

浚县农村煤炭复燃现象遥感监测研究

周志涛^{1,2} 杨永亮^{*1,2}

1. 中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094

2. 中国科学院大学 北京 100049

摘要: 本研究基于2020年1月至2022年12月的MODIS卫星遥感数据和地面监测站点数据,对河南省浚县冬季煤炭燃烧情况及其对大气PM_{2.5}和SO₂浓度的影响进行了系统分析。研究首先采用季节性分解时间序列(STL)模型解析了污染物浓度的季节性变化特征。在此基础上,创新性地以污染物浓度数据的第三四分位数为依据,提出了一种新的煤炭燃烧行为判定阈值方法。研究表明,该方法对煤炭燃烧区域的识别准确率达到75%,为区域大气污染防治提供了科学依据和技术支持。

关键词: 遥感监测; 燃煤复燃; PM_{2.5}; SO₂; 农村大气污染

引言

在中国北方地区,冬季供暖需求的增加导致燃煤使用的激增,这不仅消耗了大量的煤炭资源,也加剧了大气污染问题^[1]。燃煤产生的污染物,尤其是细颗粒物(PM_{2.5})和二氧化硫(SO₂),对空气质量和公共健康构成了严重威胁^[2]。这些污染物可以通过风力传播,影响周边地区,甚至远距离传输,造成区域性的环境问题^[3]。河南省作为中国的人口大省,其北部地区的浚县,由于冬季燃煤取暖的普遍性,导致了PM_{2.5}和SO₂浓度的显著升高^[4]。这些地区的农村人口众多,清洁能源的普及和应用相对滞后,燃煤取暖仍然是主要的供暖方式^[5]。冬季的气候条件,如低温、干燥、静风和逆温现象,不利于污染物的扩散,使得污染物在地面附近积聚,加剧了空气质量恶化^[6]。

遥感技术的发展为环境监测提供了新的视角和方法^[7]。与传统的地面监测相比,遥感技术能够覆盖更广阔的区域,提供连续、实时的监测数据,对于及时发现和评估大气污染事件具有重要意义^[8]。本研究选取浚县作为研究区,利用MODIS卫星搭载的传感器获取的遥感数据,结合地面监测站点的PM_{2.5}和SO₂浓度数据,对该县冬季煤炭燃烧情况进行了详细的监测分析。研究中采用的STL模型是一种时间序列分析方法,能够分解出时间序列中的趋势、季节性和残差成分,从而准确捕捉污染物浓度的季节性变化特征^[9]。

本研究提出了一种基于污染物浓度数据第三四分位数的阈值判定方法,通过分析PM_{2.5}和SO₂浓度分布特征,确

定煤炭燃烧活动阈值。该方法为快速识别煤炭燃烧区域提供了新手段,对大气污染防治措施的制定和实施具有重要参考价值。研究不仅揭示了浚县冬季煤炭燃烧对空气质量的影响,还为政策制定者提供了科学依据。此外,遥感监测技术的应用弥补了农村地区监测站点不足的局限,为农村大气污染防治提供了更全面、准确的数据支持。

1. 研究区概况

浚县位于河南省北部,地处华北平原南缘,紧邻黄河,是重要的农业县。该县地形以平原为主,土壤肥沃,适宜多种农作物种植,是河南省重要的粮食和经济作物生产基地^[10]。由于工业发展相对滞后,工业污染源较少,大气环境受工业排放影响较小,为研究农村地区大气污染提供了理想条件。浚县属温带季风气候,四季分明。冬季寒冷干燥^[11]。居民取暖需求增加,燃煤取暖成为主要方式,导致污染物排放量大幅上升^[12]。加之冬季常出现静风和逆温现象,污染物难以扩散,易形成雾霾天气,严重影响空气质量^[13]。该气候特点为研究冬季燃煤取暖对空气质量的影响提供了典型案例,对制定科学的大气污染防治措施、改善区域空气质量及促进可持续发展具有重要意义。

2. 研究数据与方法

2.1 研究数据

本研究采用遥感技术和地面监测数据相结合的方法,对浚县冬季煤炭燃烧情况进行了监测分析。利用美国NASA提供的MODIS传感器数据,覆盖河南省浚县研究区域,基

于冬季燃煤活动最为频繁的时期，数据时间跨度为2020年1月至2022年12月，空间分辨率达到 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ ，重点提取 $\text{PM}_{2.5}$ 与 SO_2 柱浓度产品^[14]。该数据通过气溶胶光学厚度(AOD)反演算法生成污染物浓度空间分布图，其高时空分辨率特性可有效捕捉燃煤排放污染物的扩散梯度与日变化特征^[15]。同时，获取浚县气象局部署的国家标准气象站点数据，包括逐小时风速、降水量及气温等参数，站点布局覆盖城区、工业区与农村区域，为卫星遥感反演结果提供空间校正基准。

2.2 研究方法

2.2.1 季节性分解

本研究采用STL模型来深入解析污染物浓度的动态变化特征^[16]。通过STL模型分析 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 浓度的时间序列，将其分解为趋势项、季节性项和随机残差项，揭示不同时间尺度上的变化规律。趋势项反映长期变化，季节性项捕捉周期性波动，随机残差项表征随机噪声。该方法精确量化了季节性因素对污染物浓度的影响，为理解其时间演变机制提供了科学依据。STL模型在处理非线性、非平稳数据时表现出较强鲁棒性，提升了分析结果的可靠性和准确性。

2.2.2 阈值判定

本研究提出了一种基于污染物浓度数据分布特征的第三四分位数阈值判定方法。该方法通过分析 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 浓度的统计分布特征，结合煤炭燃烧的污染物排放特性，科学确定了有效表征煤炭燃烧活动的浓度阈值。当监测区域的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 浓度同时超过各自的第三四分位数时，可判定该区域存在煤炭燃烧活动，判定准确率可达75%以上。与传统单一污染物阈值判定方法相比，本方法具有以下优势：首先，双污染物协同判定机制显著提高了准确性；其次，基于统计学原理的阈值设定适应不同区域环境特征，具有良好的普适性；最后，该方法可实现实时监测数据的快速分析，为及时采取污染防控措施提供决策支持。

3. 结果与分析

3.1 STL模型季节趋势分解

在2020年至2023年期间，浚县的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现明显的季节性波动，冬季浓度显著高于其他季节，这与冬季燃煤取暖活动增加密切相关(图1)。趋势线显示 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在2021年至2022年间

有所上升，可能反映了燃煤或其他污染源活动的增加，或现有控制措施效果减弱。随着经济发展和城市化，工业排放和交通污染也可能加剧 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度。季节性分解分析强调了冬季峰值的重要性，表明煤炭燃烧是冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度上升的关键因素。此外，残差部分揭示的随机波动可能与短期气象变化或临时污染源活动有关，如区域性沙尘暴等，这些因素在特定时段内可能加剧空气污染。

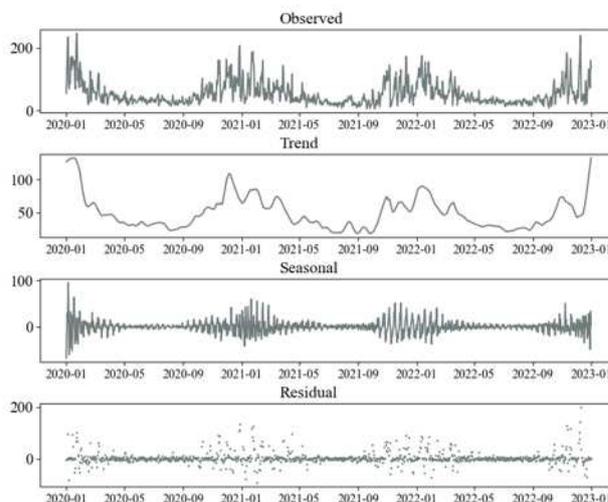


图1 浚县 $\text{PM}_{2.5}$ STL模型分解

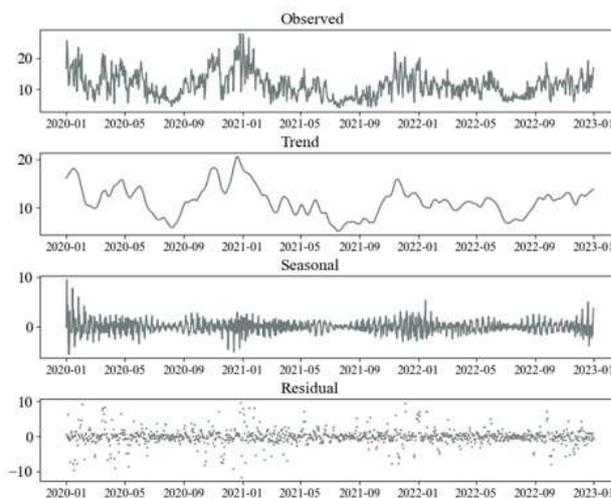


图2 浚县 SO_2 STL模型分解

在2020年至2023年期间，浚县的 SO_2 浓度呈现明显的季节性波动，冬季浓度较其他季节增加，这与冬季燃煤取暖活动导致的 SO_2 排放上升密切相关(图2)。趋势线显示 SO_2 浓度相对稳定，未出现显著的长期上升或下降，可能反映了浚县在 SO_2 排放控制方面的有效措施。季节性分解进一步揭示了冬季浓度升高的模式，强调了取暖需求与燃煤活动

的关系。残差部分则显示在考虑趋势和季节性因素后, SO_2 浓度的随机波动, 可能与短期气象条件或其他瞬时排放源有关。总体来看, 浚县 SO_2 浓度的季节性变化与冬季煤炭燃烧活动紧密相关, 尽管没有长期趋势, 但冬季仍需额外控制措施以减少 SO_2 排放。

总的来说, 通过 STL 模型分解分析, 本研究发现浚县冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 浓度均呈现先升高后降低的趋势, 且均在冬季 1 月份左右均达到峰值。

3.2 阈值判定

根据阈值判定结果, 图 3 (a) 和图 3 (b) 分别展示了浚县在冬季和夏季的煤炭燃烧监测结果。图 3 (a) 显示了 2022 年 12 月 31 日的冬季监测数据, 其中红色区域代表煤炭燃烧概率 $\geq 75\%$, 黄色区域为 $60\% - 75\%$, 绿色区域则 $< 60\%$ 。从图中可见, 红色和黄色区域分布显著, 表明冬季煤炭燃烧活动较高, 主要因气温低导致取暖和能源需求增加。相比之下, 图 3 (b) 展示了 2022 年 6 月 12 日的夏季监测结果, 几乎所有区域均为绿色, 燃烧概率均 $< 60\%$, 反映出夏季取暖需求减少, 清洁能源使用增加, 煤炭燃烧活动显著下降。这一对比清晰地揭示了季节变化对煤炭燃烧活动的显著影响。

对比两图可见, 季节变化显著影响煤炭燃烧活动。冬季取暖需求增加, 煤炭燃烧上升; 夏季气温升高, 需求减少, 燃烧降低。这反映了季节性能源需求变化, 提示制定能源政策和环保措施时应考虑季节因素, 以实现更有效的资源管理和环境保护。

4. 结论与展望

本研究综合利用遥感技术和地面监测数据, 对河南省浚县冬季煤炭燃烧情况进行了系统监测与分析。通过 STL 模型, 揭示了 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 等污染物浓度的季节性变化特征, 其中冬季浓度显著高于其他季节, 主要与燃煤取暖活动密切相关。研究提出的第三四分位数阈值判定方法, 能够有效识别煤炭燃烧区域, 为精准定位污染源和制定针对性的大气污染防治措施提供了科学依据。此外, 研究建议在污染防控中充分考虑气象条件的变化。未来研究可进一步探索更多影响因素, 并结合多源数据融合技术, 提高监测模型的准确性、普适性和时空分辨率, 为区域大气污染治理提供更全面的技术支撑。同时, 建议加大清洁能源推广力度, 优化供暖结构, 从源头减少污染物排放, 推动区域环境质量的持续改善。

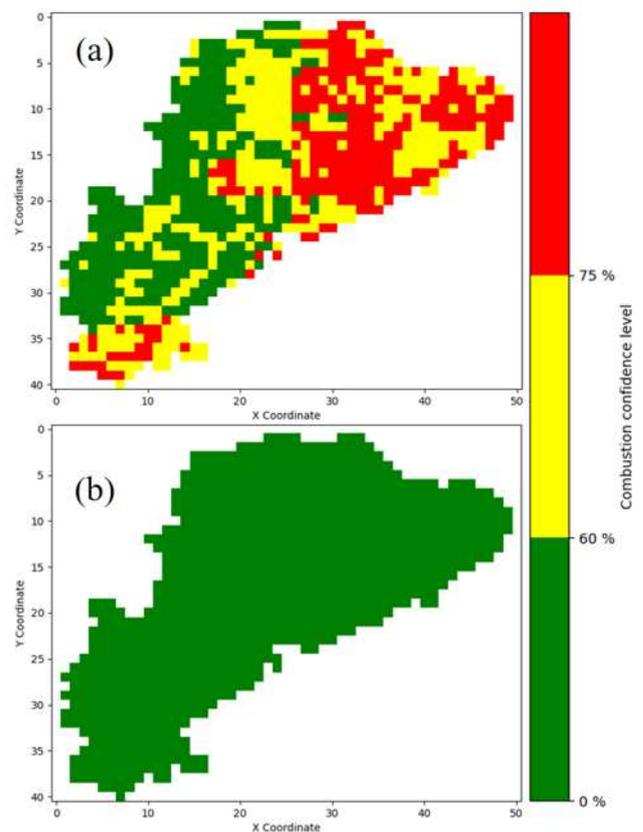


图 3 浚县煤炭燃烧阈值判定

参考文献:

- [1] 袁晓玲, 李朝鹏, 方恺. 中国城镇化进程中的空气污染研究回顾与展望 [J]. 经济学动态, 2019, 5: 88-103.
- [2] 杨新兴, 冯丽华, 尉鹏. 大气颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 及其危害 [J]. 2012.
- [3] MANISALIDIS I, STAVROPOULOU E, STAVROPOULOS A, 等. Environmental and health impacts of air pollution: a review [J]. Frontiers in public health, 2020, 8: 14.
- [4] WANG H, ZHOU S, ZHANG P. Clean heating and clean air: evidence from the coal-to-gas program in China [J]. China Economic Review, 2024, 85: 102179.
- [5] 字琼珍, 王昌梅, 吴凯, 等. “双碳”目标下中国农村能源发展现状, 问题与对策 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(6): 69-78.
- [6] ZHU W, XU X, ZHENG J, 等. The characteristics of abnormal wintertime pollution events in the Jing-Jin-Ji region and its relationships with meteorological factors [J]. Science of the Total Environment, 2018, 626: 887-898.

- [7] 聂鹏程, 钱程, 覃锐苗, 等. 天空地一体化信息感知与融合技术发展现状与趋势 [J]. *Journal of Intelligent Agriculture Mechanization*, 2023, 4(2).
- [8] CHUVIECO E. Fundamentals of satellite remote sensing: An environmental approach [M]. CRC press, 2020.
- [9] LI W, JIANG X. Prediction of air pollutant concentrations based on TCN-BiLSTM-DMAttention with STL decomposition [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1):4665.
- [10] 刘慧. 我国农村发展地域差异及类型划分 [J]. *地理学与国土研究*, 2002, 18(4):71-75.
- [11] ONO H S P, KAWAMURA T. Sensible climates in monsoon Asia [J]. *International Journal of Biometeorology*, 1991, 35:39-47.
- [12] FAN M, HE G, ZHOU M. The winter choke: coal-fired heating, air pollution, and mortality in China [J]. *Journal of Health Economics*, 2020, 71:102316.
- [13] LI Z, GUO J, DING A, 等. Aerosol and boundary-layer interactions and impact on air quality [J]. *National Science Review*, 2017, 4(6):810-833.
- [14] SHAO Y, TAFF G N, LUNETTA R S, 等. Review of Selected Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer Algorithms, Data Products, and Applications [J]. *Advances in Remote Sensing*, 2011:31-55.
- [15] WANG J, XU X, SPURR R, 等. Improved algorithm for MODIS satellite retrievals of aerosol optical thickness over land in dusty atmosphere: Implications for air quality monitoring in China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(11):2575-2583.
- [16] BANDARA K, HYNDMAN R J, BERGMEIR C. MSTL: A seasonal-trend decomposition algorithm for time series with multiple seasonal patterns [J]. *International Journal of Operational Research*, 2025.
- 作者简介:**
周志涛 (1998—), 男, 江西南昌人, 硕士研究生, 研究方向为大气遥感。
- 基金项目:** 国家自然科学基金 (42071398)