

MA Xiangjun, XU Jian, LIN Changgui, SHI Jiancheng. Spatio-temporal Characteristics Analysis of Ozone Valley on the Qinghai-Xizang Plateau Based on Satellite Data (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(5): 1272–1284. CSTR:32142.14.cjss.2024-0105. DOI:10.11728/cjss2025.05.2024-0105

基于卫星资料的青藏高原臭氧谷 时空特征分析*

马湘君^{1,2} 许健¹ 林长贵¹ 施建成¹

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 101408)

摘要 青藏高原臭氧谷对全球气候具有重要影响,为探索臭氧谷具体时空特征,本文主要利用臭氧监测仪(OMI)和微波临边探测器(MLS)提供的2010–2023年青藏高原和同纬度地区臭氧总量日观测数据、对流层臭氧月均值数据和臭氧廓线数据,对青藏高原上空臭氧低值中心的时空分布特征进行相应分析,并简要讨论总结了该现象产生的可能原因。研究结果表明,青藏高原和全球同纬度地区相比,夏季存在明显的臭氧低值现象;青藏高原垂直方向臭氧低值主要发生在15~20 km范围内,其中最低值对应高度为16.8 km,大致位于对流层顶;青藏高原内部臭氧低值现象存在明显的地域差异,冬季南部和北部规律相反。

关键词 青藏高原, 臭氧总量, 对流层臭氧, 臭氧低值中心, 时空分布
中图分类号 P407

Spatio-temporal Characteristics Analysis of Ozone Valley on the Qinghai-Xizang Plateau Based on Satellite Data

MA Xiangjun^{1,2} XU Jian¹ LIN Changgui¹ SHI Jiancheng¹

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408)

Abstract The ozone valley over the Qinghai-Xizang Plateau has a significant impact on global climate. To explore the specific temporal and spatial characteristics of the ozone valley, this study primarily utilizes daily total ozone columns, monthly average tropospheric ozone columns, and ozone profiles derived from OMI and MLS over the Qinghai-Xizang Plateau from 2010 to 2023. The study analyzes the spatial and temporal distribution characteristics of the ozone low-value center over the Qinghai-Xizang Plateau and briefly discusses the possible causes of this phenomenon. Additionally, we employ spatial in-

* 国家自然科学基金项目资助(42375142)

2024-08-25 收到原稿, 2025-03-20 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

terpolation and precision-controlled data screening to minimize uncertainties in satellite retrievals, ensuring robust conclusions. The results are indicated below. Compared to other regions at the same latitude globally, the Qinghai-Xizang Plateau exhibits a distinct low-ozone phenomenon during the summer, with a maximum deficit of 36 DU (Dobson Unit), located in the northwestern part of the Qinghai-Xizang Plateau. Notably, this seasonal anomaly extends to tropospheric ozone, where the plateau shows a deficit of 15 DU relative to regions at the same latitude globally. Vertically, there are multiple peaks of the ozone deficit over the Qinghai-Xizang Plateau in summer. The low ozone values over the Qinghai-Xizang Plateau are mainly concentrated within the 15~20 km range, with the lowest value corresponding to an altitude of 16.8 km, roughly at the tropopause. There are significant regional differences in the low-ozone phenomenon within the Qinghai-Xizang Plateau, with opposite patterns observed between the southern and northern parts during the winter, where northern regions show ozone surpluses (+156.2 ppb) within the 15~20 km range, contrasting southern deficits. Based on the current study, future research will utilize high-resolution, multi-source data and relevant climate models to analyze further and validate the formation mechanisms of the ozone valley and its impacts on climate.

Key words Qinghai-Xizang Plateau, Total column ozone, Tropospheric ozone, Ozone low value center, Spatial and temporal distribution

0 引言

臭氧 (O_3) 是大气中一种十分重要的痕量气体, 主要存在于平流层和对流层中, 平流层臭氧约占臭氧总量的 90%, 余下约 10% 的臭氧则位于对流层^[1]. 臭氧在大气层中的体积占比不到 0.001%^[2], 虽然含量很低, 但是在大气层中不同的分布和含量变化都会对全球气候以及人类的生存环境产生十分重要的影响. 目前国内外针对臭氧的探测手段主要有地基监测和卫星遥感监测两种. 其中地面站点监测获取的臭氧数据精度较高, 但是观测距离有限, 只能实现站点附近小范围观测, 受到站点数量和分布的限制, 其空间覆盖难以满足日常监测的需求, 且地面观测站点获取的是近地面臭氧浓度值, 不能用于臭氧总量时空特征分析. 自 20 世纪 90 年代开始, 随着卫星遥感技术的发展, 用于全球臭氧观测的各类卫星遥感传感器开始出现. 基于遥感监测技术的臭氧观测有效地弥补了地面站点和探空气球在观测范围方面的不足, 能够对臭氧进行大尺度、连续和动态的观测并且可以提供整层臭氧的时空分布信息^[3]. 虽然目前基于卫星遥感监测数据反演得到的臭氧气体柱浓度存在一定的误差, 但是在大气尺度气体监测方面相对于传统地面站点监测手段仍具有巨大的优势, 已成为当前观测全球臭氧时空分布的主要方式^[4].

随着南极^[5]和北极^[6]臭氧空洞的发现, 臭氧损耗

现象及其相关成因、气候效应等引起广泛关注和研究^[7-12], 与南极、北极极地涡旋有关的平流层臭氧损耗可以通过改变平流层温度场和风场的分布进而影响对流层和地面温度^[13], 从而对全球气候产生影响^[14]. 然而, 臭氧损耗现象不仅发生在极地, 也发生在中纬度地区. 1995 年 Zhou 等^[15]利用 TOMS 数据首次发现了夏季青藏高原上空也存在臭氧低值现象, 称之为臭氧谷. 随后, Zou 等^[16]利用 TOMS 卫星资料求取了 1979—1991 年青藏高原地区臭氧总量纬向偏差季节均值, 证实了青藏高原夏季臭氧谷的存在.

此后, 有关青藏高原上空臭氧时空演变特征以及臭氧谷的成因机制开展了大量研究. 根据已有研究可知, 目前关于青藏高原臭氧谷形成原因主要有三种: 大气的动力传输^[17-22]、高原的大尺度山地作用^[23,24]和大气化学反应^[25,26]. 其中大多数研究认为动力输送是青藏高原臭氧谷的主要成因, 尤其是针对对流层顶—平流层底 (Upper Troposphere-Lower Stratosphere, UTLS) 区域较强的臭氧谷^[27,28]. Yan 等^[29]利用微波临边探测器 (MLS) 数据和平流层化学反应模拟分析了青藏高原上空平流层中上部臭氧低值中心影响因素, 发现夏季青藏高原平流层中上部臭氧亏损峰值的出现可能与 NO_2 昼夜变化以及青藏高原和同纬度地区日夜温差有关. Bian 等^[30]、Bian^[31]还针对微型臭氧空洞的成因进行了相关分析, 指出臭氧小空洞持续时间较为短暂, 主要由天气尺度相关的动力过程导致

而不是化学过程. 此外, 还有一些研究提出对流层顶高度^[32,33]、闪电产生的氮氧化物^[34,35]、厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO)^[36-39]、青藏高原对流层顶气溶胶层^[40]等均会对青藏高原臭氧谷形成产生一定的影响.

青藏高原的臭氧低值现象会对整个东亚气候产生十分重要的影响, 臭氧低值中心偏强年和偏弱年的变化会给东亚地区的地表温度、降水、季风低压和西太平洋副高等都带来不同程度的影响, 这种影响在中国东部地区尤为显著^[41]. 当夏季青藏高原臭氧低值现象较强时, 会导致中国大部分地区地表气温升高, 降水则以长江流域为分界线, 长江以南降水偏多, 而长江以北降水偏少^[42]. 且由于青藏高原地区太阳紫外辐射强烈, 夏季臭氧谷的出现也会导致紫外辐射加强, 从而对人类健康造成威胁^[43]. 根据相关模拟结果可知, 未来百年青藏高原臭氧谷仍有加深的趋势^[44], 因此对近年来青藏高原臭氧谷的变化趋势、时空分布特征及其相关成因进行研究是十分重要的. 而通过以上研究可以看出, 诸多对青藏高原臭氧谷的时空特征进行的相应分析, 其工作在一定程度上揭示了青藏高原臭氧谷的形成机制, 但研究时间段整体较为久远, 且大多研究关注的是臭氧总量, 对于对流层臭氧关注较少. 基于此, 本文以青藏高原为研究区域, 利用臭氧监测仪 (OMI) 和 MLS 提供的臭氧观测数据, 对 2010—2023 年青藏高原上空臭氧总量、对流层臭氧以及臭氧谷的时空分布特征进行综合研究分析, 并针对青藏高原臭氧谷可能的成因机制进行讨论分析, 为后续研究提供相关线索.

1 卫星数据与处理方法

OMI 是由美国国家航空航天局 (NASA) 发射的 Aura 卫星上携带的 4 个传感器之一, 主要采取天底观测的手段对臭氧等痕量气体进行监测^[45]. 目前官网提供的 OMI 数据等级主要包括: Level 1B, Level 2, Level 2G, Level 3, 本文选取数据为 Level 3 (OMDOAO3e), 该数据是基于差分吸收光谱技术 (DOAS) 反演后进行空间插值得到的. DOAS 算法主要在中心波长为 334.1 nm、宽为 5 nm 的窗口进行拟合^[46], 与原有的太阳反向散射紫外线和臭氧总量绘图光谱仪 SBUV/TOMS 技术相比, DOAS 算法有明显

优势, 利用了相对较大的吸收光谱范围, 从而对仪器的辐射校准和吸收气溶胶等干扰因素不太敏感^[47]. 当前获取的产品数据格式为 he5, 数据集覆盖全球范围, 经纬度分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. 本文主要处理利用的数据为 ColumnAmountO3 臭氧总量数据集和 ColumnAmountO3Precision 臭氧总量精度评定矩阵, 并在进行数据处理之前将精度评定矩阵中负值和零值对应的臭氧总量数据删除, 保证后续结果的准确性.

MLS 也搭载在 NASA 的极轨卫星 Aura 上^[48], 在 118 GHz~2.5 THz 的五个频谱区观测地球边缘的热微波发射^[49,50], 采用临边观测手段获取数据, 并通过官方反演算法得到臭氧等气体的垂直廓线分布^[51]. 目前, 尽管 MLS 提供的臭氧廓线数据与探空数据相比仍存在一定偏差, 但与其他卫星数据相比, MLS 数据在青藏高原, 尤其是南亚高压核心区的表现更为优越, 其标准误差较小, 数据可靠性较高^[52,53]. 本文选用的 3 级数据空间范围在南北纬 82° 之间, 数据存储格式为 NetCDF (NC), 数据格网为 $4^\circ \times 5^\circ$, 后续批量读取选取数据集为 O3PressureGrid. MLS 提供的臭氧垂直廓线资料纵坐标的气压范围为 0.00001~1000 hPa, 共 55 个标准气压层, 本文选取的是 0.0215~261.0157 hPa 高度范围较为可靠的臭氧混合比数据.

本研究所用的臭氧遥感数据是 OMI 的臭氧总量日浓度数据、MLS 的臭氧垂直廓线数据以及 OMI/MLS 提供的对流层臭氧月均值数据, OMI 和 MLS 两台载荷装载在同一个卫星平台上, 为传感器之间定标提供了良好的前提条件, 而且两个载荷针对同一观测点的观测时间接近. 此外, 两台载荷的数据时间跨度较世界其他同类型载荷长, 为后续进行长时间序列的科学研究提供了重要支撑. 两台载荷提供臭氧总量和垂直廓线观测数据均可从 NASA 官网^{*}下载, 目前下载数据时间段为 2010—2023 年, 时间分辨率为 1 d. 对流层臭氧数据是通过天底-临边残差法结合 OMI 臭氧总量与 MLS 臭氧廓线数据反演得到的, 其在高原地区的适用性较高^[54], 由于目前官网提供的 OMI/MLS 对流层臭氧月均值数据只更新到 2020 年, 所以本研究选取对流层臭氧月均值数据的时间段是

* <https://disc.gsfc.nasa.gov/>

2010—2020 年. 考虑到原始数据存在与本文研究区域不一致问题和部分数据质量不合格问题, 因此在进行数据处理之前, 需要进行数据筛选. 具体而言, 首先根据经纬度信息从全球数据集中筛选出青藏高原及全球同纬度区域的相关数据; 随后, 依据原始数据集内部提供的精度评定矩阵 (例如 ColumnAmountO3-Precision 和 rms_uncertainty), 剔除填充值数据及精度小于等于零的无效数据, 以确保用于分析的数据质量满足研究需求. 在此基础上, 进一步开展青藏高原地区臭氧低值中心的时空特征分析.

2 结果与讨论

2.1 青藏高原臭氧低值中心水平分布特征

2.1.1 时间变化特征

为直观给出青藏高原臭氧低值现象, 选取 OMI 提供的 2010—2023 年青藏高原与全球同纬度地区臭氧总量日观测数据, 分别求取二者 14 年间月均值进行定量比较, 如图 1 所示.

从图 1 可以看出, 青藏高原和全球同纬度地区上空臭氧总量月均值变化趋势既有一定的相似性又有一定的差异性. 相似性体现在两个地区臭氧总量季节

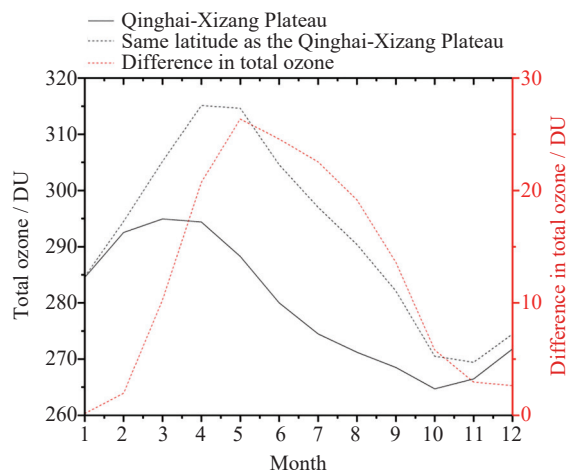


图 1 青藏高原与全球同纬度地区臭氧总量月均值曲线 (青藏高原区域: $25^{\circ}\text{N}-40^{\circ}\text{N}$, $73^{\circ}\text{E}-105^{\circ}\text{E}$)

Fig. 1 Monthly average of total ozone on the Qinghai-Xizang Plateau compared to the same latitude globally (Qinghai-Xizang Plateau: $25^{\circ}\text{N}-40^{\circ}\text{N}$, $73^{\circ}\text{E}-105^{\circ}\text{E}$)

变化规律大致相同, 都类似正弦曲线, 春季臭氧总量浓度最高, 然后逐渐下降, 秋季达到最低值. 这可能是赤道平流层通过光化学反应生成的臭氧由季节性经向环流向中高纬输送导致的^[55]. 此外, 秋末臭氧光化学反应损失、夏季青藏高原季风期降水增多 (增强臭氧清除效率) 以及云层加厚 (抑制臭氧光化学反应) 都是青藏高原上空夏季和秋季臭氧总量较低的原因^[21,56]; 差异性则主要体现在二者的臭氧浓度值和季节变化幅值: 青藏高原臭氧浓度最低值出现在 10 月 (264.7 DU^*), 最高值在 3 月 (294.9 DU), 振幅为 30.2 DU . 而除青藏高原之外的全球同纬度地区臭氧总量最低值为 11 月 (269.4 DU), 最高值在 4 月 (315.1 DU), 振幅为 45.7 DU . 2010—2023 年青藏高原臭氧总量的月均值变化与同纬度地区相比, 峰值和谷值均提前 1 个月出现, 且振幅较低.

青藏高原引起的臭氧总量变化由上述两值之差 (同纬度地区臭氧浓度值减去青藏高原上空臭氧浓度值) 表示, 可以看出青藏高原上空的臭氧总量在全年各个月份总是低于全球同纬度地区. 二者的浓度差值在夏季达到极大值 (22.1 DU), 冬季达到极小值 (1.6 DU), 振幅为 20.5 DU .

从以上分析可以看出, 夏季青藏高原臭氧低值现象最为明显, 即与全球同纬度地区相比臭氧总量差值最大, 为进一步分析 14 年间夏季青藏高原臭氧低值现象的长时间变化趋势, 绘制青藏高原与同纬度地区臭氧总量差值曲线图并进行线性拟合, 拟合结果如图 2 中红色直线所示. 由图 2 可知, 2010—2023 年, 臭氧总量差值波动下降 (斜线斜率为 -0.1846), 即在 2010—2023 年夏季青藏高原相比于同纬度地区的臭氧低值现象有所减缓但效果并不明显.

2.1.2 空间分布特征

为保证研究所用 OMI 和 OMI/MLS 数据空间分辨率一致, 将 OMI 的臭氧总量数据插值到 OMI/MLS 的对流层臭氧数据上, 然后对 2010—2023 年青藏高原不同季节臭氧总量分别取均值, 绘制如图 3 所示的空间分布, 从而分析青藏高原臭氧总量不同季节的空间分布情况. 由图 3 可知, 青藏高原上空臭氧总量分布具有一定的季节差异和空间差异: 整体上春季、冬季浓度值要高于夏季和秋季, 空间上大致规律

* DU (Dobson Unit) 为描述大气中臭氧密度的单位.

为北方浓度值高于南方。

由 2.1.1 节分析可知, 青藏高原上空整体平均的臭氧总量浓度值全年均低于同纬度地区, 存在臭氧低值中心, 为进一步表征青藏高原地区不同季节臭氧总量低值现象空间分布情况, 求取了 2010—2023 年四个季节青藏高原上空臭氧总量纬向偏差 (臭氧总量纬向偏差为臭氧总量格网数据减去臭氧总量纬圈平均值后的结果) 并绘制空间分布, 如图 4 所示。

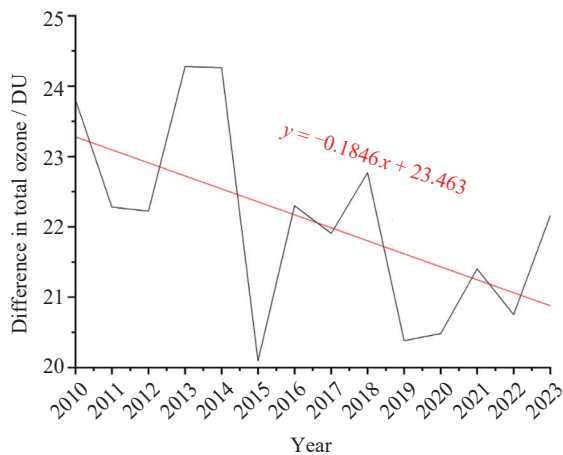


图 2 2010—2023 年夏季青藏高原与同纬度地区臭氧总量差值曲线

Fig. 2 Curve of total ozone difference in summer between the Qinghai-Xizang Plateau and regions at the same latitude from 2010 to 2023

从图 4 中可以看出, 青藏高原上空臭氧总量亏损存在一定的季节差异和地域分布差异. 首先是季节差异, 青藏高原上空全年都存在臭氧总量纬向偏差值为负的区域, 说明高原上空臭氧总量与全球同纬度地区相比全年都存在一定程度的亏损. 其中春季和夏季亏损与秋季和冬季相比, 整体亏损强度更大, 亏损区域面积更广, 尤其是夏季出现了亏损强度为 36 DU 的臭氧低值区. 为了得到青藏高原臭氧亏损最为严重时的具体时间, 求取了月均臭氧总量纬向偏差, 结果显示, 2010—2023 年 5 月青藏高原上空臭氧总量亏损最为严重, 区域平均亏损强度可达到 24.9 DU; 地域分布差异则主要体现在臭氧低值区的空间位置, 春季和夏季, 主要是高原的西北部存在较强的臭氧低值, 而在秋季和冬季, 主要臭氧总量亏损区出现在中部-东南部, 即从春季到冬季, 青藏高原臭氧谷的空间位置从西北向南部移动. 关于臭氧低值区位置随季节移动的相关规律, 与文献内利用欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 网站提供的 ERA5 再分析数据和 3 CS 月均值数据集进行分析得到的结论是一致的^[57,58].

虽然对流层臭氧在臭氧总量中占比较小, 但是其变化易受地形热力作用和天气过程的影响, 尤其是青藏高原地区频繁发生的平流层臭氧入侵^[59–61]会导致高原上空对流层臭氧浓度变化, 且近地面臭氧会对人体健康产生十分重要的影响^[62]. 因此, 为进一步分析青藏高原背景环流对其上空对流层臭氧产生的影响,

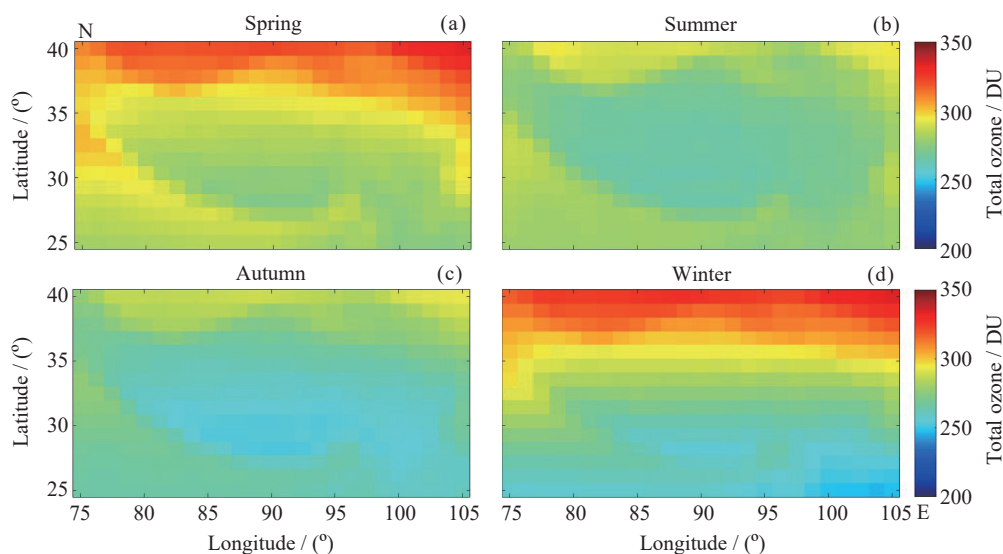


图 3 2010—2023 年青藏高原四季臭氧总量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of total ozone in four seasons on the Qinghai-Xizang Plateau between 2010 and 2023

同时比对臭氧总量和对流层臭氧的相似性和差异性, 利用 OMI/MLS 提供的对流层臭氧月均值数据 (目前官网提供数据截止到 2020 年, 后续研究时间段为 2010—2020 年), 绘制了 2010—2020 年不同季节青藏高原上空对流层的臭氧空间分布, 如图 5 所示. 从

图 5 可以看出, 青藏高原上空的对流层臭氧春季和夏季浓度高于秋季和冬季, 与臭氧总量季节规律具有一定的差异. 而且不同季节青藏高原上空对流层臭氧分布的空间规律也存在差异: 全年高原中部对流层臭氧浓度较低且较为稳定, 但是南部和北部对流层臭氧浓

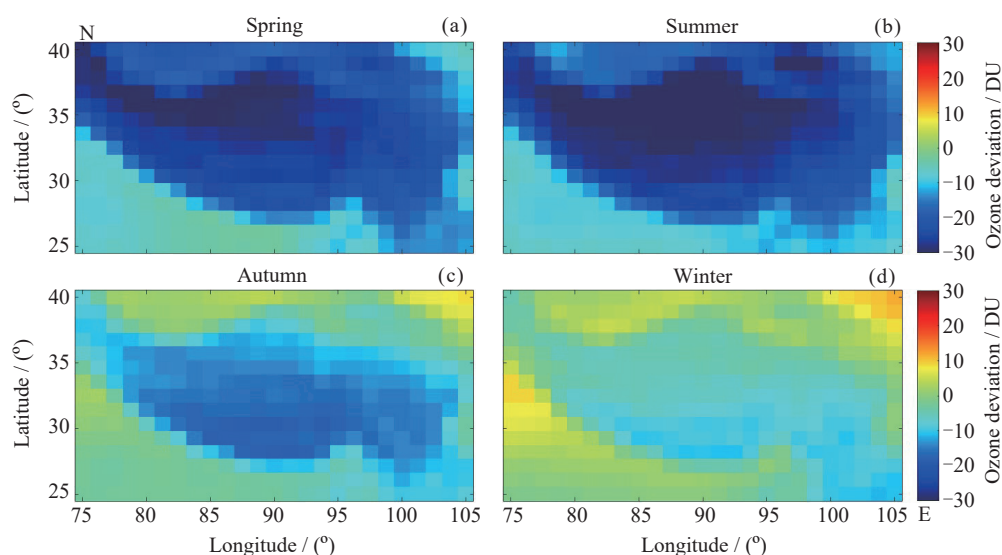


图 4 2010—2023 年青藏高原四季臭氧总量纬向偏差 (3—5 月均值代表春季, 6—8 月均值代表夏季, 9—11 月均值代表秋季, 12 月至次年 2 月代表冬季)

Fig. 4 Latitudinal deviation of total ozone in four seasons on the Qinghai-Xizang Plateau between 2010 and 2023 (March to May averages represent spring, June to August averages represent summer, September to November averages represent autumn, and December to February averages represent winter)

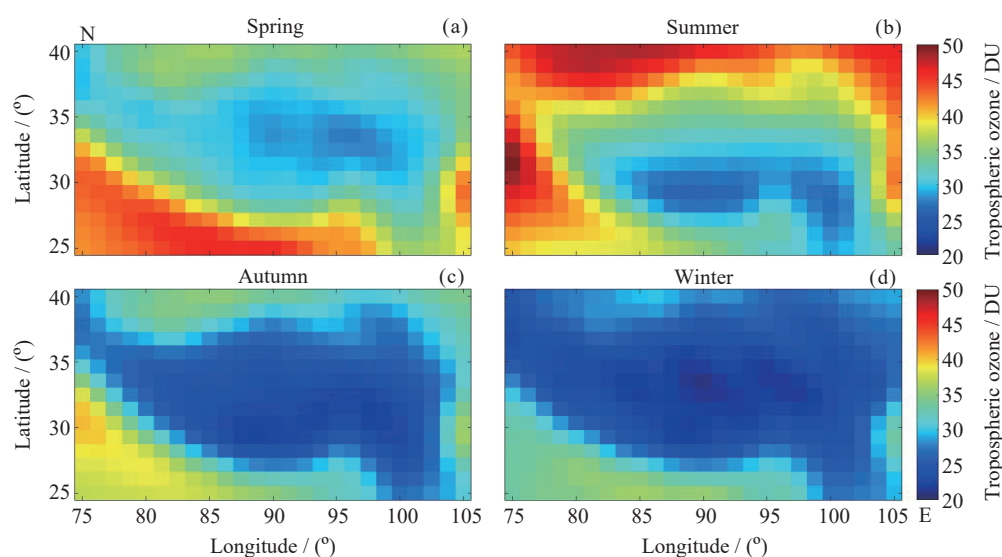


图 5 2010—2020 年青藏高原四季对流层臭氧空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of tropospheric ozone in four seasons on the Qinghai-Xizang Plateau between 2010 and 2020

度波动较大. 这种现象的产生主要是对流层顶折叠(导致平流层臭氧入侵)发生的空间位置不同, 春季青藏高原的对流层顶折叠主要发生在南部, 春季到夏季, 对流层顶折叠逐渐向北部移动^[63], 所以春季青藏高原南部对流层臭氧浓度出现高值, 夏季高值则出现在北部.

由上述分析可知, 青藏高原臭氧总量全年都存在一定的亏损区域, 为验证对比对流层臭氧是否和臭氧总量存在差异性, 求取了青藏高原上空对流层臭氧的纬向偏差, 绘制如图 6 所示的纬向偏差空间分布. 从图 6 可以看出, 与臭氧总量亏损规律一致, 即与全球同纬度地区相比, 青藏高原上空对流层臭氧全年都存在亏损区域, 且夏季亏损最为严重, 亏损峰值为 15 DU, 冬季亏损最小. 但是与臭氧总量纬向偏差相比, 对流层臭氧纬向偏差值并没有明显的地域分布差异.

青藏高原对流层臭氧柱总量全年都存在亏损可能由两方面原因造成. 一方面, 青藏高原地形较高导致对流层空气柱缩短, 使得对流层整体臭氧浓度低于同纬度地区; 另一方面, 青藏高原对流层臭氧主要来源为本地化学反应生成、平流层入侵、其他区域输送^[56], 而青藏高原地区人口较少, 工业生产、交通运输等人类活动排放的臭氧前体物较少, 从而使得青藏高原对流层臭氧浓度较低. 对于夏季青藏高原对流层

臭氧亏损最严重的现象, Zheng 等^[64]提出, 夏季从印度洋来的暖湿气流进入青藏高原后, 有可能把低纬度地区的臭氧低值气团带入高原上空, 从而使得高原上空对流层臭氧与同纬度地区相比存在一定的亏损. Sun 等^[65]也提出相似观点, 即夏季青藏高原主体地区强对流天气会将臭氧浓度低的气团输送到 UTLS 高度, 使得对流层臭氧浓度降低. 此外, 夏季同纬度地区人类活动导致的近地面臭氧污染加重也可能是造成青藏高原夏季对流层臭氧亏损最为严重的原因, 但具体亏损成因机制和影响因素还有待进一步研究分析.

2.2 青藏高原臭氧低值中心垂直分布特征

将 MLS 提供的 2010—2023 年青藏高原与全球同纬度地区不同季节不同高度的臭氧混合比分别取均值, 再计算两者之间的差值(青藏高原同纬度地区-青藏高原), 绘制臭氧差值垂直变化曲线, 如图 7 所示.

图 7 中正值表示同高度层青藏高原相比同纬度地区表现为臭氧亏损, 负值为盈余. 从图中可以看出, 春季和夏季青藏高原上空对流层中上部臭氧存在明显的亏损现象, 尤其是夏季, 在垂直方向不同高度上存在多个亏损峰值, 即夏季青藏高原臭氧谷垂直方向存在“双心结构”^[66,67]. 其主要亏损高度为 15~20 km, 亏损峰值为 108.9 ppb, 出现在 16.8 km 处, 与之前文献中利用 SAGE 卫星数据进行分析得到的结论基本一致^[68,69]. 而在秋季和冬季, 对流层臭氧亏

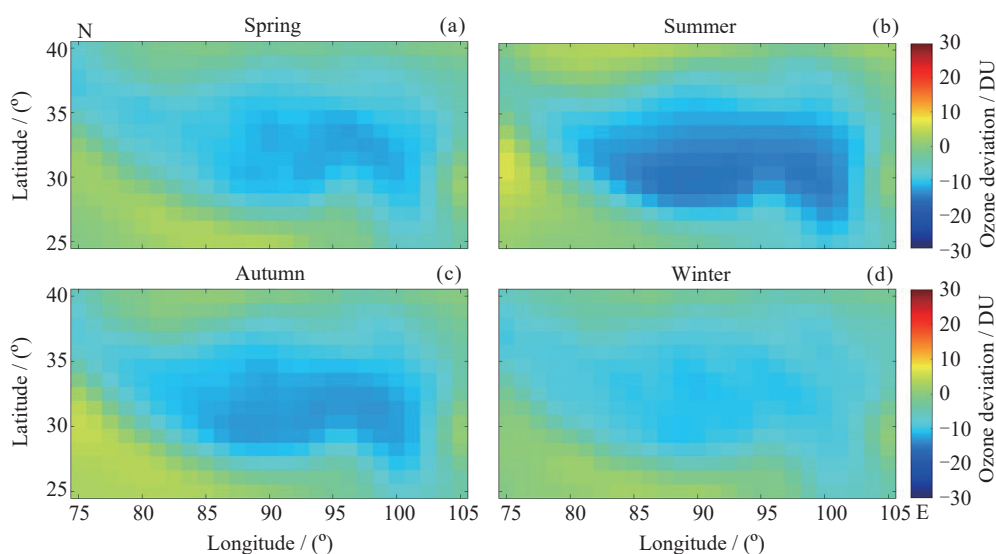


图 6 2010—2020 年青藏高原四季对流层臭氧纬向偏差

Fig. 6 Latitudinal deviation of tropospheric ozone in four seasons on the Qinghai-Xizang Plateau between 2010 and 2020

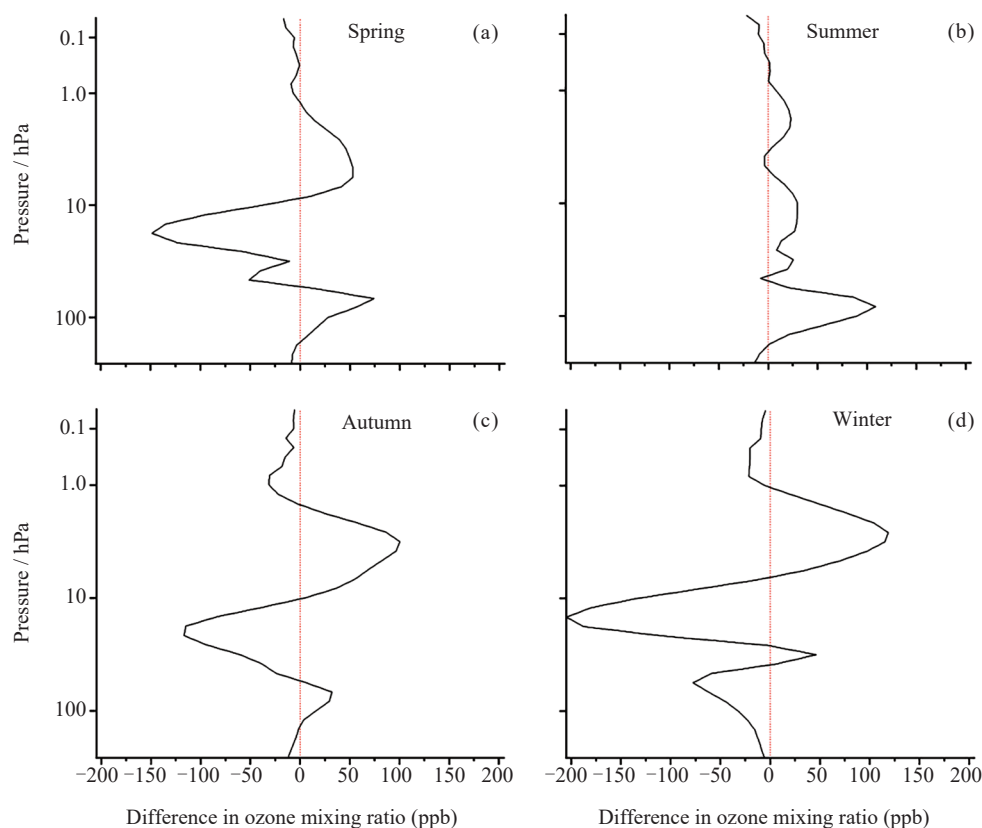


图7 2010—2023年不同季节同纬度地区与青藏高原上空臭氧差值垂直变化情况
(青藏高原区域: 24°N — 40°N , 72.5°E — 102.5°E)

Fig. 7 Vertical variation of ozone difference between the same latitude and the Qinghai-Xizang Plateau in different seasons between 2010 and 2023 (Qinghai-Xizang Plateau: 24°N — 40°N , 72.5°E — 102.5°E)

损较小, 尤其冬季同高度层对流层臭氧表现为盈余. 而图6冬季青藏高原部分地区整体对流层臭氧柱浓度却表现为亏损, 这在一定程度上是由高山静力亏损引起的对流层空气柱缩短而导致的.

由于夏季青藏高原在大致对流层顶高度附近存在较大的臭氧亏损, 为进一步分析2010—2023年该高度区域内臭氧亏损峰值的波动情况, 求取每一年夏季该高度范围内最大的亏损值, 绘制了青藏高原上空臭氧亏损峰值变化曲线图, 如图8所示, 其中红色直线代表拟合之后的结果. 从图8可以看出, 2010—2023年, 垂直方向亏损最大值有所波动, 整体呈现上升趋势, 其中2013年青藏高原垂直方向亏损峰值最高(153 ppb), 而在2010—2012年夏季青藏高原臭氧亏损峰值整体较低.

为进一步分析青藏高原内部不同区域、不同高度臭氧亏损情况是否存在一定的空间差异, 选取夏季和冬季青藏高原南部与同纬度地区不同高度的臭氧

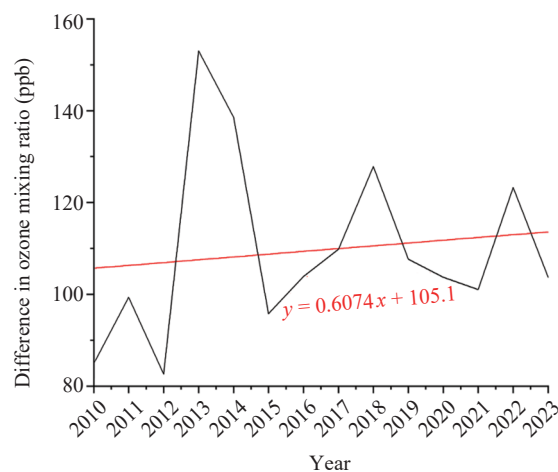


图8 2010—2023年青藏高原上空对流层臭氧亏损峰值变化曲线

Fig. 8 Variability of the peak tropospheric ozone deficit over the Qinghai-Xizang Plateau between 2010 and 2023

垂直混合比, 分别求差值得到如图9所示的曲线。

从图9中可以看出, 夏季青藏高原南部和北部变化规律基本一致, 均在15~20 km范围内出现臭氧亏损现象, 只是亏损程度有差异, 北部比南部亏损现象更严重。而冬季青藏高原南部和北部大致在对流层至平流层中低部高度区域内变化规律几乎完全相反, 尤其是15~20 km范围内, 南部主要为臭氧亏损, 但是北部主要表现为盈余, 最大盈余量可达到156.2 ppb。

2.3 夏季青藏高原臭氧低值中心原因讨论

夏季青藏高原臭氧亏损主要高度在15~20 km, 即夏季对流层顶臭氧亏损较为严重。对于夏季青藏高原上空存在较强臭氧谷的原因, Zhou等^[17]提出青藏高原在7~8月高原中低层形成一个非常强的辐合区, 在青藏高原的整个对流层, 夏季气流都处于上升状态, 同时还衔接了南侧孟加拉湾强上升区, 形成了季风环流上升支, 在盛夏时节(7~8月份)高原四周的爬升气流达到最强。且青藏高原受到南亚高压的控制使气流对流^[18,19], 是对流层向平流层物质输送的重要窗口^[70], 数百千米范围内的低空污染物质, 在夏季中统统向青藏高原辐合, 并实现低空物质向平流层下部输送, 最后再向四周辐散从而与对流层顶附近臭氧反应使其亏损^[71]。另一种观点则认为夏季青藏高原受到

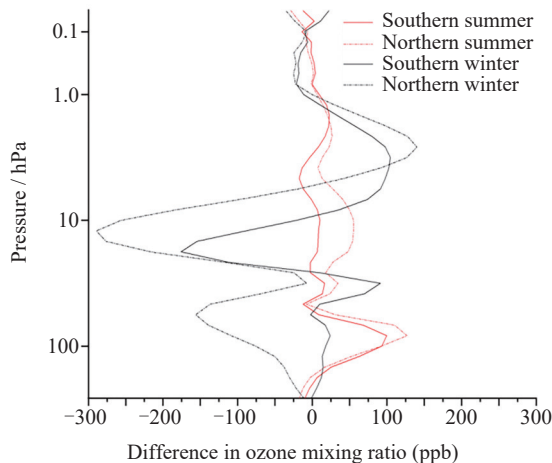


图9 夏季和冬季青藏高原南部/北部与同纬度地区臭氧混合比差值垂直变化(北部: 32°N–40°N, 南部: 24°N–32°N)

Fig. 9 Vertical variation of the difference in ozone mixing ratios between the southern/northern part of the Qinghai-Xizang Plateau and the same latitude in summer and winter (North: 32°N–40°N, South: 24°N–32°N)

南亚高压控制导致对流活动增多, 使得对流层低层的气流会聚, 从印度洋带来较低浓度的臭氧到达对流层顶, 而UTLS中的强反气旋阻止了平流层较高臭氧的输入, 这两者都在夏季青藏高原上空臭氧低压的形成中发挥了作用^[56]。

对于夏季青藏高原上空15~20 km臭氧谷的化学机制, Liu等^[26]指出, 对流层与平流层物质输送很难达到17.5 km以上, 所以17.5 km以下的对流层顶臭氧亏损可能是动力、热力作用导致的, 而在17.5 km以上出现的亏损则是由非均相化学反应引起的。

3 结论与展望

通过对2010–2023年臭氧遥感数据进行处理分析, 证实了夏季青藏高原上空存在臭氧低值中心, 并对高原上空臭氧总量、对流层臭氧、臭氧低值现象的时空分布特征进行相应分析。主要结论如下。

(1) 时间特征. 本文对青藏高原臭氧低值现象的长时序演变特征进行分析, 得出青藏高原上空臭氧总量始终低于全球同纬度地区, 即全年都表现为臭氧亏损, 且夏季亏损最为严重; 与臭氧总量类似, 青藏高原对流层臭氧也存在亏损。

(2) 空间特征(垂直方向). 通过绘制青藏高原和同纬度地区臭氧差值垂直分布曲线图, 发现夏季臭氧亏损存在多个峰值, 主要亏损范围在15~20 km内, 最大亏损峰值出现在16.8 km处。

(3) 空间特征(水平方向). 分别计算夏季、冬季青藏高原南部和北部臭氧亏损量, 发现青藏高原臭氧亏损存在一定的地域差异: 冬季青藏高原南部和北部规律相反, 即南部表现为臭氧亏损, 北部表现为盈余。

本研究虽然证实了夏季青藏高原臭氧谷的存在, 并对其形成可能的原因进行了初步总结, 但仍存在一些不足之处, 有待后续研究进一步完善和深入探讨。未来的研究可从以下几个方面展开。

(1) 臭氧谷形成机制的深入研究. 由于本研究所用数据有限, 关于臭氧谷形成的许多机制目前仅停留在初步总结和推测阶段, 还需更多高分辨率、多源数据支持, 以进一步分析和验证相关过程和机制。

(2) 气候效应的系统性分析. 青藏高原在全球气候调节中具有重要作用, 因此未来研究可以聚焦于青

藏高原臭氧谷对区域和全球气候的潜在影响, 深入探讨其在辐射强迫、大气环流调整以及生态系统响应等方面可能产生的效应, 为更全面地理解高原臭氧谷的气候意义提供科学依据。

参考文献

- [1] ZHANG Ying, GAO Yang, ZHU Shanyou, *et al.* Variation of total ozone over China for 30 years analyzed by multi-source satellite remote sensing data[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2014, **16**(6): 971-978 (张莹, 高扬, 祝善友, 等. 近 30a 中国上空臭氧总量时空变化遥感监测分析 [J]. 地球信息科学学报, 2014, **16**(6): 971-978)
- [2] XIE Jinghan, LI Sa, XIAO Zhongyong. Investigating the temporal and spatial variabilities of total ozone over China for the past 50 years[J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(7): 2977-2987 (谢静晗, 李飒, 肖钟湧. 50 年来中国臭氧总量时空变化特征 [J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(7): 2977-2987)
- [3] CHI Yulei, ZHAO Chuanfeng. Progress and challenges of ozone satellite remote sensing inversion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, **43**(18): 1899905 (迟雨蕾, 赵传峰. 臭氧卫星遥感反演进展及挑战 [J]. *光学学报*, 2023, **43**(18): 1899905)
- [4] XU J, ZHANG Z, RAO L L, *et al.* Remote sensing of tropospheric ozone from space: progress and challenges[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2024, **4**: 0178
- [5] FARMAN J C, GARDINER B G, SHANKLIN J D. Large losses of total ozone in antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction[J]. *Nature*, 1985, **315**(6016): 207-210
- [6] NEWMAN P A, GLEASON J F, MCPETERS R D, *et al.* Anomalously low ozone over the Arctic[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, **24**(22): 2689-2692
- [7] BOJKOV R D, BISHOP L, FIOLETOV V E. Total ozone trends from quality-controlled ground-based data (1964-1994)[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, **100**(D12): 25867-25876
- [8] POLVANI L M, WAUGH D W, CORREA G J P, *et al.* Stratospheric ozone depletion: the main driver of twentieth-century atmospheric circulation changes in the southern hemisphere[J]. *Journal of Climate*, 2011, **24**(3): 795-812
- [9] MCLANDRESS C, SHEPHERD T G, SCINOCICA J F, *et al.* Separating the dynamical effects of climate change and ozone depletion. Part II: southern hemisphere troposphere[J]. *Journal of Climate*, 2011, **24**(6): 1850-1868
- [10] CHANG S J, HE H T, HUANG D. The effects of gravity waves on ozone over the Tibetan Plateau[J]. *Atmospheric Research*, 2024, **299**: 107204
- [11] SHEN L, RAO J, GUO D, *et al.* Comparison of the climatic characteristics of ozone valley over the Tibetan Plateau and the Rocky Mountains[J]. *Earth and Space Science*, 2024, **11**(4): e2023EA003379
- [12] LIN P, MING Y. Enhanced climate response to ozone depletion from ozone-circulation coupling[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, **126**(7): e2020JD034286
- [13] HU Yongyun. Possible impact of stratospheric polar ozone depletion on tropospheric climate[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2006, **42**(5): 561-568 (胡永云. 平流层极地臭氧损耗影响对流层气候的研究进展 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2006, **42**(5): 561-568)
- [14] ZHU L G N, WU Z W. Climatic influence of the Antarctic ozone hole on the East Asian winter precipitation[J]. *Climatic and Atmospheric Science*, 2024, **7**(1): 184
- [15] ZHOU X J, LUO C. Ozone valley over Tibetan Plateau[J]. *Annual Report of CAMS*, 1995, **8**(4): 505-506
- [16] ZOU Han, GAO Yongqi, ZHOU Libo. Ozone low and surface heating over large scale topography[J]. *Climatic and Environmental Research*, 1998, **3**(3): 209-217 (邹捍, 郜永祺, 周立波. 大尺度山地上空的臭氧低值及地面加热 [J]. *气候与环境研究*, 1998, **3**(3): 209-217)
- [17] ZHOU X J, LI W L, CHEN L X, *et al.* Study on ozone change over the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2006, **20**(2): 129-143
- [18] ZHOU Xiuji, LUO Chao, LI Weiliang, *et al.* Total ozone changes in China and low center of the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, **40**(15): 1396-1398 (周秀骥, 罗超, 李维亮, 等. 中国地区臭氧总量变化与青藏高原低值中心 [J]. *科学通报*, 1995, **40**(15): 1396-1398)
- [19] GUO D, WANG P X, ZHOU X J, *et al.* Dynamic effects of the South Asian high on the ozone valley over the Tibetan Plateau[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, **26**(2): 216-228
- [20] ZHOU Renjun, CHEN Yuejuan. Ozone variations over the Tibetan and Iranian Plateaus and their relationship with the South Asia High pressure[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2005, **35**(6): 899-908 (周任君, 陈月娟. 青藏高原和伊朗高原上空臭氧变化特征及其与南亚高压的关系 [J]. 中国科学技术大学学报, 2005, **35**(6): 899-908)
- [21] ZHANG K Q, DUAN J K, ZHAO S Y, *et al.* Evaluating the ozone valley over the Tibetan Plateau in CMIP6 models[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2022, **39**(7): 1167-1183
- [22] WANG Qilu, XU Wenwen, TU Jingyi, *et al.* Comparison of the dynamic transport characteristics of low ozone regions over the Arctic and the Tibetan Plateau from 1979 to 2020[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2023, **47**(3): 866-880 (王启璐, 徐雯雯, 涂静怡, 等. 1979~2020 年北极和青藏高原臭氧低值区的动力输送特征比较 [J]. 大气科学, 2023, **47**(3): 866-880)
- [23] WANG Xiuying, TIAN Mengkun, CHEN Yan, *et al.* Characteristics and causes of the ozone low value center over the Tibetan Plateau[J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2019, **4**(1): 47-55 (王秀英, 田孟坤, 陈艳, 等. 青藏高原臭氧低值中心特征及成因分析 [J]. 三峡生态环境监测, 2019, **4**(1): 47-55)

- [24] QIU Yongyan, WEI Min, JIANG Ailiang, *et al.* General characteristics of the ozone low center above the Tibetan Plateau and (low) trough above the Rocky Mountains—on the cause of static deficit/depletion above the High Mountains[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2008, **13**(5): 617-628 (仇永炎, 魏民, 江爱良, 等. 青藏高原臭氧总量低中心与落基山臭氧低槽的基本特征——兼论高山静力亏损的成因 [J]. 气候与环境研究, 2008, **13**(5): 617-628)
- [25] LIU Yu, GUO Caili, LI Weiliang, *et al.* Trends of stratospheric ozone and aerosols over Tibetan Plateau[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2007, **65**(6): 938-945 (刘煜, 郭彩丽, 李维亮, 等. 青藏高原平流层臭氧和气溶胶的变化趋势研究 [J]. 气象学报, 2007, **65**(6): 938-945)
- [26] LIU Yu, LI Weiliang, ZHOU Xiuji. A possible effect of heterogeneous reactions on the formation of the ozone valley over the Tibetan Plateau[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2010, **68**(6): 836-846 (刘煜, 李维亮, 周秀骥. 非均相化学过程在青藏高原臭氧低谷形成中的作用 [J]. 气象学报, 2010, **68**(6): 836-846)
- [27] LIU Y, LI W L, ZHOU X J, *et al.* Mechanism of formation of the ozone valley over the Tibetan Plateau in summer—transport and chemical process of ozone[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**(1): 103-109
- [28] WAN Lingfeng, GUO Dong, LIU Renqiang, *et al.* Evaluation of the WACCM3 performance on simulation of the double core of ozone valley over the Qinghai-Xizang Plateau in summer[J]. *Plateau Meteorology*, 2017, **36**(1): 57-66 (万凌峰, 郭栋, 刘仁强, 等. WACCM3 对夏季青藏高原臭氧谷双心结构的模拟性能评估 [J]. 高原气象, 2017, **36**(1): 57-66)
- [29] YAN J J, WANG G L, YANG P C, *et al.* Influence of NO_x, Cl, and Br on the upper core of the ozone valley over the Tibetan Plateau during summer: simulations with a box model[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **817**: 152776
- [30] BIAN Jianchun, WANG Gengchen, CHEN Hongbin, *et al.* Ozone mini-holes appeared over the Tibetan Plateau in December 2003[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51**(5): 606-609 (卞建春, 王庚辰, 陈洪滨, 等. 2003 年 12 月青藏高原上空出现微型臭氧洞 [J]. 科学通报, 2006, **51**(5): 606-609)
- [31] BIAN J C. Features of ozone mini-hole events over the Tibetan Plateau[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, **26**(2): 305-311
- [32] ZHOU Shunwu, YANG Shuangyan, ZHANG Renhe, *et al.* Possible causes of total ozone depletion over the Qinghai-Xizang Plateau and its relation to tropopause height in recent 30 years[J]. *Plateau Meteorology*, 2012, **31**(6): 1471-1478 (周顺武, 杨双艳, 张人禾, 等. 近 30 年青藏高原臭氧总量亏损的可能原因及其与对流层顶高度的联系 [J]. 高原气象, 2012, **31**(6): 1471-1478)
- [33] ZHOU Renjun, Chen Yuejuan. Anomaly of the ozone low center over the Tibetan Plateau in 1998 and the surrounding flow field[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2006, **11**(2): 169-174 (周任君, 陈月娟. 1998 年青藏高原臭氧低值中心异常及其背景环流场的分析 [J]. 气候与环境研究, 2006, **11**(2): 169-174)
- [34] GUO Fengxia, MU Yijun, LI Yang, *et al.* Effects of nitrogen oxides produced from lightning on the formation of the ozone valley over the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2019, **43**(2): 266-276 (郭凤霞, 穆奕君, 李扬, 等. 闪电产生氮氧化物对青藏高原臭氧低谷形成的影响 [J]. 大气科学, 2019, **43**(2): 266-276)
- [35] LIU Z, GUO F X, ZHANG Y Q, *et al.* Impact of lightning-induced nitrogen oxides over and around the Tibetan Plateau on the Tibetan Plateau ozone valley[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2024, **129**(1): e2023JD039575
- [36] ZOU H, JI C P, ZHOU L B, *et al.* ENSO signal in total ozone over Tibet[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, **18**(2): 231-238
- [37] LI Y C, XU F, WAN L F, *et al.* Effect of ENSO on the ozone valley over the Tibetan Plateau based on the WACCM4 model[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(2): 525
- [38] CHANG S J, LI Y C, SHI C H, *et al.* Combined effects of the ENSO and the QBO on the ozone valley over the Tibetan Plateau[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(19): 4935
- [39] CHEN Peng, LI Yongchi, JING Guole, *et al.* Analysis of the Qinghai-Xizang Plateau ozone valley of stratospheric formation mechanism[J]. *Plateau Meteorology*, 2023, **42**(5): 1182-1193 (陈鹏, 李永炽, 景国乐, 等. 青藏高原平流层臭氧谷形成机制分析 [J]. 高原气象, 2023, **42**(5): 1182-1193)
- [40] YAN J J, WANG G L, YANG P C. Study on the sensitivity of summer ozone density to the enhanced aerosol loading over the Tibetan Plateau[J]. *Atmosphere*, 2020, **11**(2): 138
- [41] XIA Y, HU Y Y, HUANG Y, *et al.* Stratospheric ozone loss enhances summer precipitation over the southern slope of the Tibetan Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, **50**(15): e2023GL103742
- [42] ZHOU Renjun, CHEN Yuejuan. Effects of variation of low ozone center over the Tibetan Plateau on climate in China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, **31**(3): 479-485 (周任君, 陈月娟. 青藏高原臭氧低值中心的变化与我国气候的关系 [J]. 大气科学, 2007, **31**(3): 479-485)
- [43] LI Yong, WANG Shifeng, CHEN Tianlu, *et al.* Research status of solar ultraviolet radiation and its biological effects on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, **22**(4): 1321-1328 (李勇, 王世锋, 陈天禄, 等. 青藏高原太阳紫外线辐射及其生物学效应研究现状 [J]. 科学技术与工程, 2022, **22**(4): 1321-1328)
- [44] SU Yucheng, Guo Dong, Guo Shengli, *et al.* Ozone trends over the Tibetan Plateau in the next 100 years and their possible mechanism[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2016, **39**(3): 309-317 (苏昱丞, 郭栋, 郭胜利, 等. 未来百年夏季青藏高原臭氧变化趋势及可能机制 [J]. 大气科学学报, 2016, **39**(3): 309-317)

- [45] WANG Ke, LI Zhengqiang, LI Kaitao, *et al.* Accuracy verification of OMI global ozone products based on Pandora observations[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2022, **17**(6): 640-654 (汪可, 李正强, 李凯涛, 等. 基于 Pandora 观测的 OMI 全球臭氧产品精度验证 [J]. *大气与环境光学学报*, 2022, **17**(6): 640-654)
- [46] HU Yueming, YAN Huanhuan, ZHANG Xingying, *et al.* Comparing OMI-TOMS and OMI-DOAS total ozone column in China[J]. *Meteorological Monthly*, 2019, **45**(3): 362-370 (胡玥明, 闫欢欢, 张兴赢, 等. OMI-TOMS 与 OMI-DOAS 臭氧柱总量产品在中国地区的比较 [J]. *气象*, 2019, **45**(3): 362-370)
- [47] VEEFKIND J P, DE HAAN J F, BRINKSMA E J, *et al.* Total ozone from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) using the DOAS technique[J]. *IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44**(5): 1239-1244
- [48] GUO Dong, XU Jianjun, SU Yucheng, *et al.* Comparison of vertical structure and formation mechanism of summer ozone valley over the Tibetan Plateau and North America[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2017, **40**(3): 412-417 (郭栋, 徐建军, 苏昱丞, 等. 青藏高原和北美夏季臭氧谷垂直结构和形成机制的比较 [J]. *大气科学学报*, 2017, **40**(3): 412-417)
- [49] LIVESEY N J, FILIPIAK M J, FROIDEVAUX L, *et al.* Validation of Aura Microwave Limb Sounder O₃ and CO observations in the upper troposphere and lower stratosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113**(D15): D15S02
- [50] TANG Zhou. The Impact of the Chlorine Element on the Ozone Valley in the Upper Stratosphere Over the Tibetan Plateau[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2019 (唐舟. 氯元素对青藏高原上平流层臭氧谷的作用 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019)
- [51] WATERS J W, FROIDEVAUX L, HARWOOD R S, *et al.* The Earth Observing System Microwave Limb Sounder (EOSMLS) on the aura Satellite[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44**(5): 1075-1092
- [52] ZHANG Chenxin. Validation of Ozone, Temperature and Water Vapor Between Balloon Sounding and Satellite Observation for the Center of the South Asian High[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2019 (张晨昕. 南亚高压核心区臭氧、温度、水汽的气球探空与卫星观测的比较验证 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019)
- [53] YAN Xiaolu, ZHENG Xiangdong, ZHOU Xiuji, *et al.* Validation of Aura Microwave Limb Sounder water vapor and ozone profiles over the Tibetan Plateau and its adjacent region during boreal summer[J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, **58**(4): 589-603 (颜晓露, 郑向东, 周秀骥, 等. 夏季青藏高原及其周边地区卫星 MLS 水汽、臭氧产品的探空检验分析 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2015, **45**(3): 335-350)
- [54] CAO Xiaoyun, QI Donglin, XIAO Jianshe, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of tropospheric ozone in Qinghai Plateau based on satellite observations[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(5): 1640-1648 (曹晓云, 祁栋林, 肖建设, 等. 基于卫星观测的青海高原对流层臭氧时空分布特征研究 [J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(5): 1640-1648)
- [55] WANG Guiqin, XIAO Wenjun. Research on the relations between changes of total amount of atmospheric ozone and general circulation[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1987, **11**(3): 337-340 (王贵勤, 肖文俊. 大气臭氧总量变化与大气环流关系的研究 [J]. *大气科学*, 1987, **11**(3): 337-340)
- [56] MA J Z, ZHOU X J, Xu X D, *et al.* Chapter 15 - Ozone and Aerosols Over the Tibetan Plateau[M]//Singh R P. *Asian Atmospheric Pollution*. Amsterdam Elsevier, 2022: 287-302
- [57] ZHU L G N, WU Z W. To what extent can the ozone valley over the Tibetan Plateau influence the East Asian summer precipitation?[J]. *Climate and Atmospheric Science*, 2023, **6**(1): 177
- [58] LI Y J, CHIPPERFIELD M P, FENG W H, *et al.* Analysis and attribution of total column ozone changes over the Tibetan Plateau during 1979-2017[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(14): 8627-8639
- [59] YIN X F, RUPAKHETI D, ZHANG G S, *et al.* Surface ozone over the Tibetan Plateau controlled by stratospheric intrusion[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2023, **23**(17): 10137-10143
- [60] ZHANG J Q, LI D, BIAN J C, *et al.* Deep stratospheric intrusion and Russian wildfire induce enhanced tropospheric ozone pollution over the northern Tibetan Plateau[J]. *Atmospheric Research*, 2021, **259**: 105662
- [61] LIANG T, LUO J L, ZHANG C Y, *et al.* The impact of tropopause fold event on surface ozone concentration over Tibetan Plateau in July[J]. *Atmospheric Research*, 2024, **298**: 107156
- [62] ZHAO Shaohua, YANG Xiaoyu, LI Zhengqiang, *et al.* Advances of ozone satellite remote sensing in 60 years[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, **26**(5): 817-833 (赵少华, 杨晓钰, 李正强, 等. 臭氧卫星遥感六十年进展 [J]. *遥感学报*, 2022, **26**(5): 817-833)
- [63] YIN X F, KANG S C, DE FOY B, *et al.* Surface ozone at Nam Co in the inland Tibetan Plateau: variation, synthesis comparison and regional representativeness[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(18): 11293-11311
- [64] ZHENG Xiangdong, TANG Jie, LI Weiliang, *et al.* Observational study on total ozone amount and its vertical profile over Lhasa in the summer of 1998[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2000, **11**(2): 173-179 (郑向东, 汤洁, 李维亮, 等. 拉萨地区 1998 年夏季臭氧总量及垂直廓线的观测研究 [J]. *应用气象学报*, 2000, **11**(2): 173-179)
- [65] SUN Yuting, ZHENG Xiangdong, BIAN Jianchun, *et al.* Vertical distribution of summer tropospheric ozone over the northern Tibetan Plateau[J]. *Acta Meteorologica Si-*

- nica*, 2022, **80**(5): 806-818 (孙宇婷, 郑向东, 卞建春, 等. 夏季青藏高原北部对流层臭氧垂直分布的观测研究 [J]. *气象学报*, 2022, **80**(5): 806-818)
- [66] GUO D, SU Y C, SHI C H, *et al*. Double core of ozone valley over the Tibetan Plateau and its possible mechanisms[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2015, **130/131**: 127-131
- [67] JIAO Boyang, SU Yucheng, GUO Shengli, *et al*. Distribution of ozone valley and its relationship with solar radiation over the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2017, **36**(5): 1201-1208 (焦铂洋, 苏昱丞, 郭胜利, 等. 青藏高原臭氧谷的分布及其与太阳辐射的关系 [J]. *高原气象*, 2017, **36**(5): 1201-1208)
- [68] ZOU H, GAO Y Q. Vertical ozone profile over Tibet using sage I and II data[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1997, **14**(4): 505-512
- [69] LIN Weili, YAO Bo. Analysis on the vertical ozone profiles over Tibetan Plateau using SAGE II data[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, **18**(4): 102-105,128 (林伟立, 姚波. 利用 SAGE II 卫星资料分析青藏高原上空臭氧垂直廓线 [J]. *环境科学研究*, 2005, **18**(4): 102-105,128)
- [70] CHEN Quanliang, GAO Guolu, LI Yang. Advances in studies of deep convection over the Tibetan Plateau and its effect on stratospheric—tropospheric material transport[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2022, **46**(5): 1198-1208 (陈权亮, 高国路, 李扬. 青藏高原深对流及其在对

流层—平流层物质输送中作用的研究进展 [J]. *大气科学*, 2022, **46**(5): 1198-1208)

- [71] BIAN Jianchun, YAN Renchang, CHEN Hongbin. Tropospheric pollutant transport to the stratosphere by Asian summer monsoon[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2011, **35**(5): 897-902 (卞建春, 严仁嫦, 陈洪滨. 亚洲夏季风是低层污染物进入平流层的重要途径 [J]. *大气科学*, 2011, **35**(5): 897-902)

作者简介



马湘君 女, 2001 年 4 月出生于山东省烟台市, 现为中国科学院国家空间科学中心硕士研究生, 主要从事基于卫星遥感的地球多圈层耦合机制研究.

E-mail: maxiangjun23@mailsucas.ac.cn



许健 (通信作者) 男, 1982 年 1 月出生于江苏省无锡市, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为地球与行星大气遥感.

E-mail: xujian@nssc.ac.cn