, MEY, XHY and the desert station, YXH during the summer observation period of 2022 from June 23rd to June 29th and July 24th to July 30th

2022 年夏季在腾格里沙漠设置英雄会 (YXH-2m) 站点, 监测沙漠无人干扰区域的 O<sub>3</sub> 及其前体物浓度变化, 与阿左旗城区弱人为影响条件下 O<sub>3</sub> 变化特征作对比。图 8 展示阿左旗城区环保局新楼站、蒙二幼站、西花园站和位于腾格里沙漠的英雄会站点, 在 2022 年 6 月 23 日至 6 月 29 日和 7 月 24 日至 7 月 30 日 (共 14 天) 的臭氧 8 小时滑动平均值 (O<sub>3</sub>-8h) 和 NO<sub>x</sub> 浓度变化情况。英雄会站点距地面高度 2m, 与阿左旗城区相距约 55km, 受到人为干扰更少, 能够反映沙漠区域近地面 O<sub>3</sub> 和 NO<sub>x</sub> 浓度的变化特征。从图中可得, 城区的 NO 浓度为 2μg·m<sup>-3</sup>, NO<sub>2</sub> 浓度为 10μg·m<sup>-3</sup>, 而沙漠站点 NO<sub>x</sub> 的浓度几乎为零, 明显低于城区。英雄会站 (距地面 2m) 和城区三个站点 O<sub>3</sub>-8h 变化趋势和峰值浓度一致, 表明夏季 O<sub>3</sub> 浓度受沙漠区域高背景值的影响。高 O<sub>3</sub> 背景浓度可能与背景 NO<sub>x</sub> 参与 O<sub>3</sub> 光化学反应, 以及高温条件下高空 O<sub>3</sub> 下传有关。夜间, 英雄会站点 (距地面 2m) 的 O<sub>3</sub>-8h 浓度比城区站点低约 10μg·m<sup>-3</sup>, 沙漠区域 O<sub>3</sub> 浓度下降可能与 O<sub>3</sub> 沉降有关。已有研究表明, O<sub>3</sub> 在不同下垫面的沉降速度和通量存在差异。潘小乐等 (2010) 发现 O<sub>3</sub> 在草地下垫面沉降通量为 -0.4 μg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> (负号为方向指向地面), 沉降速率为 0.55 cm·s<sup>-1</sup>; 袁月 (2018) 在夏季对裸土的研究发现, O<sub>3</sub> 沉降通量为 -0.162 μg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 沉降速度为 0.59 cm·s<sup>-1</sup>。O<sub>3</sub> 沉降与下垫面的温度、湿度、摩擦系数以及植被状况等要素相关, 但目前针对阿拉善沙漠地区 O<sub>3</sub> 沉降的研究还很少。沙漠表面疏松多孔, 昼夜温差大, 这些特性会影响近地面湍流运动, 从而影响 O<sub>3</sub> 沉降速率和通量。因此, 未来需要对阿拉善沙漠区域进行更多垂直探测和 O<sub>3</sub> 沉降相关研究, 以明确高 O<sub>3</sub> 背景值的来源。

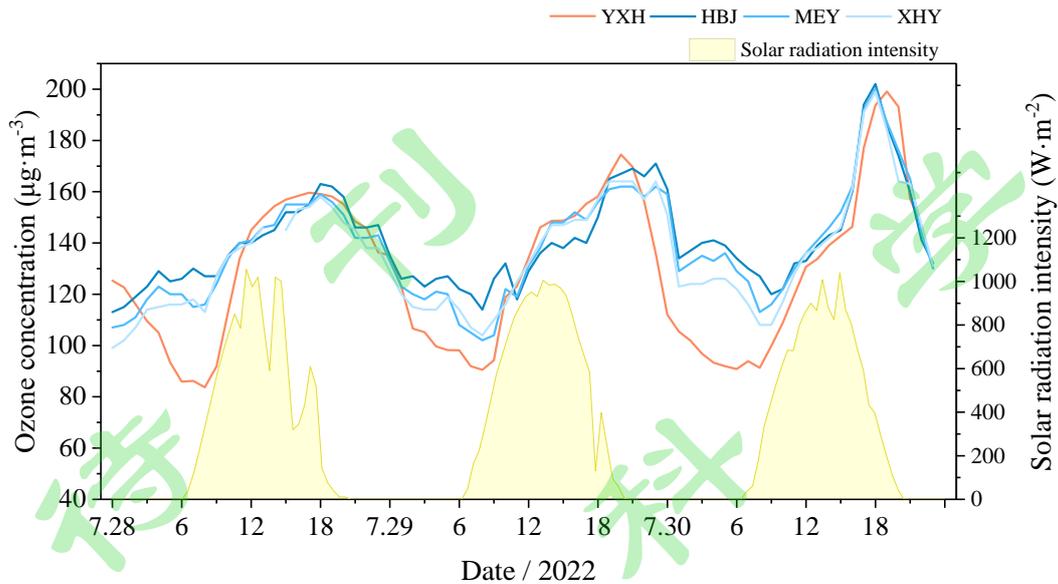


图9 环保局新楼站（HBJ）、蒙二幼站（MEY）和西花园站（XHY）三个城区国控站点以及沙漠站点英雄会（YXH）7月28日-7月30日臭氧小时浓度和太阳辐射变化图

Figure 9. Variation of ozone hourly concentration and solar radiation intensity from July 28th to July 30th 2022 at HBJ, MEY and XHY, as well as the desert station YXH

选取典型  $O_3$  污染过程分析，图9中数据时间为2022年7月28日至7月30日，其中7月30日  $O_3$  小时浓度超过国家二级标准（ $200\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ）。三日气温持续较高（日最高气温  $35^\circ\text{C}$ ），无降水过程，地面太阳辐射稳定变化。 $O_3$  浓度逐日上升，峰值从  $160\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  上升至  $200\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，并在 19:00 出现。根据已有研究，北京市  $O_3$  峰值出现于 16:00 前后，兰州市夏季  $O_3$  峰值出现于 13:00（贾龙等，2024；马志强等，2007；陈培章和陈道劲，2019）；而与阿左旗类似的沙漠区域，塔克拉玛干沙漠  $O_3$  峰值出现于 18:00（刘新春等，2013）。大型城市中，由于人为排放大量  $\text{NO}_x$ ， $\text{NO}$  消耗  $O_3$  的量超过  $O_3$  生成量时， $O_3$  浓度开始下降；而在沙漠区域， $O_3$  峰值时间要晚于城市地区。从图中太阳辐射变化可得，13:00 后太阳辐射开始逐渐变弱，直至 19:00 出现  $O_3$  峰值时，太阳辐射强度几乎为零，表明在沙漠区域， $\text{NO}$  在白天对  $O_3$  的影响极小。

## 4 结论与展望

本文利用内蒙古阿拉善地区长期环境监测数据分析表明，我国西部沙漠受到高背景 O<sub>3</sub> 浓度控制；鉴于荒漠城市人口少，社会经济活动弱，阿拉善左旗城市近地面不同高度 O<sub>3</sub> 浓度变化受到局地弱人为影响，主要结论如下：

1. 夏季强太阳辐射和高温条件促进 O<sub>3</sub> 的光化学反应，距地面较低的西花园站（距地面 12m）和蒙二幼站点（距地面 15m）O<sub>3</sub> 日浓度峰值比环保局新楼站（距地面 22m）高约 5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ；夜间，三个站点随着距地面高度增加，O<sub>3</sub> 谷值浓度分别为 93 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、97 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 106 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。反映日间近地面人为活动在一定程度上促进了 O<sub>3</sub> 浓度的增加，夜间 NO 滴定反应是造成 O<sub>3</sub> 垂直浓度差异的主要原因，但阿左旗夏季 O<sub>3</sub> 浓度主要受到高背景浓度的影响。

2. 阿左旗环保局新楼站（距地面 22m）、蒙二幼站（距地面 15m）和西花园站（距地面 12m），三个站点间最大高度差仅为 10m。然而，四季中环保局新楼站夜间 O<sub>3</sub> 浓度较其他两个站点高约 5-25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。显示出局地人为活动排放的 NO 对 O<sub>3</sub> 浓度有明显影响。

3. 西部荒漠地区 O<sub>3</sub> 污染主要集中在夏季高温时期，O<sub>3</sub> 峰值通常在 19:00 左右出现，晚于城市区域。沙漠站的夜间 O<sub>3</sub>-8h 浓度比城区低约 10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，未来的研究需关注 O<sub>3</sub> 的下传和干沉降过程，以揭示高 O<sub>3</sub> 背景浓度的形成机制。

## 参考文献:

- 陈培章,陈道劲. 2019. 兰州主城臭氧污染特征及气象因子分析[J]. 气象与环境学报, 35(02):46-54.
- Chen Peizhang, Chen Daojin. 2019. Analysis of ozone pollution characteristics and meteorological factors over Lanzhou city[J]. Journal of Meteorology and Environment, 35(02):46-54.
- Feng Z, Hu E, Wang X, et al. 2015. Ground-level O<sub>3</sub> pollution and its impacts of food crops in China: a review[J]. Environmental Pollution, 199:42-48.
- Fu Y, Liao H, Yang Y. 2019. Interannual and decadal changes in tropospheric ozone in China and the associated chemistry-climate interactions: A Review[J]. Adv. Atmos. Sci, 36:975-993.
- Feng Z, Xu Y, Kobayashi K, et al. 2022. Ozone pollution threatens the production of major staple crops in East Asia[J]. Nature Food, 3(1), 47-56.
- Güsten H, Heinrich G, Mönnich E, et al. 1996. On-line measurements of ozone surface fluxes: Part II. Surface-level ozone fluxes onto the Sahara Desert[J]. Atmospheric Environment, 30(6):911-918.
- 何清,刘强,杨兴华,等. 2010. 塔克拉玛干沙漠腹地冬季大气边界层 O<sub>3</sub>廓线分析[J].中国沙漠, 30(04):909-916.
- He Qing, Liu Qiang, Yang Xinghua, et al. 2010. Profiles of atmosphere boundary layer ozone in winter over Hinterland of Taklimakan Desert[J]. Journal of Desert Research, 30(04):909-916.
- Hoffer T E, Farber R J, Ellis E C. 1982. Background continental ozone levels in the rural US southwest desert[J]. Science of The Total Environment, 23:17-30.
- Hong J, Wang W, Bai Z, et al. 2022. The Long-Term Trends and Interannual Variability in Surface Ozone Levels in Beijing from 1995 to 2020[J]. Remote Sensing, 14(22):5726.
- 贾龙,于姗姗,徐永福. 2024. 解析北京郊区一次典型臭氧污染的物理化学过程[J].大气科学, 48(01):391-404.
- Jia Long, Yu Shanshan, Xu Yongfu. 2024. Physicochemical processes of a typical ozone pollution in suburb of Beijing[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 48(01):391-404.
- 刘新春,钟玉婷,何清,等. 2013. 塔克拉玛干沙漠腹地近地面臭氧浓度变化特征及影响因素分析[J].中国沙漠,33(02):626-633.
- Liu Xinchun, Zhong Yuting, He Qing, et al. 2013. The variation characteristics and influencing factors of surface ozone concentration in the Taklimakan Desert Hinterland[J]. Journal of Desert Research, 33(02):626-633.
- Lim S S, Vos T, Flaxman A D, et al. 2012. A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010 [J]. The Lancet, 380(9859):2224-2260.
- Li Z, Gao Y, Han L. 2017. Holocene vegetation signals in the Alashan Desert of northwest China revealed by lipid molecular proxies from calcareous root tubes[J]. Quatern

- ary Research, 88(1):60-70.
- Liu H, Liu S, Xue B, et al. 2018. Ground-level ozone pollution and its health impacts in China[J]. *Atmospheric Environment*, 173:223-230.
- Liu X, Tang W, Chen H, et al. 2022. Observational Study of Ground-Level Ozone in the Desert Atmosphere[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 108(2):219-224.
- 马志强,王跃思,孙扬,等. 2007. 北京市与香河县大气臭氧及氮氧化合物的变化特征[J]. *环境化学*, 6:832-837.
- Ma Zhiqiang, Wang Yuesi, Sun Yang, et al. 2007. Characteristics of ozone and oxides of nitrogen in Beijing and Xianghe[J]. *Environmental Chemistry*, 6:832-837.
- Meixner F X, Behrendt T, Ermel M, et al. 2013. Ozone in the Mongolian Gobi Desert: Large-scale concentrations and dry deposition[C]. In EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. EGU2013-9103).
- Mao Y H, Yu S, Shang Y, et al. 2022. Response of summer ozone to precursor emission controls in the Yangtze River Delta Region[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 10:325.
- Nguyen Duy-Hieu, Lin Chitsan, Vu Chi-Thanh, et al., 2022. Tropospheric ozone and NOx: A review of worldwide variation and meteorological influences, *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102809.
- 潘小乐,王自发,王喜全,等. 2010. 秋季在北京城郊草地下垫面上的一次臭氧干沉降观测试验[J]. *大气科学*, 34(01):120-130.
- Pan Xiaole, Wang Zifa, Wang Xiquan, et al. 2010. An observation study of ozone dry deposition over Grassland in the suburban area of Beijing[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 34(01):120-130.
- Ren X B, Wang F, Wu B Y, et al. 2025. High summer background O<sub>3</sub> levels in the desert of northwest China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 151:516-528.
- Song H, Zhao W, Yang X, et al. 2023. Ozone sensitivity analysis and ozone formation regimes division in the Beijing–Tianjin–Hebei Region based on satellite remote sensing data[J]. *Atmosphere*, 14(11):1637.
- 谈昌蓉,郭晓宁,陈奇,等. 2019. 西宁近地面臭氧特征及其影响因素[J]. *干旱气象*, 37(01):31-39.
- Tan Changrong, Guo Xiaoning, Chen Qi, et al. 2019. Study on surface ozone characteristics and its influencing factors in Xining[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 37(01):31-39.
- VanCuren R. 2015. Transport aloft drives peak ozone in the Mojave Desert[J]. *Atmospheric Environment*, 109:331-341.
- Wang T, Xue L, Brimblecombe P, et al. 2017. Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects[J]. *Science of The Total Environment*, 575:1582–1596.
- Wie J, Park H-J, Lee H, et al. 2020. Near-Surface ozone variations in East Asia during boreal summer[J]. *Atmosphere*, 11(2):206.
- Wei G, Zhang C, Li Q, et al. 2022. Grain-size composition of the surface sediments in

- Chinese deserts and the associated dust emission[J]. *Catena*, 219:106615.
- 徐栋夫,温李明,曹萍萍. 2023. 2015-2019 年成都夏季地面臭氧浓度与气象要素关系及臭氧污染天气分型[J]. *气象与环境科学*, 46(05):25-32.
- Xu Dongfu, Wen Liming, Cao Pingping, et al. 2023. The relationship between ozone concentration and meteorological factors and synoptic classification of ozone pollution during summer of 2015-2019 in Chengdu[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 46(05):25-32.
- Xiao Z, Jiang H. 2013. A study of spatial and temporal dynamics of total ozone over Southwest China with multi-source remote-sensing data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 34(1):128-138.
- 袁月. 2018. 裸土臭氧干沉降通量观测与模拟[D].南京信息工程大学硕士学位论文.
- Yuan Yue. 2018. Measurements and modeling the ozone flux on bare soil[D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology.
- 赵月. 2024-06-17. 长三角典型城市臭氧污染特征及 VOCs 来源解析[J/OL].*环境科学研究*:1-16.
- Zhao Yue. 2024-06-17. Variation Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Ozone Pollution in the Yangtze River Delta Region[J/OL]. *Research of Environmental Sciences*:1-16.
- Zhou L, Zhang J, Wang H, et al. 2018. Summer ozone variation in North China based on satellite and site observations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*:1-16.
- Zhao Z, Zhou Z, Russo A, et al. 2021. Impact of meteorological conditions at multiple scales on ozone concentration in the Yangtze River Delta[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(44):62991-63007.
- Zhu B, Yang L. 2023. Desertification and Related Climate Change in the Alashan Plateau since the Last 40 ka of the Last Glacial Period[J]. *Atmosphere*, 14(2):384.