

基于多源数据的大理市臭氧污染特征与来源解析研究

董 雯

南开大学环境科学与工程学院, 天津

收稿日期: 2026年9月2日; 录用日期: 2026年10月9日; 发布日期: 2026年10月26日

摘 要

为明确大理市臭氧(O_3)污染特征与主要来源, 基于2018~2022年环境空气质量监测数据, 结合挥发性有机物(VOCs)和氮氧化物(NO_x)排放清单及WRF-CAMx-PSAT数值模拟系统, 对大理市 O_3 污染的时空分布、气象成因、前体物排放及来源贡献进行了研究。结果表明: 大理市 O_3 污染呈“春高秋低、昼高夜低”特征, 3~5月为污染高发期, 高值区集中于城区及东部、东南部。VOCs和 NO_x 排放呈现市中心区域民用排放较为集中空间的分布特征, 且VOCs排放的高值区与 O_3 污染高值区在空间上具有较好的对应关系。数值模拟表明: 春季 O_3 污染分布为, 天然源占52.9%、交通源占20.0%和工业源占19.9%为主导; 区域传输以本地累积和边界条件为主。建议重点加强大理市主城区、西部工业聚集区及主要交通干道; 春季提前启动预警防控, 加强移动源、工业源和天然源管控。

关键词

臭氧污染, 来源解析, WRF-CAMx, OSAT, VOCs

Study on Ozone Pollution Characteristics and Source Apportionment in Dali City Based on Multi-Source Data

Wen Dong

College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin

Received: September 2, 2026; accepted: October 9, 2026; published: October 26, 2026

Abstract

To clarify the characteristics and major sources of ozone (O_3) pollution in Dali City, this study

investigated the spatiotemporal distribution, meteorological drivers, precursor emissions, and source contributions of O₃ pollution based on ambient air quality monitoring data from 2018 to 2022, combined with volatile organic compounds (VOCs) and nitrogen oxides (NO_x) emission inventories and the WRF-CAMx-PSAT numerical modeling system. The results showed that O₃ pollution in Dali exhibited a “high in spring and low in autumn, high in daytime and low at nighttime” pattern, with pollution episodes concentrated in March–May, and high-value areas concentrated in the urban center and the eastern and southeastern regions. VOCs and NO_x emissions showed spatial distribution characteristics with relatively concentrated civil emissions in the central urban area, and high-value zones of VOCs emissions corresponded well spatially with O₃ pollution hotspots. Numerical simulations indicated that natural sources (52.9%), mobile sources (20.0%), and industrial sources (19.9%) were the dominant contributors to spring O₃ pollution, while regional transport was primarily driven by local accumulation and boundary conditions. It is recommended to strengthen control measures in the main urban area, western industrial clusters, and major traffic arteries of Dali City; to initiate early warning and prevention in spring; and to enhance the regulation of mobile sources, industrial sources, and natural sources.

Keywords

Ozone Pollution, Source Apportionment, WRF-CAMx, OSAT, VOCs

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

臭氧(O₃)作为对流层大气中的重要二次污染物,其浓度升高不仅损害人体健康,还会对生态系统产生负面影响[1]。近年来,随着我国细颗粒物(PM_{2.5})污染得到有效控制, O₃ 污染问题日益凸显,成为制约城市空气质量持续改善的关键因子[2][3]。国务院《打赢蓝天保卫战三年行动计划》明确提出,需加强区域性 O₃ 形成机理与控制路径研究,深化挥发性有机物(VOCs)全过程控制[4]。

排放清单是识别 O₃ 前体物排放特征和制定控制策略的基础工具[5][6]。WRF-CAMx 空气质量模型结合 OSAT 源解析技术,已广泛应用于我国京津冀、长三角、珠三角等区域的 O₃ 来源解析研究[7]-[9],为区域 O₃ 污染联防联控提供了重要的科学支撑。然而,现有研究多集中于东部经济发达地区,对西南高原城市的 O₃ 污染特征及来源解析研究相对薄弱。

大理市位于云南省西部,地处滇中高原与横断山脉过渡地带,属低纬高原季风气候。作为滇西中心城市和知名旅游目的地,大理市环境空气质量总体优良,但春季颗粒物与 O₃ 复合污染时有发生,对空气质量优良天数比率构成威胁[10]。然而,受限于科技支撑能力不足,大理市针对 O₃ 污染的系统性研究较为匮乏,污染源与生成机制尚不清晰,制约了精准防控措施的制定。

鉴于此,本研究基于 2018~2022 年环境空气质量监测数据,结合 VOCs 和 NO_x 排放清单及 WRF-CAMx-PSAT 数值模拟系统,从污染特征、气象成因、前体物排放及来源贡献等多维度开展研究,旨在明确大理市 O₃ 污染的主要源类和管控方向,为滇西高原城市 O₃ 污染的科学防控提供理论依据和技术支撑。

2. 材料与方法

2.1. 研究区域

大理市(99°58′~100°27′E, 25°25′~25°58′N)为大理白族自治州首府,总面积 1815 km²,其中山地占 70.5%,

洱海盆地坝区占 15.8%，洱海水域占 13.7%。市区东有玉案山，南有哀牢山，西有点苍山(海拔 3500~4122 m)，北接洱源、鹤庆，形成“三山夹一湖”的典型高原盆地地貌。2019 年全市常住人口约 64.5 万，GDP 达 467.9 亿元，第三产业占比 61.8% [11]。

2.2. 数据来源

监测数据：采用大理市环境监测站和大理古城两个国控站点 2018 年 1 月 1 日至 2022 年 12 月 31 日的常规六参数(SO₂、NO₂、CO、O₃、PM₁₀、PM_{2.5})小时浓度数据。O₃ 以日最大 8 小时滑动平均(MDA8)作为评价指标，依据《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)一级标准(100 μg/m³)识别污染日。

气象数据：采用 NCEP 再分析资料驱动 WRF 模式，结合站点观测的风速、风向、温度、相对湿度、太阳辐射、边界层高度等气象要素，分析 O₃ 污染的气象驱动机制。

2.3. 排放清单编制

以 2019 年为基准年，基于第二次全国污染源普查数据，采用排放因子法建立人为源排放清单[5] [6]。VOCs 排放源涵盖移动源(道路及非道路)、溶剂使用源(工业涂装、建筑涂料、印刷印染、干洗等)、农牧源、储存运输源、餐饮源及废弃物处理源等；NO_x 排放源包括电力企业、工业锅炉/窑炉、移动源等。天然源 VOCs 排放采用 MEGAN 模型估算[12]，植被类型数据结合二类调查资料与遥感影像解译获取。

各排放源大气污染物排放清单的估算采用排放因子法，计算公式为： $E_{i,j} = \sum_k A_{j,k} \cdot EF_{i,j,k} \cdot (1 - \eta_{i,j})$ ，

其中 A 为污染源活动水平数据， EF 为排放因子， η 为末端治理设施的综合去除效率[13]。

2.4. WRF-CAMx 数值模拟

采用 WRF-CAMx-PSAT 复合模拟系统开展 O₃ 来源解析[8] [9]。WRF 模式采用 ARW 核心，配置 Goddard 短波辐射、RRTM 长波辐射、YSU 边界层及 Grell 3D 积云参数化方案[14]；CAMx 模式采用 CB05 气相化学机理和 RADM-AQ 液相化学机理[15]。模拟域采用两层 Lambert 投影嵌套，外层分辨率 36 km(覆盖中国大部)，内层分辨率 12 km(覆盖云南省及周边)，垂直方向 39 层。

利用 CAMx 内嵌的 O₃ 来源追踪技术(OSAT)，将排放源划分为天然源、农业源、民用源、交通源、工业源及电厂源等类别，追踪各类源对受体点 O₃ 浓度的贡献[7]。OSAT 技术优势在于其采用了不同的计算源分配方法，有效避免了非线性化学的影响，能较好地追踪污染物来源。同时采用综合过程速率分析(IPR)方法，解析平流、扩散、沉降、排放及化学反应等物理化学过程对 O₃ 浓度变化的相对贡献[15]。模拟选取 2019 年 3 月 31 日~4 月 10 日(春季)一个典型污染过程进行重点分析。

3. 结果与讨论

3.1. 臭氧污染时空特征

3.1.1. 时间变化特征

2018~2022 年，大理市 O₃ 年均浓度呈波动下降趋势，环境监测站点位由 2018 年的 70.4 μg/m³ 降至 2022 年的 63.5 μg/m³，表明近年来 O₃ 污染防治取得一定成效。但值得注意的是，春季 O₃ 污染程度呈逐年加重趋势，需引起关注。

从月际变化看，O₃ 浓度呈现显著的季节性差异，峰值集中于 3~5 月，其中 3 月浓度最高，6 月后迅速下降，7~10 月维持较低水平，11 月后再次缓慢回升。这一特征与大理市春季干旱少雨、太阳辐射强、边界层高度较高的气象条件密切相关。日变化呈典型单峰型(图 1)，谷值出现在 08:00~09:00(约 50 μg/m³)，随后随太阳辐射增强而快速上升，15:00~16:00 达到峰值(约 80~85 μg/m³)，夜间在 NO 滴定作用下逐渐降低。

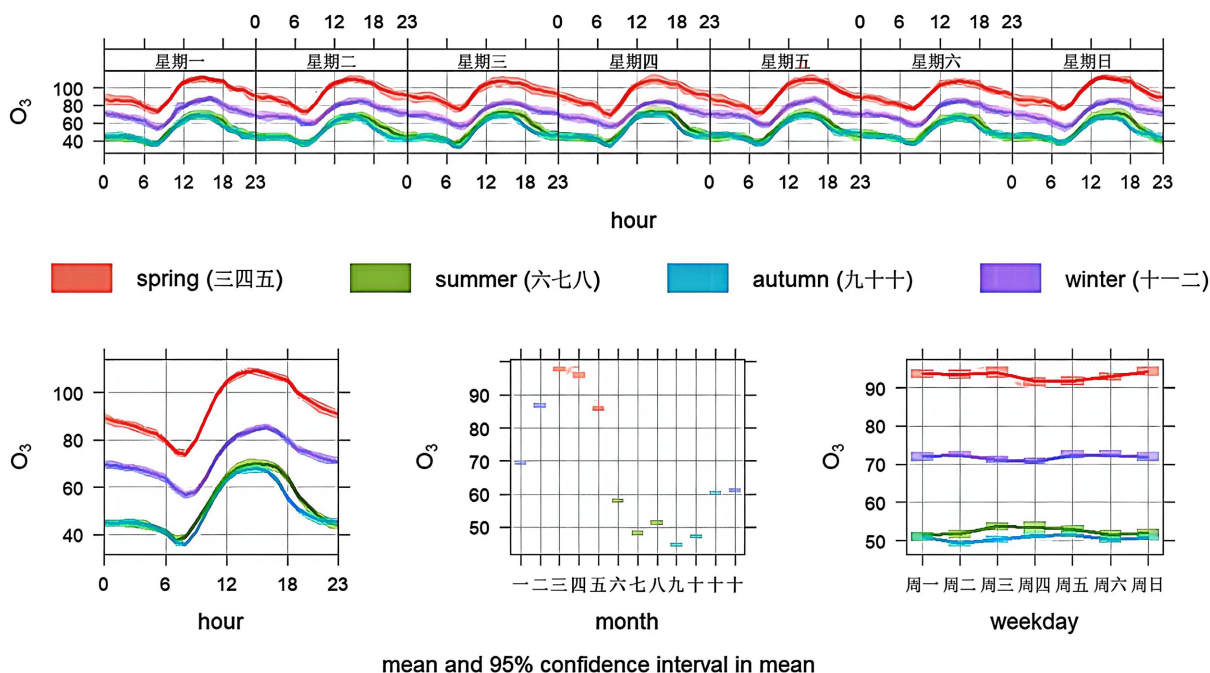


Figure 1. Typical diurnal variation characteristics of O_3 concentration in Dali City

图 1. 大理市 O_3 浓度典型日变化特征

3.1.2. 空间分布特征

基于 MDA8 O_3 第 90 百分位数的时空分布显示, 大理州 O_3 高值区由东部向东南部和南部延伸, 区域中心大理市污染特征最为明显。2019 年高值区范围最大, 此后整体呈下降趋势, 但东部和中心区域仍为污染热点。这主要与市区交通干道和工业区的 NO_x 、VOCs 排放, 以及相对较高的城市人口密度和能源消费强度有关。

3.2. 气象因素影响

O_3 生成与气象要素密切相关[16][17]。相关性分析表明: O_3 与温度呈非线性正相关, 当温度低于 20°C 时变化迟缓, 超过 20°C 后随温度升高显著增长; 与相对湿度呈非线性负相关, 高湿条件促进 O_3 消耗并削弱光化学反应; 与风速呈正相关, 低风速时 O_3 随风速升高而增加, 风速 $> 4 \text{ m/s}$ 时趋于稳定; 与气压呈负相关, 低压条件不利于 O_3 扩散。

条件概率函数(CPF)分析显示, 高浓度 O_3 与较高风速的西南风和西风伴随出现, 表明西部和西南部输送对 O_3 污染有显著影响。潜在源贡献函数(WPSCF)和浓度权重轨迹(WCWT)分析进一步证实, 大理市 O_3 潜在源区主要位于西部和西北方向, 存在一条明显的西南 - 东向污染输送带, 春季的远距离跨界传输特征尤为突出。

3.3. 前体物排放特征

3.3.1. 污染物来源贡献

根据污染源调查核算, 大理市各类污染物的人为源排放构成如图 2 所示。对于臭氧关键前体物 VOCs, 工业源排放贡献最大(主要为工业涂装、建筑涂料、印刷印染等溶剂使用过程), 其次为移动源(汽油车蒸发及尾气排放)和民用源(建筑涂料、家用溶剂等); NO_x 的主要来源为移动源中的柴油车, 以及工业燃烧过程(水泥生产、钢铁、工业锅炉等)。从污染物整体排放结构看, SO_2 以电力和工业燃烧为主, CO 和移

动源、民用源关联密切, NH_3 则主要来源于农业活动(化肥施用和畜牧养殖)。

值得关注的是, VOCs 排放中工业工艺源占比高达 45%左右, 这与大理市及周边地区建材、涂装等产业发展密切相关。移动源对 NO_x 的贡献超过 30%, 反映出交通运输对大气氧化性污染的重要影响。民用源对 CO、BC、OC 等污染物的贡献显著, 表明生活面源排放在大理市大气复合污染中不可忽视。

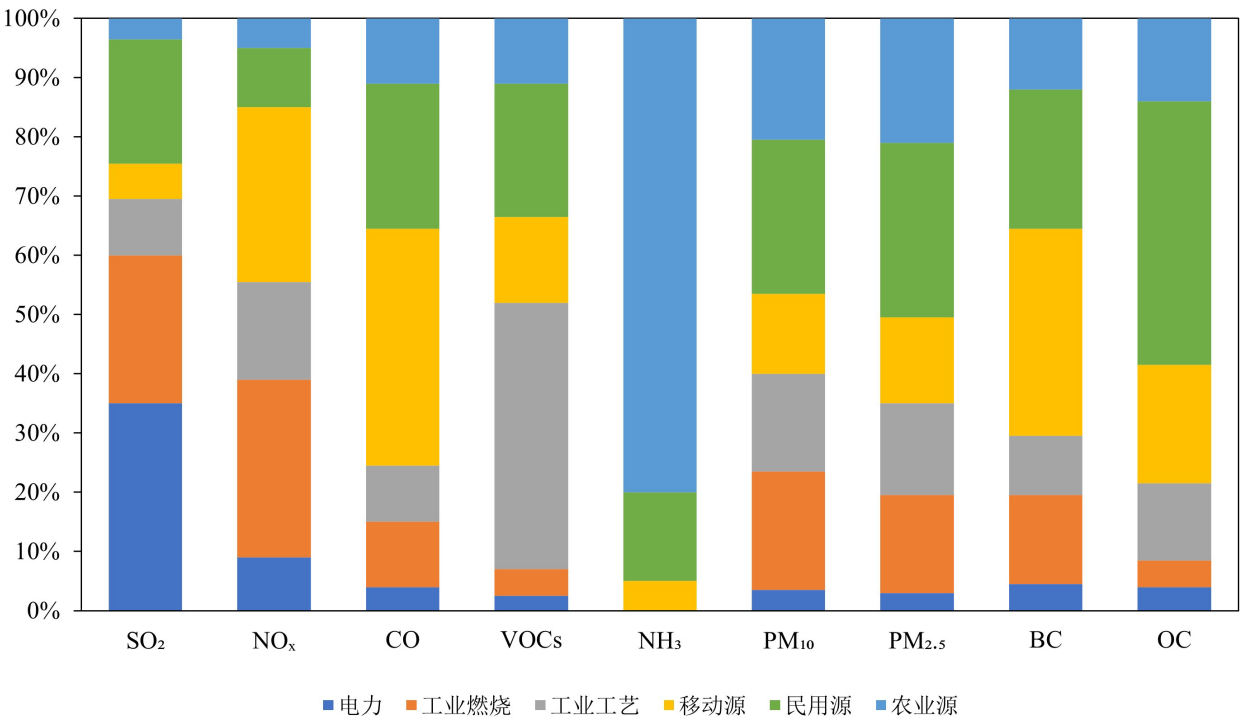


Figure 2. Composition of anthropogenic emission sources of pollutants in Dali City
图 2. 大理市污染物人为源排放构成

3.3.2. VOCs 排放空间分布

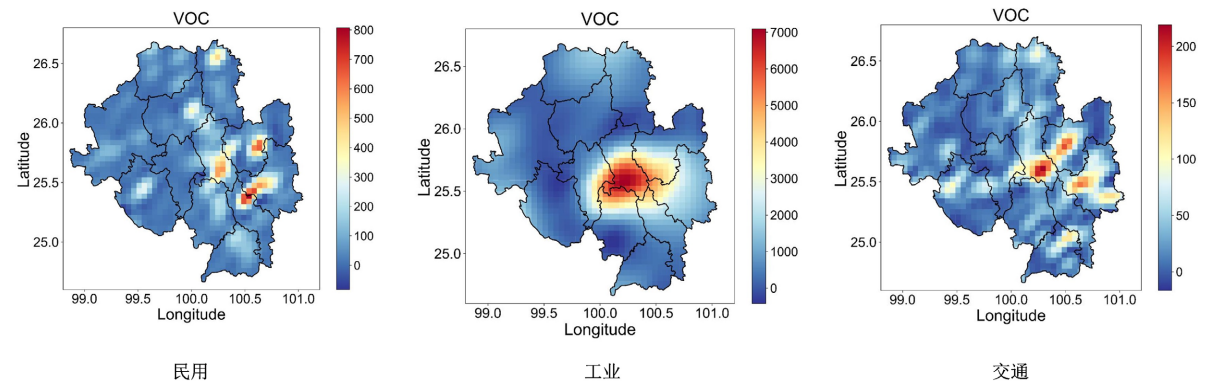


Figure 3. Spatial distribution of VOCs emissions in Dali Prefecture
图 3. 大理州 VOCs 排放空间分布

图 3 展示了大理州 VOCs 排放的空间分布特征。从民用源看, 高 VOCs 排放主要集中在弥渡县、祥云县、宾川县、大理市、洱源县和鹤庆县, 其中大理市市中心区域民用排放较为集中, 这与人口密度和

建筑活动强度密切相关。工业源的高 VOCs 排放区域以大理市为核心, 然后逐步向其周边的漾濞彝族自治县、宾川县、祥云县、弥渡县和巍山彝族回族自治县扩散, 形成以大理市为中心的放射状分布格局, 这与工业布局和城市发展规划高度一致。

在交通源 VOCs 排放方面, 大理市是最显著的高排放区域, 其后是宾川县、祥云县和南涧彝族自治县, 排放热点沿主要交通干线呈带状分布。这种分布特征与区域路网密度和车流量分布直接相关。综合来看, VOCs 排放的高值区与 O_3 污染高值区在空间上具有较好的对应关系, 说明前体物排放对 O_3 生成具有重要驱动作用。

3.3.3. NO_x 排放空间分布

图 4 展示了大理州 NO_x 排放的空间分布特征。与 VOCs 类似, NO_x 排放同样呈现以大理市为核心的空间集聚特征。民用源中, 高 NO_x 排放的区域主要位于弥渡县、祥云县、宾川县、大理市、洱源县和鹤庆县, 大理市市中心是 NO_x 民用排放的重要集聚区, 这与居民生活用能结构和采暖需求有关。从工业源角度看, 高 NO_x 排放首先在大理市明显, 之后向包括漾濞彝族自治县、宾川县、祥云县、弥渡县、巍山彝族回族自治县在内的周边地区蔓延, 工业燃烧和水泥生产是主要贡献源。

对于交通源, 大理市继续作为 NO_x 的主要排放热点, 其次是宾川县、祥云县和南涧彝族自治县。柴油货车和非道路移动机械是交通源 NO_x 排放的关键来源。综合来看, VOCs 和 NO_x 的空间分布在不同的排放源中都表现出了相似的特征, 高排放区高度重合, 这种空间一致性意味着协同控制两类前体物具有可行性和必要性。

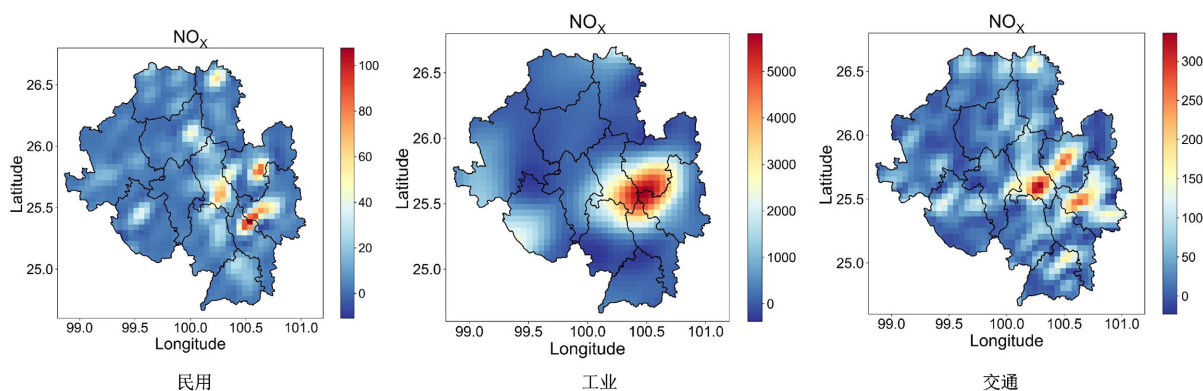


Figure 4. Spatial distribution of NO_x emissions in Dali Prefecture

图 4. 大理州 NO_x 排放空间分布

O_3 与 NO_2 的相关性分析显示, 二者在多数时段呈较强负相关, 且在低温高湿条件下相关性增强, 午后随光化学反应加剧而减弱。这一特征表明大理市 O_3 生成处于 VOCs 控制区, NO_x 滴定效应显著, 单纯削减 NO_x 可能导致 O_3 浓度反弹, 需协同控制 VOCs 与 NO_x 。

3.4. 数值模拟与来源解析

3.4.1. 模型验证

春季污染过程(2019.3.31~4.10)模拟结果显示, O_3 预测值与观测值时间序列变化趋势一致, 相关系数 $R^2 = 0.8714$, 归一化平均偏差 $NMB = 0.02$, 平均偏差 $MB = 1.83$, 均方根误差 $RMSE = 13.96$ 。表明模型对大理市 O_3 污染过程具有较好的再现能力。模型验证结果表明, WRF-CAMx 系统能够较好地模拟大理市 O_3 污染的日变化特征和污染过程演变, 为后续来源解析提供了可靠基础。

3.4.2. 源类贡献

OSAT 源解析结果表明，春季污染期间各源类对 O₃ 质量浓度的分担率为：天然源(52.9%) > 交通源(20.0%)> 工业源(19.9%)> 电厂源(3.8%)> 民用源(3.4%)> 农业源(0.0%)(图 5)。天然源贡献过半，与大理市及周边丰富的森林植被和春季植物排放活跃密切相关；交通源和工业源合计贡献近四成，是人为管控的重点。

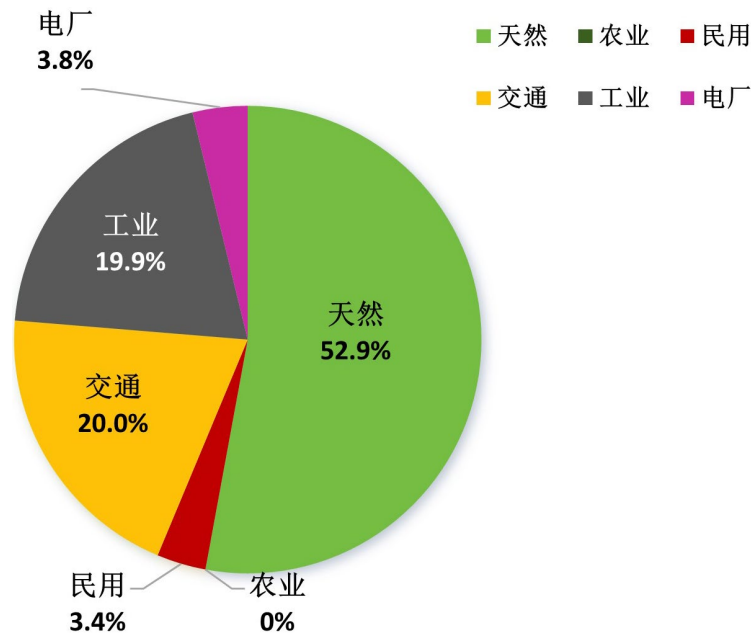


Figure 5. Average source apportionment results of O₃ during the ozone pollution episode in Dali City from March 31 to April 10, 2019

图 5. 大理市 2019 年 3 月 31 日至 4 月 10 日臭氧污染期间 O₃ 平均源解析结果

3.4.3. 区域传输贡献

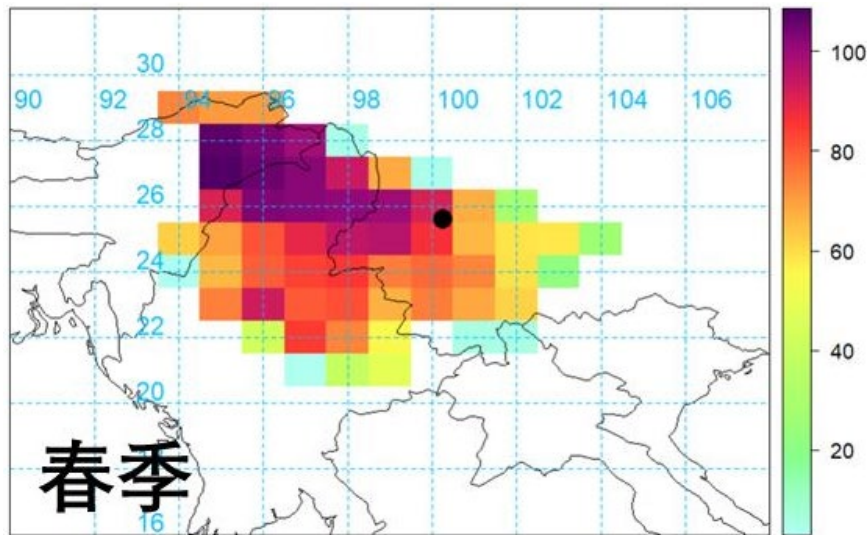


Figure 6. WCWT analysis results of O₃ in spring in Dali City from 2018 to 2022

图 6. 2018~2022 年大理市春季 O₃ WCWT 分析结果

本研究利用 HYSPLIT 模型对抵达大理市相应高度的气团在过去 48 h 经过的路径进行 39 模拟, 分析整个研究时段(2018~2022)以及春季大气污染物的输送规律及可能的的气团来源轨迹。研究表明: 春季的 WPSCF 高值区主要集中在西部和西北方向(图 6)。在大尺度环流上, 春季南支槽活跃, 干暖的西南气流沿横断山脉谷地输送, 配合下沉增温与少云强辐射条件, 为 O_3 光化学生成提供了持续的有利背景。这与 CPF 分析揭示的高浓度 O_3 伴随较高风速的西南风相互印证, 说明春季污染并非仅局地累积, 而是大尺度环流背景与局地排放共同作用的结果。

区域来源解析显示, 大理市 O_3 污染以本地累积和省内传输为主(图 7): 边界条件贡献 37.7%, 大理本地贡献 19.2%, 云南省内其他城市贡献 16.6%, 国外贡献 21.9%, 国内其他省级行政区贡献 3.6%, 初始条件贡献 0.9%。本地及边界层条件合计贡献超过 50%, 表明污染过程受局地生成与区域输送共同驱动。云南省内其他城市对大理市 O_3 污染的贡献达 16.6%, 说明省内区域传输不可忽视, 需加强滇西城市群的联防联控。

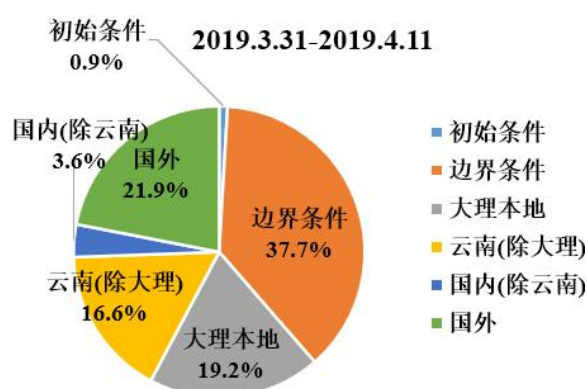


Figure 7. Percentage contributions of regional sources to O_3 concentration during the ozone pollution episode in Dali City
图 7. 大理市臭氧污染期间 O_3 浓度区域来源百分比贡献

3.4.4. 物理化学过程分析

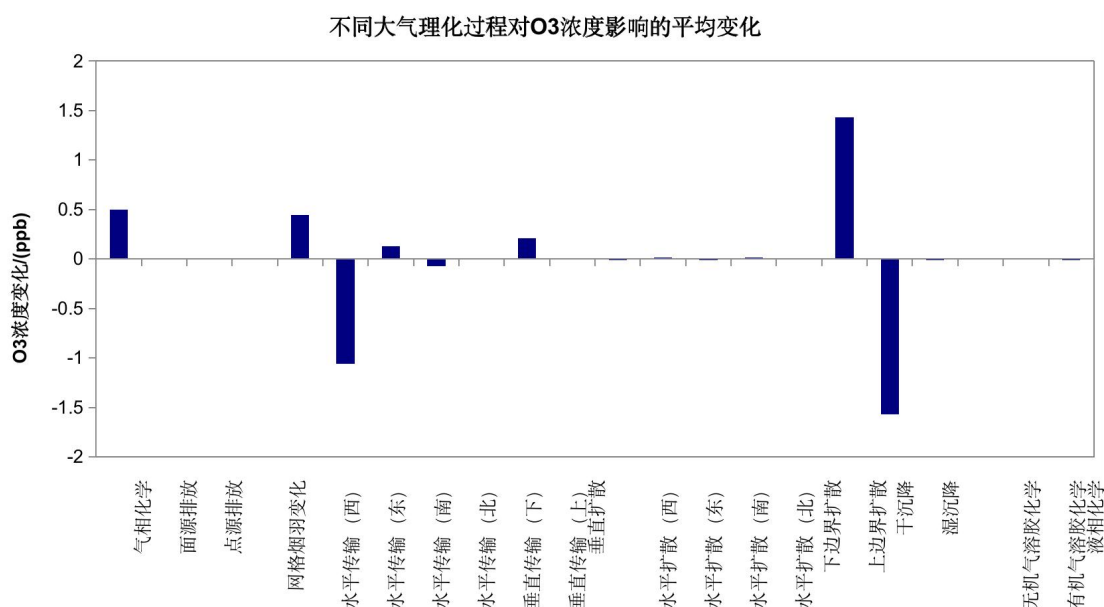


Figure 8. Average contributions of different atmospheric physical and chemical processes to spring O_3 pollution
图 8. 不同大气理化过程对春季 O_3 污染的平均贡献

IPR 过程分析揭示(图 8): 春季白天 O₃ 污染主要受垂直输送、气相光化学反应及西部水平输送驱动, 夜间沉降及东边界传输导致浓度降低, 春季垂直向上传输对 O₃ 浓度的正贡献显著, 表明边界层内 O₃ 的垂直混合和向下输送对近地面污染具有重要影响。

4. 结论与建议

4.1. 主要结论

(1) 大理市 O₃ 污染呈“春高秋低、昼高夜低”特征, 3~5 月为污染高发期, 15:00~16:00 为浓度峰值时段; 空间上高值区集中于城区及东部、东南部。

(2) 气象条件对 O₃ 生成具有显著调控作用, 温度 > 20℃、低湿、西南风及较高风速是 O₃ 污染形成的有利条件, 西部和西南部存在明显的污染输送通道。潜在源区分析表明, 远距离跨界传输和区域周边近距离传输共同促进大理市 O₃ 浓度升高。

(3) VOCs 和 NO_x 排放空间分布相似, 高值区位于大理市及周边工业和交通密集区, 呈现由大理市核心向周边县域扩散的格局。工业源是 VOCs 首要排放源, 移动源是 NO_x 主导排放源。O₃ 生成处于 VOCs 控制区, 需重点管控 VOCs 排放, 协同控制 NO_x。

(4) 数值模拟表明, 春季 O₃ 污染以天然源(52.9%)、交通源(20.0%)和工业源(19.9%)为主导; 区域传输以本地累积(19.2%)和边界条件(37.7%)为主, 云南省内其他城市贡献 16.6%。物理化学过程分析揭示, 春季白天 O₃ 污染受垂直输送、光化学及西部输送共同驱动。

(5) 本研究虽通过统计验证表明 WRF-CAMx-PSAT 系统对大理市臭氧污染过程具备较好的再现能力, 但仍存在不可忽视的不确定性: 一是模拟仅选取 2019 年春季 11 天的典型污染过程, 难以覆盖气象年际波动及夏、秋、冬三季的差异, 结果外推至常年或其他季节存在局限; 二是排放清单方面[18], 人为源缺乏本地化排放因子, 小微餐饮、民宿等面源活动水平统计存在偏差, 治理效率取值偏理想化, 综合不确定性约 $\pm 20\%$, 天然源采用通用 MEGAN 参数估算, 高原特有植被排放特征未充分校准, 误差可达 $\pm 15\%$ ~ 20% , 且 VOCs 物种分组与化学机理匹配存在简化; 三是模型层面, 12 km 分辨率难以精准刻画“三山夹一湖”复杂地形下的局地环流, CB05 机理对部分 VOCs 氧化路径的简化、OSAT 线性分配假设对非线性化学的忽略, 均会带来模拟偏差。综合来看, 本研究得出的源贡献排序具备较高稳健性, 但各类源的具体贡献数值存在约 $\pm 25\%$ 的综合不确定性, 结论应用需考虑上述局限, 后续可通过本地化观测与更高分辨率模拟进一步降低误差。

4.2. 管控建议

在高天然源背景下, 其不可控部分决定了大理市 O₃ 浓度的基线水平。交通源与工业源合计约 40% 的人为贡献中, 即使削减一半, 总 O₃ 浓度的理论降幅约为 20%。因此, 人为源管控的目标应定位于压缩天然源基线之上的增量部分, 管控力度应与空气质量改善目标、旅游经济发展相协调, 避免过度加码。

面向旅游城市特征的特色行业管控:

(1) 分时段、分区域交通管制。将 12:00~14:00 设为货运车辆禁行窗口, 柴油货车、渣土车绕行外环路; 大理古城片区旅游旺季实施机动车限行与电动摆渡车接驳; 古城 - 下关 - 洱海东岸旅游线路推动旅游大巴“油改电”, 并利用大理丰富的太阳能资源在景区停车场配套光伏充电设施。

(2) 餐饮住宿业 VOCs 控制。大理特色餐饮(野生菌火锅、烧烤等)油烟 VOCs 排放不可忽视, 建议古城核心区餐饮企业全面安装高效油烟净化设施(去除效率 $\geq 90\%$)并纳入在线监控; 结合洱海保护客栈整治, 对民宿客栈密集区开展建筑涂料与洗涤溶剂源头管控, 推广水性涂料, 限制高 VOCs 溶剂型产品使用。

(3) 旅游活动与污染过程联动调控。在 O₃ 预警启动期间, 同步采取货运限行、涉 VOCs 企业错峰生产、调整景区户外大型活动安排等措施, 实现空气质量保障与旅游体验的平衡。

参考文献

- [1] Seinfeld, J.H. and Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. 3rd Edition, Wiley.
- [2] Li, K., Jacob, D.J., Liao, H., Zhu, J., Shah, V., Shen, L., *et al.* (2019) A Two-Pollutant Strategy for Improving Ozone and Particulate Air Quality in China. *Nature Geoscience*, **12**, 906-910. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0464-x>
- [3] 王韵杰, 张少君, 郝吉明. 中国大气污染治理: 进展·挑战·路径[J]. 环境科学研究, 2019, 32(10): 1755-1762.
- [4] 国务院关于印发打赢蓝天保卫战三年行动计划的通知[EB/OL]. 2018-06-27. https://www.gov.cn/zhengce/content/2018-07/03/content_5303158.htm, 2026-10-16.
- [5] 邵敏, 郑君瑜, 张远航, 等. 大气挥发性有机物排放清单编制技术手册[M]. 北京: 中国环境出版社, 2015.
- [6] 郑君瑜, 王书肖, 张远航, 等. 区域高分辨率大气污染物源排放清单编制方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [7] 王杨君, 李莉, 冯加良, 等. 基于 OSAT 方法对上海 2010 年夏季臭氧源解析的数值模拟研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(3): 567-573.
- [8] 沈劲, 黄晓波, 汪宇, 等. 广东省臭氧污染特征及其来源解析研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(12): 4449-4457.
- [9] 陈婉莹, 陈懿昂, 褚旸晰, 等. 珠三角地区臭氧来源特征的数值模拟研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(3): 293-308.
- [10] 云南省人民政府关于印发云南省打赢蓝天保卫战三年行动实施方案的通知[EB/OL]. 2018-09-11. <https://www.waizi.org.cn/policy/80467.html>, 2026-10-16.
- [11] 大理州统计局. 大理白族自治州统计年鉴 2020 [M]. 大理: 大理州统计局, 2020.
- [12] Guenther, A.B., Jiang, X., Heald, C.L., Sakulyanontvittaya, T., Duhl, T., Emmons, L.K., *et al.* (2012) The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature Version 2.1 (MEGAN2.1): An Extended and Updated Framework for Modeling Biogenic Emissions. *Geoscientific Model Development*, **5**, 1471-1492. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1471-2012>
- [13] 大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南(试行) [S]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
- [14] Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., *et al.* (2019) A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. NCAR Technical Note NCAR/TN-556+STR. https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/technote/v4_technote.pdf
- [15] Environment International Corporation (2020) User's Guide: Comprehensive Air Quality Model with Extensions (CAMx), Version 7.20. ENVIRON.
- [16] 王占山, 李云婷, 安欣欣, 等. 2006-2015 年北京市不同地区臭氧浓度变化[J]. 环境科学, 2018, 39(1): 1-8.
- [17] 周学思, 廖志恒, 王萌, 等. 2013-2016 年珠海地区臭氧浓度特征及其与气象因素的关系[J]. 环境科学学报, 2019, 39(1): 143-153.
- [18] 于凯阳, 黄志炯, 史博文, 等. 珠三角空气质量模拟关键不确定性来源识别[J]. 环境科学学报, 2020, 40(8): 2952-2961.