

河谷城市近地面臭氧浓度的海拔梯度分异与季节调控机制

郑贵强 张六一

重庆三峡科技大学重庆市三峡库区水环境演变与污染防治重点实验室

DOI:10.32629/eep.v9i4.3154

[摘要] 臭氧(O_3)的垂直分布受排放、气象和地形的复杂影响,河谷城市因其封闭地形而更为特殊。本文基于2019–2023年高分辨率1 km近地面 O_3 浓度数据与数字高程模型(DEM),对重庆万州、湖北宜昌和甘肃兰州三座典型河谷城市进行像素级回归分析,系统探讨了 O_3 浓度随海拔梯度的分异规律及季节特征。结果表明, O_3 海拔关系存在显著季节与城市差异。宜昌和兰州在春、夏、秋三季 O_3 浓度随海拔升高而降低,冬季转为弱正相关,反映出局地光化学主导与冬季氮氧化物滴定效应的竞争。万州则呈现非典型正梯度,春、秋、冬季 O_3 随海拔显著升高,冬季斜率达 $0.0172 \mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{m})$ 且海拔可解释近80%的空间变异。这一特殊现象可能与山谷风输送、高空光化学老化和低空氮氧化物强滴定有关。本研究揭示河谷城市 O_3 垂直分异的多样性,可为监测布点与分区防控提供参考。

[关键词] 臭氧; 海拔梯度; 河谷城市; 线性回归

中图分类号: P421.33 文献标识码: A

Altitudinal Gradient Differentiation and Seasonal Regulation Mechanisms of Near-Surface Ozone Concentration in River Valley Cities

Guiqiang Zheng Liuyi Zhang

Chongqing Key Laboratory of Water Environment Evolution and Pollution Prevention and Control in Three Gorges Reservoir Area, Chongqing Sanxia University of Science and Technology

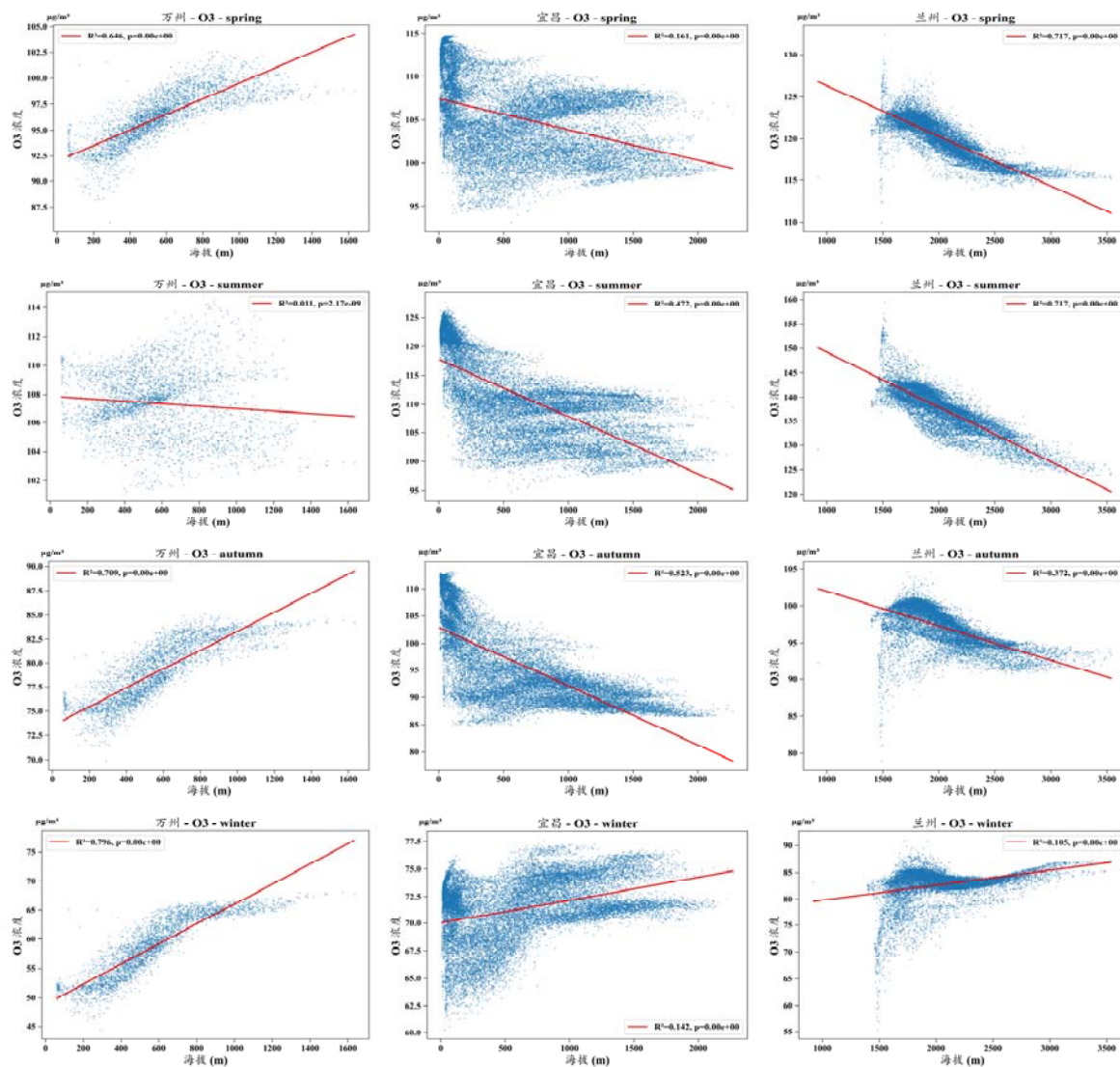
[Abstract] The vertical distribution of ozone (O_3) is subject to the complex influences of emissions, meteorology and topography, and river valley cities are even more distinctive due to their enclosed terrain. Based on high-resolution 1 km near-surface O_3 concentration data and digital elevation models (DEM) from 2019 to 2023, this study conducted pixel-level regression analysis on three typical valley cities, namely Wanzhou in Chongqing, Yichang in Hubei, and Lanzhou in Gansu, to systematically explore the vertical differentiation patterns and seasonal characteristics of O_3 concentration with altitude. The results show that there are significant urban and seasonal differences in the relationship between O_3 and altitude. In Yichang and Lanzhou, O_3 concentration decreases with increasing altitude in spring, summer, and autumn, but turns to a weak positive correlation in winter, reflecting the competition between local photochemistry and the winter nitrogen oxide titration effect. Wanzhou, however, shows an atypical positive gradient, with O_3 significantly increasing with altitude in spring, autumn, and winter. The slope in winter reaches $0.0172 \mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{m})$, and altitude can explain nearly 80% of the spatial variation. This special phenomenon may be related to valley wind transport, high-altitude photochemical aging, and strong titration of low-altitude nitrogen oxides. This study reveals the diversity of O_3 vertical differentiation in valley cities and can provide a reference for monitoring site selection and regional control.

[Keywords] O_3 ; Altitude gradient; River valley cities; Linear regression

引言

近地面臭氧(O_3)是典型二次污染物,由 NO_x 和VOCs在光照下反应生成,危害人体健康和生态系统^[1]。近年来我国 O_3 污染日益凸显,其时空分布除受前体物影响外,还强烈受控于气象与地形

条件。地形通过改变辐射、风场和边界层结构,直接影响 O_3 及其前体物的输送与化学过程^[2]。在自由对流层, O_3 常随海拔升高而增加;但在受排放强烈扰动的城市边界层内,复杂地形区的 O_3 垂直梯度呈现多样化格局^[3]。

图1 O₃浓度与各城市海拔回归图

河谷型城市因河流深切、山地夹峙形成半封闭地貌, 扩散受限, 局地环流活跃, O₃的海拔分异可能更为独特^[4]。然而, 目前针对不同气候背景和河谷形态的O₃垂直梯度对比研究仍较缺乏。为此, 本文选取重庆万州、湖北宜昌和甘肃兰州三座典型河谷城市, 利用高分辨率O₃浓度及DEM数据, 分析O₃随海拔的变化规律与季节差异, 并探讨其驱动机制, 旨在为复杂地形区O₃的精准管控提供科学支撑。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域

万州位于长江上游三峡库区, 受铁峰山、方斗山夹峙, 形成深切峡谷地貌, 相对高差逾1600 m, 城区沿江带状分布, 属亚热带季风气候。宜昌位于长江中上游分界处, 鄂西山地与江汉平原过渡带, 地形较和缓, 属亚热带湿润气候。兰州坐落在黄河上游河谷, 南北两山对峙, 峡谷狭窄, 属温带干旱半干旱气候, 年降水量不足350 mm, 日照强, 逆温频发。三市地形与气候的显著差异

为对比研究提供理想条件。

1.2 数据来源

O₃浓度数据来源于国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn>)提供的2019–2023年中国1 km高分辨率高质量逐日近地表O₃数据集^[5]。该数据集基于多源卫星遥感反演和地面观测融合生成, 空间分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$, 可较好地反映区域污染的空间细节。

数字高程模型 (DEM) 数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>), 空间分辨率约为30 m。为与O₃浓度格点匹配, 将DEM数据重采样至WGS84地理坐标系, 并插值到与污染物数据相同的1 km网格上。提取每个网格的海拔高度值(m)。为确保分析对象为陆地自然表面, 仅保留海拔大于0 m的像素参与运算。

2 研究方法

首先, 对三座城市分别裁剪出包含城区的矩形区域, 确定相应的行列索引, 读取O₃浓度和DEM海拔数组, 实现空间对齐。根据

气象学标准进行季节划分: 春季(3-5月)、夏季(6-8月)、秋季(9-11月)、冬季(12-次年2月)。对每个城市、每个季节, 将2019-2023年所有日浓度数据按像素逐一求取季节平均浓度, 得到各季节的多年平均 O_3 空间分布。

然后, 以像素海拔高度(m)为自变量, 对应位置的 O_3 季节平均浓度($\mu g/m^3$)为因变量, 进行普通最小二乘(OLS)线性回归。回归方程形式为:

$$y = \beta x + \alpha$$

式中, y 为 O_3 浓度, x 为海拔, β 为斜率(表示海拔每升高1 m的浓度变化量), α 为截距。计算每个回归的决定系数(R^2)和 p 值, 以评估海拔对 O_3 空间变异的解释程度和关系的显著性。由于各城市参与回归的像素数量庞大(万州3242、宜昌19939、兰州13256), 统计检验力极强。上述数据处理和回归分析均基于Python环境, 利用xarray和并行计算高效完成。

3 结果与讨论

3.1 O_3 海拔回归的总体特征

所有城市-季节组合的回归 p 值均趋近于0, 表明海拔与 O_3 浓度之间的线性关系在统计上极显著。然而, 斜率的符号、大小及模型解释力(R^2)在不同城市和季节间呈现显著差异(图1)。这充分说明, O_3 的海拔梯度并非单一模式, 而是局地生成、区域传输、垂直混合及化学消耗综合作用的结果。

3.2 负海拔梯度主导的宜昌与兰州

宜昌和兰州春、夏、秋季 O_3 均随海拔升高而降低, 呈现典型“城市烟囱”型负梯度。这类城市谷底人口与工业密集, NO_x 和VOCs排放强, 光照充足时近地面光化学产生大量 O_3 , 形成高值区; 随海拔升高, 前体物稀释, O_3 浓度下降。夏季负梯度最陡, 兰州斜率-0.0113, R^2 为0.717, 海拔每升高100 m浓度下降约1.13 $\mu g/m^3$, 且海拔解释七成以上空间变异; 宜昌斜率为-0.0100, R^2 为0.472。兰州因干旱区强辐射与封闭地形, O_3 积聚效应更突出; 宜昌湿度较高, 光解速率稍弱, 梯度略缓。秋季负梯度仍明显, 说明光化学依然活跃, 但强度较夏季有所减弱。冬季两城均转为弱正梯度, 宜昌0.00212, 兰州0.00279, R^2 较低(<0.15)。冬季光化学反应微弱, 近地面氮氧化物滴定消耗 O_3 作用突出, 稳定的逆温层使低处 O_3 被消耗, 较高海拔则因受局地排放影响小而保留背景 O_3 , 形成正梯度, 但整体浓度水平较低, 空间变异受其他因素干扰更大。

3.3 正海拔梯度主导的万州及其特殊机制

万州除夏季呈微弱负梯度(斜率-0.00088, R^2 =0.011)外, 春、秋、冬季 O_3 均随海拔升高而显著增加。冬季正梯度最强(0.0172), 海拔每升高100 m, O_3 增加约1.72 $\mu g/m^3$, R^2 高达0.796, 即海拔可解释近80%的空间变异。春、秋季 R^2 亦>0.6, 正相关持续。这种正梯度可能由以下机制协同导致:

(1)山谷风输送与高空光化学老化。万州地形破碎, 山谷风环流强盛。白天上坡风将含丰富 NO_x 和VOCs的气团沿坡输送至高处, 在输送过程中光化学老化生成 O_3 , 导致高海拔 O_3 累积峰值; (2)低空 NO_x 强滴定。谷底交通和工业排放大量 NO_x , 在边界层内持续

消耗 O_3 , 压低近地面浓度, 而高处 NO_x 浓度低, 滴定作用弱, O_3 得以保持; (3)区域背景 O_3 叠加。万州地处四川盆地东部边缘, 高海拔点更易受较高浓度的区域背景 O_3 影响, 与低处被消耗的空气形成明显对比。夏季正梯度消失, 是因强烈光化学使谷底 O_3 大量生成, 加之垂直混合增强, 浓度差异被抹平。

3.4河谷城市 O_3 管控的启示

上述差异提示 O_3 防控需因地制宜。对宜昌、兰州等负梯度型城市, O_3 高值聚集在谷底排放密集区, 应重点强化 NO_x 和VOCs源头减排, 尤其在夏季。万州等正梯度型城市, 高海拔处同样可能出现高浓度, 监测布点需兼顾山坡和山腰; 治理方面, 除了本地减排, 还需重视山谷风输送导致的污染再分布以及区域背景的贡献, 单一本地控制可能效果有限。冬季普遍出现的弱正梯度亦提醒, 即使非 O_3 主季, 高海拔处浓度或对生态系统有潜在影响。

4 结论

本研究基于高分辨率数据, 系统分析了三座典型河谷城市 O_3 浓度的海拔梯度分异, 主要结论如下:

(1)河谷城市 O_3 的海拔梯度存在显著城市和季节差异。宜昌、兰州春、夏、秋季为负梯度, 冬季转为弱正梯度; 万州春、秋、冬季呈强正梯度, 夏季梯度消失。(2)负梯度主要由谷底强光化学生成主导, 正梯度则归因于山谷风输送与高空光化学老化、低空 NO_x 滴定及区域背景 O_3 的综合作用。(3)不同梯度模式为监测和治理提供了差异化视角: 负梯度城市应控源为主, 正梯度城市需兼顾坡面输送和区域背景影响, 优化站点布局。

研究受限于格点回归分析, 未来可借助数值模式量化输送、化学和沉降的相对贡献, 并纳入VOCs观测以明确生成敏感性, 深化机理解析。本研究揭示的垂直分异规律可为复杂地形区 O_3 管控提供参考。

[参考文献]

- [1]ZHANG J,WEI Y,FANG Z.Ozone pollution:a major health hazard worldwide[J].Frontiers in immunology,2019,10:2518.
- [2]朱俊橙,马天光,张艳亭,等.基于环流分型的乌鲁木齐夏季臭氧污染及边界层气象成因研究[J].环境科学学报,2026,46(2):42-52.
- [3]ZUO Y,HOU J, CHI Y,et al. Unraveling the Complex Drivers of Ozone Pollution in High-Altitude Urban Areas: Insights from Source Apportionment and Spatiotemporal Variations[J].Atmospheric Pollution Research,2025:102700.
- [4]张瑞欣.西部地区河谷地带煤化工工业城市臭氧污染成因及来源解析研究[D];兰州大学,2022.
- [5]WEI J,LI L,LI K,et al. Full-coverage mapping and spatiotemporal variations of ground-level ozone (O_3) pollution from 2013 to 2020 across China[J].Remote Sensing of Environment,2022,270:112775.

作者简介:

郑贵强(2000--),男,汉族,山东临沂人,硕士,研究方向: 空气污染物浓度分析与预测。