

云南坝子型城市大气污染与气象条件关联性 研究及污染路径分析

——以文山市为例

高宏, 黄赛*, 尹顺雄, 聂常金

文山州辐射环境污染防治中心, 云南 文山

收稿日期: 2024年12月17日; 录用日期: 2025年1月11日; 发布日期: 2025年1月20日

摘要

近年来, 文山市在3~4月份出现了连续的PM_{2.5}超标现象, 且4月份颗粒物浓度水平在全年最高。本文分析了文山市主城区的地形、气象、产业发展、农业源及周边环境等条件, 通过分析, 认为文山市冬春季大气污染原因主要有气象影响因素, 外源输入因素, 内源影响因素, 其中文山市位于山区的地形地势加重了逆温效应影响, 内源影响包括机动车、工业排放、秸秆焚烧等。本文对下一步文山州加强大气污染防治提出对策建议。

关键词

大气污染, 气象条件, 污染源分析, 秸秆焚烧, 逆温

The Correlation between Atmospheric Pollution and Meteorological Conditions in Yunnan Bazi Type Cities Research and Pollution Path Analysis

—A Case Study of Wenshan City

Hong Gao, Sai Huang*, Shunxiong Yin, Changjin Nie

Wenshan State Radiation Environmental Pollution Prevention and Control Center, Wenshan Yunnan

*通讯作者。

文章引用: 高宏, 黄赛, 尹顺雄, 聂常金. 云南坝子型城市大气污染与气象条件关联性研究及污染路径分析[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(1): 96-104. DOI: 10.12677/aep.2025.151013

Abstract

In recent years, Wenshan City has experienced continuous PM_{2.5} exceedance from March to April, and the particulate matter concentration level in April was the highest throughout the year. This article analyzes the terrain, meteorology, industrial development, agricultural sources, and surrounding environment of the main urban area of Wenshan City. Through analysis, it is believed that the main causes of air pollution in winter and spring in Wenshan City are meteorological factors, external input factors, and internal influencing factors. Among them, the terrain and topography of Wenshan City in the mountainous area exacerbate the effect of temperature inversion, and internal influences include motor vehicles, industrial emissions, straw burning, etc. This article proposes countermeasures and suggestions for strengthening air pollution prevention and control in Wenshan Prefecture in the next step.

Keywords

Air Pollution, Meteorological Conditions, Pollution Source Analysis, Straw Burning, Temperature Inversion

Copyright © 2025 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

坝子型城市通常指的是在高原和山地之间分布的小型盆地或平原区域，这些区域地势平坦，适合城市建设和人口聚集，近年来，随着空气质量越来越引人关注，关于边境坝子型城市的污染天气研究也更加深入，结合我国西南气候特点，认为冬春季节云南省坝子型城市污染天气与地形和气候密切相关，且受到东南亚国家烧荒影响严重[1]-[5]。近年来，文山市在3~4月份均出现了连续的PM_{2.5}超标现象，且4月份颗粒物浓度水平在全年最高，在5~6月份随着雨季到来空气质量逐渐变好，颗粒物浓度出现显著下降。目前，有关文山市的大气PM_{2.5}研究相对薄弱，本研究力求厘清文山市城区大气3~4月PM_{2.5}超标与气象条件关联性及污染来源，为我国西南边境地区坝子型城市进行大气污染防治工作提供参考。

2. 背景

2.1. 文山市地形地势

文山市是典型的坝子地形，高低起伏较大，总体地势西北高、东南低，文山市主城区位于文山坝子中部，地势稍有起伏，城区四周群山环绕，为典型的河谷盆地。境内最高峰东山，海拔1570米；最低点新平坝，海拔1250米。

2.2. 文山市“十四五”以来污染天气情况

如图1所示为十四五期间文山市大气污染情况，可以发现2021年，文山市共出现轻度污染5天，其

中1月 $\text{PM}_{2.5}$ 超标1天,3月臭氧超标1天,4月臭氧超标1天, $\text{PM}_{2.5}$ 超标2天。2022年,文山市共出现轻度污染1天,12月 $\text{PM}_{2.5}$ 超标1天。2023年,文山市共出现轻度污染13天,其中2月 $\text{PM}_{2.5}$ 超标2天,3月 $\text{PM}_{2.5}$ 超标1天,4月 $\text{PM}_{2.5}$ 超标5天,臭氧超标5天。2024年,文山市共出现6天污染天气,其中1月 $\text{PM}_{2.5}$ 超标1天,3月 $\text{PM}_{2.5}$ 超标2天,4月 $\text{PM}_{2.5}$ 超标1天,臭氧超标2天。从以上数据得出,“十四五”以来,文山市污染天气主要集中在3月、4月。

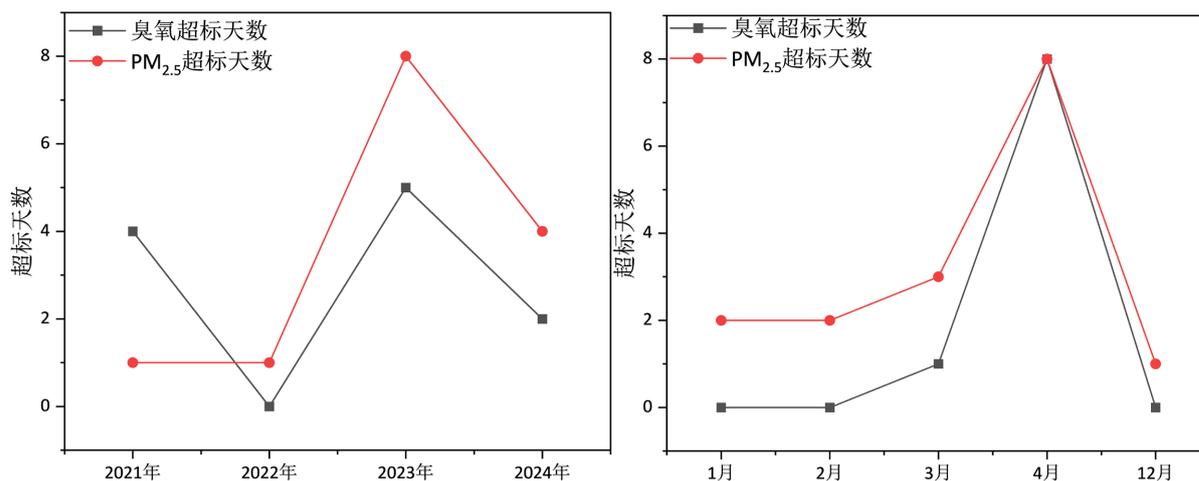


Figure 1. Air pollution situation in Wenshan City during the 14th Five Year Plan period

图 1. 十四五期间文山市大气污染情况

2.3. 文山市 3~4 月气象特征

文山市属亚热带季风气候。其特点是大部地区冬无严寒,夏无酷暑,偶有高热和冷凉天气,多年平均气温 17.1°C ,年平均降水量 1285.1 mm ,年平均降水日数为 152.1 天。文山市3月平均气温为 17.0°C 左右,一般约有3次降温降水天气过程,平均风速约为 0.5 m/s ,中低空主导风向为偏南风,高空主导风向为西北风;文山市4月的平均气温为 21.0°C 左右,一般约有3次降水天气过程,平均风速约为 0.5 m/s ,中低空主导风向为偏南风,高空主导风向为西北风。

3. 污染天气与气象条件关联度分析

“十四五”以来,2023年度文山市超标天数最多,本文将对2023年度污染天气与气象条件关联度分析进行深入分析。2023年文山市各月份气象要素见表1。气温在6月和7月达到平均温度的峰值,降水在8月和9月到达全年降雨量的峰值。平均湿度则在4月份、5月份最低,同时颗粒物浓度在4月达到峰值,表明较低的湿度会使颗粒物在大气中停留更长的时间从而导致其浓度的上升。

从表1可以看出,颗粒物和湿度之间大致呈负相关,湿度的升高可以促进 $\text{PM}_{2.5}$ 的生长,使得其更容易被沉降和清除。同时温度的升高,颗粒物的浓度也出现下降,可能是由于气温升高促进了气团产生垂直方向的湍流运动,有利于近地层空气中的污染物在垂直方向的扩散,使得颗粒物浓度降低,这一特性同时在表中中得到体现。随着降水量的增加颗粒物的浓度下降,这是由于雨水湿沉降的作用使颗粒物落到地面,同时可以将空气中的污染物稀释,从而降低颗粒物浓度。在3、4月份风速较高,风速有利于污染物的扩散,但颗粒物浓度却同样在3、4月份较高,文山市建成区的坝子地形可能阻挡了颗粒物的扩散。

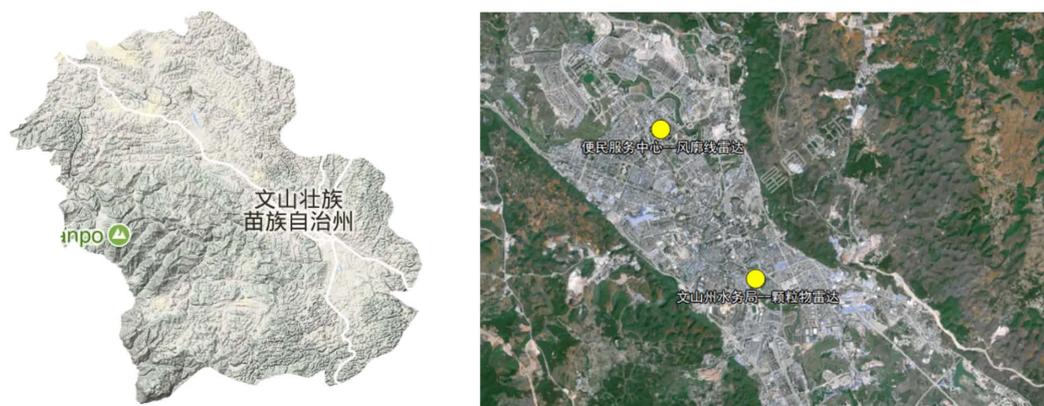
Table 1. Average temperature, humidity, wind speed, and PM_{2.5} concentration in Wenshan City from January to December 2023**表 1.** 文山市 2023 年 1~12 月平均气温、湿度、风速及 PM_{2.5} 浓度

时间	平均气温(°C)	平均湿度(%)	平均风速(m/s)	PM _{2.5} 平均浓度(μg/m ³)
2023 年 1 月	9.9	74.6	1.3	60
2023 年 2 月	14.7	72.9	1.5	35
2023 年 3 月	17.5	71.5	1.6	40
2023 年 4 月	21.7	66.4	1.7	54
2023 年 5 月	24	65.9	1.5	22
2023 年 6 月	24.2	74	1.3	25
2023 年 7 月	24.1	76.5	1.3	13
2023 年 8 月	22.9	83.3	0.9	13
2023 年 9 月	21.9	86.8	1.0	16
2023 年 10 月	20.1	82.6	1.1	12
2023 年 11 月	17.1	81.5	1.1	20
2023 年 12 月	13.7	82	1.4	31

4. 污染物源产生原因分析

4.1. 气象因素影响

1) 逆温效应影响[6]。文山城区具有明显的坝子地形特征，其地形呈 V 字形(见图 2)，两旁陡峭，底部狭窄，地势低洼，形似峡谷。这种坝子地形的地势低洼，周围环绕着山脉，形成了一定的地理封闭性，使得空气流通受到一定的限制。会造成城区内风速较小，使产生污染物不易水平扩散。冬春季节，坝子地形易受地形逆温的影响。正常情况下，在对流层的气温会随着高度的升高而降低，逆温层的出现则使这种情况相反，气温出现上高下低的状态。在夜晚，由于山坡散热较快，冷空气随山坡下沉到谷底，而谷底原来的暖空气被冷气抬挤上升，从而出现温度倒置的现象。这种现象的出现会阻碍空气的垂直对流运动，使颗粒物等污染物不易扩散。几十米甚至几百米厚度的逆温层就像锅盖一样罩在城市的上空，从而使空气污染物大量积累，进一步加重大气的污染现象。

**Figure 2.** Topographic map of the main urban area of Wenshan City**图 2.** 文山市主城区地形图

2) 地区气候因素影响。一是孟加拉湾南支槽偏弱，降水供给不足。

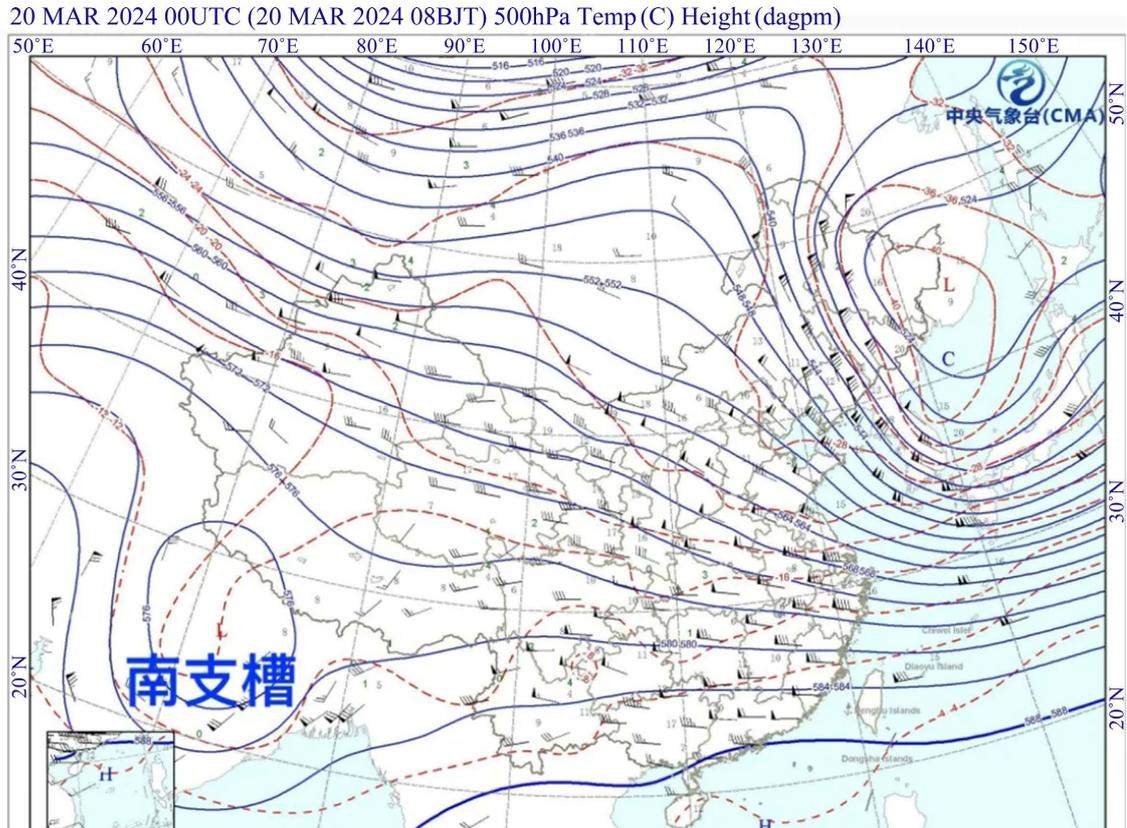


Figure 3. Schematic diagram of the formation of the southern branch channel
图 3. 南支槽形成示意图

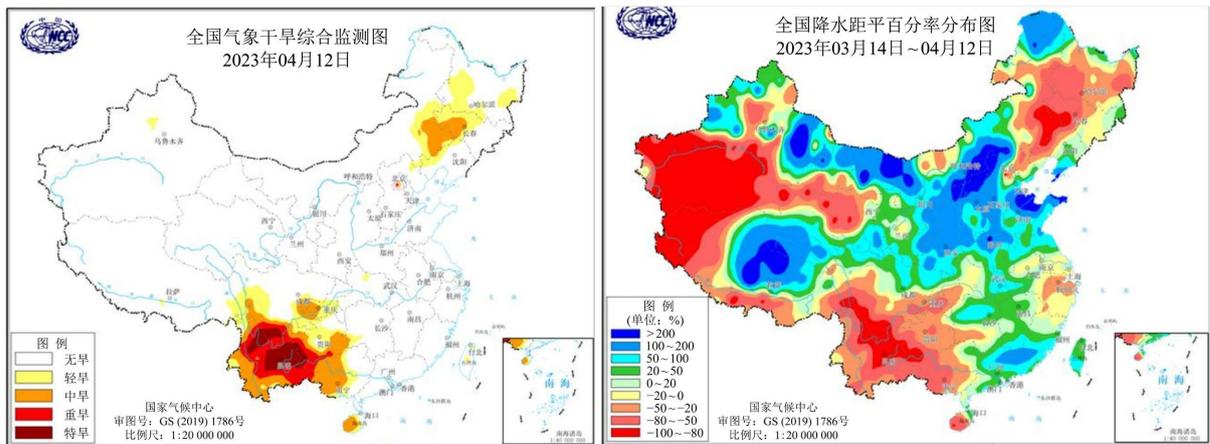


Figure 4. Comprehensive monitoring map of national meteorological drought in 2023 and distribution map of precipitation anomaly percentage in April 2023
图 4. 2023 年全国气象干旱综合监测图及 2023 年 4 月全国降水距平百分率分布图

季风是云南天气气候的一个主要特征，由于特殊的地理位置，云南处于多种季风系统交叉影响的过渡地带，可以同时受到几个不同季风系统的交叉影响。在冬季，既受到来自西伯利亚的寒冷而干燥的偏

北季风的影响，又受到来自西南亚大陆的干热气团的影响，还受到来自青藏高原的高原冬季风的影响。到了夏季则受到印度夏季风系统和东亚夏季风系统的影响。冬春季，副热带西风气流偏南，在青藏高原南部地区受山脉的阻挡，形成绕流，并在经过与云南较近的孟加拉湾海面上形成南支槽(见图 3)，南支槽能够直接影响云南冬春季的降水量。2023 年南支槽活动较弱，水汽输送偏少，全省平均降水量较常年偏少 16.7%，为 1961 年以来第三少，冬季和春季降水量为特少(见图 4)，雨季开始期和结束期均晚于常年，雨季长度较常年偏短 9 天，雨季降水量偏少 10.1%。二是昆明准静止锋无法稳定维持，春季多晴朗温暖天气。每年的 11 月至次年 4 月，在昆明准静止锋(见图 5)的作用下，常形成锋面低涡暴雨天气，2023 年度西南暖低压过于旺盛，春季昆明准静止锋无法稳定维持，云南频频出现晴朗温暖天气。全省年平均气温较常年偏高 1.1℃，为 1961 年以来最高，已连续 12 年偏高；全省平均年日照时数接近常年。

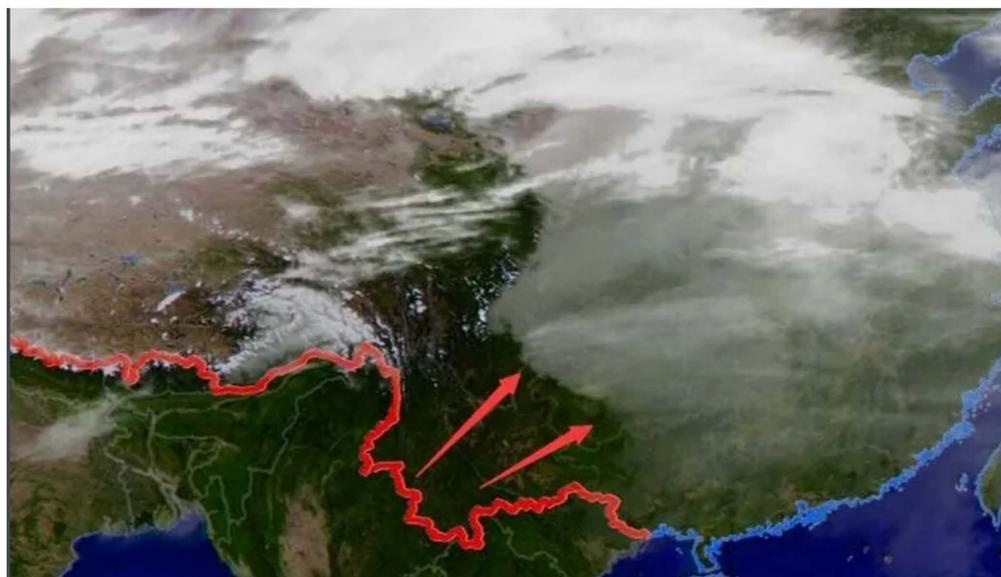


Figure 5. Kunming quasi-static front diagram

图 5. 昆明准静止锋图

总的来说，2023 年云南省冬春季节总体干旱少雨，不利于颗粒物扩散稀释，导致全省主要城市颗粒物浓度持续累积升高，文山市大气颗粒物浓度受其影响较往年也明显升高。

4.2. 外源输入影响

越南位于文山市以南，文山市距离越南边境直线距离约 60 公里，老挝位于文山市以西南，文山市距离老挝边境直线距离约 220 公里。越南、老挝是位于东南亚的传统农业国家，从事农业的人口占全国人口的大部分。如图 6 为 2023 年文山市月平均风向频率，其中 2~4 月主导风向为偏南风。文山市主城区地形为西北高、东南低，偏南风易携带污染气团入境。文山市在春季受到来自于越南、老挝的外来污染物传输的重要影响。如图 7 为是从地表高温点监测系统(SatSee-Fire 卫星看火)获取的东南亚 2023 年 3 月份的火点数据[7]，其中红色的点代表火点。可以从图中看到东南亚地区火点的分布十分密集。老挝地区受到季风的影响，春季天气炎热，尤其是 3~5 月份，属于热季。且降水量较少。生物质燃烧现象多发生在春季，且春季又属于作物收获季节，受到耕作和降水的影响，导致东南亚地区火点集中分布在 1~4 月，东南亚生物质燃烧现象在 3 月份到达顶峰。文山市 3 月、4 月份的空气质量在一年之中同样最为严重，这进一步佐证了文山市 2023 年受到了来自于东南亚生物质燃烧的影响。

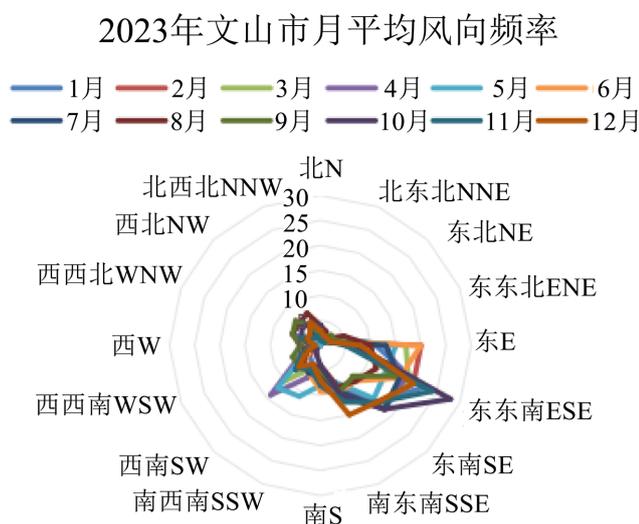


Figure 6. Monthly average wind direction frequency in Wenshan City in 2023
图 6. 2023 年文山市月平均风向频率

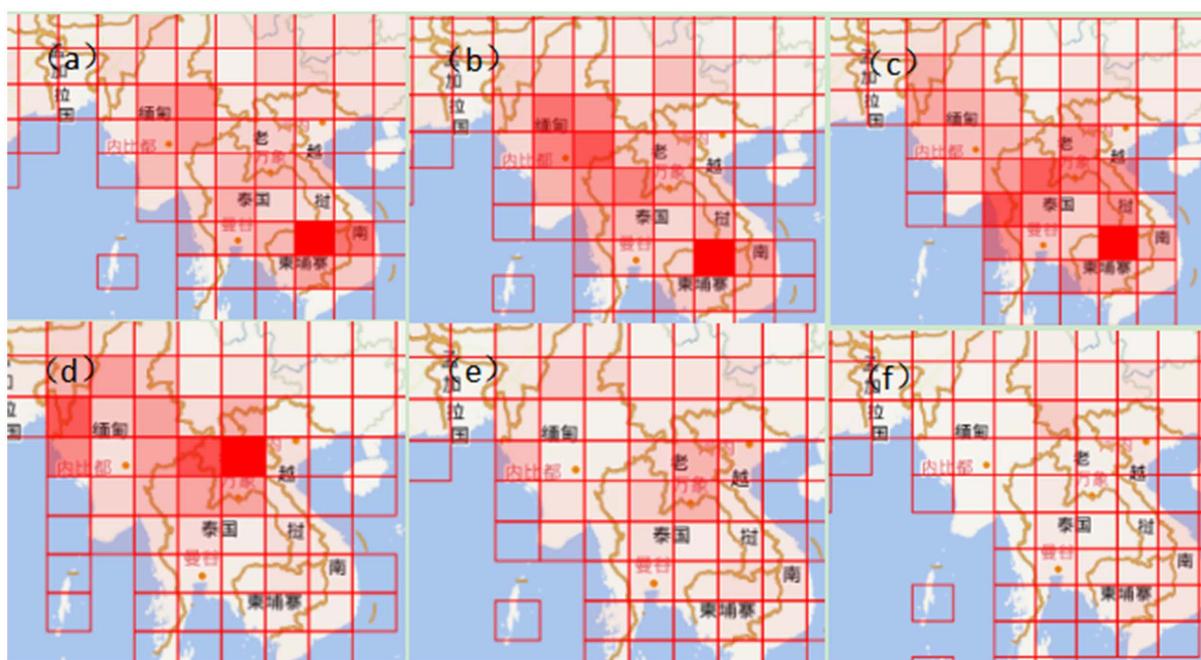


Figure 7. Fire point data for 2023 (darker colors in the area indicate more fire points) (a) January; (b) February; (c) March; (d) April; (e) May; (f) June

图 7. 2023 年火点数据(区域颜色越深, 说明火点越多) (a) 1 月; (b) 2 月; (c) 3 月; (d) 4 月; (e) 5 月; (f) 6 月

4.3. 内源污染影响

1) 工业源污染。文山市主城区附近共有 2 家烟气排放量较大的规模以上企业, 分别为云南壮山实业股份有限公司、云南文山铝业有限公司电解铝分公司, 位置如图 8 所示, 根据排污许可证办理情况, 其中云南壮山实业股份有限公司排污许可年排放量限值为颗粒物 179.955 吨/年, 二氧化硫 555.768 吨/年, 氮氧化物 1395 吨/年, 云南文山铝业有限公司电解铝分公司排污许可年排放量限值为颗粒物 316.83 吨/年, 二氧化硫 2000.39 吨/年, 氮氧化物 1356.27 吨/年。

2) 扬尘源污染。2023 年 1~4 月文山市建成区内共 53 个在建工地，部分工地存在施工场地未进行路面硬化，现场大面积裸土、堆土、水泥等易产生扬尘的粉状材料未进行全部覆盖，未对工程车辆、机械设备、渣土车辆车轮及车身进行冲洗保洁和洒水降尘等问题，工地扬尘管控不到位进一步提高建成区颗粒物超标风险。

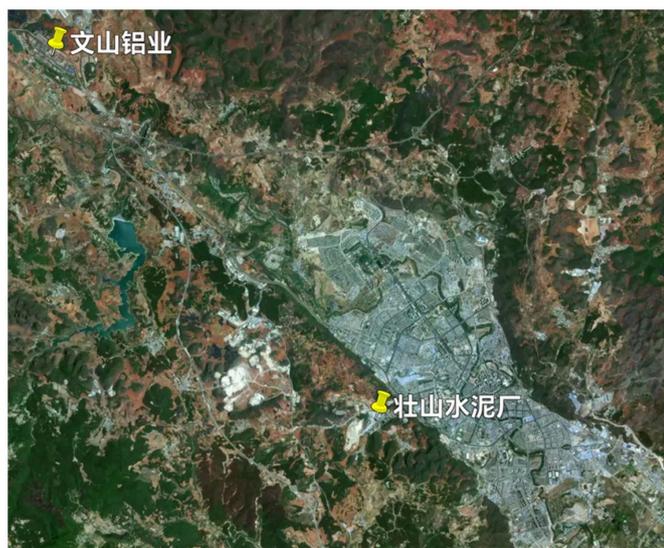


Figure 8. Location of emission enterprises
图 8. 排放企业位置

3) 农业源污染。文山市建成区周边共 4 个乡镇，分别为古木镇、追栗街乡、东山乡、马塘镇，2023 年古木镇秸秆可收集量 9120 吨，综合利用率 88%，追栗街乡秸秆可收集量 12,458 吨，综合利用率 88.28%，东山乡秸秆可收集量 9397 吨，综合利用率 90.01%，马塘镇秸秆可收集量 28,400 吨，综合利用率 82.04%，除去综合利用部分，以上 4 个乡镇共剩余未综合利用秸秆 8600 余吨，每吨玉米秸秆燃烧排放的颗粒物约为 390 ± 60 kg，若以上未综合利用秸秆被焚烧，将产生 3354~3879 吨颗粒物。

5. 研究结论

文山市是隶属于文山州的地级市，其地形是典型的坝子地形，位置距离中越边境较近，气候干湿季节分明。通过对文山市 2021 年到 2024 年的颗粒物浓度统计情况研究发现，大气 $PM_{2.5}$ 年均浓度 23 ± 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，颗粒物浓度最高值出现在 4 月，其次是 3 月。这一情况和东南亚生物质燃烧火点密集时期具有一致性。从地理因素角度分析，文山市的坝子地形极易造成地形逆温现象。从日小时颗粒物浓度变化分析，浓度最高值出现在晚上 10 时，其原因可能是由逆温现象导致。夜间风速小，同时山坡散热较快，导致四周冷空气下沉，使谷地暖空气上升，从而产生逆温现象。干季时期，来自于越南等周边地区的生物质燃烧污染可能会对文山市空气质量造成影响，同时在气象条件不利的年度，冬春季空气的湿度也会降低，从而导致颗粒物浓度上升。

6. 对策建议

(一) 积极开展人工影响天气作业。针对文山市坝子型地势污染物易聚不易散，秋冬季逆温现象污染物富集风险加大的特点，结合文山山地地貌，建议建设人工影响天气地面烟炉作业装备，在气象因素不利于污染物扩散，但云层条件有利时，开展增雨或降雨作业，加大空气湿度，稀释颗粒物污染。

(二) 建立境外传输污染的监测体系。及时了解越南地区生物质燃烧的情况,对可能会造成污染风险的天气提前进行预警,以便采取措施进行应对。

(三) 优化工业布局。由于文山市建成区坝子型城市特征,污染物不易扩散,建议文山市在新建涉及大气污染物排放量较大的企业时,避开建成区主导风向上风向,或选址在距离主城区较远位置。

参考文献

- [1] 周建琴,陶云,符睿,李蒙. 云南 2020 年 4-6 月区域性气象干旱特征和成因分析[J]. 高原气象, 2024, 43(4): 1052-1060.
- [2] 高璐. 云南春旱的变化特征、成因分析及预估[D]: [硕士学位论文]. 北京: 国家海洋环境预报中心, 2023.
- [3] 饶晓琴,张碧辉,等. 东南亚生物质燃烧对云南边境污染传输影响[J]. 中国环境科学, 2023, 43(9): 4459-4468.
- [4] 赵晨阳. 云南边境小型坝子城市大气 PM_{2.5} 理化特征及来源研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2023: 17-55.
- [5] 解明恩,姚愚,等. 影响云南空气质量的风场特征分析[J]. 中低纬山地气象, 2023, 47(2): 1-9.
- [6] 杨家康,单韬,张万诚. 云南低纬高原地区大气污染与逆温强度关系研究[J]. 灾害学, 2021, 36(4): 27-29.
- [7] <http://satsee.radi.ac.cn:8080/index.html>