

汾渭平原 PM_{2.5}-O₃ 复合污染特征及气象成因分析

周涛¹, 周青², 张勇³, 吴昱树⁴, 孙健⁵

(1. 运城市气象局,运城 044000; 2. 中国气象局气象探测中心,北京 100081; 3. 中国气象局气象发展与规划院,北京 100081; 4. 乌兰察布市气象局,乌兰察布 012000; 5. 莒县气象局,莒县 276500)

摘要: PM_{2.5} 和 O₃ 已经成为汾渭平原城市最主要的污染物, 两者之间相互影响, 在暖季经常同时出现构成污染, 其污染程度与气象条件密切相关。本文利用 2015 年至 2021 年间汾渭平原 12 个城市逐日 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度、地面气象观测数据以及 ERA5 高空再分析数据等资料, 分析了汾渭平原 PM_{2.5} 和 O₃ 的时空变化特征以及复合污染发生时 PM_{2.5} 和 O₃ 的关系, 并研究了局地气象条件和天气形势对复合污染的影响。结果显示, 得益于“污染协同治理”和“一市一策”的实施, 该地区年均 PM_{2.5} 和 MDA8 O₃ (MDA8-90, O₃ 年评价值, 日最大 8 小时滑动平均值第 90 百分位数) 浓度分别在 2017 年和 2018 年开始持续下降, 复合污染日数也在 2019 年后开始持续下降; 复合污染主要发生在 3-9 月, 在汾渭平原东部城市出现次数较多, 多出现在高温、低湿的环境下; 最后利用 T-PCA 算法(正交主成分分析)将复合污染的天气环流形势分为 4 种类型, 主要呈现出以高空西北气流或偏西气流、低层为暖区偏南风或微风为主的天气特征。研究结果对汾渭平原的大气污染防治提供了参考依据, 尤其对于 PM_{2.5} 和 O₃ 污染协同治理具有重要意义。

关键词: 汾渭平原、PM_{2.5} 和 O₃ 复合污染、T-PCA 分型、气象成因

引言

汾渭平原是我国第四大平原, 由汾河、渭河冲击形成, 由于其大部分城市位于黄土高原, 地形封闭, 能源消费结构以煤炭为主, 年消耗量达 2.6 亿吨, 占全国能源消费的 80% 以上(Feng et al, 2016), 加上繁重的道路运输和较高的人口密度, 导致汾渭平原的污染排放量极高(Dao et al, 2021), 大气污染严重, 生态环境脆弱(黄小刚等, 2021; 王云涛等, 2022; 秦卓凡等, 2021), 并且可能加重临近地区的污染(黄小刚等, 2019)。为了解决空气污染问题, 中国政府于 2013 年颁布《大气污染防治行动计划》, 行动计划实施以来, 全国空气质量显著好转(Zhang et al, 2018a, b), 但汾渭平原空气质量并未明显改善(Feng et al, 2019), 并且已经取代京津冀地区成为中国污染最严重的地区(Dao et al, 2021; 杨乐超等, 2018), 因此国务院于 2018 年继续颁布《打赢蓝天保卫战三年行动计划》, 将汾渭平原列为重点管控区域(秦卓凡等, 2021)。随着行

*山西省气象局面上项目(SXKMSTQ20217137), 秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放研究基金重点课题(2021K-10)资助

第一作者: 周涛, 主要从事天气预报和环境气象工作. E-mail: 805746177@qq.com

通讯作者: 周青, 主要从事大气成分与环境气象研究. E-mail: zhouching@cma.gov.cn

32 动计划中减排措施的强制实施，汾渭平原的 $PM_{2.5}$ 浓度已经开始下降(郝永佩等, 2022)，但
33 O_3 污染却越来越严重(关茜妍等, 2021)，2021 年汾渭平原污染物超标天数比例为 29.8%，
34 $PM_{2.5}$ 污染和 O_3 污染分别占总超标天数的 39.3% 和 38%，污染形势依旧严峻(中华人民共和
35 国生态环境部, 2022) (来自《2021 生态环境公报》)。

36 污染物局地排放是大气污染的主要因素，而不利的气象因素会加剧空气污染(Wang et al,
37 2018; 祁海霞等, 2019; 陈镭等, 2020; 胡春梅等, 2020; 宋佳琨等, 2021; 刘兆东等, 2020; 杨颖川
38 等, 2022)，2014-2018 年汾渭平原的 $PM_{2.5}$ 浓度呈 $4.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ 的趋势下降，气象因素的贡
39 献为 $0.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，贡献率达 15%， O_3 浓度呈 $6.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ 的趋势增长，气象贡献占 12% (Chen
40 et al, 2020)，有研究显示汾渭平原 2015-2019 年各年度臭氧单因子所导致污染超标所占比例
41 分别为 1.4%、5.4%、13.0%、11.1%、14.4%(解淑艳等, 2021)。 O_3 污染事件通常与高温低湿
42 度条件有关(何慧根等, 2021; 杨镇江等, 2023)，高温和低湿环境导致大量 Bvoc (生物挥发性有
43 机物) 的排放促进光化学反应(Lu et al, 2019)，进而加重地面 O_3 污染；而 $PM_{2.5}$ 污染通常发
44 生在弱风、高湿和低边界层的条件下(Xu et al, 2018; 张琴和姚秀萍, 2021)，两者条件虽有不
45 同，但高浓度的 O_3 会导致二次 $PM_{2.5}$ 粒子产生，使得空气中的 $PM_{2.5}$ 浓度增大(Ding et al,
46 2013; Wang et al, 2016)，而高浓度 $PM_{2.5}$ 会通过吸收太阳辐射、改变光解速率从而降低 O_3 浓
47 度(Unger et al, 2009; Menon et al, 2008; Li et al, 2018)，两者之间会相互影响，因此在许多城市
48 都出现了 $PM_{2.5}$ 和 O_3 同时污染的现象(He et al, 2022; Schnell and Prather, 2017; Luo et al, 2022;
49 Yang et al, 2021)，我国的大气污染已经呈现出以 $PM_{2.5}$ 和 O_3 为主的复合污染特征(Zhang et al,
50 2008)，这种复合污染的现象会极大增加人类健康风险(Anenberg et al, 2010)。

51 综上，以前的学者对汾渭平原污染的气象成因研究大多是针对单一 $PM_{2.5}$ 或 O_3 污染，
52 对汾渭平原 $PM_{2.5}$ 和 O_3 复合污染时的气象成因分析较少。因此我们将从气温、湿度和风速
53 等气象要素及天气形势方面分析 $PM_{2.5}$ 和 O_3 复合污染成因，以期为汾渭平原大气复合污染
54 防治以及环境气象预报服务等提供参考依据。

55

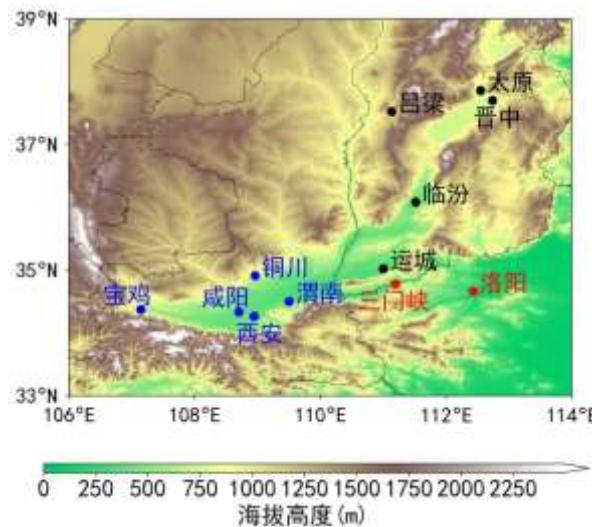
56 1 资料与方法

57

58 1.1 研究区域

59 此次研究区域汾渭平原城市群共有 12 个城市，包括陕西省西安市、渭南市、铜川市、
60 咸阳市和宝鸡市，山西省太原市、晋中市、吕梁市、临汾市和运城市，河南省三门峡市和洛
61 阳市，2021 年汾渭平原 12 个城市有 6 个城市位于全国污染倒数 20 名之内(中华人民共和国

62 生态环境部, 2022)。



63
64 图 1 汾渭平原各城市地理位置分布及海拔高度信息 (陕西省 (蓝色)、山西省 (黑色)、河南省 (红色))

65 Fig 1 Geographic location distribution and elevation information of cities in Fenwei Plain (Shaanxi Province (blue),
66 Shanxi Province (black), Henan Province (red))

67 1.2 污染物和气象数据

68 污染物数据包括 2015 至 2021 年 12 个城市的 PM_{2.5} 和 MDA8 O₃ (日最大 8 小时平均
69 O₃ 浓度) 观测资料, 来源于中国环境监测总站 (<https://quotsoft.net/air/>) (Wang et al, 2021; Jiang
70 et al, 2021; Zhang et al, 2022); 地面气象数据来自中国气象局国家气象数据观测中心
71 (<http://data.cma.cn/>), 包括同时期逐小时的地面风速 (WS)、风向 (WD)、气温 (T)、降
72 水 (RAIN)、相对湿度 (RH); 此外还使用了欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 第 5 代全
73 球大气再分析数据 (ERA5), 包括位势高度、风向、风速, 时间分辨率为 1 小时, 空间分辨
74 率为 1 ° × 1 °。

75 1.3 污染日定义

76 本研究重点关注 PM_{2.5} 和 O₃ 复合污染时的气象条件, 世界卫生组织在综合考虑过去 15
77 年间环境健康研究进展的基础上, 制定了 2021 版空气质量指南 (朱彤等, 2022), 针对 PM_{2.5}
78 和 O₃ 提出了更为严格的目标, 根据中国环境空气质量标准 (GB3095-2012), 我们将同时满
79 足日均 PM_{2.5}>35 μg·m⁻³ (一级浓度限值) 和 MDA8 O₃>100 μg·m⁻³ (一级浓度限值) 两个条件
80 时的日期定义为复合污染日, 将同时满足 PM_{2.5}>35 μg·m⁻³ 和 MDA8 O₃<100 μg·m⁻³ 定义为
81 PM_{2.5} 污染日, 将同时满足 PM_{2.5}<35 μg·m⁻³ 和 MDA8 O₃>100 μg·m⁻³ 定义为 O₃ 污染日, 将同
82 时满足 PM_{2.5}<35 μg·m⁻³ 和 MDA8 O₃<100 μg·m⁻³ 定义为无污染日。

83 1.4 研究方法

84 自 2013 年政府发布《大气污染防治行动计划》以来，中国的空气污染物浓度呈下降趋
85 势(Zhang et al, 2018a)，首要污染物以 PM_{2.5} 和 O₃ 为主，要研究每日 PM_{2.5} 和 O₃ 的关系，必
86 须消除 PM_{2.5} 和 O₃ 的长期变化趋势所产生的影响，因此我们采用去趋势化和去季节化浓度
87 的处理方式，Tai et al(2010)和 Dai et al(2021)等人均用此方法进行过研究，去趋势化算法如
88 下：

89
$$Dev_{mi} = C_{mi} - \sum_{i=1}^n \frac{C_{mi}}{n} \quad (1)$$

90 公式 (1) 中 Dev_{mi} 为去趋势化后的污染物浓度， C_{mi} 为 m 月份第 i 天的污染物浓度，n
91 为 m 月份的天数， $\sum_{i=1}^n \frac{C_{mi}}{n}$ 为 m 月污染物的平均浓度，因此当某日的 Dev_{mi} 为正时，可以说
92 明其浓度高于当月的平均浓度。

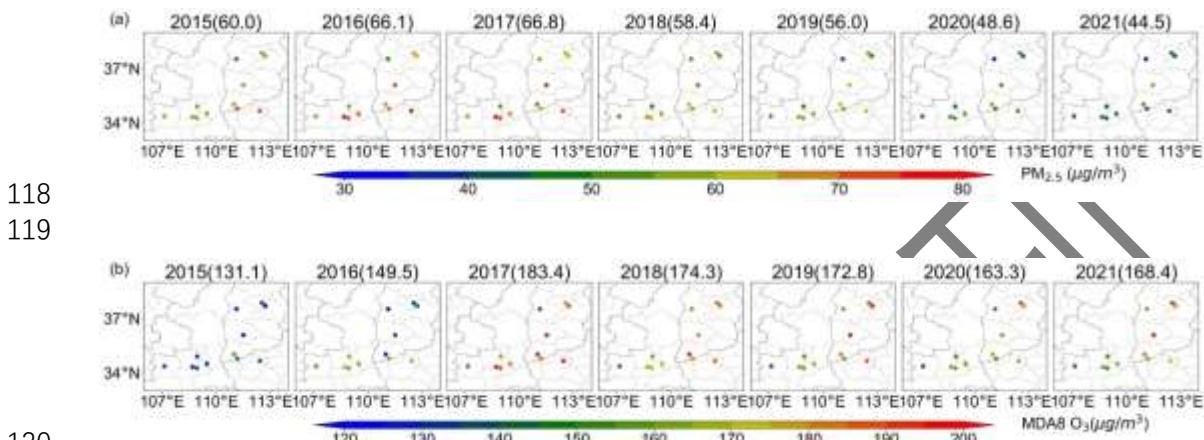
93 在天气分型方面，我们使用正交主成分分析方法(T-PCA)来对汾渭平原的天气形势进行
94 分类，T-PCA 已经证明是一种可靠的分类方法(Ye et al, 2016; Miao et al, 2018; Huth et al, 2008)，
95 其可以准确地反映原始环流场的特征，不会因分型对象的调整而有太大变化，得到的时空场
96 也更加稳定(Huth et al, 2008)，这里使用 cost733class 分型软件 (<http://cost733.met.no>) 中的
97 T-PCA 算法来对研究区域 850 hPa 形势进行客观分型，用位势高度场将天气形势进行分类，
98 进而识别出易受污染的天气形势。此外，通过计算不同天气分型数量下的累积解释方差(ECV，
99 explained cluster variance)以及累积解释方差的变率(ΔECV)，从而完成对天气分型性能的评
100 估，其中 $\Delta ECV = ECV_{k+1} - ECV_k$ ，其中 k 为分类数量， ΔECV 值越大表示在天气模式分类
101 中的性能提升幅度越大，并且趋于稳定(Ning et al, 2019)。

102 2 结果和讨论

103 2.1 2015 至 2021 年 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度变化趋势

104 图 2a 和 2b 分别为 2015 -2021 年汾渭平原各城市 PM_{2.5} 和 MDA8 O₃ 年均浓度空间分布，
105 其中臭氧年评价值采用日最大 8 小时平均浓度的第 90 百分位浓度值计算得到。整体来看汾
106 渭平原 PM_{2.5} 年均浓度于 2015 至 2017 年呈上升趋势，2017 年后，得益于蓝天保卫行动计划
107 的实施，汾渭平原城市群的年均 PM_{2.5} 开始下降，由 2017 年的 66.8 $\mu\text{g m}^{-3}$ 下降至 2021 年的
108 44.5 $\mu\text{g m}^{-3}$ ，下降幅度达 33.4%，西安、渭南、咸阳、临汾、运城和洛阳等城市浓度下降明
109 显，但浓度仍远高于世卫组织推荐的年均标准(朱彤等, 2022)；虽然 2013 年大气污染防治行
110 动计划要求控制生成 O₃ 的氮氧化物和挥发性有机物等的排放，但 MDA8 O₃ 年评价值仍由

113 2015 年的 131.1 升至 2018 年的 $183.4 \mu\text{g m}^{-3}$, 上升幅度达 28.5%, 说明氮氧化物和挥发性有
114 机物尚未得到有效控制, 2018 年蓝天保卫行动计划加大控制力度后开始逐年缓慢下降。通
115 过统计汾渭平原 $\text{PM}_{2.5}$ 和 MDA8 O_3 逐年月平均浓度变化趋势 (图略), 发现 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度主要
116 在 11 月至次年 2 月呈现高值, 而 MDA8 O_3 则在 4 月至 9 月呈现高值, 这些特征与京津冀等
117 区域的污染情况类似(Ou et al, 2022)。



122 图 2 汾渭平原各城市 2015-2021 年(a)PM_{2.5} 年均浓度和(b)MDA8 O₃ 第 90 分位数空间分布情况.

123 Fig. 2 Spatial distribution of (a) annual average $\text{PM}_{2.5}$ and (b) the 90th quantile in MDA8 O_3 concentrations in
124 cities of Fenwei Plain from 2015-2021.

125 图 3 为 2015-2021 年间汾渭平原各城市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染 (图 3a)、 MDA8 O_3 污染 (图 3b) 和
126 复合(MDA8 O_3 与 $\text{PM}_{2.5}$)污染 (图 3c) 日数的空间分布图, 可以看出汾渭平原 7 年来各城市
127 $\text{PM}_{2.5}$ 污染日数介于 852-1132 天之间, 其中污染日数最多的地区是咸阳市; O_3 污染天数则介
128 于 328 - 671 天之间, O_3 污染日数最多的地区是铜川市, 主要是由于铜川市第二产业占比较
129 高, O_3 前体物排放较其他区域突出 (郑小华等, 2021); 从复合污染情况 (图 3c) 看, 各城
130 市污染天数介于 332 至 737 天, 运城和临汾的污染天数较多, 占总日数 28%, 东部城市太
131 原、晋城、临汾、运城和三门峡普遍在 600 天以上, 西部西安、宝鸡、咸阳、渭南和铜川则
132 均在 600 天以下, 东部的运城、临汾和河南的三门峡、洛阳复合污染比西部城市严重, 主要
133 是由于这几个城市处于两省交界处, 也可能与政策缺乏协同规划有关 (郑小华等, 2021)。
134 从各城市逐年复合污染次数二维分布来看 (图 3d), 2017 年和 2018 年为复合污染天数最
135 多的两年, 2019 年至 2021 年复合污染天数开始逐年下降, 表明 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 协同治理已经发挥
136 了作用, 2021 年西部城市西安、宝鸡、咸阳、渭南和铜川的复合污染日数已经降至 40 天以
137 下, 洛阳和三门峡分别为 52 和 57 天, 而太原、晋中、临汾和运城的日数仍在 70 天以上,
138 因此这几个城市仍需加大协同治理力度。

139

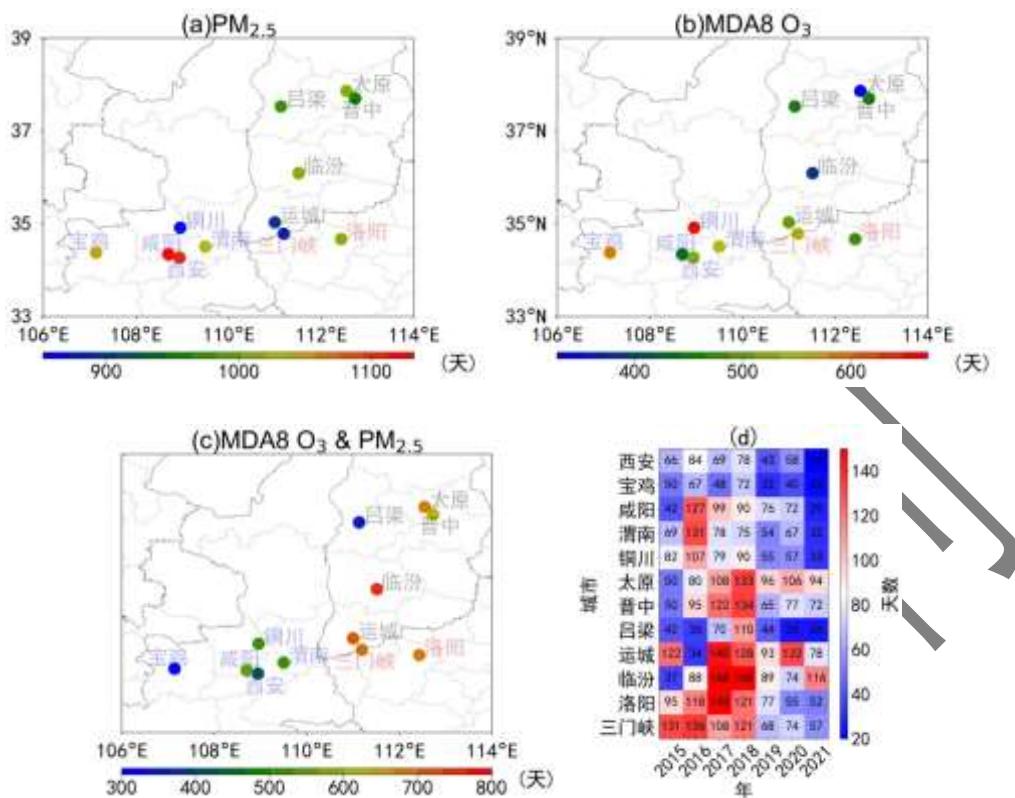
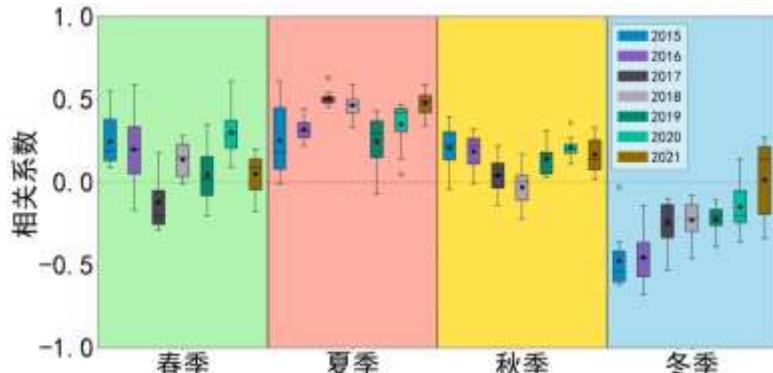


图3 汾渭平原各城市7年(a)PM_{2.5}、(b)MDA8 O₃、(c)复合污染总日数及(d)各城市逐年复合污染次数二维分布图

Fig 3 Total number of days of (a) PM_{2.5}, (b) MDA8 O₃, (c) compound pollution and (d) Two-dimensional distribution of number of compound pollution days in cities of Fenwei Plain from 2015-2021

2.2 汾渭平原地区PM_{2.5}和MDA8 O₃的关系

统计了汾渭平原2015-2021年间各城市逐月累计复合污染天数二维分布情况(图略),各城市复合污染主要集中在3月至9月,10月至次年2月PM_{2.5}污染严重,但冬季MDA8 O₃浓度偏低。使用1.4节中的公式1计算了每日的Dev_PM_{2.5}(去趋势后的PM_{2.5})和Dev_MDA8 O₃(去趋势后的MDA8 O₃),从2015-2021年不同季节各城市Dev_PM_{2.5}和Dev_MDA8 O₃之间的相关系数箱线图(图4)看,各城市春夏秋三季多以正相关为主,其中夏季相关性明显高于春秋两季,春季在2015至2016年后呈现上下波动趋势,夏季和秋季均在2019到2021年呈现上升的趋势,说明夏秋O₃对PM_{2.5}浓度的影响在呈现加剧的态势;而两者在冬季多呈现负相关性,且自2015年开始负相关开始逐渐减小,到2021年各城市的相关性均值接近于0,说明冬季PM_{2.5}对O₃的影响在持续减弱。



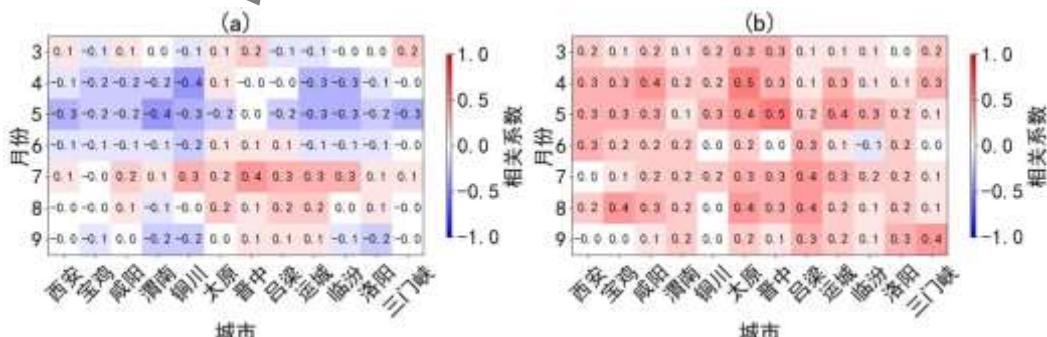
158

图 4 汾渭平原 2015-2021 年间不同季节各城市 Dev_PM_{2.5} 和 Dev_MDA8 O₃ 相关系数箱线图(箱体上下边界
分别表示第 75、第 25 百分位数, 黑色圆点表示平均值, 中间横线表示中位数, 空心圆表示异常值)

Fig 4 Boxplots of DEV_PM_{2.5} and DEV_MDA8 O₃ correlation coefficients of each city in different seasons in Fenwei Plain from 2015 to 2021 (the upper and lower boundaries of the box represent the 75th and 25th percentile, respectively; Black dot mean, middle horizontal line indicates median, hollow circle indicates outliers)

由于复合污染主要集中在3月至9月,因此我们重点分析3月至9月每日PM_{2.5}和MDA8 O₃的关系。通过统计汾渭平原地区PM_{2.5}和MDA8 O₃日平均浓度变化趋势情况发现,2015-2021年,汾渭平原PM_{2.5}呈下降趋势,而MDA8 O₃呈上升趋势,且去趋势化后的PM_{2.5}与MDA8 O₃具有弱正相关性(相关系数为0.21)。

图 5a 为各城市 Dev_PM_{2.5}>0 时 Dev_PM_{2.5} 和 Dev_O₃ 的相关系数, 可以看出 4 月、5 月、6 月和 9 月基本呈负相关, 表明当 PM_{2.5} 浓度偏大时 (Dev_PM_{2.5}>0), 会制约影响 O₃ 的生成, 但 7 月和 8 月太阳辐射较强, 气温偏高, 大气扩散条件好, 因此 PM_{2.5} 等颗粒污染物对太阳辐射的削弱作用有限, 因此 7-8 月大部分城市的 Dev_PM_{2.5} 和 Dev_MDA8_O₃ 为正相关。而当 Dev_MDA8_O₃ 浓度偏大 (Dev_MDA8_O₃>0) 时 (图 5b), 大气氧化作用强, 使得一次气态污染物 SO₂、NO_x 和 NH₃ 转换成硫酸盐和硝酸盐气溶胶粒子, 加重 PM_{2.5} 污染(王芃等, 2022), 因此在 3-9 月所有城市基本都表现为正相关, 尤其对于高海拔的太原、晋中在 4 月和 5 月相关系数高达 0.5。



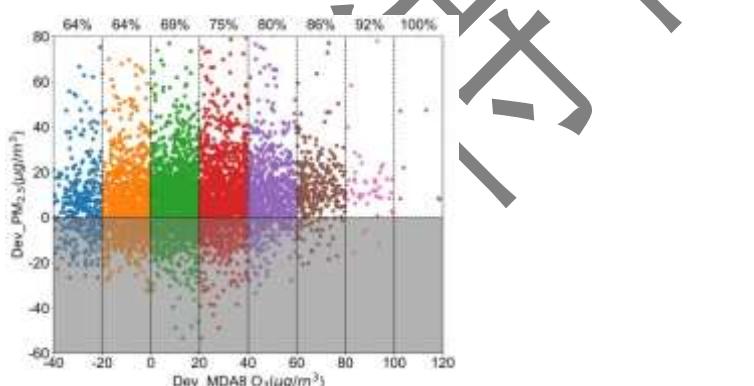
177

178

179 图 5 2015-2021 年 3-9 月汾渭平原 Dev_PM_{2.5}>0 时 (a) 和 Dev_O₃>0 (b) 时各城市 Dev_PM_{2.5} 和 Dev_O₃
180 的相关系数

181 Fig 5 Correlation coefficients between Dev_PM_{2.5} and Dev_O₃ for each city in Fenwei Plain when Dev_PM_{2.5}>0
182 (a) and Dev_O₃>0 (b) from March to September during 2015-2021

183 图6为复合污染时 Dev_MDA8 O₃与 Dev_PM_{2.5}的散点关系图,图中展示了当 Dev_MDA8
184 O₃在不同取值区间时 Dev_PM_{2.5}>0 的样本所占比例, 当 Dev_MDA8 O₃>0 时, Dev_PM_{2.5}>0
185 的比例均能超过 69%, 并且随着 Dev_MDA8 O₃的增大呈上升趋势, 在 Dev_MDA8 O₃>40
186 ug m⁻³ 时, 汾渭平原 12 个城市的 Dev_PM_{2.5}>0 的比例超过 80%, 表明了大气氧化对 PM_{2.5}
187 浓度增加起到积极影响, 然而大气强氧化性并不能无限制导致 PM_{2.5}浓度的增长, 一方面受
188 制于硫酸盐、硝酸盐等粒子的数量, 另一方面由于 O₃的生成特性要求大气环境为高温和强
189 辐射, 而高温条件下会导致硫酸盐、硝酸盐等粒子的挥发和扩散, 进而导致 PM_{2.5}浓度的下
190 降(张远远等, 2022)。

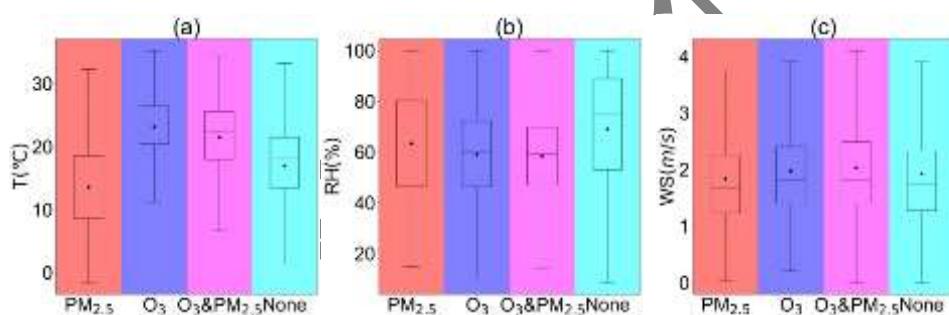


191
192 图 6 Dev_MDA8 O₃ 与 Dev_PM_{2.5} 的散点图, 不同颜色代表 Dev_MDA8 O₃ 在不同取值区间时 Dev_PM_{2.5} 数
193 值分布状况, 上横坐标各刻度值表示当 Dev_MDA8 O₃ 在各取值区间时 Dev_PM_{2.5}>0 的样本所占比例
194 Fig. 6 Scatter plot of Dev_MDA8 O₃ and Dev_PM_{2.5}, different colors represent the distribution of Dev_PM_{2.5}
195 values when Dev_MDA8 O₃ is at different value intervals, and each scale value of the upper horizontal coordinate
196 indicates the proportion of samples with Dev_PM_{2.5}>0 when Dev_MDA8 O₃ is at each value interval

197 2.3 气象条件对污染的影响

198 除排放因素外, PM_{2.5} 和 O₃ 浓度也受到气象条件的影响(何国文等, 2022; 肖致美等, 2022;
199 花丛等, 2022), 图 7 为汾渭平原 12 个城市 3-9 月中发生不同污染时的气温 (T)、相对湿度
200 (RH) 和风速 (W) 的箱线图, 可以看出 O₃ 污染和复合污染发生在高温、低湿的环境条件下,
201 日平均气温主要介于 18-26.5°C 之间, 单独 O₃ 污染时较复合污染更高, 日平均相对湿度主要
202 介于 46.3%-59% 之间; 而 PM_{2.5} 污染和无污染发生在气温相对较低、湿度偏高的条件下, PM_{2.5}
203 污染时气温介于 8.6-18.6°C 之间, 相对湿度在 46.5%-80.3% 之间, 相对湿度范围大于臭氧和
204 复合污染, 而无污染时气温介于 13.4-21.5°C 之间, 高于 PM_{2.5} 污染, 但相对湿度介于 53%-89%
205 之间, 略高于污染时的水平。在风速上四种类型差别不明显, 均介于 1.2-2.4m/s 之间。高温

206 利于大气 O_3 的光化学反应和二次污染物的生成，而高的相对湿度则利于 $PM_{2.5}$ 的吸湿增长
207 (闫小利等, 2021)，低的风速不利于污染物的扩散(肖致美等, 2022)。无污染时表现的低温、
208 高湿、弱风气象特征则可能由于 $PM_{2.5}$ 和 O_3 排放较少或降雨的影响，降雨可以有效地清除
209 $PM_{2.5}$ 污染，并且降雨降温和较厚云层阻挡太阳辐射不利于 O_3 产生，统计发现无污染天气
210 (2385 天) 中汾渭平原降雨（超过 6 个城市出现降雨）的天数为 1122 天，占比为 53%。由
211 于 $PM_{2.5}$ 和无污染样本在三种气象要素下不易区分，剔除无污染中的降水样本后，无污染和
212 $PM_{2.5}$ 污染样本主要分布在 3 月、4 月和 9 月，对比两种情况在三种气象要素下的一阶差分
213 的分布状况（后一日要素值减去前一日的要素值，图略），发现无污染时气温与前一日相比
214 会略有降低，而 $PM_{2.5}$ 污染时则温度均值会略有上升，这主要是由于春秋季节冷空气活动利于
215 污染物扩散；而相对湿度方面，无污染时相对湿度则会明显降低，而 $PM_{2.5}$ 污染时相对湿度
216 则不明显，这主要是由于低的相对湿度不利于污染物吸湿增长；风速方面两者呈现出不明显
217 的区别，这主要因为在不同风向的传输影响下，将呈现出污染加重或减轻两种现象。
218

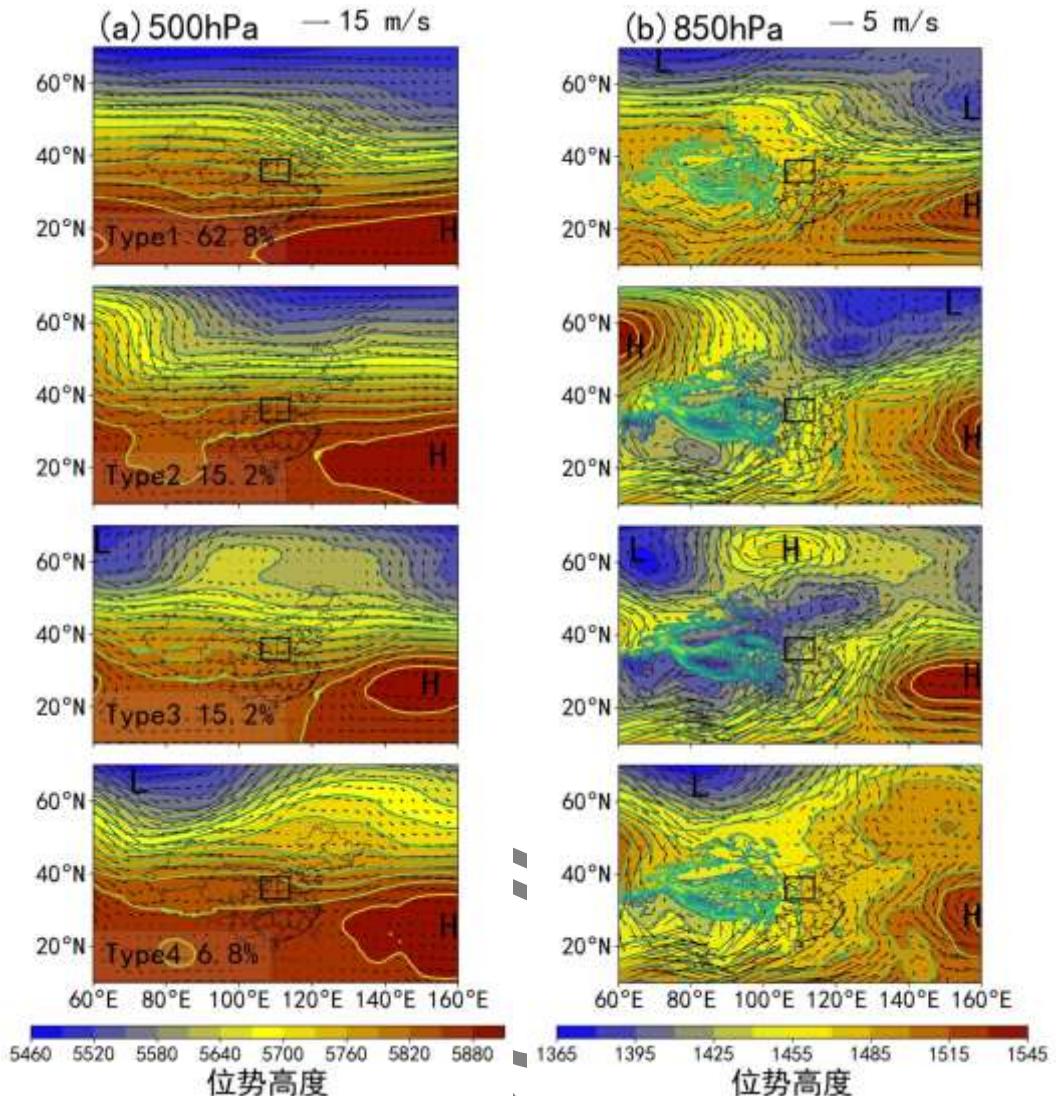


219
220 图 7 各污染类型下(a)2m 气温、(b)2m 相对湿度、(c)10m 风速的箱线分布图， $PM_{2.5}$ 表示单独的 $PM_{2.5}$ 污染，
221 O_3 表示单独 O_3 污染， $O_3&PM_{2.5}$ 表示复合污染，None 表示无污染。

222 Fig. 7 Box plots showing distribution of (a) 2m air temperature, (b) 2m relative humidity, and (c) 10m wind speed
223 related to each pollution type, $PM_{2.5}$ indicates $PM_{2.5}$ pollution alone, O_3 indicates O_3 pollution alone, $O_3 & PM_{2.5}$
224 indicates combined pollution, and None indicates no pollution.

225
226 为了更好地了解复合污染天气发生时的天气形势，提取了 2015-2021 年 3 月至 9 月汾渭
227 平原复合污染时的日期作为统计样本，这些污染日中有一半以上的城市都出现了复合污染的
228 现象，使用 T-PCA 算法将复合污染发生时的 850 hPa 位势高度进行天气分型，同时计算了
229 2-12 种天气分型结果的 ECV 以及 ΔECV ，结果显示当天气分型数量为 4 时 ΔECV 取最大值，
230 因此这里根据统计样本分为 4 种天气形势，并绘制出对应的 500 hPa 形势图（图 8），图 9
231 为对应的复合污染时每种天气类型在各月的分布比例情况，分型方法详见 2.4 节。可以看到，
232 第一种为最主要的污染天气形势，占总天数的 62.8%，平均 $PM_{2.5}$ 和 MDA8 O_3 浓度分别为

55 和 138 ug m^{-3} , 此种类型下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高, O_3 浓度最低, 这是由于类型 1 多出现在 3-5
月, 气较其余类型偏低, 此时 500 hPa 副热带高压偏南, 汾渭平原受槽后脊前的西北风影响,
导致天气晴朗, 850 hPa 受暖脊控制, 以弱偏南风为主, 利于污染物的输送, 但温度偏低在
一定程度上影响了 O_3 的产生。类型 2 占比为 15.2%, 主要发生在 7-8 月, 平均 $\text{PM}_{2.5}$ 和 MDA8
 O_3 浓度分别为 47 和 144 ug m^{-3} , $\text{PM}_{2.5}$ 污染程度较类型 1 偏弱, O_3 浓度则相对偏高, 500 hPa
副热带高压较类型 1 偏北, 退居海上, 脊线位于 25°N 附近, 汾渭平原上空气流平直, 而 850
hPa 与类型 1 类似, 以东南风为主, 同样存在暖湿气流输送, 但气压梯度偏大, 风力大于类
型 1, 加之 7-8 月温度较高, 利于污染物湍流扩散, 导致 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低于类型 1 而 O_3 浓度高
于类型 1。类型 3 占比 15.2%, 主要发生在 6 月和 7 月, 平均 $\text{PM}_{2.5}$ 和 MDA8 O_3 浓度分别为
45 和 152 ug m^{-3} , 此类型 O_3 污染最强, 这是一年中 O_3 浓度最高的月份 (图 2c), 500hPa 汾
渭平原上空为槽后西北风, 850 hPa 汾渭平原同样为东南风, 虽然 6 月和 7 月污染物排放少,
但高的臭氧浓度会使得大气氧化性增强, 提高 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度。类型 4 占比 6.8%, 主要在 7-9 月,
平均 $\text{PM}_{2.5}$ 和 MDA8 O_3 浓度分别为 44 和 142 ug m^{-3} , 副热带高压偏东, 汾渭平原上空为槽
后弱西北气流控制, 地面气压场弱, 风速小, 利于 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 前体物的累积。综合分析发
现, 汾渭平原污染时 500 hPa 以槽后西北风和偏西风为主, 而 850 hPa 多受暖脊的影响, 以
偏南风或静风为主, 槽后西北风和偏西风的动力作用使天气以晴朗活动云为主, 利于太阳辐
射, 低层偏南暖湿气流输送或者静风使得污染物累积, 导致发生 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 复合污染。

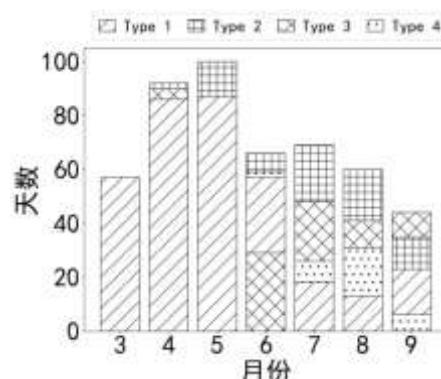


251

252

253 图 8 2015-2021 年间 3-9 月复合污染(汾渭平原 50% 以上城市出现复合污染时)所对应的 4 种天气形势,

254 (a) 表示 500 hPa 位势高度分型图, (b) 表示每种类型所对应的 850 hPa 位势高度形势图, 黑框代表汾渭平原地区。

255 Fig 8 Four synoptic patterns corresponding to combined pollution (when combined pollution occurs in more than
256 half of cities in Fenwei Plain) during March-September 2015-2021. (a) indicates the 500-hPa geopotential height
257 (GH) (color shading) superposed with the wind vector (arrows), (b) indicates the 850-hPa geopotential height
258 (GH) corresponding to each type, and the black box represents the Fenwei Plain region.

259

260 图 9 复合污染时不同类型天气形势在不同月份的分布
261 Fig 9 Distribution of different synoptic patterns from March to September during compound pollution

262 263 3 结 论

264 本文基于 2015 至 2021 年间汾渭平原 12 个城市逐日 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度、地面气象观测数
265 据以及 ERA5 高空再分析数据等资料，对汾渭平原 7 年来 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的时空变化特征尤其
266 是复合污染特征开展了统计分析，并重点研究了复合污染发生时 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 二者的相关性，
267 局地气象条件以及天气形势对复合污染的影响，主要结论如下：

268 (1) 汾渭平原的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 MDA8 O_3 年均浓度均在 2017 年达到近年来的峰值，得益于大
269 气污染防治行动计划和蓝天保卫行动计划的实施，其年评价值（ $\text{PM}_{2.5}$ 为年均浓度， O_3 为
270 MDA8-90）分别呈 5.6 和 $3.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\text{ y}^{-1}$ 的速率下降。汾渭平原各城市复合污染天数介于 332
271 至 737 天，东部城市污染日数多于西部，运城复合污染日数占比达 30.7%；复合污染日数在
272 2016 年开始增加，2018 年达到峰值，2019 年至 2021 年呈下降趋势，体现了政府在污染协
273 同治理方面的成效。

274 (2) 去趋势化后的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 MDA8 O_3 存在弱正相关性， $\text{Dev_MDA8 O}_3 > 0$ 时， $\text{Dev_PM}_{2.5} > 0$
275 的比例均能超过 69%，在 $\text{Dev_MDA8 O}_3 > 40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时 $\text{Dev_PM}_{2.5} > 0$ 的比例超过 80%，表明
276 了大气氧化对增加颗粒物浓度所起到的正贡献影响。

277 (3) O_3 污染和复合污染发生在高温、低湿的环境条件下， $\text{PM}_{2.5}$ 污染和无污染发生在气
278 温相对较低、湿度偏高和风速较小的条件下，无污染时出现降雨的概率为 53%，体现了降
279 雨对污染物的湿清除作用。使用 T-PCA 算法将复合污染时的天气形势分为 4 种类型，这些
280 形势的共同特点是 500 hPa 位势高度场以西北或偏西气流为主，低层 850 hPa 位势高度场受
281 暖脊影响，以偏南风或静风为主，利于 O_3 的生成和 $\text{PM}_{2.5}$ 的传输和累积。

282 283 参考文献

- 284
285 陈铺, 周广强, 毛卓成, 等, 2020. 上海地区 2017 年三次短时重度污染过程变化特征及其气象影响因素[J]. 气象, 46(5):
286 675-686. Chen L, Zhou G Q, Mao Z C, et al, 2020. Variation characteristics and meteorological impact factors of three short-time
287 severe air pollutions in Shanghai in 2017[J]. Meteor Mon, 46(5): 675-686 (in Chinese).
288 关茜妍, 陆克定, 张宁宁, 等, 2021. 西安市大气臭氧污染光化学特征与敏感性分析[J]. 科学通报, 66(35): 4561-4573. Guan X Y,
289 Lu K F, Zhang N N, et al, 2021. Analysis of the photochemical characteristics and sensitivity of ozone pollution in Xi'an[J]. Chin
290 Sci Bull, 66(35): 4561-4573 (in Chinese).
291 郝永佩, 宋晓伟, 赵文珺, 等, 2022. 汾渭平原大气污染时空分布及相关因子分析[J]. 生态环境学报, 31(3): 512-523. Hao Y P, Song
292 X W, Zhao W J, et al, 2022. Spatiotemporal distribution of air pollution and correlation factors in Fenwei Plain[J]. Ecol Environ Sci,
293 31(3): 512-523 (in Chinese).
294 何国文, 邓涛, 欧阳珊珊, 等, 2022. 广州地区秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧复合污染的观测研究[J]. 环境科学学报, 42(6): 250-259. He G W,

- 295 Deng T, Ouyang S S, et al, 2022. Observation studies on the PM_{2.5} and O₃ complex episodes during autumn in Guangzhou[J]. Acta
296 Sci Circumstantiae, 42(6): 250-259 (in Chinese).
- 297 何慧根, 唐红玉, 李永华, 等, 2021. 2014—2018 年重庆主城区大气污染的特征及其与大气环流之间的关系[J]. 气象, 47(10):
298 1233-1245. He H G, Tang H Y, Li Y H, et al, 2021. Characteristics of air pollution and its relationship with atmospheric circulation
299 in Chongqing City from 2014 to 2018[J]. Meteor Mon, 47(10): 1233-1245 (in Chinese).
- 300 胡春梅, 陈道劲, 周国兵, 等, 2020. 基于自组织神经网络算法的重庆秋冬季空气污染与天气分型的关系[J]. 气象, 46(9):
301 1222-1234. Hu C M, Chen D J, Zhou G B, et al, 2020. Relationship between air pollution events in autumn and winter in chongqing
302 and the classification of synoptic situation based on self-organizing maps[J]. Meteor Mon, 46(9): 1222-1234 (in Chinese).
- 303 花丛, 江琪, 迟茜元, 等, 2022. 我国中东部地区 2015—2020 年夏半年 PM_{2.5} 和臭氧复合污染气象特征分析[J]. 环境科学研究,
304 35(3): 650-658. Hua C, Jiang Q, Chi X Y, et al, 2022. Meteorological characteristics of PM_{2.5}-O₃ air combined pollution in central
305 and eastern China in the summer half years of 2015-2020[J]. Res Environ Sci, 35(3): 650-658 (in Chinese).
- 306 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 等, 2019. 汾渭平原 PM_{2.5} 浓度的影响因素及空间溢出效应[J]. 中国环境科学, 39(8): 3539-3548. Huang
307 X G, Shao T J, Zhao J B, et al, 2019. Influence factors and spillover effect of PM_{2.5} concentration on Fen-wei Plain[J]. China
308 Environ Sci, 39(8): 3539-3548 (in Chinese).
- 309 黄小刚, 赵景波, 孙从建, 等, 2021. 汾渭平原 PM_{2.5} 空间分布的地形效应[J]. 环境科学, 42(10): 4582-4592. Huang X G, Zhao J B,
310 Sun C J, et al, 2021. Orographic influences on the spatial distribution of PM_{2.5} on the Fen-Wei Plain[J]. Environ Sci, 42(10):
311 4582-4592 (in Chinese).
- 312 刘兆东, 王宏, 沈新勇, 等, 2020. 京津冀及周边地区冬季能见度与 PM_{2.5} 浓度和环境湿度的多元回归分析[J]. 气象学报, 78(4):
313 679-690. Liu Z D, Wang H, Shen X Y, et al, 2020. Multiple regression analysis of winter visibility, PM_{2.5} concentration and
314 humidity in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding regions[J]. Acta Meteor Sin, 78(4): 679-690 (in Chinese).
- 315 祁海霞, 崔春光, 赵天良, 等, 2019. 2015 年冬季湖北省 PM_{2.5} 重污染传输特征及影响天气系统的数值模拟[J]. 气象, 45(8):
316 1113-1122. Qi H X, Cui C G, Zhao T L, et al, 2019. Numerical simulation on the characteristics of PM_{2.5} heavy pollution and the
317 influence of weather system in Hubei Province in winter 2015[J]. Meteor Mon, 45(8): 1113-1122 (in Chinese).
- 318 秦卓凡, 廖宏, 陈磊, 等, 2021. 汾渭平原空气质量及气象要素对其日变化和年际变化的影响[J]. 大气科学, 45(6): 1273-1291. Qin
319 Z F, Liao H, Chen L, et al, 2021. Fenwei plain air quality and the dominant meteorological parameters for its daily and interannual
320 variations[J]. Chin J Atmos Sci, 45(6): 1273-1291 (in Chinese).
- 321 宋佳琨, 陈耀登, 陈丹, 2021. 气象-气溶胶资料联合同化对秋季 PM_{2.5} 浓度模拟的影响研究[J]. 气象学报, 79 (3) : 477-491.
322 Song J K, Chen Y D, Chen D, 2021. A study of meteorology-aerosol joint data assimilation on autumn PM_{2.5} concentration
323 simulation[J]. Acta Meteor Sin, 79(3): 477-491 (in Chinese).
- 324 王芃, 朱盛强, 张梦媛, 等, 2022. 大气氧化性及其对二次污染物形成的贡献[J]. 科学通报, 67(18): 2069-2078. Wang P, Zhu S Q,
325 Zhang M Y, et al, 2022. Atmospheric oxidation capacity and its contribution to secondary pollutants formation[J]. Chin Sci Bull,
326 67(18): 2069-2078 (in Chinese).
- 327 王坛涛, 张强, 温肖宇, 等, 2022. 运城市 PM_{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析[J]. 环境科学, 43(1): 74-84. Wang Y T, Zhang Q,
328 Wen X Y, et al, 2022. Spatiotemporal distribution and seasonal characteristics of regional transport of PM_{2.5} in Yuncheng City[J].
329 Environ Sci, 43(1): 74-84 (in Chinese).
- 330 肖致美, 李源, 孔君, 等, 2022. 天津市 PM_{2.5}-O₃ 复合污染特征及气象影响分析[J]. 环境科学, 43(6): 2928-2936. Xiao Z M, Li Y,
331 Kong J, et al, 2022. Characteristics and meteorological factors of PM_{2.5}-O₃ compound pollution in Tianjin[J]. Environ Sci, 43(6):
332 2928-2936 (in Chinese).
- 333 解淑艳, 霍晓芹, 曾凡刚, 等, 2021. 2015—2019 年汾渭平原臭氧污染状况分析[J]. 中国环境监测, 37(1): 49-57. Xie S Y, Huo X Q,
334 Zeng F G, et al, 2021. Analysis of ozone pollution in Fenwei Plain from 2015 to 2019[J]. Environ Monit China, 37(1): 49-57 (in
335 Chinese).
- 336 闫小利, 叶东, 牛广山, 等, 2021. 2017 年冬焦作市一次持续严重污染天气过程分析[J]. 气象与环境科学, 44(4): 33-42. Yan X L, Ye
337 D, Niu G S, et al, 2021. Analysis of a continuous heavy pollution weather process in Jiaozuo City in winter 2017[J]. Meteor Environ
338 Sci, 44(4): 33-42 (in Chinese).

- 339 杨乐超, 董雪丽, 徐波, 2018. 汾渭平原雾霾时空变化特征及其溢出效应[J]. 环境经济研究, 3(3): 75-87. Yang L C, Dong X L, Xu B,
340 2018. Spatial distribution and spillover effects of haze pollution in the Fen-Wei plain[J]. J Environ Econ, 3(3): 75-87 (in Chinese).
- 341 杨颖川, 叶倩, 魏颖, 等, 2022. 内蒙古呼包鄂区域冬季大气细颗粒物污染成因解析[J]. 大气科学, 46(6): 1332-1348. Yang Y C, Ye
342 Q, Wei Y, et al, 2022. Analysis of the causes of atmospheric fine particle pollution in winter in the Hohhot-Baotou-Ordos area of
343 Inner Mongolia[J]. Chin J Atmos Sci, 46(6): 1332-1348 (in Chinese).
- 344 杨镇江, 李柯, 廖宏, 等, 2023. 2022年夏季历史极端高温下我国近地表臭氧污染及气象成因分析[J]. 大气科学. Yang Z J, Li K,
345 Liao H, et al, 2023. Analysis of surface ozone pollution in China amid the record summertime extreme heat of 2022[J]. Chin J
346 Atmos Sci, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2302.22211 (in Chinese). (未找到本条文献卷期, 页码信息, 请确认)
- 347 张琴, 姚秀萍, 2021. 鲁中地区霾期间气溶胶的垂直分布及其与气象条件的关系[J]. 气象, 47(9): 1099-1112. Zhang Q, Yao X P,
348 2021. Vertical distribution of aerosol and its relationship with meteorological conditions during haze in central part of Shandong
349 Province[J]. Meteor Mon, 47(9): 1099-1112 (in Chinese).
- 350 张远远, 戴维, 华楠, 等, 2022. 基于不同周期 PM_{2.5} 组成高时间分辨观测的 PMF 源解析研究[J]. 环境科学学报, 42(2): 308-317.
351 Zhang Y Y, Dai W, Hua N, et al, 2022. PMF source apportionment based on high time-resolved measurements of PM_{2.5} components
352 during different observation periods[J]. Acta Sci Circumstantiae, 42(2): 308-317 (in Chinese).
- 353 郑小华, 李明星, 娄盼星, 2021. 不同时间尺度下汾渭平原臭氧浓度变化及气象环境影响[J]. 高原气象, 40(4): 954-964. Zheng X H,
354 Li M X, Lou P X, 2021. Different-scale changes in ozone concentration and meteorological environment in Fenwei Plain[J]. Plateau
355 Meteor, 40(4): 954-964 (in Chinese).
- 356 中华人民共和国生态环境部, 2022. 2021中国生态环境状况公报[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部. Ministry of Ecology and
357 Environment of the People's Republic of China, 2022. 2021 State of China's ecological environment bulletin[R]. Beijing: Ministry of
358 Ecology and Environment of the People's Republic of China (in Chinese). (未找到本条文献英文翻译信息, 请确认)
- 359 朱彤, 万薇, 刘俊, 等, 2022. 世界卫生组织《全球空气质量指南》修订解读[J]. 科学通报, 67(8): 697-706. Zhu T, Wan W, Liu J, et al,
360 2022. Insights into the new WHO global air quality guidelines[J]. Chin Sci Bull, 67(8): 697-706 (in Chinese).
- 361 Anenberg S C, Horowitz L W, Tong D Q, et al, 2010. An estimate of the global burden of anthropogenic ozone and fine particulate matter
362 on premature human mortality using atmospheric modeling[J]. Environ Health Perspect, 118(9): 1189-1195.
- 363 Chen L, Zhu J, Liao H, et al, 2020. Meteorological influences on PM_{2.5} and O₃ trends and associated health burden since China's clean air
364 actions[J]. Sci Total Environ, 744: 140837.
- 365 Dai H B, Zhu J, Liao H, et al, 2021. Co-occurrence of ozone and PM_{2.5} pollution in the Yangtze River Delta over 2013–2019:
366 spatiotemporal distribution and meteorological conditions[J]. Atmos Res, 249: 105363.
- 367 Dao X, Ji D S, Zhang X, et al, 2021. Characteristics, sources and health risk assessment of PM_{2.5} in China's coal and coking heartland:
368 insights gained from the regional observations during the heating season[J]. Atmos Pollutn Res, 12(12): 101237.
- 369 Ding A J, Fu C B, Yang X Q, et al, 2013. Ozone and fine particle in the western Yangtze River Delta: an overview of 1 yr data at the
370 SORPES station[J]. Atmos Chem Phys, 13(11): 5813-5830.
- 371 Feng S L, Gao D, Liao F, et al, 2016. The health effects of ambient PM_{2.5} and potential mechanisms[J]. Ecotoxicol Environ Saf, 128:
372 67-74.
- 373 Feng Y Y, Ning M, Lei Y, et al, 2019. Defending blue sky in China: effectiveness of the “air pollution prevention and control action plan”
374 on air quality improvements from 2013 to 2017[J]. J Environ Manage, 252: 109603.
- 375 He Y P, Li L, Wang H L, et al, 2022. A cold front induced co-occurrence of O₃ and PM_{2.5} pollution in a Pearl River Delta city: temporal
376 variation, vertical structure, and mechanism[J]. Environ Pollut, 306: 119464.
- 377 Huth R, Beck C, Philipp A, et al, 2008. Classifications of atmospheric circulation patterns: recent advances and applications[J]. Ann NY
378 Acad Sci, 1146(1): 105-152.
- 379 Jiang Z J, Li J, Lu X, et al, 2021. Impact of western Pacific subtropical high on ozone pollution over eastern China[J]. Atmos Chem Phys,
380 21(4): 2601-2613.
- 381 Li M M, Wang T J, Xie M, et al, 2018. Agricultural fire impacts on ozone photochemistry over the Yangtze River Delta region, East
382 China[J]. J Geophys Res Atmos, 123(12): 6605-6623.

- 383 Lu X, Zhang L, Chen Y F, et al, 2019. Exploring 2016–2017 surface ozone pollution over China: source contributions and meteorological
384 influences[J]. *Atmos Chem Phys*, 19(12): 8339-8361.
- 385 Luo Y H, Zhao T L, Yang Y J, et al, 2022. Seasonal changes in the recent decline of combined high PM_{2.5} and O₃ pollution and associated
386 chemical and meteorological drivers in the Beijing–Tianjin–Hebei region, China[J]. *Sci Total Environ*, 838: 156312.
- 387 Menon S, Unger N, Koch D, et al, 2008. Aerosol climate effects and air quality impacts from 1980 to 2030[J]. *Environ Res Lett*, 3(2):
388 024004.
- 389 Miao Y C, Guo J P, Liu S H, et al, 2018. Impacts of synoptic condition and planetary boundary layer structure on the trans-boundary
390 aerosol transport from Beijing-Tianjin-Hebei region to northeast China[J]. *Atmos Environ*, 181: 1-11.
- 391 Ning G C, Yim S H L, Wang S G, et al, 2019. Synergistic effects of synoptic weather patterns and topography on air quality: a case of the
392 Sichuan Basin of China[J]. *Climate Dyn*, 53(11): 6729-6744.
- 393 Ou S J, Wei W, Cai B, et al, 2022. Exploring the causes for co-pollution of O₃ and PM_{2.5} in summer over North China[J]. *Environ Monit
394 Assess*, 194(4): 1-14.
- 395 Schnell J L, Prather M J, 2017. Co-occurrence of extremes in surface ozone, particulate matter, and temperature over eastern north
396 America[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 114(11): 2854-2859.
- 397 Tai A P K, Mickley L J, Jacob D J, 2010. Correlations between fine particulate matter (PM_{2.5}) and meteorological variables in the United
398 States: implications for the sensitivity of PM_{2.5} to climate change[J]. *Atmos Environ*, 44(32): 3976-3984.
- 399 Unger N, Menon S, Koch D M, et al, 2009. Impacts of aerosol-cloud interactions on past and future changes in tropospheric
400 composition[J]. *Atmos Chem Phys*, 9(12): 4115-4129.
- 401 Wang D F, Zhou B, Fu Q Y, et al, 2016. Intense secondary aerosol formation due to strong atmospheric photochemical reactions in
402 summer: observations at a rural site in eastern Yangtze River Delta of China[J]. *Sci Total Environ*, 571: 1454-1466.
- 403 Wang G, Zhu Z Y, Zhao N, et al, 2021. Variations in characteristics and transport pathways of PM_{2.5} during heavy pollution episodes in
404 2013–2019 in Jinan, a central city in the North China Plain[J]. *Environ Pollut*, 284: 117450.
- 405 Wang X Y, Dickinson R E, Su L Y, et al, 2018. PM_{2.5} pollution in China and how it has been exacerbated by terrain and meteorological
406 conditions[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 99(1): 105-119.
- 407 Xu Y L, Xue W B, Lei Y, et al, 2018. Impact of meteorological conditions on PM_{2.5} pollution in China during winter[J]. *Atmosphere*,
408 9(11): 429.
- 409 Yang K J, Kong L D, Tong S Y, et al, 2021. Double high-level ozone and PM_{2.5} co-pollution episodes in Shanghai, China: pollution
410 characteristics and significant role of daytime HONO[J]. *Atmosphere*, 12(5): 557.
- 411 Ye X X, Song Y, Cai X H, et al, 2016. Study on the synoptic flow patterns and boundary layer process of the severe haze events over the
412 North China Plain in January 2013[J]. *Atmos Environ*, 124: 129-145.
- 413 Zhang N N, Ma F, Qin C B, et al, 2018a. Spatiotemporal trends in PM_{2.5} levels from 2013 to 2017 and regional demarcations for joint
414 prevention and control of atmospheric pollution in China[J]. *Chemosphere*, 210: 1176-1184.
- 415 Zhang Q Q, Ma Q, Zhao B, et al, 2018b. Winter haze over North China Plain from 2009 to 2016: influence of emission and
416 meteorology[J]. *Environ Pollut*, 242: 1308-1318.
- 417 Zhang X X, Cheng C X, Zhao H, 2022. A health impact and economic loss assessment of O₃ and PM_{2.5} exposure in China from 2015 to
418 2020[J]. *GeoHealth*, 6(3): e2021GH000531.
- 419 Zhang Y H, Hu M, Zhong L J, et al, 2008. Regional integrated experiments on air quality over Pearl River Delta 2004 (PRIDE-PRD2004):
420 overview[J]. *Atmos Environ*, 42(25): 6157-6173.
- 421
- 422
- 423
- 424

425

426

427

428

429 **Study on Characteristics of PM_{2.5}-O₃ combined pollution and**
430 **meteorological impact in Fenwei Plain**

431

432 ZHOU Tao¹, ZHOU Qing^{2*}, Zhang Yong³, WU Yushu⁴, SUN Jian⁵

433

434 (1.Yuncheng Meteorological Bureau, Yuncheng 044000, China;2.Meteorological Detection Center, China Meteorological
435 Administration, Beijing 100081; 3.Institute of Meteorological Development and Planning, China Meteorological Administration,
436 Beijing 100081; 4.Wulanchabu Meteorological Bureau, Wulanchabu 012000; 5.Juxian Meteorological Bureau, Juxian 276500)

437

438 **Abstract:** PM_{2.5} and O₃ which interact with each other have become the most important pollutants
439 in the cities of FenWei Plain. The pollution often occurs simultaneously in the warm season and is
440 closely related to meteorological conditions. Based on the daily PM_{2.5} and O₃ concentration data,
441 ground meteorological observation data and ERA5 high-altitude re-analysis data of 12 cities in the
442 FenWei Plain from 2015 to 2021, the spatio-temporal characteristics of PM_{2.5} and O₃ in the
443 FenWei Plain, as well as the relationship between PM_{2.5} and O₃ when combined pollution occurs
444 were analyzed, and the impact of local meteorological conditions and synoptic situation on
445 combined pollution is also studied in this paper. The result shows that the average annual PM_{2.5}
446 and MDA8 O₃ (maximum daily 8-h average ozone) concentrations in the FenWei Plain began to
447 decline continuously in 2017 and 2018, respectively, and the number of compound pollution days
448 also began to decline continuously after 2019, due to the implementation of "collaborative
449 pollution control" and "one city, one policy"; combined pollution mainly occurs in
450 March-September, frequently in the eastern cities of the FenWei Plain , and mostly in condition of
451 high temperature and low humidity; Finally, the synoptic circulation situation of combined
452 pollution is divided into four types by principal component analysis in the T-mode (T-PCA
453 algorithm), featured by northwest or the westerly air flow in high-altitude and the warm zone
454 southerly wind or breeze in low layer. The results of the study provide the basis for controlling
455 pollution in the FenWei Plain and are of great significance for cooperative governance for PM_{2.5}
456 and O₃ pollution especially.

457 **Key words:** FenWei Plain, PM_{2.5} and O₃ combined pollution, T-PCA typing, meteorologica
458 l impact

459

460