

沙尘影响下干旱区城市大气环境质量变化趋势——以库尔勒市为例

买尔哈巴·帕热哈提 赵琦 (通讯作者)

巴音郭楞生态环境监测站, 中国·新疆 库尔勒 841000

摘要: 库尔勒市属干旱区, 大气受沙尘显著影响。基于 2016—2025 年监测数据, 分析污染物时空变化。2025 年优良率 63.3% (降 13.5 个百分点), PM_{10} 年均 $184 \mu g/m^3$ (升 33.3%), $PM_{2.5}/PM_{10}=0.21$, 沙尘天 227 天 (增 82 天)。棉纺厂 PM_{10} 最高 ($204 \mu g/m^3$), 开发区叠加工业与戈壁输送。“十四五” PM_{10} 呈降—升—降—升, 2025 年峰值 $207 \mu g/m^3$, 自然因素主导。治理应强化人为源管控与沙尘生态联防。

关键词: 库尔勒; 大气环境质量; PM_{10} ; 沙尘天气; 干旱区

Trends in urban air quality in arid regions under dust storm influence: A case study of Korla City

Mai er ha ba · Pa re ha ti, Zhao Qi (Corresponding author)

Bayingolin Ecological Environment Monitoring Station, China Xinjiang Korla 841000

Abstract: Korla City is located in an arid area and is significantly influenced by dust. Based on the monitoring data from 2016 to 2025, the temporal and spatial variations of pollutants were analyzed. In 2025, the excellent rate was 63.3% (decreased by 13.5 percentage points), the annual average PM_{10} was $184 \mu g/m^3$ (increased by 33.3%), the ratio of $PM_{2.5}$ to PM_{10} was 0.21, and the number of dust days was 227 (increased by 82 days). The PM_{10} level at the cotton textile factory was the highest ($204 \mu g/m^3$), and the development zone combined industrial and Gobi transportation. The PM_{10} level during the "14th Five-Year Plan" period showed a pattern of decrease - increase - decrease - increase, with a peak of $207 \mu g/m^3$ in 2025, and natural factors dominated the governance. The control should strengthen the management of anthropogenic sources and the ecological joint prevention against dust.

Keywords: Korla; Atmospheric environmental quality; PM_{10} ; Dusty weather; Arid area

0 引言

大气环境质量是区域可持续发展的重要表征。干旱区绿洲城市同时受人为排放与自然沙尘过程双重制约, 污染成因具有特殊性。库尔勒市南距塔克拉玛干沙漠仅 70 km, 属典型干旱大陆性气候, 为研究沙尘影响下大气环境演变的典型样本。根据 2021—2025 年空气质量监测数据, 从污染物浓度、时空分布、沙尘影响及趋势变化等维度展开系统分析, 揭示了干旱区绿洲城市大气环境质量的变化规律与主导驱动因素, 为区域大气污染防治提供科学依据。

1 研究区概况与监测分析方法

1.1 监测点位布设与数据构成

库尔勒市空气质量自动监测系统于 2004 年 8 月建成运行, 共设孔雀公园站、州棉纺厂站、经济开发区站三个国控监测子站, 监测指标涵盖 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 六项常规污染物及气象五参数, 实行全年 24 小时连续监测。监测仪器由中晟泰科提供, 运维单位先后

经历三次变更, 目前由河南省鑫属实业有限公司承担。本研究采用三个站点 2021—2025 年的逐日监测数据, 并辅以巴州各县市同期空气质量数据进行区域对比分析。

1.2 评价标准与统计方法

污染物浓度统计与评价依据《环境空气质量标准》(GB 3095—2012) 及《环境空气质量评价技术规范》(HJ 663—2013) 执行; 空气质量指数 (AQI) 计算及级别划分依据《环境空气质量指数 (AQI) 技术规定 (试行)》(HJ 633—2012); 沙尘天气影响天数的判定参照中国环境监测总站发布的技术规范。变化趋势分析采用同比比较法, 以 2024 年为基准年计算各指标的年度变化幅度。

2 库尔勒市空气质量现状与站点分异特征

2.1 全市空气质量总体特征

“十四五”期间, 以 2025 年为例, 库尔勒市环境空气质量监测总天数为 365 天, 全年空气质量优良天数为 231 天, 优良率为 63.3%, 与上年相比下降 13.5 个百分

点。2023 年优良天数 220 天，优良率为 60.3%（期间最低），2024 年优良天数为 281 天，优良率 76.8%（期间最高）。从污染级别分布来看，轻度污染天数 65 天（占 17.8%），较上年上升 5.2 个百分点；中度污染天数 22 天（占 6.0%），较上年上升 2.5 个百分点；重度污染天数 16 天（占 4.4%），与上年持平；严重污染天数 30 天（占 8.2%），较上年上升 6.0 个百分点。空气质量分级比例呈现出优良率下降、污染天数上升的总体态势。

从主要污染物浓度水平来看，2025 年库尔勒市 SO_2 平均浓度为 $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较上年上升 20.0%； NO_2 平均浓度为 $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较上年下降 8.7%；CO 平均浓度为 $0.4 \text{mg}/\text{m}^3$ ，与上年持平； O_3 日最大 8 小时平均浓度为 $91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较上年下降 4.2%； $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度为 $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较上年上升 5.6%； PM_{10} 平均浓度为 $184 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较上年大幅上升 33.3%。空气质量综合指数为 5.28，较上年的 4.64 上升 13.8%。在全国 338 个城市中排名第 334 位，在全疆 16 城市中排名第 14 位，表明库尔勒市空气质量在全国及全疆范围内均处于较差水平。扣除沙尘天气影响后， $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度为 $20.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较上年（ $25.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）下降 18.8%； PM_{10} 平均浓度为 $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较上年（ $74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）下降 18.9%。 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值仅为 0.21，远低于一般城市水平，表明 PM_{10} 是影响库尔勒市空气质量的主要因素，且其主要来源为沙尘等粗颗粒物而非人为燃烧源排放的细颗粒物^[1]。

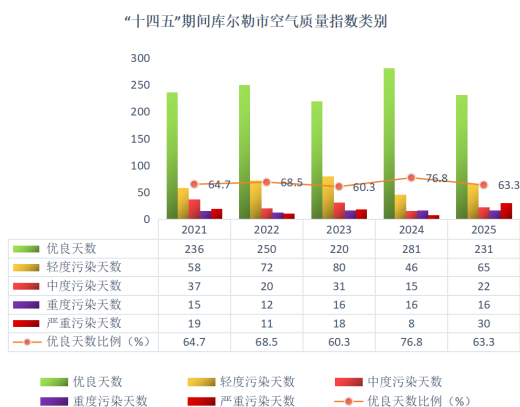


图1 “十四五”期间库尔勒市空气质量指数类别图

2.2 各监测站点污染物空间分异

三个国控自动监测站点的污染物浓度呈现明显的空间分异特征。孔雀公园站点 2025 年 PM_{10} 平均浓度为 $176.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较上年上升 45.4%； $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度为 $42.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较上年上升 6.6%； SO_2 平均浓度为 $6.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较上年上升 $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ； NO_2 平均浓度为 $25.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较上年下降 $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。该站点 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值为 0.24，风玫瑰图分析显示，东风方向时 PM_{10} 污染源少且扩散条件较好，西南风方向则相反。

州棉纺厂站点 PM_{10} 平均浓度为 $204 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较上年上升 53.8%，为三个站点中最高； $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度为 $39.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较上年上升 2.2%； SO_2 平均浓度为 $4.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ， NO_2 平均浓度为 $23.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。该站点 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值为 0.19，为三站最低，说明粗颗粒物污染特征最为突出。风玫瑰图显示，西南偏南至东南方向（ $180^\circ - 90^\circ$ 区间）是该站点 PM_{10} 污染最严重的风向，高浓度天气出现频次较高；西北至东北方向（ $270^\circ - 0^\circ$ 区间）扩散条件较好。

经济开发区站点 PM_{10} 平均浓度为 $132.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较上年下降 6.6%，为三站中唯一下降的站点； $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度为 $34.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较上年下降 0.6%； SO_2 平均浓度为 $5.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较上年上升 $1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ； NO_2 平均浓度为 $13.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，为三站最低。该站点 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值为 0.26，为三站最高。风玫瑰图分析表明，东北偏东到正东方向是 PM_{10} 污染最显著的风向，工业排放、工地扬尘及东部戈壁沙尘输送是主要成因；高浓度区域主要出现在中等风速区间，风速过高时污染物反而因快速扩散而浓度降低^[2]。

三个站点的对比分析揭示了一个重要规律：距离塔克拉玛干沙漠越近、处于下风向的站点， PM_{10} 浓度越高（州棉纺厂 > 孔雀公园 > 经济开发区），反映了沙尘输送的空间梯度效应。

2.3 沙尘天气的影响分析

“十四五”期间，库尔勒市受沙尘影响天数如下，2021 年受沙尘影响天数共计 128 天，同比增加 34 天；2022 年受沙尘影响天数共计 141 天，同比增加 13 天；2023 年受沙尘影响天数共计 178 天，同比增加 34 天；2024 年受沙尘影响天数共计 145 天，同比减少 33 天。2025 年受沙尘影响天数共计 227 天，同比增加 82 天，增幅达 56.6%，全年重度污染天数 16 天（占 4.4%），均为沙尘天气所致。沙尘天气的频发直接推高了 PM_{10} 浓度，是 2025 年空气质量恶化的最直接原因。



图2 “十四五”期间库尔勒市沙尘天数对比图

2.4 主要污染物年际波动与周期对比特征

“十三五”至“十四五”期间，库尔勒市环境空气以“沙尘型”污染为主，首要污染物为 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 。 PM_{10} 年均浓度呈明显年际波动：2016 年为 $184 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，2017

年降至 $123 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (期间最低), 2018 年为 $154 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2019 年为 $165 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2020 年为 $148 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2021 年为 $158 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2022 年降至 $146 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2023 年升至 $172 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2024 年为 $138 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2025 年升至 $207 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (期间最高)。PM_{2.5} 变化趋势类似, 由 2016 年 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 波动至 2025 年 $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 期间最低为 2024 年 $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。SO₂ 从 $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至 $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 呈缓慢下降; NO₂ 从 $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至 $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 下降明显; CO 从 $1.0 \text{mg}/\text{m}^3$ 下降至 $0.5 \text{mg}/\text{m}^3$, 2017 年上升至 $1.4 \text{mg}/\text{m}^3$ (期间最高), 呈先上升再下降趋势; O₃ 从 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 上升至 $95 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 呈缓慢上升。

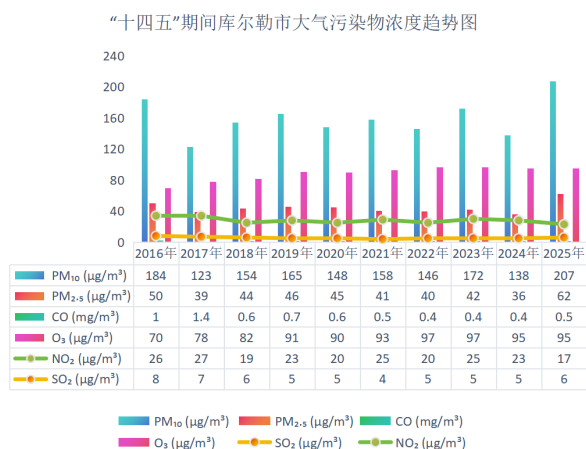


图3 “十四五”期间库尔勒市环境大气污染物浓度对比

3 库尔勒市空气质量变化的自然与人为因素及治理启示

3.1 沙尘天气对颗粒物浓度的主导作用

2025 年库尔勒市沙尘影响天数达 227 天, 占全年 62% 以上。PM_{2.5}/PM₁₀ 仅为 0.21, 明显低于东部城市 0.5—0.7 的水平, 表明 PM₁₀ 主要来自沙尘等自然源。剔除沙尘影响后, PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度同比分别下降 18.9% 和 18.8%, 进一步说明沙尘过程是当年空气质量恶化的直接原因。巴州沙尘天气空间上呈自北向南、自东向西递增, 南五县市频次远高于焉耆盆地北四县。且末县 PM₁₀ 年均浓度达 $463 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 优良率仅 33.0%, 反映出自然地理条件对颗粒物浓度的刚性约束。

3.2 人为排放叠加与年际波动归因

自然沙尘主导背景下, 人为排放仍产生叠加影响。经济开发区站点东北偏东方向 PM₁₀ 污染明显偏高, 与工业排放和施工扬尘有关; 冬季燃煤取暖加重颗粒物积累, 机动车尾气对 NO₂ 仍有贡献。Spearman 相关分析显示, O₃ 与生产总值、第二产业相关系数分别为 0.78 和 0.77, 表明经济活动对二次污染物生成具有驱动作用。对比“十四五”期间年际变化, 2024 年 PM₁₀ 为 $138 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、PM_{2.5} 为

$36 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 沙尘少、降水多; 2025 年 PM₁₀ 升至 $207 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、PM_{2.5} 升至 $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 沙尘重、降水少。这一差异说明自然气候波动是空气质量年际变化的首要控制因子, 人为减排成效易被掩盖。

3.3 自然约束下的污染防治路径

库尔勒市大气治理面临自然本底差与人为排放叠加的双重压力。“十四五”期间实施的工业深度治污、能源清洁转型、扬尘管控、移动源治理、VOCs 攻坚、区域联防、沙尘生态治理和智慧监管等措施, 受沙尘跨区域输送和气候波动影响, 部分效果被抵消^[3]。后续应重点推进荒漠化防治与绿洲防护林建设, 降低沙尘起尘量; 完善巴州及周边区域沙尘天气协同应对机制; 提高空气质量预测预警能力, 为应急减排提供支撑; 同时结合气候变化背景, 研究干旱区降水格局变化对沙尘活动的影响, 为长期空气质量改善提供依据。

4 结语

综上所述, 2025 年库尔勒市优良率降至 63.3%, 下降 13.5 个百分点; PM₁₀ 浓度上升 33.3%, PM_{2.5}/PM₁₀ 比值仅 0.21, 粗颗粒物污染主导。沙尘天气为恶化主因, 影响 227 天, 增 82 天, 16 天重度污染均由沙尘引发, 自然源控制力远超人为。空间上, 州棉纺厂 PM₁₀ 最高, 经开区因工业与沙尘叠加, 需分类治理。“十四五”期间 PM₁₀ 波动上升, 2025 年峰值, 年际变化受沙尘频次和降水驱动, 人为减排被自然变率掩盖, 凸显治理体系脆弱性。未来改善需深化工业、扬尘、移动源治理, 强化沙尘生态修复与区域联防联控, 构建自然防控与人为管控协同体系, 以削弱自然干扰, 确保空气质量稳步提升。这是克服自然波动、实现长期达标的关键所在。

参考文献:

- [1] 李晶晶, 何清, 张海亮等. 塔克拉玛干沙漠南缘沙尘气溶胶的垂直分布及其传输特征[J]. 中国环境科学, 2025, 45 (04): 1844-1857.
- [2] 张宏升, 李晓岚. 沙尘天气过程起沙特征的观测试验和参数化研究进展[J]. 气象学报, 2014(05): 987-1000.
- [3] 尚丽萍, 王天河. 西北地区大气环境中沙尘气溶胶的时空变化特征[J]. 甘肃科技, 2018, 34 (16): 19-22.

作者简介: 买尔哈巴·帕热哈提 (1997.10-), 女, 维吾尔族, 新疆轮台人, 助理工程师, 大学本科, 研究方向: 从事生态环境监测地表水、地下水、湖库中阴离子监测分析研究。

通讯作者: 赵琦 (1988.11-), 女, 汉族, 甘肃陇西人, 高级工程师, 硕士研究生, 研究方向: 从事环境监测评价的研究。