

2015—2022 年昆明市臭氧污染特征分析

陈克伟¹ 何沁璇² 包银丽^{3*}

1 昆明市规划设计研究院有限公司

2 昆明市水务集团有限责任公司

3 昆明市测绘管理中心

DOI:10.32629/eep.v9i5.3224

[摘要] 为掌握昆明市臭氧污染时序演变规律,支撑区域臭氧精细化防控,本文基于2015—2022年8年国控站点逐时监测数据,结合小时、周、月、季节多时间尺度,分析昆明近地面臭氧污染时空变化特征。结果表明:昆明臭氧日内呈典型单峰变化,8时浓度最低,15时达到峰值,午后为污染高发时段;周尺度浓度波动极小,工作日与周末无明显差异,未出现周末效应;臭氧季节特征显著,整体表现为春季>夏、冬季>秋季,3—5月为全年污染高发期。年际变化上,春季臭氧峰值持续攀升,秋冬季浓度逐年升高,污染逐步向秋冬季节蔓延。研究显示,光照、气温等气象条件是影响昆明臭氧时间分布的主导因素,人为排放短期波动影响较弱。据此提出分时段、分季节差异化管控及全域常态化减排等对策,可为当地臭氧与细颗粒物协同治理提供科学参考。

[关键词] 臭氧; 污染特征; 时间变化; 防控对策

中图分类号: Q958.116 文献标识码: A

Analysis of ozone pollution characteristics in Kunming from 2015 to 2022

Kewei Chen¹ Qinxuan He² Yinli Bao³

1 Kunming Planning and Design Institute CO.,Ltd.

2 Kunming Water Group CO.,Ltd.

3 Kunming Surveying and Mapping Management Center

[Abstract] To grasp the temporal evolution of ozone pollution in Kunming and support refined regional ozone prevention and control, this paper analyzes the spatiotemporal variation characteristics of near-surface ozone pollution in Kunming based on hourly monitoring data from national control stations spanning eight years from 2015 to 2022, combining multiple time scales including hourly, weekly, monthly, and seasonal. The results indicate that ozone in Kunming exhibits a typical single-peak variation within a day, with the lowest concentration at 8 a.m. and reaching a peak at 3 p.m., with the afternoon being a high-pollution period. Concentration fluctuations on a weekly scale are minimal, with no significant difference between weekdays and weekends, indicating no weekend effect. Ozone exhibits significant seasonal characteristics, generally showing that spring > summer and winter > autumn, with March to May being the high-pollution period throughout the year. In terms of interannual variation, ozone peaks continue to rise in spring, and concentrations increase year by year in autumn and winter, with pollution gradually spreading to these seasons. The study shows that meteorological conditions such as light and temperature are the dominant factors affecting the temporal distribution of ozone in Kunming, while short-term fluctuations in anthropogenic emissions have a weaker impact. Based on this, countermeasures such as differentiated control by time period and season, as well as normalized emission reduction across the entire region, are proposed, providing a scientific reference for the coordinated management of local ozone and fine particulate matter.

[Key words] ozone; pollution characteristics; temporal variation; prevention and control measures

近地面对流层臭氧由氮氧化物(NO_x)、挥发性有机物(VOCs)等前体物经太阳辐射光化学反应生成,是我国城市大气突出污

染物之一,过量臭氧不仅加剧温室效应,还会损伤呼吸系统、抑制农作物生长^[1-2]。《昆明市“十四五”生态环境保护规划》明

确要求统筹细颗粒物与臭氧协同治理,稳步实现六项大气污染物达标管控。昆明地处云贵高原,海拔偏高、光照充足,独特高原气候条件易促进臭氧光化生成。目前,昆明市 O_3 污染的相关研究主要集中在 O_3 浓度的时空分布特征、污染物与气象条件相关性研究,及单次污染过程分析等方面^[3-4],本文基于2015—2022年连续8年空气质量监测数据,解析多时间维度臭氧污染演变规律,助力昆明臭氧精细化污染防控。

1 数据与研究方法

1.1 研究区概况

昆明市为云南省省会、国家历史文化名城,行政区划包含7市辖区、6县、1代管县级市(安宁市),全域辖84个街道、42个建制镇、15个乡(含4个民族乡),托管玉溪市澄江市阳宗镇,合作管辖西双版纳州勐腊县磨憨镇。截至2024年末全市常住人口868.7万人,其中城镇常住人口725.7万人,城镇化率83.54%,城镇化水平较高,工业、交通、生活源污染物排放集中。区域属亚热带高原季风气候,全年日照充沛、紫外线强,光热条件利于臭氧生成。

1.2 数据来源与数据处理

研究数据取自2024年4月中国环境监测总站(CNEMC)公开数据集,以西山森林公园为区域清洁背景对照点位,选用呈贡新区、龙泉镇、金鼎山、碧鸡广场、东风东路等5个国控环境空气自动监测点位逐时臭氧(O_3)监测数据算术平均值作为昆明市臭氧代表浓度,监测点位如下图1所示,研究时段2015年1月—2022年12月。

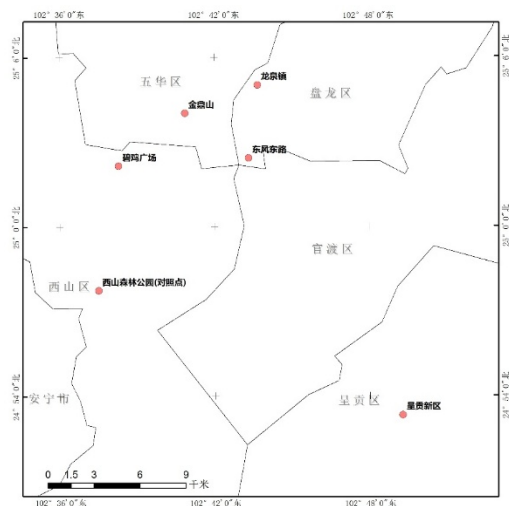


图1 监测点位分布图

按照气象季节划分标准:春季3—5月、夏季6—8月、秋季9—11月、冬季12月—次年2月^[5];分别统计小时、周日均、月均、季节平均臭氧质量浓度($\mu g/m^3$),开展多时序污染特征分析。

2 结果与分析

2.1 臭氧日内变化特征

2015—2022年平均臭氧小时浓度呈典型单峰型日变化,如图2所示,变化规律受太阳辐射驱动的光化学反应控制,全天浓度变化区间28.4~86.7 $\mu g/m^3$ 。

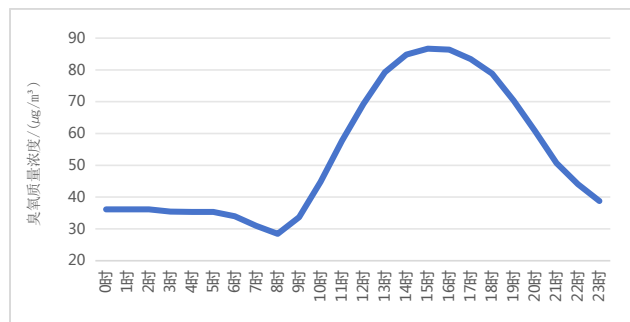


图2 臭氧日变化图

0:00—8:00时段大气光照弱,光化学反应基本停滞,臭氧生成速率低于沉降消耗速率,整体浓度低位运行;0:00—5:00浓度在35.3~36.2 $\mu g/m^3$ 小幅波动,8:00降至全日最低值28.4 $\mu g/m^3$ 。9:00起随日出后太阳辐射增强、气温上升,光化学反应速率快速提高,臭氧浓度持续快速上升,9:00—15:00为浓度快速攀升阶段,15:00达到日内峰值86.7 $\mu g/m^3$,15:00—16:00维持高浓度平台;16:00之后光照逐渐衰减,臭氧生成放缓、浓度持续下降,至23:00回落至38.8 $\mu g/m^3$,逐步趋近凌晨浓度水平。

2.2 臭氧周变化特征

一周7天臭氧日均浓度区间51.4~52.7 $\mu g/m^3$,周内浓度整体波动幅度极小,工作日(周一至周五)与周末(周六、周日)无显著浓度落差,不存在明显的“周末效应”,如图3所示。

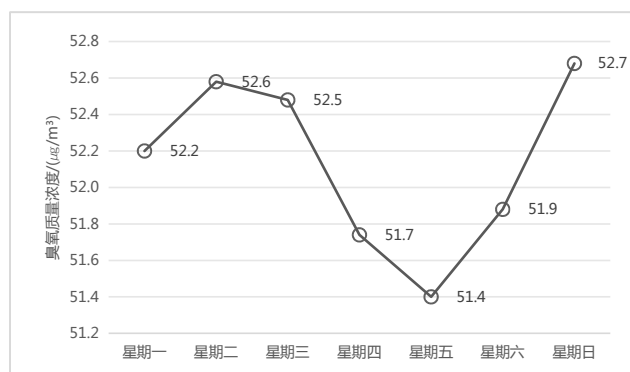


图3 臭氧周变化曲线图

周五全周浓度最低(51.4 $\mu g/m^3$),周四、周六小幅上升,依次为51.7 $\mu g/m^3$ 、51.9 $\mu g/m^3$;周一(52.2 $\mu g/m^3$)、周二(52.6 $\mu g/m^3$)、周三(52.5 $\mu g/m^3$)平稳抬升,周日达到周峰值52.7 $\mu g/m^3$ 。工作日整体平均浓度波动不足1.2 $\mu g/m^3$,周末浓度仅略高于周五。

2.3 月尺度变化

2015—2022年月均臭氧浓度区间28.4~96.7 $\mu g/m^3$,季节周期性突出,每年3—5月春季月份臭氧普遍处于全年高值区间,2019年5月出现全研究时段浓度峰值96.7 $\mu g/m^3$;12月—次年1月冬季月份浓度常年处于低值,2018年12月全时段最低28.4 $\mu g/m^3$ 。

年际演变:2015年全年臭氧月均值整体偏低;2016—2021年每年4—5月春季峰值逐年抬升,春季臭氧污染逐年加重;2022

年秋冬季(10—12月、1—2月)臭氧月浓度相较研究初期明显抬升,臭氧污染由传统春夏季逐步向秋冬季蔓延,如图4所示。

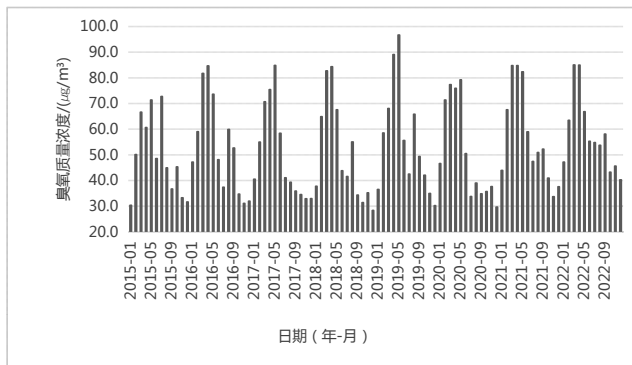


图4 臭氧月尺度变化图

2.4 季节尺度变化

四季臭氧浓度整体排序: 春季>夏季、冬季>秋季, 季节性分异规律稳定, 如图5所示季节尺度变化曲线图。

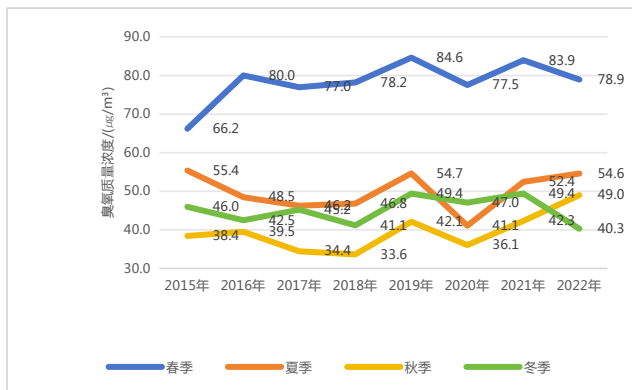


图5 臭氧季节变化曲线图

(1) 春季(3—5月): 年均浓度 $66.21 \sim 84.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 为全年最高, 2015年春季最低、2019年春季到达峰值, 多数年份春季浓度 $>77 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 是年度臭氧防控关键期;

(2) 夏季(6—8月): 浓度 $41.1 \sim 55.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 年际波动平缓, 2015年最高、2020年最低, 2021—2022年夏季浓度小幅回升;

(3) 秋季(9—11月): 研究时段整体呈逐年上涨趋势, 由2015年 $38.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 升至2022年 $49.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 涨幅显著, 秋冬季臭氧抬升成为新型污染特征;

(4) 冬季(12—次年2月): 浓度 $40.3 \sim 49.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 年际震荡变化, 无单向升降规律。

3 结论与污染管控建议

3.1 主要结论

(1) 日内变化: 昆明市臭氧呈标准单峰日变化, 清晨8时浓度最低, 午后15时浓度峰值, 太阳辐射主导日内臭氧升降, 午后为

臭氧污染高发时段;

(2) 周尺度变化: 周内工作日、周末臭氧浓度差异微弱, 人为排放周期性变化对臭氧影响有限, 无显著周末效应;

(3) 月-季节尺度: 臭氧长期维持春高冬低季节格局, 3—5月春季为污染高发期; 年际上春季臭氧峰值逐年走高, 秋冬季臭氧浓度逐年上升, 臭氧污染管控时段持续拓宽;

(4) 主控因素: 区域臭氧时间分布以气象要素(光照、气温)为首要控制条件, 人为污染源周尺度短期排放波动影响较弱。

3.2 针对性防控对策

(1) 日内精细化管控: 聚焦每日12:00—17:00午后光反应活跃时段, 重点管控主城区机动车尾气、挥发性有机物(汽修、涂装、化工)排放, 减少臭氧生成前体物;

(2) 常态化全域管控: 取消工作日、休息日差异化管控方案, 落实工业源、移动源全天候常态化减排;

(3) 分季节分类治理: 春季(3—5月)开展臭氧专项攻坚行动, 严控涉VOCs、 NO_x 企业错峰生产; 针对秋冬季臭氧逐年抬升现状, 补齐秋冬污染监管短板, 持续强化秋冬季固定源、散煤、非道路移动机械综合治理, 遏制臭氧全时段抬升趋势。

【参考文献】

[1]尚媛媛,宋丹,裴兴云,等.高原城市臭氧浓度的多尺度变化特征及与气象条件的关系:以贵阳市为例[J].中国农学通报,2019,35(34):95-101.

[2]苏志华,韩会庆,李莉,等.贵阳市臭氧的时空分布、气象作用及其与前体物的关系[J].中山大学学报(自然科学版),2020,59(5):102-112.

[3]张朝能,王梦华,胡振丹,等.昆明市PM_{2.5}浓度时空变化特征及其与气象条件的关系[J].云南大学学报(自然科学版),2016,38(1):90-98.

[4]杨芳园,潘娅婷,康道俊,等.2019年昆明市一次臭氧污染过程特征及成因分析[J].环境科学学报,2022,42(10):71-79.

[5]马赛,肖兴艳,周江,等.2021—2024年贵阳市臭氧污染特征分析[J].环保科学,2025,31(5):13-17.

作者简介:

陈克伟(1982—),男,汉族,河北定州人,硕士研究生,正高级工程师,主要研究方向为测绘地理信息技术的应用与研究。

何沁璇(1985—),女,汉族,云南昆明市人,硕士研究生,主要研究方向为人口、环境与区域经济。

*通讯作者:

包银丽(1980—),女,汉族,云南宣威人,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为测绘地理信息技术的应用与研究。