

丹江口市城区 PM_{2.5} 污染特征与来源解析

凌晓宇¹ 王 宏² 周开智²

1.丹江口生态环境保护综合执法大队 湖北 十堰 丹江口 442700

2.湖北省生态环境厅十堰生态环境监测中心 湖北 十堰 442000

【摘 要】：为明确南水北调核心水源地丹江口市 PM_{2.5} 污染特征及来源，本研究于 2022 年春夏秋冬四季在城区开展走航监测与点位采样，结合气溶胶激光雷达、多组分空气质量监测仪及 PMF 受体模型，系统分析了 PM_{2.5} 时空分布规律、与其他污染物的相关性及来源贡献。研究结果可为丹江口市及同类山区库区城市的大气污染精准管控提供科学支撑。

【关键词】：PM_{2.5}；污染特征；来源解析；PMF 模型；丹江口市

DOI:10.12417/2811-0536.26.08.019

引言

丹江口市作为南水北调中线工程核心水源地，独特山地库区小气候使其大气污染防治直接关乎供水安全。当前针对该地的研究多聚焦库区水环境，城区 PM_{2.5} 污染特征与来源的系统研究尚属空白。本研究于 2022 年开展城区四季走航监测与点位采样，结合多源数据与受体模型，解析不同季节、气象条件下 PM_{2.5} 变化规律及来源，提出减排对策，为本地治理及同类山区库区城市管控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 监测方案

本研究在丹江口市城区设置 2 个省控监测点位：沙陀营路位于老城区核心区域，周边以居民区、商业区和交通干道为主，代表建成区人类活动密集区污染特征；武当大道位于新城区，邻近白果树化工园区，代表城区上风向背景及产业集中区污染特征。两个点位均严格按照《环境空气质量监测规范（试行）》要求布设，周边 50m 范围内无明显局地污染源，监测数据可代表城区整体空气质量水平^[1]。

研究采用“定点监测+走航溯源”相结合的监测方案：①定点监测：2022 年 1 月 1 日-12 月 31 日，两个点位连续监测 PM_{2.5}、PM₁₀、O₃、NO₂、SO₂、CO 等常规 6 项污染物，时间分辨率为 1h，监测方法严格遵循《环境空气质量标准》（GB3095-2012）要求；②走航监测：分别于 2022 年 4 月（春季）、7 月（夏季）、10 月（秋季）、12 月（冬季）开展为期 5 天/季的走航监测，走航车搭载气溶胶激光雷达，监测路径覆盖重点工业园区、主干道、建筑施工场地、餐饮油烟聚集区及省控站点周边 500m 缓冲区，走航速度控制在 20~30km/h，获取高时空分辨率的污染物分布数据。

1.2 源解析方法

本研究采用正定矩阵因子分解模型（PMF）开展 PM_{2.5} 来源解析，是目前应用最广泛的源解析方法之一^[2-3]。研究根据丹江口市污染源排放特征，结合组分示踪物，最终解析出企业排放、道路积尘、道路扬尘、工地扬尘、餐饮油烟、散煤燃烧、汽修污染 7 类本地源及 1 类外来源，模型运算的 Q 值与理论 Q 值相对偏差 <10%，解析结果可靠。

2 结果与讨论

2.1 大气污染物时空变化特征

2.1.1 年际变化特征

对比 2020-2022 年两个站点的空气质量数据，丹江口市城区 PM_{2.5} 浓度呈小幅上升趋势：沙陀营路站 2020、2021、2022 年 1-4 月 PM_{2.5} 浓度分别为 49、53、56μg/m³，年增长率约 4.7%；武当大道站同期 PM_{2.5} 浓度分别为 42、46、50μg/m³，年增长率约 5.9%，略高于老城区，推测与武当大道附近区域道路修建、工地施工产生的扬尘有关。PM₁₀ 浓度呈现先升后降特征，2021-2022 年两个站点 PM₁₀ 浓度均出现回落，沙陀营路站 1-4 月 PM₁₀ 从 2021 年的 95μg/m³ 降至 2022 年的 87μg/m³，降幅 8.42%；武当大道站同期从 97μg/m³ 降至 92μg/m³，降幅 5.15%，表明近年来丹江口市扬尘管控工作已取得初步成效。

O₃ 浓度呈现显著上升趋势，2020-2022 年两个站点 O₃ 浓度均出现跳跃式增长：沙陀营路站 1-7 月 O₃ 浓度从 2021 年的 125μg/m³ 升至 2022 年的 164μg/m³，增幅达 31.2%；武当大道站同期从 161μg/m³ 升至 175μg/m³，增幅 8.7%，老城区 O₃ 增幅显著高于新城区，主要与老城区车流量大、NO_x 和 VOCs 排放强度高有关。SO₂ 浓度整体呈下降趋势，沙陀营路站 1-10 月 SO₂ 浓度从 2021 年的 13μg/m³ 降至 2022 年的 12μg/m³。

m³，降幅 7.69%，表明燃煤污染管控成效显著。NO₂ 浓度呈现主城区下降、老城区上升的分化特征：武当大道站 1-7 月 NO₂ 从 2021 年的 18μg/m³ 降至 2022 年的 16μg/m³，降幅 11.11%，主城区移动源管控成效显著；沙陀营路站同期从 24μg/m³ 升至 25μg/m³，升幅 4.17%，与老城区机动车保有量持续增长有关。CO 浓度整体呈下降趋势，武当大道站 1-4 月 CO 从 2021 年的 1.6mg/m³ 降至 2022 年的 1.3mg/m³，降幅 18.75%，移动源减排效果显著。

2.1.2 季节变化特征

丹江口市城区 PM_{2.5} 浓度呈现明显的季节差异，表现为春季>冬季>秋季>夏季。春季浓度最高主要与北方沙尘传输及春季气温回升、土建工程集中开工导致扬尘排放增加有关；冬季受逆温频次高、污染物扩散条件差影响，PM_{2.5} 浓度次高；夏季受降水增多、大气扩散条件好影响，PM_{2.5} 浓度相对较低。O₃ 浓度呈现夏季>秋季>春季>冬季的季节特征，与夏季温度高、光照强，光化学反应活跃密切相关。NO₂ 和 CO 浓度呈现冬季>春季>秋季>夏季的特征，与冬季机动车怠速时间长、扩散条件差有关。SO₂ 浓度季节差异较小，整体维持在较低水平，表明燃煤污染已得到有效控制。

2.1.3 日变化特征

对 2022 年小时监测数据进行统计分析，丹江口市城区 PM_{2.5} 浓度日变化呈现明显的双峰特征（见图 1）：第一个峰值出现在早高峰 7:00-9:00，主要受机动车尾气排放、道路扬尘影响；第二个峰值出现在夜间 20:00—凌晨 1:00，且峰值浓度高于早高峰，主要与夜间重型柴油车通行、大气边界层降低、污染物扩散条件差有关。

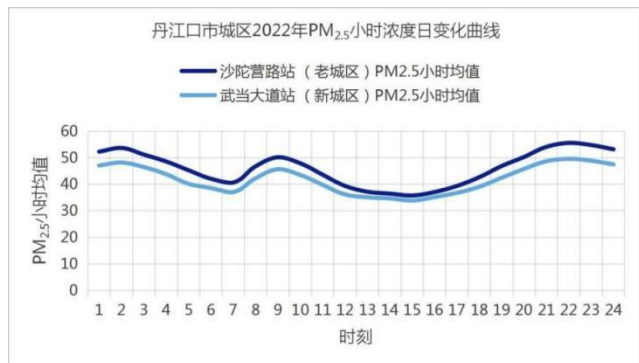


图 1 丹江口市城区 2022 年 PM_{2.5} 小时浓度日变化曲线

2.2 污染物相关性分析

为识别 PM_{2.5} 与其他污染物的同源性，对 2022 年各站点污染物小时数据进行 Pearson 相关性分析，结果见表 1。

表 1 丹江口市 2022 年污染物相关系数矩阵

站点	污染物	PM _{2.5}	PM ₁₀	O ₃	NO ₂	SO ₂	CO
沙陀营路站	PM _{2.5}	1	0.756**	-0.222**	0.140**	0.223**	0.459**
	PM ₁₀	0.756**	1	-0.141**	0.089**	0.185**	0.383**
	O ₃	-0.222**	-0.141**	1	-0.306**	0.016	-0.208**
	NO ₂	0.140**	0.089**	-0.306**	1	0.119**	0.347**
	SO ₂	0.223**	0.185**	0.016	0.119**	1	0.351**
	CO	0.459**	0.383**	-0.208**	0.347**	0.351**	1
武当大道站	PM _{2.5}	1	0.737**	-0.077**	0.100**	0.290**	0.652**
	PM ₁₀	0.737**	1	-0.027*	0.067**	0.268**	0.418**
	O ₃	-0.077**	-0.027*	1	-0.132**	0.071**	-0.122**
	NO ₂	0.100**	0.067**	-0.132**	1	0.180**	0.134**

注：**表示在 0.01 水平（双侧）上显著相关，*表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关。

2.3 PM_{2.5} 来源解析

采用 PMF 模型对丹江口市四季 PM_{2.5} 来源进行解析，共识别出 8 类污染源，四季源贡献率结果见表 2。

表 2 丹江口市四季 PM_{2.5} 污染源贡献率（单位：%）

污染源类型	春季	夏季	秋季	冬季	年均
企业排放	21.5	14.4	10.7	9.7	14.1
道路积尘	14.7	15.3	12.3	20.8	15.8
道路扬尘	19.3	20.8	15.6	21.5	19.3
工地扬尘	11.8	21.5	11.5	14.2	14.8
餐饮油烟	8.5	9.2	18.2	11.3	11.8
散煤燃烧	-	7.5	9.2	4.5	5.3
汽修污染	-	-	7.4	3.1	2.6
外来源	24.2	11.3	15.1	14.9	16.4

3 污染管控对策建议

基于丹江口市 PM_{2.5} 污染特征与来源解析结果，结合当地实际情况，提出以下精准管控对策建议：

（1）扬尘源精细化管理。扬尘是丹江口市 PM_{2.5} 首要贡献源，需实施精细化管理：①道路扬尘管控：重点管控金家湾路、丹郢路、潘家岩路、右岸沿江大道等扬尘路段，加大机械化清扫力度，提高道路清扫频次，主次干道每日洒水 4 次以上，重点路段实行湿

扫作业，对路面破损及时修复，减少道路积尘；冬季加大除冰清雪力度，避免融雪剂与尘土混合形成积尘。

②工地扬尘管控：严格落实建筑工地“6个100%”管控要求（施工现场100%围挡、物料堆放100%覆盖、施工现场路面100%硬化、拆迁工地100%湿法作业、驶出车辆100%冲洗、渣土车辆100%密闭运输），重点管控施工场地安装扬尘在线监测设备，超标立即停工整改。③堆场扬尘管控：对砂石、煤炭、建材等堆场实行密闭存储或全覆盖，装卸过程采取湿法作业，减少无组织排放。

（2）重点行业污染治理。针对企业排放源，实施分类治理：①对共同生物、丹澳药业等医药企业开展VOCs综合治理，采用密闭收集、活性炭吸附+催化燃烧等高效处理工艺，提高VOCs去除率，减少异味排放；②对弘源碳化硅、电化公司等企业实施超低排放改造，安装高效脱硫脱硝除尘设施，确保SO₂、NO_x、颗粒物稳定达标排放；③夏季对重点企业实施错峰生产，减少污染排放。

（3）移动源污染防治。机动车尾气是PM_{2.5}、NO_x、CO的重要来源，需强化移动源管控：①加快淘汰国三及以下排放标准柴油货车，提高新能源汽车推广比例；②强化重型柴油车监管，在主要出入口设置尾气检测点，夜间重点管控重型柴油车通行时间和路线，减少夜间排放积累；③加强非道路移动机械管控，施工场地非道路移动机械必须满足国三及以上排放标准，鼓励使用新能源非道路移动机械。

（4）面源污染综合治理。①餐饮油烟管控：重点管控大坝一路、大坝二路、生产北路等餐饮聚集区，所有餐饮单位必须安装高效油烟净化设施并定期清洗维护，确保达标排放，严查露天烧烤行为；②散煤燃烧管控：加大散煤替代力度，城乡结合部、农村地区推广使用电能、天然气等清洁能源，严查散煤销售和使用，重点管控三官大道盈丰家园等散煤使用集中区域；③汽修行业管控：所有汽修企业喷漆工序必须在

密闭空间进行，安装VOCs处理设施，严禁露天喷漆作业。

（5）区域联防联控。丹江口市外来源贡献占比达16.4%，春季高达24.2%，需加强区域联防联控：①建立与周边十堰、襄阳、南阳等城市的大气污染联防联控机制，定期开展会商，联合应对重污染天气；②加强空气质量预报预警能力建设，提高PM_{2.5}、O₃预报准确率，提前采取应急减排措施，减少重污染天气影响；③针对春季沙尘传输，提前采取道路洒水、工地停工等措施，降低沙尘影响程度。

4 结论

（1）2020-2022年丹江口市城区PM_{2.5}浓度呈小幅上升趋势，年增长率约4.7%~5.9%，PM₁₀浓度呈下降趋势，O₃浓度呈显著上升趋势，SO₂、CO浓度整体下降，NO₂浓度呈现新城区下降、老城区上升的分化特征。PM_{2.5}季节变化呈现春季>冬季>秋季>夏季的特征，日变化呈现夜间20:00-凌晨1:00和早7:00-9:00双峰特征，夜间峰值高于日间。

（2）相关性分析表明，PM_{2.5}与PM₁₀相关性最高（ $r=0.699\sim0.763$ ， $p<0.01$ ），与CO、SO₂显著正相关，指示扬尘源、移动源、燃烧源是PM_{2.5}的主要贡献源类。

（3）PMF源解析结果显示，扬尘源（含道路扬尘、工地扬尘、道路积尘）是丹江口市PM_{2.5}首要贡献源，四季合计贡献率达27.1%~42.3%，年均贡献率达49.9%；其次为企业排放源（年均14.1%）、外来源（年均16.4%）、餐饮油烟源（年均11.8%）。春季外来源贡献最高，夏季工地扬尘贡献最高，秋季餐饮油烟贡献最高，冬季道路扬尘和道路积尘贡献最高。

（4）针对丹江口市PM_{2.5}污染特征，需重点强化扬尘源精细化管控，推进重点行业污染治理，加强移动源防控，实施面源综合治理，开展区域联防联控，实现PM_{2.5}浓度持续下降，保障南水北调核心水源地环境空气质量安全。

参考文献：

- [1] 生态环境部.环境空气PM_{2.5}来源解析技术指南(试行)[EB/OL].2018-08-21.http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201809/t20180901_656476.htm.
- [2] Paatero P,Tapper U.Positive matrix factorization:a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values[J].Environmetrics,1994,5(2):111-126.
- [3] 朱坦,冯银厂.大气颗粒物源解析技术理论与应用[M].北京:科学出版社,2012:123-156.