

西南山区县域大气污染源排放特征

——以景谷傣族彝族自治县为例

邵捷, 肖娴, 蓝平, 范力, 周文春

云南省生态环境工程评估中心, 云南 昆明

收稿日期: 2026年1月6日; 录用日期: 2026年2月18日; 发布日期: 2026年2月25日

摘要

县域尺度大气污染源清单是实施精准、科学治污的基础, 对地形复杂、扩散条件差的山区尤为重要。本研究以云南省典型山区——景谷傣族彝族自治县为对象, 依据《大气污染物与温室气体融合排放清单编制技术指南(试行)》, 构建了2023年高分辨率大气人为污染源及温室气体排放清单。清单涵盖化石燃料固定燃烧、工艺过程、移动源、溶剂使用、农业源、扬尘、生物质燃烧、储存运输、废弃物处理及餐饮源共十大类源, 核算了SO₂、NO_x、CO、VOCs、NH₃、PM₁₀、PM_{2.5}、BC、OC及CO₂、CH₄、N₂O共12种污染物。结果表明: 2023年景谷傣族彝族自治县SO₂、NO_x、VOCs、PM_{2.5}排放总量分别为651.02、1841.60、1536.91和768.39吨。工业过程源是SO₂ (72.95%)、Nox (51.75%)、VOCs (71.35%)和PM_{2.5} (59.15%)的首要贡献源; 农业源是NH₃的绝对主导源(93.71%); 生物质燃烧对PM_{2.5} (32.88%)和OC (91.65%)贡献突出; 移动源则是CO₂ (33.20%)和Nox (28.63%)的重要来源。空间上, 工业源高度集中于威远镇、正兴镇等产业集聚区, 而农业源与生物质燃烧源则呈面状广泛分布。本研究结果有助于厘清景谷傣族彝族自治县本地大气污染物的污染源, 为境外输送影响过程下的本地污染源管控提供科学依据与决策支持。

关键词

人为源排放清单, 山区县域, 污染特征

Characteristics of Air Pollution Source Emissions in Counties of Southwest Mountainous Areas

—A Case Study of Jinggu Dai and Yi Autonomous County

Jie Shao, Xian Xiao, Ping Lan, Li Fan, Wenchun Zhou

Yunnan Province Ecological Environment Engineering Assessment Center, Kunming Yunnan

Received: January 6, 2026; accepted: February 18, 2026; published: February 25, 2026

Abstract

The county-level air pollution source list is the basis for the implementation of precise and scientific pollution control, which is especially important for mountainous areas with complex terrain and poor diffusion conditions. In this study, a typical mountainous county in Yunnan Province, Jinggu Dai and Yi Autonomous County, constructed a high-resolution atmospheric anthropogenic pollution source and greenhouse gas emission inventory in 2023 based on the “Technical Guidelines for the Compilation of Air Pollutant and Greenhouse Gas Emission Inventories (Trial)”. The list covers ten major sources, including stationary combustion of fossil fuels, processes, mobile sources, solvent use, agricultural sources, dust, biomass combustion, storage and transportation, waste treatment and catering sources, and accounts for a total of 12 pollutants such as SO₂, NO_x, CO, VOCs, NH₃, PM₁₀, PM_{2.5}, BC, OC, CO₂, CH₄, and N₂O. The results showed that the total SO₂, NO_x, VOCs, and PM_{2.5} emissions in Jinggu Dai and Yi Autonomous County in 2023 were 651.02, 1841.60, 1536.91, and 768.39 tons, respectively. Industrial process sources are the primary contributors to SO₂ (72.95%), NO_x (51.75%), VOCs (71.35%) and PM_{2.5} (59.15%). Agricultural sources were the absolute dominant source of NH₃ (93.71%). Biomass combustion contributed significantly to PM_{2.5} (32.88%) and OC (91.65%). Mobile sources are an important source of CO₂ (33.20%) and NO_x (28.63%). Spatially, industrial sources are highly concentrated in industrial agglomeration areas such as Weiyuan Town and Zhengxing Town, while agricultural sources and biomass combustion sources are widely distributed. The results of this study are helpful to clarify the pollution sources of local air pollutants in Jinggu Dai and Yi Autonomous County, and provide a scientific basis and decision-making support for the control of local pollution sources under the influence of overseas transportation.

Keywords

Anthropogenic Emission Inventory, Mountainous Counties, Pollution Characteristics

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

大气污染源排放清单是环境管理中的核心数据基础，它系统性地集数据整合、来源识别、机理剖析与策略支撑于一体，为制定科学的大气污染防治措施与应急预案提供关键依据[1]-[3]。“十四五”及未来的大气治理，核心在于通过结构优化、协同控制、精准施策和系统治理，实现空气质量持续改善与经济社会绿色低碳发展的深度融合。在此背景下，构建高分辨率、高准确度的大气污染源及温室气体排放清单，是识别关键源、量化贡献率、制定精准减排策略的科学前提[4] [5]。

按照国家相关政策要求，现有排放清单研究多集中于京津冀、长三角、珠三角等城市群或省级尺度[6] [7]。云南省仅昆明市系统地进行过人为源清单的编制工作[8]，对于其他地区，尤其是地形地貌复杂、气象条件特殊、经济结构独特的西南山区县域关注不足[9]。这些地区往往具有典型的“坝子”地形，空气流通性差，污染物易累积；同时，产业结构中农业、林业、特色加工业占比较高，污染源构成与平原城市差异显著[10]。云南省景谷傣族彝族自治县(以下简称“景谷县”)是此类地区的典型代表。该县位于横断山脉南端，城区呈“V”字形低洼坝子地形，扩散条件先天不利。近年来，其空气质量在全省排名靠后，春季 PM_{2.5} 与 O₃ 复合污染问题突出[11]，受东南亚区域生物质燃烧影响较大，本次污染防控应对难度大，缺乏精细化防控的基础。

因此,本研究以景谷傣族彝族自治县为案例,系统构建 2023 年大气污染源排放清单,旨在厘清县域尺度各类污染源对主要大气污染物及温室气体的贡献特征;同时识别本地可能影响空气质量的关键行业与重点区域,为提升区域大气环境精准、科学治理及污染应对水平提供支撑。

2. 研究方法数据来源

2.1. 研究区域及对象

景谷傣族彝族自治县地处云南省西南部,东经 100°02'~101°07'、北纬 22°49'~23°52',总面积 7518.10 平方公里,属亚热带季风气候。县境总体地势由北向南倾斜,山川相间,城区位于威远镇,地形封闭,年均风速仅 1.89 m/s,静风频率较高,不利于污染物水平扩散。2023 年,全县实现地区生产总值 142 亿元,主导产业包括林浆纸、制糖、水泥制造、农产品加工等,规模以上工业企业 30 家。2023 年空气质量优良天数比例为 95.89%,轻度污染 15 天,首要污染物为 PM_{2.5} 和 O₃,污染过程集中发生于春季,受春季东南亚生物质燃烧影响较大。

为识别区域本地源大气污染物排放情况,厘清本地及外部传输污染贡献奠定基础,本研究以 2023 年为基准年,参照《城市空气污染物排放清单编制技术手册》(以下简称《手册》)[12]、《大气污染物与温室气体融合排放清单编制技术指南(试行)》(以下简称《指南》)[13]及其他生态环境部编制发布的清单编制指南,研究对象包括 SO₂、NO_x、CO、VOCs、NH₃、PM₁₀、PM_{2.5}、BC、OC、CO₂、CH₄ 和 N₂O 共 12 种污染物。核算排放源包括化石燃料固定燃烧源、工艺过程源、移动源、溶剂使用源、农业源、扬尘源、生物质燃烧源、储存运输源、废弃物处理源和其他排放源(主要指餐饮油烟) 10 类排放源。

2.2. 数据来源及核算方法

排放特征核算采用自下而上为主、自上而下为辅的因子系数法,核心公式如下:

$$E_i = A \times EF_i \times (1 - \eta) \quad (1)$$

其中, A 为活动水平数据(如燃料消耗量、产品产量、行驶里程等); EF_i 为污染物 i 的排放因子,主要参照《手册》《指南》; η 为污染控制设施的去除效率。

活动水平数据主要来源于统计年鉴、生态环境部门的企业环境统计与排污许可数据库以及住建、公安交管、农业农村等职能部门提供数据及调研数据,对于部分缺失数据,结合县区实际情况,采用类比调查、文献参考及专家咨询进行合理补充。

3. 结果与讨论

3.1. 污染物排放总量

根据上述方法及数据,核算 2023 年景谷傣族彝族自治县大气污染物及温室气体人为排放清单如表 1 所示。

Table 1. 2023 Human-caused pollution emission inventory for Jinggu Dai and Yi autonomous county (Unit: t)

表 1. 2023 年景谷傣族彝族自治县人为源污染源排放清单(单位: t)

源分类	化石燃料固定燃烧源	工艺过程源	移动源	溶剂使用源	农业源	扬尘源	生物质燃烧源	储存运输源	废弃物处理源	其他排放源(餐饮)	合计
SO ₂	73.12	474.92	21.5	—	—	—	81.48	—	—	—	651.02

续表

NO _x	49.05	953	527.31	—	—	—	312.24	—	—	—	1841.6
CO	1425.22	5795.91	1794.94	—	—	—	2195.02	—	—	—	11211.08
VOCs	32.07	1096.63	19.47	105.27	—	—	266.59	6.94	0.007	9.94	1536.91
NH ₃	—	1.22	28.46	—	2038.05	—	43.33	—	63.82	—	2174.88
PM ₁₀	17.04	553.18	13.48	—	—	118.54	209.31	—	—	14.2	925.75
PM _{2.5}	13.02	454.5	12.69	—	—	24.16	252.66	—	—	11.36	768.39
BC	0.04	4.05	5.79	—	—	—	19.62	—	—	0.23	29.74
OC	—	4.01	1.59	—	—	—	148.71	—	—	7.95	162.26
CO ₂ (*10 ⁴)	24.96	25.75	27.73	—	—	—	5.10	—	—	—	83.55
CH ₄	—	—	28.51	—	4831.94	—	—	46.57	10.45	—	4917.46
N ₂ O	0.003	—	21.38	—	135.89	—	—	—	1.57	—	158.84

根据上述结果可知，景谷傣族彝族自治县 2023 年大气污染源排放清单结果：SO₂ 为 651.02 吨、NO_x 为 1841.60 吨、CO 为 11211.08 吨、VOCs 为 1536.91 吨、NH₃ 为 2174.88 吨、PM₁₀ 为 925.75 吨、PM_{2.5} 为 768.39 吨、BC 为 29.74 吨、OC 为 162.26 吨、CO₂ 为 83.55 万吨、CH₄ 为 4917.46 吨、N₂O 为 158.84 吨。

3.2. 排放结构与特征

景谷傣族彝族自治县各污染物不同种类占比见图 1。

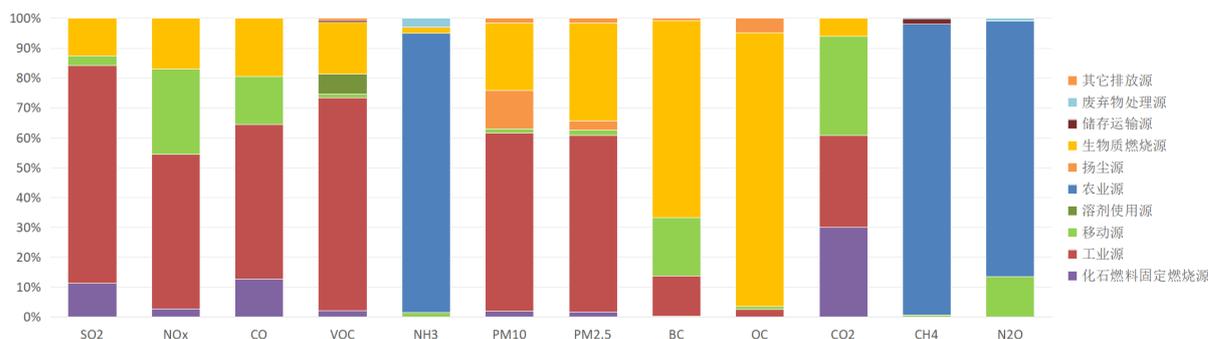


Figure 1. Proportion of pollutants emitted by various pollution sources in Jinggu Dai and Yi autonomous county

图 1. 景谷傣族彝族自治县各类污染源排放污染物占比

(1) 工艺过程源是 SO₂、NO_x、一次颗粒物和 VOCs 的绝对主导来源，同时也是 CO 和 CO₂ 的重要贡献者。其中工业排放 SO₂ 占比 72.95%、NO_x 占比 51.75%、VOCs 占比 71.35%、PM₁₀ 占比 59.75%、PM_{2.5} 占比 59.15%。区域的工业贡献行业主要包括水泥制造、造纸和纸制品业、制糖业、林产化学产品制造、砖瓦石材等建筑材料制造等。

(2) 农业源贡献了 93.71% 的 NH₃ 排放，主要来自畜禽养殖和氮肥施用。在西南山区高湿、静稳的气象条件下，大量的 NH₃ 极易与酸性气体(SO₂、NO_x)反应生成硫酸铵、硝酸铵等二次无机盐，是提高 PM_{2.5} 浓度的重要驱动力[14]。

(3) 生物质燃烧源(包括工业锅炉和秸秆露天焚烧)对 PM_{2.5}、OC (有机碳)和 CO 的贡献率分别高达 32.88%、91.65%和 19.59%。尤其在春季的污染时段，生物质开放燃烧很可能是导致 PM_{2.5} 浓度急剧升高

的重要诱因。

(4) 移动源是 NO_x 和 CO_2 的第二大贡献源，同时也是 N_2O 的重要来源。这表明在推进交通领域减污降碳协同增效方面具有较大潜力。

(5) 生物质燃烧源对细颗粒物的贡献占比达到了 32.88%，同时对 VOCs 的贡献占比达到 17.35%，在春季外源输入的不利大环境下，与工业排放叠加，是 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度峰值形成的主要原因。

3.3. 重点行业与空间分布

基于地理坐标，利用 GIS 对景谷傣族彝族自治县重点源污染物排放量进行空间分配，识别重点工业源大气污染物排放空间分布情况(见图 2)。可知威远镇及正兴镇 SO_2 和 NO_x 排放相对较高，水泥及造纸行业是主要排放来源。水泥、石灰和石膏制造是景谷傣族彝族自治县 CO 的主要来源，博尚镇 VOCs 排放量较高，主要来源于造纸及制糖行业，颗粒物排在正兴镇较高，主要为水泥，造纸及砖瓦、石材等建筑材料制造生产排放。

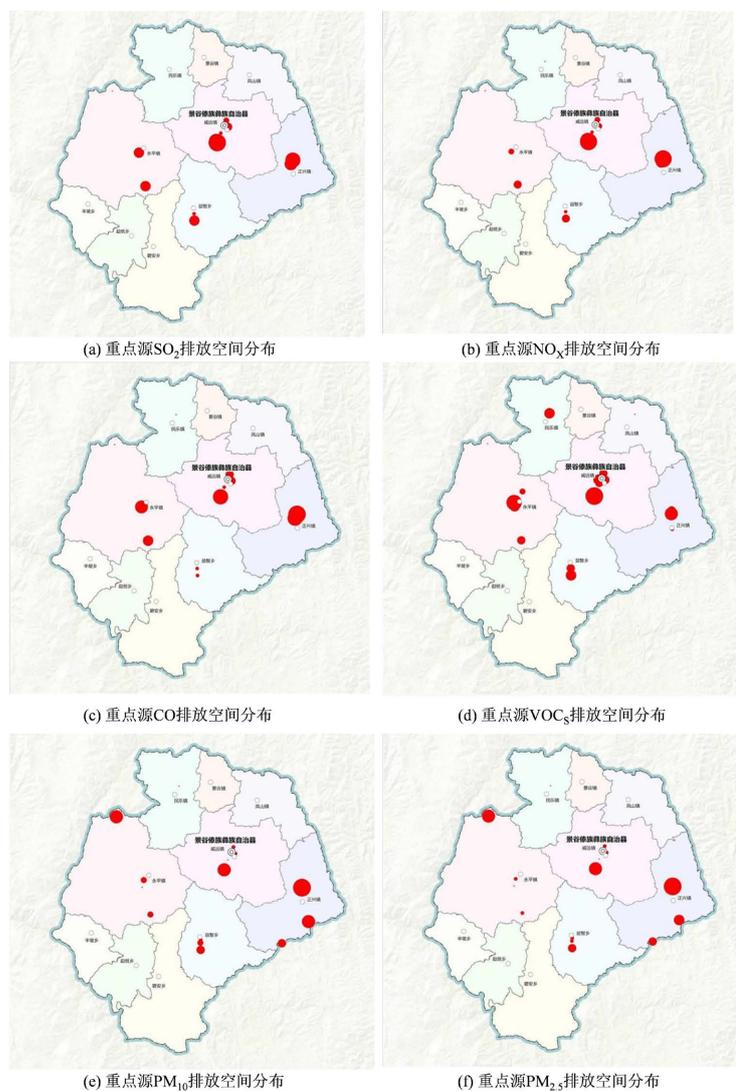


Figure 2. Spatial distribution of key pollution sources in Jinggu Dai and Yi autonomous county
图 2. 景谷傣族彝族自治县重点污染源空间分布情况

3.4. 不确定性分析与讨论

本次研究过程中不可避免地存在一定的不确定性,主要来自核算方法、活动水平的获取和排放因子的选取。化石燃料燃烧及工业源主要利用全国第二次污染源普查及排污许可的执行数据按照点源方式获取,但仍然存在填报的误差或者偏差,与实际活动水平无法完全相符;同时县域因非工业溶剂、非道路移动源及民用源等方面统计基础薄弱,存在部分核算缺失或估算偏差。活动水平数据方面,缺乏本地化实测因子,依赖指南推荐值可能不完全符合实际情况。同时,面源采用乡镇级统计数据分配到更精细网格时,会引入空间代表性误差[14]-[17]。

尽管如此,本次研究通过整合多部门数据、采用国家规范方法并进行了多轮质控,其结果能够可靠地反映景谷傣族彝族自治县污染排放的总体结构、主要矛盾和空间态势,满足为宏观决策提供科学依据的要求。但也建议县域后续加强数据统计基础,逐步建立本地化因子库,定期进行清单的更新及源解析相关工作。

4. 结论

(1) 景谷傣族彝族自治县 2023 年化石燃料固定燃烧源、工艺过程源、移动源、溶剂使用源、农业源、扬尘源、储存运输源、生物质燃烧源、废弃物处理源及其他排放源(餐饮业)等 10 类排放源的各类大气污染物的排放总量分别 SO_2 为 651.02 吨、 NO_x 为 1841.60 吨、CO 为 11211.08 吨、VOCs 为 1536.91 吨、 NH_3 为 2174.88 吨、 PM_{10} 为 925.75 吨、 $\text{PM}_{2.5}$ 为 768.39 吨、BC 为 29.74 吨、OC 为 162.26 吨、 CO_2 为 83.55 万吨、 CH_4 为 4917.46 吨、 N_2O 为 158.84 吨。

(2) 工艺过程源是 SO_2 、 NO_x 、VOCs 和一次 $\text{PM}_{2.5}$ 的绝对主要来源;农业源是 NH_3 的绝对主导源;生物质燃烧是 $\text{PM}_{2.5}$ 和 OC 的关键贡献源。

(3) 空间上,重点污染源排放呈现明显的点源集聚特征,主要集中在威远镇、正兴镇及永平镇。

(4) 本次人为源清单核算存在一定的不确定性,建议县域后续加强数据统计基础,逐步建立本地化因子库,定期进行清单的更新及源解析相关工作。

参考文献

- [1] Streets, D.G., Bond, T.C., Carmichael, G.R., Fernandes, S.D., Fu, Q., He, D., *et al.* (2003) An Inventory of Gaseous and Primary Aerosol Emissions in Asia in the Year 2000. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **108**, 8809. <https://doi.org/10.1029/2002jd003093>
- [2] Li, K., Jacob, D.J., Liao, H., Shen, L., Zhang, Q. and Bates, K.H. (2018) Anthropogenic Drivers of 2013-2017 Trends in Summer Surface Ozone in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **116**, 422-427. <https://doi.org/10.1073/pnas.1812168116>
- [3] 周子航, 邓也, 谭钦文, 等. 四川省人为源大气污染物排放清单及特征[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5344-5358.
- [4] Zheng, B., Tong, D., Li, M., Liu, F., Hong, C., Geng, G., *et al.* (2018) Trends in China's Anthropogenic Emissions since 2010 as the Consequence of Clean Air Actions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **18**, 14095-14111. <https://doi.org/10.5194/acp-18-14095-2018>
- [5] 薄宇, 周洪, 贾紫牧, 等. 全球大气污染物和温室气体融合排放清单研究趋势分析[J/OL]. 中国环境科学, 1-14. <https://link.cnki.net/doi/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20250818.006>, 2026-01-05.
- [6] Wu, R., Bo, Y., Li, J., *et al.* (2022) Method to Establish the Emission Inventory of Anthropogenic Air Pollutants and CO_2 in China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **22**, 8385-8400.
- [7] 王书肖, 等. 中国大气污染源排放清单编制技术进展与展望[J]. 环境科学研究, 2022, 35(1): 1-12.
- [8] 刘展芸, 龚元均, 陈云波, 等. 昆明市人为源大气污染物排放清单研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2025, 61(2): 301-313.
- [9] 张强, 等. 西南地区大气污染特征与成因研究进展[J]. 地球科学进展, 2020, 35(10): 1012-1024.

-
- [10] 云南省生态环境厅. 云南省“十四五”生态环境保护规划[EB/OL]. https://www.yn.gov.cn/zttg/ynghgkzl/sjqtgh/zxgh/202205/t20220505_241696.html, 2022-05-05.
- [11] 普洱市生态环境局景谷分局. 景谷傣族彝族自治县 2023 年环境空气质量分析报告[R]. 2024.
- [12] 生态环境部. 大气污染物与温室气体融合排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. 北京: 环办大气函〔2024〕28 号. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk06/202401/t20240130_1065242.html, 2024-01-30.
- [13] 清华大学. 城市大气污染源排放清单编制技术手册[M]. 北京: 中国环境出版社, 2020.
- [14] Liu, M., Huang, X., Song, Y., Tang, J., Cao, J., Zhang, X., *et al.* (2019) Ammonia Emission Control in China Would Mitigate Haze Pollution and Nitrogen Deposition, but Worsen Acid Rain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **116**, 7760-7765. <https://doi.org/10.1073/pnas.1814880116>
- [15] 祝胜男, 赵帝, 李一倬, 等. 沈阳市人为源大气污染物排放清单研究[J]. 环境保护科学, 2023, 49(2): 105-111+125.
- [16] 李会杰, 闫帅磊, 胡少倩. 邢台市工业燃烧源大气污染物排放清单及特征[J]. 绿色科技, 2023, 25(12): 99-104.
- [17] 杨继荣, 许晓霞. 大气污染源排放清单与污染特征研究——以张掖市为例[J]. 甘肃科技, 2025, 41(1): 47-54+58.